

3. SCHNEE UND PERMAFROST

Schnee besitzt eine sehr hohe Albedo und reflektiert einen großen Teil der Sonneneinstrahlung wieder in den Weltraum. Veränderungen von Schneeflächen sind daher wichtige Vorgänge für den Strahlungshaushalt der Atmosphäre und beeinflussen durch zahlreiche Rückkopplung die Temperatur (Kap. 3.1). Die Schneebedeckung reagiert auch auf den anthropogenen Klimawandel und hat auf der Nordhalbkugel in den letzten 20 Jahren um über 20% abgenommen (Kap. 3.2). Auch der Permafrost in den hohen Breiten der Nordhalbkugel ist durch den Klimawandel auf dem Rückzug, mit Folgen für Ökosysteme und Infrastruktur der betroffenen Gebiete und der Gefahr einer verstärkten Emission von Kohlenstoffverbindungen (Kap. 3.3). Permafrost kommt außerdem in den Hochgebirgen der mittleren Breiten vor. Ein Auftauen durch die globale Erwärmung kann Hangrutschungen und Felsstürze zur Folge haben (Kap. 3.4). Eine besondere Landschaftsform in Permafrostgebieten sind die sog. Pingos, rundliche Hügel, die durch Eislinsen im Boden hervorgerufen werden (Kap. 3.5). Im Kap. 3.6 wird auf die Bedeutung der Eiswolken eingegangen.

3.1 Änderungen in der globalen Schneebedeckung

ACHIM HEILIG

Änderungen in der globalen Schneebedeckung: *Schnee ist eine sehr wichtige Komponente des globalen Klimasystems. Die Schneedecke hat gleichzeitig Einfluss auf das Energiebudget der Atmosphäre und der Landoberfläche. Sie beeinflusst entscheidend die Oberflächenalbedo und kontrolliert dadurch die Reflektivität der Landoberfläche. Zusätzlich ist ein signifikant großer Anteil der Erdbevölkerung direkt von der Schnee- und Eisschmelze zur Wasserversorgung abhängig. Dieser Artikel beschreibt in einem kurzen Abriss den Effekt von Schnee und Schneebedeckung auf das Klima, erläutert regionale und lokale Zusammenhänge zwischen Schneeschmelze, Abfluss und Wasserverfügbarkeit und beschreibt derzeit verfügbare Messmethoden zur Bestimmung von Schneeparametern. Die Darstellung der Messbarkeit von Schnee ist entscheidend, um beobachtbare langfristige Veränderungen der Schneedecke interpretieren zu können. Leider sind Messungen zur flächenhaften Verteilung von Schneeparametern bisher nur für die flächige Ausdehnung von Schnee verfügbar. Eine Quantifizierung von Änderungen der Massenakkumulation ist somit nur punktuell möglich. Der Artikel schließt mit einer Zusammenfassung von Prognosen für Änderungen von Schneedeckeneigenschaften für die nächsten Jahrzehnte.*

Changes in global snow cover: *Snow is a crucial component of the global climate system. Simultaneously, snow is influencing the energy budget of the atmosphere and the land surface. Surface albedo is strongly influenced by the existence of snow coverage. In addition, a significant large part of the world's population depends directly on runoff generated by snow and ice melt for water supply. This article introduces shortly the effect of snow on climate, comments on regional and local coherence of snow melt, runoff and water availability and addresses currently available methods to quantify snow parameters. The description of measurement methods of snow is essential for interpretation of observable long-term changes in recent decades. To date, measurements on extensive distribution of snow parameters can only be provided for the snow cover extent. As a consequence, an assessment of decadal changes in snow accumulation is only possible for single point observations. This article concludes with a summary on currently available projections on changes of snow cover parameters for the next few decades.*

