

B. F. Kuhns Beitrag zur Gletscherkunde vor 200 Jahren

Abstract:

"B. F. Kuhn's contribution to the knowledge of glaciers 200 years ago". An extensive summary of Kuhn's essay "An Attempt on the Mechanism of Glaciers" is given with ample citations. He shows a remarkable insight into conditions and processes that make a glacier. Without using the following terms he describes metamorphism, the accumulation-ablation area concept, mass transport, glacier movement, formation of moraines and glacier variations in logical order. His glacier-flow mechanism by cavity collapse at the bed is a weak point, but the glacier-tremor reported in context deserves recognition; so does the essay as a whole.

Key words:

History of glaciology, glaciers, Grindelwaldgletscher, glacier variations, glacier-tremors.

1. Einleitung

In seinem «Versuch über den Mechanismus der Gletscher» anerkennt 1787 Bernhard Friedrich Kuhn (1762–1825, Rechtsgelehrter und Staatsmann) die Leistungen fremder und einheimischer Beobachter, die sich um die Erforschung der Gletscher bemüht haben, stellt aber fest, daß es noch niemand gewagt hat, die Vorgänge, die sich im Gletscher abspielen, quantitativ zu erfassen («*die Kräfte der Natur zu berechnen, ihre Verhältnisse abzuwägen und festzusetzen, und aus den daherigen Resultaten Grundsätze abzuziehen, die einer allgemeinen Anwendung fähig wären*»). Mit seiner Arbeit erhebt er keineswegs den Anspruch, dieses hochgesteckte Ziel zu erreichen, sondern beabsichtigt, den Naturforscher auf diese Fragen («*ein noch unbebautes Feld seiner Wissenschaft*») hinzuweisen. Er stützt sich weitgehend auf seine eigenen Beobachtungen, die er als Bewohner der Alpen (Grindelwald) über Jahre aus der Nähe sammeln konnte.

Mein Artikel ist im wesentlichen eine gekürzte Wiedergabe von Kuhns Arbeit mit gelegentlichen Kommentaren und einer Würdigung aus heutiger Sicht am Schluß. Besonders prägnante Formulierungen sind im Wortlaut wiedergegeben mit geringfügigen Änderungen der Schreibweise und der Berichtigung offensichtlicher (gelegentlich auch vermuteter) Druckfehler. Auch sonst folge ich weitgehend Kuhns klar gegliedertem Text. Da ich Untertitel eingeführt habe, die bei ihm fehlen, erwiesen sich einige Umstellungen als sinnvoll.

2. Entstehung von Gletschereis

Seinen Versuch über den Mechanismus der Gletscher beginnt Kuhn mit einer generellen Betrachtung des Unterschieds der Gletschersubstanz auf den Hochgipfeln und in tieferen Lagen. Einen deutlichen Hinweis geben die Lawinen, die auf großer Höhe «*in Wolken von leichtem Gestöber zerfallen, das der Wind verweht. Aber die Schneefälle sind niemals von dem heftigen Donner begleitet, den der Fall des Gletschereises tiefer am Gebirge verursacht.*» In tieferer Lage in den Gletschertälern verliert der angehäufte Schnee etwas von seiner ursprünglichen Lockerheit und wird ziemlich hart, bleibt aber porös und undurchsichtig. Mit der «*Annäherung gegen wärmere Gegenden nimmt die Verwandlung zu, und der Gletscherstoff wird dem gewöhnlichen Eise immer ähnlicher*», ohne jedoch dessen vollkommene Ausbildung je zu erreichen. Die Umwandlung erklärt Kuhn dadurch, daß der Schnee von Regen und Schmelzwasser durchtränkt wird und später gefriert. Zur Vereisung legt der erste Sommer nur den Grund, die gänzliche Verwandlung ist das Ergebnis einer ganzen Folge von Jahren. So ergibt sich ein schichtförmiger Aufbau der Gletscher, der z. B. an gerade abgeschnittenen Felswänden (wohl an der Front von Hängegletschern?) sichtbar wird. Die Schichten sind meistens nur durch dichteres Eis gekennzeichnet, oft aber auch durch schmale Streifen von verwehtem Staub und Flugsand und gelegentlich durch Zwischenlagen von Sand, Kies und größeren Steinen. Die Mächtigkeit der Schichten ist sehr ungleich; sie kann 6–8 Fuß (1,9–2,5 m) oder auch nur $\frac{1}{2}$ – $\frac{1}{4}$ Schuh (160–80 mm) betragen und liegt im Mittel bei 3 bis 4 Fuß (1–1,3 m).

