

# SCHRIFTENREIHE DES DEUTSCHEN VERBANDES FÜR WASSERWIRTSCHAFT UND KULTURBAU

Heft 46

## Analyse und Berechnung oberirdischer Abflüsse

I

Beitrag zur statistischen Analyse von Niedrigwasserabflüssen

II

Tabellen des Kolmogorov-Smirnow-Anpassungstests für  
vollständig und unvollständig spezifizierte Nullhypothesen

III

Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke

IV

Kurzfristige Hochwasservorhersage

VERLAG PAUL PAREY

T E I L    I I I

DIE BERECHNUNG DES ABFLUSSES  
AUS EINER SCHNEEDECKE

Dr.-Ing. D. Knauf, Ingenieur-Büro F. Fischer, Solingen

### 3.1 EINLEITUNG UND AUFGABENSTELLUNG

Bei der Prognose von Hochwasserereignissen sowie bei der Ausarbeitung von Bemessungsregeln für Wasserbaumaßnahmen gewinnt in zunehmendem Maße der Schnee als hydrologische Einflußgröße an Bedeutung. In dem vorliegenden Beitrag wird ein als Baustein für hydrologische Niederschlag-Abfluß-Modelle verwendbares Verfahren zur rechnerischen Erfassung von Abflußbildungsvorgängen in einer Schneedecke beschrieben.

Das Problem besteht darin, die Schneedeckenabflüsse einerseits in Abhängigkeit von Parametern der Witterung (Temperatur, Strahlung, Niederschlag), andererseits in Abhängigkeit von den zeit- und ortsveränderlichen Gebietseinflüssen (Oberflächenbeschaffenheit, Bodenfeuchtezustand, Schneebedeckungsgrad, Höhenlage, Exposition zu Strahlung und Wind usw.) zu bestimmen. Die Mannigfaltigkeit der möglichen Einflußfaktoren schließt eine umfassende rein analytische Vorgehensweise von vornherein aus. Ein Ausweg aus dieser Situation ist durch die in diesem Beitrag beschriebene schneehydrologische Modellvorstellung gegeben. Die wichtigsten physikalischen Vorgänge und Einflußgrößen werden mit einem vereinfachten Modellkonzept beschrieben und damit einer rechnerischen Behandlung zugänglich gemacht.

Die Schneedeckenabflußberechnung bezieht sich auf abgegrenzte Teilgebiete, bei denen eine Mittlung der meteorologischen und gebietsspezifischen Parameter zugelassen werden kann. Feinheiten der örtlichen Differenzierung werden zugunsten einer integralen Modellvorstellung nicht berücksichtigt. Berechnet wird infolgedessen der Schneedeckenabfluß, der als örtlich gemittelte Schneedeckenabflußspende für das gesamte Teileinzugsgebiet maßgebend ist. Die Schneedeckenabflußberechnung umfaßt nicht die hydrologischen Prozesse, die erst anschließend im Einzugsgebiet ablaufen, d.h. es werden noch

keine Retentionswirkungen des Einzugsgebietes erfaßt. Die hydrologischen Teilprozesse der Abflaufaufteilung und Abflaufverzögerung im Einzugsgebiet sind zusätzlich mit Hilfe bekannter Verfahren der Ingenieurhydrologie zu beschreiben. Die Aufgabe des sog. Schmelzsetzungsverfahrens besteht in der Umsetzung der potentiellen Schneeschmelzintensitäten, die aus dem Wärmehaushalt berechnet werden können, in die eigentlich gesuchte Ganglinie des Schneedeckenabflusses.

Wegen der in jedem Einzugsgebiet naturgemäß vorhandenen örtlichen Differenzierung der Einflußgrößen kann es sich bei der Anwendung des Schmelzsetzungsverfahrens nur um eine Abschätzung des Schneedeckenabflusses handeln. Die notwendigen Vereinfachungen sind jedoch nicht durch das Verfahren bzw. durch das Modellkonzept bedingt, sondern in erster Linie durch den Umfang der zur Verfügung stehenden Meßdaten. Der erforderliche Aufwand zur Erfassung und Verarbeitung relevanter Meßdaten kann je nach wasserwirtschaftlicher Fragestellung sehr unterschiedlich sein. Allgemeingültige Angaben, wieviel Meßstellen pro Flächeneinheit z.B. erstrebenswert wären, können nicht gegeben werden, da die erforderliche Anzahl eine Funktion der Fragestellung, der vorhandenen Höhenabstufung des Einzugsgebietes sowie der lokalklimatischen Gegebenheiten ist. Zur Beantwortung ingenieurhydrologischer Fragestellungen wird das Schmelzsetzungsverfahren als "Snow-Compaction-Procedure" in den USA auch auf Einzugsgebiete von mehr als 100 km<sup>2</sup> Größe angewendet, wobei lediglich 3 Meßstationen ausgewertet werden (s. Beispiel III in [2]).

Die früheren Versuche, den Schneeschmelzprozeß allein durch empirische Schneeschmelzformeln zu beschreiben, konnten bisher nicht zufriedenstellen, da eine wichtige Eigenschaft der Schneedecke sowie auch des Einzugsgebietes mit den Schneeschmelzformeln nicht erfaßt werden kann: das zeitlich veränderliche Rückhaltevermögen. Besonders anschauliche Bei-

Die tägliche potentielle Schneeschmelzrate  $M_d$  ergibt sich mit den Werten aus Tafel 1 zu

$$M_d = a_d \cdot \bar{t}_L \quad \text{in mm/d} \quad (3)$$

mit  $a_d$  = Gradtag-Faktor in mm/d·K

$\bar{t}_L$  = Tagesmittel der positiven Lufttemperatur  
(= Gradtage in °C)

### 3.3.2 Temperatur-Faktor Verfahren

Eine Näherungsformel für die Berechnung der potentiellen Schneeschmelzintensität  $i_p$  sollte im einfachsten Fall, d.h. wenn keine weiteren Meßwerte außer der Lufttemperatur  $t_L$  vorliegen, folgenden Aufbau haben:

$$i_p = a_h \cdot t_L + i_{S,B} \quad \text{in mm/h} \quad (4)$$

Die Konstante  $i_{S,B}$  berücksichtigt u.a. die  $t_L$  - unabhängigen Strahlungseinflüsse,  $a_h$  ist der um die Strahlungswirkung und um den Bodenwärmestrom reduzierte Abtaukoeffizient. Für eine Optimierungsprozedur im Rahmen hydrologischer Abflußmodelle können die Wertebereiche nach [12] wie folgt eingegrenzt werden:

$$a_h = 0,1 \text{ bis } 0,5 \quad \text{mm/h} \cdot \text{K}$$

$$i_{S,B} = 0,1 \text{ bis } 1,0 \quad \text{mm/h}$$

### 3.3.3 Vereinfachte Modellierung des Wärmehaushaltes (Temperatur-Wind-Niederschlag)

Liegen zusätzliche Niederschlagsmessungen und Daten der Windgeschwindigkeit  $v_w$  vor, so kann die potentielle Schneeschmelz-

intensität  $i_p$  näherungsweise durch

$$i_p = \frac{1}{r_s} (a_o + a_1 \cdot v_w) t_L + 0,0125 i_N \cdot t_N + i_{S,B} \quad (5)$$

wiedergegeben werden. Die Parameter  $a_o$  und  $a_1$  sind die sog. Wärmeübergangskoeffizienten, der Ausdruck  $0,0125 \cdot i_N \cdot t_N$  gibt die Wärmezufuhr aus Regen wieder, wobei  $i_N$  die Regenintensität in mm/h und  $t_N$  die Temperatur des Regens in °C bedeuten.

Die Wertebereiche der Wärmeübergangskoeffizienten können für hydrologische Berechnungen wie folgt eingegrenzt werden:

$$a_o = 1 \text{ bis } 7 \quad \text{Wh/h} \cdot \text{K}$$

$$a_1 = 0,8 \text{ bis } 2,5 \quad \text{Wh/h} \cdot \text{K} \quad \text{bei } v_w = 1 \text{ m/s}$$

Auch hier sind die Parameter  $a_o$ ,  $a_1$  und  $i_{S,B}$  nicht als physikalische Konstanten zu betrachten, sondern als Eichfaktoren für das betrachtete Einzugsgebiet. Durch die Aufgliederung der Eingangsdaten wird nicht nur eine bessere Anpassung an die jeweilige meteorologische Situation erreicht, auch die Übertragbarkeit der ermittelten Eichparameter wird verbessert.

