



## Modellierung des Abflusses aus hochalpinen Einzugsgebieten unter Verwendung von Satellitendaten

Helmut Rott <sup>1</sup>, Nikolaus Batlogg <sup>2</sup>, Thomas Nagler <sup>3</sup>, Otto Pirker <sup>4</sup>

<sup>1</sup> *Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck*

<sup>2</sup> *Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck*

<sup>3</sup> *Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck*

<sup>4</sup> *Österr. Elektrizitätswirtschafts AG, Am Hof 6A, 1010 Wien*

VGI – Österreichische Zeitschrift für Vermessung und Geoinformation **86** (3), S. 155–160

1998

Bib<sub>T</sub>E<sub>X</sub>:

```
@ARTICLE{Rott_VGI_199821,  
  Title = {Modellierung des Abflusses aus hochalpinen Einzugsgebieten unter  
          Verwendung von Satellitendaten},  
  Author = {Rott, Helmut and Batlogg, Nikolaus and Nagler, Thomas and Pirker,  
           Otto},  
  Journal = {VGI -- {"0}sterreichische Zeitschrift f{"u}r Vermessung und  
            Geoinformation},  
  Pages = {155--160},  
  Number = {3},  
  Year = {1998},  
  Volume = {86}  
}
```



## 5. Zusammenfassung

Die exemplarisch angeführten Anwendungsbeispiele demonstrieren deutlich, daß durch die Auswertung hochauflösender Satellitenbilddaten ein wesentlicher Teil des forstlichen Informationsbedürfnisses in Österreich abgedeckt werden kann. Im Bereich der Methodenentwicklung besteht aber noch großer Forschungsbedarf, da langfristig gesehen die derzeitigen auf statistischen Ansätzen basierenden Auswertemethoden durch wissenschaftliche Methoden ersetzt werden müssen. Die bestehende Kooperation mit der forstlichen Öffentlichkeit wird weiter ausgebaut, um auch in Zukunft die forstlichen Informationsbedürfnisse in der Wahl der Forschungsschwerpunkte zu berücksichtigen.

## 6. Beteiligungen

Das Projekt MISSION-FORST wurde von Seiten des Landwirtschaftsministeriums von Dipl.-Ing. Vladimir Carnba, von Seiten der forstlichen Bundesversuchsanstalt von Dipl.-Ing. Manfred Gärtner und von Seiten der Fa. Umweltdata von Dipl.-Ing. Michael Sutter betreut.

## Literatur

- [1] Banko, G. (1997a). Forstliche Anwendungsmöglichkeiten von Landsat-TM-Daten in Österreich; Dipl.-Arb., Wien, Univ. für Bodenkultur.
- [2] Burger, H. und Steinwendner, J. (1996). Study of forest mask generation from satellite imagery using image segmentation algorithms. In: Proceedings of the FIRS Workshop, Vienna, Oktober 1996, S. 465-476.
- [3] Haralick, R. M. und Shapiro, L. G. (1992). Computer and Robot Vision; Band I+II; Addison-Wesley; Reading, Massachusetts
- [4] Burger, H.; Banko, G. und Steinwendner, J.; (1997). Landnutzungserhebung in einem Wildbacheinzugsgebiet aus Satellitenbilddaten; In: Risikofaktoren in Wildbach- und Laweneinzugsgebieten, Symposium, September 1997, BZG Univ. f. Bodenkultur, Wien.
- [5] Burger, H.; Kroiher, F.; Steinwendner, J.; Schneider, W.; (1997). Analysis of simulated satellite imagery with different ground pixel sizes for forestry applications; In: Proceedings of DIP-97, SPIE-International Society for Optical Engineering, Vienna, in Druck.
- [6] Banko, G. (1997). Waldoptimierte Korrektur von geländebedingten Beleuchtungsunterschieden in Landsat-TM-Daten. In: Angewandte Geographische Informationsverarbeitung IX, Dollinger u. Strobl (Hrsg.), Salzburger geographische Materialien, Salzburg, Heft 26, S. 1-10.
- [7] Kaufmann, V. und Sulzer, W. (1997): Über die Nutzungsmöglichkeit hochauflösender amerikanischer Spionage-Satellitenbilder (1960-1972), VGI 3/97, S. 166-174.