Wegen der abnehmenden Kraft der Sonne mit der Meereshöhe und weil der Niederschlag vorwiegend in Form von Schnee fällt, rechnet Kuhn in der Gipfelregion nicht mit starken Veränderungen, er betrachtet daher das Gletschereis als Produkt eines mildereren Klimas in tieferen Lagen.

3. Nähr- und Zehrgebiet

Kuhn weist nun auf weitere Gegebenheiten mit Nachdruck hin. Der Schneeniederschlag nimmt mit der Meereshöhe zu. Die Ursache ist leicht erkenn-

bar: Wenn es im Herbst im Tal regnet, fällt im Gebirge Schnee. Infolge der großen Kälte geschieht im Gebiet der Hochalpen im Winter nicht mehr viel («wenig Abdunstung»), und der Frühling kommt nicht vor dem Monat Juli. Im kurzen «grönländischen» Sommer schmilzt der Winterschnee z. T. nicht einmal zur Hälfte ab.

Dies führt zur Frage nach den Folgen einer ständigen Anhäufung von Schnee. Selbst unter der Annahme, die Alpen seien nicht älter als 3000 bis 4000 Jahre, müßten die höheren Bergtäler und Gipfel auch bei geringem jährlichem Zuwachs mit Schnee überdeckt sein. Kuhn bezweifelt, daß die auf den Bergen liegenden Schneemassen irgendwo eine Tiefe von 90 bis 100 Klaftern (170–190 m) erreichen, und er fragt sich, wo der Überschuß hingekommen sei.

Bevor er der Frage nachgeht, wendet er sich den Verhältnissen auf den Talgletschern zu. Viele liegen tief unterhalb der «Grenzlinie von Temperatur und Kälte, unter welcher sogar der in tiefen schattigen Schlunden liegende Schnee jeden Sommer wieder wegschmilzt». An der Seite dieser Talgletscher und zuweilen weit über ihnen findet man blühende Wiesen mit Fruchtbäumen, Äckern und Wohnhäusern. «Diese Beobachtung allein überzeugt uns schon von der Unmöglichkeit, daß der Abgang, den diese Gletscher leiden, auf der Stelle selbst durch frisch entstandene Eislagen ersetzt werden könne». Der Winterschnee schmilzt im Frühling vollständig weg: «Die darauf (auf den tieferen Gletschern) liegenden Sandhaufen und Steine sind im Winter unsichtbar und unter dem Schnee begraben; sie kommen aber, so wie auch das Gletschereis selbst, jedesmal bei der Rückkehr der Wärme wieder zum Vorschein». Da Gletschereis «nicht anders als aus einer Mischung von Schnee und Wasser vermittelt ihrer innigen Verbindung durch die Kälte» entsteht, kann es sich auf den «tieferen Gletschern» nicht bilden. Im Gegenteil, hier schmilzt Eis weg: «Die Sommerhitze zerstört während der warmen Jahreszeit eine erstaunliche Menge von Eis. Dieses beweisen unter anderem die von demselben ablaufenden Gletscherwasser, die, so leicht und klein sie auch im Winter sind, im Sommer dennoch zu großen Strömen anschwellen. Die Verminderung des Gletschereises ist daher zuweilen beträchtlich.» Trotzdem erhalten sich die Gletscher, und es gibt Beispiele, wo «der erlittene Abgang nicht nur mitten im Sommer ersetzt worden ist», sondern sich die Gletscher die ganze Zeit hindurch vergrößert haben. Von 1770 bis 1778 haben sich die beiden Grindelwaldgletscher am Ende der schönen Jahreszeit jeweils den umliegenden Gegenständen um 20–30 Klafter (38–57 m) und mehr genähert, wobei die Ausbreitung im Sommer meistens beträchtlicher war als im Winter! Da offensichtlich «die Summe des vorhandenen Gletscherstoffes sich nur im Winter vermehrt, im Sommer hingegen einer beständigen Verminderung unterworfen ist», läßt sich die sommerliche

Ausbreitung nur als Verlagerung der Gletschermasse erklären.

