

Kapitel 2: Grundlagen und Einflussmöglichkeiten in die operationelle Vorhersage mit LARSIM in schneegeprägten Hochwassersituationen

2.1 Grundlagen der Schneemodellierung im Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Dr.-Ing. Kai Gerlinger

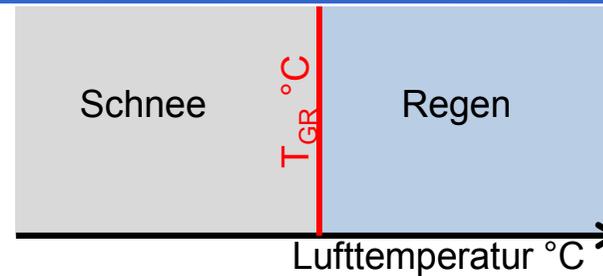
HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft

März 2017

Schneemodellierung in LARSIM

• Akkumulation von Schnee

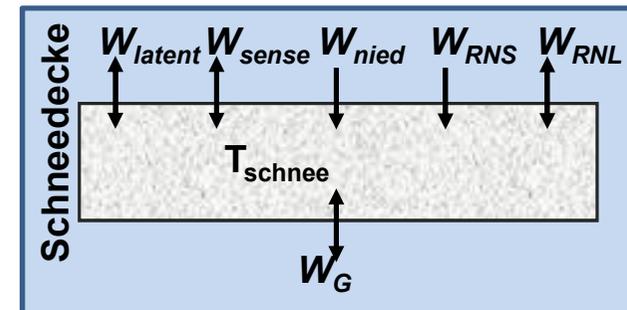
- $T_{\text{Luft}} < T_{\text{Gr}} \rightarrow$ Schneefall
Aufbau der Schneedecke mit trockenem Neuschnee
- Schneeinterzeption



• Energiebilanz der Schneedecke

Temperatur der Schneedecke und potentielle Schmelze

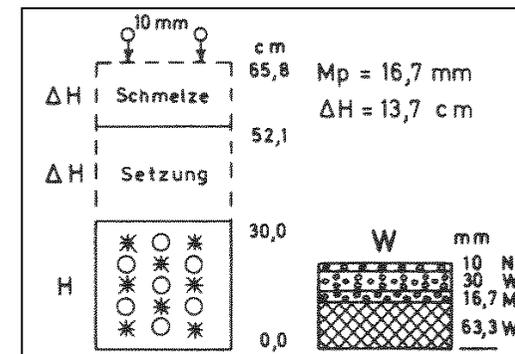
- Grad-Tag-Verfahren
- Knauf vereinfacht
- Knauf erweitert
- UEB-Energiebilanz-Ansatz
- Vollständige Energiebilanz



• Setzung und Wasserabgabe

Rückhalt flüssigen Wassers in der Schneedecke und tatsächliche Wasserabgabe

- UEB-Setzungs-Ansatz
- Bertle-Verfahren



• Schneemassentransport

Schneemodellierung in LARSIM

Kombinationsmöglichkeiten Energiebilanz – Setzung
je nach Aufgabenstellung und Datenverfügbarkeit

		Setzung und Wasserabgabe		
		ohne	Bertle-Verfahren	UEB-Retention
Energiebilanz	Grad-Tag-Verfahren	X	X	
	Knauf vereinfacht	X	X	
	Knauf erweitert	X	X	
	Utah Energy Balance Snow Accumulation and Melt Model UEB	X		X
	Vollständige Energiebilanz (mit Zusatzoptionen)	X	X	X

→ In operationellen Modellen der Länder:
Vollständige Energiebilanz + Bertle-Verfahren

Akkumulation von Schnee

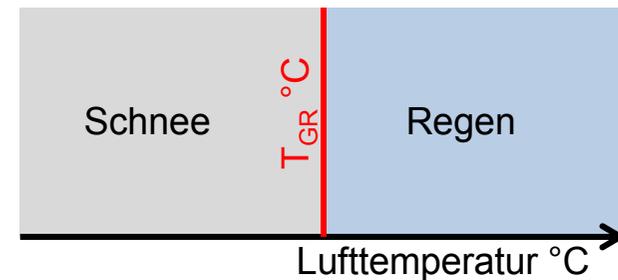
- Betrachtete Teilprozesse:
 - a) Akkumulation von Schnee: abhängig von der Grenztemperatur Schnee bzw. Schneeregen und der Schneeeinterzeption



Akkumulation von Schnee: Schneereg

Ausgangslage:

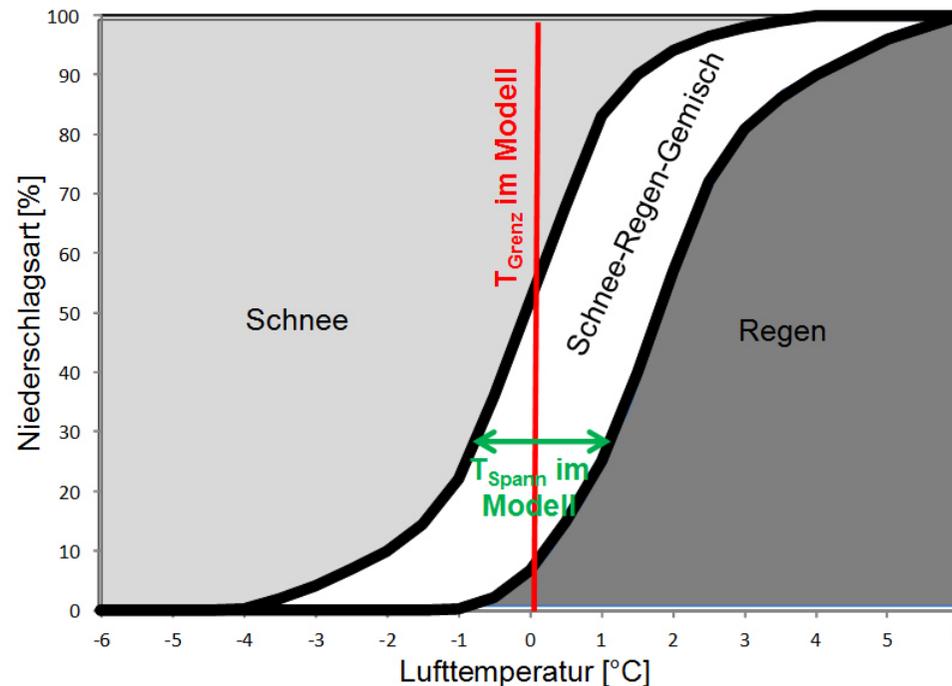
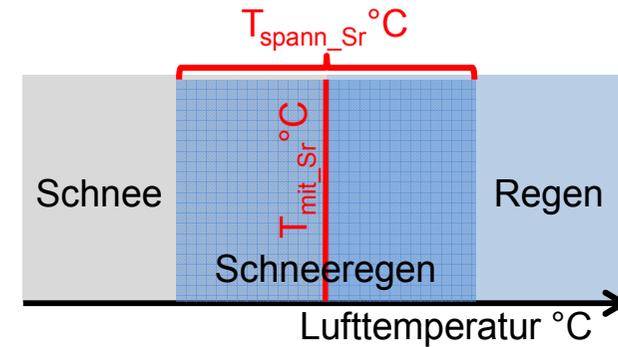
- Bislang starre Grenze (T_{GR}):
Regen oder (trockener!) Schnee
- T_{GR} sehr sensitiv, abrupte Änderung der
Abflussreaktion
- Bei Schneefall immer komplett trockene
Schneedecke und damit tendenziell zu späte und
zu langsame Wasserabgabe aus Schneedecke



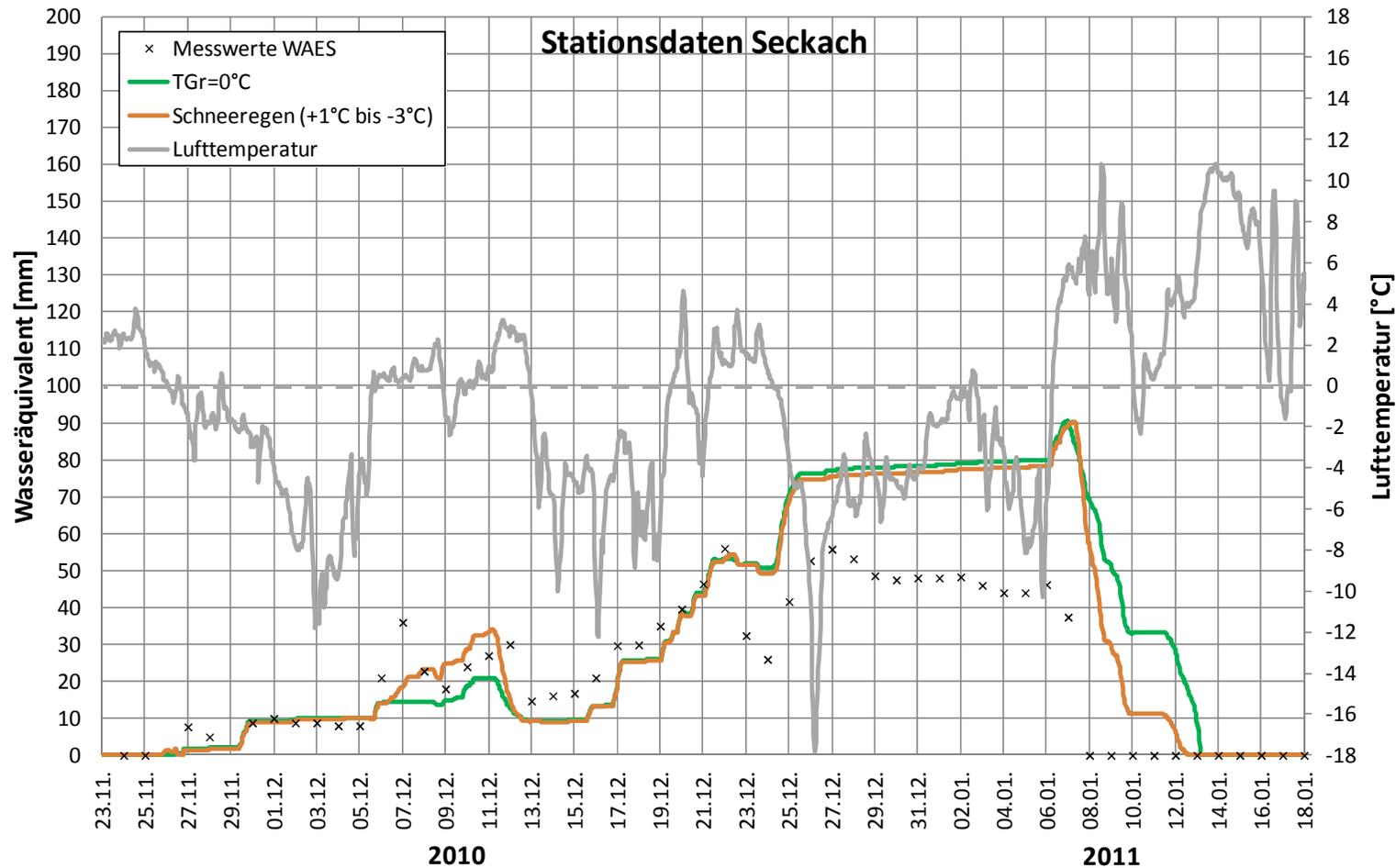
Akkumulation von Schnee: Schneeregen

LARSIM-Option SCHNEEREGEN:

