Zeitschrift: Jahresbericht der Naturforschenden Gesellschaft Graubünden

Herausgeber: Naturforschende Gesellschaft Graubünden

Band: 101 (1983-1984)

Artikel: 60 Jahre geophysikalische Arbeiten in Chur : eine wissenschafts-geschichtliche Studie

Autor: Florin, Reto

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-594503

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: 25.12.2025

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

Jber. Natf. Ges. Graubünden 101 (1984), 31–52

60 Jahre geophysikalische Arbeiten in Chur

Eine wissenschafts-geschichtliche Studie

Von Reto Florin, Chur

Anschrift des Verfassers:

Prof. R. Florin
Jochstrasse 31
7000 Chur

Inhaltsübersicht

Im Kapitel «Die Churer Seismographen» erzähle ich zuerst die Geschichte der Erdbebenwarte Chur und ihres grossen Dreizehn-Tonnen-Seismographen und befasse mich dann mit dem kleinen, tausendmal leichteren Seismographen, den Professor Kreis in der Werkstatt der Kantonsschule gebaut hat.

In den nächsten zwei Kapiteln ist von den Messungen die Rede, die wir – jeweils während der Kantonsschulferien und gelegentlich an Wochenenden – mit dem Gletscherseismographen und nach 1949 auch mit elektrischen Seismographen gemacht haben. Es handelt sich um wissenschaftliche Studien, wie sie damals in der Schweiz nur von Chur aus betrieben werden konnten, und auch um geotechnische Expertisen, wie sie später von spezialisierten Ingenieurbüros gemacht wurden.

In den zwei letzten Kapiteln geht es um die Schwere: Die mit den Gezeiten der festen Erde verknüpften Schwereänderungen haben ich noch selber gemessen, allerdings mit einer fremden Apparatur; die wichtigen absoluten Schweremessungen dagegen wurden von italienischen Spezialisten mit einem hochempfindlichen Gravimeter ausgeführt.

Erde, Wasser, Luft, Feuer

So hiessen die vier Elemente der Antike, und so heissen auch die grossen Themen der Geophysik unserer Tage. Denn Geophysiker erforschen nicht nur die «Erd»-Kugel selbst: ihren heissen Kern, den mächtigen Mantel und die dünne Kruste, sie befassen sich auch mit ihrer «Wasser»-Hülle und mit der alles umfangenden «Luft»-Hülle: mit den Gezeiten der Meere also und mit dem Eis der Gletscher, mit Wind und Wetter, mit den Farben des Regenbogens, mit gespenstischen Polarlichtern und mit vielen anderen Phänomenen. Das «Feuer» schliesslich ist uns Sinnbild für eine alles bewegende, allgegenwärtige Energie.

Auf den folgenden Seiten ist nur von den geophysikalischen Untersuchungen (ohne die mannigfaltigen Arbeiten rund um die Wetterwarte) die Rede, die etwas mit der *Kantonsschule in Chur* zu tun haben und die in den sechs Jahrzehnten seit der Gründung der Erdbebenwarte im Jahre 1915 bis hin zu den Messungen der Schwere im Jahre 1978 gemacht wurden.

Erdbeben, Gletscher, Ebbe und Flut der festen Erde, Schweremessungen, seismische Sondierungen und Erschütterungsmessungen, das waren unsere Themen; und es handelt sich um Untersuchungen, deren

Ergebnisse in vielen einzelnen wissenschaftlichen Publikationen oder in verstreuten technischen Gutachten zu finden sind, die aber bisher nirgends in zusammenhängender Weise dargestellt wurden.

So ist es denn an der Zeit, einen allgemein verständlichen historischen Überblick über diese Arbeiten – an denen der Verfasser beteiligt war – zu geben. Ich befasse mich aber nicht mit den Ergebnissen der Arbeiten, sondern mit den Arbeiten selbst – mit Apparaten, Messverfahren, geophysikalischen Überlegungen –, und es liegt mir daran, den Text mit dokumentarisch wertvollen Bildern zu illustrieren. Als Schüler, Mitarbeiter und Nachfolger von Professor Dr. h. c. ALFRED KREIS (1885–1964) möchte ich diesen Bericht auch als Würdigung des Werkes meines verehrten Lehrers schreiben.

Die Churer Seismographen

Im Jahre 1915 gegründet und 1970 abgebrochen, hat die Erdbebenwarte Chur lange Jahre zu den bekanntesten europäischen Warten gehört. Und der 1935 von Professor Kreis in der Werkstatt der Kantonsschule gebaute sogenannte Gletscherseismograph war in den dreissiger und vierziger Jahren wohl der beste tragbare Seismograph in unserem Lande.

Ich erzähle in diesem Kapitel die Geschichte der Erdbebenwarte, bitte meine Leser, zwei schöne Seismogramme miteinander zu vergleichen, und beschreibe die Churer Seismographen und ihre Arbeitsweise.

1. Erdbebeninstrumente

Acht Drachen halten je eine kleine Kugel ganz lose im Rachen; unter jedem Drachen sitzt ein Frosch mit weit offenem Maul auf einer der acht Linien der Windrose. Wenn eine der kleinen Kugeln dieses chinesischen Instrumentes aus dem Jahr 136 n. Chr. in ein Froschmaul fiel, hatte die Erde irgendwo gebebt und die Kugel zeigte die Richtung an, aus der die Erdbebenwelle herangekommen war.

Anderthalb Jahrtausende später dienten Gefässe, die bis zum Rand mit Quecksilber gefüllt waren, Körper, die beim leisesten Stoss umfielen, oder allerlei Pendel als *«Erdbebenanzeiger»* (Seismoskope). Und am 1. November 1755 haben die Kronleuchter in den Kirchen in ganz Europa Kunde gegeben von der Erdbebenkatastrophe in Lissabon: Unheimlich, wie von unsichtbarer Hand angestossen, fingen sie plötzlich an hin und her zu schwingen.

In der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts wurden die ersten *«Erdbebenaufzeichner»* (Seismographen) gebaut, Instrumente also, die nicht nur auf einen ersten Stoss reagieren, sondern die *ganze Bewegung des Bodens aufzeichnen.*

Und in der Schweiz? Der erste Seismograph in unserem Lande stand in Graubünden: von 1907 bis 1915 in Davos und nachher in Chur. Die erste Erdbebenwarte wurde 1911 in Zürich eingerichtet; und 1924 stellte A. de Quervain erstmals transportable Seismographen im Herdgebiet eines Bebens (in Visp) auf.

2. Die Geschichte der Erdbebenwarte Chur

Der Seismograph, den der deutsche Physiker Dr. Dietz 1907 in Davos aufgestellt hatte, war ein kleines Horizontalpendel System Bosch-Omori mit einer *Pendelmasse von 100 kg,* das die Bodenerschütterungen *95fach vergrössert* auf Russpapier aufzeichnete. Im Jahr 1915 wird der Seismograph nach Chur gebracht, und Professor Kreis ist sofort bereit, ihn im Physikgebäude der Kantonsschule aufzustellen und Tag für Tag zu bedienen.

Es zeigt sich bald, dass der Aufstellungsort sehr gut ist, einmal, weil Chur am Fusse der Alpen liegt, dann aber auch weil der Seismograph direkt auf hartem Felsuntergrund (Bündnerschiefer der penninischen Dekke) steht, weitab vom starken Strassenverkehr. Es zeigt sich aber auch, dass der Apparat etwa *zehnmal* zu wenig empfindlich ist, und das heisst mindestens *hundertmal* zu leicht! Eisen ist aber mitten im Krieg so teuer, dass man an ein 10 000 kg schweres Pendel kaum zu denken wagt.

Nach dem Krieg wird der Bau eines grossen Seismographen System de Quervain-Piccard in Angriff genommen (Abb. 1 und 2). Der mächtige Würfel wiegt gute 13 Tonnen und besteht aus 500 mit Mörtel gefügten Blöcken: aus Eisenquadern, welche für die Herstellung von Granaten gegossen worden waren! Eingeritzt sind die Worte «. . . sie werden ihre Schwerter zu Pflugscharen schmieden und ihre Spiesse zu Rebmessern».

