

Zeitschrift: Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen = Swiss forestry journal = Journal forestier suisse

Herausgeber: Schweizerischer Forstverein

Band: 151 (2000)

Heft: 6

Artikel: Die Schneedeckenverteilung in einem voralpinen Einzugsgebiet und ihre Bedeutung für den Schneeschmelzabfluss

Autor: Stähli, Manfred / Papritz, Andreas / Waldner, Peter / Forster, Felix

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-1098355>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 01.05.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Die Schneedeckenverteilung in einem voralpinen Einzugsgebiet und ihre Bedeutung für den Schneeschmelzabfluss

MANFRED STÄHLI, ANDREAS PAPRITZ, PETER WALDNER UND FELIX FORSTER

Keywords: Snowcover; snow course; sub-alpine catchment; snowmelt runoff; Alptal; canton of Schwyz, Switzerland. FDK 116.12 : (494.11)

Abstract: For the spatial pattern of the snow-cover measurements carried out in the winter of 1998/99 in a sub-alpine catchment, the altitude and the forest density showed to be the most important landscape parameters, whereas terrain slope and aspect were of minor importance for that specific area. The influence of the snow cover distribution on the snow-melt runoff was illustrated by means of a mathematical snow-cover model. For thirty of these randomly chosen sites, the snow-melt runoff was simulated. Although the variability of a simulated total runoff between these locations was considerable, their weighted mean corresponded closely to the measured runoff.

Abstract: Bei den während des Winters 1998/99 in einem voralpinen Einzugsgebiet durchgeführten Schneemessungen erwiesen sich die Höhenlage und die Walddichte als wichtigster Landschaftsparameter, während die Hangneigung und die Exposition in diesem Einzugsgebiet eine untergeordnete Rolle spielten. Die Bedeutung der räumlichen Verteilung der Schneedecke für den Schneeschmelzabfluss wurde mit einem mathematischen Schneedeckenmodell aufgezeigt. Für dreissig zufällig gewählte Standorte des Einzugsgebietes wurde der Schneeschmelzabfluss simuliert. Trotz beträchtlicher Variabilität des Abflusses zwischen einzelnen Standorten stimmte der gemittelte Abfluss dieser dreissig Simulationen gut mit dem gemessenen Abfluss überein.

1. Einleitung

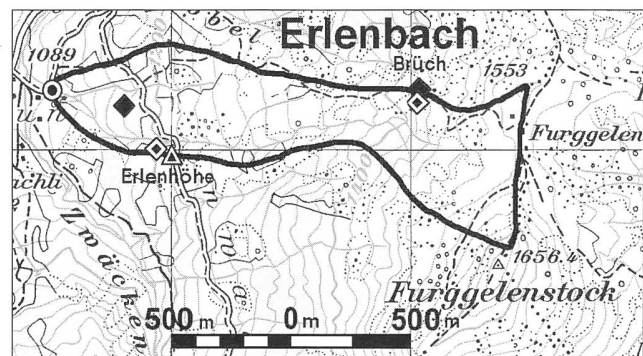
Der Winter 1998/99 wird vielen Leuten noch lange als «Winter der Rekorde» in Erinnerung bleiben. Ergiebige Schneefälle, welche grösstenteils ab Februar einsetzten, führten in den Alpen zu einer aussergewöhnlich mächtigen Schneedecke und zu einer sehr hohen Lawinengefahr. Wie aber hat die Schneesituation in den Voralpen ausgesehen, wo die Schneedecke über die Jahre stark wechselhaft ist und ausserdem stark von der Vegetation beeinflusst wird? Mit diesem Artikel möchten wir dieser Frage am Beispiel des Einzugsgebietes Erlenbach (Alptal/SZ) nachgehen, wo seit vielen Jahren intensive hydrologische und meteorologische Messungen durchgeführt werden. Mit dem Ziel, ein genaueres Bild von der räumlichen Verteilung der Schneedecke im Einzugsgebiet zu erhalten, insbesondere über deren Abhängigkeit von Topographie und Vegetation, wurden an einzelnen Tagen des Winters umfassende Schneemesskampagnen im ganzen Einzugsgebiet durchgeführt. Diese räumlichen Messwerte wurden ausserdem mit zwei Standorten verglichen, wo die Eidg. Forschungsanstalt WSL seit 1978 regelmässig die Schneehöhe und das Schneewasseräquivalent (SWE) misst.

Mit diesem Aufsatz wollen wir auch zeigen, wie die gemessene räumliche Schneeverteilung mit einfachen linearen Regressionsmodellen beschrieben werden kann, d.h. wie gut sie sich mit einfachen topographischen und Vegetationseigenschaften erklären lässt. Ausserdem wird erläutert, was diese variable Schneedecke für den Schneeschmelzabfluss im Frühling bedeutet.

2. Beschreibung des Einzugsgebietes und der Messungen

Das Einzugsgebiet Erlenbach (Alptal/SZ) hat eine Fläche von 0,7 km² und erstreckt sich vom Brunni (1090 m ü. M.) hinauf zum Furggelenstock (1650 m ü. M.). Das Gebiet ist mässig bis stark geneigt (mittlere Neigung: 28%) und ziemlich uniform westlich exponiert (Abbildung 1). Ungefähr 40% der Fläche sind bewaldet, wobei es neben geschlossenem Wald und Frei-

land auch zahlreiche halboffene Waldpartien und Baumgruppen gibt. Felsige Partien gibt es im Einzugsgebiet keine, dafür finden sich in Bachnähe lokal stark kuptierte und schwierig begehbare, bewaldete Einhänge. Bei den offenen Flächen im obersten Teil des Einzugsgebietes handelt es sich um Alpweiden und um gleichmässig geneigte Feuchtwiesen im unteren Teil.



