



Modelling of the mountain snow cover in the Berchtesgaden National Park



Die Modellierung der
Gebirgsschneedecke
im Nationalpark Berchtesgaden

Modelling of the mountain
snow cover in the
Berchtesgaden National Park

Ulrich Strasser

Department für Geographie
(Ludwig-Maximilians-Universität München)

Berchtesgaden, Juli 2008

Impressum:

Nationalpark Berchtesgaden
Forschungsbericht 55/2008

Herausgeber:

Nationalparkverwaltung Berchtesgaden, Doktorberg 6,
D-83471 Berchtesgaden, Telefon 0 86 52/96 86-0, Telefax 0 86 52/96 86 40,
e-Mail: poststelle@npv-bgd.bayern.de

Internet: <http://www.nationalpark-berchtesgaden.de>

im Auftrag des Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt, Gesundheit und Verbraucherschutz

Alle Rechte vorbehalten!

ISSN 0172-0023

ISBN 978-3-922325-62-8

EAN-Code 9783922325628

Druck: Berchtesgadener Anzeiger, Berchtesgaden

Gedruckt auf chlorfrei gebleichtem Papier

Titelbild:

Ulrich Strasser

Fotos:

Peter Neusser, Ulrich Strasser

Zusammenfassung

Im Hochgebirge wird ein beträchtlicher Anteil der Niederschläge temporär in der Schneedecke gespeichert. Die Dynamik dieser Schneedecke unterliegt dabei einer Reihe von spezifischen Prozessen, die zu einer ausgeprägten räumlichen Heterogenität der Schneebedeckung führen. Diese Prozesse umfassen die stark von der Topographie beeinflussten meteorologischen Vorgänge in der Grenzschicht, die Massenbilanz der Schneedecke am Boden, die Wechselwirkungen zwischen Schnee und Vegetation sowie die laterale Verlagerung von Schnee aufgrund von gravitativen Rutschen und wind-induziertem Transport.

Im vorliegenden Forschungsbericht wird eine kontinuierliche, räumlich sowie zeitlich hochaufgelöste Modellierung dieser Prozesse mit einer Reihe von flächenverteilten Modellen dargestellt. Die Prozessbeschreibungen orientieren sich, soweit möglich und sinnvoll, an physikalischen Gegebenheiten, so dass aufwendige Kalibrierungen nicht notwendig sind und das Modellsystem prinzipiell in Ort und Zeit übertragbar ist. Dadurch und durch die Berücksichtigung der wesentlichen, die Heterogenität der hochalpinen Schneedecke verursachenden Prozesse werden Szenariosimulationen zukünftiger Schneedeckenentwicklung für verändertes Klima ermöglicht sowie eine Vorhersage der Verteilung und Verfügbarkeit der Wasserressource Schnee in Hochgebirgs-Einzugsgebieten. Anhand der Modellergebnisse wird eine detaillierte Diskussion der sich aus den einzelnen Prozessbeschreibungen ergebenden Muster durchgeführt. Testgebiet ist die hochalpine Region des Nationalparks Berchtesgaden (Bayerische Alpen, Süddeutschland).

Die Prozesse zur Akkumulation, der Wechselwirkungen zwischen Schnee und Vegetation, der gravitativen Umverteilung sowie der Ablation von Schnee werden mit dem physikalisch basierten, flächenverteilten Modell AMUNDSEN (**A**lpine **M**ultiscale **N**umerical **D**istributed **S**imulation **E**ngine) simuliert, welches zur Simulation der Schneedeckendynamik in Hochgebirgsräumen kleiner bis mittlerer Skala konzipiert wurde. Das Modell berechnet stündliche meteorologische Eingabefelder aus Punktmessungen von möglichst repräsentativ im Raum und in der Höhe verteilten Stationen. Aus den Messwerten werden unter Einsatz eines integrierten stochastischen Wettergenerators Szenarien zukünftigen Klimas produziert. Die Prozesse und Auswirkungen von wind-induziertem Schneetransport werden mit einem separaten Modell unter Verwendung einer Bibliothek modellierter Windfelder simuliert.