Im Jahr 1927 ist es soweit, der neue Seismograph, den Professor Kreis zusammen mit dem Schweizerischen Erdbebendienst gebaut hat, zeichnet die Bodenbewegung zweitausendfach vergrössert auf.

«Viel zu empfindlich ist dieser Apparat!» meinten wir Schüler. Denn als wir einmal behaupteten, lange und vergeblich vor der geschlossenen Türe des Physikzimmers gewartet zu haben, sagte uns Professor Kreis

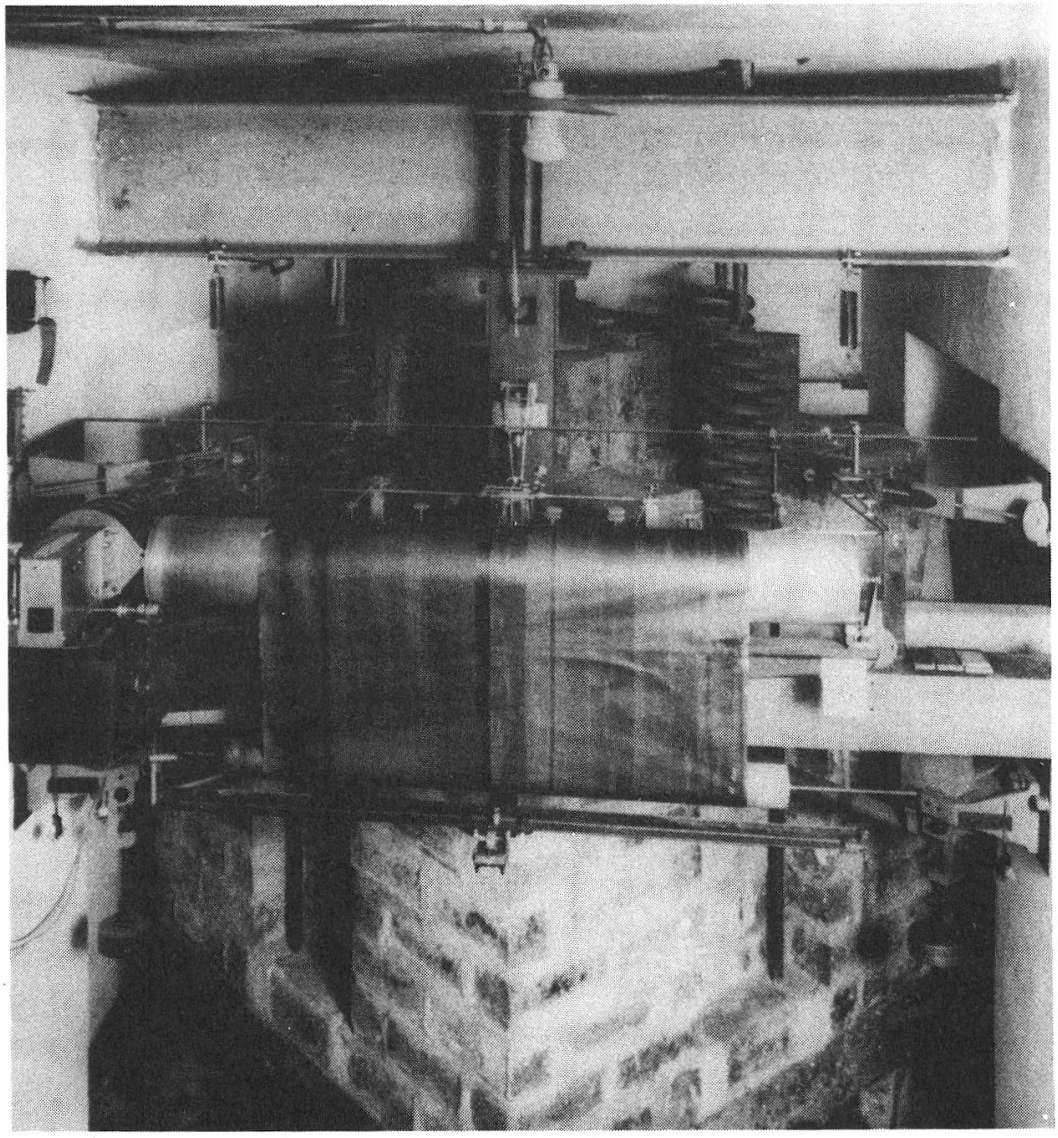


Abb. 1
Der Dreikomponenten-Seismograph de Quervain-Piccard der Erdbebenwarte Chur.
Oben: Neben den Federn stehen einige Eisenquader.
Mitte: Berusster Bogen mit Registrierlinien der West-Ost-Komponente, der Vertikalkomponente und der N-S-Komponente der Bodenbewegung.
Unten: 13 Tonnen Block. (Foto: Reinhardt, Chur)

einfach: «Der Seismograph hätte euer Kommen und Gehen deutlich aufgezeichnet, auch wenn die Erschütterung des Gebäudes nicht grösser gewesen wäre als ein zehntausendstel Millimeter».

Nein, zu empfindlich ist der neue Seismograph nicht, aber er sollte Erdbeben registrieren und nicht alle möglichen Erschütterungen des Gebäudes aufzeichnen. Was ist da zu tun? Der Seismograph muss in einem

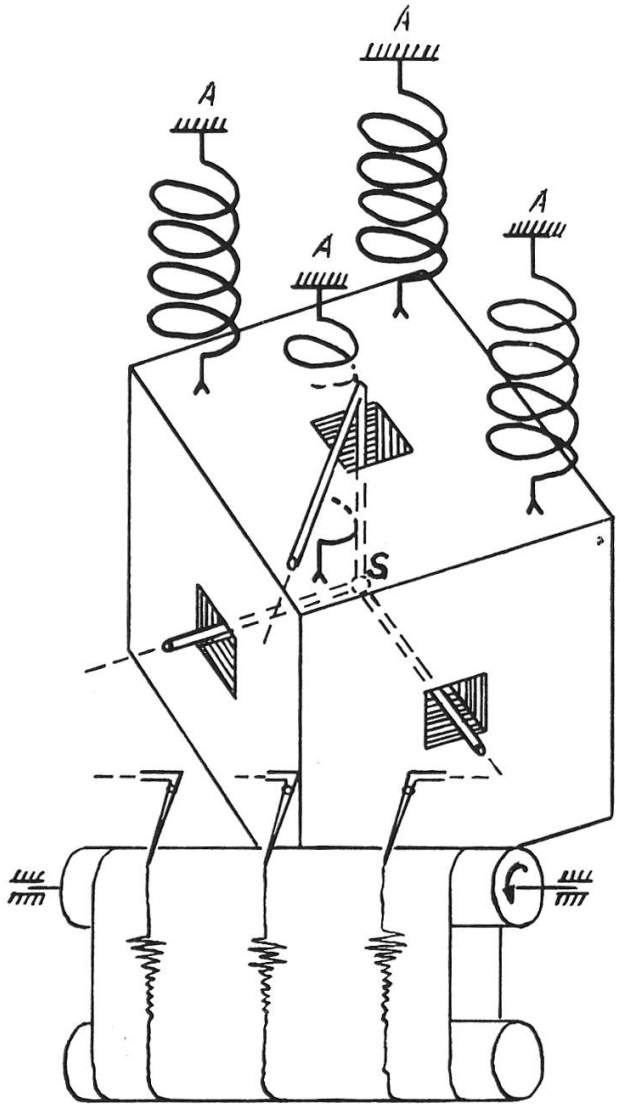


Abb. 2 Schematische Darstellung eines Dreikomponenten-Seismographen für Russregistrierung. Die Stangen und Hebel, welche die Relativbewegung Umgebung A – Block S auf die Zeiger übertragen, sind nur angedeutet.

tieferen Keller neu aufgebaut werden, und zwar so, dass die tragenden Pfeiler die Erschütterungen der Hausmauern nicht mehr aufnehmen und weiterleiten können. Das ist leichter gesagt als getan! Im Laufe der Jahre wurden dann weitere Verbesserungsarbeiten – Astasierung, Temperaturkompensation, Zeitdienst – ausgeführt, die sich nicht mit zwei Worten beschreiben lassen. Sagen wir nur, dass Churer Seismogramme, die sich sehr genau auswerten lassen, von Erdbebenwarten in der ganzen Welt verlangt wurden.