- Parameter T_{mit_Sr} und T_{spann_Sr} für Übergangsbereich von trockenem Schnee zu Regen
- Im Übergangsbereich lineare Interpolation des flüssigen Anteils

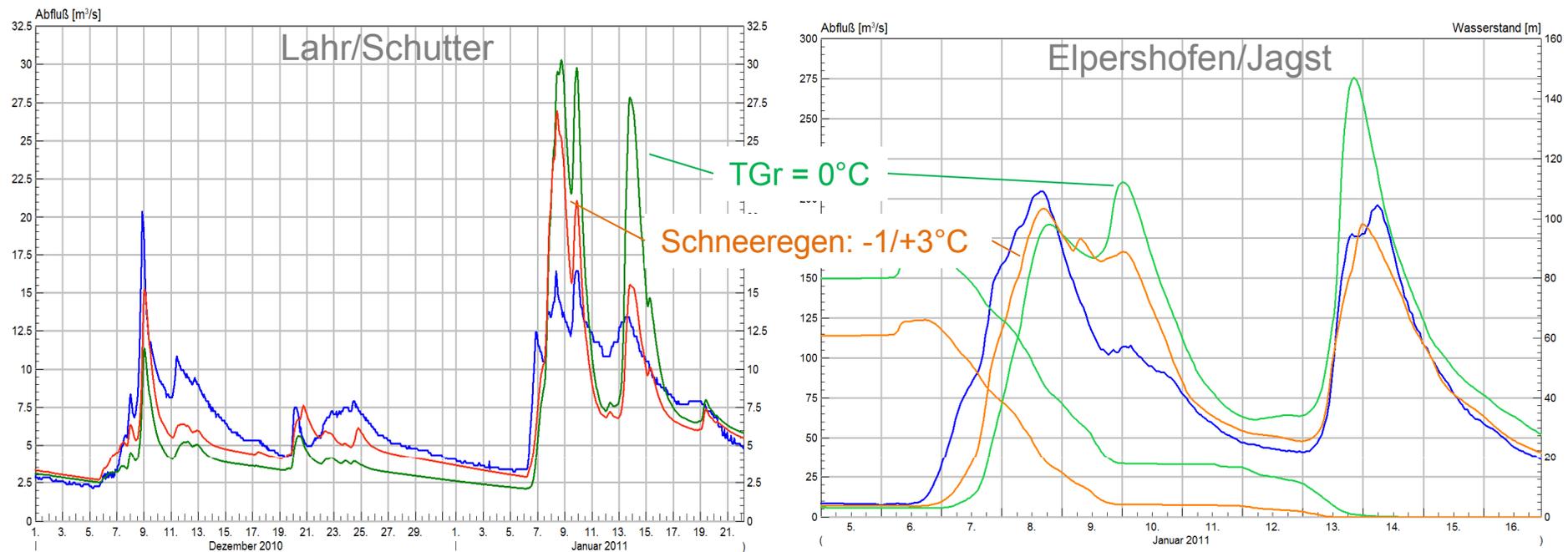


Akkumulation von Schnee: Schneeregen



- Sensitiv (vor allem bei nicht perennierender Schneedecke, nahe TGr / Tmit_Sr)
- Dämpfung der Reaktion im Bereich von TGr / Tmit_Sr
- Tendenziell größere Feuchte der Schneedecke → intensivere Wasserabgabe

Akkumulation von Schnee: Schneeregen



- Test für Oberrheinzuflüsse + Jagst vor allem Winter 2010/2011
- Mit SCHNEEREGEN können Verbesserungen erzielt werden
- 2010/2011: Bessere Aufteilung des Abflusses zwischen Dez.- und Jan.-Ereignis
- Frühere und intensivere Wasserabgabe (Verringerung Lag)
- Tspann_Sr von 4 °C hat sich bisher bewährt
- Übergangsbereich nicht symmetrisch um bisherige TGr, sondern tendenziell tiefer z.B. TGr = 0 °C → -3 °C bis +1 °C (Tmit_Sr = -1 °C, Tspann_Sr = 4 °C)

Akkumulation von Schnee: Schneeregen

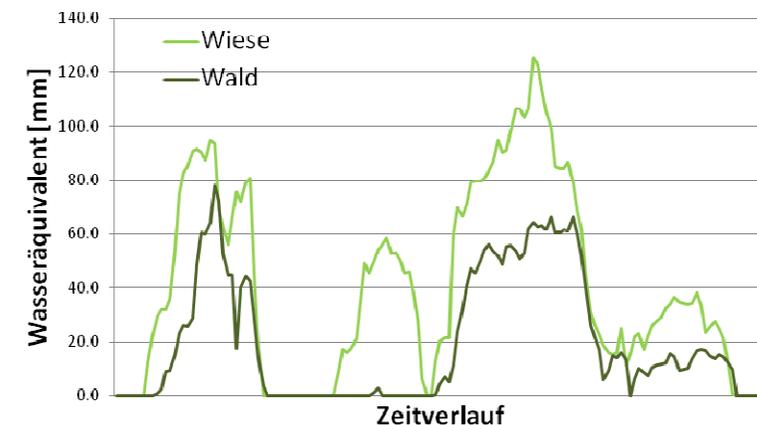
Option SCHNEEREGEN:

- Wird zur Anwendung empfohlen
- Empfehlungen:
 - $T_{\text{spann_Sr}} \sim 4 \text{ } ^\circ\text{C}$
 - $T_{\text{mit_Sr}}$ um 1°C tiefer als bisheriges T_{Gr}
 - T_{Gr} muss weiterhin im tape35 aufgeführt sein
- Die Problematik, dass $T_{\text{Gr}} / T_{\text{spann_Sr}}$ zeitlich variabel ist, bleibt bestehen

Akkumulation von Schnee: Schneeinterzeption

Ausgangslage:

- Interzeption von Schnee wird in LARSIM wie Regen betrachtet
- Schnee auf Kronendach und Sublimation von dort wird nicht gesondert simuliert
- Schneedecke wird nur **unter** Wald simuliert
- Messdaten der Univ. Freiburg für Stationspaare Freiland und Wald im Schwarzwald
- Relevanz der Schneeinterzeption für typische Mittelgebirgsstandorte:
 - (ereignisspezifische) Schneeinterzeption kann um mehrfaches höher sein als (in LARSIM simulierte) maximale Regeninterzeption von ca. 2 mm
 - Anteil Schneeinterzeption am gesamten gefallenen Nied. ~50%



Akkumulation von Schnee: Schneeinterzeption

Verbesserung:

- Die Schneeinterzeption beeinflusst Schneedynamik von Waldstandorten maßgeblich
- Erweiterung des in LARSIM implementierter Ansatz zur (Regen-)Interzeption, um Wirkung der Schneeinterzeption abzubilden
- Die Option SCHNEEINTERZEPTION bewirkt, dass an Waldstandorten zusätzlich zur Berechnung einer Schneedecke am Boden ein Interzeptionsspeicher für Schnee im Kronendach berechnet wird.
- Bei der Schneeinterzeption werden der Rückhalt des fallenden Schnees und die Reifungsprozesse des Schnees auf dem Kronendach berücksichtigt. Dies umfasst Prozesse wie Sublimation und Verdunstung, das Schmelzen und Abtropfen von Schnee sowie die Auswirkungen auf die Schneedecke am Boden.
- Die Schneeinterzeption wird über die Einzelparameter SCHNEEINZ KAPAZITAET und SCHNEEINZ RATE gesteuert. Die Angaben für die Einzelparameter werden im <tape10> definiert.

Akkumulation von Schnee: Schneeinterzeption

- SCHNEEINZ KAPAZITAET:
 - Parametrisierung der Interzeptionskapazität für Schnee auf dem Kronendach über die Parameter SCHNEEINZ KAPAZITAET. Nach Erreichen der max. Interzeptionskapazität gelangt zusätzlich fallender Schnee zum Waldboden.

$$F1_{simax} = P1_{simax} + P2_{simax} \cdot LAI$$

$F1_{simax}$	[mm]	Parameter, der die Abhängigkeit der Schneeinterzeptionskapazität vom LAI ausdrückt
LAI	[]	Landnutzungsspezifischer jahreszeitlich variabler Blattflächenindex
$P1_{simax}$	[mm]	Erster Parameterwert (Einzelparameter SCHNEEINZ KAPAZITAET)
$P2_{simax}$	[mm]	Zweiter Parameterwert (Einzelparameter SCHNEEINZ KAPAZITAET)

Akkumulation von Schnee: Schneeinterzeption

- SCHNEEINZ KAPAZITAET:

- Dabei wird auch berücksichtigt, dass kalter, trockener Schnee geringere Adhäsionskräfte hat als wärmerer Schnee:

$$F2_{simax} = 2.0 \quad \text{bei } TLU > -1^{\circ}\text{C}$$

$$F2_{simax} = 2.5 + 0.5 \cdot TLU \quad \text{bei } -1^{\circ}\text{C} \geq TLU \geq -3$$

$$F2_{simax} = 1.0 \quad \text{bei } TLU < -3^{\circ}\text{C}$$

$F2_{simax}$ [] *Parameter zur Berechnung der Schneeinterzeptionskapazität als Funktion der Lufttemperatur*