- ◆ Schneemessstrecke WSL Freiland
- ◆ Schneemessstrecke WSL Wald
- ▲ Klimastation WSL

Abbildung 1: Karte des Einzugsgebietes Erlenbach mit den Standorten der WSL-Schneemessstrecken Brüch und Erlenhöhe (Reproduziert mit Bewilligung des Bundesamtes für Landestopographie, BA4813). Die grau-schattierten Flächen entsprechen den bewaldeten Gebieten.

Seit 1978 führt die WSL an zwei Standorten im Erlenbach-Gebiet regelmässig Schneemessungen durch: unten bei der Klimastation «Erlenhöhe» (1210 m ü. M.) und, im oberen Teil, beim Standort «Brüch» (1430 m ü. M.) (Abbildung 1). Auf zwei Messstrecken von 30 m Länge, eine im Wald und eine auf der offenen Wiese, werden an beiden Standorten alle ein bis vier Wochen Schneehöhe, -dichte und daraus das SWE bestimmt. Diese Messungen erfolgen manuell mit einem Messstock und einem Rohr, mit dem Schneesäulen ausgestochen werden. Erste Resultate wurden von KELLER et al. (1984) zusammengestellt und analysiert.



Bedeckungsgrad = 58%

Abbildung 2: Aufwärts gerichtete Aufnahme der Baumkrone (links) und mit digitaler Bildverarbeitung bestimmte Bedeckungsfläche (rechts) beispielhaft dargestellt für einen ausgewählten Standort.

Im Winter 1998/99 wurde die Schneedecke im Einzugsgebiet auf einem Raster von 75 x 75 m an fünf ausgewählten Tagen aufgenommen (total 134 Punkte). An je einer Stelle im oberen und im unteren Teil des Gebietes wurde das Messnetz durch je 40 zusätzliche Punkte auf 25 x 25 m verdichtet. Ausserdem wurden am 22. Januar 1999 80 weitere Punkte entlang eines Waldtransektes beprobt. Um die durch die unebene Bodenbeschaffenheit bedingte, kleinräumige Variabilität auszugleichen, wurden an jedem Messpunkt mindestens fünf Wiederholungen gemacht und dann gemittelt. Für jeden Punkt wurden ausserdem die Koordinaten sowie Höhenlage, Neigung und Exposition festgelegt. Dabei charakterisierten Höhenlage und Neigung die direkte Umgebung (10 x 10 m) der Messpunkte. Sämtliche Standorte wurden in drei Klassen eingeteilt: (a) «offen», d.h. unbewaldete Standorte, (b) «halb-offen», das sind einerseits Waldränder, andererseits Standorte, wo die Baumdicke gering ist, und (c) «Wald»; damit ist geschlossener Wald gemeint. Als Unterklasse wurden die unbewaldeten Standorte oben an der Krete ausgeschieden, welche stark windexponiert sind. An 89 der insgesamt 152 Waldstandorte bestimmten wir auch noch den Bedeckungsgrad der Vegetation mit folgender Methode (*Abbildung 2*): Mit einer senkrecht aufwärts gerichteten Handkamera (Brennweite: 35 mm) wurde die Kronenbedeckung photographiert und das Bild eingescannt. Mit einer einfachen Schwellenwert-Funktion im blauen Kanal wurde dann der Himmel von der Vegetation getrennt, so dass eine quantifizierbare Abbildung der Bedeckungsfläche resultierte. Die Bedeckungsfläche pro Gesamtfläche des Bildes wurde dann als Bedeckungsgrad bezeichnet. Der Bedeckungsgrad ist ein schnell und einfach bestimmbarer Mass für die Vegetationsdichte und wurde darum anderen Vegetationsparametern, wie z. B. LAI (Blattflächenindex), Baumhöhe oder -dicke, vorgezogen.

3. Räumliche Schneeverteilung im Einzugsgebiet

3.1 Gemessene Schneedeckenentwicklung

In diesem Abschnitt soll die generelle Schneedeckenentwicklung im Einzugsgebiet Erlenbach für den Winter 1998/99 aufgezeigt werden (vgl. *Abbildung 5*). Die folgenden Auswertungen beziehen sich grösstenteils auf die Schneehöhe, deren Verteilungsmuster sich sehr ähnlich dem des SWE verhält. Die Schneefälle setzten Mitte November ein, worauf sich innerhalb weniger Wochen eine etwa 50 cm mächtige Schneedecke bildete. Diese blieb danach ohne grosse Veränderung bis Ende Januar bestehen, bis ergiebige Schneefälle einsetzten, welche den ganzen Februar hindurch anhielten. Die grösste Schneehöhe wurde am 1. März gemessen, unmittelbar nach den markantesten Schneefällen, und betrug am Fusse des Furggelenstocks auf einer Höhe von 1550 m ü. M. 323 cm (entsprechend

einem SWE von 824 mm). Die Schneeschmelze setzte um den 20. April ein und wurde dank schnell steigenden Lufttemperaturen intensiviert. Am 10. Mai war das Gebiet unterhalb 1300 m ü. M. grösstenteils schneefrei.

