© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

Schnee und Gletscher – Wasserreserven für heute und morgen?

Robert Kirnbauer

Einleitung

Der Schnee- und Gletscherabfluss ist in alpinen Gebieten ein wesentlicher Einflussfaktor auf den Wasserhaushalt, und sein Einfluss erstreckt sich weit in die Unterläufe der großen Ströme.

Im Gebirge wird der Gletscherabfluss zum dominierenden Faktor, der das Ganglinienbild prägt (siehe Abb. 1). Während Hitze- und Trockenzeiträumen bleibt Schmelzwasser vom Gletscher die maßgebende Quelle des Abflusses und ist bis weit stromab sowohl an den Pegelständen als auch an der Farbe des Flusswassers erkennbar (siehe Abb. 2).

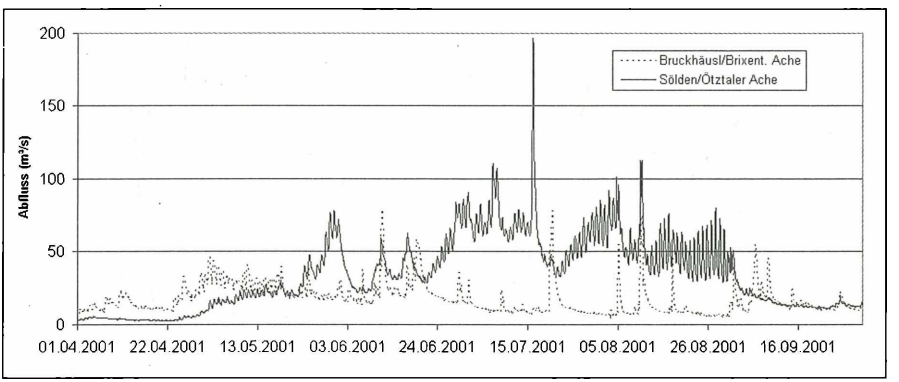


Abb. 1: Abflussganglinien zweier Gebiete ähnlicher Größe; eines vergletschert (Sölden/Ötztaler Ache, 375 km², 27 % vergletschert), eines unvergletschert (Bruckhäusl/Brixentaler Ache, 320 km², 0 % vergletschert)

Abbildung 2 zeigt am Beispiel von Gewässern im Oberpinzgau (Land Salzburg), in welchem Ausmaß der Einfluss der extremen Gletscherschmelze im Sommer 2003 mit zunehmender Einzugsgebietsgröße aber abnehmendem Gletscheranteil abnimmt. Der

© Verein für Ökologie und Umweltforschung, download unter www.zobodat.at

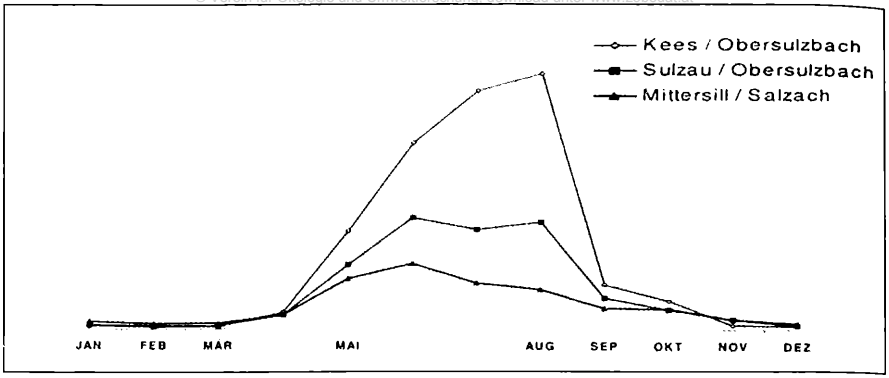


Abb. 2: Abnehmende Abflussspende mit größer werdendem Einzugsgebiet, aber abnehmendem Gletscheranteil. Gewässer im Oberpinzgau, im Jahr der extremen Gletscherschmelze 2003 (nach Slupetzky & Wiesenegger, 2005).

Obersulzbach am Pegel Kees ist zu 60 % vergletschert, am Pegel Sulzau nur mehr zu 18,2 %, und die Salzach am Pegel Mittersill zu bloß 5,3 % (Koboltschnig, 2007).

In einer Hochwasser-Wetterlage ist nicht nur die Höhenlage der Schneefallgrenze sondern auch der Ausaperungszustand der Gletscher dafür entscheidend, welche Höchststände die Pegel im Unterlauf der Gletscher erreichen. Beim Inn-Hochwasser August 2005 war die Stadt Innsbruck akut durch Ausuferung des Inn gefährdet. Hätten die Gletscher im Oberlauf der Ötztaler Ache zum Abfluss beigetragen, wäre es vermutlich zu Ausuferungen gekommen (Kirnbauer et al., 2009)

Die Schnee- und Gletscherschmelze macht regelmäßig Schwierigkeiten bei der Simulation und Vorhersage von Abflüssen. In Abbildung 3 ist eine Simulation des Abflusses im Gebiet des Löhnersbaches bei Saalbach (16 km^2) dargestellt. Hier ist erkennbar, dass in den Zeitbereichen der Schneeschmelze die simulierte Ganglinie signifikant tiefer liegt als die beobachtete. Dies ist eine Folge der rechnerisch zu frühen Ausaperung des Einzugsgebietes.

Derartige Fehlsimulationen treten regelmäßig auf, wenn die an den üblichen Ombrometern und Ombrographen gemessenen Niederschlagshöhen unkorrigiert als Modellinput verwendet werden. Speziell bei Schneeniederschlägen sind wegen des Windeinflusses die gemessenen Werte wesentlich zu klein. Bei einer Windgeschwindigkeit von 4m/s kann der tatsächlich gefallene Schnee den dreifachen Wasserwert wie der gemessene haben (Fuchs et al., 2001).

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

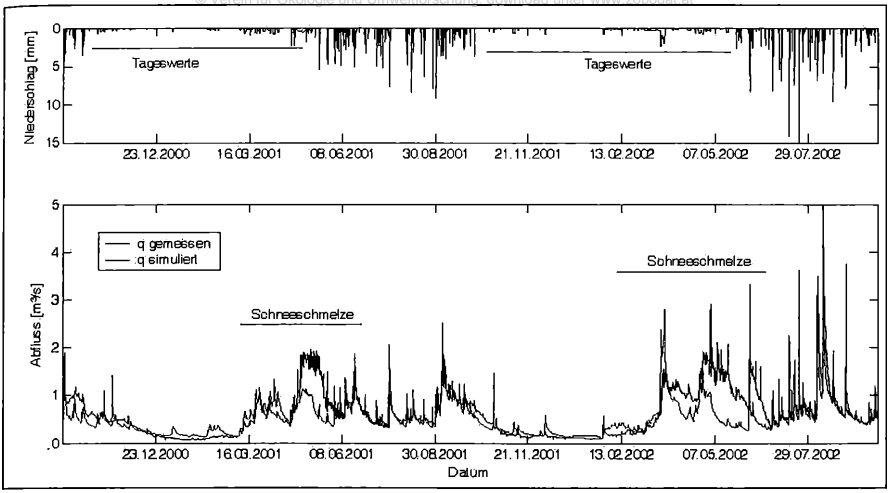


Abb. 3: Abflusssimulation für den Löhnersbach bei Saalbach; in Zeitbereichen der Schneeschmelze unterschätzt das Simulationsmodell deutlich.