Bei der Aufbereitung der meteorologischen Felder, dem Modellinput, wird den spezifischen Charakteristika hochalpiner Gebiete Rechnung getragen. Dazu zählen dynamische, höhenabhängige Gradienten der meteorologischen Variablen, der Einfluss der Topographie auf die kurz- und langwelligen Strahlungsflüsse sowie deren Modifikation durch Schatten, multiple und Geländereflexionen und Wolken. Das räumliche Muster der Strahlungsflüsse, welche zur Schneeschmelze wesentlich Energie beitragen, ist außerordentlich komplex. Sie spielt aber eine entscheidende Rolle für das Verständnis der zeitlichen Dynamik und der räumlichen Heterogenität der hochalpinen Schneedecke.

Die Energiebilanz der Schneeoberfläche wird mit einem physikalisch basierten Ansatz bestimmt, einschließlich der expliziten Formulierung des beteiligten Austausches von Masse, d.h. der Akkumulations- und Ablationsprozesse. Beide Bilanzen sind für den betrachteten Schneespeicher zwischen Boden und Atmosphäre geschlossen.

In vielen gemäßigten Berggebieten ist Bergwald der dominante Landnutzungstyp. Mit AMUNDSEN wird der Einfluss des Bestandes auf die mikrometeorologischen Verhältnisse über dem Schnee am Boden explizit behandelt. Außerdem wird die Sublimation von zuvor interzipiertem Schnee zurück in die darüberliegenden Luft-

schichten berücksichtigt, sowie Schmelze und Herunterfallen von Schnee aus dem Interzeptionsspeicher. In den höheren Bereichen vieler hochalpiner Gebiete dominieren steile Felswände und bilden zusammen mit scharfen Gipfelgraten das prägende Landschaftselement. Die hier wirkenden Prozesse der lateralen Umverteilung von Schnee aus den steilen Hangbereichen in die darunter befindlichen Verflachungen, meist Karflächen, bedingen einen Großteil der in Hochgebirgsregionen typischen räumlichen Muster der Schneedecke. Um diese realistisch wiedergeben zu können, werden die dafür relevanten Prozesse explizit modelliert. Es entspricht der visuellen Erfahrung, dass in den Kar- und Muldenbereichen die höchsten Akkumulationsraten vorkommen und die lokale Schneebedeckung bis in das späte Frühjahr hinein andauern kann, während die Gipfelgrate und steilen Felsflanken weitgehend schneefrei bleiben.

Die wind-induzierten Prozesse der Erosion, des Transportes, der Deposition sowie der Sublimation von Schnee aus einer Schicht turbulenter Suspension werden mit dem physikalisch basierten, flächenverteilten Modell SnowTran-3D quantifiziert. Dabei finden mit dem Atmosphärenmodell MM5 simulierte Felder von lokaler Windgeschwindigkeit und -richtung Verwendung. Die Windfelder wurden zuvor berechnet und in einer Bibliothek gespeichert, auf die zur Laufzeit der Schneedeckenmodellierung zugegriffen wird. Der Zugriffsschlüssel zu dieser Bibliothek wird durch DWD-Lokalmodell-Rechnungen dargestellt, die die Kopplung zwischen der Schneemodellzeit und -skala und dem synoptischen Status der Atmosphäre erlauben.

Mit Hilfe eines stochastischen Wettergenerators, der direkt mit AMUNDSEN gekoppelt ist, können auf sehr effiziente Weise meteorologische Zeitreihen potentieller zukünftiger Klimaentwicklung generiert werden. Dies geschieht durch Aufteilung der vorhandenen meteorologischen Messreihen in zeitlich begrenzte Perioden und anschließendes Umsortieren unter Berücksichtigung eines vorgegebenen klimatischen Trends. Daraus wird eine zukünftige, physikalisch konsistente Zeitreihe meteorologischer Daten unter Reproduktion dieses Trends konstruiert. Die anschließende Modellierung der Schneedeckendynamik unter Verwendung der generierten zukünftigen Zeitreihe meteorologischer Eingabedaten erlaubt dann eine Quantifizierung der potentiellen Veränderung des Wasserspeichers Schnee unter den veränderten Klimabedingungen, sowie die Abschätzung der entsprechenden Auswirkungen auf die Hydrologie eines Hochgebirgs-Einzugsgebietes.