Für drei ausgewählte Zeitpunkte des Winters wird die Schneehöhenverteilung in *Abbildung 3* gezeigt. Obwohl die Schneemenge zwischen Dezember, März und Mai beträchtlich variierte, blieb das Verteilungsmuster innerhalb des Gebietes für den ganzen Winter ähnlich, wobei sich die Kontraste gegen Saisonende wegen unterschiedlicher Ablagerung und Schmelze verdeutlichten. Zum Verteilungsmuster trugen im Wesentlichen die Höhenlage und die Vegetation bei. Einerseits war eine generelle Zunahme vom westlichen zum östlichen Gebietsrand als Folge des Höhengradienten feststellbar. Andererseits wurde das Schneeablagerungsmuster von den geschlossenen Waldpartien geprägt. Diese sind in den Schneehöhenkarten als lokale Minima gut wiedererkennbar. Im Wald war die Schneedecke im Mittel ungefähr halb so mächtig wie im Freiland, was bereits in einer früheren Studie von KELLER *et al.* (1984) für das ganze Alptal – in Bezug auf das SWE – gezeigt worden ist. Unsere Messungen bestätigten diese Grössenordnung im Grossen und Ganzen, wenn auch dieses Verhältnis im Laufe des Winters 1998/99 stark variierte. An den von uns als «halboffener Wald» klassierten Standorten entsprach die Schneehöhe ungefähr dem Mittelwert der Standorte «offen» und «Wald».

Ausserdem gab es im unbewaldeten, obersten Teil des Einzugsgebietes Akkumulations- und Erosionsgebiete, die durch Topographie und Wind bedingt waren.

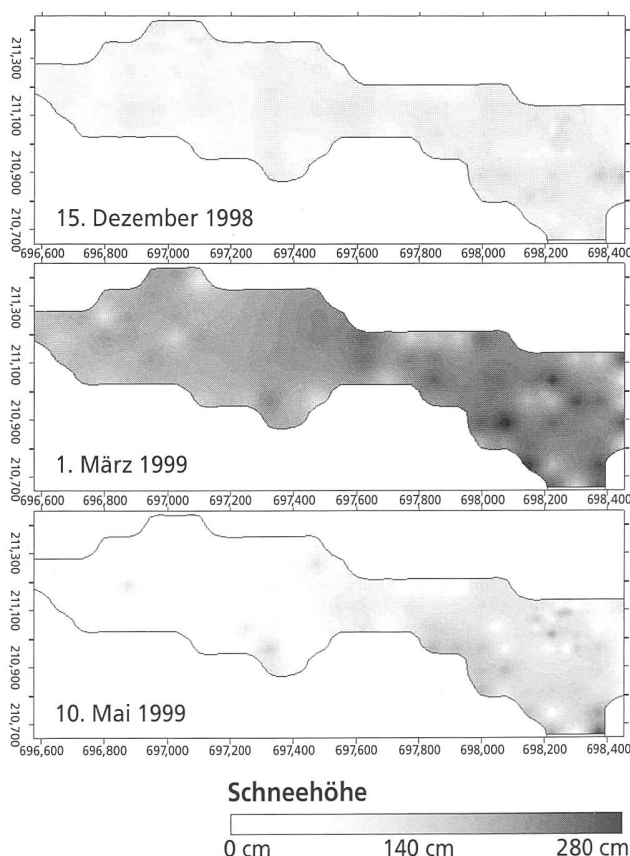


Abbildung 3: Räumliche Verteilung der Schneedecke an drei ausgewählten Tagen des Winters 1998/99. (Die Interpolation der Schneehöhen zwischen den Messpunkten wurde mit einer Inversen-Distanz-Methode gemacht.)

3.2 Lineare Regressionsmodelle

Wir untersuchten die Abhängigkeit der Schneehöhe von Topographie und Vegetation mittels linearer Regression (Tabelle 1 und 2). Als Regressorvariablen wählten wir die Höhe ü. M., die Hangneigung, die Exposition und den Bedeckungsgrad (siehe oben).

In einem ersten Schritt testeten wir für die unbewaldeten und nicht windexponierten Standorte nur den Einfluss der Höhenlage. Dabei zeigte es sich, dass die Höhe ü. M. bereits einen recht grossen Teil der Schneehöhenvariabilität erklärt (Tabelle 1, Modell 1). Eine diesbezügliche Ausnahme zeigte sich anfangs Winter, als die Schneedecke mit der Höhe kaum variierte. KELLER *et al.* (1984) schätzten für das Alptal eine Zunahme des maximalen SWE von rund 1 mm pro m Meereshöhe, was unseren Berechnungen von 0,75 mm m⁻¹ am 1. März, respektive 1,29 mm m⁻¹ am Ende des Winters (10. Mai) gegenübergestellt werden kann.

Wenn zusätzlich zur Höhenlage auch noch Hangneigung und Exposition ins Regressionsmodell einbezogen werden (Tabelle 1, Modell 2), verbessert sich die Übereinstimmung zwischen Modell und Messungen ein wenig. Der deutlichste Neigungs- und Expositionseinfluss zeigt sich während der Schneeschmelze (10. Mai), wo die Topographie für die Einstrahlung eine wichtige Rolle spielt (grösste Zunahme des R²-Wertes). Für die Schneeablagerung am Anfang des Winters scheinen Neigung und Exposition innerhalb dieses Einzugsgebietes kaum eine Bedeutung zu haben.

In einer weiteren Regressionsanalyse untersuchten wir, wie gut die Schneehöhenverteilung im bewaldeten Gebiet mit der Höhenlage und dem Bedeckungsgrad als Regressoren erklärt werden kann. Tabelle 2 (Modell 3) zeigt, dass dieses Modell die Schneehöhenvariabilität im Wald nur am Anfang des Winters befriedigend repräsentieren kann. Der Bedeckungsgrad scheint also nur ein geeigneter Parameter zur Beschreibung der Schneeablagerung, nicht aber der Schneeschmelze zu sein.