Daher wird in der Folge der Schneemessung ein eigenes Kapitel gewidmet, bevor auf Fragen der Modellierung eingegangen werden kann. Das Kapitel über die Modellierung geht auch auf Fragen der Gletscherschmelze und der Abflussvorhersage für vergletscherte Gebiete ein. Was die Zukunftsperspektiven für Schnee und Gletscher im Lichte des Klimawandels anlangt, muss auf einige Kernaussagen von Fachleuten auf diesem Gebiet verwiesen werden.

Messung der Schneedecke

Messung am Punkt

Ist schon der Regenniederschlag durch sehr große zeitliche Variabilität und örtliche Heterogenität gekennzeichnet, so gilt dies für den Schneeniederschlag in noch stärkerem Maße. Zu den in der Einleitung erwähnten Schwierigkeiten mit der korrekten Messung treten noch die Probleme der Verfrachtung des schon abgelagerten Schnees hinzu. Diese Umlagerungen geschehen auf Maßstabsebenen vom Meter- bis zum Kilometerbereich, denkt man z. B. an das lokale Zuwehen eines Straßeneinschnittes bzw. an die weiten Schneeverfrachtungen im Hochgebirge und auf Plateaugletschern.

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

Auch die Schneemessung am Punkt kann durch Windverfrachtung stark verfälscht werden. Daher sollte vor der endgültigen Aufstellung einer Schneemessstelle bekannt sein, dass Schneehöhe und Schneewasserwert an diesem Punkt einen Durchschnittswert für die nähere Umgebung darstellen.

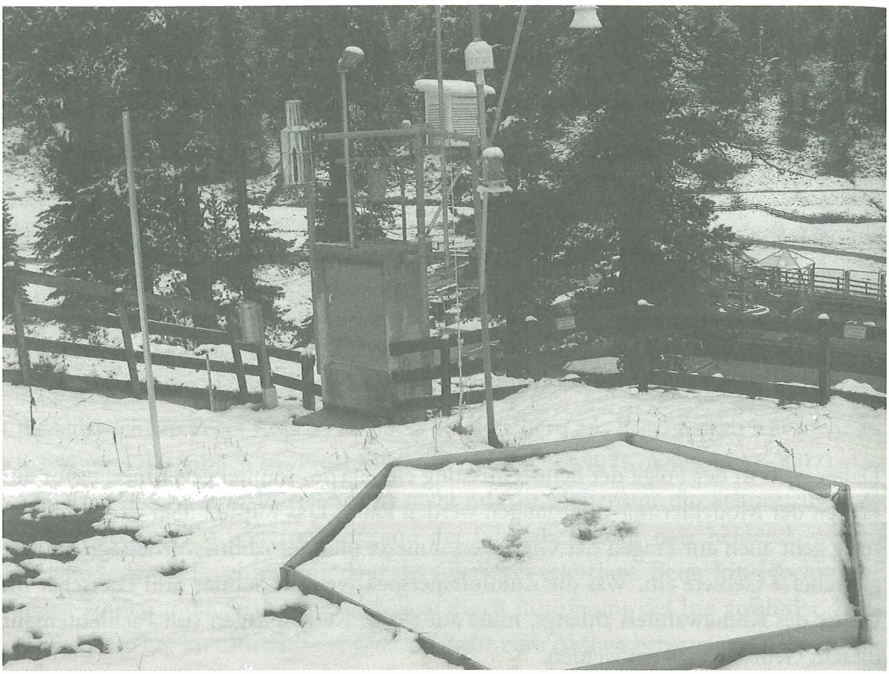


Abb. 4: TIWAG Schneemessstelle Kühtai (Aufnahme E. Tentschert, 2007)

Normaler Weise wird die Schneehöhe mit einem Schneepegel, also einer senkrecht stehenden Latte mit Zentimeterteilung, gemessen. Die Wahl des Aufstellungsortes, nicht in einer Mulde, nicht auf einer Kuppe, ist wichtiger als die „Genauigkeit" der Ablesung. Die Angabe der Schneehöhe auf fünf Zentimeter ist ausreichend. Für die quasikontinuierliche Aufzeichnung der Schneehöhe eignet sich ein Ultraschallsensor, der in ausreichender Höhe über der Messfläche aufgehängt wird und seine Daten an einen Datensammler und eventuell zusätzlich via Fernübertragung an eine Zentralstelle weiter gibt. Erfahrungsgemäß kommt es während eines Schneefalles zu Fehlmessungen mit dem Ultraschallsensor, weil der Ultraschall auch an den herum wirbeln-

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at
den Schneeflocken reflektiert wird. Eine Plausibilitätskontrolle der registrierten Daten vor ihrer Verwendung ist angeraten. Neuschneehöhen werden mit einem Neuschneebrett gemessen. Dies ist eine weiß gestrichene kleine Platte mit einem darauf montierten kurzen Schneepegel. Das Neuschneebrett wird täglich abgelesen und dann abgekehrt und wieder auf die Schneeoberfläche gestellt. Genauere Definitionen der genannten Messmittel finden sich u.a. in der Wasserkreislauferhebungsverordnung im Wasserrechtsgesetz (Oberleitner, 2007) und in diversen Vorschriften des Hydrographischen Dienstes.

Abbildung 4 zeigt eine weitgehend komplett ausgestattete Schneemessstelle, an der außer der Schneehöhe auch eine Reihe weiterer Messwerte erhoben wird. Die Messstelle besteht aus: Ultraschallsensor für die Schneehöhe, Waagen-Ombrograph für flüssige und feste Niederschläge, Schneekissen (Snow Pillow) und Schneelysimeter. Das Snow Pillow dient der Bestimmung des Schneewasserwertes: Die Schneedecke drückt mit ihrem Gewicht auf ein mit Wasser-Frostschutz-Mischung gefülltes Kissen aus flexiblem und auch bei Kälte nicht starr werdendem, UV-beständigem Material. Ein Schlauch verbindet das Kissen mit einem Steigrohr, in dem die Frostschutzmischung bei Schneefall ansteigt bzw. bei Abschmelzen oder Verdunsten der Schneeauflage absinkt. Einem Millimeter Schneewasserwert-Änderung entspricht eine Spiegeländerung von einem Millimeter im Steigrohr. Die Spiegeländerungen werden mit Drucksonde und Datensammler registriert. Das Schneelysimeter dient dazu, das Schmelzwasser von der Oberfläche des Snow Pillows aufzufangen und über eine Registriereinrichtung zu leiten. Somit kann mit der Kombination aus Pillow und Lysimeter eine vollständige Wasserbilanz für die Pillow – Lysimeter – Fläche gerechnet werden. Weitere Details über die TIWAG-Messstelle können bei Kirnbauer & Blöschl (1990) nachgelesen werden. Seit einigen Jahren sind Schneekissen in unterschiedlichen Größen, je nach zu erwartender Schneehöhe, im Handel erhältlich (siehe z. B. Sommer, 2009).

