

Die Höhe der Firnlinie am Hüfigletscher
und die
Methode der Bestimmung der Höhe der Firnlinie
im allgemeinen.

Von
ED. BRÜCKNER in Halle a/S.

In seiner verdienstlichen Untersuchung des Hüfigletschers kommt G. A. Voskule auch auf die Höhe der Firnlinie an diesem Gletscher zu sprechen¹⁾; er bestimmte sie zu 2650 m. Die Höhe des Gletscherendes über dem Meer beträgt nach ihm 1465 m; die mittlere Randhöhe der Firnmulde findet er „aus 29 exakten Höhenzahlen“ zu 3024 m. Er fährt dann fort: „Aus den angegebenen Zahlen sehen wir, dass die Höhendifferenz zwischen mittlerer Randhöhe und Firnlinie 374 m beträgt und zwischen der Firnlinie und der Höhe des Gletscherendes 1185 m. . . . Nach Brückner sollen die Differenzen gleich sein, das heisst, die Firnlinie sollte bei 2244 m Meereshöhe liegen.“ Voskule spricht sich hier gegen die von R. Zeller und J. Jegerlehner auf meine Veranlassung auf die Gletscher der Schweiz angewandte Kurowskische Methode der Bestimmung der Höhe der Schneegrenze aus²⁾ und glaubt sie am Hüfigletscher ad absurdum geführt zu haben. Doch liegt der Fehler nicht an der Methode von Kurowski, sondern an Herrn Voskule, der jene Methode völlig missverstanden und falsch angewendet hat. Da mit der Methode von Kurowski, wenigstens zum Teil, die Resultate von Zeller und Jegerlehner über die Schneegrenze an den heutigen Gletschern der Schweiz, ferner auch meine Resultate über die Höhe der Schneegrenze an den quartären Gletschern der Schweiz in verschiedenen Stadien ihres Rückganges stehen oder fallen, möchte ich hier das Missverständnis von

¹⁾ Diese Zeitschrift XLIX 1904 S. 43.

²⁾ L. Kurowski. Die Höhe der Schneegrenze mit besonderer Berücksichtigung der Finsteraarhorngruppe. Geogr. Abhandlungen Bd. V, Heft 1, S. 124. Wien 1891.

R. Zeller. Die Schneegrenze im Triftgebiet. XI. Jahresbericht der geograph. Gesellschaft von Bern. Bern 1893.

J. Jegerlehner. Die Schneegrenze in den Gletschergebieten der Schweiz. Beiträge zur Geophysik V. S. 486. Leipzig 1902.

Voskule berichtigen, indem ich die von uns angewandte Methode klarlege.

Kurowski fand, als er für eine Reihe von Gletschern des Oetztals die mittlere Höhe bestimmte, dass diese mittlere Höhe der Höhe der Schneegrenze oder Firnlinie entsprach. Darauf baute er seine in den oben erwähnten Arbeiten zur Anwendung gekommene Methode auf; sie lässt sich kurz in den Worten zusammenfassen: Die mittlere Höhe eines Gletschers ist gleich der Höhe seiner Firnlinie; um die letztere zu finden, braucht man also nur die mittlere Höhe der Gletscheroberfläche festzustellen. Als mittlere Höhe der Gletscheroberfläche ist dabei die wahre mittlere Höhe zu verstehen, d. h. das Mittel der Höhen aller Differentiale der Oberfläche des Gletschers. Vorstellen kann man sich diese mittlere Höhe einfach in folgender Weise: Man denke sich den Gletscher mitsamt seinem Felssockel durch eine vertikale Fläche, die genau den Umrissen des Gletschers folgt, aus dem Gebirgsstock herausgeschnitten. Wir haben dann ein Prisma vor uns, dessen Basis der Horizontalprojektion des Gletschers auf das Meeresniveau entspricht, während die obere Begrenzungsfläche von der faktischen Gletscheroberfläche, also von einer krummen wind-schiefen Fläche gebildet wird. Die mittlere Höhe dieser Fläche kann man dadurch erhalten, dass man von den hochragenden Partien des Prismas oben Masse weggenommen und auf die tiefliegenden geschüttet denkt, bis beide gleiche Höhe besitzen; man denkt sich also die Oberfläche des Prismas planiert, ohne dass das Volumen des Prismas sich ändert. Es ist dann die mittlere Höhe der Gletscheroberfläche gleich der Höhe des planierten Prismas. Wie diese Planierung mit Hilfe der hypsographischen Kurve sehr einfach ausgeführt werden kann, ist in den oben angeführten Publikationen, besonders der von Zeller, dargelegt.

