Simulierter zeitlicher Schneedeckenverlauf und Schneedeckendauer des Oberen Pinzgau berechnet auf Basis eines mehrfach validierten hydrologischen Modells

Simulated snow-cover time curve and snow-cover duration in the Upper Pinzgau valley (River Salzach in the Province of Salzburg) based on a hydrological model validated on the basis of several data sets

von G. Koboltschnig¹, W. Schöner² und H. Holzmann³

Kurzfassung/Summary

Das Einzugsgebiet der Oberen Salzach bis zum Pegel Mittersill wurde mit dem hydrologischen Modell PREVAH untersucht. In einer vorangegangenen Studie wurde das Modell ausgehend von stündlichen Abflussbeobachtungen, Fernerkundungsdaten der Schneeverteilung und mit Hilfe von beobachteten Gletschermassenbilanzdaten mehrfach validiert. Das Spektrum der Modellergebnisse erstreckt sich von den einzelnen zum Abfluss beitragenden Komponenten wie dem Direktabfluss aus flüssigem Niederschlag, dem Schnee- und Gletscherschmelzabfluss und dem Abfluss aus den Bodenspeichern, über Gletschermassenbilanzen bis hin zu den flächenverteilten Informationen des Schneedeckenzustandes. Verglichen mit aus Punktmessdaten angepassten Verteilungen der mittleren Schneedeckendauer für gewisse Zeitperioden besteht durch diese Methode der entscheidende Vorteil für einzelne Jahre und durch die Wasserbilanz validierte Darstellungen der Schneedeckendauer zu generieren. Die Depletion-Curves zeigen für die berechneten Haushaltsjahre recht unterschiedliches Verhalten, welche die Witterung des Haushaltsjahres widerspiegeln. Die Anzahl der Tage mit 100%iger Schneebedeckung schwankt zwischen 7 Tagen für 2002/2003 und 107 Tagen für das Haushaltsjahr 1999/2000. Die mittlere Schneedeckendauer wurde für den Modellierungszeitraum (Oktober 1999 bis September 2005) mit 230 Tagen berechnet, was einen um

14 Tage kürzeren Mittelwert im Vergleich zu den aus Stationsmessungen berechneten Daten für die Periode 1961 – 1990 ergibt.

The catchment area of the Upper Salzach above the Mittersill river-flow gauge has been studied using the hydrological model PREVAH. The model was multi-validated in a previous study, on the basis of hourly flow recordings, remote-sensing data of snow distribution and using glacier mass-balance records. The results obtained from the model include the various components making up flow, such as direct runoff from rainfall, runoff from snow and glacier melt and flow from groundwater reservoirs, as well as glacier mass balances and information on the spatial distributed snow cover condition. Compared with adjusted mean snow-cover duration distributions, generated from point measurements, for certain periods in time, this method offers the great advantage of permitting the generation of snow-cover duration curves, validated on the basis of water balance, and this for individual years. The depletion curves exhibit a fairly varying behaviour for the years when the balance was studied, thus reflecting variations in weather conditions. The number of days of 100% snow cover varied between 7 days for 2002-03 and 107 days for the balance year 1999-2000. The mean snow-cover duration has been calculated to be 230 days for the study period (October 1999 to September 2005), which is 14 days shorter than the mean value calculated from station records for the period 1961 to 1990.

1. Einleitung

Im Zuge des Projektes SNOW-TRANS (gefördert durch die Österreichische Akademie der Wissenschaften im Programm HOE 29) wurde das Einzugsgebiet der Oberen Salzach bis zum Pegel Mittersill als Modellgebiet für die Modellierung mit dem Wasserbilanzmodell PREVAH (Gurtz et al., 1999) ausgewählt. Dabei war das Ziel, den Abfluss und vor allem die Gletscher- und Schneeschmelze als wesentliche zum Abfluss beitragende Komponenten auf stündlicher Basis numerisch zu simulieren. Das hydrologische Modell wurde nicht ausschließlich mit den beobachteten Abflussdaten am Gebietsauslass, sondern auch unter Zuhilfenahme von Satellitenfernerkundungsdaten der Schneebedeckungsmuster und mit beobachteten Gletschermassenbilanzdaten mehrfach validiert (Koboltschnig et al., 2008a). Aus klimatologischer Sicht wurden für den Alpenraum (Beniston, 1997; Wielke et al., 2004) und für Österreich speziell (Hantel et al., 2000) bereits Untersuchungen zur Schneedeckendauer und deren Abhängigkeit von der Lufttemperatur durchgeführt. Die Frage nach bisherigen Trends und zukünftigen Änderungen bekommt in den Fachbereichen der Bioklimatologie (Randin et al., 2008) aber auch in der Hydrologie (Strasser und Mauser, 2001) zunehmend größere Bedeutung. In der Hydrologie ist dabei die Dauer der Speicherung von Wasser in der Schneedecke und die Verfügbarkeit und Interaktion von flüssigem Niederschlag, welcher auf die Schneedecke fällt