Die Validierung des Modellsystems auf der Punktskala zeigt die gute Übereinstimmung der Ergebnisse mit den Messungen. Ein Vergleich mit einer aus Satellitendaten abgeleiteten Schneebedeckungskarte zeigt die generelle Übereinstimmung der Modellergebnisse mit der Beobachtung auch auf der Flächenskala, und insbesondere die Verbesserung des modellierten Schneebedeckungsmusters durch die Berücksichtigung der gravitativ bedingten Schneesutsche. Insgesamt ist aber anzufügen, dass trotz der guten Übereinstimmung in Anbetracht der Anzahl und Verflechtung der betrachteten Prozesse ein Vergleich zwischen Rechenergebnis und Messung zu nur einem einzelnen Zeitschritt kein aussagekräftiges Maß für die Güte eines so komplexen Modells sein kann. Erst eine Zeitserie von aus Fernerkundungsdaten abgeleiteten Validierungskarten wird diesem Anspruch gerecht werden können. Ein terrestrischer Sensor wäre hierzu ein geeignetes Instrument mit hinreichender räumlicher und zeitlicher Auflösung. Die Anwendung des beschriebenen Modellsystems wird für die saisonale Schneedeckenentwicklung im Gebiet des Nationalparks Berchtesgaden durchgeführt. Als Ergebnisse werden die einzelnen verteilten Größen der Massenbilanz diskutiert. Hauptaugenmerk der Analyse liegt bei den speziellen Eigenschaften der räumlichen Muster der Schneedecke. Deren Heterogenität ist im Wesentlichen bedingt durch den hochalpinen Charakter der Topographie. Darüber hinaus wird der jährliche Beitrag der Wasserbilanzgrößen quantifiziert und die mittlere jährliche Evapotranspiration mit Hilfe gemessener Abflüsse abgeschätzt.

Als Ergebnis der Modellierungen zeigt sich, dass auf lokaler Skala der Niederschlag, die Schneeschmelze und die Sublimation während wind-induziertem Schneetransport bedeutende Bilanzgrößen darstellen, während der Anteil von Kondensation und Sublimation von Schnee am Boden bzw. aus dem Bestand mäßig ist. Auf regionaler Skala dagegen stellen Niederschlag und Schneeschmelze bedeutende Bilanzgrößen dar, Sublimation aus dem Bestand einen mäßigen, und Kondensation und Sublimation von Schnee am Boden sowie aus wind-induziertem Schneetransport geringe. Laterale Umverteilung von Schnee beeinflusst die Wasserbilanz des Einzugsgebietes nicht, ist lokal aber hochsignifikant.

Unter Einsatz des stochastischen Klimagenerators werden sodann zwei zukünftige Szenarien veränderten Klimas konstruiert und für prognostische Modellläufe verwendet, um die zukünftige saisonale Entwicklung der Schneedeckendynamik im betrachteten Hochgebirgsgebiet unter veränderten klimatischen Bedingungen abzuschätzen. Die Ergebnisse zeigen für einen angenommenen mäßigen Trend zu höheren Temperaturen einen prinzipiell deutlichen und räumlich stark differenzierten Rückgang der Schneedeckendauer. Dies gilt auch für das Szenario, das zusätzlich zur Erwärmung eine Verschiebung von Sommerniederschlägen in den Winter berücksichtigt. Obwohl letztere überwiegend als Schnee fallen, wird der Effekt der zusätzlichen Akkumulation vom angenommenen Temperaturtrend und den damit einhergehenden veränderten meteorologischen Bedingungen weitgehend kompensiert.

Das vorgestellte Modellsystem ist ein Schritt hin zur Entwicklung von Landoberflächenmodellen, welche den Anforderungen an eine vollständige und realistische Darstellung von Schneedeckenprozessen in Hochgebirgsräumen gerecht werden. Damit können auch Simulationsrechnungen für längerfristige Szenarien zukünftiger Klimaentwicklung durchgeführt werden. Darüberhinaus stellt dies eine wesentliche Voraussetzung für die korrekte Wiedergabe von zukünftiger Gletscherdynamik dar, welche wegen der Bedeutung der Eisressourcen v.a. für die Hydrologie, die Wasserwirtschaft und den Tourismus in hochalpinen Einzugsgebieten von besonderem Interesse ist.