TLU [°C] *Lufttemperatur*

- Die aktuelle Schneeinterzeptionskapazität $snowint_max$ [mm] ergibt sich aus dem Produkt der beiden Parameter:

$$snowint_max = F1_{simax} \cdot F2_{simax}$$

- Beispielwerte: $P1_{simax} = 8\text{mm}$; $P2_{simax} = 1,5\text{ mm}$
Somit z.B. Nadelwald (LAI 11) bei $TLU < -3^{\circ}\text{C}$: $snowint_max = 24,5\text{ mm}$

Akkumulation von Schnee: Schneeinterzeption

- SCHNEEINZ RATE:
 - Übersteigt die Intensität des Schneefalls die Interzeptionsrate, so landet der über die Interzeptionsrate hinaus fallende Anteil des Schnees auf dem Waldboden.

$$F1_{sirate} = P1_{sirate} + P2_{sirate} \cdot LAI$$

$F1_{sirate}$	[]	<i>Parameter, der die Abhängigkeit der Schneeinterzeptionsrate vom LAI ausdrückt</i>
$P1_{sirate}$	[]	<i>Erster Parameterwert (Einzelparameter SCHNEEINZ RATE)</i>
$P2_{sirate}$	[]	<i>Zweiter Parameterwert (Einzelparameter SCHNEEINZ RATE)</i>

Akkumulation von Schnee: Schneeinterzeption

- SCHNEEINZ RATE:

- Die Schneeinterzeptionsrate hängt von der bereits zurückgehaltenen Menge an Schnee auf dem Kronendach ab. Bis zum Erreichen der Interzeptionskapazität nimmt die Interzeptionsrate mit Menge des bereits zurückgehaltenen Schnees zu:

$$F2_{sirate} = P3_{sirate} \cdot WEQ_{intz}$$

$F2_{sirate}$ [] Parameter, der die Abhängigkeit der Schneeinterzeptionsrate vom bereits zurückgehaltenen Schnee ausdrückt

$P3_{sirate}$ [1/mm] Dritter Parameterwert (Einzelparameter SCHNEEINZ RATE)

WEQ_{intz} [mm] Wasseräquivalent des bereits interziptierten Schnees

- Die aktuelle Schneeinterzeptionsrate [] ergibt sich dann aus der Summe der Parameter $F1_{sirate}$ und $F2_{sirate}$ (mit Maximum = 1) :

$$\text{snowint_rate} = \min(F1_{sirate} + F2_{sirate}; 1)$$

- Beispielwerte: $F1_{sirate} = 0,2$; $F2_{sirate} = 0,02$; $F3_{sirate} = 0,003$.
Somit z.B. Nadelwald (LAI 11) und schneefrei: $\text{snowint_rate} = 0,42$ mm

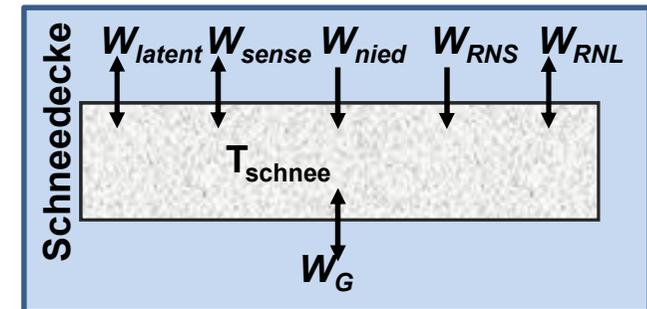
Potentielle Schneeschmelze

- Betrachtete Teilprozesse:

- a) Akkumulation von Schnee

- b) Potentielle Schneeschmelze durch Wärmezufuhr: Modellierung des Wärmehaushaltes und Strahlungshaushalts der Schneedecke

- Bodenwärmestrom W_G
- Eingetragene Wärme aus Niederschlag W_{nied}
- Turbulenter Strom fühlbarer Wärme W_{sense}
- Turbulenter Strom latenter Wärme W_{latent}
- Kurzwellige Strahlungsbilanz W_{RNS}
- Langwellige Strahlungsbilanz W_{RNL}



W_{tot} (Energiebilanz der Schneedecke [W/m^2]):

$$W_{tot} = W_G + W_{nied} + W_{sense} + W_{latent} + W_{RNS} + W_{RNL}$$

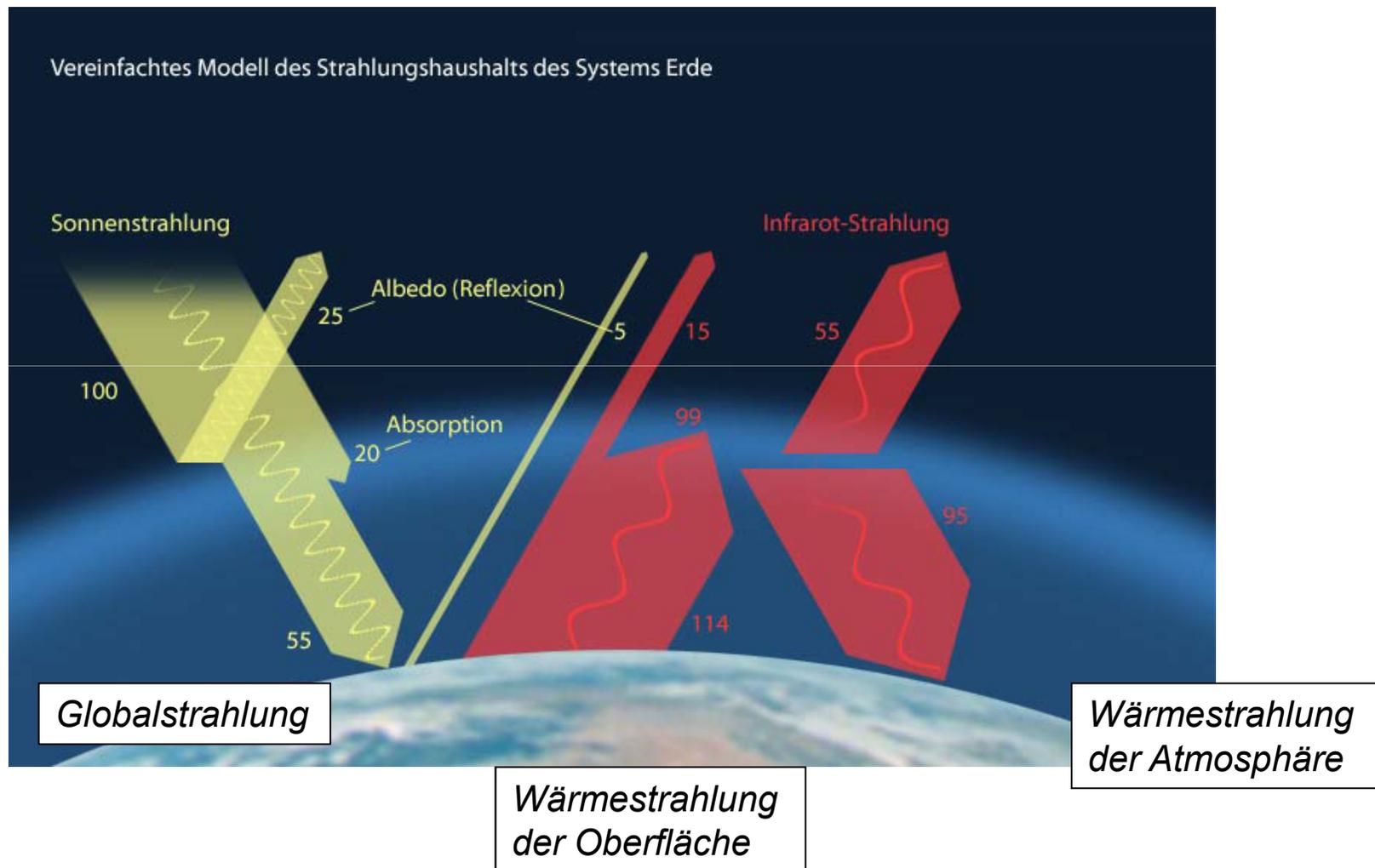
← Knauf vereinfacht →

← Knauf erweitert →

← Vollständige Energiebilanz der Schneedecke →

Potentielle Schneeschmelze

Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:



Potentielle Schneeschmelze

Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:

Langwellige und kurzwellige Strahlung tragen zur Schneeschmelze bei. Auch bei bewölktem Himmel nimmt der Schnee Energie durch die langwellige Strahlung auf.

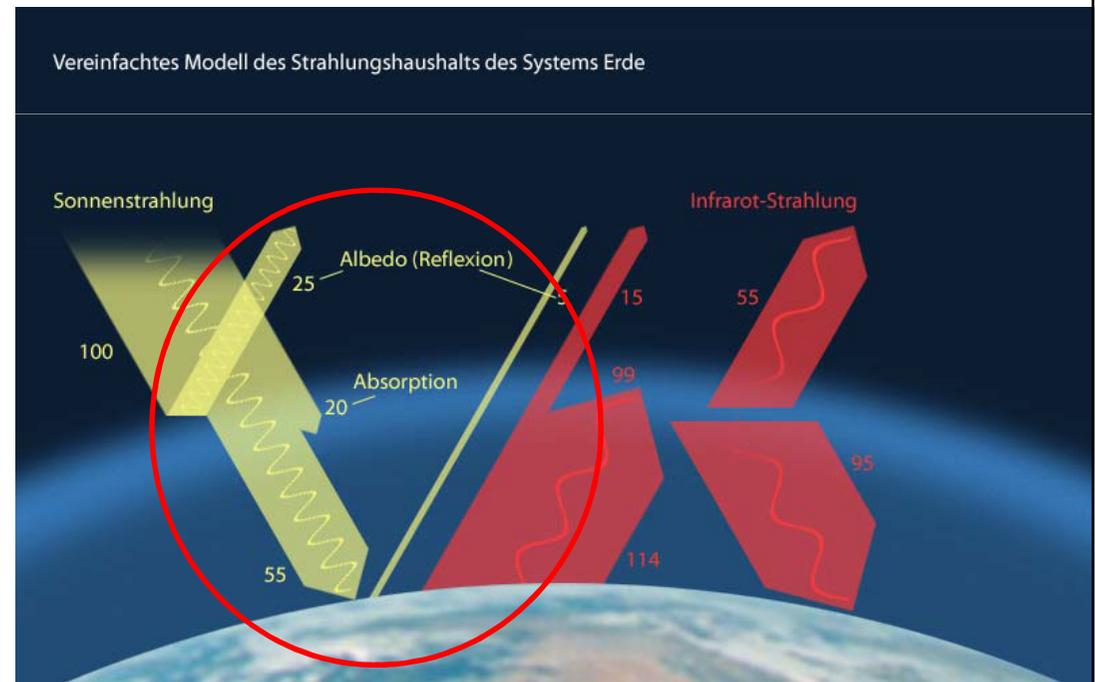
Schnee absorbiert:

- 10 bis 50 % der kurzwelligen Strahlung
- 99 % der langwelligen Strahlung

Ein Großteil der kurzwelligen Strahlung wird an der Schnee-Schneeoberfläche reflektiert.