von Bedeutung (siehe z. B. Singh et al., 1997), da dadurch die Abflussbildung vor allem bei Hochwasser maßgeblich beeinflusst werden kann.

2. Das Untersuchungsgebiet

Das hydrologische Einzugsgebiet des Oberen Pinzgau bis zum Pegel Mittersill hat eine Fläche von 593 km² und ist durch die Kombination von vergletscherten Flächen, hochalpinen, vegetationsfreien Gebieten aber auch durch bewaldete Zonen und landwirtschaftlich genutzte Flächen im Talboden geprägt. Die Höhenverteilung im Einzugsgebiet erstreckt sich von 780 m ü. d. A. beim Pegel Mittersill bis auf 3666 m ü. d. A. auf den Großvenediger. Alle hydrometeorologischen Beobachtungsdaten wurden vom Hydrographischen Dienst Salzburg (HD), der ZAMG (Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik), der AHP (Austrian Hydro Power) und vom Lawinenwarndienst Salzburg und Tirol (LWD) bezogen. Eigene Messungen wurden für diese Studie nicht durchgeführt.

Das Einzugsgebiet umfasst die nördliche Abdachung des Venedigergebietes mit den großen Süd-Nord erstreckten Zubringern aus den Tauerntälern: Krimmlerache, Obersulzbach, Untersulzbach, Habach und Hollersbach (von Westen nach Osten). Weiters kommen noch die nördlichen Zubringer aus den unvergletscherten Kitzbüheler Alpen dazu. Die vergletscherte Fläche des Einzugsgebietes, ermittelt aus dem CORINE Landnutzungsdatensatz aus dem Jahr 2000 beträgt 37,3 km². Die Klassifizierung von CORINE wird jedoch für Gletscher als „Schnee und Gletscher“ angegeben. Für die Skala dieser Untersuchung ist diese Unterteilung ungeeignet. Das Orthofoto einer Befliegung im Jahr 2003 (ASL, 2003) wurde daher für die Digitalisierung der Flächen herangezogen, und es konnte eine Fläche von

Abb. 1: Das Einzugsgebiet des Oberen Pinzgau und meteorologische Stationen mit stündlicher Auflösung (rote Punkte = nur Temperaturmessungen, roter Punkt mit Kreis = zumindest Temperatur und Niederschlagsmessung). Blau dargestellt sind die Gletscherflächen.

Tab. 1: Flächenanteile der Höhenzonen im Einzugsgebiet Oberer Pinzgau

Höhenzone [m ü.d.A.]	Fläche [km ²]	Anteil an der Gesamtfläche [%]
700–1000	46	8
1000–1500	105	17
1500–2000	170	29
2000–2500	164	28
2500–3000	97	16
3000–3700	10	2
Σ	593	100

32,8 km² ermittelt werden. Das entspricht einem gletscherbedeckten Anteil von 5,3 %.

Die mittlere Höhe des Einzugsgebietes Oberer Pinzgau liegt bei etwa 1910 m ü. d. A. (siehe auch Tab. 1). Die Klassifizierung wurde auf Basis eines DHM mit 10 m Auflösung ermittelt (ASL, 2003). Dabei nehmen die Zonen „1500–2000“ und „2000–2500“ jeweils fast 30 % der Fläche des gesamten Gebietes ein. Der hochalpine Anteil des Einzugsgebietes, also die Zonen von 2500 bis 3700 m, haben einen Anteil von 18 % an der Gesamtfläche. Nur 8 % der Gesamtfläche liegen unter einer Seehöhe von 1000 m ü. d. A. Der mittlere Jahresniederschlag für das Gebiet bis zum Pegel Mittersill wird für die Klimanormalperiode 1961–90 aus der Wasserbilanz mit 1741 mm, die Wasserbilanzkomponenten „Aktuelle Verdunstung“