### 3.3.4 Erweiterte Modellierung des Wärmehaushaltes (Nettostrahlung - Temperatur - Wind - Dampfdruck - Regen)

$$i_p = \frac{1}{r_s} \left\{ \epsilon \cdot Q_s + (a_o + a_1 \cdot v_w) [(t_L - t_s) + \beta(e_L - e_s)] + i_N \cdot t_N \right\} + i_B \quad (6)$$

In Gleichung (6) bedeuten:

$$r_s = \text{Schmelzwärme von Schnee in Wh/kg}$$

$$\epsilon = \text{Absorptionskoeffizient}$$

$$Q_s = \text{Nettostrahlung in Wh/m}^2\text{h}$$

$\beta$  = Kehrwert der Psychrometerkonstanten über  
Eis bzw. Schnee = 1,76 K/mbar

$e_L, e_S$  = Dampfdruck der Luft bzw. der Schneedecke  
in mbar ( $e_S = 3,44$  mbar bei  $0^\circ\text{C}$ )

Der Absorptionskoeffizient  $\epsilon$ , die Wärmeübergangskoeffizienten  $a_0$  und  $a_1$  sowie der Parameter des Bodenwärmestroms  $i_B$  sind als freie Parameter durch Optimierung zu bestimmen. Die Parameterbereiche können wie folgt eingegrenzt werden [12]:

$\epsilon$  = 0,02 bis 0,6

$a_0$  = 0,5 bis 3,5 Wh/h·K

$a_1$  = 0,8 bis 2,5 Wh/h·K bei  $v_w = 1$  m/s

$i_B$  = 0,01 bis 0,05 mm/h

Mit den hier beschriebenen Näherungsformeln kann der Schneeschmelzprozeß mit einer mehr oder weniger vollständigen Modellierung des Wärmehaushaltes berechnet werden. Bei ingenieurhydrologischen Fragestellungen ist oft eine Anwendung der vereinfachten Gleichungen durchaus ausreichend.

Im Hinblick auf die Berechnung von Abflußwellen ist der Erfassung des Wasserhaushaltes von Schneedecke und Boden oft mehr Bedeutung beizumessen, als einer möglichst differenzier- ten Erfassung der meteorologischen Schneeschmelzfaktoren, die lediglich das Ausmaß der Schneeumwandlung in den flüssigen Zustand beschreiben. Als Belastungsgröße für den Abflußprozeß im Einzugsgebiet ist jedoch nicht die potentielle Schneeschmelzintensität  $i_p$  sondern der Schneedeckenabfluß  $W_{ab}$  maßgebend, der aus dem Wasserhaushalt der Schneedecke resultiert.

### 3.4 BERECHNUNG DES WASSERHAUSHALTES EINER SCHNEEDECKE

Bei geringen Schneedichten kommen die potentiellen Schneeschmelzraten nicht direkt zum Abfluß. Das freie Wasser aus dem Schmelzvorgang wird zunächst in der Schneedecke gespeichert und verändert dabei die Struktur der Schneedecke. Dieser Vorgang äußert sich in einer Setzung der Schneedecke als Folge einer Metamorphose der Schneekristalle. Freies Wasser wird in der Schneedecke solange zurückgehalten, bis ein Grenzzustand der Lagerungsdichte erreicht ist. Nach Überschreiten des Grenzwertes setzt eine Dränwirkung in der Schneedecke ein. Weiteres freies Wasser wird dann nicht mehr zurückgehalten, sondern an die Bodenoberfläche abgegeben.

Bei einem plötzlichen Warmlufteinbruch werden infolge der hohen Schneeschmelzintensitäten große Mengen der vorher in fester Form gespeicherten Wassermengen durch den Tautvorgang freigesetzt. Ist die Schneeschmelze mit Regenfällen verbunden, so addieren sich die Schmelzwassermengen mit den Regelmengen zu den sog. Taufluten.

Solche aus Schneeschmelze und Regen kombinierten Ereignisse haben zu den höchsten Hochwassern geführt. Für die Modellierung derartiger Regen - auf - Schnee Ereignisse ist das im folgenden beschriebene Schmelzsetzungsverfahren besonders geeignet.

#### 3.4.1 Das Schmelzsetzungsverfahren nach F. Bertle

Das von BERTLE in [2] beschriebene Rechenverfahren basiert auf Laborversuchen, die 1951 vom US-Bureau of Reclamation durchgeführt wurden. Hierbei wurde ein empirischer Zusammenhang zwischen der anfänglichen Schneehöhe und der Menge des



zugeführten freien Wassers gefunden, der durch folgende lineare Näherungsformel ausgedrückt werden kann:

$$P_H = 147,4 - 0,474 \cdot P_W \quad (7)$$

$P_H$  = Schneehöhe in Prozent der Ausgangshöhe

$P_W$  = akkumuliertes Wasseräquivalent in Prozent  
vom anfänglichen Wasseräquivalent

Mit der empirischen Beziehung (7) und der vorher berechneten potentiellen Schneeschmelzintensität kann eine Wassergehalt-Schneehöhen Berechnung durchgeführt werden, mit der Zeitpunkt und Menge des Schneedeckenabflusses bestimmt werden. Von besonderer Bedeutung ist hierbei, daß die Zufuhr an freiem Wasser entweder aus dem Schneeschmelzvorgang oder aber direkt aus flüssigem Niederschlag stammen kann. Der für praktische Anwendungen überaus wichtige Fall der kombinierten Regen-Schneeschmelz-Ereignisse kann daher ebenfalls mit Hilfe des Schmelzsetzungs-Verfahrens erfaßt werden.

In Gleichung (7) kommt zum Ausdruck, daß die Schneedecken-Setzung umso größer ist, je größer die Zufuhr von flüssigem Wasser ist. Dagegen ist sie - bei gleicher Wasserzufuhr - umso kleiner, je größer das anfängliche Wasseräquivalent des Trockenschnees bzw. der Eisgehalt der Schneedecke ist. Die Schneehöhe wird etwa auf die Hälfte reduziert, wenn die Wasserzufuhr gerade so groß wird wie das vor der Wasserzugabe vorhandene Wasseräquivalent. Von Bedeutung ist hierbei, daß die Setzung allein auf die Wirkung des freien Wassers zurückzuführen ist. Dieser Vorgang ist nicht mit der Reduktion der Schneehöhe durch den Schmelzvorgang zu verwechseln.

Um eine Aussage über den Wasserhaushalt einer Schneedecke machen zu können, müssen beide Vorgänge beachtet werden: Die Schneehöhenänderung infolge Schneeschmelze und die Höhenänderung infolge Setzung.

Die Entwicklung einer Schneedecke gliedert sich in drei Phasen (s. Bild 3):

1. Akkumulieren ohne Schmelzvorgang und Regen
2. Umwandlung durch Schmelzvorgänge oder Regeneinwirkung ohne Schneedeckenabfluß, die kritische Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$  ist noch nicht erreicht
3. Abbau der Schneedecke durch Schneedeckenabfluß nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte (Ablation)

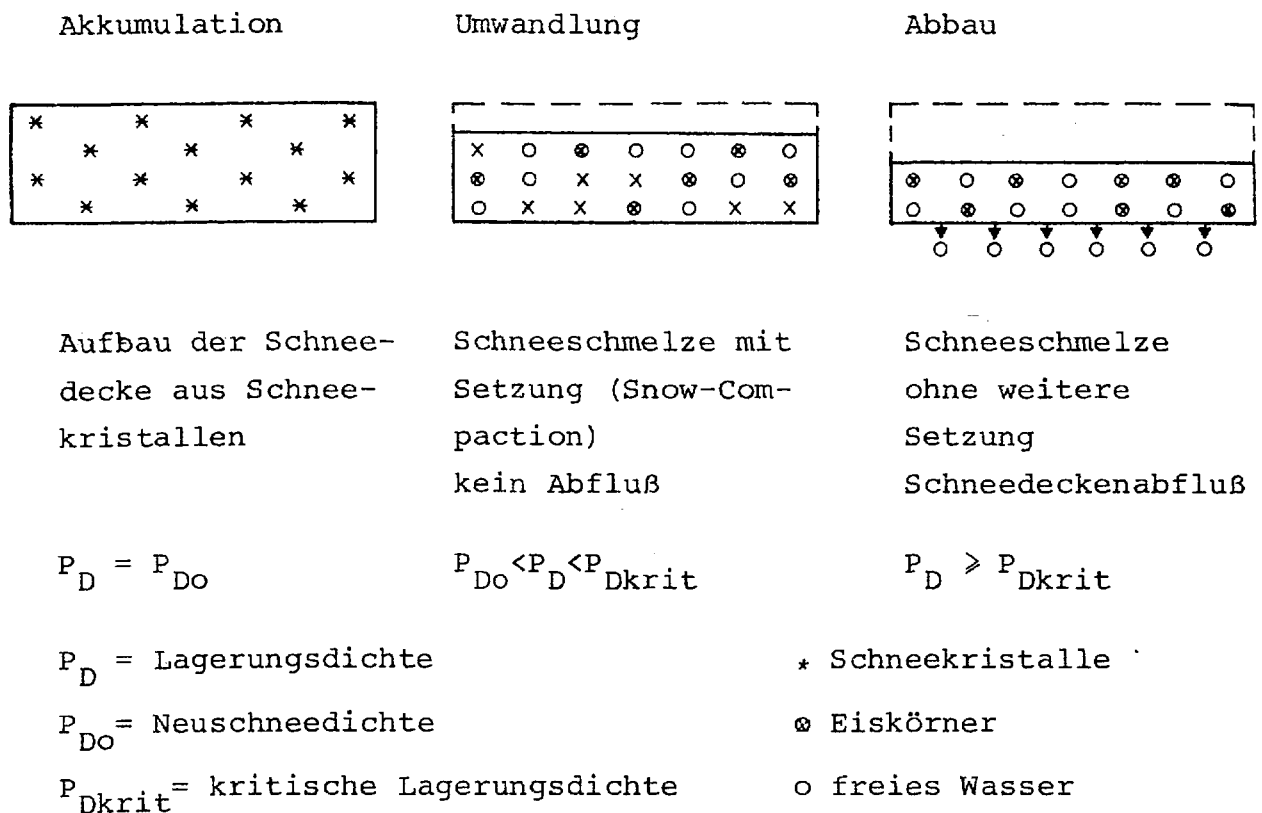


Bild 3: Metamorphosezustände einer Schneedecke

Man kann sich feuchten Schnee als wassergefüllten Eis-Schwamm vorstellen. Die Schneeschmelze führt zum Abbau des Eisskeletts, so daß bei Überschreiten der Rückhaltefähigkeit das gespeicherte freie Wasser plötzlich freigesetzt wird. Eine Schneeschicht, die einmal von Sickerwasser durchlaufen worden ist, setzt weiterem Durchdringen von Wasser kaum mehr Widerstand entgegen. Diese Erscheinung wird auch im neueren Schrifttum allgemein bestätigt. Der für den Schneedeckenabfluß kritische Wert der Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$  liegt zwischen 40 und 45 % [2, 10, 14]. Ab diesem Schwellenbereich wird auch ohne Regeneinwirkung die Retentionskapazität einer natürlich entwickelten schmelzenden Schneedecke sprunghaft herabgesetzt, es ist eine ruckhafte Wassserabgabe aus der Schneedecke zu beobachten [10].