Albedo: oberflächenabhängige, kurzwellige Reflexionszahl.

Die Schneeralbedo verändert sich bei Alterung der Schneedecke.



Potentielle Schneeschmelze

Kurz- und langwellige Strahlungsbilanz:

Langwellige und kurzwellige Strahlung tragen zur Schneeschmelze bei. Auch bei bewölktem Himmel nimmt der Schnee Energie durch die langwellige Strahlung auf.

Schnee absorbiert:

- 10 bis 50 % der kurzwelligen Strahlung
- 99 % der langwelligen Strahlung

Ein Großteil der kurzwelligen Strahlung wird an der Schnee-Schneeoberfläche reflektiert.

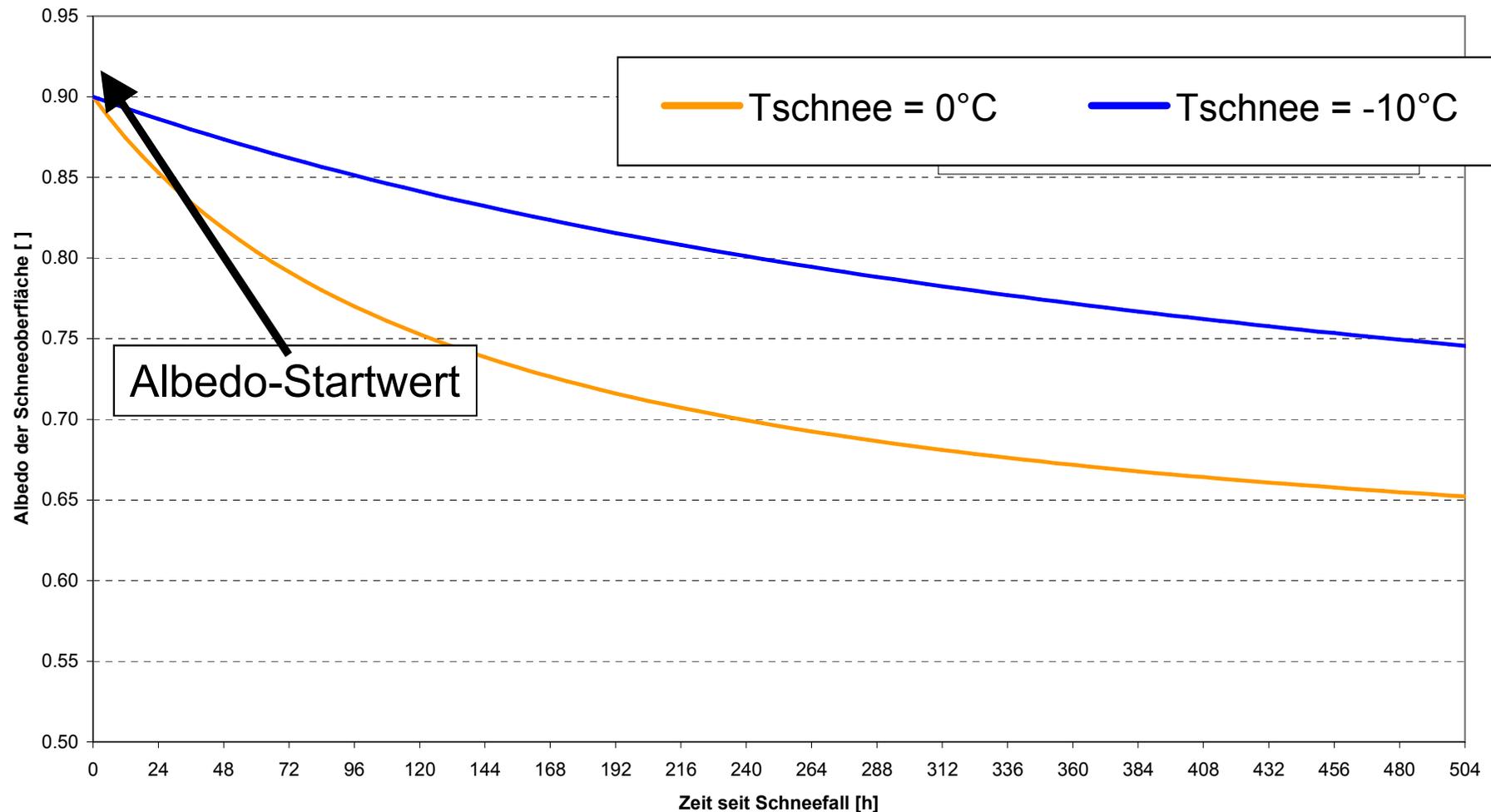
Albedo: oberflächenabhängige, kurzwellige Reflexionszahl.

Die Schneeralbedo verändert sich bei Alterung der Schneedecke.

Schneeform	Albedo
Neuschnee, fein, flockig	etwa 90%
Neuschnee, körnig	80%
Altschnee, je nach Verunreinigung	45-75%
Firn, rein	55%
Gletschereis , stark verschmutzt	13%

Potentielle Schneeschmelze

In LARSIM dynamische Berechnung der Albedo möglich. Abnahme der Albedo vor allem Funktion der Schneetemperatur:

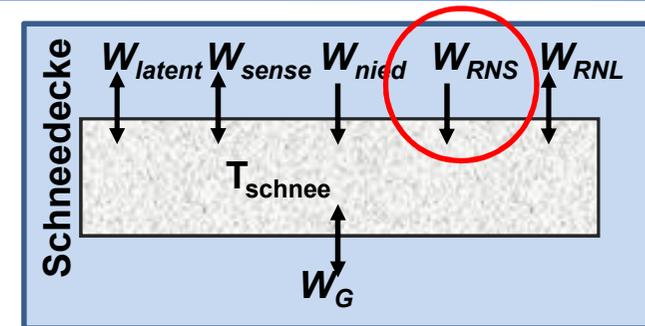


Potentielle Schneeschmelze

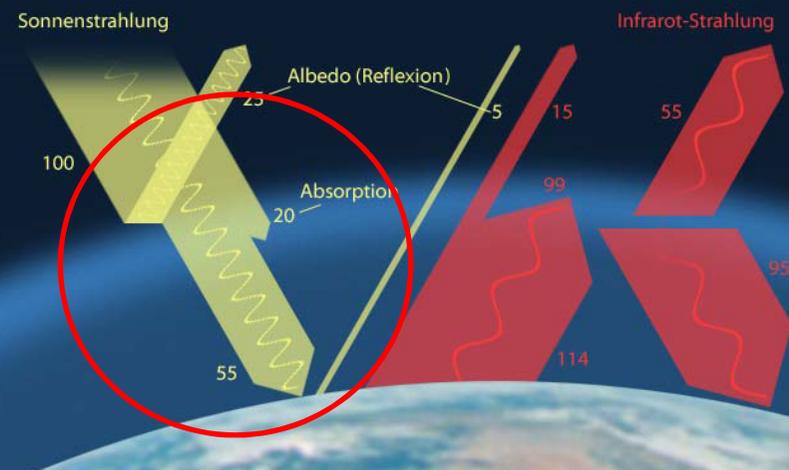
1) Kurzwellige Strahlungsbilanz:

$$W_{RNS} = \varepsilon \cdot R_C$$

- W_{RNS} [W/m²] Kurzwellige Strahlungsbilanz
 R_C [W/m²] Globalstrahlung (aus Messung)
 ε [-] Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung
 (Kalibriergröße Abso: Albedo = 1 - ε), Wertebereich nach Knauf (1980) zwischen 0,02 und 0,6



Vereinfachtes Modell des Strahlungshaushalts des Systems Erde



Potentielle Schneeschmelze

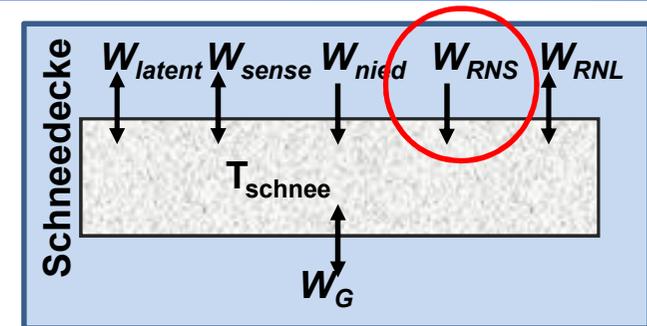
1) Kurzwellige Strahlungsbilanz:

$$W_{RNS} = \varepsilon \cdot R_C$$

W_{RNS} [W/m²] Kurzwellige Strahlungsbilanz

R_C [W/m²] Globalstrahlung (aus Messung)

ε [-] Absorptionskoeffizient für kurzwellige Strahlung
(Kalibriergröße *Abso*: $Albedo = 1 - \varepsilon$), Wertebereich nach
Knauf (1980) zwischen 0,02 und 0,6



Der Absorptionskoeffizient *Abso* wird in LARSIM standardmäßig auf 0,3 gesetzt. Bei Option <EINGABE KNAUF-PARAMETER> kann der Absorptionskoeffizient als Kalibriergröße verwendet werden. Bei Option SCHNEEALBEDO wird durch *Abso* die Albedo der Neuschneedecke (ohne Alterung) definiert.