Wir haben alle paar Tage ein Erdbeben registriert, dessen Herd in der Schweiz lag oder in Italien, in Japan, in Amerika oder anderswo, oft in grosser Tiefe unter der Erdoberfläche. Der Schweizerische Erdbebendienst in Zürich bewahrt nun einige tausend dieser grossen schwarzen Bögen (90x70 cm) mit feinen weissen Registrierlinien sorgfältig auf.

Am 26. Juni 1970 ist es mir nicht leicht gefallen, den *letzten berussten Bogen* aufzulegen, doch der Seismograph musste abgebrochen werden, um dem neuen Schulhaus Platz zu machen. Es wäre verlorene Mühe gewesen, ihn im Zeitalter der elektronischen Verstärkung und der Magnetbandregistrierung wieder aufbauen zu wollen. Der grosse Churer Seimograph mag nun im Technorama in Winterthur an vergangene Zeiten erinnern.

3. Arbeitsweise eines Dreikomponenten-Seismographen

Erste erstaunte Frage der Besucher unserer Erdbebenwarte: «Der Block wiegt volle 13 Tonnen! Muss er wirklich so schwer sein?»

Wozu dient der Block? Der *Block* hat, überspitzt gesagt, weiter nichts zu tun als in *Ruhe zu bleiben,* auch wenn alles um ihn herum schaukelt und zittert. Stangen und Hebel (Abb. 2) und drei lange, leichte Zeiger – beim Churer Seismographen Strohhalme mit einer feinen Stahlspitze – bringen die Bewegung der Umgebung des Blockes zu Papier: stark vergrössert und in die drei Komponenten zerlegt. Das ist alles; doch so schwer es uns fällt, mitten im Strome der Ereignisse Ruhe zu bewahren, so schwierig ist es, einen Block so aufzuhängen, dass er an der Bewegung der Umgebung nicht teilnimmt! Nein, das ist gar nicht möglich, man kann ihm das Mitmachen nur erschweren, die *Schwingungen dämpfen.*

Warum muss der Block so schwer sein? Bei der *Russregistrierung* erfahren die Zeigerspitzen auf dem Papier *Reibungskräfte,* die via Stangen und Hebel den Block zu bewegen versuchen. Je stärker die Vergrösserung ist und je grösser die Registriergeschwindigkeit, desto gefährlicher ist ihre Wirkung. Nur wenn der Block sehr schwer ist, können ihm diese Kräfte wenig oder nichts anhaben.

Und wenn man diese Kräfte kleiner machte? Ja, bei der *fotografischen Registrierung* schreiben Lichtstrahlen *ohne jede Reibung* auf Fotopapier. Der Block braucht nicht schwer zu sein; ohne Block, ohne «ruhenden Punkt» geht es allerdings auch hier nicht.

Wieso haben wir in der Erdbebenwarte nicht auf Fotopapier registriert? Der Seismograph arbeitete jahraus, jahrein und brauchte jeden Tag einen neuen grossen Bogen. Berusstes Papier kostete nicht viel, Fotopapier dagegen wäre für eine Dauerregistrierung viel zu teuer gewesen.

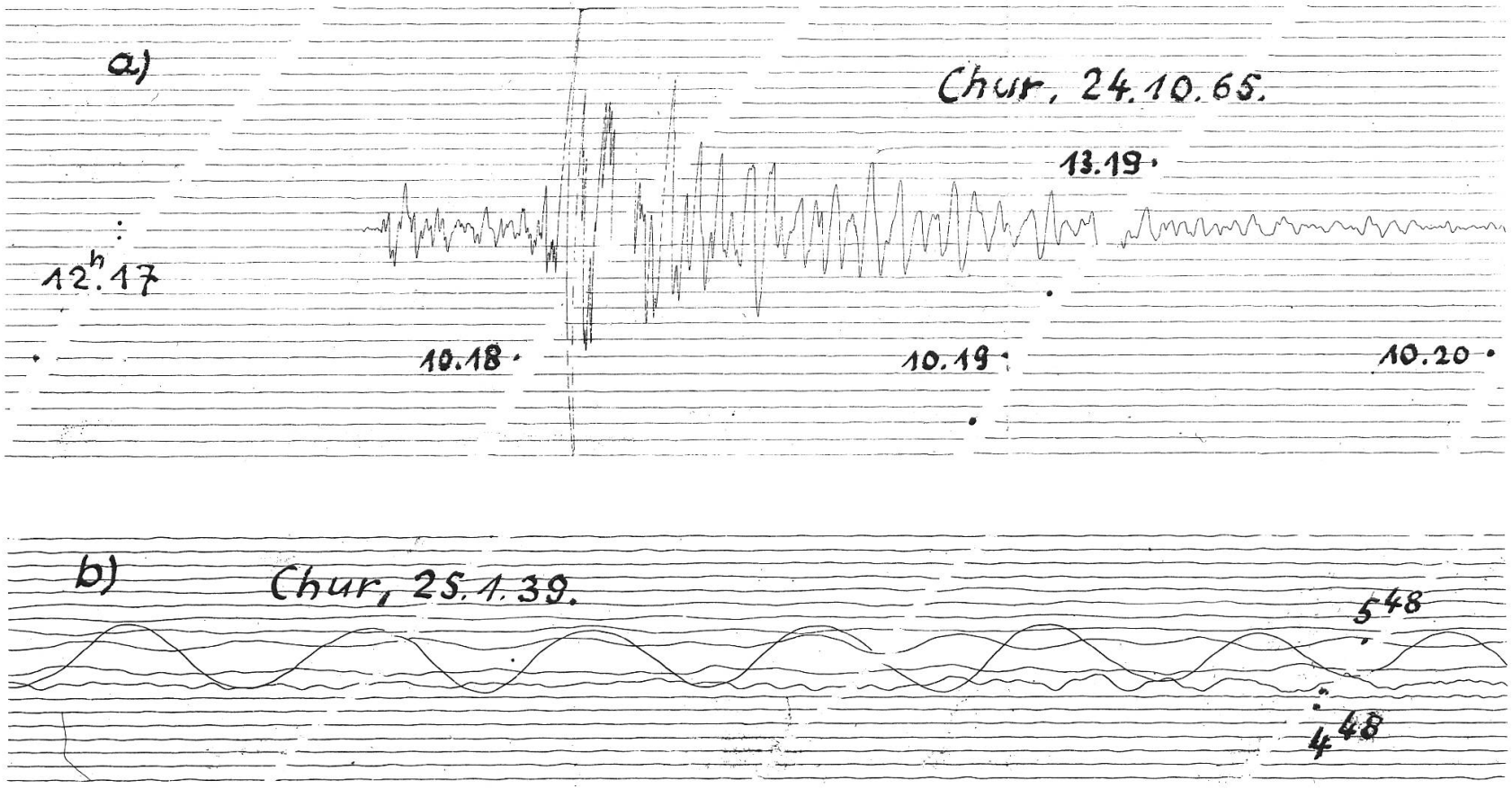


Abb. 3 Seismogramm-Ausschnitte, im Original weisse Linien auf schwarzem Grund; im Verhältnis 100:94 verkleinert. Registriergeschwindigkeit 6 cm/min. Nord-Süd-Komponente (N28°E) der Bodenbewegung in 1300facher Vergrösserung:
a) Nahbeben (Wallis): Rasches Zittern, beginnt in Chur um 12h 17m 28,4s und dauert etwa 3 Minuten.
b) Fernbeben (Chile): Vorwiegend langsames Schaukeln, beginnt in Chur um 4h 48m und dauert mehr als 1 1/2 Stunden.

4. Zwei Seismogramme der Erdbebenwarte Chur

Warum macht man sich so viel Mühe mit der Aufzeichnung von Erdbeben? Weil Erdbebenwellen die Röntgenstrahlen der Geophysiker sind und Seismogramme ihre Röntgenaufnahmen. Ein Erdbebenherd ist, um in diesem Bild zu bleiben, ein ungemein komplizierter Röntgenapparat – von dem niemand genau weiss, wann er eingeschaltet wird.