Der kritische Wert  $P_{Dkrit}$  ist seiner Natur nach ein Schwellenwert für die Strukturentwicklung einer Schneedecke. Er ist kein Stoffwert im Sinne der Schneedichte-Definition. Auf diesen qualitativen Unterschied sei hier besonders hingewiesen, da in der Natur durchaus höhere Lagerungsdichten durch fortschreitende Metamorphose (Sinterung, mechanische Verfestigung) vorkommen.

Nach Erreichen des kritischen Lagerungszustandes findet keine weitere Setzung der Schneedecke durch die Wirkung des freien Wassers statt, da das freie Wasser abfließen kann [2].

Zum besseren Verständnis der nachfolgenden Bilanzierung des Wasserhaushaltes einer Schneedecke sind in Bild 4 die unterschiedlichen Bilanzierungsstufen für ein Beispiel schematisch dargestellt.

## ERLÄUTERUNGEN ZU BILD 4

Bild 4 a)

Die Ausgangslagerungsdichte des noch trockenen Schnees sei  $P_{Do} = 10 \%$  bei einer Schneehöhe von  $H = 100$  cm. Die Schneesäule hat ein Wasseräquivalent von  $W = 100$  mm. Das akkumulierte Wasseräquivalent ist gleich dem Eisgehalt.

$$W = W_{akk} = W_t = 100 \text{ mm}$$

Der Feuchtegehalt  $W_f$  ist daher Null.

Bild 4 b)

Durch Wärmeeinwirkung hat sich die Schneehöhe um 20 cm verringert, was einer potentiellen Schneeschmelzrate von  $M_p = 20$  mm entspricht. Zusätzlich zur potentiellen Schneeschmelzrate erhöht sich die freie Wassermenge durch 10 mm Regen. Die ursprüngliche Schneehöhe ist um den Betrag der Schneehöhenänderung durch Schneeschmelze, das Ausgangsäquivalent um die potentielle Schneeschmelzrate zu reduzieren, bevor die Schneedeckensetzung mit Gleichung (7) berechnet wird. Nach der Schneedeckensetzung durch die Wirkung des freien Wassers verbleibt eine Schneehöhe von 65,8 cm. Auf diese aktuelle Schneehöhe nach dem Setzungsvorgang ist die neue Lagerungsdichte  $P_D$  der Schneedecke zu beziehen. Die auf das Ausgangsäquivalent  $W_t$  bezogene Lagerungsdichte des Trockenschneeanteiles hat sich durch den Setzungsvorgang auf  $P_t = 12,16 \%$  vergrößert.

Bild 4 c)

Die durch die potentielle Schneeschmelzrate in Bild 4 c) verursachte Schneehöhenänderung errechnet sich aus der Lagerungsdichte des Trockenschnees zu  $\Delta H = M_p / P_t = 16,7 / 0,1216 = 137$  mm. Durch die gleichzeitige Erhöhung des Feuchtegehaltes  $W_f$  durch den Regen beträgt das akkumulierte Wasseräquivalent nunmehr  $W_{akk} = 120$  mm. Das Ausgangswasseräquivalent ist um die

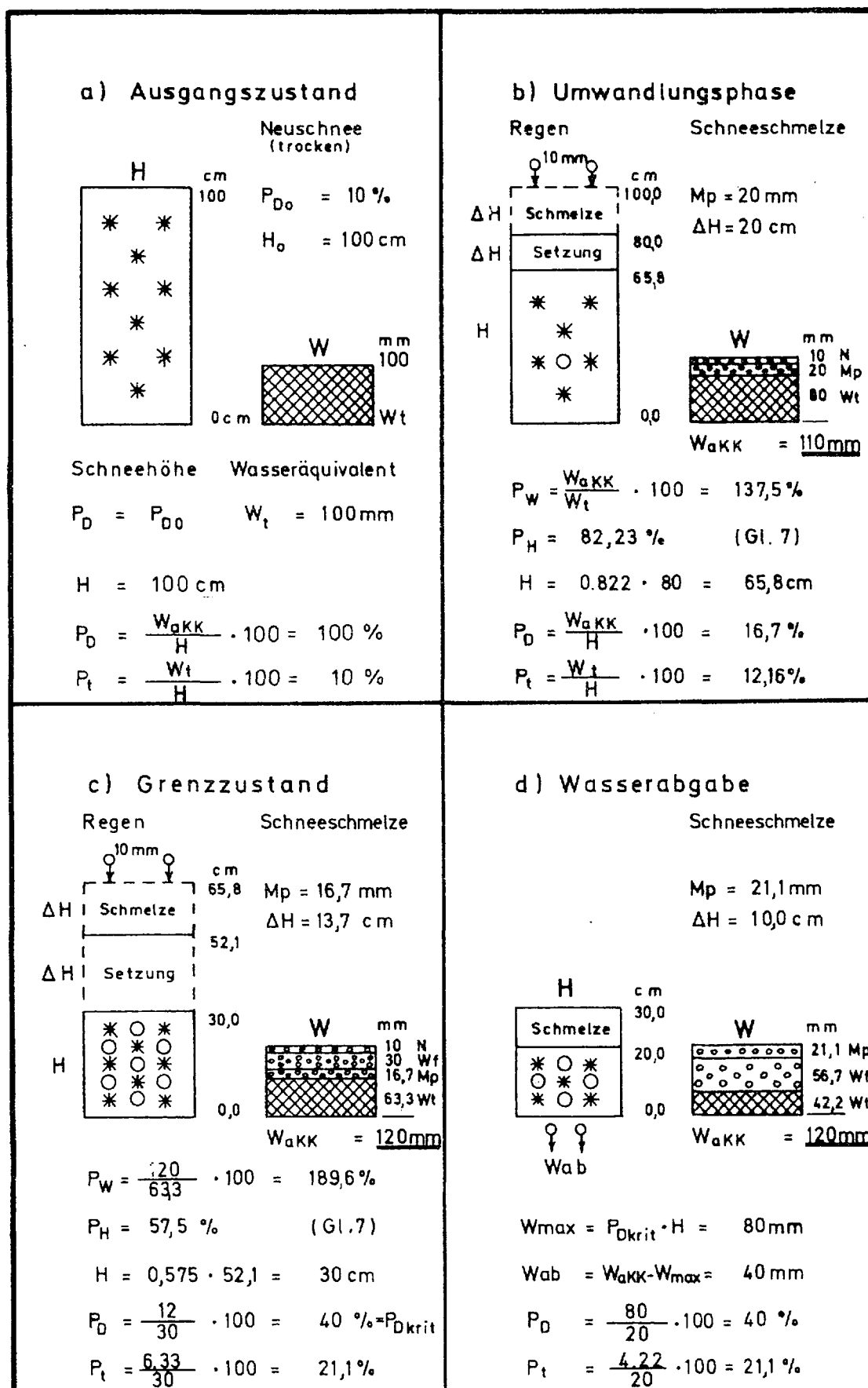


Bild 4: Bilanzierungsstufen zur Beschreibung des Wasserhaushaltes einer Schneedecke

potentielle Schneeschmelzrate zu vermindern  $W_t = 80 - 16,7 = 63,3$  mm. Hieraus errechnet sich die Schneedeckensetzung mit Hilfe von Gl. (7) zu 57,5 %. Mit der neuen Schneehöhe von  $H = 30$  cm wird der kritische Lagerungszustand erreicht:  $P_D = P_{Dkrit} = 40$  %. Bisher wurde alles freie Wasser in der Schneedecke zurückgehalten.

#### Bild 4 d)

Erst bei weiterer Schneeschmelze oder Regen wird die Retentionskapazität der Schneedecke überschritten. Es setzt ein Schneedeckenabfluß ein. Durch den Schmelzvorgang werden nur  $M_p = 21,1$  mm Wasser verflüssigt. Durch den einsetzenden Entleerungsvorgang werden jedoch insgesamt 40 mm Wasser abgegeben.

#### BESCHREIBUNG EINES RECHENBEISPIELS

Die Durchführung einer Bilanzrechnung sei an einem einfachen Beispiel erläutert, bei dem besonders günstige Schneeschmelzbedingungen angenommen wurden. Ziel der Berechnung ist die Ermittlung der Schneedeckenabflußganglinie. Die Berechnungen gelten jeweils für das Ende der Berechnungsintervalle. Die Länge der Intervalle richtet sich nach dem verfügbaren Datenmaterial bzw. nach der Problemstellung. Hier wird angenommen, daß nur Daten der Klima-Hauptstationen vorliegen. Die Berechnung erfolgt ohne Berücksichtigung des Kälteinhalts, d.h. man geht davon aus, daß sich die Schneedecke zu Beginn der Bilanzierungsrechnung bereits im isothermen Beharrungszustand von  $0^\circ\text{C}$  befindet.