mit 311 mm und die „Mittlere Abflusshöhe“ mit 1429 mm angegeben (Kling et al., 2005). Die Gletscherschmelze wurde dabei nicht berücksichtigt. Für die Beschreibung der weiteren Klimaelemente werden die Analysen der langjährigen Beobachtungen der Klimastation Zell am See (766 m ü. d. A.) herangezogen (Auer et al., 2001). Dabei wird das Klima als inneralpin mit starker Tagesamplitude der Lufttemperatur, sonnig im Winter und im Sommer oft Quellbewölkung vom Alpenhauptkamm her beschrieben. Die Lufttemperatur beträgt im Mittel (1961–90) 6,9 °C mit etwa 130 Frosttagen, 41 Eistagen und 32 Sommertagen. Frosttage sind jene Tage, an welchen das Minimum der Lufttemperatur unter 0 °C liegt. Ist an solchen Tagen auch das Maximum der Lufttemperatur (die Tageshöchsttem-

peratur) unter 0 °C, so spricht man von Eistagen. Tage, an welchen die Lufttemperatur 25 °C erreicht oder überschreitet, werden als Sommertage bezeichnet. Der inneralpine Charakter setzt sich im Einzugsgebiet des Oberen Pinzgau fort. Durch die größere Höhenlage gibt es entsprechend einen höheren Anteil an Frost- und Eistagen.

3. Methodik

3.1 Hydrologisches Modell PREVAH

PREVAH (Precipitation-Runoff-Evapotranspiration-Hydrotope Model; Gurtz et al., 1999) ist ein HRU (Hydrological Response Unit) basiertes Modell, das die hydrologische Antwort der einzelnen HRUs, in welche das Einzugsgebiet aufgeteilt wird auf den meteorologischen Input berechnet. Für die in dieser Arbeit vorgestellten Modellrechnungen wurde ein erweitertes Tag-Grad-Verfahren mit potentieller Solarstrahlung verwendet (Hock, 1999). Dieses Schmelzmodell benötigt ausschließlich die gemessene Lufttemperatur als Input und berechnet für jedes Flächenelement die potentielle Solarstrahlung, welche für die notwendige Ausprägung des Tagesganges bei den durch Gletscher- und Schneeschmelze beeinflussten Abflüssen sorgt. Eine detaillierte Beschreibung für das Modell liefert Viviroli et al. (2007).

3.2 Hydro- meteorologische Datenbasis für das Einzugsgebiet Oberer Pinzgau

Für die Kalibrierung bzw. Validierung des hydrologischen Modells waren die hydro-meteorologischen Daten für den Zeitraum Oktober 1999 bis Oktober 2005 verfügbar. Tab. 2 gibt einen Überblick der im und nahe dem Einzugsgebiet gelegenen meteorologische Stationen auf stündlicher Basis. Die höchst-

Tab. 2: Stationen mit stündlichen meteorologischen Aufzeichnungen

Stationsname	Betreiber	Seehöhe [m]	Messgröße
Krimml	ZAMG	1009	T, N, S, Vw
Rudolfshütte	ZAMG	2304	T, N, S, Vw, G, Rf
Hoher Sonnblick	ZAMG	3106	T, N, S, Vw, G, Rf
Uttendorf	ZAMG	803	T
Schmittenhöhe	ZAMG	1973	T, N, S, Vw, G, Rf
Zell am See	ZAMG	766	T, N, S, Vw
Pass Thurn	HD	1200	T
Stuhlfelden	HD	780	T
Mittersill	HD	790	N
Eselrücken	LWD	2450	T, Rf
Kreuzspitze	LWD	3155	T, Rf, Vw
Durlaßboden	AHP	1432	T, N
Högmoss	AHP	980	T, N
Mooserboden	AHP	2038	T, N
Gerlos/Gmünd	AHP	1640	T, N
Schwarzach	AHP	600	T, N
Zillergrund/Plattkopf	AHP	2500	T, N

Eintragungen in der Spalte „Messgröße“ bedeuten: T = Lufttemperatur, N = Niederschlag, S = Sonnenscheindauer, Vw = Windgeschwindigkeit, G = Globalstrahlung und Rf = Relative Luftfeuchtigkeit.

gelegenen Stationen sind „Sonnblick“ und „Kreuzspitze“. Anzumerken ist, dass auf Grund der Wartung und der Fehlerprüfung die größte Qualität der Messdaten von den Stationen der ZAMG zu erwarten ist. Die räumliche Verteilung der meteorologischen Stationen ist in Abb. 1 dargestellt. Nur die zwei Stationen „Krimml“ und „Paß Thurn“ befinden sich innerhalb des Einzugsgebietes. Strahlungsmessungen (ausschließlich für die Verdunstungsberechnung) konnten nur von Stationen der ZAMG verwendet werden. Die Verteilung der Stationen in den Höhenzonen scheint ausreichend abgedeckt zu sein.