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

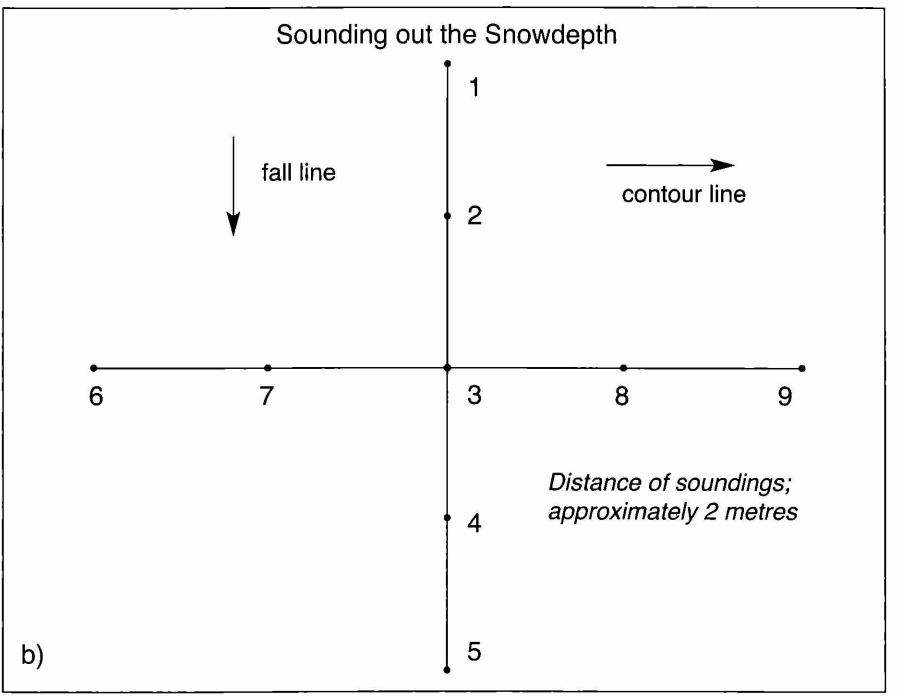


Abb. 5: a) Sondierung der Schneehöhe mit der Lawinensonde; b) Sondenkreuz

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

Erfassung der Schneedecke im Einzugsgebiet

Für Wasserhaushaltsuntersuchungen und Simulations- und Vorhersagemodelle werden Informationen über die flächenhafte Verteilung der Schneedecke, insbesondere des Schneewasserwertes gebraucht. Diese flächenhafte Information zu erhalten stößt auf erhebliche Schwierigkeiten. Als Basis für eine Interpolation auf die Fläche können sogenannte Snow Courses im Einzugsgebiet angelegt werden. Hier wird an vorher festgelegten Punkten entlang der zu planenden Route mit der Lawinensonde die Schneehöhe bestimmt (Abb. 5) und dann der Schneewasserwert ermittelt (Abb. 6). Bei der Sondierung der Schneehöhe bewährt sich das „Sondenkreuz" In der Schichtenlinie und in der Falllinie werden im Abstand je einer Schilänge insgesamt neun Sondierungen durchgeführt. Der Mittelwert dieser neun Werte kann als die repräsentative Schneehöhe angesehen werden. An jenem Sondierungsort, wo die gemessene Tiefe dem Mittelwert am nächsten kommt, sollte auch die Schneewasserwert-Bestimmung vorgenommen werden. Je nach Schneehöhe kann das sehr aufwendig werden, weil ja das Ausstechrohr (Abb. 6) von der Schneeoberfläche bis zum Boden hinunter

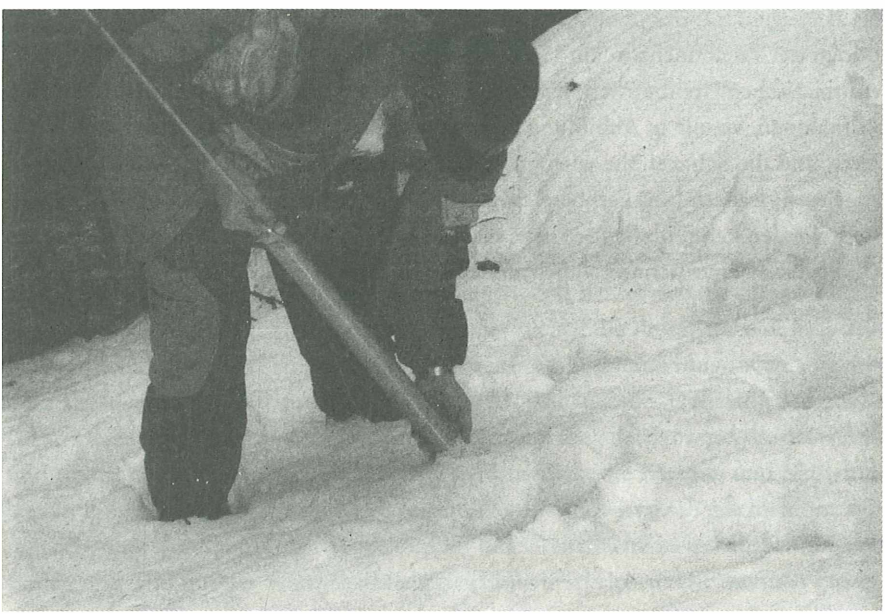


Abb. 6: Ausstechrohr zur Entnahme einer Schneeprobe zur Bestimmung der Schneedichte bzw. des Schneewasserwertes

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at
gebohrt werden muss. Da kann es vorkommen, dass der Messtrupp sich durch eine meterdicke Schneedecke hindurch graben muss. Dank der Tatsache, dass die Schneedichte nicht so heterogen ist wie die Schneehöhe, muss nicht bei jedem Sondenkreuz eine Schneewasserwert-Bestimmung vorgenommen werden.

Fernerkundungsmethoden

Zur Feststellung der Schneebedeckung von Einzugsgebieten können Fernerkundungsmethoden eingesetzt werden. Ihnen allen ist gemeinsam, dass a priori nur festgestellt werden kann, ob ein bestimmtes Flächenelement im Einzugsgebiet schneebedeckt ist oder nicht. Quantitative Aussagen über den Schneewasserwert können nicht ohne weiteres getroffen werden. Zur Verifikation oder Falsifikation eines flächendetaillierten Schneeschmelzmodelles ist aber die Schneebedeckung allein auch schon aussagekräftig. Hierzu müssen Luftbilder, terrestrische Aufnahmen (Kirnbauer et al., 1991; Kirnbauer & Blöschl, 1993) oder Satellitenbilder (Parajka & Blöschl, 2008) photogrammetrisch ausgewertet werden.

In Abbildung 7 wird ein Ansatz zur Kombination der quantitativen Messung mit Schneepegeln mit der photogrammetrischen Methode gezeigt. Auf dem fast ebenen Boden der Edelbodenalm am Hochschwab sind Schneepegel aufgestellt. Mit einer automatischen, fix montierten Kamera werden von Herbst bis Frühjahr stündlich Aufnahmen wie die in Abbildung 7 gezeigte gemacht. Die Aufnahmen werden entzerrt, und die Schneehöhe wird im Nahbereich von den Schneepegeln automatisch abgelesen, während im Fernbereich, also z. B. im Kar in Bildmitte, lediglich festgestellt werden kann, ob Schnee liegt oder nicht. Die so erhobenen Daten dienen zur Überprüfung eines Schneeschmelzmodells (vgl. Blöschl et al., 2002).