Wasser ist essentiell für menschliches Leben. In vielen Erdregionen befinden sich die Hauptquellen für verfügbares Wasser in Bergregionen entlang Oberläufen von Flüssen. Diese Flüsse werden wiederum durch Schnee- und Gletscherschmelze genährt. Ungefähr ein Sechstel der Erdbevölkerung lebt in Regionen der Erde, die mehr als 50% ihrer jährlichen Wasserversorgung aus der Schmelze von Schnee beziehen (BARNETT et al. 2005). Jedoch nicht nur in Berggebieten ist eine kontinuierliche Schneedecke vorhanden. Saisonaler Schnee hat eine maximale Flächenausdehnung von mehr als 9% der gesamten Erdoberfläche. Folglich haben schnee- und eisbedeckte Regionen ei-

nen enormen Einfluss auf das Klima, sowohl lokal als auch global. Während Eis über Land normalerweise ganzjährig vorhanden ist, sind Schneebedeckungen abgesehen von Eisschilden und Gletschern nur saisonal vorhanden. Saisonale Eisbedeckungen treten zusätzlich noch als Meereis auf. Indes sind saisonale Ausdehnungen von Schnee und Meereis sehr unterschiedlich. Im Mittel liegt die eisbedeckte Meeresfläche auf der Nordhalbkugel im Sommer bei etwa 50% der Ausdehnung im Winter. Im Gegensatz hierzu erreichen Sommerausdehnungen der Schneebedeckung über Land nur einen sehr begrenzten Bruchteil (ein Sechzehntel) der Winterausdehnung (Abb. 3.1-1).

Effekte der Schneebedeckung auf das Klima

Die Schneebedeckung der Landoberfläche hat weitreichende Auswirkungen auf Energie- und Feuchtebudgets der Atmosphäre und Landoberfläche und als Folge auf das Klima. Schnee ist für die großen Unterschiede zwischen Sommer- und Winteroberflächenalbedo verantwortlich, sowohl im Jahresgang als auch zwischen einzelnen Jahren. Eine schneebedeckte Oberfläche kann bis zu 80-90 Prozent der eingehenden kurzwelligen Sonnenenergie reflektieren, wohingegen schneefreie Oberflächen wie Boden oder Vegetation nur maximal 10 bis 20 Prozent der einfallenden kurzwelligen Strahlung wieder direkt reflektieren. Eine ansteigende Tendenz der globalen Lufttemperatur läuft auf eine verminderte flächenmäßige Erstreckung der Schneedecke hinaus. Mit der daraus resultierenden Abnahme der Albedo wird mehr solare Strahlung absorbiert, und damit mehr Wärme ins System eingebracht, was wiederum die Schneeschmelze begünstigt. Diesen Vorgang bezeichnet man als klassischen Temperatur-Albedo-Feedback-Mechanismus. Es handelt sich hier um eine »positive Rückkopplung« zwischen Schneebedeckung und Oberflächentemperatur, da die Temperatur sehr stark von der Präsenz oder dem Ausbleiben einer Schneedecke abhängt. Trends in der Temperatur können mit Änderungen der Schneedecke verknüpft werden (GROISMAN et al. 1994).

Zusätzlich zum Rückstrahlvermögen repräsentiert eine vorhandene Schneedecke eine signifikante Wärmesenke während der Schmelzperiode von saisonalem Schnee aufgrund der hohen latenten Schmelzwärme. Infolgedessen stellt die saisonale Schneedecke eine Hauptquelle der thermalen Trägheit innerhalb des Gesamtklimasystems dar. Solange Schneekristalle zu Wasser schmelzen, werden große Beträge der ankommenden Energie mit wenig oder keiner Schwankung in der Oberflächentemperatur verbraucht.