### Anschrift der Autoren:

Dipl.-Ing. Gebhard Banko, Dipl.-Ing. Hannes Burger und Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. Werner Schneider: Institut für Vermessung, Fernerkundung und Landinformation, Universität für Bodenkultur, Peter-Jordan-Straße 82, A-1190 Wien

## Modellierung des Abflusses aus hochalpinen Einzugsgebieten unter Verwendung von Satellitendaten



Helmut Rott, Nikolaus Batlogg und Thomas Nagler, Innsbruck, Otto Pirker, Wien

### Zusammenfassung

Verfahren für den Einsatz satellitengetragener Erdbeobachtung zur Modellierung und Vorhersage des Abflusses in hochalpinen Einzugsgebieten wurden entwickelt und im Einzugsgebiet Schlegeis (Zillertal) während zwei Abflußperioden erprobt. Wesentliche hydrologische Eingangsgrößen von Seite der Fernerkundung sind digitale Schneekarten, die aus Aufnahmen abbildender Radarsysteme (SAR) und optischer Sensoren abgeleitet werden. Testläufe zur Kurzfristprognose täglicher Abflüsse zeigen für die Periode der Schneeschmelze gute Ergebnisse, da sich die wesentlichen Eingangsdaten für das hydrologische Modell, Schneeflächen aus Satellitendaten und Lufttemperatur aus numerischen meteorologischen Vorhersagen, gut abschätzen lassen.

### Abstract

Methods for the application of satellite data for modelling and forecasting the runoff in alpine drainage basins were investigated and tested in the drainage basin Schlegeis, Zillertal, in the Austrian Alps during two runoff seasons. Digital snow maps, derived from synthetic aperture radar and optical sensors, are the basic hydrological input data for the runoff calculations. Model runs show good results for runoff simulations during spring and summer. The quality of the short-term forecasts of daily runoff is good during the snowmelt period, because the main model input data, snow distribution from satellite data and air temperature from numerical meteorological forecasts, are accurate.

## 1. Aufgabenstellung

Das Projekt Alpine Hydrologie, das als Teilprojekt im Rahmen der Forschungsinitiative MISSION des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr durchgeführt wurde, befaßte sich mit der Entwicklung und Erprobung von Methoden zur Abflußvorhersage in hochalpinen Einzugsgebieten, in denen Schnee- und Gletscherschmelze einen wesentlichen Beitrag zum Abfluß liefern [1]. Satellitendaten hochauflösender optischer Sensoren (Landsat TM und SPOT HRV) und des abbildenden Radars (SAR) des europäischen Fernerkundungssatelliten ERS wurden zur Überwachung der Schneebedeckung verwendet. Optische Daten wurden auch zur Kartierung der wichtigsten Bodenbedeckungsarten genutzt, um unterschiedliche hydrologische Einheiten abzugrenzen. Auf Seite der Fernerkundung lag der Schwerpunkt der Arbeiten auf der Weiterentwicklung von Methoden zur automatischen Kartierung von Schneeflächen mittels SAR, wobei die Anwendbarkeit für den operationellen Einsatz im Vordergrund stand. Auf Seite der Hydrologie umfaßten die Arbeiten die Eichung der Modellparameter, Untersuchungen zur Ableitung des Gebietsniederschlag, und die Entwicklung eines Verfahrens zur zeitlichen Interpolation der Schneeflächen. Die Methodik wurde anhand von Modellrechnungen täglicher Abflüsse während zwei Abflußperioden überprüft.

## 2. Das Testgebiet

Als Testgebiet wurde das Einzugsgebiet des Jahrespeichers Schlegeis im Zillertal gewählt, das eine Fläche vom 122 km<sup>2</sup> umfaßt und sich über einen Höhenbereich von 1780 m bis 3509 m erstreckt. Die steile Topographie des Gebiets, mit Hangneigungen größer als 20 Grad auf 70 % der Fläche, stellt große Anforderungen an die Geokodierung der Satellitendaten und an die Korrektur topographisch bedingter radiometrischer Effekte. Der Gletscheranteil beträgt 21 % der Gesamtfläche. Gletscher und andere Oberflächentypen wurden aus multitemporalen Landsat Thematic Mapper (TM) Daten abgeleitet, wobei überwachte Klassifizierung basierend auf der topographisch korrigierten planetaren Albedo angewandt wurde.