Die auffallenden *Unterschiede* zwischen dem Seismogramm (Abb. 3) eines Nahbebens, Herdentfernung von Chur *180 km,* und der Aufzeichnung eines Fernbebens, Herdentfernung *12 300 km,* hängen offensichtlich mit der *Länge* und der *Beschaffenheit* der Wege zusammen, welche die Wellen im *Innern der Erde* durchliefen. Die geologischen Vorgänge, welche die Wellen erzeugten – Teile der überbeanspruchten Erdkruste haben bei einem plötzlichen Ruck oder Bruch eine neue Gleichgewichtslage aufgesucht – dauerten bei beiden (tektonischen) Beben etwa gleich lange, nämlich wenige Sekunden. Die Registrierung hingegen dauert im ersten Fall etwa 3 Minuten, im anderen Fall ungefähr 1½ Stunden. So geben denn gute Seismogramme vielfältige Auskunft über Strukturen und über geodynamische Vorgänge im *Innern der Erde.*

Hin und wieder wird ein sehr starkes Beben wiederholt aufgezeichnet, und zwar durch Wellen, welche mehrmals rund um die Erde laufen. Diese langen Oberflächenwellen brauchen für eine Umkreisung gute 3 Stunden und haben also etwa hundertfache Autobahngeschwindigkeit! (ungefähr 12 700 km/h = 3530 m/sec)

Wir werden uns in den nächsten Abschnitten mit den *Geschwindigkeiten* von Erdbebenwellen beschäftigen, und ich führe daher einige unserer Messergebnisse an:

	Geschwindigkeit der Longitudinalwellen m/sec
Wasser	1450
Eis (Gletscherzungen)	3700
Humus, Lehm, Schutt	250–700
Bündner Schiefer	3700–4600
Kristalline Gesteine	4300–5800
(Lange Oberflächenwellen ca. 3500 m/sec)	

5. Der Gletscherseismograph von A. Kreis

Die Seismogramme der Erdbebenwarte Chur geben also Auskunft über die Beschaffenheit «grossräumiger» Strukturen – die Dicke der Erdkruste, die Form der Alpenwurzel – unter der Erdoberfläche.

Was für Eigenschaften muss ein Seismograph haben, mit dem man «kleinräumige» Strukturen – die Tiefe eines Gletschers, die Form eines Baugrundes – erfassen kann? Er muss die Laufzeiten der Wellen auf einige *tausendstel Sekunden* genau angeben können (im Eis entspricht 1/1000 sec bereits einer Weglänge von 3.7 m!), er muss *empfindlich* sein (auf schwache Sprengerschütterungen ansprechen) und er soll erst noch leicht, *tragbar* sein.

Professor Kreis hat 1931 einen ersten Seismographen konstruiert, der diese strengen Bedingungen erfüllt, und damit 1932 bis 1934 seismische Sondierungen im Auftrag des Eidg. Amtes für Wasserwirtschaft gemacht.

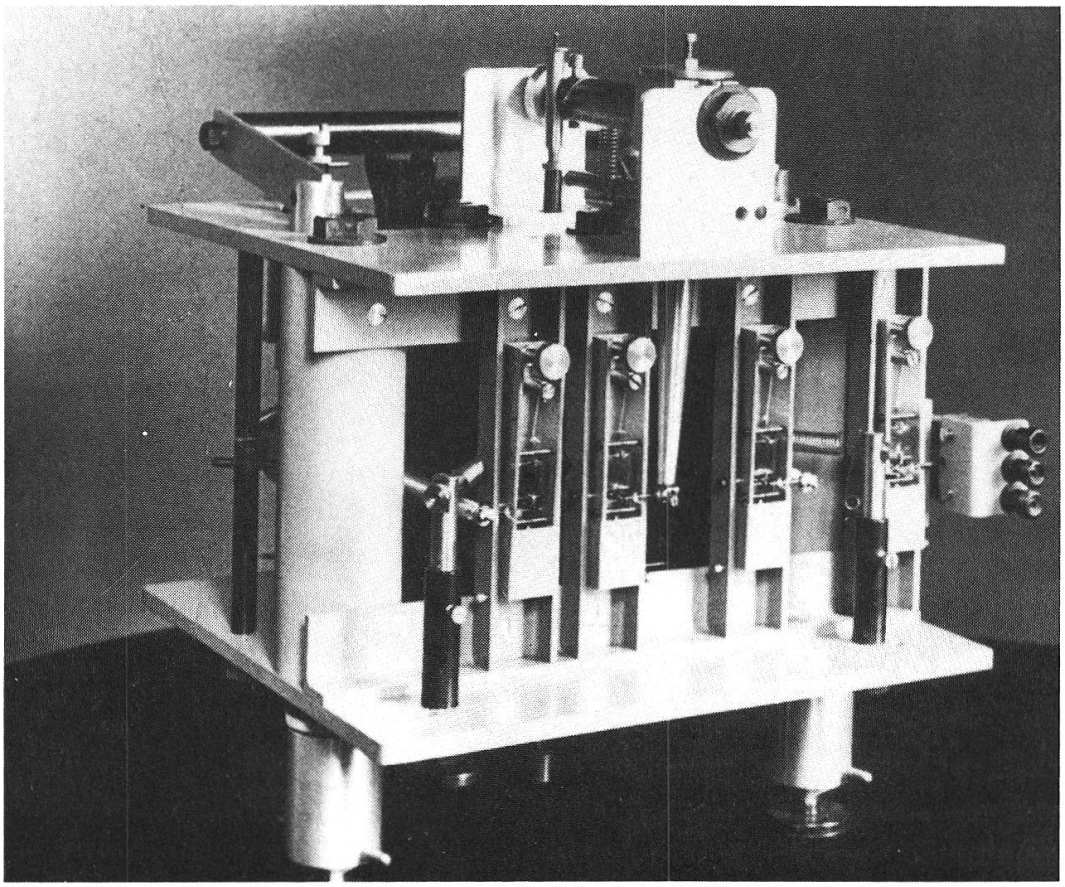


Abb. 4 Der tragbare Dreikomponenten-Seismograph von A. Kreis (Gletscherseismograph). Die vier «weissen» Gefässe über der Grundplatte enthalten Dämpfungsöl. Lichtstrahlen, die an den «schwarzen» Spiegelchen reflektiert werden, bilden die langen Zeiger des Seismographen. Rechts: Buchsen für die elektrische Übertragung des Sprengmomentes.

Abb. 5 Die seismische Apparatur von A. Kreis (im Apparate-Zelt). Rechts der Gletscherseismograph, links das Registriergerät. Hinten die Stimmgabel für die Zeitmarken, sie steuert eine Heliumröhre, die 50mal in der Sekunde aufblitzt.

Den zweiten Seismographen baute er 1935 für die Gletscherkommission der Schweizerischen Naturforschenden Gesellschaft (daher der Name «Gletscherseismograph») in der Werkstatt der Kantonsschule.

Der Gletscherseismograph (Abb. 4 und 5) hat die Pendelmasse 12 kg und ist also tausendmal leichter als der grosse Seismograph. Er vergrössert die Bodenbewegung mechanisch-optisch 30 000fach und zeichnet alle drei Komponenten auf Fotopapier auf, nicht mit Strohhalmen, sondern mit Lichtstrahlen. Die hohe Registriergeschwindigkeit von 15 cm/sec macht es möglich, in den Seismogrammen tausendstel Sekunden abzulesen.

Professor Kreis und seine Mitarbeiter (R. Florin, Chur, und A. Süsstrunk, Zürich, (auf Gletschern auch W. Jost, Bern und A. Renaud, Lausanne) haben in den Jahren 1935 bis 1948 mit der neuen Apparatur zahlreiche Messungen in der ganzen Schweiz (35 Objekte) ausgeführt: Eistiefenbestimmungen, Baugrunduntersuchungen, Geschwindigkeitsmessungen, Erschütterungsmessungen, geologische Sondierungen usw.

Die Apparatur hat sich überall ausgezeichnet bewährt. Sie wurde um 1949 durch elektrische Instrumente abgelöst.

Über diese Arbeiten berichte ich nun in den folgenden Kapiteln.

Seismische Sondierungen

Wie kann man Tiefe und Form von geologischen Strukturen bestimmen, die unter der Erdoberfläche verborgen sind?