Einfluss der Schneebedeckung – global und regional

Wie bereits erwähnt, ist die Schneeschmelze von sehr entscheidender Bedeutung für die Wasserversorgung von über 1 Mrd. Menschen (BARNETT et al. 2005; Abb. 3.1-2). Vor allem in Nordamerika und Asien sind viele stark bevölkerte Regionen in Klimazonen lokalisiert, in denen Winterniederschläge dominieren. Diese Niederschläge fallen in höheren Bergregionen als Schnee. Niedere Höhenbereiche am Fuße der Bergregionen werden in der Regel extensiv für Landwirtschaft und zur Besiedelung genutzt. Idealerweise fallen die stärksten Abflüsse aus den Bergregionen während der Schneeschmelze in die Zeiten des meisten Wasserverbrauchs der Vegetation (Frühling). Bei Verlagerung der Schneeakkumulation in ausschließlich höchste Bereiche des jeweiligen Einzugsgebietes und damit verbundener Reduktion der vorhandenen Wassermenge – gespeichert in Schnee – sind die Abflussmengen im Frühjahr entsprechend verringert. Winterliche Flüssigniederschläge können nur genutzt werden, wenn entsprechende Speichermöglichkeiten (Staudämme, Seen) vorhanden sind.

Ökonomisch gesehen wird der saisonalen Schneedecke ein höherer Wert zugerechnet als Vergletscherungen (KRISHNA 2005). Die Konsequenz hieraus ist, dass für ein sinnvolles Wassermanagement Kenntnisse über die vorhandene Schneeakkumulation, Schmelze und Abfluss im Einzugsgebiet unabdingbar sind. Von größter Wichtigkeit sind entsprechende Abschätzungen über Veränderungen der Schneeparameter durch Änderungen im Klimasystem.

Zusätzlich zur Wasserversorgung aus schneebedingten Abflüssen ist die Schneedecke aber auch eine Quelle für existenzgefährdende Naturgefahren wie Hochwasser und Lawinen. Die Schneedecke besitzt unterschiedliche Zeitskalen im Hinblick auf ihre Speicherdynamik und kann ausgleichend, aber auch verstärkend auf die Abflüsse einwirken. Unter bestimmten Umwelt-

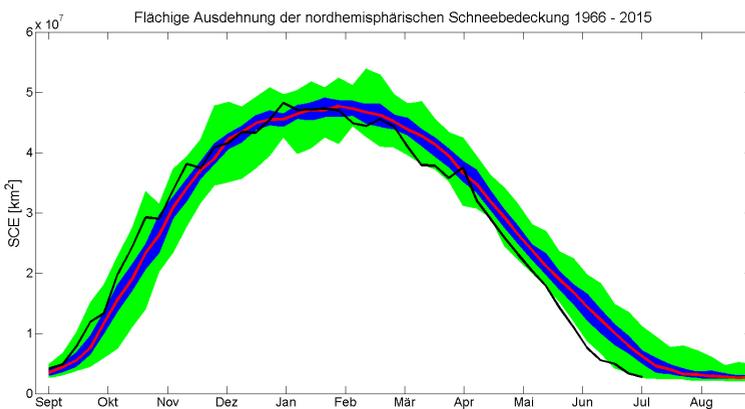


Abb. 3.1-1: Flächenmäßige Ausdehnung der Schneebedeckung auf der Nordhalbkugel der Jahre 1966-2015. Die Abbildung stellt den Median der Schneedeckenausdehnung pro Woche (rote Linie) sowie das 25-75% Perzentil dieser Datenreihe (dunkelblauer Bereich) und die gesamte Streuung aller Daten über diesen Zeitraum (hellgrüner Bereich) dar. Zusätzlich ist noch der bisherige Teil der Datenreihe des glaziologischen Jahres 2014/15 aufgetragen (schwarze Linie). Daten aus <http://climate.rutgers.edu/snowcover>.

bedingungen geht von der Freisetzung von Wasser aus der Kryosphäre eine erhebliche Gefahr für Menschen und Infrastruktur in den Tälern aus. In hochalpinen Einzugsgebieten hängt eine verlässliche Abschätzung der Hochwassergefahr von genauen Bestimmungen der räumlichen und zeitlichen Variabilität der Schneedecke ab (HALL et al. 2012).

Lawinen stellen weltweit eine Hauptnaturgefahr für menschliches Leben und Infrastrukturen in Gebirgsregionen dar. Jedes Jahr sterben ca. 250 Menschen in direkter Folge von Lawinen (MEISTER 2002). In den USA sind Schneelawinen im jährlichen Durchschnitt ursächlich für mehr Todesopfer als zum Beispiel Erdbeben oder Erdbeben (VOIGHT et al. 1990).

