

Sitzungsberichte
der
mathematisch-physikalischen Classe
der
k. b. Akademie der Wissenschaften
zu München.

Band XX. Jahrgang 1890.



München.
Verlag der K. Akademie.
1891.

In Commission bei G. Franz.

Sitzung vom 3. Mai 1890.

Herr L. SOHNCKE legte eine Abhandlung der Herren Doktoren AD. BLÜMCKE und S. FINSTERWALDER: „Zur Frage der Gletschererosion“ vor.

Zur Frage der Gletschererosion.

Von Ad. Blümcke und S. Finsterwalder.

(Eingelaufen 3. Mai.)

In der Diskussion über die Wirkung der Gletscher auf den Untergrund ist von Seiten der Verfechter der Gletschererosion bisher hauptsächlich auf die zermalmende, zerreibende, furchende, feilende und schleifende Thätigkeit nicht so sehr des bewegten Eises selbst, als der mitgeführten, unter grossem Druck gegen die Unterlage gepressten Grundmoränenschicht hingewiesen worden. Der Wirkung dieser Thätigkeit ist nun nach Heim dadurch eine Grenze gesetzt, dass bei zunehmendem Drucke infolge der hierbei bewirkten Erweichung des Eises die Kraft, welche die Steine der Grundmoräne gegen den Boden drückt, durch eine Art Auftrieb in der plastischen, flüssigkeitsähnlichen Eismasse vermindert wird. Diese Masse ist dann nämlich im Stande, den Druck allseitig, wenn auch nicht mit gleicher Stärke fortzupflanzen und es wird bei einem fast ganz im Eise eingebetteten Steine, welcher nur mit einer kleinen Fläche am Boden aufliegt,

der auf die obere Seite ausgeübte Druck zum Theil durch denjenigen vermindert, welcher auf die vom Eise berührte Unterfläche nach oben wirkt. Die Möglichkeit, dass auf diese Weise der Druck der Grundmoränengeschiebe gegen die Unterlage modifizirt wird, muss zugegeben werden, sobald man annimmt, dass die Grundmoräne von Eis gänzlich „durchtränkt“ ist und dass das Eis in den Zwischenräumen den Druck noch fortzuleiten vermag; keinesfalls aber kann natürlich der Gesamtdruck des Gletschers (Eis und Steine) von etwas anderem als von seinem Gewicht abhängen. Wenn schon der Druck des Gletschers im Ganzen wesentlich von der Mächtigkeit des Eises abhängt, so ist es doch angesichts der selbst bei grosser Belastung immer noch unvollkommenen Fluidität desselben sicher, dass während der Bewegung der Druck im Einzelnen zeitlich und örtlich sehr veränderlich ist, und momentan wohl auf Null herabgehen kann, so z. B. dann, wenn bei Stellungsänderungen der Geschiebe hohle nicht mit Eis erfüllte Räume entstehen. Entsprechend muss dann auch nothwendig der Druck an benachbarten Stellen erheblich grösser sein und kann den normalen vielmal übersteigen. Nun ist es eine gegenwärtig wohl allgemein zugestandene Thatsache, dass sich das Eis am Grunde wenigstens grösserer Gletscher mit Ausnahme vielleicht der höheren Lagen jahraus jahrein im Zustande der Schmelzung befindet.¹⁾ Dabei wird seine Temperatur dem Schmelzpunkt bei dem herrschenden Drucke entsprechen und demgemäss um einen geringen Betrag unter Null liegen. Experimentell wurde dies von Forel²⁾ und Hagenbach am Arollagletscher direct nachgewiesen. Das allenthalben schmelzende Eis des gänzlich stagnirenden Gletschers hatte an verschiedenen Stellen nahe dem Grunde Temperaturen zwischen — 0,031° C und

1) Heim. Gletscherkunde. Seite 250.

2) Comptes rendus 1887. 2. 859.