4. Gletscherbewegung und Gletscherbeben

Kuhn hat also die großräumige Massenumlagerung erkannt, und er gibt in einer Fußnote weitere Einzelheiten über den Gletschervorstoß: «Ein Hirtenknabe von ungefähr 15 Jahren hütete im Jahr 1773 nahe an dem oberen Grindelwaldgletscher seine Ziegen. Er hatte von dem damals sehr schnellen Fortschreiten der Gletscher und den daherigen Besorgnissen der Anwohner reden gehört, und mitunter selbst die Annäherung desselben gegen die benachbarten Gegenstände wahrzunehmen geglaubt. Seine Neugierde trieb ihn, dieses Phänomen etwas näher zu untersuchen. Er maß zu diesem Ende die Entfernung eines aus der Erde hervorragenden Felsblockes von dem Gletscher aus, und bemerkte die Distanzen allemal nach der Länge seines Stockes mit einem Steine. Er besuchte nun die Merkzeichen täglich, und sah eines nach dem andern unter dem Eise verschwinden. Innerhalb weniger Tage lag der Gletscher zart an dem Felsblocke selbst; den nächsten Morgen war er bis auf die Mitte desselben (vorgerückt) und noch dem nämlichen Abend war er (der Felsblock) ganz vom Eise bedeckt.» Kuhn begnügt sich nicht mit der Wahrnehmung der Gletscherbewegung als Faktum, er fragt sogleich nach dem Mechanismus, d. h. nach den Kräften, die diese unermeßlichen Gletschermassen zu bewegen vermögen. Er verbindet die Erfahrung, daß sich die Gletscherzungen im Sommer stärker bewegen als im Winter mit weiteren Beobachtungen, um daraus auf den Bewegungsmechanismus zu schließen. Im Winter liegen die Gletschermassen eng an der Erde an. Mit der Rückkehr der warmen Jahreszeit entstehen überall unter dem Eise geräumige Höhlen. Gelegentlich formt das Eis weiträumige Gewölbe von ein bis mehreren Fuß Höhe, die nur hie und da auf einzelnen oft schwachen Stützen lagern. Die Unterhöhlung der Gletscher deutet Kuhn als Folge von aus dem Boden aufsteigender Wärme, trieft doch immer etwas Wasser von der Decke der Eisgewölbe ab; «an schwülen Sommertagen schießt es gleich einem starken Regen herunter». Es ist daher wahrscheinlich, daß die aus dem Boden aufsteigende Wärme mit der Atmosphäre im Verhältnis steht. Ursprung der Wärme ist viel eher die Erhitzung des Bodens in der Nachbarschaft der Gletscher als eine geothermische Wärmequelle (als «Centralfeuer» oder von einem vulkanischen Erguß). Die im Frühling in Bewegung gesetzte Feuermaterie (Wärme als Stoff gedeutet?) breitet sich nach allen Seiten aus und strömt durch die Oberfläche des Bodens den Gletschern zu. Unter diesen pflanzt sie sich bis in die obersten Täler der Eisgebirge fort, gleich dem Schalle, der mit seiner Entfernung vom Entstehungspunkte verhältnismäßig seine Stärke verliert.»

Durch die Ausschmelzung wird der Gletscher an der Sohle so lange ausgehöhlt, bis die Abstützungen zu schwach werden und die Gewölbe einstürzen. Da die Eismassen im allgemeinen auf einer schiefen Unterlage aufliegen, bewirkt der Einsturz gleichzeitig eine Vorwärtsbewegung. Nach der Lehre der Bewegung eines Körpers auf der schiefen Fläche folgt, daß *«ein Teil des Gewichtes der auf abschüssigem Grunde ruhenden Gletschermassen auf das Eis, das am Fuße der Halde liegt»*, fallen und darauf wirken muß. *«Sobald es aber den Widerstand der tiefer liegenden Eismassen überwiegt, so muß es dieselben entweder in gerader Linie, oder wenn es die Krümmung der Täler nicht erlaubt, in gebrochener Richtung nach derjenigen Gegend hinschieben, wo die Gegenwirkung am schwächsten ist – gegen den Auslauf der Täler zu»*. Sehr oft ist es also nicht die eigene Schwere, sondern die in den *«obersten Tälern liegenden Schnee- und Eismassen, welche die tiefern Gletscher gegen die fruchtbaren Gegenden tief unter dem Frostpunkt hinabführt»*. Ein schönes Beispiel stellt das untere Eismeer dar, dessen Eismasse, *«ihrer fast horizontalen Lage ungeachtet, dennoch immer weiter gegen den Einschnitt des Mettenbergs und Eigers herausrückt, und den unteren Grindelwaldgletscher vor sich her schiebt»*. Auf das Eismeer wirken die Kräfte von zwei steilen Eismassen *«nach den Gesetzen der einfachsten Mechanik»*.