Für einige Länder, vor allem in den europäischen Alpen, hat eine Veränderung der winterlichen Schneebedeckung auch volkswirtschaftliche Konsequenzen, vor allem im Tourismussektor (GONSETH 2013). In Teilen Österreichs und der Schweiz sind ganze Kommunen fast ausschließlich von Einnahmen abhängig, die im Winterhalbjahr durch den Tourismus und Agglomerationen hieraus generiert werden. Ohne eine kontinuierliche Schneedecke zur Nutzung in der Freizeitgestaltung der Gäste verringern sich die Tourismuseinnahmen signifikant. SCHMUDE Kap. 7.6 in diesem Band behandelt am Beispiel der Gletscherskigebiete

in den Alpen ausführlich die Wechselwirkungen von Schnee/Eis und Tourismus.

Messmethoden zur Bestimmung der Schneedecke

Ohne eine verlässliche Bestimmung von Kenngrößen der Schneedecke und ihrer räumlichen Kontinuität sind Abschätzungen von Veränderungen und Zukunftsprognosen unmöglich. Für die räumliche Bestimmung von Schneedeckeneigenschaften eignen sich in bedingtem Maße Fernerkundungsmethoden. Nach derzeitigem Stand der Forschung ist eine nass – trocken Klassifikation von Schnee aus Mikrowellen-Fernerkundungsdaten ohne zusätzliche In-Situ-Informationen bereits möglich. Mit optischen Daten lassen sich zusätzlich schneebedeckte Bereiche von schneefreien Gebieten abgrenzen (PARAJKA & BLÖSCHL 2008) und die flächenhafte Ausdehnung (snow cover extent - SCE) der Schneedecke kontinuierlich bestimmen. Ein weiterer Schneeparameter, der aus klimatologischer Sicht erhoben wird, ist die Dauer der Schneebedeckung (snow cover duration – SCD). Jedoch liefern diese Daten keine Information zur tatsächlich akkumulierten Masse des Schnees (snow water equivalent – SWE). Gegenwärtig sind Angaben zu Schneehöhen nur mit bodengestützten Messmethoden möglich, was in der Folge die räumliche Information