Das Einzugsgebiet Schlegeis setzt sich aus 10 Teileinzugsgebieten zusammen, die Flächen zwischen 1.8 km<sup>2</sup> (S04) bis 33.6 km<sup>2</sup> (S00) einnehmen (Abb. 1). Die Auswertungen und hydrologischen Modellrechnungen wurden sowohl für

das Gesamteinzugsgebiet, als auch getrennt für die Teilgebiete durchgeführt [1]. Aus Platzgründen werden in diesem Artikel nur Beispiele für das Gesamtgebiet gezeigt.

## 3. Methodik der Schneekartierung aus Satellitendaten

Digitale Schneekarten aus Satellitendaten stellen die wesentliche Grundlage für die Berechnung der Schmelzwasserabflüsse mit Hilfe des Abflußmodells SRM dar [1, 2]. Diesen Karten, die mit einem digitalen Höhenmodell verknüpft sind, kann man die Schneebedeckung für beliebige Teilgebiete, Höhenstufen, hydrologische Einheiten usw. entnehmen. Neben der Ausdehnung der Schneedecke ist die räumliche Verteilung des Wasseräquivalents für hydrologische Anwendungen von Bedeutung. Dieser Parameter kann von Satelliten aus mit Mikrowellenradiometern gemessen werden. Die geringe räumliche Auflösung der zur Zeit verfügbaren Sensoren, die in der Größenordnung von 10 km oder darunter liegt, schließt jedoch die Anwendung im Gebirge aus [3].

Bei der Geokodierung der Satellitendaten wurde die topographisch bedingte Verzerrung unter Verwendung eines digitalen Höhenmodells korrigiert, das von Bundesamt für Eich- und Vermessungswesen zur Verfügung gestellt wurde. Aus den optischen Satellitendaten wurde das Reflexionsvermögen an der Obergrenze der Atmosphäre (die planetare Albedo) berechnet. Bei Landsat TM ermöglicht die Ratio der planetaren Albedo von Kanal 3 (0.63 – 0.69 µm) zu Kanal 5 (1.55 – 1.75 µm) eine gute Unterscheidung schneebedeckter und schneefreier Flächen, da das Reflexionsvermögen von Schnee im Gegensatz zu anderen Objekten von Kanal 3 zu Kanal 5 stark abnimmt. Mittels der Ratio-Bildung werden topographische Einflüsse weitgehend eliminiert. Da SPOT 3 keinen Kanal bei 1.5 µm aufweist, wurde die Schneedecke über einen Schwellwert der planetaren Albedo im SPOT Kanal 2 (0.61 – 0.68 µm) klassifiziert, wobei für die radiometrische Korrektur topographischer Einflüsse die Cosinus Korrektur angewandt wurde (Abb. 1).

Auf Grund der Abbildungsgeometrie sind bei SAR topographische Einflüsse noch störender als bei optischen Sensoren. Auf steilen Hängen, die in Richtung zur Radarantenne geneigt sind, kommt es zu Bildverkürzung und Bildüberlagerung (Layover); diese Bereiche eines SAR Bildes können für die Klassifizierung nicht genutzt werden. Im Einzugsgebiet Schlegeis liegen 43.0 % der Fläche bei Aufnahmen aus absteigender

Umlaufbahn und 45.6 % der Fläche bei aufsteigender Umlaufbahn in Layover-Bereichen. Durch Kombination der Aufnahmen aus den beiden Umlaufbahnen wird das Layover auf 8.3 % der Fläche reduziert. Abb. 2 zeigt den Ausschnitt eines ERS SAR Bildes der absteigenden Umlaufbahn. Die nach Südosten geneigten Hänge sind vollständig von Layover betroffen; auf Grund der Steilheit werden diese Hänge sogar zum Teil auf die unteren Bereiche der gegenüberliegenden Talseite projiziert.

Das Verfahren zur Klassifizierung der Schneebedeckung mit SAR beruht auf der starken Reduktion des rückgestreuten Signals bei nasser Schneedecke [3, 4]. Im Frequenzbereich von ERS SAR (5.3 GHz) kann man trockenen Schnee nicht erkennen, da er weitgehend transparent ist. Die wesentlichen Bearbeitungsschritte zur Kartierung schmelzenden Schnees sind:

- Radiometrische Eichung der SAR Bilder unter Verwendung der Daten in den Header-Files.
- Koregistrierung des zu klassifizierenden Bildes mit einem schneefreien Referenzbild.
- Tiefpaßfilterung zur Reduktion des multiplikativen Rauschens (Speckle).
- Berechnung der Ratio von Schnee-Bild zu Referenzbild.
- Geokodierung mit Geländekorrektur und Berechnung einer Karte der lokalen Einfallswinkel  $\theta$ .
- Kombination der Ratio-Bilder von absteigender und aufsteigender Umlaufbahn, wobei Pixel mit  $\theta < 17^\circ$  und  $\theta > 78^\circ$  ausgeschlossen werden.
- Erzeugung der Karte schmelzender Schneeflächen mit Hilfe eines Schwellwerts der Ratio von -3 dB. Dieser Wert wurde im Rahmen von Verifikationskampagnen festgelegt [4].

Mit ERS SAR kann man nur nasse Schneedecke erkennen. Für die Berechnung von Schmelzwasserabfluß ist dies ausreichend, da sich die Schneefläche im wesentlichen in den Randbereichen ändert, in denen die Schneedecke feucht ist [5]. Schnee, der nur oberflächlich gefroren ist, aber eine Schicht mit feuchtem Schnee enthält, wird als schmelzender Schnee klassifiziert [4]. In Hinblick auf den operationellen Einsatz wurde eine Programmsequenz entwickelt, die eine automatische Bearbeitung der obigen Verarbeitungsschritte erlaubt und insbesondere für die Erzeugung von Zeitreihen der Schneebedeckung eine rasche Bearbeitung ermöglicht. Abb. 3 zeigt eine Farbkomposit aus zwei Schneekarten, die aus SAR Bildern vom 12. Mai 1997 und 16. Juni 1997 abgeleitet wur-

den. Die Schneekarte jedes Termins wurde aus Bilddaten aufsteigender und absteigender Umlaufbahn erstellt. Im unteren Bereich von Abb. 3 erscheint ein relativ großer Layover-Anteil, da das Bild der aufsteigenden Umlaufbahn etwa an der Grenze des Einzugsgebiets abschneidet.

Vergleiche mit Schneekarten aus optischen Bilddaten und mit photographischen Aufnahmen weisen darauf hin, daß die SAR Analysen die Schneebedeckung in den Randzonen etwas unterschätzen. Grund dafür ist die Dominanz des Rückstreuerverhaltens schneefreier Flächen bei durchbrochener Schneedecke [4].

#### 4. Grundlage der hydrologischen Modellierung

Für die Abflußberechnungen wurde das Snowmelt Runoff Modell (SRM) verwendet, das speziell für die Berechnung von Schneeschmelzabflüssen unter dem Gesichtspunkt der Nutzung von Fernerkundungsdaten entwickelt wurde [2]. In diesem Modell wird das Einzugsgebiet in verschiedene Höhenzonen unterteilt, außerdem kann man auch eine Unterteilung nach anderen Gesichtspunkten durchführen, wie z.B. vergletscherte und unvergletscherte Flächen. Der Abfluß von den einzelnen Zonen wird zusammenfassend berechnet, als Zeitschritt für die Berechnungen wird üblicherweise ein Tag gewählt. Der Schmelzwasserbeitrag aus jeder Zone ( $i = 1, Z$ ) wird über die mittlere tägliche Lufttemperatur  $T$  berechnet. Der Niederschlag  $P$  in Form von Regen wird direkt dem Abfluß zugeführt,  $P$  in Form von Schnee wird gespeichert. Die grundlegende Gleichung von SRM ist:

$$Q_{n+1} = Q_n k_{n+1} + (1 - k_{n+1}) \sum_{i=1}^Z (c_{s,i} \alpha_n T_n S_n + c_{r,i} P_n) \quad (1)$$

$n$  ist die Zahl des jeweiligen Tages in der Zeitserie,  $i$  ist der Index für die Höhenzone,  $Q$  ist der Abfluß aus dem Einzugsgebiet und  $S$  ist die aktuelle Schneefläche in der jeweiligen Zone.  $k$ , der Rezessionskoeffizient, beschreibt die Abnahme des Abflusses und entspricht dem Verhältnis des Abflusses von zwei aufeinanderfolgenden Tagen ohne Schneeschmelze oder Niederschlag.  $k$  wird aus historischen Zeitreihen des Abflusses bestimmt und variiert mit der Abflußmenge  $Q$ .  $c_s$  und  $c_r$  sind Korrekturfaktoren für die Abflußbeiträge von Schneeschmelze bzw. Niederschlag, die Verlustfaktoren wie z.B. Verdunstung implizit berücksichtigen [2]. Für jede Höhenzone wird die Temperatur  $T_i$  mit Hilfe eines Höhengradienten, ausgehend vom Niveau der vorhandenen Meßstelle, berechnet. Der un-

