

## 2.3 Schnee, Gletscher und Permafrost

Die Klimaänderung wirkt sich deutlich auf die Kryosphäre aus. Weltweit betrachtet manifestieren sich die Folgen deutlich in den zwei Eisschilden (Grönland/Antarktis), im Meer-, See- und Flusseis sowie in den auch in der Schweiz weit verbreiteten Komponenten Schnee, Gletscher und Permafrost. Allen gemeinsam ist ihre Reaktion auf Änderungen von Temperatur und/oder Niederschlag. Der Wandel der Kryosphäre wirkt sich in der Schweiz auf verschiedene Bereiche von Umwelt, Wirtschaft und Gesellschaft aus. Stark betroffen sind Winter- und Skitourismus, Wasserkraft und die Sicherheit von Siedlungen, Infrastruktur und Transportwegen in alpinen Gebieten. Anpassungsmassnahmen, die mit gewichtigen Kosten verbunden sind, werden zunehmend notwendig.

*Christian Huggel (Universität Zürich), Christoph Marty (SLF), Jeannette Nötzli (Universität Zürich, \*neu SLF), Frank Paul (Universität Zürich)*

### Nationale Situation

#### Auswirkungen auf den Winter- und Skitourismus

In tieferen Lagen der Schweiz konnte in den letzten Jahrzehnten ein klarer Rückgang der Schneedeckendauer beobachtet werden, in hohen Lagen (über 2000 Metern) jedoch nicht. Mit der fortschreitenden Erwärmung wird sich in Zukunft die Schneesaison je nach Höhenlage um mehrere Wochen verkürzen und die Schneegrenze um mehrere hundert Meter nach oben verschoben. Die erwartete Erwärmung und die damit einhergehende Zunahme der Regen- statt Schneefälle (Serquet et al. 2011) wird sich substantiell auf den Winter- und Skitourismus auswirken (s. a. Kap. 2.11 Tourismus, S. 117). Im Kanton Graubünden etwa werden ohne weitere künstliche Beschneigung die Anzahl der schneesicheren Skigebiete abnehmen. Als schneesicher werden Gebiete bezeichnet, die mindestens in sieben von zehn Jahren mehr als 100 Tage im Jahr mindestens 30 Zentimeter Schnee aufweisen. In einem Szenario ohne explizite Massnahmen zum Klimaschutz (kurz: Referenzszenario) SRES-A2 (s. a. Kap. 1.5 Szenarien für die zukünftigen Treibhausgasemissionen, S. 38) und ohne künstliche Beschneigung verringert sich die Zahl der schneesicheren Skigebiete bis 2035 um rund 20 Prozent, bis 2085 um mehr als die Hälfte. Auch mit künstlicher Beschneigung nehmen die schneesicheren Gebiete ab – mit rund 25 Prozent bis ins Jahr 2085 aber weniger stark. Um die Schneesicherheit für Skigebiete weiterhin zu gewährleisten, müsste die künstliche Beschneigung – sofern überhaupt noch möglich – bis Ende des Jahrhunderts verdreifacht werden (Abegg et al. 2013; CH2014-Impacts 2014). Andererseits könnte aufgrund zunehmend fehlender Winterstimmungen im Unterland die Nachfrage nach klassischem Wintertourismus abnehmen.

#### Auswirkungen auf Wasserverfügbarkeit und Wasserkraftwerke

Das starke Abschmelzen der Gletscher und die Veränderungen der Schneedecke wirken sich auch auf die Wasserverfügbarkeit sowie den Energiesektor mit seinen Wasserkraftwerken aus. Auch wenn der globale Temperaturanstieg auf zwei Grad Celsius (gegenüber vorindustriellem Niveau) begrenzt werden kann, gehen Modellrechnungen im Vergleich zum Jahr 2000 immer noch von einem Gletschermassenverlust von etwa 50 Prozent bis 2050 und etwa 75 Prozent bis 2100 aus (Salzmann et al. 2012).

Im Zuge der zukünftigen Veränderungen der Schneedecke könnte die als Schnee gespeicherte Wassermenge um bis zu zwei Drittel kleiner werden, was zu einem geringeren Abfluss vor allem im Frühling und Sommer führen würde (Schmucki et al. 2015). Die grösste Unsicherheit dieser Projektionen liegt im Hochgebirge, weil dort die unsichere Niederschlagsentwicklung im Winter einen Teil der Erwärmung kompensieren könnte, zumindest falls mehr davon als Schnee fallen sollte.