Der Geologe macht Feldaufnahmen, es werden Sondierschächte ausgehoben, Bohrungen niedergebracht, geoelektrische Methoden eingesetzt usw.

Die ersten seismischen Messungen in der Schweiz wurden 1929 von H. Mothes auf dem Aletschgletscher ausgeführt, 1931 folgten die Arbeiten der Gletscherkommission (zusammen mit dem Geophysikalischen Institut Göttingen) auf dem Rhonegletscher. A. Kreis hat 1932 zusammen mit dem Geologen J. Cadisch mit seinem ersten Seismographen im ehemaligen Rheinlauf unterhalb der Luziensteig die Tiefe des Flussbettes gemessen und an der Flussschleife der Rheinau die Dicke der Sandstein- und Mergelschicht unter der Schotterüberlagerung ermittelt. Der Gletscherseismograph wurde erstmals 1935 eingesetzt, und zwar zur Messung von Eistiefen auf dem Rhonegletscher. (Es war die erste Sondierung, bei der ich mitgearbeitet habe.)

1. Reflexionsseismik

Es gibt zwei Methoden seismischer Sondierung (Reflexionsmethode, Refraktionsmethode). Die erste erläutere ich hier am Beispiel einer Messung der Tiefe eines Gletschers:

Eine Sprengstoffladung wird am Ort S in einem etwa 1 m tiefen Bohrloch zur Explosion gebracht und ruft Erschütterungen hervor, die sich im Eis nach allen Seiten hin ausbreiten (Abb. 6). In Abb. 7 sind die Wege jener Wellen dargestellt, die zum Seismographen im Zelt Z gelangen und dort aufgezeichnet werden:

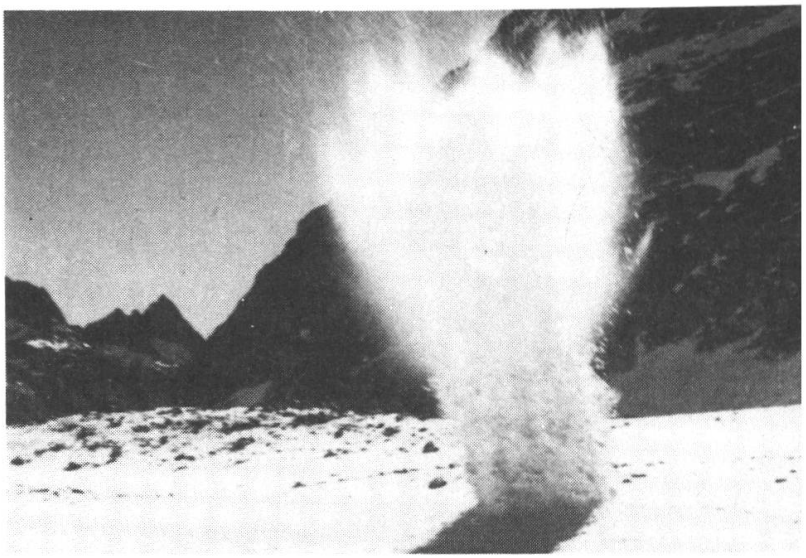
I Weg der *direkten Welle*; er verläuft ganz im Eis, seine Länge wird durch Vermessung auf dem Gletscher ermittelt.

II Weg der am Felsuntergrund *reflektierten Welle*; er verläuft ganz im Eis.

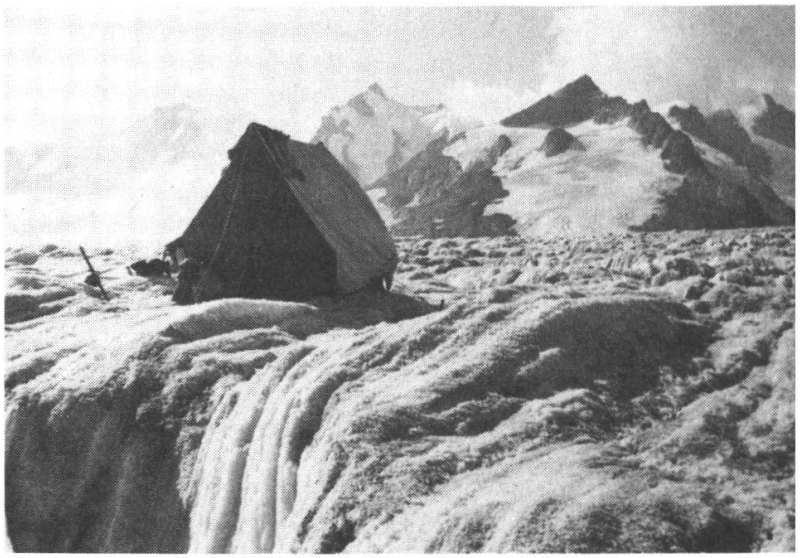
III Weg der *zweimal gebrochenen Welle*; er verläuft zum Teil im Eis, zum Teil im Felsuntergrund.

Abb. 6 Seismische Sondierung

Eine Sprengstoffladung wird vorbereitet. Die Kabel dienen der elektrischen Zündung und der Übertragung des Sprengmomentes.
Unteraargletscher 1939



Sprengung auf einem Gletscher
Unteraargletscher 1939



Apparatezelt auf dem Konkordiaplatz
Aletschgletscher 1947

Als das Zelt nach vier heissen Julitagen abgebrochen wurde, kam ein Eissockel von 40 cm Höhe zum Vorschein. Auf der ungeschützen Eisfläche sind also 10 cm Eis im Tag weggeschmolzen!
Unteraargletscher 1947

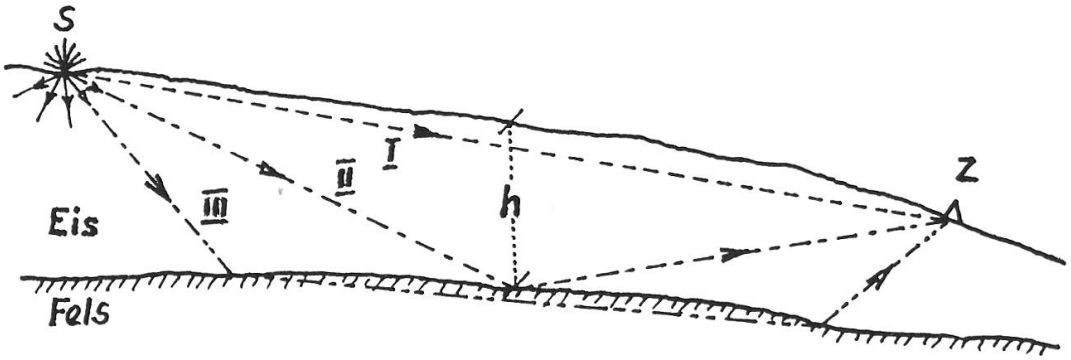


Abb. 7 Seismische Sondierung. S Sprengung, Z Apparate-Zelt, h Tiefe des Gletschers, I, II, III Wellenwege.

