HYDROLOGISCHE SIMULATION DES SCHNEE-WASSER-ÄQUIVALENTS IM EINZUGSBEREICH DER I. WIENER HOCHQUELLENWASSERLEITUNG

G. BLÖSCHL, R. KIRNBAUER, J. JANSA, K. KRAUS, G. KUSCHNIG, D. GUTKNECHT

Kurzfassung

Die Wiener Wasserwerke (MA31) beziehen das Trinkwasser für Wien aus Quellen im Bereich von Hochschwab, Schneealpe, Rax und Schneeberg. Um die raum-zeitliche Verteilung der Schneeschmelze in diesen Gebieten besser zu verstehen und letztendlich vorherzusagen, initiierte die MA31 ein Forschungsprojekt, von dem Ergebnisse in dieser Arbeit vorgestellt werden. Es wurde ein hydrologisches Schneeschmelz- und Akkumulationsmodell auf Basis eines Digitalen Geländemodells mit 20m Rasterweite für das Untersuchungsgebiet aufgestellt, das für jedes Rasterelement die Energiebilanz der Schneedecke simuliert. Das Modell verwendet als Eingangsgrößen stündliche meteorologische Daten. Einige der Modellparameter des Schneemodells müssen geeicht werden, und dies wurde durch einen Vergleich von mit dem Schneemodell simulierten Schneebedeckungsmustern mit aus den SPOT Bildern abgeleiteten Schneebedeckungsmustern ermöglicht. Die Eichung ergab einen Modellparametersatz, der zuverlässige Schneesimulationen für das Untersuchungsgebiet erlaubt. Insbesondere kann das Schnee-Wasser-Äquivalent und die Schneeschmelze mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung berechnet werden. Gewisse Verfeinerungen des Schneemodells sind noch nötig, und es ist auch geplant, das Modell in ein operationelles Vorhersagesystem einzubinden.

Einleitung

Ein großer Anteil der Wasservorräte im Einzugsgebiet der beiden Wiener Hochquellenwasserleitungen (Hochschwab, Schneealpe, Rax und Schneeberg) bildet sich im Winter und im Frühjahr. Besonders interessant ist der Anteil, der in Form von Schnee über eine lange Zeitspanne gebunden ist. Ist die räumliche und zeitliche Verteilung dieser Schneereserven bekannt, so ist eine genauere Bewirtschaftung der Wasservorräte möglich. Dies wird für die Stadt Wien immer wichtiger. Da es kaum Untersuchungen gibt, die sich mit der Bedeutung des Schnees für die Hydrologie der Quellgebiete der Wiener Hochquellenleitungen befassen, wurde ein Pilotprojekt im Bereich der Schneealpe gestartet. Das Projekt wird vom Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung (IPF) sowie dem Institut für Hydraulik, Gewässerkunde und Wasserwirtschaft – beide an der TU Wien – seit 1998 gemeinsam mit den Wiener Wasserwerken (MA31) durchgeführt. Ziel dieses Projektes ist die Untersuchung der räumlichen und zeitlichen Verteilung des Schnees, seines Abschmelzverhaltens und seines Beitrages zur Grundwasserneubildung und damit seiner Rolle als Trinkwasserreservoir.

Der grundsätzliche Ansatz in diesem Projekt bestand darin, mit Hilfe eines hydrologischen Schneemodells den Aufbau und das Abschmelzen der Schneedecke zu simulieren. Um dies in genauer Weise zu ermöglichen, sind umfangreiche Daten erforderlich.

Datenbasis

Vorerst wurde für das Untersuchungsgebiet ein genaues digitales Geländemodell erstellt. Wegen der geforderten Genauigkeit wurde ein Farbinfrarot-Bildflug (21 cm Kamerakonstante) analysiert. Ein derartiger Bildflug für die Schneealpe aus dem Jahre 1994 wurde vom Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen zur Verfügung gestellt. Aus diesen Luftbildern wurden im photogrammetrischen

Zweibildauswertegerät Geländepunkte im Abstand zwischen etwa 50 und 25 m erfaßt, zusätzlich Struktur- und Bruchlinien sowie markante Punkte auf Kuppen und in Mulden. Besonders genau wurden zum Beispiel die Dolinen auf der Hochfläche erfaßt und digital modelliert. Aus den punktförmigen Messungen wurde anschließend durch Interpolation eine kontinuierliche Oberfläche ermittelt und als 20 m Raster abgelegt. Aus diesem Geländemodell wurden eine Reihe topographische Kenngrößen abgeleitet, die für die Schneemodellierung erforderlich sind, wie etwa Neigung, Exposition, Krümmung, sowie der lokale Horizont (sogenannte Sky-Plots). Alle Geländeanalysen wurden mit dem Programmpaket SCOP durchgeführt, das vom IPF gemeinsam mit der Fa. INPHO Stuttgart (IPF, 1999) entwickelt wurde.