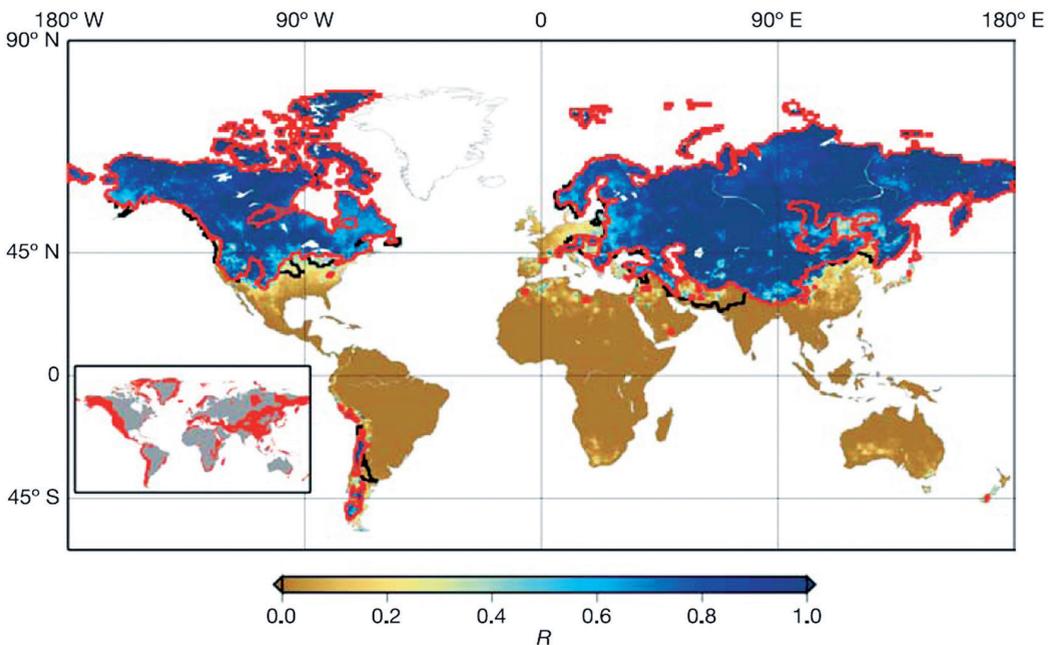


Abb. 3.1-2: Akkumulierter jährlicher Schneefall dividiert durch jährlichen Abfluss per Kontinentalregion als dimensionslose Größe R . Die räumliche Auflösung liegt bei $0,5^\circ$ geographischer Länge und Breite. Ein $R > 0,5$ wird als schneedominierte Abflussregion definiert. Alle Bereiche mit $R > 0,5$ sind gekennzeichnet durch eine rote Umrandung. Schwarz umrandete Bereiche zeigen Regionen, in denen Wasserverfügbarkeit durch Schneeschmelze dominiert ist, die außerhalb der betreffenden Regionen generiert wird. Rot gefärbte Regionen im Inset zeigen topographisch komplexe Kontinentalbereiche. Aus BARNETT et al. (2005) mit freundlicher Genehmigung durch Nature Publishing Group.

deutlich einschränkt. Aus der Schneehöhe und der Dichte des Schneepaketes folgt die Masseninformation (SWE) an einem Punkt. Nur über den SWE können Angaben zu Abfluss- und Speichermengen der Schneedecke gemacht werden. Zusätzliche Daten zu Schichtaufbau und gefallenen Neuschneemengen sind eminent wichtig für eine verlässliche Prognose der Abgangsbereitschaft von Lawinen und der Kalkulation von Lawinenausmaßen. Diese Daten werden in der Regel durch einen oder mehrere Beobachter als konventionelle Schneeprofile aufgenommen (Fierz et al. 2009). Ebenso ist für die Lawinengefahrenprognose sowie für die Bestimmung von Schmelzmengen eine Beobachtung der Perkolationsstiefe von Flüssigwasser notwendig. Neuartige Radarsysteme können sowohl Daten zur Akkumulation oder zur Änderung der Stratigraphie als auch Informationen zum Fortschritt der Schneeschmelze in Echtzeit bereitstellen (HEILIG et al. 2010, SCHMID et al. 2014), jedoch weiterhin nur für einzelne Punktmessungen.

Derzeitig beobachtbare Veränderungen von saisonalen Schneedecken

Mit sehr großem Vertrauen in die Aussage spricht der derzeitige letzte IPCC Bericht von 2013 von einer Abnahme des SCE auf der nördlichen Hemisphäre - vor allem im Frühjahr (VAUGHAN et al. 2013). Für einen Zeitraum von 1967-2012 lassen sich aus Satellitendaten Abnahmen mit statistischer Signifikanz feststellen. Die stärksten Abnahmen mit höchster Signifikanz sind für den Monat Juni zu beobachten. Für keinen einzigen Monat lassen sich signifikante Zunahmen erkennen. Zusätzlich ist noch erkennbar, dass prozentuale Abnahmeraten des SCE mit der geographischen Breite ansteigen. Die beobachteten Verlustraten des SCE im Juni übertreffen sogar alle Modellrechnungen. Betrachtet man die SCD der nordhemisphärischen Schneeperiode, dann hat sich im Vergleich zum Winter 1972/73 eine durchschnittliche Wintersaison um 5.3 Tage pro Dekade verringert (CHOI et al. 2010). Es ist eine deutliche Korrelation zwischen gemessenen Temperaturen im Frühjahr und dem zugehörigen SCE zu erkennen. Grund hierfür ist die oben erwähnte positive Rückkopplung zwischen ansteigenden Temperaturen und verringerten Albedowerten über schneefreien Gebieten.