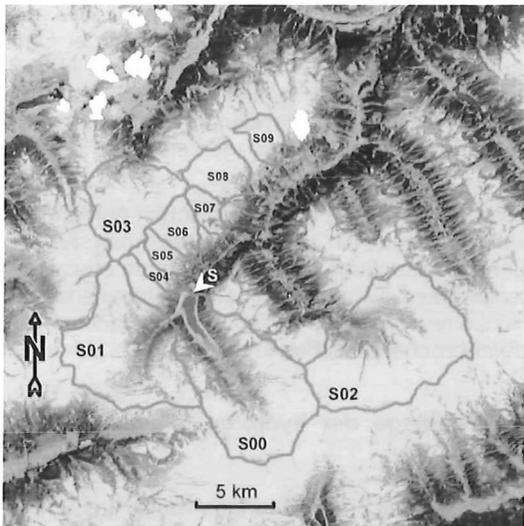


Abb. 1: SPOT Bild vom 7.6.1997 mit Karte der Schneebedeckung (blau) und Teileinzugsgebieten des Speichers Schlegeis. S – Staumauer.

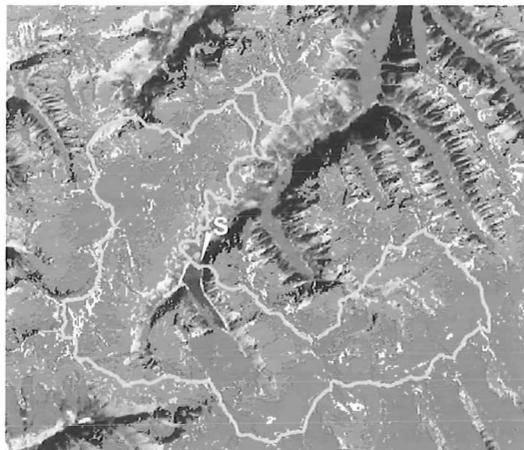


Abb. 3: Schneekarte aus ERS SAR Aufnahmen vom 12. Mai 1997 (rot) und 16. Juni 1997 (grün) mit Grenzen des Einzugsgebiets Schlegeis. Blau: Restzonen mit Bildüberlagerung.

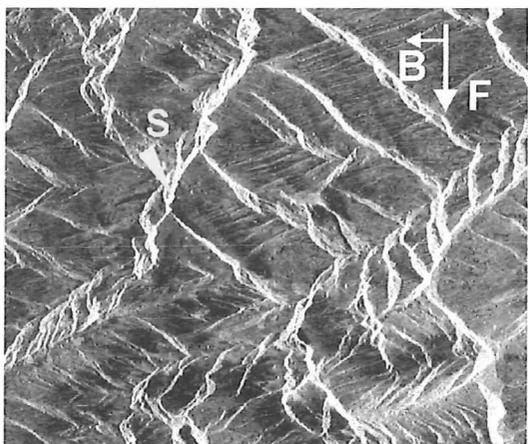


Abb. 2: ERS SAR Bild vom 21. 7. 1997, von absteigender Umlaufbahn aus aufgenommen. F – Flugrichtung, B – Blickrichtung des SAR.

vergletscherte Teil des Einzugsgebiets Schlegeis wurde in fünf Höhenzonen unterteilt, der vergletscherte Teil in drei Höhenzonen.

Der Gradtagfaktor  $\alpha$  stellt einen empirisch bestimmten Umrechnungsfaktor dar, mit dessen Hilfe aus der Lufttemperatur der Schmelzwasserbeitrag in mm pro Tag abgeschätzt wird [6]. Auf Grund zunehmender Verschmutzung der Schneeoberfläche und Verdichtung der Schneedecke nimmt  $\alpha$  im Laufe der Schmelzperiode zu. Für das Gesamteinzugsgebiet Schlegeis änderten sich die Werte von  $\alpha = 3$  [mm/°C Tag] im April bis 4.5 [mm/°C Tag] ab Juni bzw. Juli (je

nach Höhenstufe). Über den Gletscherflächen lagen der Werte von  $\alpha$  im Sommer je nach Eisanteil etwas höher [5].