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

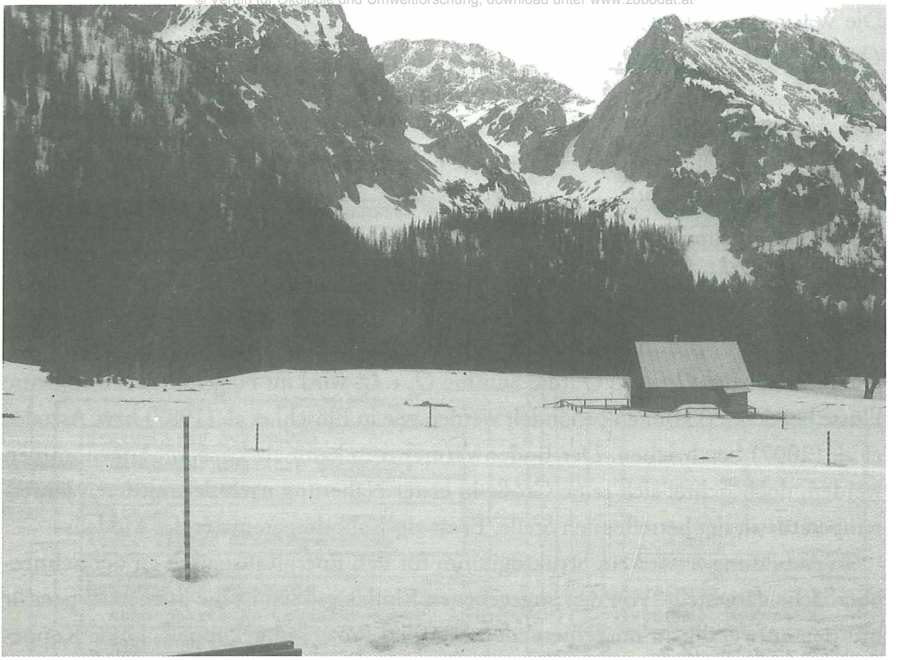


Abb. 7: Dokumentation des Schneedeckenauf- und Abbaues durch terrestrische Fotos.

Modellierung der Schneeschmelze

Auf- und Abbau der Schneedecke werden mit mathematischen Schneeschmelzmodellen simuliert. Nach den Anforderungen an das Modell richtet sich die Flächengliederung des Einzugsgebietes (flächendetailliert oder nicht), die Prozessnähe des Modells (physikalisch basiert oder empirisch) und die zeitliche Diskretisierung (hoch aufgelöst oder Tageswerte) und je nach dem gewählten Modell auch die Datenanforderungen (siehe hierzu z. B. Kirnbauer, 1993a, b). Zur Modellierung der Prozesse, die beim Auf- und Abbau der Schneedecke ablaufen, ist es erforderlich, die Energie- und Massenbilanz in ihrem zeitlichen Verlauf zu verfolgen. Der Energieaustausch geschieht im Wesentlichen an der Schneeoberfläche und an der Grenzfläche zwischen Schnee und Boden und wird mit der Wärmehaushaltsgleichung beschrieben. Die internen Prozesse betreffen ein Drei-Stoff-System aus Eis, flüssigem Wasser und Wasserdampf.

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

Die Wärmehaushaltsgleichung lautet

$Q = Q_{SW} + Q_{LW} + Q_S + Q_L + Q_{Soil}$

mit

Q	Wärmebilanz
Q_{SW}	Kurzwellige Bilanz
Q_{LW}	Langwellige Bilanz
Q_S	Fühlbarer Wärmestrom
Q_L	Latenter Wärmestrom
Q_{Soil}	Bodenwärmestrom

Die Bilanzglieder Q_{LW}, Q_S, Q_L (die Summe $Q_S + Q_L$ wird im Folgenden als turbulente Flüsse bezeichnet) können behandelt werden wie in Blöschl et al. (1987) bzw. Asztalos et al. (2007) beschrieben. Der Bodenwärmestrom kann als konstant angenommen werden, doch richtet sich seine Größe in erster Näherung nach der mittleren Jahrestemperatur an der betreffenden Stelle. Er ist ein Kalibrierparameter des Modells.

In Abbildung 8 wird ein Struktogramm für den Energieaustausch an der Schneeoberfläche dargestellt. Von den angegebenen Einflussgrößen ist die Schneetemperatur mit den aufwendig zu modellierenden internen Prozessen gekoppelt. Diese Koppelung macht Schwierigkeiten bei der empirischen Modellierung der Schneeschmelze: Die Schneeoberfläche kühlt auch im Frühjahr bei wolkenlosem Strahlungswetter in der Nacht auf unter Null Grad ab, und durch diesen Effekt wird die langwellige Ausstrahlung von der Schneeoberfläche reduziert, was nur durch Einführung weiterer empirischer Parameter berücksichtigt werden kann (Braun, 1985; Blöschl & Kirnbauer, 1991).

Für operationelle Anwendungen, etwa im Rahmen von Abflussvorhersageverfahren, wird seit vielen Jahren häufig das empirische Gradtagfaktor-Verfahren in unterschiedlichsten Variationen (Braun, 1985; Hock, 1999, 2003, Hock et al., 2005) angewendet. Bei diesem Verfahren wird die Schmelzwassermenge durch Multiplikation der Differenz aus Lufttemperatur und einer Referenztemperatur des Schnees – oft wird hier Null Grad gewählt – mit einem Faktor, dem Gradtagfaktor ermittelt. Diesem Gradtagfaktor kann auch noch eine jahreszeitliche Variabilität, mit dem Minimum im Dezember und dem Maximum im Juni, aufgeprägt werden. Zusätzlich wurde von Regine Hock eine Adaptierung zur Berücksichtigung der Hangexposition – Südhänge haben verstärkte Schmelze, Nordhänge reduzierte Schmelze – eingeführt. Ein Energiebilanz-Ansatz ohne explizite Berücksichtigung der internen Prozesse wurde von Escher-Vetter (2000) publiziert.