Ausgangsdaten für die Berechnung der Schneedeckenabflußganglinie sind in diesem Beispiel die 8-stündigen äquidistanten Meßwerte für Temperatur und Niederschlag. Mit Hilfe des Gradtagverfahrens (Gl. 3) läßt sich aus den Temperaturdaten

die potentielle Schneeschmelzrate berechnen. Hieraus ergibt sich mit der anfänglichen Lagerungsdichte (Bezugsgröße ist die Lagerungsdichte am Ende der Akkumulation) die Höhenänderung infolge Abtauen. Mit Gl.(7) wird die Schneehöhenänderung infolge Setzung (Wirkung des einsickernden freien Wassers) berechnet. Nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte bleibt der Dichtezustand der Schneedecke konstant und weiteres Regen- oder Schmelzwasser wird als Schneedeckenabfluß an den Boden abgegeben.

Die grundsätzlichen Zusammenhänge der verschiedenen Prozesse sind zur Verdeutlichung der rechnerischen Vorgehensweise in Form eines Strukturdiagramms in Bild 5 dargestellt.

Die tabellarische Auswertung entspricht dem in [2] dargestellten Bilanzierungsschema, das von BERTLE anhand mehrerer Beispiele erläutert wird. In [2] wird ferner gezeigt, daß das Schmelzsetzungs-Verfahren auch auf Fälle mit intermittierendem Schneefall und bei Schichtenbildung in der Schneedecke angewendet werden kann. Für die Ermittlung des Schneedeckenabflusses ist es dabei unerheblich, ob die Bilanzierung für jede Schneesicht getrennt oder einheitlich für die gesamte Schneedecke durchgeführt wird.

Die Anwendung des hier beschriebenen Näherungsverfahrens zur Berechnung des Wasserhaushaltes einer Schneedecke setzt die Annahme zweier Kennwerte voraus. Der erste Kennwert ist die kritische Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$ , der hier mit 40 % angenommen wurde. Als möglicher Wertebereich wird auch in der neueren Literatur ein Bereich zwischen 40 und 45 % angegeben (s.S.113). Der zweite Kennwert ist die Neuschneedichte  $P_{Do}$ , die in der Regel nicht gemessen wird. Die Neuschneedichte liegt meist in einem Bereich zwischen 5 und 20 % [12]. Hier wurde die Neuschneedichte mit 10 % angenommen.

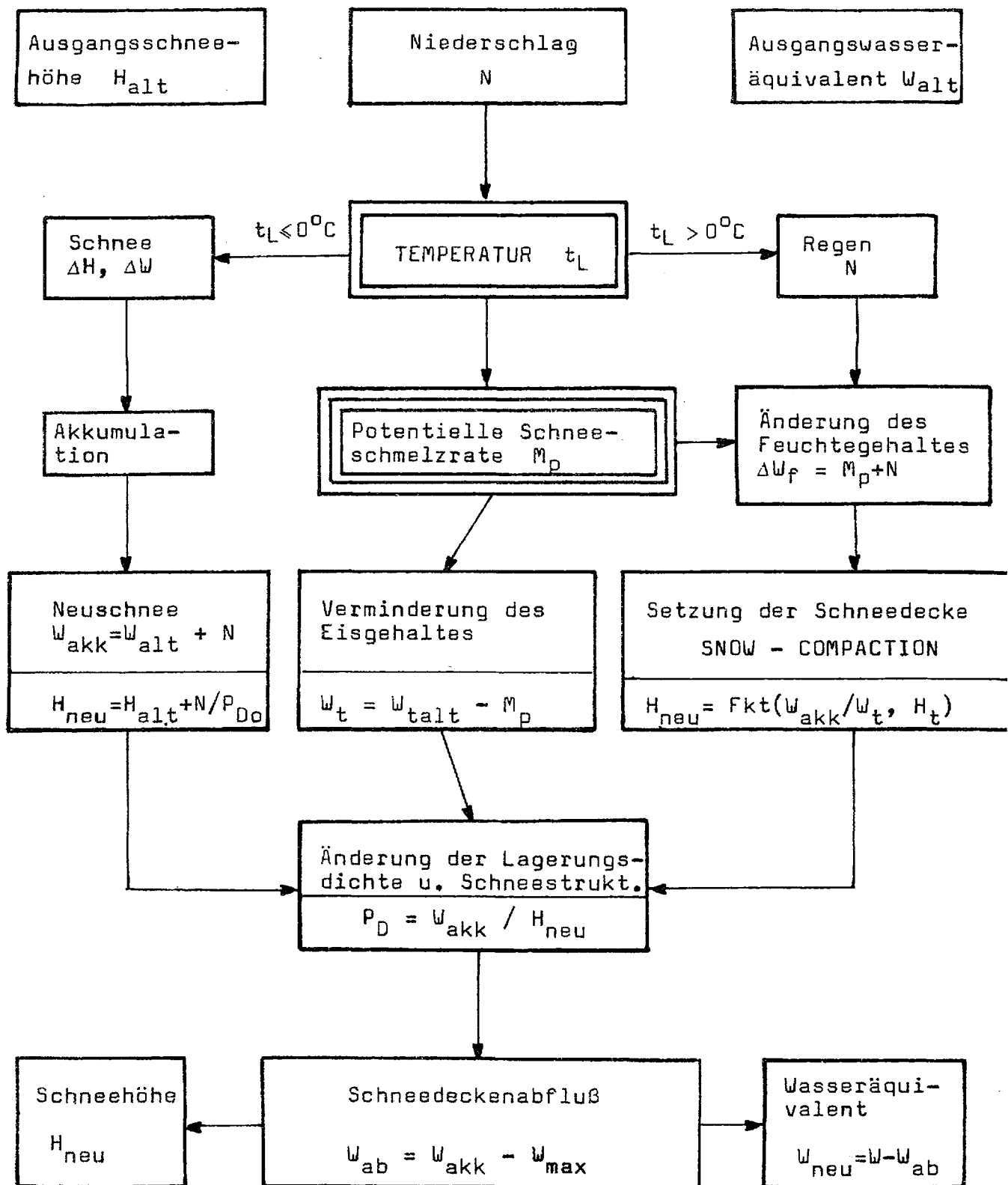


Bild 5: Strukturdiagramm zum Schmelzsetzungsverfahren



Zu Beginn der Bilanzierungsrechnung müssen Schneehöhe und Wasseräquivalent der Schneedecke bekannt sein. In dem Rechenbeispiel wird angenommen, daß sich der isotherme Beharrungszustand von 0°C gerade eingestellt hat, und daß noch kein freies Wasser in der Schneedecke vorhanden ist. Diese Bedingungen sind nach längeren Frostperioden bei Beginn der Tauperiode meist gegeben, wenn sich aufgrund einer milden Witterung kein nennenswerter Kälteinhalt aufbauen konnte.

#### BESCHREIBUNG ZU TAFEL 2

Zeile 1 : Zeit am Intervallende

Zeile 2 : Niederschlag N in mm

Zeile 3 : mittlere Lufttemperatur  $\bar{t}_L$  in °C im Zeitintervall, errechenbar aus den Werten der Klima-Haupttabellen (MIN-MAX-Temperatur, trockenes Thermometer)

Zeile 4 : Schneehöhenzuwachs bei Schneefall  
Die Schneehöhenänderung errechnet sich aus dem Niederschlag N und der Neuschneedichte  $P_{Do}$  zu

$$\Delta H_N = N / P_{Do}$$

für Intervalle mit  $\bar{t}_L \leq 0^\circ\text{C}$  wird angenommen, daß der Niederschlag als Schnee fällt.