3.3 Modelltechnische Unterteilung des Einzugsgebietes

Als Basis für die Simulation stand ein hochauflösendes Höhenmodell (10x10 m) zur Verfügung. Im „Preprocessing“ wurde das Höhenmodell durch ein „Resampling“

auf eine gröbere Auflösung von 150x150 m gebracht. Damit wird das Gebiet von einem 214x203 Raster abgedeckt. Das entspricht einer Zellenanzahl von 26434 innerhalb der Einzugsgebietsgrenzen. Die Unterteilung in HRUs mit dem „Preprocessor“ von PREVAH (Gurtz et al., 1999) wurde nach folgenden Kriterien durchgeführt:

- Subeinzugsgebiete (Gewässer dritter Ordnung) = 5 Klassen
- Höhenzonen (100 m) = 28 Klassen
- Exposition (Haupt-, Zwischenhimmelsrichtungen + flach) = 9 Klassen
- Landbedeckung = 10 Klassen
- Gletscher (Firn und Eis, Gleichgewichtslinie bei 2900 m) = 2 Klassen

Daraus ergeben sich 1571 HRUs und 109 meteorologische Zonen. Für die meteorologischen Zonen wurden nur die ersten beiden Kriterien der HRU Unterteilung an-

genommen. Die Gletscherflächen entsprechen der Digitalisierung der Befliegungsauswertung von 2003. Die Unterteilung in HRUs entspricht einer Reduktion der zu berechnenden Teilflächen um den Faktor 17 gegenüber einem vollverteilten Rastermodell (Koboltschnig et al., 2008a). Die flächenhaften Ergebnisse der Modellierung werden als Raster ausgegeben, wobei die HRU's auf Raster abgebildet werden.

3.4 Meteorologischer Input

Durch Interpolation der verfügbaren Stationsdaten wurde der Modellinput generiert. Zur Anwendung kam für alle meteorologischen Größen, ausgenommen der Lufttemperatur, das IDW (Inverse Distance Weighting)-Verfahren. Die Lufttemperaturdaten wurden mit dem „IDW-Lapsrate“-Verfahren regionalisiert, wobei die Stationsdaten mit dem vorgegebenen Höhengradienten auf ein einheitliches Höhenniveau gebracht und auf diesem mittels IDW interpoliert werden. Anschließend wird mit Hilfe des Höhengradienten das interpolierte Raster mit den Daten des Höhenmodells wieder auf die Geländehöhe gebracht. Der Temperaturgradient wurde mit $0.6^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ angesetzt – dieser Wert ergibt sich aus langjährigen Temperaturmittelwerten. Mitunter wird der Gradient zwischen zwei Stationen wie z.B. Rudolfshütte und Uttendorf noch kleiner (etwa $0.5^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). Das ist durch die Ausbildung von Kaltluftseen und der stabilen Inversion im Winter erklärbar.

3.5 Modellkalibrierung

Als Kalibrierungsperiode wurde ein Zeitraum von drei Jahren, vom 01.10.1999 bis zum 30.09.2002 gewählt. Die Modellparameter in PREVAH wurden mit einer automatischen Optimierungsroutine

anhand der beobachteten stündlichen Abflussdaten vom Pegel Mittersill (siehe Abb. 1) kalibriert. Die Kalibrierung erfolgt durch Optimierung einer objektiven Zielfunktion (Zappa und Kan, 2007), bei der die lineare Modellgüte (Nash & Sutcliffe, 1970) der gesamten Kalibrierungsperiode optimiert wird. Dabei wurde der in Gurtz et al. (1999) vorgeschlagene Satz von elf Parameterpaaren verwendet. Ein weiteres Feintuning der Parameter wurde anschließend noch „von Hand“ durchgeführt. Dabei wurden die Speicherparameter für Eis, Firn und Schnee, die in der automatischen Kalibrierung nicht implementiert sind, angepasst. Dabei konnten die Parameter aus vorangegangenen Untersuchungen am Goldbergkees im Gebiet des Hohen Sonnblicks übertragen werden (Koboltschnig et al., 2007). Die Korrektur des festen Niederschlagsanteils wurde durch die automatisierte Parameteroptimierung mit 44 % ermittelt und im Prozess der händischen Modell-Feinkalibrierung mit Hilfe von Satellitenfernerkundungsdaten auf Grund des beobachteten Ausaperungszustandes des Einzugsgebietes auf 50 % erhöht. Der Niederschlag wurde, getrennt nach festem und flüssigem Anteil separat korrigiert. Durch eine 50%ige Korrektur des festen Anteils wird der Niederschlagsverteilung ein zusätzlicher Höhengradient „verpasst“. Das kommt durch die Temperaturverteilung in dem stark höhengegliederten Einzugsgebiet zustande, wodurch hoch gelegene Gebiete immer geringere Lufttemperaturen aufweisen und damit der Niederschlag stärker nach oben korrigiert wird.