— 0,002° C, was darauf hinweist, dass der Druck, unter dem das Eis bei einer Mächtigkeit von 40^m—50^m stand, an den einzelnen Punkten zwischen $4\frac{1}{2}$ und $\frac{1}{4}$ Atmosphäre schwankte. Es unterliegt keinem Zweifel, dass bei lebhafter Bewegung des Gletschers die Druckunterschiede sich verlegen, wodurch nothwendig partielle Verflüssigungen und Wiedergefrierungen der Gletschermasse, mit welchen entsprechende Temperaturschwankungen parallel gehen, erfolgen müssen. In der That lassen sich mit dieser Annahme Bewegungs- und Structurerscheinungen des Gletschers ungezwungen erklären, wie dies J. Thomson schon im Jahre 1849 gethan hat und worin ihm unter Anderen auch Heim im Gegensatze zu Tyndall zustimmt.¹⁾ Diese Aenderungen des Aggregatzustandes finden natürlich nicht nur im Innern, sondern in erhöhtem Maasse an den Unebenheiten des Bettes, an den Ecken der Gesteinstrümmer, kurz überall da statt, wo Reactionen der bewegten Masse gegenüber den Widerständen auftreten und die Unregelmässigkeiten der Bewegung ihren Ausgangspunkt nehmen. Solche Aenderungen des Aggregatzustandes sind nun bekanntlich von Verwitterungserscheinungen der angrenzenden Gesteinsoberflächen begleitet, deren qualitative und quantitative Bestimmung den Gegenstand einer Reihe von Untersuchungen des Einen von uns bildete.²⁾

Während man bisher der Ansicht war³⁾, dass oft wiederholtes Frieren und Aufthauen eines mit Wasser getränkten Gesteines erst eine allmähliche Lockerung des Gefüges er-

1) Gletscherkunde Seite 308—318.

2) Ad. Blümcke. Bestimmung der Frostbeständigkeit von Materialien. Centralblatt der Bauverwaltung. 1885; ferner unter gleicher Ueberschrift Fortsetzung und wesentliche Erweiterung. Zeitschrift für Bauwesen 1887.

Ueber das Verwittern von Materialien. Centralblatt der Bauverwaltung 1889.

3) Richthofen. Führer für Forschungsreisende. S. 95. 1887.

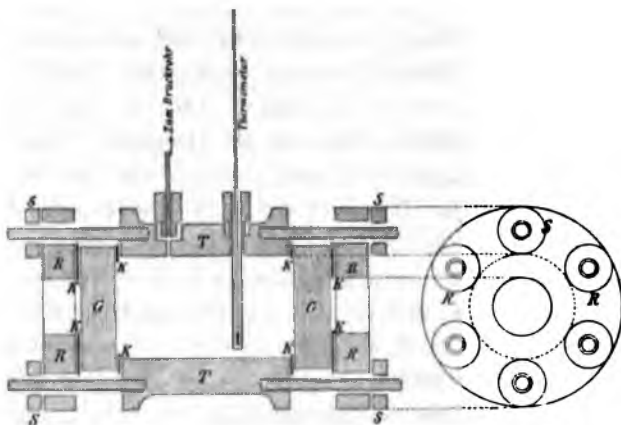
zeugt, die sich schliesslich in dem Auftreten von Fugen äussert, welche sich dann durch die Sprengwirkung des gefrierenden Wassers rasch erweitern und zur Abbröckelung scharfkantiger Fragmente führen, zeigte sich bei den erwähnten Untersuchungen, dass gleich bei erstmaliger Frosteinwirkung, gleichviel von welcher Beschaffenheit das Gestein war — ob feinsten Marmor oder grobkörniger Sandstein — ein wägbarer Materialverlust statthatte, ohne dass auch mit bewaffnetem Auge eine Veränderung am Gestein wahrgenommen werden konnte. Das Verwitterungsprodukt ist anfänglich mikroskopisch feiner Staub und seine Menge bei gleichem Material der Oberfläche und der Zahl der Frostwirkungen genähert proportional. Für verschiedene Gesteine schwankt dieselbe innerhalb bedeutender Grenzen z. B.