Potentielle Schneeschmelze

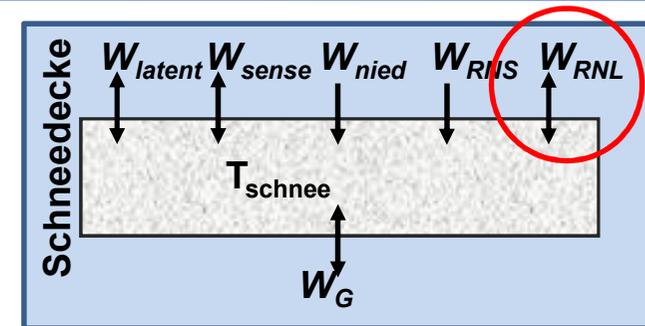
2) Langwellige Strahlungsbilanz:

$$W_{RNL} = R_{Latm} - R_{Lschnee}$$

W_{RNL} [W/m²] Langwellige Strahlungsbilanz

R_{Latm} [W/m²] Wärmestrahlung der Atmosphäre (Gegenstrahlung)

$R_{Lschnee}$ [W/m²] Wärmestrahlung der Schneedecke



Berechnung der Gegenstrahlung analog zum LARSIM-Verdunstungsmodell:

$$R_{Latm} = 1,28 \cdot \sigma \cdot (T_{Luft} + 273,15)^4 \cdot \left(\frac{e}{T_{Luft} + 273,15} \right)^{1/7} \cdot \left(1 + 0,22 \cdot \left(\frac{n}{N} \right)^2 \right)$$

R_{Latm} [W/m²] Wärmestrahlung der Atmosphäre (Gegenstrahlung)

σ [W/(m² K⁴)] Stefan-Boltzmann-Konstante (= 5,67×10⁻⁸ W/(m² K⁴))

e [hPa] Wasserdampfdruck der Luft (ermittelt aus rel. Feuchte)

T_{Luft} [°] Lufttemperatur

Potentielle Schneeschmelze

2) Langwellige Strahlungsbilanz:

Die Abstrahlung der Schneedecke wird mit Hilfe der Stefan-Boltzmann-Gleichung aus der Temperatur der Schneedecke ermittelt:

$$R_{L\text{Schnee}} = \sigma \cdot (T_{\text{Schnee}} + 273,15)^4$$

$R_{L\text{Schnee}}$ [W/m²] *Wärmestrahlung der Schneedecke*

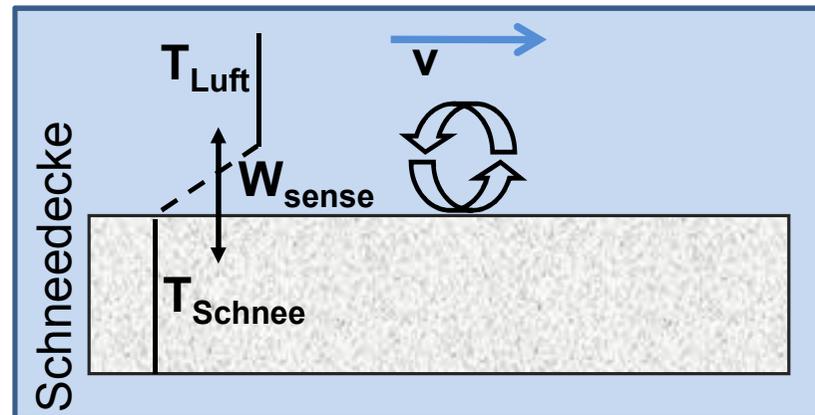
T_{Schnee} [°C] *Temperatur der Schneedecke*

Die Temperatur der Schneedecke wird (ebenso wie deren Kälteinhalt) im vorliegenden Fall dynamisch aus der Energiebilanz berechnet (siehe unten).

Sowohl die kurzwellige wie auch die langwellige Strahlungsbilanz werden an Waldstandorten durch die Abschattung und die Wärmestrahlung der Vegetation beeinflusst. Dies wird in LARSIM berücksichtigt.

Potentielle Schneeschmelze

3) Turbulenter Strom fühlbarer Wärme:



W_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
T_{Schnee}	$[^{\circ}C]$	Temperatur der Schneedecke
T_{Luft}	$[^{\circ}C]$	Lufttemperatur
v	$[m/s]$	Windgeschwindigkeit

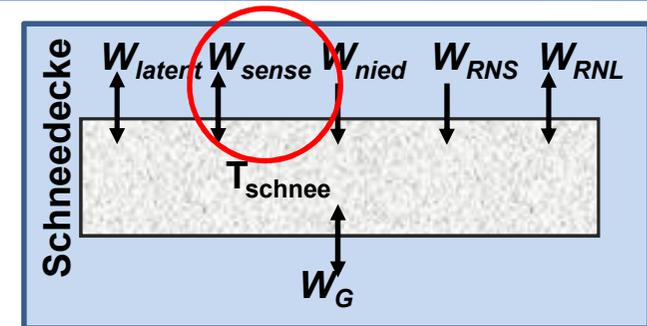
Aerodynamischer Ansatz mit Transferkoeffizient = $f(v)$

Potentielle Schneeschmelze

3) Turbulenter Strom fühlbarer Wärme:

$$W_{sense} = (a_0 + a_1 \cdot v) \cdot (T_{Luft} - T_{Schnee})$$

W_{sense}	$[W/m^2]$	Strom fühlbarer Wärme
v	$[m/s]$	Windgeschwindigkeit (aus Messung)
a_0	$[W/(m^2 \text{ } ^\circ C)]$	Konstante im turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,5 - 3,5 $W/(m^2 \text{ } ^\circ C)$
a_1	$[J/(m^3 \text{ } ^\circ C)]$	Konstante zur Berechnung des windabhängigen Terms des turbulenten Übergangskoeffizient; Wertebereich nach Knauf: 0,8 - 2,5 $J/(m^3 \text{ } ^\circ C)$

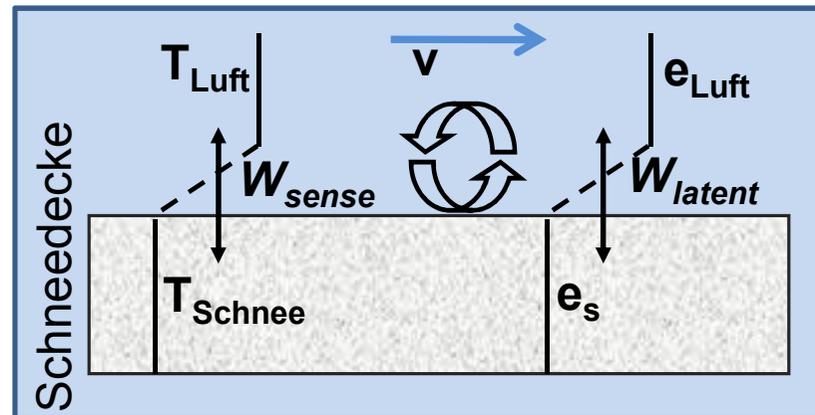


Die Konstanten a_0 und a_1 werden in LARSIM standardmäßig auf 2,0 und 1,6 gesetzt. Bei Option <EINGABE KNAUF-PARAMETER> können sie als Kalibriergrößen verwendet werden.

Der windabhängige turbulente Wärmeaustausch an der Schneeoberfläche wird bei Waldstandorten durch die Verringerung der Windgeschwindigkeit abgeschwächt. Dies wird über den Windfaktor F_{wind} berücksichtigt.

Potentielle Schneeschmelze

3) Turbulenter Strom fühlbarer und latenter Wärme:

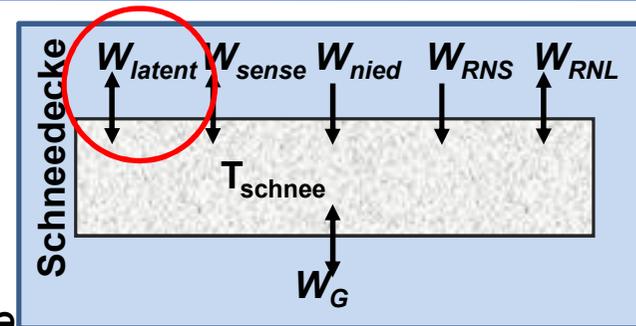


W_{sense}	[W/m ²]	Strom fühlbarer Wärme
T_{Schnee}	[°C]	Temperatur der Schneedecke
T_{Luft}	[°C]	Lufttemperatur
v	[m/s]	Windgeschwindigkeit
W_{latent}	[W/m ²]	Strom latenter Wärme (Verdunstung, Kondensation, Sublimation)
e_s	[hPa]	Wasserdampfdruck an der Schneeoberfläche
e_{Luft}	[hPa]	Wasserdampfdruck in der Luft

Potentielle Schneeschmelze

4) Turbulenter Strom latenter Wärme:

$$W_{\text{latent}} = (a_0 + a_1 \cdot v) \cdot (\beta \cdot (e_{\text{Luft}} - e_s(T_{\text{Schnee}})))$$



W_{latent} [W/m²]

Strom latenter Wärme
(Verdunstung, Kondensation, Sublimation)

e_s [hPa]

Wasserdampfdruck an der Schneeoberfläche
(ermittelt über Lufttemperatur)

e_{Luft} [hPa]

Wasserdampfdruck in der Luft (ermittelt aus rel. Feuchte)

1,76 [°C/hPa]

Kehrwert der Psychrometerkonstante über Eis bzw. Schnee (Knauf 1980)

a0 [W/(m² °C)]

Konstante im turbulenten Übergangskoeffizient;
Wertebereich nach Knauf: 0,5 - 3,5 W/(m² °C)

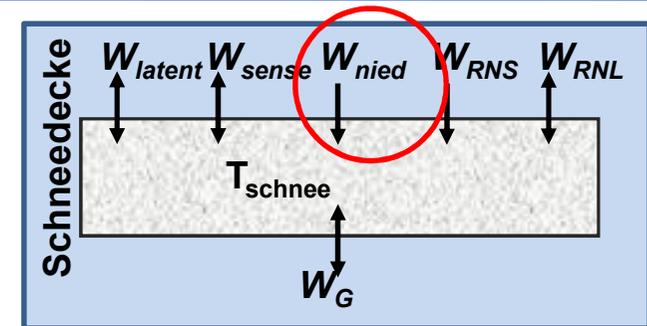
a1 [J/(m³ °C)]

Konstante zur Berechnung des windabhängigen Terms des turbulenten Übergangskoeffizient;
Wertebereich nach Knauf: 0,8 - 2,5 J/(m³ °C)

Potentielle Schneeschmelze

5) Eingetragene Wärme aus Niederschlag:

$$W_{\text{nied}} = \frac{N \cdot T_{\text{nied}} \cdot c_{p_{\text{wasser}}}}{t_a \cdot 3600}$$



W_{nied}	$[W/m^2]$	Wärmestrom durch Niederschlag
N	$[mm]$	Niederschlagsmenge im Zeitschritt (entspricht $[kg/m^2]$) (aus Messung)
T_{nied}	$[^\circ C]$	Temperatur des flüssigen Niederschlags (Differenz zu $0^\circ C$)
$c_{p_{\text{wasser}}}$	$[J/(kg \ ^\circ C)]$	Wärmekapazität von flüssigem Wasser, programminterne Konstante nach DWD 1987: $4186,8 J/(kg \ ^\circ C)$
t_a	$[h]$	Rechenschrittweite

Bei Schneeniederschlag: Schneetemperatur von $0^\circ C$ (keine Erhöhung des „Kälteinhalts“ der Schneedecke).