Ein weiterer wichtiger Einflußfaktor auf die Schneeschmelze ist der Bewuchs des Untersuchungsgebietes. Zur Bestimmung des Bewuchses wurden ebenfalls die Farbinfrarot-Luftbilder analysiert, wobei eine visuelle Interpretation erfolgte. Bei dieser Interpretation und der Festlegung der Bewuchsklassen wurde auf die Auswirkung von Bewuchs auf die räumliche Schneeverteilung Rücksicht genommen, um die Bewuchsdaten direkt im hydrologischen Schneemodell verwenden zu können. Die Baumvegetation wurde unterschieden nach Nadelwald, Laubwald, Mischwald mit jeweils drei Bestandsdichteklassen und drei Bestandshöheklassen (d.h. insgesamt 27 Klassen). Weitere Klassen waren Fels, Latschen dicht, Latschen schütter mit Fels, Wiese satt, Wiese mit Fels und Latschen, und Alpenrosen. Die Bewuchsdaten wurden ebenfalls als 20 m Raster abgelegt. Es wurde angenommen, daß die zeitliche Veränderung der Vegetation gering ist und deshalb bei der hydrologischen Schneemodellierung vernachlässigt werden kann. Bodenkenngrößen wurden nicht aufgenommen, da in dem Pilotprojekt vorerst nur die Schneeschmelze an der Grenzfläche Schnee-Boden von Interesse war, d.h. Infiltration und Wasserbewegung im Untergrund wurden vorerst ausgeklammert.

Da die räumliche Verteilung des Schneereserven von zentraler Bedeutung in dieser Studie ist, Windverfrachtung und andere räumliche Schneeprozesse allerdings vorab nicht genau zu bestimmen sind, wurde für mehrere Termine die räumliche Verteilung der Schneebedeckung aus Satellitenbildern abgeleitet, um damit das hydrologische Schneemodell zu kalibrieren und zu verifizieren. Für die folgenden Termine wurden SPOT XS Satellitenbilder beschafft und ausgewertet: 18.2.1998, 20.2.1998, 31.3.1998, 8.5.1998, 27.2.1999, 19.3.1999, 10.5.1999, 6.6.1999, 28.2.2000, 22.3.2000, 3.5.2000, 27.5.2000. Alle Termine liegen im Frühjahr, d.h. in der Schneeschmelzperiode, da zu diesen Terminen die Schneebedeckungsmuster für das Kalibrieren und Verifizieren des hydrologischen Schneemodells besonders aussagekräftig sind. Die Auswertung der SPOT Bilder erfolgte vorerst durch übliche Schneeklassifizierungsmethoden wie die "Supervised Maximum Likelihood" und die "Unsupervised Isodata Technique" (JENSEN, 1996). Allerdings zeigten Vergleiche mit Bodenbeobachtungen, daß diese Methoden zu ungenau sind. Deshalb wurde die Analyse folgendermaßen erweitert: Das Bild wurde in Teilbilder entsprechend bestimmter Lichteinfallklassen segmentiert. Dann wurden die Standardmethoden für jedes Teilbild angewendet und im letzten Schritt die Teilbilder zusammengesetzt. Als Ergebnis dieser Klassifizierung erhielt man für jeden Termin auf einem 20m * 20m Raster die Schneebedeckung als eine der folgenden Kategorien: "Volle Schneedeckung erkennbar", "lückige Schneedeckung erkennbar", "sehr lückige Schneedeckung erkennbar" und "keine Schneedeckung erkennbar". Der Vergleich mit Bodenbeoachtungen zeigte, daß dieser modifizierte Ansatz sehr gute Ergebnisse lieferte.

Zur Kontrolle der gesamten Datenerfasssung und der Modellierung der Schneedeckenprozesse sowie zur Abschätzung des Einflusses der Vegetation auf die Schneeverfrachtung wurden während der drei Saisonen (Frühjahr 1998, 1999, 2000) von den Wiener Wasserwerken Schneekurse (d.h. Schneemessungen entlang definierter Linien im Gelände) durchgeführt. Dabei wurden an insgesamt 27 repräsentativen Geländepunkten Schneedeckenparameter direkt gemessen. Bei jeder Meßstelle wurde kreuzförmig im Abstand von 2m die Schneehöhe mittels einer Lawinensonde neunmal gemessen und einmal die Schneedichte, woraus sich ein mittleres Schnee-Wasser-

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

Äquivalent für jeden der 27 Geländepunkte berechnen ließ. Die Schneekurse wurden in jeder Saison vier oder fünfmal durchgeführt.