Gelber Sandstein (Lichtenau)	0,341 gr	pro	□ dm	u.	einmal.	Frieren.
Roth. Sandst. (Rothenfels a. M.)	0,022 gr	"	"	"	"	"
Weisser Carrara Marmor	0,007 gr	"	"	"	"	"
Weisser Kalkstein (Estailade)	0,135 gr	"	"	"	"	"
Granit (Wunsiedel)	0,017 gr	"	"	"	"	"
Granit (Blauberg)	0,014 gr	"	"	"	"	"

Erst bei mehrfach wiederholtem Gefrieren (3—30fach bei Sandsteinen, 2 bis weit über 100 bei Kalksteinen und Marmor, 40fach bei Granit, wenn das Material möglichst mit Wasser getränkt ist) hört die Proportionalität auf und es zeigen sich die bekannten, sichtbaren, unregelmässig wirkenden Verwitterungserscheinungen. Bei den damaligen Versuchen wurde das Frieren durch Temperaturniedrigung herbeigeführt, aber es war zu erwarten, dass die gleiche Wirkung eintritt, wenn das Frieren durch Druckerniedrigung hervorgerufen wird. Diese Voraussicht haben wir nun durch einige neue Versuche bestätigt gefunden.

Es wurden erst Gesteinsproben in Eis eingefroren, dann das Eis durch Druck verflüssigt und durch Nachlassen des Druckes zum Wiedergefrieren gebracht. Die Druckänderungen

wurden mehrfach wiederholt und die dabei entstandenen Materialverluste des Gesteines mit denjenigen verglichen, welche bei gewöhnlicher Frostwirkung auftreten.



Die zu untersuchenden Steine befanden sich in einem horizontal liegenden Rohr (siehe Figur) aus Phosphorbronze von 2 cm Wandstärke, 12 cm Länge und 6 cm lichter Weite, welches an den Enden durch 2 cm dicke Glasplatten *G* geschlossen war. Letztere waren durch Metallringe *R*, welche durch je 6 Schrauben *S* angezogen werden konnten, gegen das Rohr gepresst. Zur Dichtung lagen zwischen Rohr und Glasplatten Kautschukringe *K* mit Hanfeinlagen. Oben hatte das Rohr zwei Durchbohrungen. In die eine konnte ein dünnes Kupferrohr behufs Verbindung mit einer Cailletet'schen Druckpumpe geschraubt werden, in die andere ein dünnwandiges mit Alkohol gefülltes Gefäß zur Aufnahme eines feinen Thermometers. Nachdem die Steine (etwa ein Dutzend nussgrosse Stücke) unter der Glocke der Luftpumpe mit Wasser gesättigt waren, wurden sie in einen Blechtrog, der die abfrierenden Partikel sammeln sollte, gelegt und in das zu vier Fünftel mit Wasser gefüllte Druckrohr gebracht.