Als Referenz für die Lufttemperatur wurden die Messungen an der Station Schlegeis herangezogen, die in 1800 m Meereshöhe in Nähe der Staumauer liegt. Die Temperaturen für die einzelnen Zonen wurden im Mittel mit einem vertikalen Temperaturgradienten von  $-0.65^\circ\text{C}/100$  m berechnet. Für die Berechnung des Gebietsniederschlags wurde ebenfalls die Station Schlegeis verwendet, sowie 6 Stationen in der Umgebung des Einzugsgebiets. Auf Grund der räumlichen Wichtung mit dem Quadrat der Entfernung ist jedoch die Station Schlegeis für den Gebietsniederschlag dominierend. Ein wesentlicher Faktor ist weiters die Höhenabhängigkeit des Niederschlags. Die Analyse von Zeitreihen von Niederschlagsmessungen an synoptischen Stationen und Totalisatoren in den österreichischen Zentralalpen zeigten starke Unterschiede der Höhengradienten des Niederschlags für konvektive oder advektive Ereignisse. Bei der Abflußmodellierung wurden diese Unterschiede berücksichtigt.

Für die Berechnung der Schmelzwasserabflüsse nach Gleichung [1] wird die Schneefläche an jedem einzelnen Tag benötigt. Da im Schnitt nur etwa zwei Schneekarten pro Monat vorlagen, war es notwendig, die zeitliche Änderung der Schneefläche zwischen diesen Terminen abzuschätzen. Dafür wurden Faktoren der Flächenänderung  $f_s$  für die einzelnen Höhenstufen berechnet, die sich aus dem Verhältnis von Flächenänderung zur Gradtagsumme zwischen zwei Termi-

nen ergeben. Für jeden Tag kann man mit  $f_s$  aus der jeweiligen Gradtagsumme die Änderung der Schneefläche seit der letzten Satellitenaufnahme berechnen. Dies ermöglicht eine realistische Abschätzung der Flächenänderungen, da die Schneefläche während der kalten Perioden konstant gehalten wird, der Rückgang an warmen Tagen hingegen entsprechend groß angesetzt wird. Dieses Verfahren kann auch für die Prognose von Schmelzwasserabflüssen verwendet werden, indem man von der Schneefläche einer Satellitenaufnahme ausgeht und mittels  $f_s$  die täglichen Flächenänderungen bis zum Termin der nächsten Satellitenaufnahme berechnet.

### 5. Ergebnisse der Abflußberechnungen

Modellrechnungen täglicher Abflüsse wurden für die Perioden 1. Mai bis 30. Juni 1996 und 1. April bis 15. September 1997 im Simulationsmodus, für die Periode 1. April bis 15. September 1997 im Prognosemodus durchgeführt. Beim Simulationsmodus wurde der Abflußwert des letzten Tages vor Beginn der Untersuchungsperiode eingegeben, die Tageswerte des Abflusses wurden nach dem oben erläuterten Verfahren aus meteorologischen Meßwerten und Schneekarten berechnet.

Abb. 4 zeigt die Ergebnisse der Abflußmodellierung für Frühjahr und Sommer 1997 im Vergleich zum gemessenen Abfluß. Von Anfang Mai bis Mitte Juni war Schneeschmelze für den Abfluß dominierend, den zeitlichen Verlauf be-

stimmten Schneebedeckung und Temperaturverhalten. Ab Mitte Juni führten starke Niederschläge kurzfristig zu Abflußspitzen, Gletscherabfluß lieferte ab Anfang August einen wichtigen Beitrag. Zwischen Ende Mai und Ende Juli traten außerdem wiederholt Neuschneefälle auf, die eine starke Modulation des Schmelzwasserabflusses bedingten. Trotz dieser komplexen Verhältnisse ist die Übereinstimmung zwischen gemessenen und berechneten Abflüssen gut, die Differenz im Gesamtvolumen von gemessenem und berechnetem Abfluß beträgt nur 3 %, das Bestimmtheitsmaß  $R^2$  zwischen berechneten und gemessenen täglichen Abflußwerten [2] beträgt 0.87 (Tab. 1). Größere Abweichungen ergeben sich für einzelne niederschlagsbedingte Abflußspitzen, was auf Fehler im berechneten Gebietsniederschlag zurückzuführen ist.