Schon einleitend bemerkt Kuhn zum Mechanismus der Gletscherbewegung, daß im Sommer gelegentlich ein dumpfer Donner die Umgebung erschüttert, der sich deutlich vom Knallen der einstürzenden Eistürme unterscheidet. Beim Einbruch der kalten Jahreszeit schließen sich die Gewölbe, das Eis sinkt wieder an die Erde zurück, und das Donnern und Knallen verschwindet. Implizit ist dies eine der Beobachtungen, auf die Kuhn seinen Gewölbeeinsturzmechanismus begründet. Viel stärker dürfte seine Ansicht aber von einem einzelnen persönlichen Erlebnis geprägt gewesen sein: *«Im Herbst 1783 war ich selbst Zuschauer eines solchen gewaltsamen Auftrittes, der mir Gelegenheit gab, das Fortschreiten der Gletscher mit aller Genauigkeit zu untersuchen. Ich war auf das oben erwähnte Eisfeld am Rücken des Mettenbergs (das untere Eismeer) hinaufgestiegen, und schon eine ziemliche Strecke auf demselben fortgegangen. Auf einmal entstand gegen Osten am Fuße des Schreckhorns ein heftiges Getöse, das wie ein Donnerschlag unter meinen Füßen durchlief. Im gleichen Augenblicke wurde das Eisfeld gewaltig erschüttert, und zwei äußerst heftige Stöße, denen eines horizontalen Erdbebens ähnlich – folgten sich Knall auf Knall in der Richtung des unterirdischen Getöses nach. Verschiedene zu meiner Seite auf abschüssigem Boden ruhende Felsblöcke kamen in Bewegung, und rollten in die nächsten Vertiefungen hinunter. Ein paar nahe gelegene, sehr weite Schlünde schlossen sich plötzlich zu, und warfen das darin stehende Wasser mit vielem Geräusch in die Luft aus. Ich selbst wurde*

durch die Heftigkeit der Stöße zu Boden geworfen. Nach dieser Erfahrung besteht also die Bewegung der Gletscher, wodurch ihr Fortschreiten bewirkt wird, in einem oder mehreren Stößen, welche sich von ihrem Ursprunge aus über die ganze Masse fortpflanzen, und dieselbe ein oder zwei Schritte weit – oft mehr, oft weniger – vorwärts rücken.»

In der raschen Bewegung des Eises sieht Kuhn auch die Ursache für die Gletscherschrammen im Fels in der Fließrichtung des Eises und für die Zertrümmerung eines großen Granitblockes zwischen dem Eis und einer herausspringenden Felsecke des Mettenbergs im Jahre 1779: *«Aber die Erfahrung hat schon eher gelehrt, daß die Geschwindigkeit der Bewegung bei weichern Körpern oft den Mangel eines festern Baues ersetzt.»* De Saussures Hypothese von einer langsamen und stetigen Bewegung der Gletscher ist für Kuhn (1788) unbegreiflich.

5. Moränen

Im Zusammenhang mit den nachfolgend zu erwähnenden Gletscherschwankungen beschreibt Kuhn sehr drastisch die Wirkung einer vorstoßenden Gletscherstirn. Dies nimmt er zum Anlaß, sich in einer Fußnote in einer Art und Weise zu den Moränen zu äußern, die dem Thema der Gletscherbewegung sehr nahe liegt.

«Die größten vor dem Eise stehenden Bäume werden mit der Wurzel aus der Erde gehoben, oder mitten am Stamme entzweigebrochen. Die Erde vor den Kanten der Gletscher wird vom Grund aufgewühlt, und mit den daselbst liegenden Felsblöcken in hohe Wälle zusammengeschoben, die das Eis immer weiter vor sich her – selbst Anhöhen hinan wälzt.» Solche Wälle werden im Oberland Gandecken genannt. Sie dürfen nicht mit den *«Sand- oder Guferlinien»* verwechselt werden, die auf den savoyischen Gletschern *«la moraine»* heißen und *«oft mitten über die Gletschermassen herablaufen, und zu einer beträchtlichen Höhe auf denselben aufgeschüttet sind.»* Die Guferlinien entstehen auf ganz andere Weise als die Gandecken an den Vereinigungspunkten zweier Gletscher. Die Erklärung ist einfach. Die Gletscher nehmen längs von Felswänden am Rand Sand, Steine und Felsblöcke mit. Wenn sich zwei Eismassen vereinigen, so müssen die randlichen Guferlinien gemeinsam mitten aufs Eis hinauslaufen und hier der Diagonallinie der Kräfte (korrekt: dem Bewegungsvektor) folgen. Damit dienen die Guferlinien dem Naturforscher, das Verhältnis der Eismengen, die von den zwei Zuflüssen an den vereinigten Gletscher abgegeben werden, zu erforschen. Die Anzahl der Guferlinien auf einem Gletscher und deren Verlauf bleibt von Jahr zu Jahr gleich. Da der Gletscher in der Mitte höher ist als am Rand, können die Guferlinien nicht von randlichem Schutt herrühren, der durch Schnee in die Gletschermitte geschoben wird.