Der übrige Raum des Druckrohrs wurde unter Ausschluss der Luft mit Olivenöl gefüllt, welches auch zur Speisung der Cailletet'schen Pumpe diente. Man wählte diese Substanz anstatt des Wassers, um ein Zerspringen des Apparates beim Gefrieren zu vermeiden.¹⁾ Es wäre im Interesse der Bequemlichkeit und Reinlichkeit gewesen, Quecksilber anzuwenden, doch verbot sich dies mit Rücksicht auf das Material des Rohrs und der Pumpe. Das gefüllte Druckrohr wurde in eine Kältemischung gesteckt und hiedurch das Wasser zum Gefrieren gebracht. Man bemühte sich alsdann, die Temperatur des Eises so zu reguliren, dass bei den zur Verfügung stehenden Drucken [80 Atm.] eine Verflüssigung eintreten konnte. Es gelang, für mehrere Stunden die constante Temperatur $-0,3^{\circ}\text{C}$ zu erhalten. Wurde nun der Druck durch Einpumpen von Olivenöl auf 80 Atmosphären gesteigert, so sank das Thermometer auf $-0,6^{\circ}\text{C}$ und die Verflüssigung machte sich ausserdem noch durch starke Volumen- und Druckabnahme, die indessen immer wieder compensirt wurde, bemerklich. Später blieben Druck und Temperatur nahezu constant. Hierauf wurde der Druck aufgehoben, wobei das Thermometer wieder auf $-0,3^{\circ}$ stieg. Solche Druckänderungen wurden nun in Zwischenräumen von 10–15 Minuten mehrfach hintereinander bewirkt. Anfänglich war bei jeder Druckverminderung das Wiedergefrieren des Wassers durch Anschliessen von Eisnadeln und leichte Trübung der Masse beim Durchsehen zu erkennen, später wurde das Ganze so gleichförmig, dass eine sichere Unterscheidung von Wasser und Eis nicht mehr möglich war. Doch folgt das Gefrieren und Schmelzen mit Sicherheit aus den Temperaturänderungen. Nach Beendigung der Versuche sammelte man den Inhalt des Rohres in einer Schale, dampfte

1) Bei Temperaturen unter -10° wurde auch das Olivenöl fest, was thatsächlich einen Bruch der Glasplatte nach sich zog.

ein und wusch den Rückstand auf dem Filter mit Chloroform zur Entfernung des noch anhaftenden Olivenöls aus. Der Rückstand wurde getrocknet und gewogen.

Dieselben Steine wurden ausserdem im nassen Zustande einer gewöhnlichen Frostwirkung ausgesetzt und die abgefrorenen Theilchen gewogen. Um auch die Frage zu entscheiden, in wie weit die blossen Druckwirkungen, denen die Gesteine im Apparate ausgesetzt sind, Materialverluste hervorrufen können (durch Auflösen des Bindemittels im Wasser oder durch Abbröckelung des Gesteines im Eis), wurden noch zwei Parallelversuche gemacht, wobei einmal die Gesteine in Wasser bei Zimmertemperatur wiederholt Druckänderungen von 80 Atmosphären ausgesetzt, das anderemal dieselben in Eis von -5°C bis $-7,5^{\circ}\text{C}$ gebettet und in gleicher Weise behandelt wurden, wobei ein Thauen bei den angewendeten Drucken natürlich ausgeschlossen ist. Wir experimentirten mit zweierlei Material, einem rothen Sandstein von mittlerer Güte unbekannter Herkunft und einem dunkelgrünen Schiefer aus dem Pfischthal.

Die erhaltenen Zahlen theilen wir in folgender Zusammenstellung mit:

I. Probe. Sandstein.

Oberfläche ca. 360 □ cm.

Gewichtsverlust nach einmaligem

Frieren bei -10°C 0,497 gr

Für den □ cm Oberfläche berechnet 0,137 gr

Gewichtsverlust im Apparate nach

einmaligem Frieren ohne Druck

durch Temperaturerniedrigung

und fünfmaligem Frieren durch

Druckerniedrigung von 80 Atm.

auf 1 Atm. 2,898 gr = $6 \times 0,483$ gr

Verlust nach 10maligem Druck in
Wasser von Zimmertemperatur 0,607 gr

Da die Steine schon sichtbare Spuren tieferer Frostwirkung zeigten, wurde eine zweite Probe desselben Materials genommen von 280 □ dcm Oberfläche:

Gewichtsverlust nach einmaligem
Frieren bei -5°C 0,367 gr
Für den □ dcm Oberfläche . . 0,130 gr

Gewichtsverlust nach 10 maligem
Druck auf 80 Atm. des im Eise von -5° bis $-7,5^{\circ}\text{C}$ eingeschlossenen Materials, wobei natürlich vorher einmaliges Frieren statthatte 0,308 gr

II. Probe. Schiefer.

Oberfläche ca. 300 □ cm.