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

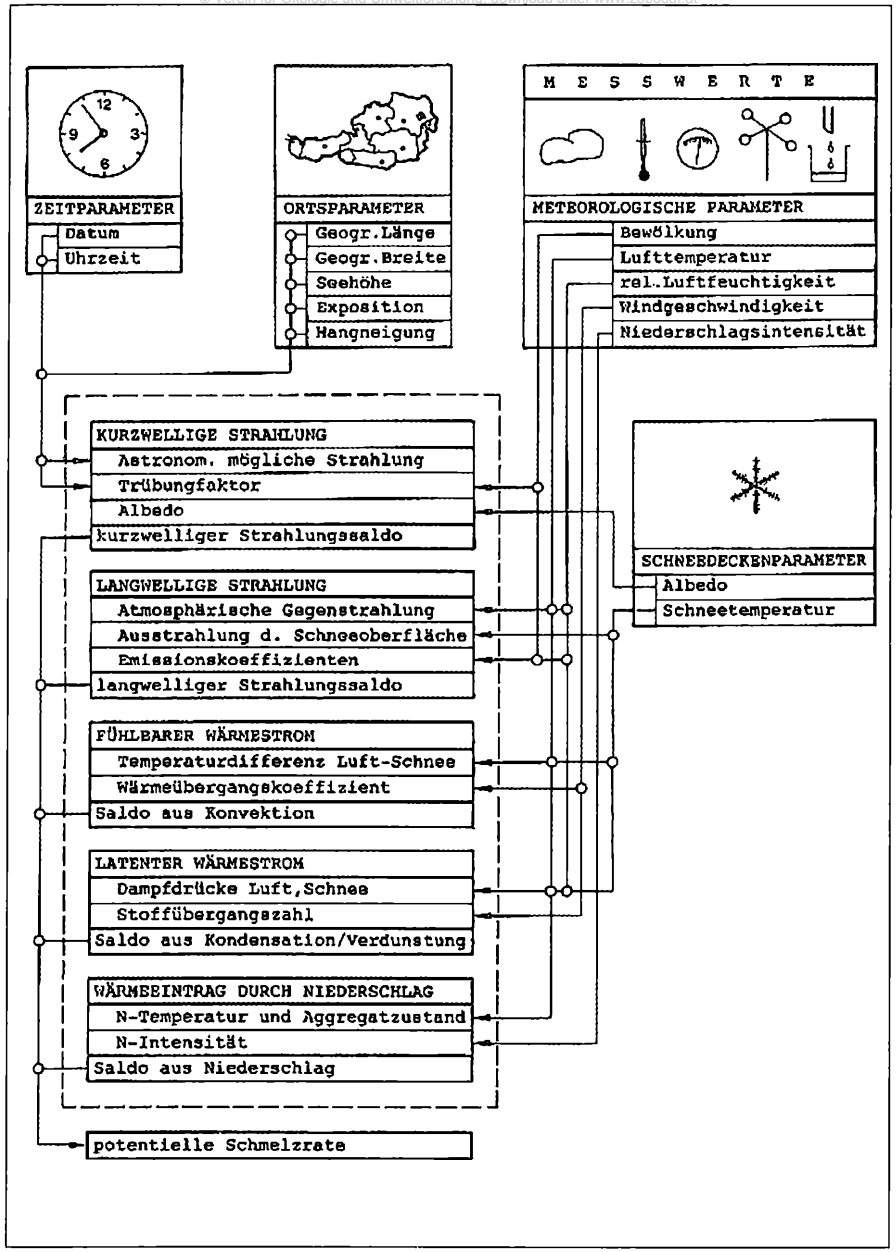


Abb. 8: Struktogramm der Energiebilanzgleichung für Schnee (nach: Blöschl et al., 1987)

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

Die physikalisch strengste Annäherung an das Problem der Schneeschmelze sind Energiebilanz-Ansätze mit Berücksichtigung der internen Prozesse. Hierzu muss das System von gekoppelten Differentialgleichungen für Energie- und Massenbilanz von Eis, Wasser und Wasserdampf in der Schneedecke numerisch gelöst werden. Entsprechende Ansätze existieren z. B. von Siemer (1988), Blöschl (1990) und Reijmer & Hock (2008).

Bei der Modellierung des Abflusses aus vergletscherten Einzugsgebieten kommt der Gletscherschmelze besondere Bedeutung zu, wie schon in der Einleitung erwähnt. Letztere wird durch die kurzwellige Strahlung wesentlich beeinflusst.

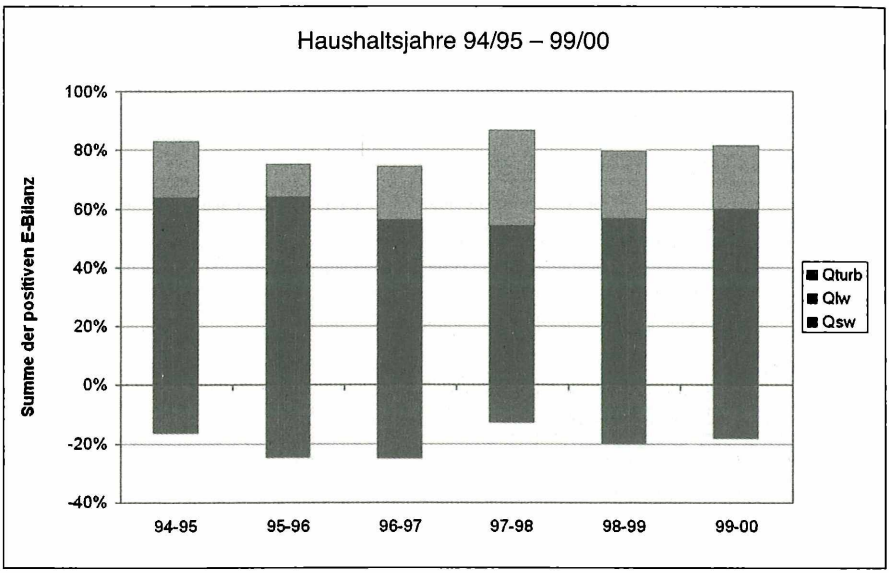


Abb. 9: Energiebilanzglieder für den Vernagtferner, Ötztal, Tirol (turb = turbulente Flüsse; lw = langwellige Strahlung; sw = kurzwellige Strahlung)

Aus Abbildung 9 ist zu erkennen, dass fast zwei Drittel des positiven Energieeintrages in den Gletscher aus kurzwelliger Strahlung kommen. Somit kommt der Albedo, dem Reflexionsvermögen der Schnee- oder Eisoberfläche, eine besondere Bedeutung zu. Die Albedo ist der Quotient aus reflektierter zu eingestrahlter kurzwelliger Strahlung. Dieser Quotient ist von einer Fülle von Einflussfaktoren abhängig, so z. B. von der Kornform der Schneekristalle oder -körner an der Oberfläche, von einem eventuellen

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at
Wasserfilm auf den Schneekörnern, vom Grad der Verschmutzung, vom Einstrahlungswinkel der Sonnenstrahlung, In der Literatur zu den Schmelzmodellen werden diese Abhängigkeiten oftmals nicht detailliert modelliert, sondern es wird versucht, die zeitliche Veränderung der Albedo summarisch durch das Alter der Schneeoberfläche seit dem letzten Schneefall zu beschreiben. Dieser Ansatz beschreibt zwar das Phänomen, nicht aber dessen eigentliche Ursachen. Für das an der TU Wien entwickelte Gletschermodell wurde daher ein spezieller Baustein zur Modellierung des zeitlichen Verlaufes der Albedo als Folge unterschiedlicher Einflussfaktoren entwickelt. Dieser Baustein setzt die Beobachtung, dass es im Wesentlichen der Energiegenuss ist, der die Metamorphose der Schneedecke und somit auch die Veränderung der Albedo bewirkt, in einen entsprechenden Algorithmus um. Die Änderung der Albedo wird als Funktion des Energieeintrages und seiner ersten Ableitung simuliert. Eine nähere Beschreibung dieses Bausteines findet sich in (Asztalos, 2004).