Schließlich wurden an vier Stellen im Untersuchungsgebiet kontinuierliche meteorologische Messungen durchgeführt. Abb. 1 zeigt die Meßstellen sowie die Topographie des Untersuchungsgebietes. Es standen drei Talstationen (Wasseralm, 802m, Karlgraben, 790m und Kalte Mürz, 1060m) zur Verfügung, sowie eine Station am Plateau der Schneealpe (Schneealpe, 1735m). Niederschlag und Lufttemperatur wurden an allen Stationen gemessen, Windgeschwindigkeit und -richtung an zwei Stationen, relative Luftfeuchtigkeit und Globalstrahlung allerdings nur an der Station Karlgraben. Alle Daten wurden mittels Datenlogger auf Halbstundenbasis aufgezeichnet. Die Stationen wurden zwar nicht kontinuierlich betreut, doch wurde in etwa zweiwöchigen Abständen die Funktion überprüft. Gewisse Meßprobleme traten über kurze Zeitperioden auf (schneebedeckter Strahlungssensor, Anfrieren des Windsensors, Ausfall von Niederschlagsstationen) und deshalb wurden sämtliche Daten nachbearbeitet und auf Konsistenz geprüft. Eine wichtige Abschätzung betraf auch den systematischen Meßfehler des Niederschlags, insbesondere bei der exponierten Station auf der Schneealpe.

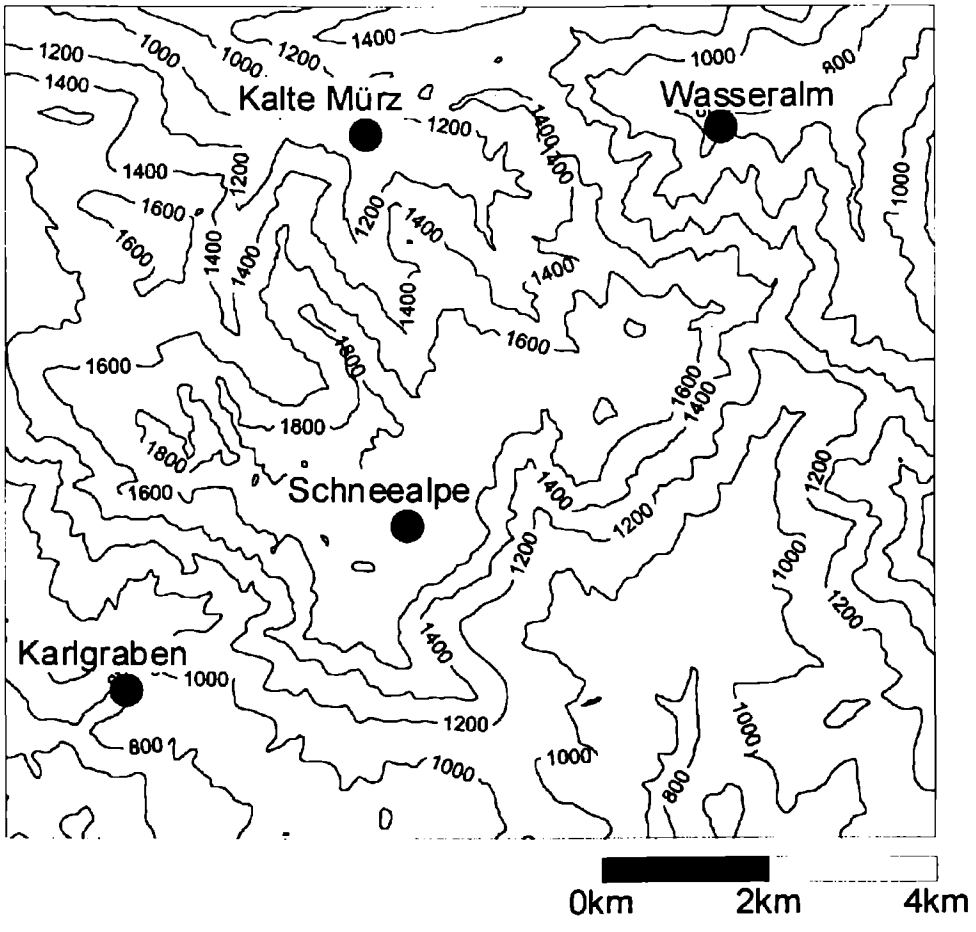

Abb. 1: Meßstellen und Topographie des Untersuchungsgebietes (10km * 9km). Zahlenangaben der Seehöhe in m.