Potentielle Schneeschmelze

5) Eingetragene Wärme aus Niederschlag:

Im Regelfall wird dem flüssigen Niederschlag die aktuelle Lufttemperatur zugewiesen:

$$T_{nied} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} T_{Luft} \\ 0 \end{array} \right\}$$

T_{Luft} [°C] Lufttemperatur (aus Messung)

Bei Option <T GR. AUCH S-SCHMELZ>:

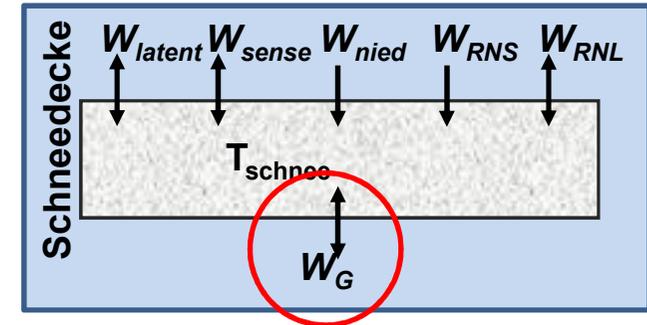
$$T_{nied} = \text{Max} \left\{ \begin{array}{l} T_{Luft} - T_{gr} \\ 0 \end{array} \right\}$$

T_{gr} [°C] Grenztemperatur für den Übergang von Schnee in Regen (Kalibriergröße)

Potentielle Schneeschmelze

6a) Statischer Bodenwärmestrom:

$$W_G = i_G \cdot \frac{r_{\text{schmelz}}}{3600}$$



W_G [W/m²] Bodenwärmestrom

i_G [mm/h] Parameter des Bodenwärmestroms, Wertebereich nach Knauf zwischen 0,01 mm/h und 0,05 mm/h, entspricht ~ 0,9 W/m² bis 4,6 W/m²

r_{schmelz} [J/kg] Schmelzwärme des Wassers (programminterne Konstante nach DWD 1987: 334000 J/kg)

Quotient 3600: Umrechnungsfaktor von Stunden auf Sekunden (somit von J/h/m² in W/m² (mit Annahme Dichte flüssiges Wasser: 1 kg/l)).

Der Parameter i_G wird in LARSIM standardmäßig auf 0,03 mm/h gesetzt. Bei Option <EINGABE KNAUF-PARAMETER> kann i_G pegelkontrollbereichsspezifisch als Kalibriergröße verwendet werden.

Potentielle Schneeschmelze

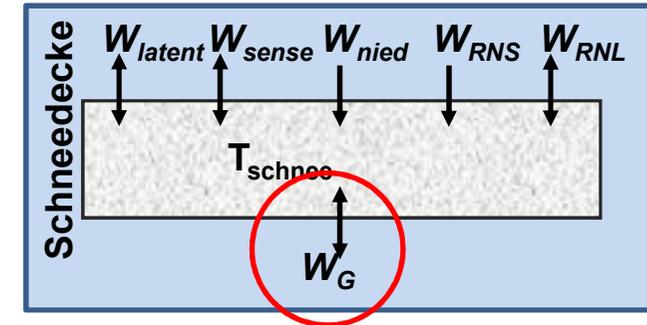
6b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Der Bodenwärmestrom ist außer für die Schneeschmelze auch durch eine mögliche „Frost-Versiegelung“ des Bodens für die Abflussbildung relevant.

Die oberste Bodenschicht kann vereinfacht in der Energiebilanz mit betrachtet werden. Somit ergibt sich ein Temperaturgradient zwischen oberem Boden und Schneedecke → dynamische Simulation des Bodenwärmestroms.

Zudem wird der Anteil des gefrorenen Bodenwassers am Gesamtwasser-gehalt der oberflächennahen Bodenschicht berechnet.

- Option BODENTEMPÉRATUR
- Einzelparameter FROST-VERSIEGEL-FAK

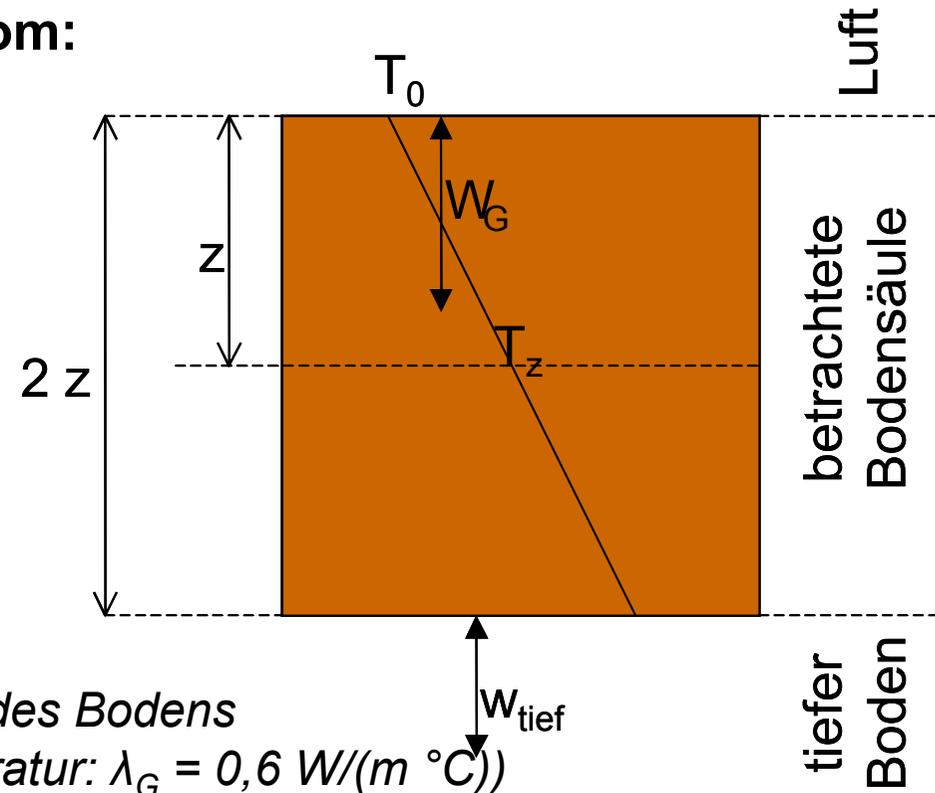


Potentielle Schneeschmelze

6b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Vereinfachte dynamische Berechnung des Bodenwärmestroms für oberflächennahes Bodenvolumen:

$$W_G = -\lambda_G \cdot \frac{T_0 - T_z}{z} \cdot \Delta t$$



W_G [W/m²] Bodenwärmestrom

λ_G [W/(m °C)] Wärmeleitfähigkeit des Bodens
(Mittelwert aus Literatur: $\lambda_G = 0,6$ W/(m °C))

T_z [° C] Mittlere Bodentemperatur (berechnet aus Energiegehalt E_G)

T_0 [° C] Temperatur der Bodenoberfläche (Luft- oder Schneetemperatur)

W_{tief} [W/m²] Wärmestrom vom tieferen Untergrund

z [cm] Oberflächennahe Schicht $2z = 20$ cm

Potentielle Schneeschmelze

6b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

- Energiegehalt der Bodenschicht E_G ergibt sich aus $W_G + W_{\text{tief}}$

$$E_G^t = E_G^{t-1} + W_G + W_{\text{tief}}$$

- Wärmestrom aus tiefer Schicht W_{tief} nach MORECS (mittlere Werte der Wärmespeicherung im Boden für die Monate Jan. bis Dez.)
- Wenn Energiegehalt $E_G < 0 \text{ J/m}^2$: Bodentemperatur $\leq 0^\circ\text{C}$, Bodenwasser gefroren.
- Mit Energiegehalt
 - + Wärmekapazität des Bodens
 - + Gefrieren und Tauen des Bodenwassers
 - T_z (Mittlere Bodentemperatur)
 - SFF (Anteil des gefrorenen Wassers am gesamten Bodenwasser)
- So ermittelter Wert für W_G wird in Schneemodell verwendet
 - SFF kann für Berechnung der Frost-Versiegelung verwendet werden

Potentielle Schneeschmelze

6b) Dynamischer Bodenwärmestrom:

Anteil gefrorenes Bodenwasser (SFF)

→ Mögliche Wirkung der Frostversiegelung

Wirkung ?

Wenn, dann nur wenige Ereignisse (Ausmaß der Bodengefrorenis hängt maßgeblich vom Vorhandensein, der Zeitdauer und der Mächtigkeit einer Schneedecke ab).

Oberflächennahe Bodengefrorenis aufgrund zahlreicher Einflüsse (z.B. Vegetationsbedeckung) räumlich sehr heterogen verteilt.

- Steuerung der Wirkung der Bodengefrorenis über Einzelparameter
FROST-VERSIEGEL-FAK **FrostFak**

$FrostFak = 0$ → Keine Frostversiegelung bei Abflussbildung

$FrostFak > 0$ → Mehr Direktabfluss bei gefrorenem Boden (z.B. $FrostFak = 2$
→ hohe Wirkung)

Potentielle Schneeschmelze

Kälteinhalt der Schneedecke und Schneetemperatur:

- Kälteinhalt: erforderliche Energie, um Schneepaket bis auf 0°C zu erwärmen
- Die Schneedecke kann erst schmelzen, nachdem sie zuvor bis auf 0°C erwärmt wurde, der Kälteinhalt also gleich Null ist.

$$W_{\text{kälte}} = \frac{(\text{WEQ}_{\text{ts}} \cdot c_{p_{\text{eis}}} + (\text{WEQ}_{\text{tot}} - \text{WEQ}_{\text{ts}}) \cdot c_{p_{\text{wasser}}}) \cdot T_{\text{Schnee}}}{t_a \cdot 3600}$$

$W_{\text{kälte}}$	[W/m ²]	Kälteinhalt der Schneedecke
WEQ_{ts}	[mm]	Wasseräquivalent des trockenen Schnees
WEQ_{tot}	[mm]	Wasseräquivalent der gesamten Schneedecke
$c_{p_{\text{eis}}}$	[J/(kg °C)]	Wärmekapazität von gefrorenem Wasser (programminterne Konstante nach DWD 1987: 2090 J/(kg °C))

- Aus dem Kälteinhalt wird die Schneetemperatur ermittelt.
- Zudem wird in LARSIM die Abweichung der Schneetemperatur an der Oberfläche von der mittleren Schneedeckentemperatur berechnet.