3.6 Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der Schneedeckung

Durch Auswertung der in Kartenform von PREVAH auf Tagesbasis generierten Speicherzustän-

de des Schneewasseräquivalents (SWE) kann der zeitliche Verlauf der Schneedeckung des Einzugsgebietes berechnet werden. Dazu werden die in Rasterform vorliegenden SWE – Speicherzustände jedes einzelnen Tages nach den Kriterien „schneebedeckt“ oder „schneefrei“ reklassifiziert. Als Grenzwert für das Kriterium „schneebedeckt“ wurde ein Schneewasseräquivalent von 1 mm gewählt. Das entspricht etwa einer Schneehöhe von 1 cm Neuschnee. Aus der Reklassifizierung lässt sich für jeden modellierten Tag der prozentuelle Anteil der schneebedeckten Fläche der gesamten Einzugsgebietsfläche errechnen.

3.7 Berechnung der kumulativen Schneedeckendauer

Ein weiteres Produkt der Schneesimulation in PREVAH ist die Berechnung der kumulativen Schneedeckendauer. Dabei kann vom Modell für jeden Tageszeitschritt ein räumliches Raster generiert werden, welches für jede Rasterzelle die kumulative Schneedeckendauer angibt. Die kumulative Schneedeckendauer ist die Anzahl jener Tage in einem Jahr, an welchen eine Rasterzelle mit zumindest 1 mm Schneewasseräquivalent gefüllt ist. Aus den Simulationsergebnissen ist damit das für den letzten Tag eines Haushaltsjahres berechnete Raster maßgeblich. Um nun für ein bestimmtes Haushaltsjahr die Schneedeckendauer zu berechnen, wird ein Raster mit der kumulativen Schneedeckendauer am Beginn des Haushaltsjahres von jenem am Ende subtrahiert. Somit ist gewährleistet, dass die maximale Dauer 365 Tage entspricht. Das wurde für alle sechs Haushaltsjahre von 1999 bis 2005 auf dem vorgegebenen Raster von $150 \times 150\text{ m}$ durchgeführt. Zum Vergleich wurde auch die mittlere Schneedeckendauer der Referenzperiode 1961–1990 gegenübergestellt ($250 \times 250\text{ m}$ Raster). Diese

flächenhafte Information ist das Ergebnis einer Interpolation mittels linearer Regression der Schneedeckendauer mit der Seehöhe anhand von Stationsdaten (Schöner & Mohnl, 2003). Dabei muss angemerkt werden, dass sich nur zwei Stationen direkt im Einzugsgebiet Oberer Pinzgau befanden.

4. Ergebnisse

Das Haushaltsjahr 1999/2000 ist mit 107 Tagen vollständiger Schneebedeckung der Spitzenreiter und 2002/2003 mit sechs Tagen das Schlusslicht (siehe Tab.3). Im Mittel gibt es für den gesamten Simulationszeitraum 1999 bis 2005 66 Tage mit 100%iger Schneebedeckung.

In Abb.2 sind die zeitlichen Verläufe für die Jahre 1999 bis 2005 dargestellt. Diese zeigen recht unterschiedliches Verhalten. Einerseits die unterschiedliche Länge der Perioden mit vollständiger Schneebedeckung und andererseits die unterschiedlichen Beginnphasen der Akkumulationsperioden. Die rasch beginnenden und anhaltenden Winterdecken sind in dieser Untersuchungsperiode eher die Minderzahl. Auch in der Ablationsperiode gibt es größere Unterschiede, wobei 2002/2003 als das Haushaltsjahr mit den bisher negativsten beobachtetem Gletschermassenbilanzen (Frauenfelder et al., 2005; Hynek und Schöner, 2004; Koboltschnig et al., 2008b) erwartungsgemäß auch bei der Schneeschmelze den steilsten Abfall der prozentuellen Schneebedeckung zeigt. Der Prozess der Ausaperung der Gletscher ist verglichen mit den anderen Jahren am schnellsten vor sich gegangen und hat damit auch zu den negativen Gletschermassenbilanzen geführt. Bei den minimalen Schneebedeckungen des Einzugsgebietes zeigt auch das Haushaltsjahr 2002/2003 die kleinsten Werte. Dagegen verläuft die Ausaperung im Haushalts-