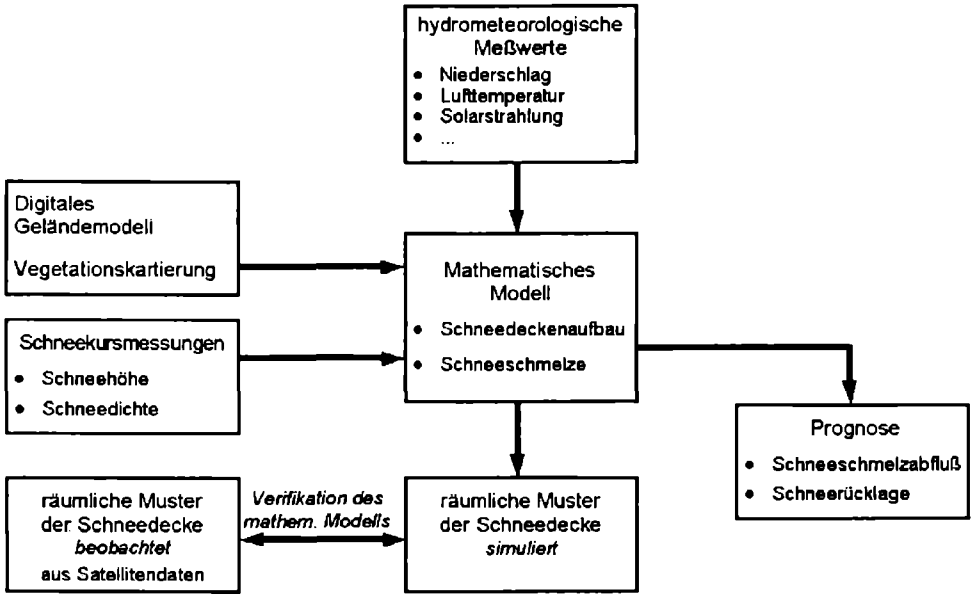

Abb. 2: Vorgangsweise bei der hydrologischen Schneemodellierung.

Hydrologisches Schneemodell

In dieser Studie wurde bei der hydrologischen Schneemodellierung folgende generelle Vorgangsweise gewählt (Abb. 2). Das Schneemodell wurde als prozeßorientiertes Rastermodell entsprechend dem Vorbild von BLÖSCHL et al. (1991) gewählt. Dabei wird für jedes Rasterelement (in diesem Fall 20m * 20m), der Schneedeckenaufbau und die Schneeschmelze auf Stundenbasis simuliert. Wesentlich ist der Energieeintrag an der Oberfläche der Schneedecke, der mit Hilfe des Energiebilanzansatzes formuliert wurde. Dazu war es notwendig, als Eingangsdaten die Meßwerte an den vier meteorologischen Stationen auf das 20m Raster des Schneemodells räumlich zu interpolieren. Für die Lufttemperatur wurde eine lineare Abnahme mit der Seehöhe angenommen. Windgeschwindigkeit und relative Luftfeuchtigkeit wurden als über das Gebiet konstant angesetzt. Der systematische Meßfehler des Niederschlags wurde berücksichtigt, indem für jeden Stundenschritt das Maximum der Werte in den vier Stationen verwendet wurde. Turbulente Flüsse und langwellige Strahlung wurden durch einfache Ansätze parameterisiert. Die kurzwellige Strahlung wurde unter Berücksichtigung der lokalen Hangneigung, Exposition und des lokalen Horizontes (Abschattung) aus den Meßwerten der Globalstrahlung abgeleitet. Für die Schneealbedo wurde eine einfache Parameterisierung als Funktion des Schneealters angesetzt. Zwischen flüssigem und festem Niederschlag wurde mit Hilfe eines Schwellenwertes der Lufttemperatur unterschieden. Eine wichtige Annahme betrifft die räumliche Verteilung des festen Niederschlages zufolge Windverfrachtung. Dafür wurde das Konzept eines Windverfrachtungsfaktors F angesetzt:

$$F = (a + b \cdot H) \cdot (1 - f(S)) \cdot (1 + e \cdot C) \qquad \geq 0$$

$$f(S) = \begin{cases} 0 & \dots \; S < c \\ \dfrac{S - c}{d - c} & \dots \; S \geq c \end{cases}$$

wobei H die Seehöhe, S die Neigung und C die Geländekrümmung ist. Auf Basis von Literaturwerten (BLÖSCHL et al., 1991) und Auswertung der SPOT Daten wurden die Parameter auf b= 0.0001m^{-1}, c=10°, d=60° und e=50m gesetzt und a wurde aus Massenbilanzüberlegungen für das Gesamtgebiet bestimmt. Für ein geneigtes Rasterelement wird der feste Niederschlag somit als Produkt des Windverfrachtungsfaktors mit dem festen Niederschlag auf einer ebenen Referenzfläche angesetzt. Die Schneekursmessungen und die Vegetationskartierung wurden zur Abschätzung des Einflusses der Vegetation auf die Windverfrachtung und auf das Ablationsverhalten der Schneedecke verwendet.

Für die meisten Modellparameter wurden Literaturwerte verwendet. Einige Parameter mußten jedoch für die lokale Situation der Schneealpe geeicht werden, wie die Schneealbedo und der Schwellenwert der Lufttemperatur für festen/flüssigen Niederschlag. Die Eichung dieser Werte erfolgte durch einen Vergleich der beobachteten (aus den Satellitendaten abgeleiteten) Schneebedeckungsmuster mit den simulierten (d.h. mittels Schneemodell berechneten) Schneebedeckungsmustern für das Frühjahr 1998 und 1999 (acht Termine). Für mehrere Parametersätze wurden Testläufe mit dem Modell durchgeführt, bis sich eine zufriedenstellende Übereinstimmung zwischen beobachteten und simulierten Mustern ergab. Für diesen Vergleich wurden insbesondere die Teilflächen ohne Waldvegetation herangezogen (Wiese, Fels, ..), da für diese Teilflächen die Schneebedeckungsauswertungen aus den Satellitendaten zuverlässiger sind. Der große Vorteil eines derartigen räumlichen Vergleiches ist es, daß dadurch auch die räumliche Variabilität der hydrologischen Prozesse sehr gut abgeschätzt werden kann und die Zuverlässigkeit des Modells eben in Hinblick auf die räumlichen Verteilung der Simulationsergebnisse wesentlich besser beurteilt werden kann, als dies mit Punktmessungen möglich ist. Dies ist ein Ansatz der sich derzeit generell bei der flächendetaillierten hydrologischen Modellierung durchzusetzen scheint (GRAYSON and BLÖSCHL, 2000)