6. Ursache und Wirkung von Gletscherschwankungen

Über die Zeit, die das Eis vom Innern des Gebirges bis zu dessen Fuß braucht, liegen noch keine Beobachtungen vor. In Anbetracht der unterschiedlichen Länge und der Schwierigkeiten des zurückzulegenden Weges variiert sie sicher von Ort zu Ort sehr stark. Daneben gibt es einen weiteren Grund für ungleichförmige Geschwindigkeiten, dem Kuhn sehr große Bedeutung beimißt. Es ist die von Jahr zu Jahr unterschiedliche Schneemenge, die im Gebirge fällt. Da das Gewicht der hochgelegenen Massen unter gewissen Bedingungen die vorwiegend wirkende Kraft ist, welche die Fortbewegung der tieferen Gletscher verursacht, muß sich die von Jahr zu Jahr verschiedene Schneemenge in Geschwindigkeitsschwankungen auswirken. Wenn daher die Schneereserven im Gebirge ein Gleichgewicht (*«ein gewisses Verhältnis»*) unterschreiten, müssen die Gletscher abnehmen, beim Überschreiten des Gleichgewichts stoßen sie vor. *«Durch die außerverhältnismäßige Geschwindigkeit im Fortschreiten der Gletschermassen (beim Vorstoß) aber wird der Vorrat im Gebirge auf einmal gleichsam erschöpft, und daher folgt auf ein starkes Anwachsen der Gletscher allemal eine eilfertige Verminderung des Eises, die sich zuerst auf den Gebirgen äußert.»* Der kontinuierlichen Verlagerung der Masse aus dem Nähr- ins Zehrgebiet sind also Anomalien überlagert, die durch das Zusammenwirken mehrerer Umstände zustande kommen, in erster Linie aber von der Witterung eines oder mehrerer Jahre im Durchschnitt abhängen. Daraus resultiert der Wechsel der Gletschergröße in Ausdehnung und Höhe der Oberfläche. Eine 7jährige Periode der Gletscherschwankungen lehnt Kuhn aufs schärfste als Märchen und Aberglauben ab. Zeitliche Änderungen in der Oberflächencharakteristik der Gletscher stellt er in Zusammenhang zu den Geschwindigkeits- und Mächtigkeitsschwankungen. So schreibt er die Bildung von bizarr geformten Türmen und Schlünden fehlendem Nachschub zu, während sich bei vermehrter Masse in der Höhe die Schlünde schließen.

Auswirkungen der Gletscherschwankungen zeigen sich vor allem bei den Gletschervorstößen, die rauhe Winde bewirken, vermehrte Kälte in der Nachbarschaft, zurückgehaltenes Wachstum der Pflanzen und verspätete Ernten. Das von den Gletschern bedeckte Land wird mit einem unfruchtbaren Sande belegt. Erst lange nach dem Gletscherückzug wird es wieder urbar, nachdem sich eine neue fruchtbare Humusschicht gebildet hat. Der Vergletscherung gehen meistens andere Verwüstungen voraus durch das Austreten der Gletscherbäche, wodurch die fruchtbare Erde fortgeschwemmt wird und der urbare Boden versandet.

Als älteste verbürgte Gletscherschwankung nennt Kuhn den *«revolutionsartigen»* Vorstoß der Grin-

delwaldgletscher am Ende des 16. Jahrhunderts, und er glaubt, daß die Gletscher in der Schweiz, im Tirol und wahrscheinlich auch in den savoyischen Alpen um 1600 ihre größte Ausdehnung überhaupt erreichten, es sei denn, frühere Spuren seien ausgewischt worden.

7. Alpine Talgletscher und polares Inlandeis

Zum Schluß postuliert Kuhn, daß die *«sonderbare Fortschreitungsart der Gletscher nach den tieferen Gegenden»* auch außerhalb der Alpen ihre Gültigkeit haben dürfte. Die Ausbreitung der isländischen *«Yökeln»* erklärt er auf analoge Weise, wobei es naheliegt, daß die vulkanische Wärme eine besonders schnelle Veränderung bewirken kann. Yökeln und Alpengletscher können dann als kleine Modelle für die Geschehnisse in den Polargebieten angesehen werden. VON BÜFFON, CRANZ und LOMONOSOFF haben schon Eisberge als Landeis gedeutet. Kuhn schließt sich dieser Ansicht mit folgender Begründung an: *«Und kann nicht die Natur, wenn sie das Eis einmal auf dem festen Lande gebildet hat, es durch gleiche Kräfte, und nach den nämlichen Gesetzen in das Meer hinausführen, nach welchen sie in der Schweiz die Gletscher durch lange Täler bis an den Fuß der Alpen hinab fortbewegt?»*