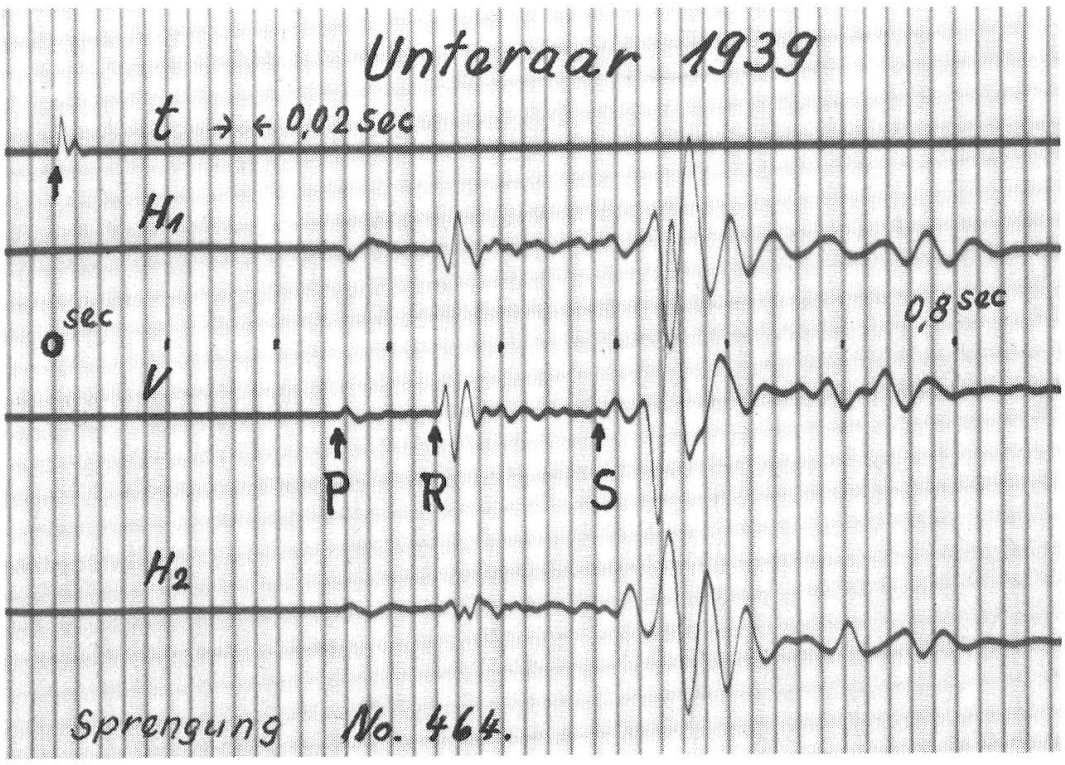


Abb. 8 Seismogramm einer Sprengung, aufgenommen mit dem Gletscherseismographen. Die vertikalen Striche stammen von den Lichtblitzen einer Heliumröhre, ihr zeitlicher Abstand beträgt 0,02 sec. H_1 und H_2 Horizontalkomponenten, V Vertikalkomponente der Bodenbewegung. Der Ausschlag auf der t-Linie gibt den Sprengmoment an: «Zeit 0».

Um die Eisdicke h berechnen zu können, braucht man neben der Länge des Weges I entweder die Länge II (Reflexionsseismik) oder die Länge III (Refraktionsseismik). Beide Längen lassen sich aus dem Seismogramm der Sprengung herauslesen.

Das Seismogramm einer *Sprengung* (Abb. 8) im Abstand 925 m vom Zelt sieht dem Seismogramm eines *Nahbebens* (Abb. 3) zum Verwechseln ähnlich – was nicht weiter erstaunlich ist! Es hat aber, was wichtig ist, eine Linie mehr: Der Ausschlag auf der t-Linie entspricht dem Sprengmoment. P zeigt die Ankunft der direkten Welle an, die also 0,25 sec unterwegs war. R ist der Einsatz der reflektierten Welle, welche für ihren Weg 0,08 sec länger brauchte. (S gibt die Ankunftszeit der transversalen Welle an, die hier für die Berechnung der Eistiefe nicht verwendet wird.) Aus diesen Daten erhält man folgende Werte: Geschwindigkeit der Longitudinalwelle im Eis 3700 m/sec, Länge des Weges II 1221 m. Die Weglängen I und II ergeben die Gletschertiefe h ca. 398 m.

2. *Gletscher*

Wie tief sind unsere Gletscher? Welche Form hat das Gletscherbett? Wie kann hartes Eis im Gletscherbett fliessen wie Wasser in einem Fluss? Mit solchen Fragen, die auch volkswirtschaftlich wichtig sind (Bauten im Hochgebirge, Stauseen, Wasserhaushalt, Gefahren vorstossender Gletscher usw.) hat sich die Gletscherkommission seit ihrer Gründung im Jahre 1895 (Gletscherkollegium 1874 bis 1895) immer wieder auseinandergesetzt. Thema dieses Abschnittes sind *Tiefe und Form des Gletscherbettes*. Zuerst beschäftigen wir uns mit einem Gletschertisch, der – so unwahrscheinlich dies auch klingen mag – etwas mit der Tiefe des Gletschers zu tun hat, auf dem er gewachsen ist.

Ein Gletschertisch auf dem Unteraargletscher

Ein eigenartiger Gletschertisch steht heute da, wo vor nicht langer Zeit eine grosse Felsplatte auf dem Gletscher lag (Abb. 9). Eindrücklich zeigt er uns, wieviel Eis in einem kurzen Sommer auf der schmalen, weit ins Tal hinunterreichenden Gletscherzunge wegschmilzt, wie gross der Abtrag *(Ablation)* im «Zehrgebiet» ist (siehe auch viertes Bild der Abb. 6). Dieser grosse Eisverlust im Zehrgebiet wird durch Eis ersetzt, das jahraus, jahrein aus dem Firngebiet, wo der Zuwachs *(Akkumulation)* durch Schneefall überwiegt, talwärts fliesst.

Der Gletschertisch, ein Boot im grossen Eisstrom, wird mitgetragen und macht es uns leicht, die *Geschwindigkeit des Eises an der Gletscheroberfläche* zu bestimmen. Sie ist umso grösser, je tiefer das Eis ist.

Akkumulation/Ablation, Oberflächengeschwindigkeit und Gletschertiefe sind miteinander verknüpft. Louis Agassiz hat dies bereits 1842 bemerkt und daraus die Tiefe des Unteraargletschers «berechnet». Bei dieser Schätzung hat er den nahezu richtigen Wert gefunden.

Beispiele für den Zusammenhang von Oberflächengeschwindigkeit und Gletschertiefe:

		Geschwindigkeit an der Oberfläche	Eisdicke
Unteraargletscher (Südlich der Lauteraarhütte)	1842/46	70 m/Jahr	420 m
	1928/29	50	355
	1961/62	26	300
Aletschgletscher (Konkordiaplatz. Grösste alpine Eistiefe)	um 1950	ca. 200	ca. 800

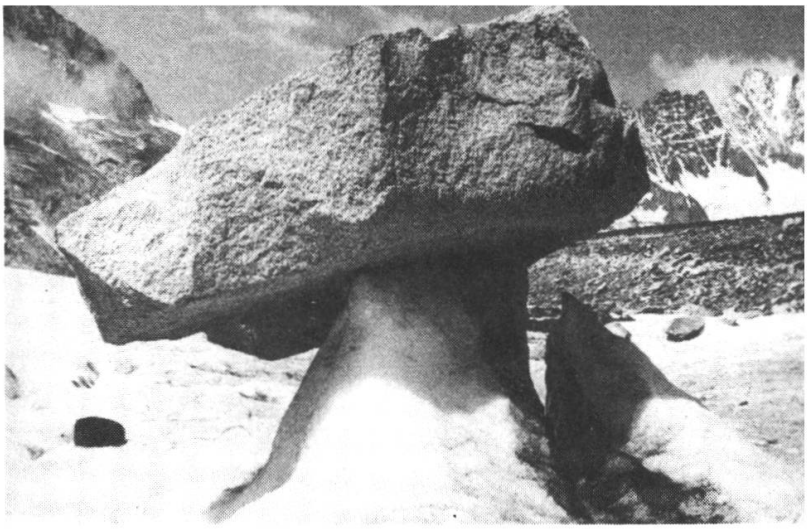
Dem geduldigen Beobachter verrät ein schöner Gletschertisch erstaunlich viel über den Aufbau und die Bewegung unserer Gletscher.

Seismische Tiefenmessungen

Der Unteraargletscher ist das schweizerische Experimentierfeld für das seismische Gletschersondierverfahren geworden, indem die Gletscherkommission (mit Unterstützung der Kraftwerke Oberhasli AG) in den Sommern 1936/37/38/39/47/48 und 1950 auf diesem Gletscher je zwei- bis dreiwöchige Messkampagnen organisierte. Die Tiefe wurde an so vielen Punkten gemessen, dass *erstmals eine vollständige Karte des Untergrundes eines Gletschers* gezeichnet werden konnte (A. KREIS, R. FLORIN und A. SÜSSTRUNK: «Die Ergebnisse der seismischen Sondierungen des Unteraargletschers». Verhandlungen der Schweizer. Naturforschenden Gesellschaft, Bern 1952).