Ergebnisse und Ausblick

Abb. 3 zeigt als Beispiel einen Vergleich von beobachteten und simulierten Schneebedeckungsmustern. Da es sich in Abb. 3 um binäre Muster (Schnee bzw. aper) handelt, wurden die aus den SPOT-Daten abgeleiteten Muster für die Modellvergleichszwecke folgendermaßen zugeordnet. Als "Schnee" wurde angesehen, wenn eine volle, leicht lückige und stark lückige Schneebedeckung erkennbar war. Als "aper" wurde angesehen, wenn in Abb. 3 keine Schneebedeckung erkennbar war. Diese Zuordnung berücksichtigt eine mögliche Verdeckung einer am Boden liegenden Schneedecke durch Bäume.

Der Vergleich von beobachteten Schneebedeckungsmustern (SPOT-Daten) mit den simulierten Schneebedeckungsmustern (hydrologisches Schneemodell) in Abb. 3 zeigt, daß zum Februartermin die Modellrechnungen generell etwas mehr Schnee zeigten. Dies kann allerdings darauf zurückzuführen sein, daß gerade die niedrigen Lagen, in denen die Unterschiede auftreten, bewaldet sind, und die Satellitendaten apere Baumkronen gesehen haben, während am Boden noch eine geringe Schneedecke gelegen haben dürfte. Der März- und der Maitermin zeigen recht gute Übereinstimmung zwischen Satellitenbildauswertungen und Modellrechnungen. Für den Junitermin zeigen die Satellitenbilder ein geringe Schneedecke an, während das Modell bereits eine vollständige Ausaperung angibt. Insgesamt belegen die Vergleiche jedoch, daß das Modell die wesentlichen Strukturen der räumlichen Schneeverteilung sehr gut erfaßt. Damit ist das hydrologische Schneemodel auch für die Berechnung anderer Schneedeckenkenngrößen einsetzbar (Abb. 2). Mit dem Modell kann an jedem Rasterpunkt und für jeden Zeitschritt das Schnee-Wasser-Äquivalent (in mm) berechnet werden, sowie der Anteil an flüssigem Wasser im Schnee und der Kälteinhalt. Weiters kann für jeden Zeitschritt (auf Stundenbasis) die aktuelle von der Schneedecke abgegebene Schmelzwassermenge berechnet werden. Die Modellergebnisse können auf unterschiedliche Art visualisiert werden.