8. B. F. Kuhns Mechanismus der Gletscher in heutiger Sicht

Kuhns Arbeit überzeugt in dreifacher Hinsicht: im klaren Aufbau, im Erkennen der großen Zusammenhänge und in den detaillierten Beobachtungen. Es ist ihm gelungen, vor 200 Jahren einen Abriß der Gletscherkunde zu schreiben, der sich auch heute sehen lassen darf. Daß seine Vorstellungen und Erklärungen z. T. von falschen physikalischen Voraussetzungen ausgingen oder auch lückenhaft und einseitig waren, tut der Bedeutung seines Werkes keinen Abbruch. Wohl bedingt durch die politischen und kriegerischen Ereignisse der Französischen Revolution und napoleonischen Zeit hat sein *«Versuch über den Mechanismus der Gletscher»* in seiner Zeit ein viel zu geringes Echo gefunden und ist später weitgehend in Vergessenheit geraten mit Ausnahme einer falsch zitierten Aussage über die einstige Ausbreitung der Gletscher. Ohne sich der Fachausdrücke, die erst viel später eingeführt wurden, zu bedienen, zeichnet er ein klares Bild der wichtigsten Zusammenhänge. Es lohnt sich, dies im einzelnen etwas zu beleuchten.

8.1 Zur Metamorphose

Kuhn erkennt, daß sich Schnee in Firn und sich dieser in Gletschereis umwandelt. Damit stellt er einen

Hauptaspekt des Phänomens Gletscher an den Anfang, die Metamorphose. Da er diese lediglich als das Gefrieren von wassergetränktem Schnee auffaßt, sind seine Vorstellungen über deren Ablauf nur beschränkt richtig. Ohne Kenntnis der Vorgänge unter höherem Druck im Innern der Gletscher kommt er gestützt auf die Beobachtungen an der Gletscheroberfläche zum Schluß, daß sich das Gletschereis nicht auf den Gipfeln der Alpen bildet, sondern als Produkt eines milderen Klimas in tieferen Lagen anzusehen ist. Am richtigen Grundkonzept, daß sich Schnee, der in der Höhe gefallen ist, zum Gletschereis wandelt, ändert das unvollständige Erfassen der Umwandlungsprozesse nichts.

8.2 Zum Massenhaushalt

Es ist charakteristisch für Kuhns Vorgehen, daß sich eine Idee aus der anderen derart organisch entwickelt, daß die Einteilung in einzelne Themen nicht ohne Willkür gelingt. So führen ihn seine Argumente über Herkunft und Umwandlung von Gletschereis zur Gegenüberstellung von Nähr- und Zehrgebiet, und mit einer quantitativen Schätzung der Akkumulation ist im Ansatz sogar das Konzept des Massenhaushalts vorhanden. Kuhn schließt auf ein langfristiges Gleichgewicht und die Notwendigkeit der großräumigen Massenverlagerung. Ablation und Dickenänderung im Zungenbereich hat er zwar nicht sauber getrennt, aber er erkennt die Diskrepanz zwischen der totalen jahreszeitlichen Massenänderung und der Volumenzunahme an der Zunge im Sommer. Daraus gewinnt er ein zusätzliches Argument für die Massenverlagerung mittels Gletscherbewegung.

8.3 Zum Bewegungsmechanismus

Ohne sich explizit über die mechanischen Eigenschaften des Eises zu äußern, scheint sich Kuhn der doppelten Natur desselben bewußt gewesen zu sein. Er nimmt die plastische Verformung des gesamten Gletschers als naturgegeben hin und bezeichnet auch das Eis im Vergleich zu Granit als weich. Bei der Entwicklung seiner «Gewölbeeinsturztheorie» der Gletscherbewegung dagegen scheint er den Gletscher als weitgehend starren Körper zu betrachten, der, einmal genügend durch Schmelzung unterhöhlt, beim Bruch der verbleibenden Abstützungen ruckartig schräg nach vorwärts stürzt. In bezug auf die am Bett wirkenden Mechanismen war DE SAUSSURE der Wahrheit wesentlich näher, indem er der Wirkung von Wasser eine entscheidende Bedeutung beimaß (HEIM, 1885). Beide, de Saussure und Kuhn, waren Vertreter der «Gleitungstheorie». Für sie war die interne Eisdeformation sekundär, sie ermöglichte die Anpassung an die Talform. Mit der Kriechbewegung über den ganzen Querschnitt als der di-

rekten Wirkung der Schwerkraft haben sie aber nicht gerechnet. Auch die von Kuhn angenommene Kräfteübertragung auf die ganze Länge des Gletschers ist in der Vorstellung des Gletschers als starrer Körper begründet und in dieser Form unhaltbar. Zu bemerken ist immerhin, daß neuerdings der longitudinalen Ausbreitung der Kräfte mehr Gewicht beigemessen wird als während der vorausgehenden Jahrzehnte.