Abschliessend versuchten wir, die Schneehöhenverteilung im ganzen Gebiet (sowohl im Freiland als auch im Wald) mit einem einzigen Regressionsmodell zu beschreiben. Als konti-

nuierliche Regressorvariable wurde wieder die Höhenlage gewählt, zusätzlich wurden Indikatoren für Wald, Walddichte und Windexponierung gemäss folgendem Schema bestimmt:

$$I_{\text{wald}} = \begin{cases} 1 & \text{wenn bewaldeter Standort (geschlossen oder halboffen)} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$I_{\text{wdichte}} = \begin{cases} 1 & \text{wenn geschlossener Waldstandort} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

$$I_{\text{wind}} = \begin{cases} 1 & \text{wenn wind-exponierter Standort} \\ 0 & \text{sonst} \end{cases}$$

Auch in Anbetracht der Einfachheit dieses Modelles dürfen die R²-Werte zwischen 0,36 und 0,47 (Tabelle 2, Modell 4) als nur knapp zufriedenstellend, aber sicher nicht als gut beurteilt werden. Die residuale Standardabweichung dieses Modelles liegt im Bereich der übrigen Modelle. Somit sind derart einfache Modelle, die mit rasch bestimmbar Indikatoren arbeiten, nur bedingt angebracht, falls keine differenzierten Informationen über die räumliche Verteilung der Vegetationseigenschaften vorliegen.

4. Repräsentativität der WSL-Messstrecken

Für die hydrologischen Studien im Erlenbachgebiet ist es wichtig zu wissen, wie gut die Standorte der mehrjährigen WSL-Schneemessungen das ganze Einzugsgebiet repräsentieren. Um dies abzuklären, ordneten wir die Punktmessungen einem unteren und einem oberen Teilgebiet zu. Diese wurden durch die Höhenkurve 1350 m ü. M. voneinander getrennt. Den unteren Teil des Gebietes verglichen wir mit dem Standort «Erlenhöhe» (1011: Freiland; 1012: Wald), den oberen mit dem Standort «Brüch» (1031: Freiland; 1032: Wald).

Abbildung 4 zeigt, dass die WSL-Schneestrecken in Bezug auf den Mittelwert im Grossen und Ganzen das Einzugsgebiet gut repräsentieren. Die gemittelten Schneehöhen der räumlichen Messungen sind vergleichbar mit den Schneehöhen an

den WSL-Standorten. Dies gilt besonders bei geringer Schneehöhe, d.h. am Anfang und gegen Ende des Winters. Zur Zeit der maximalen Schneedecke liegen die WSL-Messwerte etwas niedriger als die Mittelwerte der räumlichen Messkampagnen, in fast allen Fällen liegen die Werte jedoch innerhalb der Standardfehler. Die schwerwiegendste Differenz konnten wir ganz am Ende des Winters feststellen (10. Mai), als die WSL-Standorte 1011, 1012 und 1032 bereits schneefrei waren, jedoch im Gebiet an vereinzelten schattigeren Stellen noch bis zu über 1 m Schnee lag. Da die Ausaperung in einem solchen Gebiet lokal sehr unterschiedlich stattfindet und sich über Wochen hinziehen kann, ist es nicht möglich, während einer solchen Zeit das ganze Gebiet mit einer oder zwei Messstationen zu repräsentieren. Selbstverständlich kann auch die Variabilität der Schneehöhe über das ganze Ein-

Tabelle 1: Bestimmtheitsmass (R²-Wert) und residuale Standardabweichung für die linearen Regressionsmodelle, welche für die Schneehöhenmessungen an den Freilandstandorten bestimmt wurden.

Datum	Modell 1: Schneehöhe = a*Höhe ü. M. + b			Modell 2: Schneehöhe = a*Höhe ü. M. + b*Neigung + c*Exposition + d		
	R ² -Wert	Res. Std. abweichung	Anzahl Standorte	R ² -Wert	Res. Std. abweichung	Anzahl Standorte
15. Dez.	0,27	14,9 cm	84	0,33	14,5 cm	84
22. Jan.	0,47	19,4 cm	74	0,48	19,6 cm	74
1. März	0,61	35,7 cm	42	0,67	33,6 cm	38
10. Mai	0,47	40,6 cm	52 ¹	0,61	35,7 cm	52 ¹

¹) nur Standorte berücksichtigt, wo es noch Schnee hatte

Tabelle 2: Bestimmtheitsmass (R²-Wert) und residuale Standardabweichung für das lineare Regressionsmodell, welches für die Schneehöhenmessungen an den bewaldeten Standorten bestimmt wurde (Modell 3) resp. für das generelle Regressionsmodell für die Schneehöhenmessungen sowohl an bewaldeten als auch unbewaldeten Standorten (Modell 4).

Datum	Modell 3: Schneehöhe = a*Höhe ü. M. + b*Bedeckungsgrad + c			Modell 4: Schneehöhe = a*Höhe ü. M. + b*I _{Wald} + c*I _{wdichte} + d*I _{Wind} + e		
	R ² -Wert	Res. Std. abweichung	Anzahl Standorte	R ² -Wert	Res. Std. abweichung	Anzahl Standorte
15. Dez.	0,50	10,1 cm	57	0,36	15,4 cm	201
22. Jan.	0,48	14,3 cm	79	0,47	18,4 cm	272
1. März	0,39	45,2 cm	28	0,39	53,1 cm	112
10. Mai	0,12	43,9 cm	28 ¹	0,36	40,9 cm	108 ¹