Nicht nur Daten zum SCE zeigen eine rückläufige Tendenz. Auch Studien zum langjährigen maximalen saisonalen SWE, zur Anzahl Tage mit mindestens 20 cm Schneehöhe an Wetterstationen wie auch Analysen des SCD zeigen vor allem für Regionen, deren Lufttemperatur sich nahe 0°C befindet, einen generellen Trend zu geringeren SWE und kürzeren SCD. Dies betrifft vor allem die Monate März-Juni, niedere bis mittlere Höhenbereiche und geographische Breiten zwischen 40 und 60° nördlicher Breite.

Detaillierte regionale Aussagen zur Änderung von Schneeparametern sind schwierig, weil kontinuierliche umfassende hydroklimatische Messungen über lange Zeiträume in schneedominierten Bergregionen sehr selten sind (REBA et al. 2011). Für zwei dieser sehr seltenen langjährigen hochalpinen Messreihen zeigen MARTY & MEISTER (2012) eine lineare dekadische Abnahme der Niederschlagsanteile in fester Form (Schnee) am Gesamtniederschlag um jeweils 1,2 bis 1,3% von 1960 bis 2010. STEWART (2009) fasst Änderungen für alpine Schlüsselregionen mit mehrjährigen verlässlichen Messreihen für die nördliche Hemisphäre in ihrer Arbeit zusammen:

- In den europäischen Alpen sind generell folgende Trends erkennbar: bis in die 1980er Jahre werden zunehmende mittlere Schneehöhen und SCD beobachtet und darauf anschließend signifikante Abnahmen, was SCE, Schneehöhe und SWE in mittleren und geringen Höhenlagen betrifft. Zumeist wird eine Höhenlage von 1.300-1.700 m als Grenze erkannt. Für darunter liegende Regionen sind statistisch signifikante Abnahmen zu verzeichnen.
- In den zentralasiatischen Gebirgen fehlen oftmals Schneemessstationen, die eine langjährige Analyse der Veränderungen der Schneedecke erlauben. Hauptsächlich werden Temperaturmessreihen aufgezeigt, die eine deutliche Erwärmung seit den 1980er Jahren z.B. für das Tibetische Hochland dokumentieren. Es wird allgemein ein Anstieg der Niederschlagssummen beobachtet.
- In Nordamerika, und hier vor allem im westlichen Nordamerika, werden ebenfalls für die Monate März und April deutliche Änderungen der Schneedeckeneigenschaften aufgeführt. Der Höhepunkt des SWE erscheint früher im Jahr, es werden vermehrte Abflussraten im Winter beobachtet und eine generelle Abnahme des SWE. Ausnahmen stellen sehr kalte Gebiete und Regionen in großer Höhenlage dar.

Diese regionalen Beobachtungen bestätigen die Aussagen im IPCC 2013 (VAUGHAN et al. 2013) von deutlichen Veränderungen der saisonalen Schneedecke in niederen und mittleren Höhenlagen sowie in den Frühjahrsmonaten.

Prognosen zu zukünftigen Veränderungen der saisonalen Schneedecken

In-situ Messungen, Fernerkundungsdaten und Modellierungen zeigen, dass Schneehöhe und SWE typischerweise mit der jeweiligen Höhenlage zunehmen (e.g. RICE et al. 2011). Unter der Annahme, dass sich das globale Klima durch eine fortschreitende Erwärmung verändert, werden sich auch durchschnittliche Schneehöhen und SWE in Einzugsgebieten ändern und daraus entsprechend bisherige Abflussregime.

In einer aktuellen Studie untersuchen TENNANT et al. (2015) Szenarien mit einer zunehmenden Erwärmung von +1 bis +5 °C. Die Hauptparameter in dieser Studie sind Änderungen des maximalen SWE und Reduzierungen der schneebedeckten Fläche, beides in Abhängigkeit von der Höhenlage. Generell sind Änderungen