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

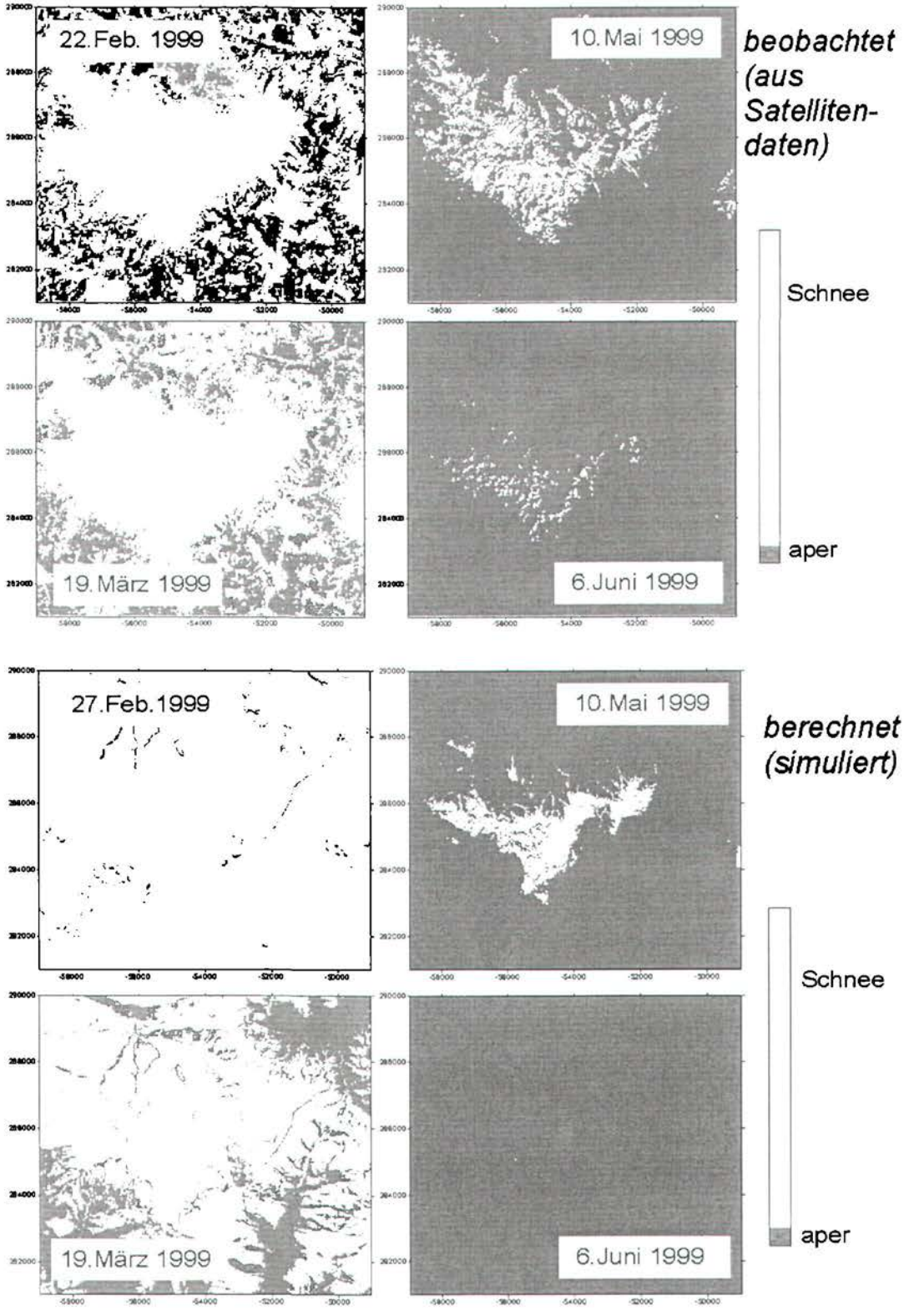

Abb. 3: Beobachtete (aus den Satellitendaten abgeleitete) Schneebedeckungsmuster (oben) und simulierte (mittels Schneemodell berechnete) Schneebedeckungsmuster (unten) für das Frühjahr 1999. Die weißen Flächen sind schneebedeckt und die dunklen Flächen sind aper.