Zeile 5 : Potentielle Schneeschmelzrate nach Gl. (3), in dem Beispiel wurde der Gradtagfaktor mit  $a_d = 5 \text{ mm/d} \cdot \text{K}$  angenommen. In Anlehnung an den Tagesgang gemessener Schneeschmelzintensitäten wurde  $a_d$  unterschiedlich auf die einzelnen Zeitintervalle verteilt:

21.00-07.00 Uhr	$a = 1,25 \text{ mm/K}$
07.00-14.00 Uhr	$a = 1,50 \text{ mm/K}$
14.00-21.00 Uhr	$a = 2,25 \text{ mm/K}$

- Zeile 6: Änderung des Gehaltes an freiem Wasser durch Schneeschmelze. Die Werte entsprechen Zeile 5 bis die Schneedecke die kritische Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$  erreicht hat. Im Grenzzustand Aufteilung der potentiellen Schneeschmelzrate auf Zeile 6 und Zeile 8 nach Vorgabe von  $P_{Wmax}$  in Zeile 13.
- Zeile 7: Änderung der Trockenschneehöhe  $H_t$  durch Schneeschmelze, Zeile 6 dividiert durch Trockenschneedichte  $P_{to}$
- Zeile 8: Änderung des Gehaltes an freiem Wasser durch den Schmelzvorgang nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$
- Zeile 9: Änderung der Trockenschneehöhe  $H_t$  durch Schneeschmelze, bezogen auf die größtmögliche Trockenschneedichte. Der Grenzwert für die Lagerungsdichte des Trockenschneeanteils kann mit Gl. (8) vorherbestimmt werden:

$$P_{tmax} = 0,678 (P_{to} + 0,474 \cdot P_{Dkrit}) \quad (8)$$

$P_{tmax}$  = Höchstwert für die Trockenschneedichte in der nassen Schneedecke

$P_{to}$  = Trockenschneedichte vor Beginn der Schneedeckensetzung (Akkumulationsende)

$P_{Dkrit}$  = Schwellenwert der Lagerungsdichte, bei der eine meßbare Wasserabgabe aus der Schneedecke einsetzt

- Zeile 10: Trockenschneehöhe  $H_t$ , Ausgangsschneehöhe plus Schneehöhenzuwachs bei Schneefall (Zeile 4) minus Schneehöhenreduktion durch Schmelzvorgang (Zeile 7)

$$H_t = H_t + \Delta H_N - \Delta H_S \quad *)$$

- Zeile 11: Wasseräquivalent des Trockenschnees  $W_t$ , Ausgangswasseräquivalent plus Zuwachs aus Schneefall

\*) der Punkt über der Variablen bedeutet Wert aus vorhergehendem Zeitintervall

Tafel 2

Einzugsgebiet:

Rechenbeispiel 1

Neuschneedichte  $P_{D0} = 10 \%$  $P_{DKrit} = 40 \%$ 

Zeile	Bez.	Beschreibung		1.			2.			3.			4.			5.			6.			Bearbeitungshinweise	
1		Zeit am Intervallende	Uhr	7 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup>	21 <sup>00</sup>	7 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup>	21 <sup>00</sup>	7 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup>	21 <sup>00</sup>	7 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup>	21 <sup>00</sup>	7 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup>	21 <sup>00</sup>	7 <sup>00</sup>	14 <sup>00</sup>	21 <sup>00</sup>		
2	N	Niederschlag	mm	—	20	30	50	20	5	0	0	0	10	20	50	30	30	30	0	0	0	Meßdaten	
3	$\overline{T}_L$	mittlere Temperatur	°C	-1	-1	0	0	0	0	4	16	8	4	16	8	4	16	8	4	16	8	Meßdaten	
4	$\Delta H_N$	Schneehöhenänderung durch N	mm	—	200	300	500	200	50	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	$(Z 2 / P_{D0}) \cdot 100$	
5	$M_p$	potentielle Schneeschmelzrate	mm	0	—	—	—	—	0	5	24	18	5	24	18	5	24	18	5	24	18	aus Schneeschmelzformel	
				Schneeschmelze vor Erreichen der kritischen Lagerungsdichte $P_{DKrit}$																			
6	$\Delta W_{fs}$	freies Wasser aus Schneeschmelze	mm	—	—	—	—	—	—	5	24	18	5	24	6							wie Z 5	
7	$\Delta H_S$	Schneehöhenänderung durch $M_p$	mm	—	—	—	—	—	—	36	171	128	36	171	43							$(Z 6 / P_{D0}) \cdot 100$	
				Schneeschmelze nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte $P_{DKrit}$																			
8	$\Delta W_{fs}$	freies Wasser aus Schneeschmelze	mm												12	5	24	18	5	24	18	wie Z 5	
9	$\Delta H_S$	Schneehöhenänderung durch $M_p$	mm												54	22	107	80	22	107	80	$(Z 8 / P_{Dmax}) \cdot 100$	
				Schneedecke vor Erreichen der Grenzdichte																			
10	$H_t$	Trockenschneehöhe	mm	350	550	850	1350	1550	1600	1564	1393	1265	1229	1058	1015							$Z 10 + Z 4 - Z 7$	
11	$W_t$	Wasseräquivalent d. Trockenschnees	mm	100	120	150	200	220	225	220	196	178	173	149	143							$Z 11 + Z 2^{**} - Z 6$	
12	$W_{akk}$	akkumuliertes Wasseräquivalent	mm	100	120	150	200	220	225	225	225	225	235	255	255							$Z 12 + Z 2$	
13	$P_W$	$W_{akk} / W_t$	%	100	—	—	—	—	100	102.3	114.8	126.4	135.8	171.1	178.3							$(Z 12 / Z 11) \cdot 100$	
14	$P_H$	Schneehöhe in Prozent von $H_t$	%	100	—	—	—	—	100	98.9	93.0	87.5	83.0	66.3	62.9							Gl. (7)	
15	$H_{neu}$	Schneehöhe nach Setzung	mm	350	—	—	wie $H_t$	—	1600	1547	1295	1107	1020	701	638							$Z 10 \cdot Z 14 / 100$	
16	$P_t$	Dichte des Trockenschnees	%	28.6	21.8	17.6	14.8	14.2	14.1	14.2	15.1	16.1	17.0	21.2	22.4							$(Z 11 / Z 15) \cdot 100$	
17	$P_D$	Lagerungsdichte d. Schneedecke	%	28.6	—	—	wie $P_t$	—	14.1	14.5	17.4	20.3	23.0	36.4	40.0							$(Z 12 / Z 15) \cdot 100$	
				Schneedecke nach Erreichen der Grenzdichte von 40 %																			
18	$H_{neu}$	Schneehöhe	mm												584	562	455	375	353	246	166	$Z 18 - Z 9$	
19	$W_{akk}$	akk. Wasseräquivalent	mm												305	264	255	212	150	141	98	$Z 20 + Z 2$	
20	$W_{max}$	max. W bei 40 %	mm												234	225	182	150	141	98	66	$Z 18 \cdot P_{DKrit} / 100$	
				Schneedeckenabfluß																			
21	$W_{ab}$	Wasserabgabe aus Schneedecke	mm	0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	71	39	73	62	9	43	32	$Z 19 + Z 20$

$$P_H = 147.4 - 0.474 \cdot P_w \quad (7)$$

x) Z: Wert aus vorhergehendem Zeitintervall

(Zeile 2 für Intervalle mit  $\bar{t}_L \leq 0^\circ\text{C}$ ), vermindert um freies Wasser aus dem Schmelzvorgang  $W_f$  (Zeile 6)

$$W_t = \dot{W}_t + N - W_f$$

Zeile 12: Akkumuliertes Wasseräquivalent  $W_{akk}$  der Schneedecke

$$W_{akk} = \dot{W}_{akk} + N$$

Zeile 13: Akkumuliertes Wasseräquivalent in Prozent vom Wasseräquivalent des Trockenschnees (Zeile 11)

$$P_W = \frac{W_{akk}}{W_t} \cdot 100$$

Der größtmögliche Wert errechnet sich aus

$$P_{Wmax} = 147,4 \cdot P_{Dkrit} / (P_{to} + 0,474 \cdot P_{Dkrit}) \quad (9)$$

Bei Erreichen der Grenzbedingungen ist dieser Wert vorzugeben, die Aufteilung zwischen Zeile 6 und Zeile 8 ergibt sich dann durch Rückrechnung.

Zeile 14: Schneehöhe in Prozent der Trockenschneehöhe, Maß für die Setzung der Schneedecke als Resultat der Wirkungen des freien Wassers aus Schneeschmelze und Regen, wird aus Gl.(7) berechnet.

Zeile 15: Schneehöhe  $H_{neu}$  nach Setzung der Schneedecke, berechnet durch Multiplikation der Trockenschneehöhe (Zeile 10) mit der Prozentzahl nach Zeile 14:

$$H_{neu} = P_H \cdot H_t / 100$$

Zeile 16: Trockenschneedichte in der nassen Schneedecke, berechnet aus dem Wasseräquivalent des Trockenschnees (Zeile 11) und der Schneehöhe nach Setzung (Zeile 15):

$$P_t = \frac{W_t}{H_{neu}} \cdot 100$$

Zeile 17: Aktuelle Lagerungsdichte der Schneedecke  $P_D$  als Maß für den Zustand der Schneedecke und ihre Rückhalteigenschaften, berechnet aus akkumuliertem Wasseräquivalent (Zeile 12) und Schneehöhe nach Setzung (Zeile 15):

$$P_D = \frac{W_{akk}}{H_{neu}} \cdot 100$$

Zeile 18: Schneehöhe nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$ . Der erste Wert von Zeile 18 entspricht dem letzten Wert von Zeile 15 abzüglich Schmelzanteil aus Zeile 9. Danach sukzessive Subtraktion Zeile 18 minus Zeile 9, bis der Schnee vollständig geschmolzen ist.

$$H_{neu} = H_{neu} - \Delta H_S$$

Zeile 19: Akkumuliertes Wasseräquivalent nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte. Erster Wert wie Zeile 12, danach sukzessive Addition des maximal möglichen Gehaltes an freiem Wasser in der Schneedecke (Zeile 20) plus Niederschlagshöhe aus Regen:

$$W_{akk} = W_{max} + N^+$$

Zeile 20: Maximal möglicher Gehalt an freiem Wasser  $W_{fmax}$  nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte. Schneehöhe (Zeile 18) multipliziert mit dem Grenzwert der Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$ :

$$W_{fmax} = P_{Dkrit} \cdot H_{neu} / 100$$

Zeile 21: Wasserabgabe aus der Schneedecke, Subtraktion Zeile 19 minus Zeile 20:

$$W_{ab} = W_{akk} - W_{fmax}$$

Solange  $P_{Dkrit}$  noch nicht erreicht ist, findet kein Schneedeckenabfluß statt.