Gletscherschmelzmodell für die Abflussvorhersage

Das Hochwasserprognosesystem für den Tiroler Inn (HoPI) enthält den Baustein „SES", das an der TU Wien entwickelte Gletschermodell. Es ist ein flächendetailliert arbeitendes bilanzierendes Energiebilanzmodell für den Auf- und Abbau von temporärer Schneedecke und von Firn. Für das Gletschereis werden keine Bilanzierungen gerechnet. Das nicht vergletscherte Umfeld der Gletscher wird insofern berücksichtigt, als für diese Flächen Auf- und Abbau der Schneedecke mit dem gleichen mathematischen Instrumentarium wie für die temporäre Schneedecke am Gletscher bearbeitet wird. Für die Simulation der Abflüsse zufolge Schmelze bzw. flüssigen Niederschlägen von den vergletscherten und unvergletscherten Einzugsgebietsteilen wird ein auf parallelen Speicherkaskaden basierendes Abflussmodell verwendet. Es modelliert die unterschiedlichen Verzögerungs- und Retentionsprozesse, denen der Abfluss je nach seinem Entstehungsort unterliegt. Als adäquate Möglichkeit zur Kalibrierung bzw. Validierung des Schmelzmodells werden zusätzlich zu den Abflussganglinien an Pegeln unterhalb der Gletscherzungen auch simulierte und durch Fernerkundung dokumentierte Ausaperungsmuster verwendet. Die Simulationsergebnisse stimmen auch für die Verifikationsperioden mit den Fernerkundungs-Bildern (Orthofotos bzw. terrestrisch aufgenommene Fotos) gut überein. Dies deutet darauf hin, dass das Modell aus den richtigen Gründen richtige Resultate liefert. Der Einbau des Gletschermodells SES in das Vorhersagemodell HoPI ist somit gerechtfertigt.

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

Zukunftsperspektiven

Es gab kaum ein wissenschaftliches Thema, das in den Medien mit einer derartigen Breitenwirkung diskutiert wurde wie der Klimawandel. Kirnbauer und Kohl (2007) schreiben zu diesem Thema: „Die weltweit diskutierten und prognostizierten Auswirkungen des Klimawandels sind mannigfaltig. Der Bogen spannt sich von wissenschaftlich gut abgesicherten Phänomenen, über vernachlässigbare, manchmal skurrile Effekte bis zu apokalyptischen Visionen auf der einen Seite und gänzlichem Skeptizismus auf der anderen." „Was wir in den letzten zehn Jahren in der Klimadebatte erlebt haben, war die Geburt einer konstruierten Gewissheit von großer Suggestivkraft. Ihr Erfolg hat nicht zuletzt mit ihrer eingängigen Erzählbarkeit und Dramatisierbarkeit zu tun, aus der zunächst die Medien Schlagzeilen machten und dann die Politiker Programme" (Schulz, 2007). Es ist leicht einzusehen, dass es vor diesem sehr emotionalen Hintergrund nicht einfach ist, sachliche und seriöse Auskünfte über die Auswirkungen des Klimawandels auf die Hochwassersicherheit der österreichischen Infrastruktur zu erhalten. Die sicherste Quelle ist das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), dessen vierter Report (IPCC, 2007) Anfang Februar 2007 erschienen ist.

Die Beobachtungen und Messungen der Massenbilanz der Alpengletscher lassen keinen Zweifel darüber aufkommen, dass eine Änderung des Klimas im Gange ist. Als Ursache dieses Klimawandels steht in der öffentlichen Diskussion meist der anthropogene Einfluss im Mittelpunkt. Dies greift aber zu kurz, denn Gletschervorstöße und -rückzüge gab es immer schon, wobei aber nur die Gletschervorstöße in Form von Moränen eindeutige Zeugen hinterlassen. Die Spuren eines Rückzuges werden vom folgenden Vorstoß vernichtet (Böhm, 2008). Auf die Ursachendiskussion kann hier nicht eingegangen werden, eine Beschränkung auf Beobachtungen an Gletschern und die Wiedergabe von Ergebnissen kompetenter Forschergruppen und seriöser Quellen (IPCC, 2007; Weber & Braun, 2004; Hock et al., 2005) soll die Leitlinie der folgenden Bemerkungen sein.

Das Abschmelz- und daher auch das Abflussverhalten eines Gletschers sind sehr stark durch seinen Ausaperungszustand bestimmt. Der Vergleich der sommerlichen Abflussganglinien vom Vernagtferner im Ötztal zwischen den Jahren 1981 und 1991 (Abb. 10) zeigt, dass schon 1991 die Gletscherzunge viel weiter als 1981 ausgeapert gewesen sein muss, denn die viel größeren Tagesschwankungen deuten klar darauf hin, dass durch die Ausaperung 1991 viel mehr Gletschereis mit seiner viel niedrigeren Albedo der Sonnenstrahlung ausgesetzt gewesen war als 1981.

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

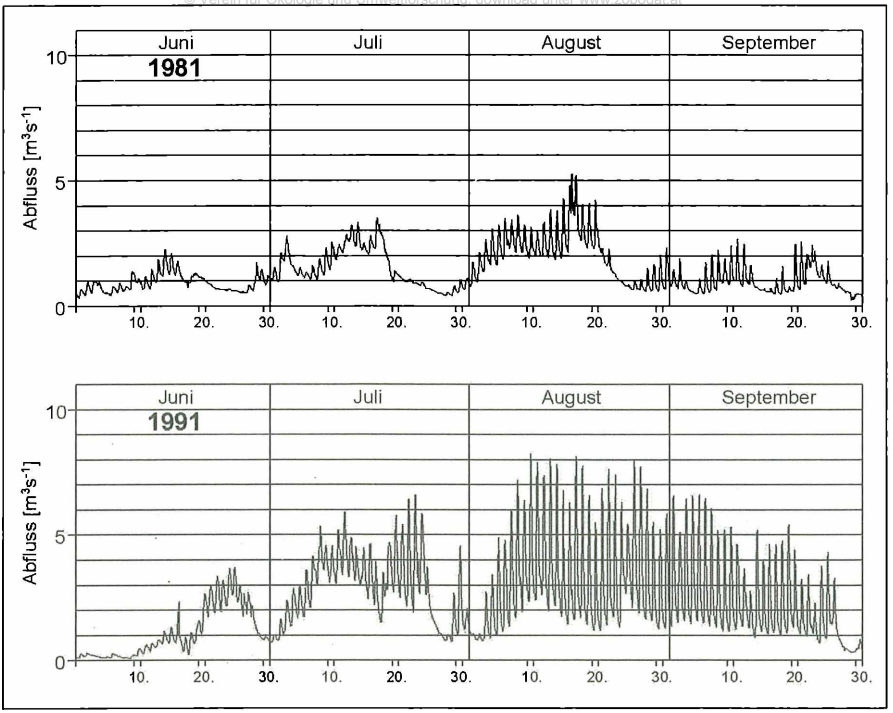
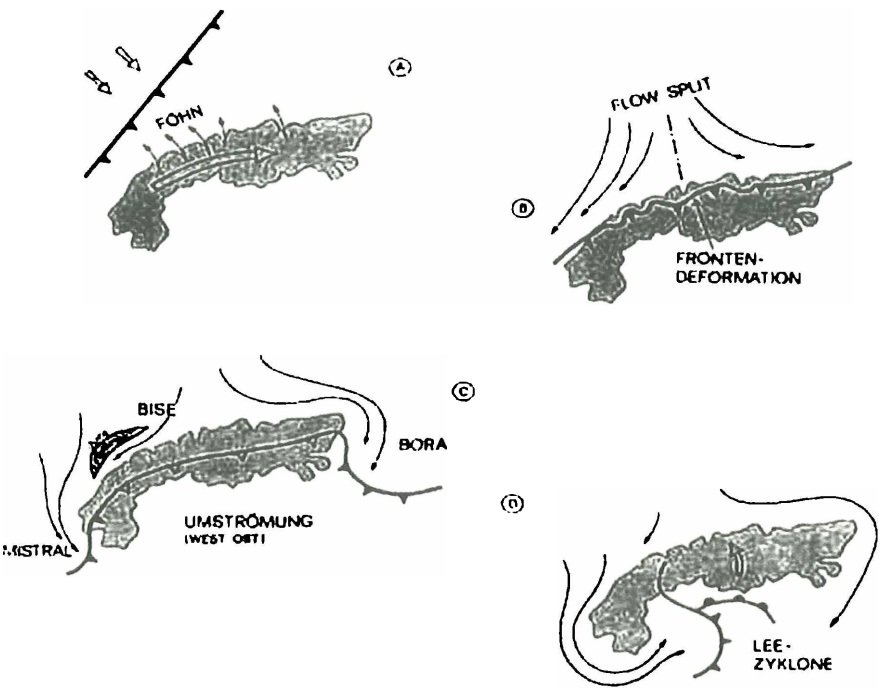


