

Tafel 3.9 Permafrost

Einleitung

Dauernd gefrorener Boden, so die wörtliche Übersetzung von «Permafrost», ist vor allem aus Sibirien und Alaska bekannt. In den Alpen wird dieses Temperaturphänomen seit den 1970er Jahren intensiver untersucht. Bildlich lässt sich die Entstehung des Permafrostes wie folgt erklären: Wird die während des Winters im Boden gespeicherte Kälte im Sommer nicht vollständig ausgeglichen, bleiben die Temperaturen unterhalb einer bestimmten Tiefe, dem sogenannten Permafrostspiegel, das ganze Jahr hindurch kälter als 0°C. Nur im obersten Teil, in der Auftauschicht, steigen die Werte im Sommer über den Gefrierpunkt. Darunter – und somit nicht direkt sichtbar – befindet sich der eigentliche Permafrost. Zwar steigt die Temperatur mit zunehmender Tiefe aufgrund des Erdwärmeflusses an; positive Werte werden jedoch erst wieder in der Tiefe der Permafrostbasis erreicht.

Permafrost ist in erster Linie über die Temperatur definiert. Das Eis im Permafrost, das sich aus unterkühltem Wasser bildet, ist lediglich eine Folgeerscheinung. Dementsprechend gibt es auch trockenen Permafrost, welcher kaum Eis enthält.

Verbreitung des Permafrostes in den Alpen

Generell muss bereits oberhalb der Waldgrenze mit Permafrost gerechnet werden. Neben der mittleren jährlichen Lufttemperatur bestimmt vor allem die einfallende Strahlung die Verbreitung von Permafrost. An nordexponierten Hängen tritt Permafrost deshalb in tieferen Höhenlagen auf als an südexponierten Hängen. Weitere massgebliche Faktoren sind Schnee, Oberflächenbeschaffenheit und Wasserangebot.

Mitte der 1970er Jahre wurden Faustregeln für die Abschätzung der Permafrostverbreitung abgeleitet. Diese wurden zwanzig Jahre später mittels Geographischer Informationssysteme (GIS) umgesetzt und je nach Region angepasst. Es gibt somit verschiedene statistische Modelle [2], welche die Permafrostverbreitung auf der Basis eines digitalen Höhenmodells mit unterschiedlichem räumlichem Detaillierungsgrad abschätzen. Dabei wird jede Zelle bezüglich Höhe über Meer, Exposition und spezieller Lage (z.B. Hangfuss) analysiert. In einem weiteren Modell wird die Höhe durch die mittlere Jahrestemperatur und die Exposition durch die direkte Strahlung ersetzt [4]. In [2] wurden diese Modelle auf dieselbe Testregion angewandt und verglichen. Das auf der Kartenseite dargestellte wahrscheinliche Auftreten von Permafrost wurde mittels dreier regional verschiedener Modelle berechnet. Insgesamt umfasst Permafrost rund 4 bis 6% der Fläche der Schweiz, was etwa der doppelten Gletscherfläche entspricht.

Blockgletscher

Permafrost erkennt man besonders gut, wenn er sich im Lockermaterial gebildet hat, das vom Eis in den Porenräumen auseinandergedrückt wird. Oft wird dadurch der Porenraum zusätzlich vergrößert, und man spricht von eisübersättigtem Material. Für die Eigenschaften eines solchen Schutt-Eis-Gemisches spielt das Eis eine wichtige Rolle. Bei geneigter Topographie beginnt der Permafrost allmählich zu kriechen und bildet charakteristische lavastrom-ähnliche Formen. Diese werden Blockgletscher genannt, auch wenn sie weder ihre Entstehung noch ihr Verhalten mit Gletschern gemein haben.

Blockgletscher sind typischerweise einige hundert Meter lang; ihre Oberfläche ist mit grobem Schutt bedeckt. Sie bewegen sich mit einigen Dezimetern pro Jahr talwärts (s. Fig. 1). Da diese Geschwindigkeiten zum Rand hin meist abnehmen, entstehen typische Fließmuster. Die Stirn und die seitlichen Ränder sind oft sehr steil (bis 40°) und von grossen, groben Blöcken bedeckt. Diese fallen gelegentlich hinunter und lagern sich als sogenannte Schürze unten an. Dazwischen entsteht eine Zone aus Feinmaterial, in welcher sich bei inaktiven Blockgletschern erste

Vegetation bilden kann. Bei aktiven Blockgletschern werden die Pflanzen durch die Bewegung des Blockgletschers und den Steinschlag zerstört. Fossile Blockgletscher enthalten zumeist kein Eis mehr, sind entsprechend zusammengefallen und stark bewachsen. Eine Auswahl leicht identifizierbarer, zugänglicher Blockgletscher aller drei Kategorien (aktiv, inaktiv, fossil) ist in der Tabelle ausgewiesen.