Das Rechenbeispiel beginnt mit einer 35 cm hohen Schneedecke mit einem Wasseräquivalent von 100 mm. Nach 2 Tagen weiterer Schneedeckenakkumulation wird eine Schneehöhe von 1,60 m erreicht. Danach beginnt die Periode der Schneedeckenumwandlung mit einer Anfangslagerungsdichte  $P_{to} = 14,1 \%$ . Erst am Ende des 4. Tages setzt der Schneedeckenabfluß ein. Vor Erreichen der kritischen Lagerungsdichte werden 124 mm freies Wasser (94 mm aus Schneeschmelze und 30 mm aus Regen) in der Schneedecke gespeichert.

Das Modellkonzept der kritischen Lagerungsdichte ist die Grundlage für das Schmelzsetzungsverfahren. Seine besondere Bedeutung erhält das Rechenverfahren durch die Berücksichtigung der Setzungsvorgänge in einer Schneedecke bei Zufuhr von freiem Wasser. Erst durch die rechnerische Beschreibung dieser "Schneeschrumpfung" (Snow-Compaction) wird eine zutreffende Berechnung des Wasserhaushaltes einer Schneedecke in beliebigen Zeitschritten möglich.

### 3.4.2 Erweitertes Schmelzsetzungsverfahren

In dem vorangegangenen Beispiel wurde davon ausgegangen, daß Schneehöhen- und Schneedichte-Anfangswerte zu Beginn der Tabellenrechnung bekannt sind, und daß sich die Schneedecke im isothermen Beharrungszustand von  $0^{\circ}\text{C}$  befindet. Diese Anfangsbedingungen sind bei praktischen Anwendungen nicht immer bekannt. Hier ist zu empfehlen, die Schneedeckenentwicklung über eine längere Zeitperiode zu verfolgen, wobei der Kälteinhalt der Schneedecke oft nicht mehr vernachlässigt werden kann. Die Retentionswirkung des Kälteinhaltes kann mit Hilfe des erweiterten Schmelzsetzungs-Verfahrens erfaßt werden. Der Kälteinhalt  $W_k$  wird dabei durch die äquivalente Wassermenge ausgedrückt, die beim Gefrieren so viel Erstarrungswärme abgibt, daß gerade die isotherme Beharrungsstufe von  $0^{\circ}\text{C}$  er-

reicht wird.  $W_k$  wird in Abhängigkeit von den negativen Lufttemperaturen aufsummiert und durch die potentiellen Schneeschmelzraten  $M_p$  vermindert [11, 12]:

$$W_k = \dot{W}_k + a_k \cdot t_L - M_p \quad \text{für } t_L < 0^\circ\text{C} \quad (10)$$

$W_k$  = Kälteinhalt in mm

$a_k$  = Kälteübergangsfaktor in mm/K·h

Der Kälteübergangsfaktor liegt nach Auswertungen in [12] in der Größenordnung von 0,015 bis 0,025 mm/h·K. Zu beachten ist hierbei, daß der Höchstwert des akkumulierten Kälteinhalts die Wärmekapazität der kalten Schneedecke nicht überschreiten kann. Die Wärmekapazität von Eis beträgt  $c_{pE} = 0,58 \text{ Wh/kg} \cdot \text{K}$ , damit ergibt sich der größtmögliche Wert des Kälteinhaltes einer Schneedecke zu

$$W_{kmax} = 0,00625 \cdot W_{akk} \cdot t_S \quad \text{in mm} \quad (11)$$

wobei  $W_{akk}$  das akkumulierte Wasseräquivalent und  $t_S$  die Schneedeckentemperatur bedeuten.

Bei vorhandenem Kälteinhalt wird das durch den Energieüberschuß  $E$  an der Schneeoberfläche entstehende Schmelzwasser wieder gefrieren und durch die Freigabe der Erstarrungswärme den Kälteinhalt vermindern. Lediglich die Schneeschmelze an der Schneedeckenunterseite (durch Bodenwärmestrom) kann bei vorhandenem Kälteinhalt zur Wasserabgabe führen (vergleiche Tafel 3, Zeile 22). In diesem Fall ist die Wasserabgabe aus der Schneedecke nur gering. Nach Abschnitt 3.4.1 kann der Schneedeckenabfluß solange vernachlässigt werden, bis die Lagerungsdichte der Schneedecke ihren kritischen Wert noch nicht erreicht hat. Diese in Laborversuchen an Schneeproben gewonnene Erkenntnis ist nicht ohne weiteres auf natürliche Schneedecken übertragbar. Bei Messungen mit der großen Schneewaage Hohenpeißenberg hat sich nach Auswertun-

gen von [12] gezeigt, daß bereits vor Erreichen der kritischen Lagerungsdichte eine merkbare Wasserabgabe einsetzt. Um diesem vorzeitigen Schneedeckenabfluß, der mit dem inhomogenen Aufbau einer Schneedecke zusammenhängt, Rechnung zu tragen, wird in dem erweiterten Schmelzsetzungs-Verfahren eine kontinuierliche Änderung des Wasserrückhaltevermögens angenommen. Als Funktion der Lagerungsdichte kann nach [12] folgende Näherungsformel empfohlen werden:

$$W_{ab} = (1 - \exp(-(P_D/P_{Dkrit})^4)) \cdot W_{zu} \quad (12)$$

$$W_{zu} = M_p + N = \text{zugeführte freie Wassermenge in mm aus Schneeschmelze und Regen}$$

Für eine natürliche Schneedecke vor Erreichen der kritischen Lagerungsdichte kann mit Hilfe von Gleichung (12) eine veränderliche Wasserrückhaltefähigkeit und damit eine bessere Anpassung an natürliche Verhältnisse erzielt werden. Nach Erreichen der kritischen Lagerungsdichte  $P_{Dkrit}$  ist die Wasserabgabe wie im ursprünglichen Schmelzsetzungsverfahren aus

$$W_{ab} = W_{akk} - W_{fmax}$$

zu berechnen.

Das erweiterte Schmelzsetzungsverfahren wird in Tafel 3 an einem praktischen Beispiel demonstriert.

Das Beispiel des erweiterten Schmelzsetzungsverfahrens wurde mit den in der Frühjahrsperiode 1971 an der Schneewaage Hohenpeißenberg gemessenen Daten aufgestellt. Die potentielle Schneeschmelzrate wurde hier vereinfacht aus

$$M_p = 1,8 \cdot \bar{t}_L + 4,2 + 0,0125 \cdot i_N \cdot \bar{t}_L^{(+)} \quad \text{in mm/d}$$

berechnet. Die temperaturunabhängige Schneeschmelzrate setzt



sich aus  $M_S = 3,0 \text{ mm/d}$  für die Wirkung der Nettostrahlung und aus  $M_B = 1,2 \text{ mm/d}$  für den Bodenwärmestrom zusammen. Die konstante Schneeschmelzrate wurde auch für den Fall negativer Lufttemperaturen angesetzt, denn auch bei Frost findet eine Schneemetamorphose und ein Schneedeckenabfluß statt. Der Kälteinhalt  $W_k$  wurde mit Gleichung (10) mit dem Kälteübergangsfaktor  $a_k = 0,4 \text{ mm/d} \cdot \text{K}$  berechnet. Das Beispiel zeigt, daß der Kälteinhalt sehr schnell abgebaut wird. Die dargestellte Methode zur Berechnung des Kälteinhalts ist nur eine einfache Näherungsrechnung zur Erfassung des thermischen Rückhaltevermögens. Im Gegensatz zur Schneeschmelze, die hauptsächlich an der Schneeoberfläche einsetzt, ist die Akkumulation des Kälteinhalts von Schneehöhe und Schneedichte abhängig, d.h. der Kälteübergangsfaktor  $a_k$  müßte sich eigentlich mit diesen Größen ändern. Spezielle Untersuchungen hierzu sind bisher jedoch nicht bekannt.

In ihrem grundsätzlichen Aufbau entspricht Tafel 3 dem Berechnungsschema nach Tafel 2. Tafel 3 wurde lediglich durch die Berechnung des Kälteinhalts und der Schneedeckenakkumulation bei negativen Temperaturen ergänzt (s. Tafel 3, Zeile 6 bis Zeile 10). Der Abbau des Kälteinhalts erfolgt überwiegend durch die kurzweilige Globalstrahlung bei Tage, der Bodenwärmestrom führt direkt zur Wasserabgabe. Die Größe  $W_B$  geht daher in die Bilanzierung des Kälteinhalts nicht ein.

Bei positiver Lufttemperatur wird erst der akkumulierte Kälteinhalt vermindert, bevor sich der Lagerungszustand der Schneedecke ändert. Erst wenn der isotherme Beharrungszustand mit  $0^\circ\text{C}$  und  $W_k = 0$  erreicht ist, setzt eine mit der Lagerungsdichte veränderliche Wasserabgabe aus der Schneedecke ein. (Vgl. Tafel 3).