im maximalen SWE nicht linear, sondern zeigen ein parabolisches Muster mit der Höhenlage. Die stärksten Reduktionen in Einzugsgebieten treten in den Höhenbereichen von 1.000-2.000 m Höhe auf, unabhängig von der Erwärmungsrate. Bei einer Erwärmung um +1 °C verringert sich der maximale SWE um -50 mm Wasseräquivalent in diesem Höhenbereich. Bei einer maximalen Akkumulation von 500 mm Wasseräquivalent entspricht dies einer Reduktion um -10% bei nur einem Grad Erwärmung. Flächenverluste hängen sehr stark von der Topographie des jeweiligen Einzugsgebietes ab. Regionen, in denen derzeit im langjährigen Durchschnitt in mehr als 6 Monaten im Jahr der SWE > 0 mm Wasseräquivalent ist, befinden sich über einer sogenannten »snowline«. Entlang der jeweiligen snowline können Flächenverluste bis 100% auftreten bei einer zukünftigen Erwärmung. Für Erwärmungsszenarien über +1 °C verringern sich die schneebedeckten Flächen auch deutlich über die jeweilige derzeitige snowline.

Für die europäischen Alpen prognostizieren mehrere aktuelle Studien eine deutlich verkürzte SCD, einen Rückgang des SCE um 90% für Regionen unterhalb 1.000 m Höhe und starke Änderungen des Abflussregimes. Danach werden erhöhte Mittwinterabflüsse vor allem in mittleren Höhenlagen bis zum Ende des Jahrhunderts erwartet (zusammengefasst bei STEWART 2009). Infrastrukturbetriebe im Wintertourismusbereich werden am stärksten von diesen Veränderungen beeinträchtigt sein. Es gibt jedoch auch Studien, die von weiterhin guten Voraussetzungen für die Kompensation von fehlenden natürlichen Schneefällen durch künstliche Beschneigung ausgehen und damit Einschränkungen für den Wintertourismus in den Alpen bis 2050 als gering ansehen (HARTL & FISCHER 2015). Selbst für tiefe und mittlere Lagen wird in dieser Studie von einem hohen Potential für die künstliche Beschneigung ausgegangen.

Für das westliche Nordamerika prognostizieren aktuellste Studien generell eine Abnahme der Schneefallmengen für relativ warme und tiefere Lagen, sowie insgesamt eine Zunahme der Auftretswahrscheinlichkeit für Winterhalbjahre mit geringen Schneefällen und eine geringere Wahrscheinlichkeit für das Eintreten von sehr schneereichen Wintern (LUTE et al. 2015), unabhängig von der Höhenlage und der Jahresdurchschnittstemperatur einer Region.

Literatur

- BARNETT T. P., ADAM J. C. & D. P. LETTENMAIER (2005): Potential impacts of a warming climate on water availability in snow-dominated regions. *Nature* 438(7066):303-309. doi: 10.1038/nature04141.
- CHOI G., ROBINSON D. A. & S. KANG (2010): Changing Northern Hemisphere Snow Seasons. *J. Climate* 23(19):5305-5310. doi: 10.1175/2010JCLI3644.1.