©Geol. Bundesanstalt, Wien; download unter www.geologie.ac.at

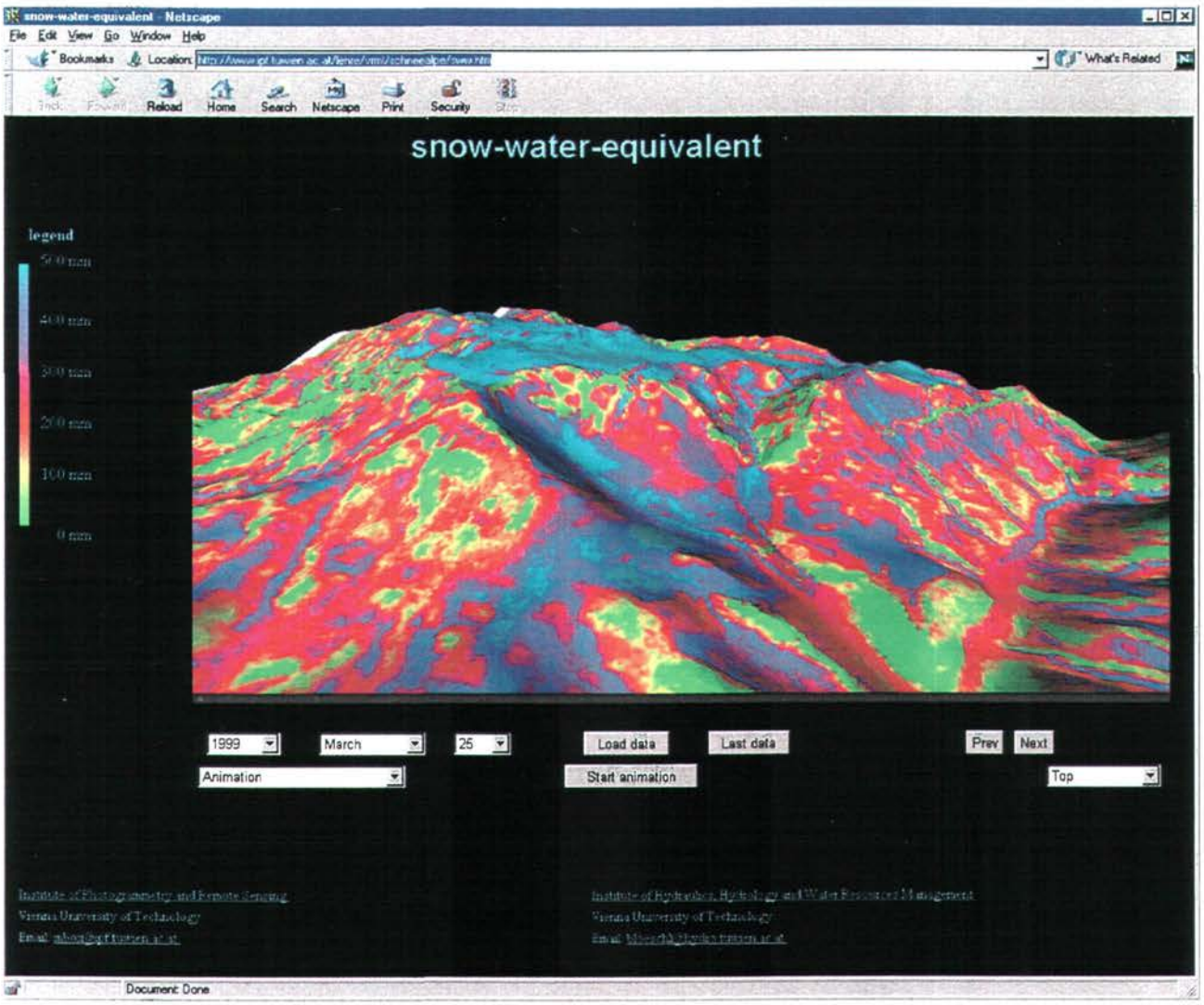

Abb. 4: Visualisierung des Schnee-Wasser-Äquivalents für den 25. März 1999 mit Hilfe eines vrml-viewers.

Abb. 4 zeigt eine perspektivische Visualisierung des Schnee-Wasser-Äquivalents für den 25. März 1999 mit Hilfe eines vrml-viewers (DORFFNER, 2000). Die Abbildung läßt erkennen, daß die Schneeverteilung räumlich sehr heterogen ist. Man erkennt nicht nur die durch die Höhenlage bedingten Unterschiede in der räumlichen Verteilung des Schneewasserwertes (mit Werten mit bis zu 500m Schnee-Wasser-Äquivalent am Plateau der Schneealpe und viel geringeren Werten in den Tallagen), sondern auch eine Modulation der Muster durch das komplexe Gelände wie etwa geringere Werte auf Kuppen und auf steilen Hängen und größere Werte in topographischen Konvergenzzonen. Beides ist eine Folge der Windverfrachtung. Auch Unterschiede auf Nordhängen und Südhängen lassen sich aus solchen Darstellungen ablesen. Derartige Visualisierungen lassen eine Plausibilitätsprüfung der räumlichen Verteilung zu, die wie Abb. 4 zeigt, durchaus realistisch erscheint. Durch Überlagerung des Geländemodelles mit einer Folge von Schnee-Wasser-Äquivalent-Bildern, was eine Art Film ergibt, läßt sich auch die räumlich-zeitliche Veränderung anschaulich visualisieren.

Eine weitere Auswertung ist die raum-zeitliche Verteilung der Schneeschmelze. Zu diesem Zwecke wurden für das Untersuchungsgebiet vier Teilgebiete abgeschätzt, die näherungsweise den

Einzugsgebieten der vier Hauptquellen entsprechen. Die Einzugsgebietsgrenzen wurden mit der räumlichen Verteilung der Schneeschmelze verschnitten und für jedes Einzugsgebiet die mittlere Schneeschmelze ausgewertet. Eine Summenlinie der Schneeschmelze (akkumulierte Schneeschmelze + Regen) ist in Abb. 5 dargestellt. Die Abbildung zeigt, daß innerhalb des Untersuchungszeitraumes die Summe aus Schneeschmelze und Regen auf aperen Grund (d.h. diejenige Wassermenge, die für die Infiltration bzw. den Abfluß zur Verfügung steht) etwa 1000mm betragen hat. Zwischen den Teileinzugsgebieten ergeben sich deutliche Unterschiede in Hinblick auf die zeitliche Verteilung der Schneeschmelze. Die größten Schmelzraten treten in dem Teilgebiet mit der geringsten mittleren Seehöhe auf, das auch einen vergleichsweise großen Anteil an Südhängen aufweist. Letzteres führt zu einem größeren Strahlungseintrag und damit zu größeren Schmelzraten. Außerdem ist dieses Gebiet eher konkav, wodurch zufolge Schneeverfrachtung größere Schneemengen als in andere Teilgebiete eingetragen werden. Derartige Unterschiede lassen sich naturgemäß nur mit flächendetaillierten hydrologischen Modellen wie hier verwendet bestimmen.

Insgesamt zeigte die Studie, daß die generelle Vorgangsweise einer hydrologischen Schneemodellierung in Kombination mit aus Satellitendaten abgeleiteten Schneemustern zur Eichung des Modells geeignet ist, die raum-zeitliche Verteilung des Schneerückhalts und der Schneeschmelze zuverlässig abzuschätzen. In der nächsten Zukunft ist eine Verfeinerung des Schneemodels, insbesondere in Hinblick auf den Schneeverfrachtungsmodul, geplant. Eine Implementierung des Verfahrens bei den Wiener Wasserwerken als Werkzeug für eine operationelle Bewirtschaftung der Wasservorräte ist vorgesehen. Dieses Projekt fügt sich bestens in die sonstigen naturräumlichen Untersuchungen der Quelleinzugsgebiete der Wiener Wasserversorgung ein.