	$R^2$	$\Delta V$ (%)
Simulationsmodus		
1.5.-30.6.1996	0.85	6
1.4.-15.9.1997	0.87	3
Vorhersagemodus		
1.4.-15.9.1997 +24h	0.83	14
1.4.-15.9.1997 +72h	0.66	21
1.5.-15.6.1997 +24h	0.91	11
1.5.-15.6.1997 +72h	0.88	13

Tab. 1: Vergleich gemessener und berechneter Abflüsse für das Einzugsgebiet Schlegeis;  $R^2$  – Bestimmtheitsmaß,  $\Delta V$  – Volumsdifferenz.

Die Berechnungen im Prognosemodus wurden zwar nicht in Echtzeit durchgeführt, es wurde jedoch nur diejenige Information verwendet, die auch bei Echtzeitprognosen zur Verfügung stünde. Temperatur und Niederschlag wur-

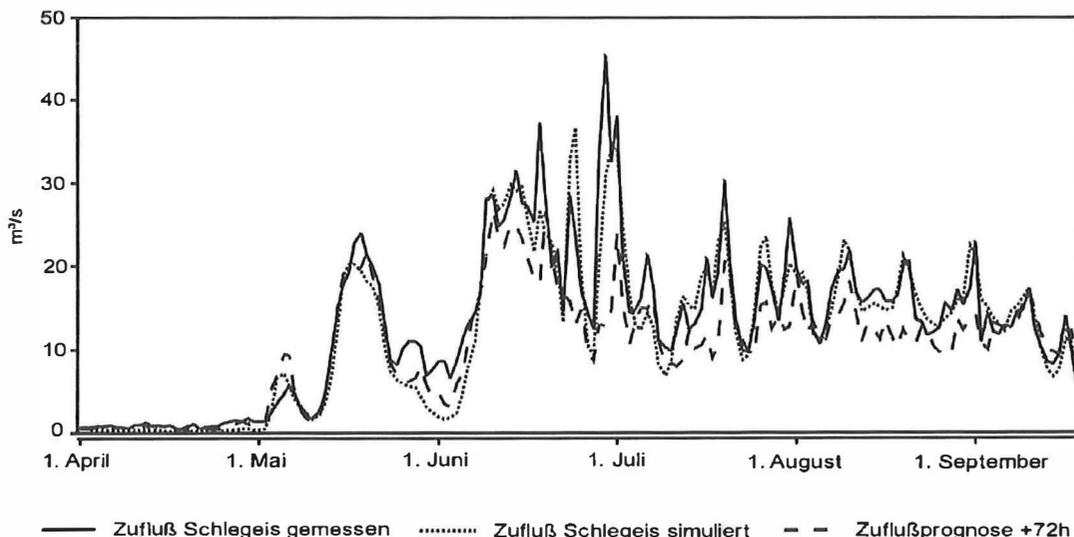


Abb. 4: Gemessene tägliche Abflußraten des Einzugsgebiets Schlegeis und Ergebnisse der Modellrechnungen im Simulationsmodus und für 72-stündige Vorhersagen.

den den meteorologischen Prognosen des europäischen Zentrums für mittelfristige Wettervorhersagen (ECMWF) entnommen. Die tägliche Ausdehnung der Schneefläche wurden vom Termin einer Satellitenaufnahme ausgehend mit dem in Abschnitt 4 angeführten Verfahren abgeschätzt. Die Berechnungen wurden für Vorhersageperioden von ein bis drei Tagen durchgeführt. Die Statistik in Tab. 1 zeigt gute Ergebnisse für die ein- bis dreitägigen Prognosen während der Hauptperiode der Schneeschmelze (1.5. bis 15.6.1997) mit  $R^2 = 0.91$  für eintägige Vorhersagen und  $R^2 = 0.88$  für dreitägige Vorhersagen. Im Sommer sinkt die Güte der Abflußvorhersage deutlich, was im wesentlichen auf Fehler der Niederschlagsprognose im meteorologischen Modell zurückzuführen ist. In Perioden, in denen Niederschlagsabfluß dominiert, ist eine wesentliche Verbesserung der Abflußvorhersagen nur über eine Verbesserung der Niederschlagsvorhersagen möglich.