- FIERZ C., ARMSTRONG R., DURAND Y., ETCHEVERS P., GREENE E., MCCLUNG D., NISHIMURA K., SATYAWALI P. & S. SOKRATOV (2009): The International classification for seasonal snow on the ground. IACS Contribution, no. 1. UNESCO/IHP, Paris
- GONSETH C. (2013): Impact of snow variability on the Swiss winter tourism sector: implications in an era of climate change. *Climatic Change* 119(2):307-320. doi: 10.1007/s10584-013-0718-3.
- GROISMAN P. Y., KARL T. R. & R. W. KNIGHT (1994): Observed impact of snow cover on the heat balance and the rise of continental spring temperatures. *Science* 263(5144):198-200. doi: 10.1126/science.263.5144.198.
- HALL D. K., FOSTER J. L., DIGIROLAMO N. E. & G. A. RIGGS (2012): Snow cover, snowmelt timing and stream power in the Wind River Range, Wyoming. *Geomorphology* 137(1):87-93. doi: 10.1016/j.geomorph.2010.11.011.
- HARTL L. & A. FISCHER (2015): *Endbericht Beschneigungsklimatologie: Projektbericht des Instituts für Interdisziplinäre Gebirgsforschung*, der: 1039 pp. hdl:10013/epic.45450.d001.
- HEILIG A., EISEN O. & M. SCHNEEBELI (2010): Temporal Observations of a Seasonal Snowpack using Upward-Looking GPR. *Hydrological Processes* 24(22):3133-3145. doi: 10.1002/hyp.7749.
- KRISHNA A. P. (2005): Snow and glacier cover assessment in the high mountains of Sikkim Himalaya. *Hydro. Process.* 19(12):2375-2383. doi: 10.1002/hyp.5890.
- LUTE A. C., ABATZOGLOU J. T. & K. C. HEGEWISCH (2015): Projected changes in snowfall extremes and interannual variability of snowfall in the western United States. *Water Resour. Res.* 51(2):960-972. doi: 10.1002/2014WR016267.
- MARTY C. & R. MEISTER (2012): Long-term snow and weather observations at Weissfluhjoch and its relation to other high-altitude observatories in the Alps. *Theor Appl Climatol* 110(4):573-583. doi: 10.1007/s00704-012-0584-3.
- MEISTER R. (2002): Avalanches: Warning, rescue and prevention. *Avalanche News* 62:37-44.
- PARAJKA J. & G. BLÖSCHL (2008): The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. *Journal of Hydrology* 358(3-4):240-258. doi: 10.1016/j.jhydrol.2008.06.006.
- REBA M. L., MARKS D., SEYFRIED M., WINSTRAL A., KUMAR M. & G. FLERCHINGER (2011): A long-term data set for hydrologic modeling in a snow-dominated mountain catchment. *Water Resour. Res.* 47(7):n/a. doi: 10.1029/2010WR010030.
- RICE R., BALES R. C., PAINTER T. H. & J. DOZIER (2011): Snow water equivalent along elevation gradients in the Merced and Tuolumne River basins of the Sierra Nevada. *Water Resour. Res.* 47(8):n/a. doi: 10.1029/2010WR009278.
- SCHMID L., HEILIG A., MITTERER C., SCHWEIZER J., MAURER H., OKORN R. & O. EISEN (2014): Continuous snowpack monitoring using upward-looking ground-penetrating radar technology. *Journal of Glaciology* 60(221):509-525. doi: 10.3189/2014JG13J084.
- STEWART I. T. (2009): Changes in snowpack and snowmelt runoff for key mountain regions. *Hydro. Process.* 23(1):78-94. doi: 10.1002/hyp.7128.
- TENNANT C. J., CROSBY B. T., GODSEY S. E., VANKIRK R. W. & D. R. DERRYBERRY (2015): A simple framework for assessing the sensitivity of mountain watersheds to warming-driven snowpack loss. *Geophys. Res. Lett.* 42(8): 2814-2822. doi: 10.1002/2015GL063413.
- VAUGHAN D. G., COMISO J. C., ALLISON I., CARRASCO J., KASER G., KWOK R., MOTE P., MURRAY T., PAUL F., REN J., RIGNOT E., SOLOMINA O., STEFFEN K. & T. ZHANG (2013): Observations: Cryosphere: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.
- VOIGHT B., ARMSTRONG B. R., ARMSTRONG R., BACHMAN D., BOWLES D., BROWN R. L., FAISANT R. D., FERGUSON S. A., FREDSTON J. A., KENNEDY J. L., KIUSALAAS J., LACHAPPELLE E. R., MCFARLANE R. C., NEWCOMB R., PENNIMAN R. & R. PERLA (1990): Snow Avalanche Hazards and Mitigation in the United States. The National Academies Press, Washington, DC.

Kontakt:

Dr. Achim Heilig
WSL - Institut für Schnee- und Lawinenforschung (SLF)
Davos Dorf - Schweiz
heilig@r-hm.de

Heilig, A. (2015): Änderungen in der globalen Schneebedeckung. In: Lozán, J. L., H. Grassl, D. Kasang, D. Notz & H. Escher-Vetter (Hrsg.). *Warnsignal Klima: Das Eis der Erde*. pp. 63-67. Online www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de. doi:10.2312/warnsignal.klima.eis-der-erde.10