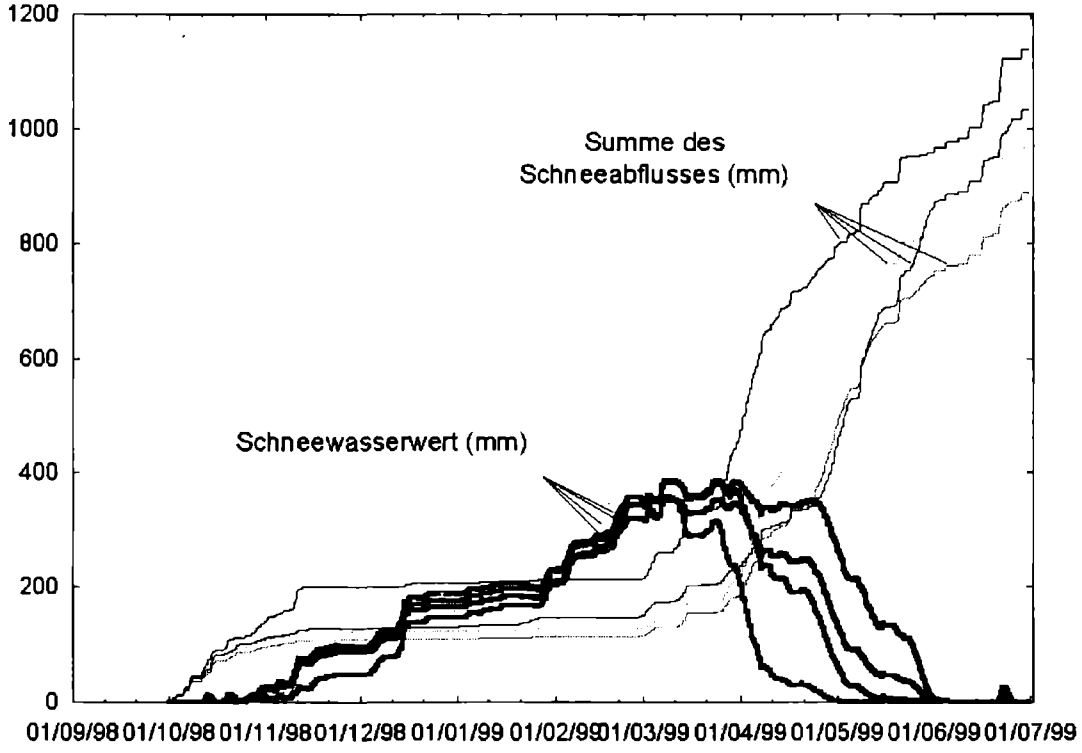

Abb. 5: Summenlinie der Schneeschmelze plus Regen auf aperen Grund für vier Teilgebiete (dünne Linien). Mittleres Schnee-Wasser-Äquivalent für vier Teilgebiete (dicke Linien).

Danksagung

Finanziell wird diese Arbeit durch das Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur unter Projekt Nummer GZ 79083/2-III/A/5/98 unterstützt. Die Wiener Wasserwerke (MA31) stellten Mittel zum Ankauf der meisten in dieser Arbeit verwendeten SPOT Bilder zur Verfügung.

Literatur

BLÖSCHL, G., R. KIRNBAUER and D. GUTKNECHT: Distributed snowmelt simulations in an Alpine catchment. 1. Model evaluation on the basis of snow cover patterns. *Water Resources Research*, **27** (12), pp. 3171-3179, 1991.

DORFFNER, L.: Interactive Visualization of Terrain Models and Orthophotos. Geotetski Vestnik, *Journal of the Association of Surveyors of Slovenia*, **44** (3), pp. 205 - 212, 2000.

GRAYSON, R. B. and G. BLÖSCHL (Eds): Spatial Patterns in Catchment Hydrology: Observations and Modelling. Cambridge University Press, Cambridge, 404 pp., 2000.

IPF (Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung, Techn. Univ. Wien): Produktinformation SCOP, http://ibmws2.ipf.tuwien.ac.at/produktinfo/scop/englisch/scop_e.html (31. Mai 2001), 1999.

JENSEN, J. R.: Introductory Digital Image Processing. A Remote Sensing Perspective, 2nd edition. Prentice-Hall, NJ, 1996.

ZOBODAT - www.zobodat.at

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: Arbeitstagung der Geologischen Bundesanstalt

Jahr/Year: 2001

Band/Volume: 2001

Autor(en)/Author(s): Blöschl Günter

Artikel/Article: HYDROLOGISCHE SIMULATION DES SCHNEE-WASSER-ÄQUIVALENTS IM EINZUGSBEREICH DER I. WIENER HOCHQUELLENWASSERLEITUNG 232-240