## 6. Schlußfolgerungen

Sowohl SAR als auch hochauflösende optische Sensoren bieten gute Möglichkeiten zur Kartierung der Schneebedeckung in komplexem Gelände, eine wesentliche Größe für die Modellierung des Abflusses in alpinen Einzugsgebieten. SAR bietet den Vorteil einer regelmäßigen Aufnahme, unabhängig von Bewölkung und Beleuchtung. Es sind jedoch komplexe Analyseverfahren notwendig, um den Einfluß der Topographie zu eliminieren. Außerdem kann man mit SAR nur feuchte Schneedecke kartieren. Für die Überwachung der Schneeschmelze ist dies jedoch ausreichend, da sich die Schneebedeckung primär in den durchfeuchteten Randzonen ändert. In Hinblick auf operationelle Anwendungen wurde ein automatisches Verfahren für die Schneeklassifizierung mittels SAR entwickelt.

Das verwendete Abflußmodell SRM ist speziell für die Berechnung täglicher Abflußmengen zufolge von Schneeschmelze geeignet. Für die Abflußsimulation im Testgebiet Schlegeis lieferte das Modell in beiden Abflußperioden gute Ergebnisse. Nennenswerte Abweichungen zum gemessenen Abfluß gibt es lediglich an einzelnen Tagen mit starken Niederschlägen, da die Abschätzung des Gebietsniederschlags aus Punktmessungen problematisch ist. Die Pro-

gnose täglicher Abflüsse für Vorhersagezeiträume von ein bis drei Tagen liefert für die Schneeschmelzperiode gute Ergebnisse, da sich die wesentlichen Eingangsgrößen, Schneeflächen aus Satellitendaten und Lufttemperatur aus numerischen meteorologischen Vorhersagen, gut abschätzen lassen. An den Tagen, an denen Regen den Abfluß dominiert, hängt die Güte der Abflußprognose im wesentlichen von der Qualität der Niederschlagsvorhersage ab, die insbesondere im Gebirge oftmals mit großen Fehlern behaftet ist. Da Satellitendaten nur während der Schmelzperiode einen wesentlichen Beitrag zur Vorhersage des Abflusses leisten, kann man den Einsatz von Satellitenmessungen auf diese Periode begrenzen. Die Nutzung der Fernerkundung ist vor allem für große Einzugsgebiete von Interesse. Untersuchungen dazu laufen im Rahmen eines EU-Projekts, das vom Institut für Meteorologie und Geophysik koordiniert wird und Testgebiete in vier europäischen Ländern umfaßt.

### Dank

Die Arbeiten wurden im Rahmen eines Forschungsauftrags des Bundesministeriums für Wissenschaft und Verkehr durchgeführt. Die ERS SAR Daten wurden von der ESA für das Experiment AO2.A101 zur Verfügung gestellt.

### Literatur

- [1] Rott, H., Batlogg, N., Nagler, T., Rack, W., Pirker, O.: Projekt MISSION – Alpine Hydrologie, Endbericht. Institut für Meteorologie und Geophysik der Universität Innsbruck, 64 S., 1998.
- [2] Martinec J. Rango, A., Roberts, R.: Snowmelt Runoff Model (SRM) User's Manual. Geographica Bernensia P29, 65 pp., 1994.
- [3] Rott, H., Nagler, T., Floricioiu, D.-M.: Anwendungen der Fernerkundung für die Schneehydrologie. Österr. Z. für Vermessung und Geoinformation, 84. Jhg.: 51–54, 1996.
- [4] Nagler, T.: Methods and Analysis of Synthetic Aperture Radar Data from ERS-1 and X-SAR for Snow and Glacier Applications. Diss., Univ. Innsbruck, 1996.
- [5] Nagler, T. and Rott, H.: The application of ERS-1 SAR for snowmelt runoff modelling. Remote Sensing and GIS for Design and Operation of Water Resources Systems, IAHS Publ. No. 242: 119-126, 1997.
- [6] Rango, A. and Martinec, J.: Revisiting the degree-day method for snowmelt computations. Water Resources Bulletin 31(4), 657-669, 1995.

### Anschrift der Autoren:

Helmut Rott, Nikolaus Batlogg und Thomas Nagler: Institut für Meteorologie und Geophysik, Universität Innsbruck, Innrain 52, A-6020 Innsbruck.  
Otto Pirker: Österr. Elektrizitätswirtschafts AG, Am Hof 6A, 1010 Wien.