Was macht nun Voskule? Er nimmt das Mittel der Höhen von 29 Punkten des Kammes, der die Firmulde des Hüfigletschers umgibt, ferner die Höhe des Gletscherendes und glaubt im arithmetischen Mittel aus diesen beiden Zahlen die mittlere Höhe der Gletscheroberfläche zu haben. Es liegt auf der Hand, dass der so erhaltene Wert sich sehr weit vom wahren Wert der mittlern Höhe entfernen kann. Ist die Gletscheroberfläche, insbesondere das Längsprofil des Gletschers im Bereich der Gletscherzunge, nach oben konkav, so wird der auf Voskules Weg gefundene Wert über der wahren mittlern Höhe liegen; ist die Gletscheroberfläche, vor allem das Längsprofil der Zunge, nach oben konvex, so wird Voskules Wert weit unter die wahre mittlere Höhe fallen. Letzteres trifft für den Hüfigletscher zu.

Jegerlehner¹⁾ hat nun schon zwei Jahre vor Voskules Arbeit die wahre mittlere Höhe des Hüfigletschers bestimmt, was Voskule entgangen ist; er fand sie und damit die Höhe der Firnlinie am Hüfigletscher zu 2670 m. Man vergleiche: Voskule findet die Firnlinie durch direkte Beobachtung in 2650 m, Jegerlehner aus der mittleren Höhe der Gletscheroberfläche in 2670 m, Differenz nur **20 m**. Eine bessere Übereinstimmung kann man nicht wünschen. So komme ich zu dem genau entgegengesetzten Resultate wie Voskule: Die mit Hilfe der mittleren Höhe der Gletscheroberfläche bestimmte Höhe der Firnlinie stimmt am Hüfigletscher trefflich mit der durch direkte Beobachtung gefundenen überein. Diese Übereinstimmung zwischen der direkt bestimmten Firnlinie und der nach der Kurowskischen Methode gefundenen hat sich überall gezeigt. Die nach Kurowskis Methode gefundenen Höhen stimmen auch, wie Jegerlehner an vielen Gebieten der Schweiz dargetan hat, sehr gut mit denen überein, die durch Verfolgen der Verbreitung kleiner Gletscher, also mit der sogenannten Gipfelmethode, gewonnen werden. Diese Methode basiert auf folgender einfacher Überlegung: Gipfel, welche kleine Gletscher tragen, ragen etwas über die Schneegrenze heraus; etwas niedrigere, die keine Gletscher tragen, liegen darunter. So lässt sich durch Grenzen von unten und oben die Höhe der Firnlinie sehr zuverlässig feststellen.

Wenn Kurowskis Methode so gute Resultate ergibt, so ist das keinesweg Zufall, viel mehr hat sie theoretisch durchaus ihre Berechtigung. Den Nachweis, dass die mittlere Höhe der Gletscheroberfläche sehr angenähert gleich der Höhe der Firnlinie sein muss, hat Kurowski selbst erbracht; ich habe den Beweis bei Gelegenheit einer Besprechung der Kurowskischen Arbeit in etwas anderer Form wiederholt und auch Zeller gibt ihn. Da dieser Nachweis trotzdem oft übersehen und Kurowskis Methode als rein empirische Methode nicht so gewürdigt wird, wie sie es verdient, so sei der Beweis hier nochmals vorgeführt.

Die Firnlinie oder Schneegrenze eines Gletschers ist diejenige Linie, entlang deren im Laufe eines Jahres genau ebenso viel Schnee fällt als geschmolzen werden kann; oberhalb überwiegt der Schneefall über die Abschmelzung, unterhalb herrscht Abschmelzung vor. Wie an der Schneegrenze Gleichgewicht zwischen Schneefall und Schneeschmelze besteht, so fällt auch auf die Oberfläche eines stationären Gletschers²⁾

1) Beiträge zur Geophysik V, Leipzig 1902, S. 548, Nr. 262.

2) Über den Begriff des stationären Gletschers vergl. Finsterwalder, der Vernagtletscher. Wissenschaftliche Ergänzungshefte zur Zeitschrift des deutschen und österreichischen Alpenvereins. Graz 1897.

genau ebenso viel Schnee als auf derselben geschmolzen werden kann. Es herrschen also auf seiner Oberfläche in ihrer Gesamtheit dieselben Verhältnisse wie längs der Schneegrenze. Daher darf man a priori schliessen, dass eine ganz bestimmte Beziehung zwischen der Gletscheroberfläche und der Höhe der Schneegrenze vorhanden sein muss. Diese Beziehung lässt sich in der Tat deduktiv entwickeln.