¹) nur Standorte berücksichtigt, wo es noch Schnee hatte

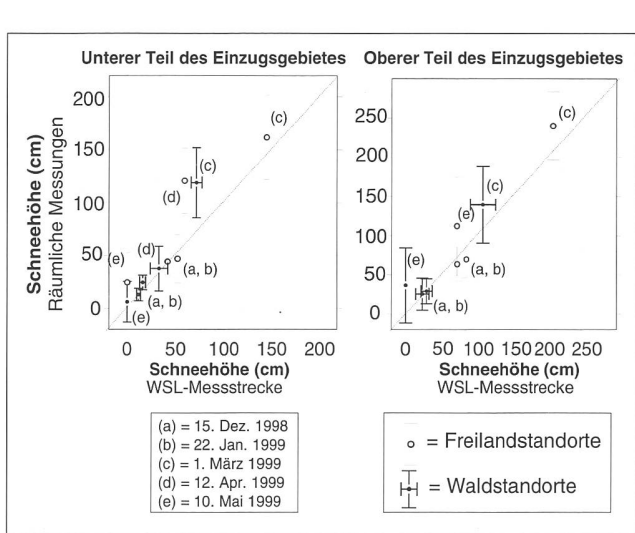


Abbildung 4: Schneehöhen der räumlichen Messkampagnen verglichen mit den Schneehöhen der WSL-Schneemessstrecken. Die Punktsymbole entsprechen dem Mittelwert und die Balken dem Standardfehler der Messungen.

zugsgebiet, dargestellt in *Abbildung 4* durch den Standardfehler, nicht mit einer 30 m langen Messstrecke repräsentiert werden, innerhalb welcher die Schneehöhe viel gleichmässiger ist.

5. Bedeutung der variablen Schneedecke für den Abfluss

Was aber bedeutet diese variable Schneedecke für den Abfluss? Wir sind dieser Frage nachgegangen, indem wir mit einem mathematischen Schneedeckenmodell¹ (JANSSON, 1998) die Schneeschmelze für dreissig Messpunkte der räumlichen Schneemesskampagne simulierten. Das Modell berechnet die Akkumulation, Setzung und Schmelze der Schneedecke als Funktion von stündlich gemessenen Klimavariablen (Lufttemperatur, Niederschlag, Globalstrahlung). Dabei verwendeten wir die Messwerte der Klimastation «Erlenhöhe» (1210 m ü. M.), wobei die Lufttemperatur mit einer Höhenkorrektur von $0,0056 \text{ }^\circ\text{C m}^{-1}$ an die jeweilige Höhenlage der Messpunkte angepasst wurde. Auch die Globalstrahlung wurde der jeweiligen Neigung und Exposition entsprechend korrigiert. Für die Standorte im Wald bzw. im halboffenen Wald wurde eine Interzeptionskapazität (proportional zum

¹ frei erhältlich unter <http://amov.ce.kth.se/coup.htm>

Tabelle 3: Modellparameterwerte für die Simulation der vier WSL-Messstrecken.

Parameter 1)	WSL 1011 (unten, Freiland)	WSL 1031 (oben, Freiland)	WSL 1012 (unten, Wald)	WSL 1032 (oben, Wald)
<i>gemessene Parameter</i>				
Höhe ü. M.	1210 m	1420 m	1185 m	1420 m
Neigung	20%	20%	10%	20%
<i>angepasste Parameter</i>				
Schmelzkoeffizient	$1,6 \text{ kg K}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$1,6 \text{ kg K}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$1,6 \text{ kg K}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	$1,6 \text{ kg K}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$
Lufttemperatur				
Schmelzkoeffizient globale Strahlung	$9,0 \cdot 10^{-7} \text{ Kg J}^{-1}$	$9,0 \cdot 10^{-7} \text{ Kg J}^{-1}$	$3,0 \cdot 10^{-7} \text{ Kg J}^{-1}$	$6,0 \cdot 10^{-7} \text{ Kg J}^{-1}$
Schneesetzungskoeff. wegen Masse	$0,38 \text{ m}^{-1}$	$0,23 \text{ m}^{-1}$	$0,38 \text{ m}^{-1}$	$0,40 \text{ m}^{-1}$
Schneesetzungskoeff. wegen Flüssigwasser	119 Kg m^{-3}	119 Kg m^{-3}	119 Kg m^{-3}	139 Kg m^{-3}
max. Interzeption	–	–	$2,8 \text{ mm m}^{-2}$	$2,8 \text{ mm m}^{-2}$

¹ Für eine detaillierte Erläuterung des Modells sowie der Parameter verweisen wir auf die Modellbeschreibungen in STÄHLI und JANSSON (1998) oder STADLER *et al.* (1997).

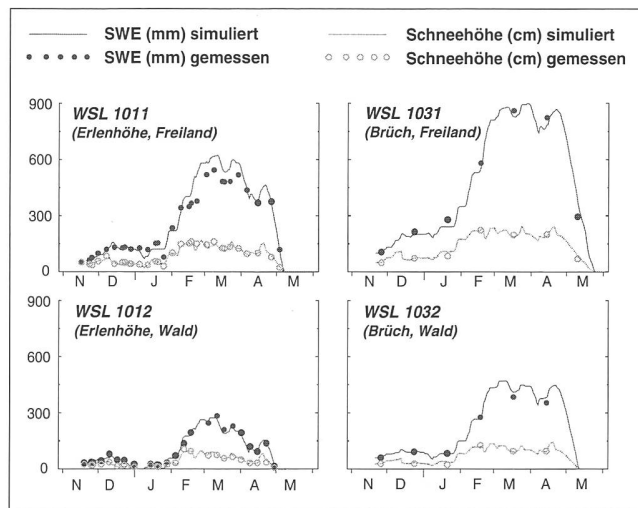


Abbildung 5: Vergleich von simulierter und gemessener Schneehöhe resp. Schneewasseräquivalent (SWE) für die vier WSL-Messstrecken (November 1998 bis Mai 1999).