Abb. 10: Zunahme der täglichen Abflussschwankungen am Vernagtferner, eine Folge der zunehmenden Ausaperung der Gletscherzunge (aus Escher-Vetter et al., 1998)

Es ist verständlich, dass die Modellierung solcher Phänomene ein lohnendes Ziel ist. Ein Modell, das die in der Vergangenheit beobachteten Prozesse richtig nachzeichnet, sollte doch auch verlässliche Prognosen für die Zukunft erlauben. Dieser Hoffnung stellen sich allerdings Schwierigkeiten entgegen: Die meteorologischen Prognosemodelle, die zur Berechnung von Zukunftsperspektiven für das Klima verwendet werden, müssen auf Szenarien der zukünftigen wirtschaftlichen und soziologischen Entwicklung der Menschheit aufbauen (IPCC, 2007), und diese sind unsicher. Weiters haben die meteorologischen Modelle derzeit noch große Schwierigkeiten damit, gerade jene Phänomene zu beschreiben, die für den Massenhaushalt der Gletscher entscheidend sind, nämlich den Niederschlag und die Bewölkung. Die gute Beschreibbarkeit der Temperaturentwicklung hilft da nicht weiter. Zusätzlich sind sogar die kleinskaligen Lokalmodelle mit ihrem Berechnungsraster in der Größenordnung von zehn Kilome-

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

tern nicht in der Lage, ein für extreme Niederschlagsereignisse im Alpenraum bedeutsames Phänomen zu beschreiben, die Leezyklogenese. In Mitteleuropa führt sie zur Vb Wetterlage, die extrem große Niederschläge bringen kann, die bis in den Alpenraum hineingreifen. In Abbildung 11 wird der Ablauf dieses Prozesses schematisch dargestellt. Durch eine von NW heranziehende Kaltfront wird im Lee der Alpen, im Bereich des Golfes von Genua, ein Tief induziert, das seine Fronten nach NE schickt, wo sie zu heftigen, großflächigen und anhaltenden Niederschlägen führen.



Schematische Darstellung der alpinen Leezyklogenese:
a) Kaltfront mit seichtem Präfrontalföhn;
b Blockierung mit Frontendeformation und Flow Split;
c) Umströmung der Kaltluft (Mistral, Bise, Bora):
weiße Pfeile: Höhenströmung
schwarze Pfeile: Bodenströmung

Abb. 11: Leezyklogenese an den Alpen (aus Wanner, 2006)

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at

Die Lebensdauer der Gletscher zu prognostizieren ist somit nur mit einiger Unschärfe möglich. Die Arbeit von Zemp (2006) zielt genau auf diese Frage. Seine Aussagen lassen sich auf die Kurzfassung bringen, dass bis 2050 große Gletscher mit hoch gelegenem Nährgebiet stark schrumpfen, aber nicht ganz verschwinden werden. Dies gilt beispielsweise für die Pasterze und die großen Gletscher im Stubai-, Ötz- und Kaunertal. Kleinere und tiefer gelegene Gletscher werden 2050 vermutlich zur Gänze abgeschmolzen sein. Dies betrifft z. B. die Gletscher am Dachstein, auf der Zugspitze und in der Silvretta.

Zusammenfassung

Schnee und Gletschereis sind außerordentlich wichtige Größen des Wasserhaushaltes speziell in alpinen Gebieten. Die Basis jeglicher mathematischen Modellierung der Schneeschmelze und des Massenhaushaltes der Gletscher ist die sorgfältige Erfassung adäquater Daten, die als Inputgrößen, Anfangs- und Randbedingungen der Modelle sowie zu deren Validierung notwendig sind. Nach wie vor macht die flächenhafte Erfassung der Schneewasserwerte große Schwierigkeiten, was sich in der Ergebnisunschärfe von Schmelzmodellen niederschlägt. Dennoch sind Schnee- und Gletscherschmelzmodelle für die operationelle Abflussvorhersage notwendig, und die schon jetzt eingesetzten Modelle genügen den Anforderungen der Abflussvorhersage weitgehend. Auf Modellrechnungen basierende Perspektiven für die zukünftige Entwicklung der Schneedecke und der Gletscher sind mit großen Unschärfen behaftet. Hier sollte die öffentliche Diskussion um mehr Sachlichkeit, abseits von Glaubenssätzen oder wirtschaftlichen Interessen bemüht sein.

Literatur

ASZTALOS J. (2004): Ein Schnee- und Eisschmelzmodell für vergletscherte Einzugsgebiete. Diplomarbeit, Technische Universität Wien.

ASZTALOS J., KIRNBAUER R., ESCHER-VETTER H. und BRAUN L. (2007): A distributed energy balance snow and glacier melt model as a component of a flood forecasting system for the Inn river. Proceedings of the Alpine*Snow*Workshop, Munich, October 5–6, 2006, Germany. Berchtesgaden National Park research report, Nr. 53, Berchtesgaden, 2007. pp. 9–17.

BLÖSCHL G. (1990): Snowmelt simulation in rugged terrain. Dissertation, Technische Universität Wien.

© Verein für Ökologie und Umweltforschung; download unter www.zobodat.at
BLÖSCHL G., KIRNBAUER R. und GUTKNECHT D. (1987): Zur Berechnung des Wärmeeintrags an einem Punkt der Schneedecke. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, 31(5): 149–155.

BLÖSCHL , G., KIRNBAUER, R. (1991): Point snowmelt models with different degrees of complexity – internal processes. Journal of Hydrology. 129 (1991), pp. 127–147.

BLÖSCHL , G., R. KIRNBAUER, J. JANSA, K. KRAUS, G. KUSCHNIG, D. GUTKNECHT, D. und Ch. RESZLER (2002): Einsatz von Fernerkundungsmethoden zur Eichung und Verifikation eines flächendetaillierten Schneeschmelzmodells. Österr. Wasser- und Abfallwirtschaft 54 (2002), H. 1/2, pp. 1–16.