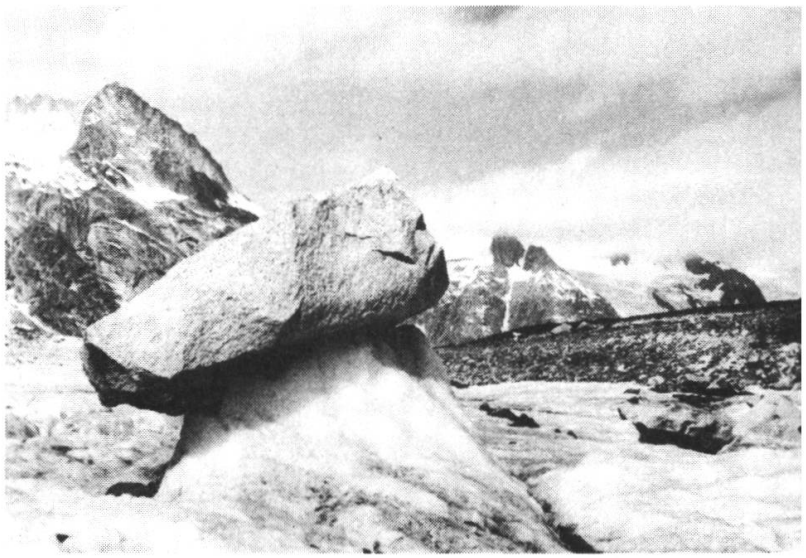
Wir haben seismische Sondierungen mit vorwiegend wissenschaftlichen Zielen u. a. ausgeführt auf dem Rhonegletscher, dem Aletschgletscher, dem Morteratschgletscher. Auf der Plaine Morte und auf dem Gornergletscher stand die Frage subglazialer Wasserfassungen zur Diskussion. Bei einigen Walliser Gletschern (Zmutt, Findelen u. a.) waren Stollen für Wasserleitungen projektiert, die den Gletscher unterfahren sollten.

Abb. 9 Ein Gletschertisch auf dem Unteraargletscher



Ende Juli 1938 sitzt eine prächtige Granitplatte auf einem hohen Eissockel.

Die Platte gleitet ab – nach Süden wegen der heissen Mittagssonne – und wird bald einen neuen Tisch gebildet haben.



Mitte Juli 1939 sitzt die Platte auf einem neuen Sockel. Der Pikkel rechts im Bild gibt den letzten Standort des Tisches an.

Die Steinplatte ist wieder abgeglitten – wieder nach Süden – und ist bereit, einen neuen Tisch zu bilden. (Wenn sie nicht in die nahe Gletscherspalte fällt; 1947 habe ich sie nicht mehr gefunden). Links: Apparate-Zelt.

3. Geologische Strukturen

Die *Reflexionsseismik* hat sich namentlich zur Bestimmung der Tiefe von Gletschern bewährt.

Die häufigste Problemstellung für das *Refraktionsverfahren* bildet die Bestimmung der Mächtigkeit von (mehrschichtigen) Überlagerungen, beziehungsweise die Bestimmung der Topographie von Felsoberflächen unter Schutt, Schotter, Alluvionen usw. Es ging etwa um die Lokalisierung von Sperrstellen, die Messung von Abdichtungsquerschnitten bei Erddämmen, um Baugrunduntersuchungen für grössere Bauten (Schulhäuser, Fabriken) oder um die Bestimmung der Mächtigkeit einer Schicht von abbauwürdigem Material (Kies, Ton).

Wir haben solche Messungen u. a. ausgeführt im Oberhalbstein, in der Val Gliems, in Arosa, Andermatt, Böttstein, auf der Göscheneralp, in Salanfe.

Geschwindigkeitsmessungen: Die Geschwindigkeit der elastischen Wellen (ich habe oben einige Werte angegeben) hängt von der Beschaffenheit des Materials ab. Mit Geschwindigkeitsmessungen ist es daher zum Beispiel möglich, Felspartien auf ihre Festigkeit, auf ihre Klüftung hin zu untersuchen.

Unerwartet die folgende Frage: Ein Bohrloch, das für die Aufnahme eines Kabels bestimmt war und einen Tunnel in 300 m Tiefe hätte erreichen sollen, war von der Geraden abgewichen. Wo befand sich nun der Bohrkopf? Die Stelle wurde seismisch ermittelt, und der Bohrkopf konnte dann durch einen 50 m langen Stollen vom Tunnel aus erreicht werden.

Erschütterungsmessungen

Wir haben uns bis jetzt mit Erschütterungen befasst, die von einem *entfernten Herd* her – Erdbebengebiet, Sprengort – auf Wellen zum Seismographen herangetragen werden, und es kam uns nur auf die *Wege* dieser Wellen an und auf ihre *Laufzeiten*.

In diesem Kapitel geht es um die *Stärke* (Intensität) der Erschütterungen. Ich gebe zuerst an, was damit gemeint ist, wie diese Stärke in einem Seismogramm zu finden ist, und gehe dann in zwei Beispielen der Frage nach, wozu wir Erschütterungsmessungen gemacht haben.

1. Erschütterungsstärke

Jeder Schritt, den wir in unserer Wohnung gehen, jede Maschine, die im Hause arbeitet, jedes Fahrzeug, das auf der Strasse vorbeifährt, er-

zeugt *mehr oder weniger starke* Erschütterungen des Fussbodens. Rasche Verkehrserschütterungen (Frequenz ca. 1800 Schwingungen/min) mit einer Amplitude von etwa 0.05 mm werden bereits als störend oder sogar als lästig empfunden.

Wir entnehmen den Seismogrammen in Abb. 3 die folgenden Werte:

	Frequenz	Grösste Amplitude
Walliser-Beben	90 Schwingungen/min	0.008 mm
Chilenisches Beben	2	0.004

Beide Beben konnten in Chur bei weitem nicht gespürt werden, da Frequenz und Amplitude der Schwingungen viel zu klein waren.

2. Zwei Beispiele von Erschütterungsmessungen

Aus der grossen Zahl von Erschütterungsmessungen, die mit dem Gletscherseismographen und später auch mit anderen Seismographen gemacht wurden, habe ich zwei Beispiele mit möglichst verschiedenen Fragestellungen herausgesucht.

Reconvilier (Bern) 1946

In zwei Uhrenfabriken, die sich in der Nähe eines Geschützstandes befanden, wurden die feinen Arbeiten durch die Detonationen der Geschütze empfindlich gestört.

Sind diese Störungen, so lautete die Frage, auf die Erschütterungen des Werkstattbodens zurückzuführen, die durch die feuernden Geschütze erzeugt werden?

Wir haben die Erschütterungen gemessen und festgestellt, dass sie schwächer waren als die normale durch Menschen und Maschinen erzeugte Bodenunruhe.

Woher kamen dann die Störungen? Die Fehlleistungen hingen damit zusammen, dass die Uhrmacher, durch den Knall der Geschütze erschreckt, zusammenfuhren und mit ihren Werkzeugen winzig kleine falsche Bewegungen machten.

Kantonsschule Chur 1968–1969

Die Aushubarbeiten für den Neubau der Schule erforderten Sprengungen in der Nähe der Kirchenruine St. Stephan, die unter Denkmalschutz steht.

Wie, das war die hier gestellte Frage, müssen die Sprengungen ausgeführt werden, damit die Kirche keinen Schaden nehme und die Sprengwirkung, der Felsabtrag, dennoch gross genug sei?

Wir haben bei den rund 1000 Sprengungen die Erschütterungsstärke auf einer Mauer in der Kirche mit einem elektrischen Seismographen gemessen, und ich konnte zusammen mit dem Sprengmeister nach jeder Sprengung die Sprenganordnung für die nächste Sprengung (Anzahl und Tiefe der Bohrlöcher, Ladungen, Zündfolge) festlegen.

Es ist gelungen, einen Mittelweg zwischen zu starker und zu schwacher Sprengung zu finden; die Kirche erlitt keinen Schaden und 8500 m^3 Fels wurden in nicht allzulanger Zeit abgetragen.

Internationale Projekte

Upper mantle project 1960, Explosions alpines 1963/64, International Geodynamics Project 1975. So heissen einige der Projekte, an deren Realisierung wir – auch nach dem Abbruch der Erdbebenwarte – beteiligt waren: Es wurden Messungen mit den eigenen und auch mit fremden Apparaten ausgeführt oder Spezialseismographen bedient, die monatelang Erdbeben und Sprengungen registrierten.