Einzugsgebiet: Schneewaage Hohenpeißenberg

Februar / März 1971

Neuschneedichte  $P_{D0} = 11 \%$  $P_{DKrit} = 40 \%$ 

Zeile	Bez.	Beschreibung																				Bearbeitungshinweise		
1		Zeit / Datum		22.	23.	24.	25.	26.	27.	28.	1.3.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.			
2	N	Niederschlag	mm		13.7	11.3	3.7	10.4	0.8	8.0	7.2	0	0.8	1.6	0.8	2.4	1.6	0	0	2.4	4.8	Heißdaten		
3	t <sub>L</sub>	mittlere Temperatur	°C	-1.3	-3.7	-4.0	-2.8	-4.1	-10.	-11.6	-10.	-9.2	-8.6	-14.5	-15.1	-15.5	-12.6	-9.4	-7.9	-4.9	-5.0	Heißdaten		
4	ΔH <sub>N</sub>	Schneehöhenänderung durch N	mm	—	125	103	34	94	7	70	65	—	7	14	7	22	14	—	—	22	44	(Z 2 / P <sub>D0</sub> ) · 100		
5	M <sub>p</sub>	potentielle Schneeschmelzrate	mm	—	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	aus Schneeschmelzformel		
				Schneedecke bei negativer Temperatur (W <sub>k</sub> ≠ 0)																				
6	W <sub>k</sub>	Kältegehalt	mm	—	—	—	—	—	1.0	2.6	3.6	4.3	4.7	7.5	10.5	13.7	15.7	16.5	16.7	15.7	14.7	Gl. I		
7	ΔH <sub>s</sub>	Schneehöhenänderung durch M <sub>p</sub>	mm	—	27	28	29	28	28	27	27	27	26	25	25	24	23	23	22	21	21	(Z 5 / Z 10) · 100		
8	W <sub>t</sub>	Wasseräquivalent d. Trockenschnees	mm	35.0	47.5	57.6	60.	69.2	68.8	75.6	81.6	80.4	80.0	80.4	80.0	81.2	81.6	80.4	79.2	80.4	84.0	Z 8 - Z 22 + Z 2		
9	H <sub>t</sub>	Schneehöhe, trocken	mm	222	320	395	400	466	445	488	526	499	480	469	451	449	440	417	395	396	373	Z 9 - Z 4 - Z 7		
10	P <sub>t</sub>	Schneedichte, trocken	%	15.8	14.8	14.6	15.0	14.8	15.5	15.5	15.5	16.1	16.7	17.1	17.7	18.1	18.5	19.3	20.0	20.3	22.5	(Z 8 / Z 9) · 100		
				Schneedecke vor Erreichen der Grenzdichte (T <sub>s</sub> = 0°C)																				
11	H <sub>t</sub>	Trockenschneehöhe	mm																			Z 11 - Z 4 - Z 7		
12	W <sub>t</sub>	Wasseräquivalent d. Trockenschnees	mm																			Z 12 - Z 2 - Z 5		
13	W <sub>akk</sub>	akkumuliertes Wasseräquivalent	mm																			Z 13 + Z 2 - Z 22		
14	P <sub>W</sub>	W <sub>akk</sub> / W <sub>t</sub>	%																			(Z 13 / Z 12) · 100		
15	P <sub>H</sub>	Schneehöhe in Prozent von H <sub>t</sub>	%																			Gl. (III)		
16	H <sub>neu</sub>	Schneehöhe nach Setzung	mm																			Z 11 · Z 15 / 100		
17	P <sub>t</sub>	Dichte des Trockenschnees	%																			(Z 12 / Z 16) · 100		
18	P <sub>D</sub>	Lagerungsdichte d. Schneedecke	%																			(Z 13 / Z 16) · 100		
				Schneedecke nach Erreichen der Grenzdichte																				
19	H <sub>neu</sub>	Schneehöhe	mm																			Z 19 - Z 7		
20	W <sub>akk</sub>	akk. Wasseräquivalent	mm																			Z 21 + Z 2		
21	W <sub>max</sub>	max. W bei 40%	mm																			Z 19 · P <sub>DKrit</sub> / 100		
																						P <sub>D</sub> < P <sub>DKrit</sub> : Gl. (III)		
22	W <sub>ab</sub>	Wasserabgabe aus Schneedecke	mm	1.2 <sup>x)</sup>	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	P <sub>D</sub> ≥ P <sub>DKrit</sub> : Z 20 - Z 21		

$$W_k = W_k + a_k \cdot \bar{t}_l - M_p \quad (I)$$

$$P_H = 147,4 - 0,474 P_W \quad (II)$$

$$W_{ab} = 1 - \exp(-IP_n / P_{DKrit})^4 \quad (III)$$

x) Z-Wert aus vorhergehendem

Einzugsgebiet: Schneewaage Hohenpeißenberg			März 1971			Neuschneedichte $P_{D0} = 11 \%$												$P_{DKrit} = 40 \%$							Bearbeitungshinweise		
Zeile	Bez	Beschreibung		11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28						
1		Zeit / Datum																									
2	N	Niederschlag	mm	4,8	4,8	1,6	0	0	7,2	2,4	0	0	0	0	0	18,4											Meßdaten
3	$t_L$	mittlere Temperatur	°C	-5,0	-3,9	2,9	4,8	3,2	-1,2	1,7	5,6	5,0	5,4	11,3	5,0	-3,0											Meßdaten
4	$\Delta H_N$	Schneehöhenänderung durch N	mm	44	44	—	—	—	65	—	—	—	—	—	—	167											$(Z 2 / P_{D0}) \cdot 100$
5	$M_p$	potentielle Schneeschmelzrate	mm	4,2	4,2	9,5	12,8	10,0	4,2	7,4	14,3	13,2	13,9	24,5	13,2	4,2											aus Schneeschmelzformel
				Schneedecke bei negativer Temperatur ( $W_k \neq 0$ )																							
6	$W_k$	Kältegehalt	mm	14,7	13,4	3,9	-8,9																				Gl. I
7	$\Delta H_s$	Schneehöhenänderung durch $M_p$	mm	21	19	19	38	41	16	32	56	44	46	82	44												$(Z 5 / Z 10) \cdot 100$
8	$W_t$	Wasseräquivalent d. Trockenschnees	mm	84	87,6	88																					$Z 8 - Z 22 + Z 2$
9	$H_t$	Schneehöhe, trocken	mm	373	398	379																					$Z 9 + Z 4 + Z 7$
10	$P_t$	Schneedichte, trocken	%	22,5	22	23,2																					$(Z 8 / Z 9) \cdot 100$
				Schneedecke vor Erreichen der Grenzdichte ( $T_s = 0^\circ C$ )																							
11	$H_t$	Trockenschneehöhe	mm				341	300	349	317	261																$Z 11 + Z 4 - Z 7$
12	$W_t$	Wasseräquivalent d. Trockenschnees	mm				79,1	69,1	72,1	67,1	52,8																$Z 12 + Z 2 - Z 5$
13	$W_{akk}$	akkumuliertes Wasseräquivalent	mm				86,8	85	88,9	90,3	88,1																$Z 13 + Z 2 - Z 22$
14	$P_W$	$W_{akk} / W_t$	%				110	123	123	135	167																$(Z 13 / Z 12) \cdot 100$
15	$P_H$	Schneehöhe in Prozent von $H_t$	%				95	89	89	83	68																Gl. (II)
16	$H_{neu}$	Schneehöhe nach Setzung	mm				324	267	311	263	177																$Z 11 \cdot Z 15 / 100$
17	$P_t$	Dichte des Trockenschnees	%				24,4	25,9	23,2	25,5	29,8																$(Z 12 / Z 16) \cdot 100$
18	$P_D$	Lagerungsdichte d. Schneedecke	%				26,8	31,8	28,6	34,3	49,8																$(Z 13 / Z 16) \cdot 100$
				Schneedecke nach Erreichen der Grenzdichte																							
19	$H_{neu}$	Schneehöhe	mm								177	133	87	5	0												$Z 19 - Z 7$
20	$W_{akk}$	akk. Wasseräquivalent	mm								75,1	70,8	53,2	34,8	2												$Z 21 + Z 2$
21	$W_{max}$	max. W bei 40%	mm								70,8	53,2	34,8	2	0												$Z 19 \cdot P_{DKrit} / 100$
																								$P_D - P_{DKrit}$ Gl. (III)			
22	$W_{ab}$	Wasserabgabe aus Schneedecke	mm	1,2	1,2	1,2	1,8	3,3	1,0	2,2	17,3	17,6	18,4	32,8	2												$P_D \approx P_{DKrit} : Z 20 - Z 21$

$$W_k = W_k + a_k \cdot \bar{t}_L - M_p \quad (I)$$

$$P_H = 147,4 - 0,474 P_W \quad (II)$$

$$W_{ab} = 1 - \exp \left( - \left( P / P_{DKrit} \right)^4 \right) \quad (III)$$

x) Z: Wert aus vorhergehendem Zeitintervall

### 3.5 ZUSAMMENFASSUNG

Der Schnee in einem Einzugsgebiet wirkt durch seine Speichereigenschaften und durch das bei der Schneeschmelze freiwerdende Wasserdargebot auf den Abflußprozeß ein. Für die Berechnung der Belastungsganglinie des Abflußprozesses kann das Schmelzsetzungs-Verfahren verwendet werden, das hier in zwei Varianten dargestellt wurde. Ergebnis der Berechnung ist die Ganglinie des Schneedeckenabflusses, die bei hydrologischen Berechnungen wie eine Belastungsganglinie aus Regen behandelt werden kann.