Wenn auch der von Kuhn postulierte Bewegungsmechanismus einen der schwachen Punkte seiner Arbeit darstellen mag, so sind seine Angaben über beobachtete Bewegungen und die Art, wie er die Gletscherbewegung im Zusammenhang mit den Moränen und dem Massenhaushalt sieht, bemerkenswert. Eindrücklich vor allem, wie er auf eine mehrjährige Diskrepanz zwischen Ernährung und Zungenwachstum schließt und daraus eine durchaus modern anmutende Eigendynamik des Gletschervorstoßes ableitet!

8.4 Zum Thema Gletscherbeben

Eigentlich gehören die Beben zum Thema Gletscherbewegung, doch scheint es mir gerechtfertigt, dieses Juwel der Schilderung eines kaum bekannten Naturereignisses gesondert zu würdigen. Vor allem gehe ich näher auf die Erscheinung ein, weil ich auf dem Gornergletscher mit Mitarbeitern zusammen ähnliche Beben erlebt habe, rund 2 km unterhalb des Zusammenflusses von Gorner- und Grenzgletscher. Am späten Nachmittag des 7. August 1974 waren A. Iken und ich am Rande einer Mühle (eines Strudelochs) rechts der Mittelmoräne mit Messungen beschäftigt. Unmittelbar nachdem ein dumpfes Donnerrollen, eher noch an eine entfernte Artilleriesalve erinnernd, eingesetzt hatte, erzitterte der Boden spürbar. Soweit feststellbar lief die Welle gletscherabwärts vorbei. Sogleich nach ihrem Durchgang waren ringsum und aus der Tiefe des Strudelochs zischende Geräusche zu vernehmen, und verbreitet spritzten feine Wasserstrahlen oder einzelne Tropfen etwa kniehoch von der Gletscheroberfläche in die Höhe. In kleinen Tümpeln stiegen anschließend noch Luftblasen hoch. Falls mich die Erinnerung nicht täuscht, war die Gletscheroberfläche zwischen den Tümpeln kurze Zeit später wie ausgetrocknet. Anscheinend war aus unzähligen Rissen oder Scherflächen unter Druck stehende Luft ausgetreten, die das an der Oberfläche in den Poren liegende Schmelzwasser in die Höhe schleuderte. Anschließend verschwand das Wasser zumindest teilweise in den Rissen. Im Sommer 1979 hatte ich abermals Gelegenheit, einem Beben beizuwohnen, doch stand ich auf der Mittelmoräne. Diese wurde von der Erschütterung nicht erfaßt, doch war das gletscherabwärts laufende dumpfe Grollen deutlich zu vernehmen, und der auf dem Gletscher

beschäftigte R. Bindschadler aus USA war gleichermaßen beeindruckt wie A. Iken und ich das erste Mal.

In beiden Fällen, beim unteren Eismeer und dem Gornergletscher, sind die Gletscherbeben in Kompressionszonen aufgetreten, die am Zusammenfluß von zwei in Steilstufen einmündenden Gletschern liegen. In dieser Zone ist anzunehmen, daß von den drei Hauptspannungen (des Spannungstensors) zwei senkrecht zueinander stehende Druckkomponenten parallel zur Oberfläche verlaufen, während senkrecht zur Oberfläche keine Spannung auftritt. (Eine tatsächlich beobachtete oberflächenparallele Abschabung steht mit dieser Spannungsverteilung im Einklang.) Die maximale Scherspannung tritt dann in zwei senkrecht zueinander liegenden Ebenen auf, die zur Oberfläche je einen Winkel von 45° bilden. Es ist nun denkbar, daß es während des Bebens in einer Vielzahl der potentiellen Schubflächen im elastisch gespannten Eis zum Bruch kommt und die in der Kompressionszone unter Druck stehenden Luftblasen längs der Bruchflächen austreten. Am Gornergletscher haben wir es verpaßt, das Vorhandensein und die Orientierung solcher Bruch- resp. Schubflächen festzustellen, aber bei seismischen Arbeiten auf der Zunge des Glacier de Breney habe ich beobachtet, daß durch eine erste kleine Sprengung künstlich ein lokales Beben ausgelöst wurde, bei dem schief einfallende Störungsflächen offensichtlich reaktiviert wurden. Kleinräumig wurde der oberflächliche Schmelzwasserabfluß augenblicklich verändert, vermutlich weil die in der Fallinie verlaufenden Rinnsale durch die frischen Querstörungen miteinander verbunden wurden.