Genaue Aussagen zur zukünftigen Entwicklung des Abflusses aus vergletscherten Gebieten sind deshalb mit Unsicherheiten behaftet. Ob sich in den kommenden zwei bis drei Jahrzehnten ein Anstieg des Abflusses ergibt, hängt von der Vergletscherung des Einzugsgebietes und weiteren Faktoren ab. Sind die Gletscher gross und dick, kann die Erhöhung der Schmelze durch Dickenabnahme die Verringerung der Schmelze durch Flächenabnahme überwiegen und der Abfluss wird noch einige Jahrzehnte zunehmen. Es lässt sich jedoch mit grosser Sicherheit sagen, dass der durch die Gletscherschmelze beeinflusste Abfluss im Sommer nach Mitte des Jahrhunderts abnehmen und sich die Abflussspitzen vom Hochsommer in den Frühsommer verschieben werden (Huss 2011).

**Abbildung 2.4:** Als Folge des Gletscherschwundes sind zahlreiche neue Seen in den Alpen entstanden, wie zum Beispiel der See am Triftgletscher (Bild unten) – und weitere werden dazu kommen. Dies führt für die Nutzung der Wasserkraft und für den Tourismus zu neuen Fragen im Umgang mit Risiken, Nutzung und Bewirtschaftung. Diese wurden etwa im Nationalen Forschungsprogramm 61 (NFP61) untersucht. Die Erwärmung der Permafrostböden führt zu Bewegungen an der Oberfläche, welche die Infrastruktur in hochalpinen Gebieten beschädigen können (zum Beispiel Lawinverbauungen oder Seilbahnstationen). Als Anpassungsmassnahme werden «schwimmende Fundamente» eingeführt. Das Bild rechts zeigt ein Beispiel oberhalb von Randa im Mattertal. (Quelle: Jürg Alean, SwissEduc.ch [Foto unten] und Marcia Phillips [Foto oben])



Inzwischen liegen auch einzelne Modellstudien zum Einfluss von Klimawandel und Gletscherschmelze auf die Speicherseen vor. Diese sagen eine erhebliche Abnahme des Sommerabflusses in stark vergletscherten Einzugsgebieten schon in der Mitte des 21. Jahrhunderts voraus (Finger et al. 2012), basieren allerdings nur auf der Abnahme der Gletscherfläche. Mit abnehmendem Sommerabfluss muss gegebenenfalls die Bewirtschaftung der Speicherseen und Kraftwerke angepasst werden. Neue Gletscherseen, die beim Abschmelzen der Gletscher im Gletscherbett entstehen können, könnten – falls wirtschaftlich sinnvoll, gesellschaftlich akzeptiert und ökologisch unbedenklich – in bestehende Kraftwerkssysteme integriert werden (NELAK 2013; ACQWA 2013). Effektiv haben sich bereits in den vergangenen Jahren zahlreiche Gletscherseen neu gebildet oder bestehende Seen weiter vergrössert (z. B. am Rhone- und am Triftgletscher). Damit verbundene konkrete Studien und Projekte für einen Ausbau der Wasserkraft wurden bereits durchgeführt und liegen vor, so etwa für den Triftgletscher im Berner Oberland (Abb. 2.4).

## Auswirkungen auf Hangstabilität und Geschiebe

Wie schwindende Gletscher hat auch auftauender Permafrost Auswirkungen auf die Hanginstabilität und Sedi-mentfracht in den alpinen Gebieten der Schweiz. Anders als bei den Gletschern sind systematische Messreihen von Untergrundtemperaturen in den alpinen Permafrostgebieten noch relativ kurz. Erste Messungen in Blockgletschern (gefrorene, kriechende Sedimentkörper) begannen in den späten 1980er-Jahren, im steilen Fels sogar erst nach der Jahrtausendwende. Aussagen zu langfristigen Trends sind daher noch vorsichtig zu interpretieren. Die meisten Permafrostvorkommen in der Schweiz haben Temperaturen zwischen etwa minus drei und null Grad Celsius – also nur wenig unter dem Schmelzpunkt. Eine Erhöhung der Temperatur braucht in diesem Temperaturbereich sehr viel mehr Energie als im kalten Permafrost, da für den Phasenwechsel (fest–flüssig) zusätzlich Schmelzenergie benötigt wird. Die Erwärmungstrends zeigen sich damit weniger klar als bei tieferen Temperaturen. Es lässt sich jedoch an verschiedenen Standorten beobachten, dass die Temperatur in der Tiefe zunimmt und die jährliche Auftauschicht immer mächtiger wird (PERMOS 2016). Ergänzend zu den Permafrosttemperaturen zeigen sich auch bei den Geschwindigkeiten, mit denen sich Blockgletscher talwärts bewegen, zum Teil deutliche Zunahmen und es wird ein steigender Anteil von flüssigem Wasser im Untergrund gemessen. Auch dies sind beides Hinweise auf eine Erwärmung oder Degradation von Eis. Insbesondere in den 2010er-Jahren wurden konstant sehr warme Permafrostverhältnisse beobachtet, verglichen mit dem Be-

ginn der meisten Messungen vor zirka 15 Jahren (PERMOS 2016). Im Vergleich zu den letzten gut 150 Jahren scheint es während der letzten 20 Jahre auch eine Häufung von grossen Felsstürzen<sup>1</sup> aus Permafrostgebieten zu geben (Huggel et al. 2012).