Ebbe und Flut der festen Erde

Wenn die Flut kommt, braust das Wasser auf den flachen Küsten Nordfrankreichs mit der Geschwindigkeit eines galoppierenden Pferdes heran, es staut sich in der langen Fundy-Bucht (Kanada) bis zu 21 m Höhe auf, und – es steigt nur wenig im Mittelmeer. Dort eindrucksvolle Phänomene, hier kleine Schwankungen des Wasserspiegels sind die Gezeiten der Meere Wirkungen des Mondes und der Sonne. Gefährliche Springfluten treten auf, wenn die Anziehungskräfte der beiden Gestirne im gleichen Sinn wirken (bei Vollmond und bei Neumond), Nippfluten treten auf, wenn die fluterzeugenden Kräfte gegeneinander wirken. (Als Cäsar 54 v. Chr. nach Britannien übersetzte – er hatte ausgerechnet die Zeit des Vollmondes gewählt – brachte ihm die Springflut erhebliche Verluste.)

Doch was hat das alles mit Chur zu tun? In *Chur* wurden zum *erstenmal in der Schweiz* Wirkungen von *Ebbe und Flut der «festen Erde»* gemessen, und zwar mit einem Gezeiten-Gravimeter des Centre International des Marées terrestres in Brüssel. Was heisst das? Wir haben mit dem hochempfindlichen Instrument im Frühling 1972 in einem Luft-

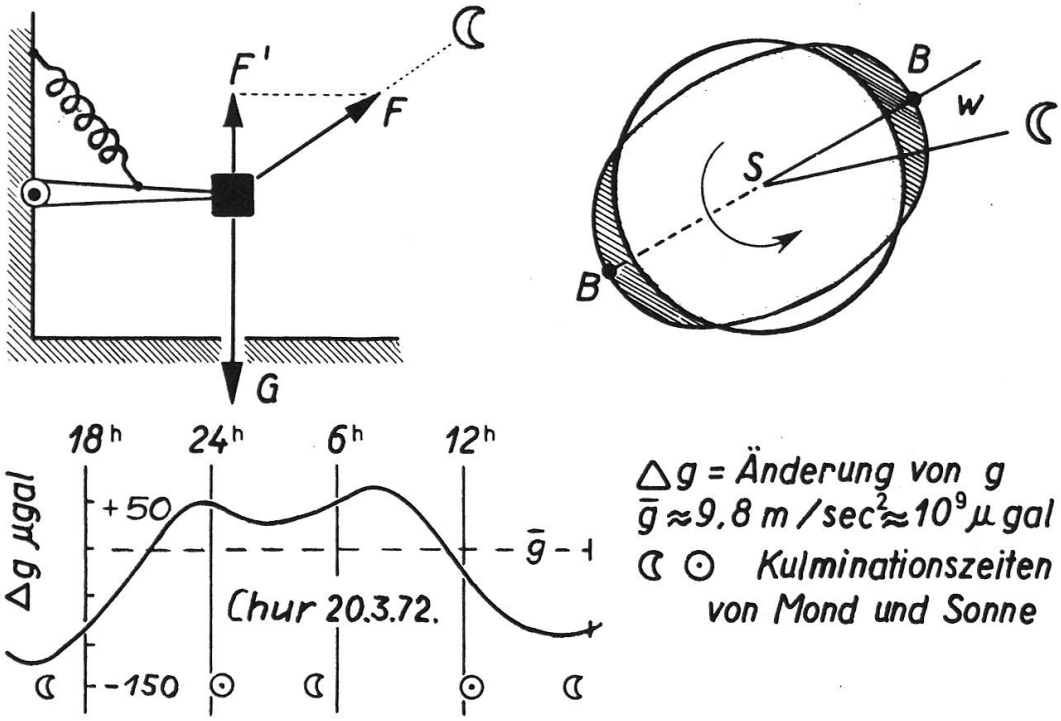


Abb. 10 Oben links: Gezeiten-Gravimeter.
Oben rechts: Erde mit den Flutbergen B, die der Mond erzeugt.
Unten: Diagramm, das die Zunahme / Abnahme der Fallbeschleunigung in Chur am 19./20. März 1972 angibt. Zur Zeit der oberen Kulmination des Mondes (um ca. 16.00 am 19. März und ca. 25 Stunden später) befand sich Chur auf einem Flutberg und die Fallbeschleunigung war am kleinsten.

schutzkeller des Lehrerseminars während 130 Tagen die Änderung der Fallbeschleunigung g gemessen.

Die Vertikalkomponente F' (Abb. 10) der Anziehungskraft F des Mondes zieht die Pendelmasse des Gravimeters nach oben und macht sie leichter. Der Mond verformt aber auch die rotierende Erde, was zu einer weiteren Verkleinerung des Gewichtes führt: Wenn nämlich einer der um die Erde wandernden Flutberge B Chur passiert, ist die Pendelmasse für kurze Zeit um rund 20 cm weiter vom Schwerpunkt der Erde entfernt als bei Ebbe und ihr Gewicht G ist daher kleiner als einige Stunden früher oder später. Verkleinerung des Gewichtes bedeutet Verkleinerung der Fallbeschleunigung g.

Die gesamte durch Mond und Sonne hervorgerufene Änderung der Fallbeschleunigung beträgt allerdings höchstens 0.00002% des Mittelwertes 9.8 m/s²! Das Diagramm zeigt, wie sich g am 19./20. März 1972 in Chur geändert hat.

Wozu macht man so spitzfindige Messungen? Die Höhe der Flutberge B und der Winkel w (Grössenordung 1′), um den die Gerade BB hinter der Bewegung des Mondes zurückbleibt, sind ein Mass für die Verformbarkeit der Erdkugel als Ganzes und für die Starrheit der Erdkruste in Chur.

Absolute Schweremessungen

In der Schweiz sind die ersten absoluten Schweremessungen höchster Präzision in Zürich und in Chur gemacht worden: Spezialisten des Istituto Metrologico di Torino haben im Frühling 1978 die Fallbeschleunigung g mit ihrer hochmodernen Apparatur gemessen und die folgenden Werte erhalten:

Zürich 515.50 m ü. M. $g = 9.806\ 478\ 95\ m/s^2$
(ETH-Hönggerberg, 7.–8. 6. 78)
Chur 629.66 m ü. M. $g = 9.804\ 538\ 56\ m/s^2$
(Zivilschutzanlage der Kantonsschule, 14.–16. 6. 78)

Das Prinzip der Messung ist einfach: man wirft einen Körper in einem hochevakuierten Gefäss in die Höhe und misst dann die Länge von Steig- und Fallwegen und die zugehörigen Zeiten. Aber es ist alles andere als einfach, die im Internationalen Schwerenetz geforderte relative Genauigkeit von $1:10^8$ zu erreichen: Zeiten und Längen müssen bis auf etwa 1 Milliardstel Sekunden und 1 Milliardstel Meter genau gemessen werden können.

Wozu macht man solche Messungen und warum gerade in Chur? Chur ist von der Erdbebenwarte her bekannt und liegt überdies in einer merkwürdigen Zone mit erhöhter Seismizität, kleiner Schwere und grossen Hebungsraten (Präzisionsnivellements 1913–1976). Bewegungen der Erdkruste und Verlagerung von Massen im tiefen Untergrund der Alpen rufen langsame zeitliche Änderungen der Fallbeschleunigung hervor, und es ist interessant, ein wenig zu spekulieren (ohne auf die Messgenauigkeit zu achten, unbekümmert um die Frage, ob die Hebungsraten – in mm/Jahr – wirklich Höhenänderungen sind.): Wenn sich die Erdkruste in Chur z. B. um 2 mm im Jahr hebt, nimmt die Fallbeschleunigung g um etwa $5 \cdot 10^{-9}$ m/sec² im Jahr ab und wird 1998 nur noch 9.804 538 46 m/sec² betragen. Ob das wohl stimmen wird? Um dies zu erfahren, um heutige Theorien zu prüfen, wird man die Messungen in der Kantonsschule wiederholen müssen, und so haben wir 1978 einen guten Schritt getan hinein in die Zukunft der geophysikalischen Forschung in Chur.