Unsere eigene Erfahrung läßt das von Kuhn beschriebene Gletscherbeben in neuem Licht erscheinen. Viel eher als um ein Absacken des ganzen Gletschers an der Sohle hat es sich um die Bildung oberflächlich austretender Scherbrüche in der beschriebenen Art gehandelt. Ob Kuhns Deutung des in die Höhe geschleuderten Wassers als Ausquetschung aus wassergefüllten Spalten richtig ist, dürfte eher fraglich sein. Luftaustritt, wie er von uns beobachtet wurde, ist wahrscheinlicher. Da Kuhn durch das Beben zu Boden geworfen wurde, hat er den Vorgang kaum genau beobachten können.

8.5 Zu den Gletscherschwankungen

Für Kuhn sind Gletscherschwankungen ohne Zweifel auf Klimaänderungen zurückzuführen. Dabei sieht er im Niederschlag des Akkumulationsgebietes den entscheidenden Faktor, während er eigenartigerweise der Wirkung unterschiedlicher Sommertemperaturen keine Beachtung schenkt. Vermutlich hat ihn das ungehemmte und sogar beschleunigte Vorrücken der Grindelwaldgletscher im Sommer

derart beeindruckt, daß er den Einfluß der Ablation übersehen hat. Bezeichnenderweise versteht er denn auch die «rauhen Winde» usw. als Folge, nicht als eine der Ursachen des Gletschervorstoßes.

Obwohl Kuhn den Maximalstand der Grindelwaldgletscher von 1600 als mutmaßlich größte je erreichte Ausdehnung deutet, ist er als Begründer der Eiszeittheorie in die glaziologische Literatur eingegangen. Dies erklärt sich aus einem falsch interpretierten Zitat aus dem Handbuch der Gletscherkunde von Albert Heim (1885). Auf Seite 340 nennt dieser zwar Kuhn als einen der Forscher, die sich des Transports der Obermoränen durch den Gletscher bewußt waren, setzt aber den Beginn der Eiszeittheorie auf später an. Auf Seite 533 würdigt er dann Kuhns Aufsatz in Höpfners Magazin im Rahmen der Geschichte der Gletscherkunde: «In kurzer scharfer Weise beschreibt Kuhn die Gestalt und Struktur der ihm bekannten Grindelwaldnergletscher, erklärt die Bewegung durch den Druck der oben liegenden Firnmassen, erörtert die Entstehung der Moränen und verfolgt alte Moränen weit über das jetzige Eisgebiet hinaus, als der Erste daraus auf einstige ungewöhnlich große Ausdehnung der Gletscher schließend.» Der fehlende Hinweis, daß es sich bei dieser großen Ausdehnung um den 1600er-Vorstoß handelt, hat denn auch zum später verbreiteten Irrtum geführt (F. RÖTHLISBERGER, 1986).

Es ist bedauerlich, daß ob Kuhns falsch zitierter Aussage über die einstige Ausbreitung der Gletscher die viel allgemeinere Bedeutung seines Aufsatzes nicht gebührend beachtet worden ist. Auch wenn seine Ansichten durch die viel berühmteren Veröffentlichungen eines de Saussure und anderer Autoren beeinflusst waren (KUHN, 1788), steht doch außer Zweifel, daß er nur Dank eigener Beobachtung und intuitiver Erfassung der wichtigsten Zusammenhänge seine abgerundete Schilderung der Gletscher als Naturerscheinung verfassen konnte. Sein Aufsatz über den Mechanismus der Gletscher verdient als wichtiger Markstein in der Geschichte der Gletscherkunde unsere Anerkennung.

Literatur

HEIM, A. (1885): Handbuch der Gletscherkunde, Stuttgart.

KUHN, B. F. (1787): Versuch über den Mechanismus der Gletscher. Magazin für die Naturkunde Helvetiens, ed. A. Höpfner, Bd. 1, 117–136.

KUHN, B. F. (1788): Nachtrag zu dem Versuche über den Mechanismus der Gletscher im ersten Bande dieses Magazins. Magazin für die Naturkunde Helvetiens, ed. A. Höpfner, Bd. 3, 427–436.

RÖTHLISBERGER, F. (1986): Die Eiszeittheorie – Geburt mit vielen Wehen. Die Alpen, Jg. 62, 4. Quartal, 215–229.