Die rechentechnischen Möglichkeiten, die insbesondere mit einer EDV-gerechten Anwendung des Schmelzsetzungsverfahrens gegeben sind, dürfen nicht darüber hinwegtäuschen, daß die Zuverlässigkeit der Ergebnisse in besonders hohem Maße von der Qualität und Dichte der Eingangsdaten bestimmt wird. Wenn z.B. nur ein Meßwert pro Tag für die Lufttemperatur vorliegt, kann man nicht erwarten, daß die Schneedeckenakkumulation oder die Schneeschmelzprozesse immer richtig erfaßt werden können, da sich die Witterungsfaktoren im Laufe eines Tages sehr schnell ändern können.

Als Baustein von hydrologischen Abflußmodellen ermöglicht das Schmelzsetzungsverfahren eine Eichung der für den Schneeschmelzvorgang maßgebenden Gleichungsparameter. Mit Hilfe der aus der Analyse bekannten gebietsspezifischen Schneeschmelzparameter ist dann eine Prognose von Abflußereignissen aus Schneeschmelze mit oder ohne Regeneinfluß möglich, wenn die übrigen hydrologischen Kenngrößen des betrachteten Einzugsgebietes bekannt sind und näherungsweise vereinheitlichte Abflußverhältnisse angenommen werden können. Diese Einschränkung bedeutet jedoch nicht, daß die örtliche Abflußbildung in den verschiedenen Höhenlagen überall gleiche Werte annehmen muß. Da die Schneeverteilung in einem Ein-

zugsgebiet im wesentlichen durch zeitinvariante Größen wie Höhenabstufung und Waldverteilung bestimmt wird, kann davon ausgegangen werden, daß bei verschiedenen Schneeschmelzereignissen die lokale Intensitätsverteilung des Schneedeckenabflusses im Mittel ähnlich sein wird.

Unter dieser Voraussetzung können auch hydrologische Blockmodelle zur Beschreibung des Übertragungsverhaltens schneebedeckter Einzugsgebiete verwendet werden.

### 3.6 SCHRIFTTUM

- [1] APPOLLOV, B.A., KALININ, G.P., KOMAROV, V.D.: Hydrologische Prognosen. Fachliche Mitteilungen des geophysikalischen Beratungsdienstes der Bundeswehr Nr. 141-144, 1969
- [2] BERTLE, F.A.: Effect of Snow-Compaction on Runoff from Rain on Snow. Bureau of Reclamation, Engineering Monograph No. 35, Washington, 1966
- [3] BRECHTEL, H.M.: Gravimetrische Schneemessungen mit Schneesonde Vogelsberg. WW Heft 11, 1969, S. 323-327
- [4] BRECHTEL, H.M.: Einfluß von Waldbeständen verschiedener Baumarten und Altersklassen auf die Schneeansammlung und Schneeschmelze in den Hochlagen des westlichen Vogelsberges. DGM Heft 5, 1972, S. 121-133
- [5] CORPS OF ENGINEERS, US ARMY: Snow Hydrology; Summary Report of the Snow Investigations. Portland, Oregon USA, June 1956
- [6] CORPS OF ENGINEERS, US ARMY: Runoff from Snowmelt. Manual EM 1110-2-1406, Vicksburg, Mississippi USA, Jan. 1960
- [7] EULER, G.: Die Simulation der Niederschlagsaufteilung für Hochwasserabfluß-Modelle. TB Nr. 14 aus dem Institut für Hydraulik und Hydrologie der TH Darmstadt, Juli 1974

- [ 8] GERDEL, R.W.: The Transmission of Water through Snow. Transact. American Geophys. Union, Vol. 35, No. 3, S. 475-485, 1954
- [ 9] HERRMANN, A.: Bemerkungen zur Modellierung und Simulation der Schmelzabflüsse aus einer randalpinen Schneedecke. Sonderforschungsbereich 81 TU München, Vortragsveranstaltung 12. Mai 1976
- [10] HERRMANN, A.: Einflüsse des Alpensüdföhns auf die Schneedeckenentwicklung und das nival gesteuerte Abflußgeschehen. Polarforschung 46 (2): 83-94, 1976
- [11] KNAUF, D.: Abfluß aus Regen und Schneeschmelze. 6. Fortbildungslehrgang für Hydrologie des DVWW, Bad Herrenalb, 1974
- [12] KNAUF, D.: Die Abflußbildung in schneebedeckten Einzugsgebieten des Mittelgebirges. TB Nr. 17 aus dem Institut für Hydraulik und Hydrologie der TH Darmstadt, 1976
- [13] KUZ'MIN, P.P.: Melting of Snow Cover. Israel Program for Scient. Transl., Jerusalem 1972 (Übersetzung von: Prozess tayaniya shezhnogo pokrova, Leningrad 1961)
- [14] LANG, H.: Hydrometeorologische Ergebnisse aus Abflußmessungen im Bereich des Hintereisferners (Ötztaler Alpen) in den Jahren 1957 bis 1959. Archiv für Meteorologie, Serie B, Band 14 (3-4), Wien 1966, S. 280-302
- [15] LANG, H.: Meteorologische Daten als Eingangsgröße für hydrologische Prognose- und Bemessungsverfahren. 6. Fortbildungslehrgang für Hydrologie des DVWW, Bad Herrenalb, 1974
- [16] MARTINEC, J.: Snow and Ice. Mitt. des Eidgen. Institutes für Schnee- und Lawinenforschung No. 31, August 1976
- [17] RACHNER, M.: Vergleich einiger Formeln zur Bestimmung der Schneeschmelze (Vorläufige Ergebnisse). WWT 1968 Heft 1, S. 25-28

- [18] RÖSL, G.: Mathematisches Modell zur Berechnung des Abflusses aus einem schneebedeckten Einzugsgebiet. Sonderforschungsbereich 81 TU München, Vortragsveranstaltung 12. Mai 1976
  
- [19] SCHRÖDER, R.C.M.: Deterministische Berechnungsmethoden. 6. Fortbildungslehrgang für Hydrologie des DVWW, Bad Herrenalb, 1974
  
- [20] STINTZING, W.: Mathematisches Modell zur Simulation von Abflußganglinien in Vorflutern mit schneebedecktem Einzugsgebiet in Mittelgebirgen. Mitt. aus dem Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der TU Hannover, H. 46, 1979
  
- [21] ZINGG, Th.: Beziehung zwischen Temperatur und Schmelzwasser und ihre Bedeutung für Niederschlags- und Abflußfragen. IUGG / IASH, Ass. Generale de Bruxelles Publ. No.32, 1951, S. 266-269

## ANLAGE :

DEFINITION SCHNEEHYDROLOGISCHER BEGRIFFE  
DES DVWK-ARBEITSKREISES "SCHNEEHYDROLOGIE"  
(Auszug)

Stand Oktober 1978

BENENNUNG	EINHEIT	ERKLÄRUNG
Ablation der Schneedecke		Abnahme des Wasseräquivalentes
Akkumulation der Schneedecke		Zunahme des Wasseräquivalentes der Schneedecke
Eisgehalt des Schnees	%	Anteil des Wassers in fester Form am Wasseräquivalent
Feuchtegehalt des Schnees	%	Anteil des Wassers in flüssiger Form am Wasseräquivalent
Kälteinhalt des Schnees	J	Wärmemenge, die nötig ist, um die Temperatur des Schnees auf 0°C zu heben, ohne den Schnee zu schmelzen
Lagerungsdichte der Schneedecke	%	Quotient aus Wasseräquivalent der Schneedecke und der Schneedeckenhöhe
Potentielle Schmelzwassermenge	cm <sup>3</sup>	Die nach der Wärmebilanz verflüssigbare Schneemenge
Potentielle Schneeschmelzrate	mm/t	Das nach der Wärmebilanz pro Zeiteinheit verflüssigbare Wasseräquivalent einer Schneedecke
Retentionskapazität des Schnees	mm	Maximale Wassermenge in flüssiger Form, die Schnee entgegen der Schwerkraft zurückhalten kann



BENENNUNG	EINHEIT	ERKLÄRUNG
Schmelzwärme des Schnees	J/g	Physikalische Konstante, die angibt, welche Wärmemenge nötig ist, um 1 g Schnee von 0°C zu schmelzen (330 J/g)
Schneedeckenabfluß (nicht: Schneeschmelzrate oder Abschmelzrate)	mm/t	Aus einer Schneedecke in flüssiger Phase abgegebene Wassermenge pro Zeiteinheit
Schneedichte	g/cm <sup>3</sup>	Quotient aus der Masse des Schnees und seinem Volumen
Schneehöhe	cm	Lotrechte Höhe einer Schneeanammlung
Schneemetamorphose		Physikalischer Umwandlungsprozeß der Schneekristalle
Schneeschnelzabfluß	m <sup>3</sup> /s	Abfluß in einem Vorfluter, der überwiegend aus Schneedeckenabfluß stammt
Schneeschnelzrate	mm/t	In einer Schneedecke pro Zeiteinheit verflüssigte Wassermenge
Thermische Retentionskapazität des Schnees	mm	Gleichmäßig verteilt gedachte Wassermenge von 0°C, die durch Gefrieren innerhalb des Schnees dessen Temperatur auf 0°C heben würde
Wasseräquivalent des Schnees (nicht: Wassergehalt)	cm <sup>3</sup>	Wassermenge einer Schneeprobe, die sich durch Schmelzen ergeben würde
Wasseräquivalent der Schneedecke	mm	Wasser, das in der Schneedecke enthalten ist, ausgedrückt als Höhe über einer horizontalen Fläche (s.auch DIN 4049, S. 7)