Gestützt auf Prozessverständnis und Computermodelle kann davon ausgegangen werden, dass eine fortlaufende Erwärmung zu einer dickeren jährlichen Auftauschicht sowie generell zu höheren Untergrundtemperaturen führen würde. Damit einher gehen die weitere Erwärmung und schliesslich das Auftauen von Permafrost sowohl in Schutthalden und Blockgletschern als auch in eisgefüllten Klüften im Fels. Voraussagen zu detaillierten räumlichen Auswirkungen sind schwierig zu machen, da, neben der zukünftigen Entwicklung, bereits die Abschätzung der genauen räumlichen Verbreitung von Permafrostvorkommen grösseren Unsicherheiten unterliegt. Generell kann man aber sagen, dass mit dem Auftauen von Permafrost neue Gefahren in Gebieten entstehen können, die bisher davon nicht betroffen waren. So können Häufigkeit und Ausmass von Steinschlag und Felsstürzen zunehmen, oder grössere Mengen an Lockermaterial Starkniederschlägen ausgesetzt werden, die zu Murgängen führen können. Bereits in den vergangenen Jahren hat man neuen oder stärkeren Steinschlag an verschiedenen Orten in den Alpen beobachtet. Felsstürze können bewohntes Gebiet oder Infrastruktur direkt betreffen, es können aber im Zusammenhang mit neuen oder bereits existierenden Seen auch Flutwellen ausgelöst und damit die Gefahrenzonen um ein Vielfaches vergrössert werden. Bewegungen und Setzungen im sich erwärmenden oder auftauenden Untergrund können die Lebensdauer oder Stabilität von Infrastrukturen beeinflussen, die auf Permafrostböden gebaut sind. Bei Ski- und Seilbahninfrastrukturen oder Lawinenverbauungen sind zum Beispiel bereits seit einigen Jahren Massnahmen ergriffen worden, welche die Auswirkungen verringern (Abb. 2.4).

Die erwarteten Veränderungen von Gletschern und Permafrost betreffen zudem das Geschiebe. Die abschmelzenden Gletscher legen neue Sedimentvorkommen frei und bis anhin gefrorene Schuttkörper können durch auftauenden Permafrost stärker der Erosion ausgesetzt werden. Zusätzlicher Schutt durch stärkeren Steinschlag kann die Geschiebefracht in Gerinnen erhöhen und Murgangaktivität auslösen oder verstärken. Eine Untersuchung des Kantons Bern geht für die nächsten Jahrzehnte in fast allen Einzugsgebieten des Berner Oberlandes von grossen Veränderungen beim Geschiebehaushalt aus (AG NAGEF 2015). Extreme Auswirkungen durch eine Kombination von auftauendem Permafrost und stark erhöhter Steinschlag- und Murgangaktivität auf wichtige Infrastruktur und den Ge-

<sup>1</sup> Volumen von mindestens einer Million Kubikkilometern

schiebehaushalt der Aare konnte in den letzten Jahren beispielhaft in Guttannen beobachtet werden (s. a. Kap. Herausforderungen für Forschung, Praxis und Gesellschaft im Umgang mit klimabedingten Naturrisiken – Fallbeispiel Haslital (Kanton Bern), S. 70). Die Veränderungen der Geschiebefracht sind zudem von grosser Bedeutung für die Anlagen der Wasserkraftwerke.