Tab. 3: Anzahl der Tage mit vollständiger Schneebedeckung des Einzugsgebietes Oberer Pinzgau für den Zeitraum 1999–2005

Haushaltsjahr	Anz. d. Tage mit 100 % Schneebedeckung
1999/2000	107
2000/2001	24
2001/2002	75
2002/2003	6
2003/2004	99
2004/2005	99

Abb. 2: Zeitlicher Verlauf der prozentuellen Schneebedeckung („Depletion curves“) des Einzugsgebietes Oberer Pinzgau auf Basis der simulierten Tageswerte der Schneebedeckung für die hydrologischen Jahre 1999 bis 2005.

Abb. 3: Mittlere prozentuelle Schneebedeckung der hydrologischen Jahre 1999 bis 2005 des Einzugsgebietes Oberer Pinzgau auf Basis simulierter Tageswerte.

jahr 2003/2004 deutlich langsamer, es zeigt sich eine flacher geneigte Gerade. Die Unterbrechungen in den Sommermonaten mit kurzzeitig großflächigeren Schneebedeckungen (im Juli 2000 mit 60 % und im August 2005 mit 50 %) kommen selten vor, nur in der Periode 2004/2005 tritt das häufiger auf. Ab spätestens Mitte September war in allen Haushaltsjahren mit größeren Schneefällen zu rechnen und im Oktober mit dem Beginn des Aufbaus der Winterschneedecke.

Da die zeitlichen Verläufe der relativen Schneebedeckung des Untersuchungsgebietes auch immer wiederkehrende Eigenschaften zeigen, ist es interessant einen mittleren Verlauf der relativen Schneebedeckung darzustellen (Abb.3). Dabei werden die einzelnen Ausreißer, welche sich durch spontane Schneedeckenzuwächse ergeben, herausgemittelt. Abb.3 zeigt damit im Mittel sechs Monate im Jahr, in welchen es mehr als 60 % Schneebedeckung im Oberen Pinzgau gab. Ab Ende April beginnt die Schneeschmelzperiode, welche bis Ende Juni gleichbleibend und im Juli und August etwas schwächer verläuft. Im September und Oktober gibt es wieder Neuschneeakkumulation.

4.1 Kumulative Schneedeckendauer

Die angeführten Ergebnisse ergeben große Unterschiede von Jahr zu Jahr. Tab. 4 zeigt, dass 1999/2000 mit 245 Tagen als Gebietsmittelwert als einziges Haushaltsjahr das Mittel der Klimanormalperiode übertrifft.

In Abb.4 ist das Haushaltsjahr 1999/2000 mit einer langen Schneedeckendauer im Tal und in den großen Höhenzonen zu sehen. 2000/2001 hat eine kürzere Schneedeckendauer im Tal aber eine vergleichbare Dauer wie 1999/2000 in den höheren Lagen. 2001/2002 zeigt wiederum

Abb. 4: Räumliche Darstellung der kumulativen Schneedeckendauer der Haushaltsjahre 1999 bis 2002 und mittlere Anzahl der Tage mit Schneebedeckung in den 100 m – Höhenzonen des Einzugsgebietes Oberer Pinzgau.

Tab. 4: Kennwerte der Schneedeckendauer für die simulierten Haushaltsjahre und die mittleren Perioden 1999–2005 und 1961–1990 im Vergleich

Haushaltsjahr	Minimum [Tage]	Maximum [Tage]	Mittel [Tage]
1999/2000	105	366	245
2000/2001	26	365	241
2001/2002	77	365	218
2002/2003	58	362	208
2003/2004	93	366	244
2004/2005	99	365	222
Mittel 1999–2005	78	364	230
Mittel 1961–1990	105	349	244

in allen Höhenzonen eine kürzere Schneedeckendauer. Es ist zu beachten, dass die Höhenzonen

unterschiedliche Flächenanteile an der Gesamtfläche des Einzugsgebietes haben (siehe Tab. 1).