Ausaperungsprozesse sowie hydrologische Bedeutung des Permafrostes

In gefrorenem Lockerschutt wird die Hydrologie durch den praktisch undurchlässigen Permafrostkörper wesentlich beeinflusst. Weiter bestehen Wechselwirkungen zwischen dem Permafrost und der Ausaperung. So findet die Schneeschmelze in Permafrostgebieten etwa 15 bis 20 Tage später statt [6].

In zwei Untersuchungsgebieten werden diese Aspekte näher untersucht: Hauptforschungsobjekt im Gebiet Furggentälti [7] ist ein Blockgletscher von 350 m Länge am Nordfuss der Plattenhörner (s. Photographie). Er ist zur Zeit sehr aktiv; seine Stirn stösst pro Jahr mit durchschnittlich 40 cm vor. Zwischen 1960 und 1992 verlor er insgesamt 48 000 m³ an Masse (Eis), wobei sich die jährliche Schmelzrate zwischen 1985 und 1992 gegenüber den vorangegangenen 25 Jahren vervierfacht hat. Felduntersuchungen haben ergeben, dass sich der Permafrost hauptsächlich auf jene Bereiche beschränkt, die relativ wenig Direktstrahlung erhalten (Fig. 4).

Mittels einer automatischen Kamera wird die Ausaperung im Bereich des Blockgletschers dokumentiert (Fig. 6). Die Schneeschmelze setzt im Frühjahr jeweils zu verschiedenen Zeitpunkten ein und verläuft unterschiedlich schnell (Fig. 7). Dennoch gleicht sich das Muster der Ausaperung jedes Jahr stark (Fig. 5). Es wird nämlich hauptsächlich durch Geländewölbung, Windverfrachtung, Strahlung und die Bodentemperaturen (Permafrost!) bestimmt. Umgekehrt erlaubt das Verfolgen der Ausaperung in Kombination mit der Strahlung Rückschlüsse auf die Permafrostverbreitung.

Im Untersuchungsgebiet Vallon de Réchy wird der Abfluss seit 1988 in zwei Teileinzugsgebieten beobachtet (Fig. 8, [1]). Rund 90% des 20.5 ha grossen Gebietes 2 liegen im Permafrost. Es umfasst auch den südwestlichen Teil des Blockgletschers Becs de Bosson. Der grössere Anteil dieses Blockgletschers befindet sich allerdings im Gebiet 1, das eine Fläche von 76 ha aufweist und in dem der Anteil der Permafrostzone rund 50% beträgt. Wie Figur 8 verdeutlicht, ist der Flächenanteil des alpinen Rasens im Gebiet 2 wesentlich kleiner als im Gebiet 1.

Die Hydrologie wird durch die tiefen Temperaturen (1993–1997: Jahresmittel -1°C), die spärliche Vegetation und den Permafrost geprägt. So liegt die Jahresverdunstung bei ca. 300 mm (vgl. Tafel 4.1). Charakteristisch ist die markante Saisonalität der hydrologischen Prozesse. Die Abflüsse besitzen ein nival geprägtes Regime mit kleinen Abflüssen im Winter und – infolge der Schneeschmelze – grossen Abflussmengen zwischen Mai und August. Im Vergleich der beiden Abflussganglinien in Figur 9 gelangen die Unterschiede der beiden Gebiete deutlich zum Ausdruck. Das vom Permafrost dominierte Gebiet 2 weist deutlich höhere Abflussmengen auf. Das Schmelzwasser fliesst in der Auftauschicht über dem Permafrostkörper oberflächennah ab (vgl. Fig. 10) und speist die am Rande des Blockgletschers gelegenen Quellen. Im Gebiet 1 sind die Speicherungsmöglichkeiten dank des grösseren Anteils von Flächen ohne Permafrost wesentlich besser; dies führt zu deutlich geringeren Abflussmengen. Es ist zudem möglich, dass ein Teil des Gebietes 1 – insbesondere im Bereich des Blockgletschers – unterirdisch ins Gebiet 2 entwässert. Der vergleichsweise hohe Basisabfluss aus dem Gebiet 2 entstammt vermutlich einem unter dem Blockgletscher gelegenen Reservoir.

Blockgletscher Murtèl-Corvatsch (Engadin)

Im Rahmen eines Forschungsprojektes wurde im Jahre 1987 eine 60 m tiefe wissenschaftliche Bohrung durch den Blockgletscher Murtèl-Corvatsch durchgeführt [3]. Bohrkerne wurden entnommen, geophysikalische Messungen im Bohrloch durchgeführt und Instrumente für weitere,

langfristige Beobachtungen installiert (Fig. 2). Die Bohrung ermöglichte einen erstmaligen Einblick in den inneren Aufbau von kriechendem Permafrost [8].