Bedeckungsgrad) geschätzt und die strahlungsbedingte Schmelzrate reduziert (exponentielle Abnahme mit zunehmendem Bedeckungsgrad). Der Schmelzkoeffizient infolge positiver Lufttemperatur wurde überall gleich gross angenommen. Das Schmelzwasser aus der Schneedecke fliesst nicht unmittelbar ab, sondern wird im Boden kurzzeitig zwischengespeichert. Wie FEYEN (1998) gezeigt hat, geschehen aber die Wasserabflussprozesse in diesem Einzugsgebiet sehr rasch, nicht zuletzt wegen dem oberflächennahen Grundwasserspiegel. Mit der hier verwendeten Bodenparameterisierung von STADLER *et al.* (1997) konnte diese kurze Zwischenspeicherung realistisch simuliert werden.

Bevor wir das Modell auf das ganze Gebiet anwendeten, testeten wir es anhand der vier WSL-Messstrecken (*Abbildung 5*). Der Test ergab eine gute Übereinstimmung mit den gemessenen Schneehöhen und SWE. Die dabei verwendeten wichtigsten Parameterwerte sind in *Tabelle 3* dargestellt. Das Modell war in der Lage, die durch Höhenlage und Vegetation bedingten Unterschiede während der Akkumulations- und Schmelzphase erfolgreich wiederzugeben.

Danach simulierten wir für die Periode der Schneeschmelze (März bis Mai) dreissig zufällig ausgewählte Freiland- und Waldstandorte, welche über das ganze Einzugsgebiet gleichmässig verteilt waren. Als Anfangsschneehöhen und -SWE setzten wir die in der Messkampagne vom 1. März ermittelten Messwerte ein. Als einzige Parameterwerte passten wir die Höhe ü. M., die Hangneigung, die Exposition sowie den durch die Strahlung bedingten Schmelzkoeffizienten (nur für Waldstandorte) den entsprechenden Standorten an. Das Ergebnis der Abflusssimulation ist in *Abbildung 6* dargestellt. Im Grossen und Ganzen kann eine befriedigende Übereinstimmung des Mittelwertes aus den dreissig Simulationen mit dem gemessenen Abfluss im Erlenbach festgestellt werden. Dieser Eindruck wird noch verstärkt, wenn man die enorme Variabilität betrachtet, welche nur schon zwischen den vier WSL-Schneemessstellen besteht (*Abbildung 6b*). Ein ähnlich

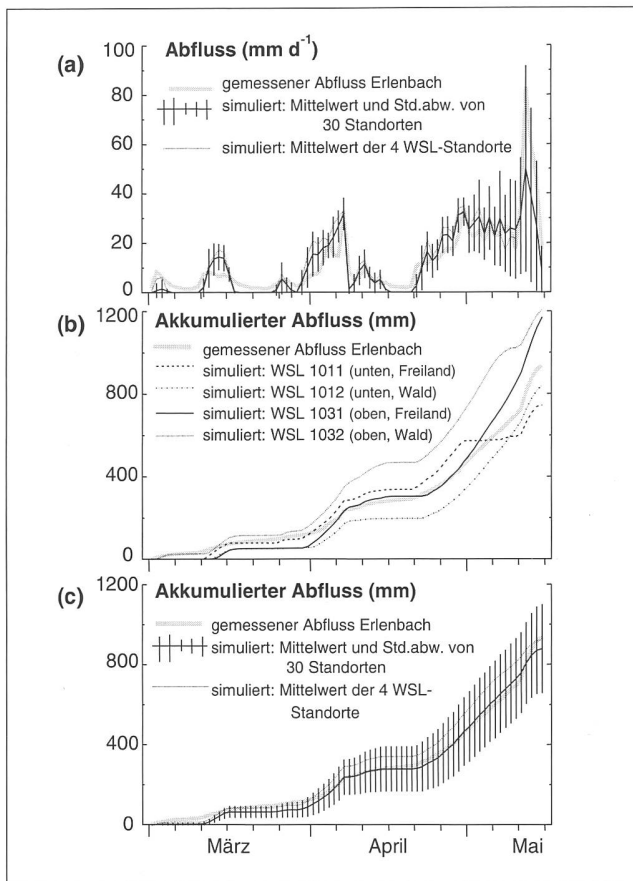


Abbildung 6: Vergleich von gemessenem und simuliertem Schneeschmelzabfluss (1. März bis 15. Mai): (a) tägliche Abflussrate und (b), (c) akkumulierter Abfluss für den Mittelwert und die Standardabweichung von 30 Simulationen zufällig ausgewählter Standorte verteilt über das ganze Einzugsgebiet, für die vier WSL-Schneemessstandorte, sowie deren gewichteter Mittelwert.

deutliches Bild von der grossen Variation in der Schneeschmelze im Gebiet gibt der Standardfehler der dreissig Simulationen (Abbildungen 6a und 6c). Wenn man nur den Mittelwert aus den vier Simulationen der WSL-Standorte nimmt, erreicht man zwar bereits eine recht gute Annäherung an den gemessenen Abfluss, überschätzt jedoch den Abfluss zwischenzeitlich (z. B. anfangs April). Unsere Schlussfolgerung lautet demzufolge, dass die Berücksichtigung der räumlichen Schneedeckenvariabilität im Einzugsgebiet Erlenbach eindeutig eine zuverlässigere Abflusssimulation ergibt, als wenn man das Modell nur für einen oder ein paar wenige repräsentative Standorte laufen lässt.