Das Haushaltsjahr 2002/2003 zeigt erwartungsgemäß die kürzeste Schneedeckendauer in allen Höhenlagen (Abb. 2.5). Nur in den größten Höhenzonen (ab 3400 m ü.d.A.) wurde eine ganzjährige Schneedecke simuliert. 2003/2004 zeigt wiederum eine längere Schneedeckendauer in den hohen Lagen. Im Vergleich zu 2004/2005 ist die Schneedeckendauer im Tal ähnlich, nur in den hohen Lagen zeigt 2004/2005 die Klasse der längsten Schneedeckendauer um eine 100 m Höhenzone weiter oben. In Abb. 6 wird die simulierte mittlere Schneedeckendauer der Periode 1999 – 2005 mit der beobachteten mittleren (interpolierten) Schneedeckendauer der Periode 1961 – 1990 (Schöner und Mohnl, 2003) gegenübergestellt. Einerseits ist ein sehr ähnliches, durch die Höhenverteilung vorgegebenes Bild zu sehen. Andererseits zeigen sich für 1999 – 2005 in den Tallagen kürzere Schneedeckendauern und in den hohen Lagen größere Gebiete mit längeren Schneedeckendauern.

5. Diskussion

Die hier vorgestellte Arbeit präsentiert einen Ansatz, mit welchem, die Schneedeckendauer und das Ausaperungsverhalten eines Einzugsgebietes basierend auf ein räumlich verteiltes hydrologisches Modell berechnet werden kann. Im Gegensatz zu aus Fernerkundungsdaten abgeleiteter Information zur Schneedeckendauer (z. B. Brander et al., 2000) und dem Ausaperungsverlauf von Gebieten überwiegen die Vorteile der Modellierung auf Grund der Tatsache, dass die Information zur Schneedeckenverteilung für jeden simulierten Tag berechnet werden kann. Die Verfügbarkeit von Fernerkundungsdaten, sofern es sich um optische Satellitensensoren handelt, ist aber stark von der Wolkenbedeckung abhängig (Parajka und Blöschl, 2006). Eine weitere

Abb. 5: Räumliche Darstellung der kumulativen Schneedeckendauer der Haushaltsjahre 2002 bis 2005 und mittlere Anzahl der Tage mit Schneebedeckung in den 100 m – Höhenzonen des Einzugsgebietes Oberer Pinzgau.

Abb. 6: Räumliche Darstellung der kumulativen Schneedeckendauer der Haushaltsjahre 2002 bis 2005 und mittlere Anzahl der Tage mit Schneebedeckung in den 100 m – Höhenzonen des Einzugsgebietes Oberer Pinzgau.

Möglichkeit für die Berechnung der kumulativen Schneedeckendauer ergibt sich aus der räumlichen Interpolation von punktuellen Schneedeckeninformationen (Schöner und Mohnl, 2003). Dabei

hängt das Ergebnis von der Dichte des Schneedeckenmessnetzes und dem gewählten Interpolationsverfahren ab.

Ein großer Nachteil der berechneten Schneedeckendauer aus der hydrologischen Simulation ist die im Modell nicht implementierte Verfrachtung des Schnees durch Wind und Lawinen, welche in der Natur dafür sorgt, dass selbst nach großen Schneefällen hochgelegene

Grate und Gipfel rasch schneefrei werden. Durch den vertikalen Transport gelangt der Schnee in tiefere Lagen und kann dort auch auf Grund der höheren Temperaturen früher abschmelzen. Weiters muss erwähnt werden, dass die aus einem hydrologischen Modell gewonnene Information von mehreren Eingangsvariablen direkt oder indirekt abhängig und damit von Unsicherheiten behaftet ist. ■

¹ Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT, % Abt. 18 Wasserwirtschaft, Amt der Kärntner Landesregierung, Flatschacher Straße 70, 9020 Klagenfurt, Austria

² Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik – Klimaabteilung, Hohe Warte 38, 1190 Wien

³ Universität für Bodenkultur (BOKU) Wien, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und Konstruktiven Wasserbau, Muthgasse 18, 1190 Wien

Korrespondenz:

Gernot Koboltschnig

Internationale Forschungsgesellschaft INTERPRAEVENT,
www.interpraevent.at

E-Mail: gernot.koboltschnig@ktn.gv.at

Tel: +43-463-536-31805, Fax: +43-463-536-31828

LITERATUR

ASL (2003) Amt der Salzburger Landesregierung – Luftbild Orthophotos und digitales Höhenmodell der Hohe Tauern Region

Auer I, Böhm R, Mohnl H, Potzmann R, Schöner W, Skomorowski P (2001) ÖKLIM – Digitaler Klimaatlas Österreichs. Eine interaktive Reise durch die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft des Klimas (auf CD). Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Vienna.