Potentielle Schneeschmelze

Potentielle Schneeschmelze:

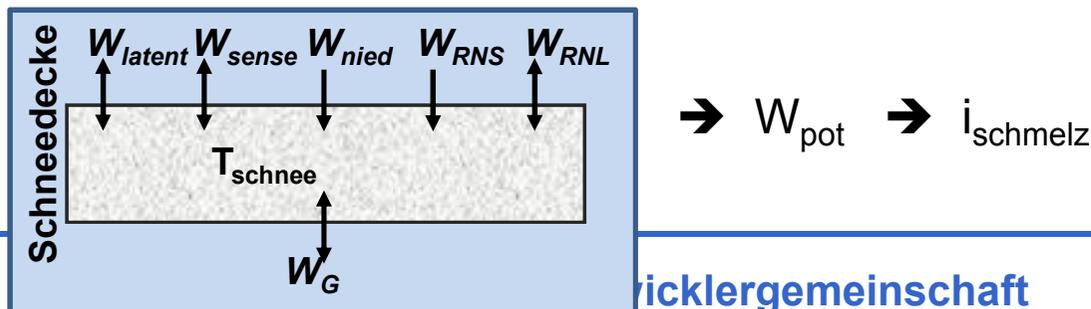
- Die Veränderung des Kälteinhalts ergibt sich aus der Energiebilanz der Schneedecke im aktuellen Zeitschritt W_{tot} .
- Sofern im aktuellen Zeitschritt mehr Energie zugeführt wird, als für die Erwärmung der Schneedecke auf 0°C erforderlich ist, steht die verbleibende Energie für die potentielle Schneeschmelze zur Verfügung:

$$i_{\text{schmelz}} = 3600 \cdot \frac{W_{\text{pot}}}{r_{\text{schmelz}}}$$

i_{schmelz} [mm/h] Schmelzrate

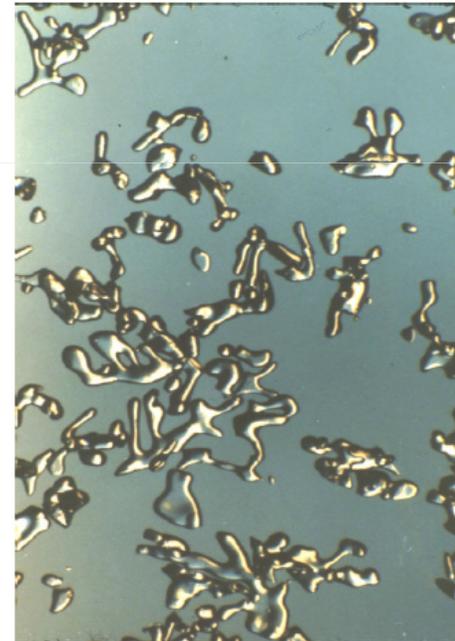
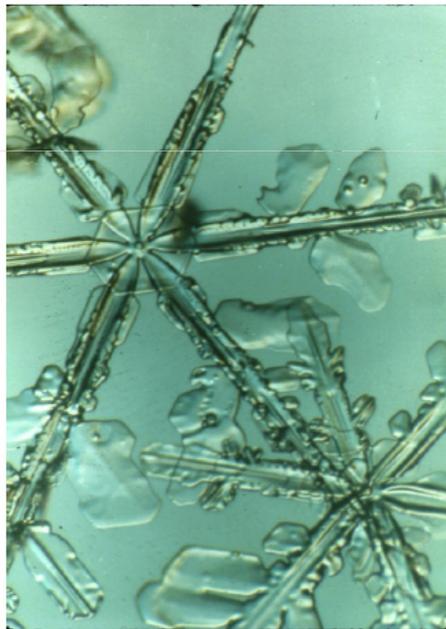
W_{pot} [W/m²] Verbleibende Energie zur Erwärmung der Schneedecke

r_{schmelz} [J/kg] Schmelzwärme des Wassers (programminterne Konstante nach DWD 1987: 334000 J/kg)



Setzung der Schneedecke

- Betrachtete Teilprozesse:
 - a) Akkumulation von Schnee
 - b) Potentielle Schneeschmelze durch Wärmezufuhr: Modellierung des Wärmehaushaltes und Strahlungshaushalts der Schneedecke
 - c) Setzung (Kompaktion) der Schneedecke als Folge des zunehmenden Anteils von flüssigem Wasser



Schneemetamorphose

Setzung der Schneedecke

- Betrachtete Teilprozesse:
 - a) Akkumulation von Schnee
 - b) Potentielle Schneeschmelze durch Wärmezufuhr: Modellierung des Wärmehaushaltes und Strahlungshaushalts der Schneedecke
 - c) Setzung (Kompaktion) der Schneedecke als Folge des zunehmenden Anteils von flüssigem Wasser
 - Wasser aus Schmelzvorgang sowie aus Regenniederschlägen auf Schneedecke wird zunächst in Schneedecke gespeichert (v.a. bei geringen Lagerungsdichten des Schnees)
 - Anteil des flüssigen Wassers am gesamten Wasseräquivalent des Schnees steigt auf Kosten des gefrorenen Anteils
 - Lagerungsdichte Schnee erhöht sich
 - Abgabe von Wasser aus der Schneedecke erst nach Überschreitung eines Grenzwertes der Lagerungsdichte der Schneedecke
 - für die aktuellen Schneeschmelze Berechnung des Gehaltes von flüssigem Wasser innerhalb der Schneedecke erforderlich

Setzung der Schneedecke

Berechnung des Rückhalts von flüssigem Wasser, die damit einhergehende Setzung sowie die verzögert einsetzende Wasserabgabe aus der Schneedecke (tatsächliche Schmelze) mit dem Snow-Compaction-Verfahren nach Bertle.

Beschreibung der Schneedecke und deren Zustand durch den Gesamt-Wassergehalt (WEQ_{tot}) und den Wassergehalt des gefrorenen Schnees (Trockenschnee, WEQ_{ts}):

$$P_W = 100 \cdot \frac{WEQ_{tot}}{WEQ_{ts}}$$

P_W [%] *Gesamtes Wasseräquivalent in Prozent des gefrorenen Wasseräquivalents*

- a) Schnee auf Schneedecke: Erhöhung von WEQ_{tot} und WEQ_{ts} um den gefallenen Schneeniederschlag.
- b) Regen auf Schneedecke: Erhöhung von WEQ_{tot} , WEQ_{ts} unverändert.
- c) Potentielle Schmelze infolge eines Energieüberschusses: Verringerung von WEQ_{ts} , WEQ_{tot} unverändert

Setzung der Schneedecke

Flüssiges Wasser wird bis zum Erreichen eines Schwellenwerts für das maximal speicherbare Gesamtwasseräquivalent in der Schneedecke zurückgehalten:

$$P_{W,max} = \frac{10000}{100 - S_{ret}}$$

$P_{W,max}$	[%]	<i>Schwellenwert des maximal speicherbaren Gesamtwasseräquivalents in Prozent des gefrorenen Wasseräquivalents</i>
S_{ret}	[%]	<i>Parameter für die maximale Schneeretention (optionaler Kalibrierparameter: 5 – 47%; Standardwert in LARSIM: 30 %)</i>

Wasserabgabe aus der Schneedecke, wenn $P_{W,max}$ durch die Zufuhr flüssigen Wassers aus potentieller Schmelze oder Regen überschritten wird (tatsächliche Schmelze). Dabei wird so viel Wasser abgegeben, bis P_W dem maximal möglichen Wert $P_{W,max}$ entspricht.

Setzung der Schneedecke

Berechnung der aktuellen Schneehöhe:

$$P_H = c1 - c2 \cdot P_W$$

$$c1 = 100 \cdot \frac{\rho_{\max} - \rho_{ts}}{\rho_{\max} \cdot \frac{S_{ret}}{100}}$$

$$c2 = \frac{c1}{100} - 1$$

P_H	[%]	Schneehöhe in Prozent der Ausgangshöhe
P_W	[%]	Akkumuliertes Wasseräquivalent in Prozent des gefrorenen Wasseräquivalents
ρ_{\max}	[kg/cbm]	Kritische Lagerungsdichte des Schnees (in LARSIM: 420 kg/cbm)
ρ_{ts}	[kg/cbm]	Dichte des Neuschnees (in LARSIM: 130 kg/cbm)
S_{ret}	[]	Maximale Schnee-Retention

Setzung der Schneedecke

Berechnung der aktuellen Schneehöhe:

Ausgangsschneehöhe:

$$SH_{ts} = 1000 \frac{WEQ_{ts}}{\rho_{ts}}$$

SH_{ts} [mm] (Fiktive) Höhe des gefrorenen Anteils des Schnees
(Trockenschnee-Höhe)