Die Oberfläche des Blockgletschers besteht aus Blöcken unterschiedlichen Durchmessers (Zentimeter bis einige Meter). Wie das Dichteprofil in Figur 2 verdeutlicht, folgt unterhalb dieser ungefähr 3 m mächtigen Schicht bis in eine Tiefe von 30 m fast reines Eis. Zwischen 30 m und 57 m dominieren wiederum Gesteinsblöcke, deren Zwischenräume mit Eis gefüllt sind. In 57 m Tiefe wurde der anstehende Fels erbohrt.

Bei der Bohrstelle kriecht der Permafrost an der Oberfläche mit 6 cm pro Jahr talwärts. Die Messungen der Bohrlochdeformation zeigen, dass der grösste Teil der Bewegung (4 cm pro Jahr) dem Scherhorizont zwischen 28 m und 30 m Tiefe entstammt (Fig. 2).

Spezielle, hochauflösende Techniken analytischer Luftbildphotogrammetrie erfassen die räumlichen Veränderungen der Permafrostoberfläche (Fig. 1). Die so bestimmte Oberflächenbewegung am Bohrloch stimmt sehr gut mit Bohrlochmessungen überein. Durchschnittlich sank die Oberfläche des Blockgletschers zwischen 1987 und 1996 um 4 cm pro Jahr ein. Die maximalen horizontalen Kriechgeschwindigkeiten betragen rund 15 cm pro Jahr. Das Fließfeld lässt auf ein Alter des Blockgletschers in der Grössenordnung von 10 000 Jahren schliessen [5].

Die Temperaturen zwischen 3.5 m und rund 50 m Tiefe liegen ganzjährig unter 0°C. Die Jahresschwankungen sind bis in eine Tiefe von 20 m zu beobachten (Fig. 3). Zwischen 52 m und 56 m Tiefe treten überraschenderweise ebenfalls jahreszeitliche Schwankungen auf, während darunter wiederum stabile, negative Temperaturen registriert werden. Dies deutet auf eine jeweils im Sommer aktive Grundwasserströmung innerhalb des Permafrostkörpers hin. Die obersten 30 m erwärmten sich zwischen 1987 und 1994 stark. Die beiden Winter 1994/95 und 1995/96 waren im Engadin schneearm. Die dünne Schneedecke wirkte somit kaum isolierend, weshalb die Winterkälte fast ungehindert in den Boden eindringen konnte. Die Temperatur in 11.6 m Tiefe erreichte demnach 1996 ähnliche Werte wie 1987 und steigt seither wieder an (Fig. 3).

Literatur

- [1] **Gardaz, J.-M. (1999):** Permafrost prospecting, periglacial and rockglacier hydrology in mountain areas: Cases studies in the Valais Alps, Switzerland. University of Fribourg, Fribourg.
- [2] **Haeberli, W. et al. (1996):** Simulation der Permafrostverbreitung in den Alpen mit Geographischen Informationssystemen. Arbeitsbericht NFP 31, Zürich.
- [3] **Haeberli, W. et al. (1998):** Ten years after drilling through the permafrost of the active rock glacier Murtèl, Eastern Swiss Alps: answered questions and new perspectives. In: Seventh International Conference on Permafrost, Yellowknife, Canada. Proceedings:403–410, Collection Nordicana, N° 57, Laval.
- [4] **Hölzle, M. (1994):** Permafrost und Gletscher im Oberengadin. Grundlagen und Anwendungsbeispiele für automatisierte Schätzverfahren. Mitteilung der VAW, Nr. 132, Zürich.
- [5] **Käab, A. (1998):** Oberflächenkinematik ausgewählter Blockgletscher des Oberengadins. In: Beiträge aus der Gebirgs-Geomorphologie. Jahrestagung 1997 der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft. Mitteilung der VAW, Nr. 158:121–140, Zürich.
- [6] **Keller, F. (1994):** Interaktion zwischen Schnee und Permafrost. Eine Grundlagenstudie im Oberengadin. Mitteilung der VAW, Nr. 127, Zürich.
- [7] **Krummenacher, B. et al. (1998):** Periglaziale Prozesse und Formen im Furggentälti, Gemmipass. Mitteilung Nr. 56, Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- [8] **Vonder Mühl, D. (1993):** Geophysikalische Untersuchungen im Permafrost des Oberengadins. Mitteilung der VAW, Nr. 122, Zürich.