BÖHM, R. (2008): Heiße Luft; Reizwort Klimawandel – Fakten, Ängste, Geschäfte. Edition Va Bene, Klosterneuburg.

BRAUN L.N. (1985): Simulation of snowmelt-runoff in lowland and lower alpine regions of Switzerland. Zürcher Geographische Schriften, 21: 166 pp, 1985.

ESCHER-VETTER, H. WEBER, M., BRAUN, L.N. (1998): Gletscherverhalten als klimatische Information –Auswirkungen von Klimaänderungen auf den Wasserhaushalt alpiner, teilweise vergletscherter Gebiete. BayFORKLIM, Bayerisches Klimaforschungsprogramm, Abschlußbericht zu den Projekten A II 2 und H2, Bayerische Akademie der Wissenschaften, Kommission für Glaziologie, München.

ESCHER-VETTER H. (2000): Modelling meltwater production with a distributed energy balance method and runoff using a linear reservoir approach – Results from Vernagtferner, Oetztal alps, for the ablation seasons 1992 to 1995. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie 36: 119–150.

FUCHS, T., RAPP, J., RUBEL, F., AND RUDOLF, B. (2001): Correction of Synoptic Precipitation Observations due to Systematic Measuring Errors with Special Regard to Precipitation Phases. Physics and Chemistry of the Earth, Part B: Hydrology, Oceans and Atmosphere, Vol. 26, No. 9, pp. 689–693.

HOCK, R., (1999): A distributed temperature index ice and snow melt model including potential direct solar radiation. Journal of Glaciology 45 (149), 101–111.

HOCK, R., (2003): Temperature index melt modelling in mountain regions. Journal of Hydrology 282 (1–4), 104–115. doi:10.1016/S0022-1694(03)00257-9.

HOCK, R., P. JANSSON AND L. BRAUN (2005): Modelling the response of mountain glacier discharge to climate warming. In: Huber, U. M., M. A. Reasoner and H. Bugmann (Eds.): Global Change and Mountain Regions – A State of Knowledge Overview. Springer, Dordrecht. 243–252.

IPCC-Report (2007): http://www.ipcc.ch/

KIRNBAUER, R. (1993a): Modellkonzeptionen zur operationellen Kurzfristvorhersage der Schneeschmelze. In: Hochschulkurs „Schneehydrologie – Modellierung der Schneeschmelze in Einzugsgebieten" Schriftenreihe der Forschungsinitiative des Verbundkonzernes. 13, pp. 87–110. Wien, 1993.

KIRNBAUER , R. (1993b): Datenanforderungen zweier operationeller Schneeschmelzmodelle. In: Hochschulkurs „Schneehydrologie – Modellierung der Schneeschmelze in Einzugsgebieten" Schriftenreihe der Forschungsinitiative des Verbundkonzernes. 13, pp. 111–116. Wien, 1993.

© Verein für Ökologie und Umweltforschung, download unter www.zobodat.at
KIRNBAUER, R., BLÖSCHL, G. (1990): A lysimetric snow pillow station at Kühtai/Tyrol. In: Hydrology in Mountainous Regions. I-Hydrological Measurements; the Water Cycle. IAH/IAHS International Conference on Water Resources in Mountainous Regions. Lausanne – Switzerland. IAHS Publ. 193, pp. 173–180.

KIRNBAUER, R., BLÖSCHL G., WALDHÄUSL, P., HOCHSTÖGER, F. (1991): An analysis of snow cover patterns as derived from oblique aerial photographs. In: Snow, Hydrology and Forests in High Alpine Areas (ed. by H. Bergmann, H. Lang, W. Frey, D. Issler and B. Salm) (Proc. Vienna Symp., August 1991). IAHS Publ. no. 205, pp. 91–99.

KIRNBAUER , R. und G. BLÖSCHL (1993): Wie ähnlich sind Ausaperungsmuster von Jahr zu Jahr? Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen 37(5/6), S. 113–121.

KIRNBAUER , R. und KOHL, B. (2007): Grundlagen zur Beurteilung der Eignung hydrologischer Modelle für die Berechnung des Einflusses von Klimaszenarien auf die Bemessung von Wildbacheinzugsgebieten. Interreg III B Projektes ClimChAlp, WP5; Unveröff. Bericht.

KIRNBAUER , R., ACHLEITNER, ST., SCHÖBER, J., ASZTALOS, J., UND SCHÖNLAUB, H. (2009): Hochwasservorhersage Inn: Modellierung der Gletscherabflüsse. In: Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich. Im Druck.

KOBOLTSCHNIG, G.R. (2007): Mehrfachvalidierung hydrologischer Eis- und Schneeschmelzmodelle in hochalpinen, vergletscherten Einzugsgebieten. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.

OBERLEITNER, F. (2007): Kommentar zum Wasserrechtsgesetz 1959 mit der Wasser-Rahmenrichtlinie, den Verordnungen AAEV und IEV, einer Aufstellung der wasserwirtschaftlich bedeutsamen Normen und mit der Judikatur in Leitsätzen. 2. aktualisierte und erweiterte Auflage Manzsche Verlags- und Universitätsbuchhandlung; 828 S. Wien 2007.

PARAJKA J. and G. BLÖSCHL (2008): The value of MODIS snow cover data in validating and calibrating conceptual hydrologic models. Journal of Hydrology (2008) 358, 240–258.

REIJMER, C. H. and R. HOCK (2008): A distributed energy balance model including a multilayer sub-surface snow model. Journal of Glaciology. 54, No. 184, 61–72.

SCHULZ, G. (2007): Die Klima-Hysterie. Artikel 12-01-2007, Welt-Online, http://www.welt.de/print-welt/article708190/Die_Klima-Hysterie.html.

SIEMER, A. H. (1988): Ein eindimensionales Energie-Massenbilanzmodell einer Schneedecke unter Berücksichtigung der Flüssigwassertransmission. Berichte des Inst. für Meteorologie u. Klimatologie der Universität Hannover, 34: 167 S.

SOMMER Fa. (2009): Firmen-Webauftritt http://www.sommer.at/no_cache/produkte/geraete-sensoren/schnee/sommer/own/schneekissen.html

SLUPETZKY, H. und WIESENEGGER, H. (2005): Glazialhydrologische Aspekte des Jahres 2003 im „Hohe Tauern" Einzugsgebiet der Salzach. In: Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich Nr. 83, S. 61–81.

WANNER, H. (2006): Klimaeinfluss der Gebirge; Skript Alpen, Geogr. Inst der Uni Bern, 2006 http://www.giub.unibe.ch/klimet/teaching/SkriptAlpen.pdf

WEBER, M. & L. BRAUN (2004): „Gletscherschmelze ohne Ende? – Hat der Klimawandel bereits begonnen?", Mitteilungen des Österreichischen Alpenvereins Heft 1–04, S. 16–20.

ZEMP, M. (2006): Glaciers and Climate Change – Spatio-temporal Analysis of Glacier Fluctuations in the European Alps after 1850. Dissertation, Universität Zürich.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Umwelt - Schriftenreihe für Ökologie und Ethologie

Jahr/Year: 2009

Band/Volume: 35

Autor(en)/Author(s): Kirnbauer Robert

Artikel/Article: Schnee und Gletscher - Wasserreserven für heute und morgen? 127-145