Gewichtsverlust nach einmaligem

Frieren bei -5°C .

a) vor den Druckversuchen 0,044 gr

b) nach „ „ „ „ 0,039 gr

Mittel pro □ dcm Oberfl. 0,014 gr

Gewichtsverlust nach einmaligem

Gefrieren durch Temperaturerniedrigung und 16 maligem Gefrieren durch Druckerniedrigung

von 80 Atm. auf 1 Atm. . . 0,726 gr = $17 \times 0,045$ gr.

Aus dieser Zusammenstellung entnehmen wir, dass die Frostwirkung, welche durch Druckverminderung herbeigeführt wird, quantitativ von der durch blosse Temperaturerniedrigung erzeugten nicht wesentlich verschieden ist und dass ferner die Löslichkeit des Materials im Wasser nur

nebensächtlichen, die Druckwirkung des Eises allein (ohne gleichzeitige Aggregatsänderung) verschwindenden Einfluss auf den Materialverlust hat. Aber auch qualitativ ist die Erscheinung die gleiche: erst regelmässiges Abfrieren feinen Staubes, später unregelmässiges Abblättern und Abbröckeln gröberer Theile.

Es scheint hiemit bewiesen, dass die Verwitterung auch unter der Decke des Gletschereises ihren Fortgang nimmt und dass dem Gletscher ausser der schleifenden Thätigkeit auch noch eine verwitternde zuzuschreiben ist. Ob dieselbe mit der oberflächlichen Verwitterung der Felsen in Folge der Temperaturschwankungen einen Vergleich aushalten kann, entzieht sich natürlich genauer Schätzung. Es hängt die Beantwortung dieser Frage ganz davon ab, wie oft oder wie selten man das Eintreten von Druckänderungen an ein und derselben Stelle des Gletschergrundes zugeben will. Sicher ist nur das Eine, dass diese Druckänderungen dort am häufigsten eintreten, wo die Bewegung am gestörtesten ist, namentlich an dem obern Ende der Gletscherzunge beim Uebergang in's Firngebiet, wo die von allen Seiten der Mulde radial zusammenströmenden Eismassen einer gemeinsamen Strömungsrichtung im Thalweg sich anbequemen müssen. Wer bei längerem Aufenthalt in jenen Regionen das Leben der Gletscherfläche bei dem beinahe unausgesetzten Werfen von Spalten beobachtet hat, wird es nicht für widersinnig halten, dass wenigstens zeitweise die Zahl der Frostwirkungen unter dem Eise derjenigen im Freien gleichkommt. Die hierdurch bewirkte Zerstörung des Materials macht sich natürlich an denselben Stellen geltend, wo infolge der gesteigerten Bewegung eine erhebliche Schleifwirkung des Eises zu erwarten ist. Die Grösse oder die Mächtigkeit des Gletschers dürfte von einer gewissen Grenze ab keinen entscheidenden Einfluss auf den Grad der Frostwirkung ausüben, da es für dieselbe gleichgiltig ist, unter

welchen Temperaturen bzw. Drucken das Gefrieren statthat. Stets aber wird die Verwitterung neue Angriffspunkte für die schleifende Thätigkeit des Gletschers schaffen.

Wenn durch die Heim'sche Argumentation die Erosionsfähigkeit des Gletschers einigermaßen eingeschränkt erscheint, so dürfte diese Einschränkung durch die vorgetragene sich ebenfalls auf physikalische Grundlagen stützende Betrachtung mehr als compensirt sein. Jedenfalls wird man nicht behaupten dürfen, dass schon aus physikalischen Gründen tiefergehende Erosionswirkungen der Gletscher unwahrscheinlich seien.