6. Diskussion und Ausblick

Für hydrologische und meteorologische Problemstellungen sind Kenntnisse über die räumliche und zeitliche Variabilität der Schneedecke äusserst wichtig. Sie sind die Grundlage zur Entwicklung, Verbesserung und Überprüfung mathematischer Vorhersagemodelle. Zahlreiche Studien mit räumlichen Schneehöhen- und SWE-Messungen haben gezeigt, dass für unterschiedliche Landschaftstypen die bestimmenden Einflussfaktoren verschieden sein können (z. B. LAPEN und MARTZ, 1996; KÖNIG und STURM, 1998; YANG und WOO, 1999). Hier im voralpinen Einzugsgebiet Erlenbach kann bereits mit dem Höheneinfluss ein grosser Teil der Schneehöhenvariabilität erklärt werden, wie die linearen Regressionen gezeigt haben. Das hat damit zu tun, dass die Nullgradgrenze im Winter häufig gerade in dieser Höhenzone (1000 bis 1500 m ü. M.) schwankt, was sowohl beim Niederschlag (Schnee/Regen) als auch bei der Schmelze zu grossen lokalen Unterschieden auf

kurze Distanz führt. Dass als zweiter wichtiger Einflussfaktor die Vegetation (Bestandesdichte) das Schneeablagerungsmuster deutlich beeinflusst, geht aus den Messungen ebenso klar hervor. Es scheint jedoch, dass das hier gewählte Mass zur Differenzierung der Vegetationsdichte (Bedeckungsgrad) dem Einfluss des Waldes nur bedingt gerecht wird. Hier drängt es sich auf, bessere oder zusätzliche Bestandeseigenschaften in ein Regressionsmodell einzubeziehen, damit ein erfolgreiches Instrument zur Vorhersage räumlicher Schneedeckenverteilung geschaffen werden kann. Möglicherweise liefern uns Luftbilder solche (Zusatz-)Informationen.

Die Frage, wie gut sich die Gebietschneedecke im Mittel durch eine oder einzelne wenige Messstationen repräsentieren lassen, ist bedeutungsvoll, weil sich andere hydrologische Studien auf solche langzeitlichen, kontinuierlichen Messreihen stützen wollen, wie sie beispielsweise hier im Alptal vorhanden sind. Unsere Messungen haben einerseits gezeigt, dass die vier WSL-Schneemessstrecken die mittlere Schneehöhe in den entsprechenden Teilgebieten (obere/untere Gebietshälfte, Wald/Freiland) relativ gut repräsentieren. Während der Schmelzperiode am Ende des Winters wurde allerdings eine schlechtere Repräsentativität der WSL-Schneemessstrecken, d.h. ein zu rasches Abschmelzen an den WSL-Standorten im Vergleich zum Gebietsdurchschnitt festgestellt. Dies erklärt auch, weshalb der für die vier Standorte simulierte Abfluss (entsprechend den jeweiligen Gebietsanteilen gemittelt) den Gebietsabfluss nicht optimal wiedergibt (Abbildung 6c). Eine bessere Simulation des Gebietsabflusses während der Schneeschmelze wird erreicht, wenn man der Schneedeckenvariabilität besser Rechnung trägt, indem man eine grössere Anzahl gleichmässig über das Gebiet verteilter Standorte simuliert und daraus den Abfluss mittelt. Eine verwandte Studie von LUCE *et al.* (1998) ist zu einer sehr ähnlichen Schlussfolgerung gekommen.

Abschliessend noch ein Ausblick auf weiterführende Schritte: Unser Ziel ist es, ein Regressionsmodell zu entwickeln, das sowohl die räumliche Verteilung als auch die zeitliche Entwicklung der Schneedecke in diesem Einzugsgebiet über den ganzen Winter beschreiben kann. Dafür müssen zusätzlich zur Topographie und zur Vegetation auch meteorologische Messwerte einbezogen werden, welche die zeitliche Entwicklung der Schneeakkumulation bzw. -schmelze hauptsächlich bestimmen. Im Weiteren muss auch gezeigt werden, wie gut dieses Modell für andere Winter mit anderem Charakter anwendbar ist. Entsprechende Validierungsmesskampagnen sind im Winter 1999/2000 durchgeführt worden. Ferner werden wir versuchen, aus Luft- und Satellitenbildern zusätzliche Informationen bezüglich Vegetationsdichte zu gewinnen, die unsere Beschreibung der Schneehöhenverteilung im Wald verbessern kann.

Zusammenfassung

Während des Winters 1998/99 wurden im voralpinen Einzugsgebiet Erlenbach (Alptal/SZ) räumlich hochaufgelöste Schneemessungen durchgeführt, um die Abhängigkeit der Schneehöhe und des Schneewasseräquivalents von Topographie und Vegetation zu untersuchen. Die Höhenlage erwies sich dabei als wichtigster topographischer Parameter, während die Hangneigung und die Exposition in diesem Einzugsgebiet eine untergeordnete Rolle spielten. Der Einfluss der Vegetation auf die Schneeablagerung und -schmelze zeigte sich deutlich, konnte aber mit dem gewählten Vegetationsdichtemass (Bedeckungsgrad der Baumkrone) nur zu Beginn des Winters (Schneeablagerung) zufriedenstellend erklärt werden.

Die räumlichen Messungen zeigten auch, dass die seit 1978 betriebenen Schneemessstrecken der WSL das Gebiet recht gut

charakterisieren, ausser am Ende des Winters, wo die Ausaperung im Gebiet zu einer heterogenen Verteilung des Schnees führt. Die Bedeutung der räumlichen Verteilung der Schneedecke für den Schneeschmelzabfluss wurde mit einem mathematischen Schneedeckenmodell aufgezeigt. Für dreissig zufällig gewählte Standorte des Einzugsgebiets wurde der Schneeschmelzabfluss vom 1. März bis zum 31. Mai simuliert. Während die Variabilität des Abflusses zwischen den einzelnen Standorten beträchtlich war, stimmte der gemittelte Abfluss dieser dreissig Simulationen gut mit dem im Erlenbach gemessenen Abfluss überein.