Schneeiger Niederschlag n und Ablation a sind Funktionen der Höhe h , die wir darstellen können durch $f_n [h]$ und $f_a [h]$. In der Höhe h_s der Schneegrenze gilt dann die Gleichung:

$$f_n [h_s] = f_a [h_s] \text{ oder } f_n [h_s] - f_a [h_s] = 0$$

oder, indem man die Gleichung mit einer positiven endlichen Grösse m multipliziert,

$$m f_n [h_s] - m f_a [h_s] = 0.$$

Zu einer ganz ähnlichen Gleichung kommen wir auch für den ganzen Gletscher, sofern dieser stationär ist, d. h. weder vorrückt noch sich zurückzieht, so dass ein vollständiges Gleichgewicht zwischen Schneezufuhr und Abschmelzung besteht. Denken wir uns die ganze Gletscheroberfläche in m gleichgrosse Teilchen zerlegt, so ist der Schneefall auf einem beliebigen Teilchen eine Funktion seiner Höhe, also gleich $f_n [h_x]$. Die gesamte Menge N des schneeigen Niederschlages, die auf alle m Teile der Gletscheroberfläche fällt, ist sonach

$$N = \sum_{x=1}^{x=m} f_n [h_x].$$

Ganz entsprechend ist die Abschmelzung A auf dem ganzen Gletscher

$$A = \sum_{x=1}^{x=m} f_a [h_x].$$

Für einen stationären Gletscher gilt dann

$$N = A \text{ oder } N - A = 0.$$

Setze ich hier die Werte für N und A ein, so erhalte ich

$$\sum_{x=1}^{x=m} \left(f_n [h_x] - f_a [h_x] \right) = 0.$$

Dann ist also auch

$$m f_n [h_s] - m f_a [h_s] = \sum_{x=1}^{x=m} \left(f_n [h_x] - f_a [h_x] \right).$$

Diese Gleichung gilt ganz allgemein und besagt: wenn die Funktionen bekannt sind, die die Abhängigkeit des schneeigen Niederschlages und der Ablation von der Meereshöhe darstellen, so lässt sich für einen stationären Gletscher die Höhe der Schneegrenze einfach berechnen.

Was wir nun über die Änderung der Ablation und des schneeigen Niederschlages mit der Höhe wissen, lehrt uns, wie Kurowski im einzelnen ausführt, dass beide im wesentlichen der Höhenabnahme bezw. Höhenzunahme proportional sind und sich sonach durch die Gleichungen

$$n = t + u h \quad a = o + p h$$

darstellen lassen, worin t , u , o und p Konstante sind.

Es geht daher unsere obige Gleichung in die Form über:

$$m ([t + u h_s] - [o + p h_s]) = \sum_{x=1}^{x=m} ([t + u h_x] - [o + p h_x])$$

oder umgeordnet, wobei t , o , u und p fortfallen:

$$h_s = \frac{1}{m} \sum_{x=1}^{x=m} h_x.$$

Der Ausdruck rechts ist nun offenbar nichts anderes als die mittlere Höhe der Gletscheroberfläche. Es ergibt sich also: Wenn die Menge des Schnees genau proportional der Höhe zunimmt und die Intensität der Ablation ebenso abnimmt, so muss die mittlere Höhe der Gletscheroberfläche genau gleich der Höhe der Schneegrenze sein.

Ganz streng besteht nun nicht ein arithmetisches Verhältnis zwischen schneeigem Niederschlag, bezw. Ablation und Meereshöhe. Es nimmt vielmehr der schneeige Niederschlag langsamer als die Höhen zu und andererseits die Ablation rascher ab. Man kann dieser Tatsache dadurch gerecht werden, dass man den schneeigen Niederschlag proportional der Quadratwurzel aus der Seehöhe und ebenso die Ablation umgekehrt proportional der Quadratwurzel aus der Seehöhe setzt. Doch ändert sich der resultierende Wert für die Höhe der Firnlinie nur um einen geringen Betrag, bei einem von Kurowski durchgerechneten Beispiel nur um 25 m. Es ist bemerkenswert, dass dort, wo von einem Gletscher die Firnlinie durch längere direkte Beobachtung und aus der mittlern Höhe der Gletscheroberfläche bestimmt wurde, der letztere Wert stets um einen kleinen Betrag, beim Hüfigletscher wie wir sahen um 20 m, höher liegt als der erste. Innerhalb dieser engen Fehlergrenze gibt also Kurowskis Methode richtige Resultate.