## Herausforderungen für die Schweiz

Die Kryosphärenkomponenten Schnee, Gletscher und Permafrost haben bereits stark und im Fall der Gletscher auch sehr sichtbar auf den Klimawandel reagiert. Dies führte bereits zu deutlichen Veränderungen im Hochgebirge (s. a. Kap. 2.5 Dynamik von polaren und hochalpinen Landschaften, S. 88), die sich mit grosser Sicherheit auch in Zukunft fortsetzen und noch verstärken werden. Die Schweiz muss sich mit neuen, gletscherfreien Landschaften und den entsprechenden Auswirkungen auseinandersetzen. Im Wasserhaushalt werden saisonal starke Veränderungen erwartet (s. a. Kap. 2.4 Wasser, S. 84). Diese verursachen Auswirkungen auf die Energie- und Landwirtschaft (s. a. Kap. 3.4 Energie, S. 168, Kap. 2.10 Landwirtschaft, S. 111), insbesondere in Kombination mit wahrscheinlich häufiger auftretenden Hitze- und Dürreperioden. Die Verschiebung der Schneegrenze und die abnehmende Schneesicherheit stellen bedeutende Herausforderungen für den Tourismus dar (s. a. Kap. 2.11 Tourismus, S. 117). Zudem werden Energie, Transport und Siedlungen in den Alpen zunehmend betroffen sein durch Veränderungen im Sedimenthaushalt sowie durch Felsstürze und Murgänge. Dadurch entstehen neue Herausforderungen für das Gefahren- und Risikomanagement sowie für das Betreiben und die Sicherheit von Infrastrukturanlagen (s. a. Kap. 2.12 Bauten und Infrastrukturen, S. 121).

## Referenzen

- Abegg B, Steiger R, Walser R (2013) **Aktuelle und zukünftige Schneesicherheit der Bündner Skigebiete**. In: Herausforderung Klimawandel: Chancen und Risiken für den Tourismus in Graubünden. Amt für Wirtschaft und Tourismus & Bergbahnen Graubünden.
- ACQWA (2013) **Assessing Climate impacts on the Quantity and quality of Water**. A large integrating project under EU Framework Programme 7 (FP7), coordinated by the University of Geneva, Switzerland (2008–2013). [www.acqwa.ch](http://www.acqwa.ch)
- AG NAGEF – Arbeitsgruppe Naturgefahren des Kantons Bern (2015) **Klimawandel und Naturgefahren – Veränderungen im Hochgebirge des Berner Oberlandes und ihre Folgen**. Bern, 36 pp.
- CH2014-Impacts (2014) **Toward Quantitative Scenarios of Climate Change Impacts in Switzerland**. Published by OCCR, FOEN, MeteoSwiss, C2SM, Agroscope and ProClim, Bern, Switzerland, 136 pp.
- Finger D, Heinrich G, Gobiet A, Bauder A (2012) **Projections of future water resources and their uncertainty in a glacierized catchment in the Swiss Alps and the subsequent effects on hydropower production during the 21st century**. *Water Resources Research* 48: W02521.
- Huss M (2011) **Present and future contribution of glaciers to runoff from macroscale drainage basins in Europe**. *Water Resources Research* 47: W07511.
- Huggel C, Allen S, Deline P, Fischer L, Noetzi J, Ravelin L (2012) **Ice thawing, mountains falling—are alpine rock slope failures increasing?** *Geology Today* 28: 98–104.
- Jouvet G, Huss M, Funk M, Blatter H (2011) **Modelling the retreat of Grosser Aletschgletscher, Switzerland, in a changing climate**. *Journal of Glaciology* 57: 1033–1045.
- Linsbauer A, Paul F, Machguth H, Haeberli W (2013) **Comparing three different methods to model scenarios of future glacier change in the Swiss Alps**. *Annals of Glaciology* 54: 241–253.
- NELAK (2013) **Neue Seen als Folge des Gletscherschwundes im Hochgebirge – Chancen und Risiken**. Formation des nouveaux lacs suite au recul des glaciers en haute montagne – chances et risques. Forschungsbericht NFP 61. Haeberli W, Büttler M, Huggel C, Müller H, Schleiss A (eds.). vdf Hochschulverlag AG an der ETH Zürich, 300 pp.
- PERMOS (2016) **Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014**. Noetzi J, Luethi R, Staub B (eds.). Glaciological Report (Permafrost) No. 12–15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences.
- Radić V, Bliss A, Beedlow AC, Hock R, Miles E, Cogley JG (2013) **Regional and global projections of the 21st century glacier mass changes in response to climate scenarios from GCMs**. *Climate Dynamics* 42: 37–58.
- Salzmann N, Machguth H, Linsbauer A (2012) **The Swiss Alpine glaciers' response to the global «2°C air temperature target»**. *Environmental Research Letters* 7: 044001.
- Schmucki E, Marty C, Fierz C, Lehning M (2015) **Simulations of 21st century snow response to climate change in Switzerland from a set of RCMs**. *International Journal of Climatology* 35: 3262–3273.
- Serquet G, Marty C, Rebetez M, Dulex JP (2011) **Seasonal trends and temperature dependence of the snowfall/precipitation day ratio in Switzerland**. *Geophysical Research Letters* 38: L07703.