Die wichtigsten Eingabedaten für AMUNDSEN, welche für ein betrachtetes Gebiet vorliegen müssen, umfassen stündliche Zeitreihen der meteorologischen Variablen, ein digitales Geländemodell, den sky view factor sowie LAI bzw. Wuchshöhe der Bäume. Mit der zu erwartenden weiteren Steigerung verfügbarer Rechenleistung wird es bald möglich sein, das Modell für ganze Gebirgseinheiten auf regionaler Skala anzuwenden. Durch die bidirektionale Kopplung der Landoberflächenprozesse mit entsprechenden Klimamodellen wird dann eine verbesserte Abschätzung der Menge, Verteilung und Verfügbarkeit zukünftiger Wasserressourcen in hochalpinen Gebirgseinzugsgebieten möglich sein.

Contents

Modelling of the mountain snow cover in the Berchtesgaden National Park

1	Introduction	11
1.1	Snow cover processes in mountain regions	11
1.2	Requirements for modelling the mountain snow cover	12
1.3	Theoretical background	13
1.3.1	Modelling mountain hydrology - an ultimate challenge	13
1.3.2	Observation of the states of nature	13
1.3.3	Theoretical understanding	13
1.3.4	Implications for modelling mountain hydrology	13
1.4	Scale issues for modelling the mountain snow cover	14
1.4.1	Process scale, measurement scale and model scale	14
1.4.2	Support, spacing and extent	15
1.4.3	Model resolution	15
1.4.4	Subgrid variability	16
1.4.5	Practical considerations	17
1.5	The right model for the right purpose	18
1.6	Existing modelling systems for the mountain snow cover	19
1.7	Content and final goal	19
2	AMUNDSEN - program concept	21
3	The test site	23
3.1	Site description	23
3.2	Data	24
3.2.1	Meteorological data	24
3.2.2	Forest canopy data	25
4	Distribution of meteorological variables	27
4.1	The variability of meteorological variables in mountainous terrain	27
4.2	Spatial interpolation	28
4.3	Radiation modelling	29
4.3.1	Incoming shortwave radiation	29
4.3.2	Incoming longwave radiation	33
5	Modelling the snow surface energy balance	34
5.1	General model structure	34
5.2	Radiation balance	34
5.3	Turbulent transfer	35
5.4	Advective heat	36
5.5	Snowmelt	36
6	Modelling snow-canopy processes	37
6.1	Modifications for beneath canopy climate variables	38
6.2	Simulation of canopy snow interception and sublimation	39
7	Modelling snow slides	42
8	Modelling wind-induced snow transport	45
8.1	Generation of wind fields	46
8.2	Simulation of snow transport	47
9	The role of snow in the alpine water balance	50
9.1	Snow precipitation	50
9.2	Snow sublimation	51
9.2.1	Ground snow sublimation and condensation	51

9.2.2	Canopy snow sublimation	52
9.2.3	Sublimation of snow from turbulent suspension	53
9.2.4	Distribution of total snow sublimation	54
9.3	Snowmelt	55
9.4	The alpine winter water balance	56
9.5	The annual alpine water balance	57
10	Model coupling and validation	59
11	Alpine snow and climate change - modelling future snow conditions	64
11.1	A stochastic weather generator	64
11.2	Reference period	66
11.3	Scenario generation	67
11.4	Future seasonal snow cover model results	70
11.4.1	Mean future seasonal snow cover duration	70
11.4.2	Mean future seasonal snow cover evolution	72
11.4.3	Mean future seasonal snowmelt	75
	Conclusion and outlook	79
	Zusammenfassung und Ausblick	84
	List of figures	89
	List of tables	92
	List of abbreviations and acronyms	93
	Symbols	94
	References	98
	Roald Amundsen (1872-1928)	104