Beniston M (1997) Variations of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climate forcings. *Climatic Change* 36: 281–300

Brander D, Seidel K, Zurflüh M, Huggel Ch (2000) Snow cover duration maps in Alpine regions from remote sensing data. *EARSel eProceedings* 1: 292–296.

Frauenfelder R, Zemp M, Haeberli W, Hoelzle M (2005) Worldwide glacier mass balance measurements: trends and first results of an extraordinary year in Central Europe. *Ice and Climate News* 6: 9–10

Gurtz J, Baltensweiler A, Lang H (1999) Spatially distributed hydrotopobased modelling of evapotranspiration and runoff in mountainous basins. *Hydrological Processes* 13: 2751–2768

Hantel M, Ehrendorfer M, Haslinger A (2000) Climate sensitivity of snow cover duration in Austria. *International Journal of Climatology* 20: 615–640

Hock R (1999) A distributed temperature-index ice- and snowmelt model including potential direct solar radiation. *Journal of Glaciology* 45/149: 101–111

Hynek B, Schöner W (2004) Massenhaushalt 2002/2003 der Gletscher in der Goldberggruppe. *Jahrbuch des Sonnblick-Vereins*, 101–102, 1–15

Kling H, Nachtebel HP, Fürst J (2005) Bilanzierungsgebiete, klimatische Wasserbilanz und Abflussverhältnisse. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (ed.) *Hydrologischer Atlas Österreichs*, Kartentafel 7.1. Wien; ISBN 3-85437-250-7

Koboltschnig GR, Schöner W, Zappa M, Holzmann H (2008b) Glacier melt of a small basin contributing to runoff under the extreme climate conditions in the summer of 2003. *Hydrological Processes*. DOI: 10.1002/hyp.7203

Koboltschnig GR, Schöner W, Zappa M, Kroisleitner C, Holzmann H (2008a) Runoff modelling of the glacierized alpine Upper Salzach basin (Austria): Multi-criteria result validation. *Hydrological Processes* 22: 3950–3964. DOI: 10.1002/hyp.7112

Koboltschnig GR, Schöner W, Zappa M, Holzmann H (2007) Contribution of glacier melt to stream runoff: if the climatically extreme summer of 2003 had happened in 1979. *Annals of Glaciology* 46: 303–308

Nash JE, Sutcliffe JV (1970) River flow forecasting through conceptual models (1), a discussion of principles. *Journal of Hydrology* 10(3): 282–290

Parajka J, Blöschl G (2006) Validation of MODIS snow cover images over Austria. *Hydrology and Earth System Sciences* 10: 679–689

Randin CF, Engler R, Normand S, Zappa M, Zim-

mermann NE, Pearman P, Vittoz P, Thuiller W, Guisan A (2008) Climate change and plant distribution: local models predict high-elevation persistence. *Global Change Biology*. in print

Schöner W, Mohnl H (2003) Schneehöhen und Schneebedeckung. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (ed.) *Hydrologischer Atlas Österreichs*, 2. Lieferung, Kartentafel 4.1. Wien; ISBN 3-85437-250-7

Singh P, Spitzbart G, Hübl H, Weinmeister HW (1997) Hydrological response of snowpack under rain-on-snow events: a field study. *Journal of Hydrology* 202: 1–20

Strasser U, Mauser W (2001) Modelling the Spatial and Temporal Variations of the Water Balance for the Weser Catchment 1965–1994. *Journal of Hydrology* 254(1–4): 199–214

Viviroli D, Gurtz J, Zappa M (2007) The Hydrological Modelling System PREVAH. Model documentation and user manual. *Geographica Bernensia* P40. Berne: Department of Geography, University of Berne, ISBN 978-3905835-01-0

Wielke L-M, Haimberger L, Hantel M (2004) Snow cover duration in Switzerland compared to Austria. *Meteorologische Zeitschrift* 13(1): 13–17

Zappa M, Kan C (2007) Extreme heat and runoff extremes in the Swiss Alps. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 7: 375–389, www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/7/375/2007/