Résumé

La répartition de la couverture de neige dans un bassin versant préalpin et son importance sur l'écoulement de l'eau provenant de la fonte des neiges

Au cours de l'hiver 1998/99, on a effectué de nombreuses mesures de la couverture de neige dans le bassin versant préalpin d'Erlenbach (Alptal/SZ), afin d'étudier dans quelle mesure l'épaisseur de neige et son équivalent en eau dépendent de la topographie et de la végétation. L'altitude s'est révélée être le principal paramètre topographique, tandis que la pente et l'exposition du terrain jouaient un rôle secondaire. L'influence de la végétation sur le dépôt de la neige et la fonte a été clairement identifiée. Néanmoins, la mesure de la densité de la végétation qui a été choisie (degré de recouvrement des houppiers) n'a pas permis d'expliquer cette relation de manière satisfaisante, sauf au début de l'hiver.

Les mesures ont aussi montré que les réseaux de placettes d'échantillonnage de neige, observés par le WSL depuis 1978, caractérisent bien le bassin versant, hormis à la fin de l'hiver lorsque la fonte des neiges entraîne une répartition hétérogène de la couverture de neige. Un modèle numérique a permis de mettre en évidence l'importance de cette répartition pour l'écoulement de l'eau provenant de la fonte des neiges. L'écoulement a été simulé sur la période portant du 1er mars au 31 mai pour 30 emplacements choisis au hasard dans le bassin. Alors que l'écoulement simulé varie considérablement entre les différents emplacements, le débit moyen correspond bien à celui mesuré dans le ruisseau Erlenbach.

Summary

The Snow-Cover Distribution in a Sub-Alpine Catchment and its Significance for the Snow-Melt Runoff

In order to determine the influence of the topography and the vegetation on snow depth and snow water equivalent (SWE) in a Swiss sub-alpine catchment, a number of intense spatial snow measurement campaigns were conducted during the «winter of records» 1998/99. The altitude showed to be the most important topographic parameter, whereas terrain slope and aspect were of minor importance for that specific area. The effect of the forest canopy on the snow accumulation and melt was clearly demonstrated, however, the selected measure to quantify the vegetation density (fraction of canopy cover) was able to explain the snow depth variability only at the beginning of the winter.

The spatial measurements showed that the long-term snow course measurements by the Swiss Federal Research Institute WSL (conducted since 1978) fairly well represent the total catchment, except towards the end of the winter when the snow-cover becomes highly patchy. The importance of taking the spatial snow-cover variability into account when simulating snow-melt runoff was tested with a physically based

numerical snow model. The snow-melt runoff was simulated for 30 randomly selected locations of the catchment. While the variability of a simulated total runoff between these locations was considerable, their weighted mean corresponded nicely to the measured discharge in the Erlenbach-brook.

Literaturverzeichnis

- FEYEN, H., 1998: Identification of runoff processes in catchments with small scale topography. ETH Diss No. 12868.
- JANSSON, P.-E., 1998: Simulation model for soil water and heat conditions. Description of the soil model. SLU, Department of Soil Sciences. Uppsala, Sweden. 82 S.
- KELLER, H.M.; STROBEL, T.; FORSTER, F., 1984: Die räumliche und zeitliche Variabilität der Schneedecke in einem schweizerischen Voralpentale. Eidg. Anstalt für das forstliche Versuchswesen. Birmensdorf. Interner Hydrologie Bericht, 520/1. 98 S.
- KÖNIG, M.; STURM, M., 1998: Mapping snow distribution in the Alaskan Arctic using aerial photography and topographic relationships. *Water Resources Research*, 34 (12): 3471–3484.
- LAPEN, D.R.; MARTZ, L.W., 1996: An investigation of the spatial association between snow depth and topography in a Prairie agricultural landscape using digital terrain analysis. *Journal of Hydrology*, 184: 277–298.
- LUCE, C.H.; TARBOTON, D.G.; COOLEY, K.R., 1998: The influence of the spatial distribution of snow on basin-averaged snowmelt. *Hydrological Processes*, 12: 1671–1683.
- STADLER, D.; FLÜHLER, H.; JANSSON, P.-E., 1997: Modelling vertical and lateral water flow in frozen and sloped forest plots. *Cold Regions Science and Technology*, 26: 181–194.
- STÄHLI, M.; JANSSON, P.-E., 1998: Test of two SVAT snow submodels during different winter conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 92: 29–41.
- YANG, D.; WOO, M.-K., 1999: Representativeness of local snow data for large scale hydrologic investigations. *Hydrological Processes*, 13: 1977–1988.

Dank

Lada Randazzo, Dominik Bänninger, Christian Holzner, Markus Reinhard, Kuno Strassmann, Gunnar Laudel für die Mithilfe bei den Schneemesskampagnen, David Gustafsson (SLU Uppsala) für die Modifizierung des Modellkodes sowie der WSL (Forstliche Hydrologie) für das Zur-Verfügung-Stellen der Referenzschneedaten. Finanzielle Unterstützung durch die ETH Zürich.

Abbildungen gedruckt mit Unterstützung der Eidgenössischen Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (WSL), 8903 Birmensdorf.

Verfasser:

DR. MANFRED STÄHLI und Dr. ANDREAS PAPRITZ, ETH Zürich, Institut für terrestrische Ökologie, Grabenstr. 3, 8952 Schlieren. E-Mail: staehli@ito.umnw.ethz.ch, papritz@ito.umnw.ethz.ch
PETER WALDNER, dipl. Umwelt-Natw. ETH, und FELIX FORSTER, dipl. Bau-Ing. ETH., Eidg. Forschungsanstalt WSL, Abt. Wasser-, Erd- und Felsbewegungen, 8903 Birmensdorf. E-Mail: peter.waldner@wsl.ch, felix.forster@wsl.ch