Tatsächliche Schneehöhe:

$$SH_{tot} = \frac{P_H}{100} \cdot SH_{ts}$$

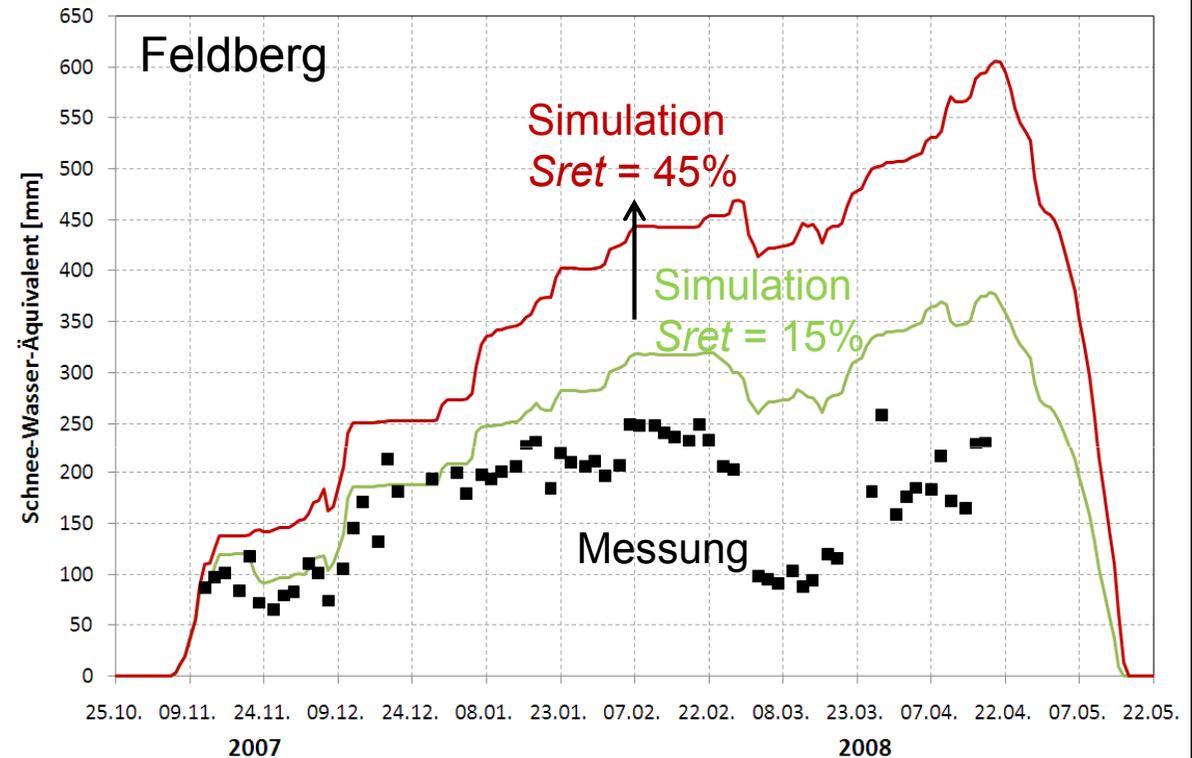
SH_{tot} [mm] Tatsächliche Schneehöhe

Setzung der Schneedecke

Max. Schnee-Ret. (S_{ret}) – Setzung nach Bertle:

Wirkungsweise:

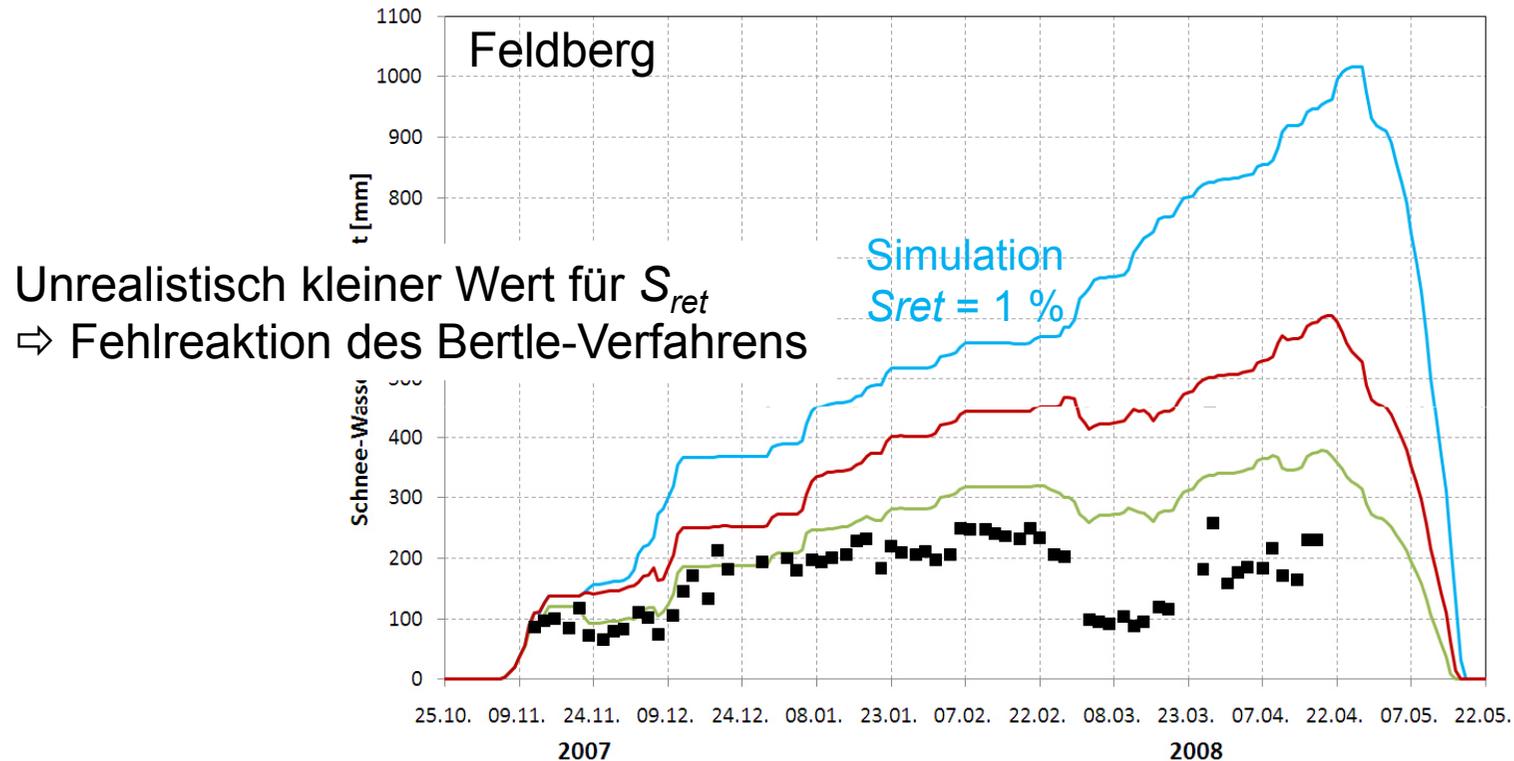
- Rückhalt in Schneedecke nimmt mit S_{ret} zu
- Schmelze wird geringer
- Schneedecke wird mächtiger



- PKB-spezifische Eichung des Parameters (S_{ret}) möglich.
⇒ Eichung sinnvoll (in merklich schneebeeinflussten Gebieten)

Setzung der Schneedecke

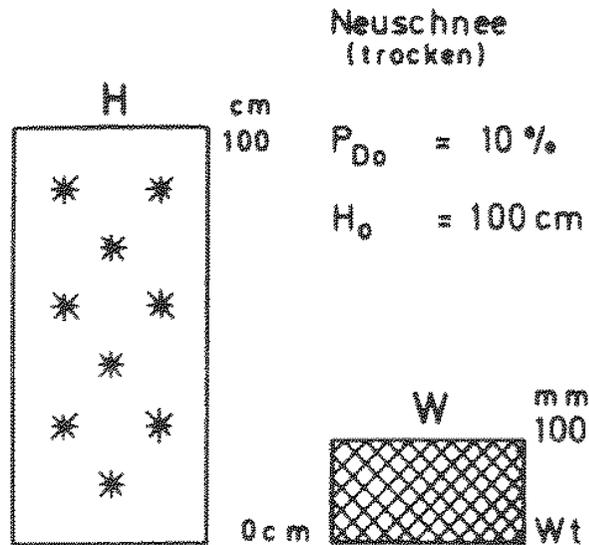
Zulässiger Wertebereich Max. Schnee-Ret. :



⇒ Physikalisch zulässiger Wertebereich für S_{ret} : $\geq 5\%$ - 47%

Setzung der Schneedecke

a) Ausgangszustand



Schneehöhe Wasseräquivalent

$$P_D = P_{D0} \quad W_t = 100 \text{ mm}$$

$$H = 100 \text{ cm}$$

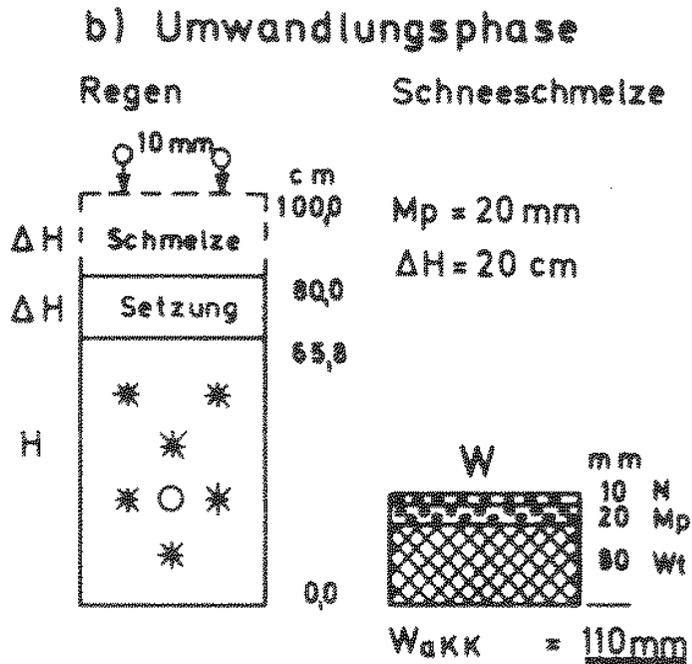
$$P_D = \frac{W_{akk}}{H} \cdot 100 = 100 \%$$

$$P_t = \frac{W_t}{H} \cdot 100 = 10 \%$$

Knauf 1980

- Lagerungsdichte Trockenschnee (= Neuschneedichte), Wertebereich 5 % - 20 %, hier:
 $P_t = 10 \%$
- Schneehöhe: $H = 100 \text{ cm}$
- Wasseräquivalent: $W = 100 \text{ mm}$
(= W_{akk} (WEQ_{tot}) = W_t)
- Feuchtegehalt: $W_f = 0 \%$

Setzung der Schneedecke



$$P_W = \frac{W_{akk}}{W_t} \cdot 100 = 137,5 \%$$

$$P_H = 82,23 \% \quad (\text{Gl. 7})$$

$$H = 0,822 \cdot 80 = 65,8 \text{ cm}$$

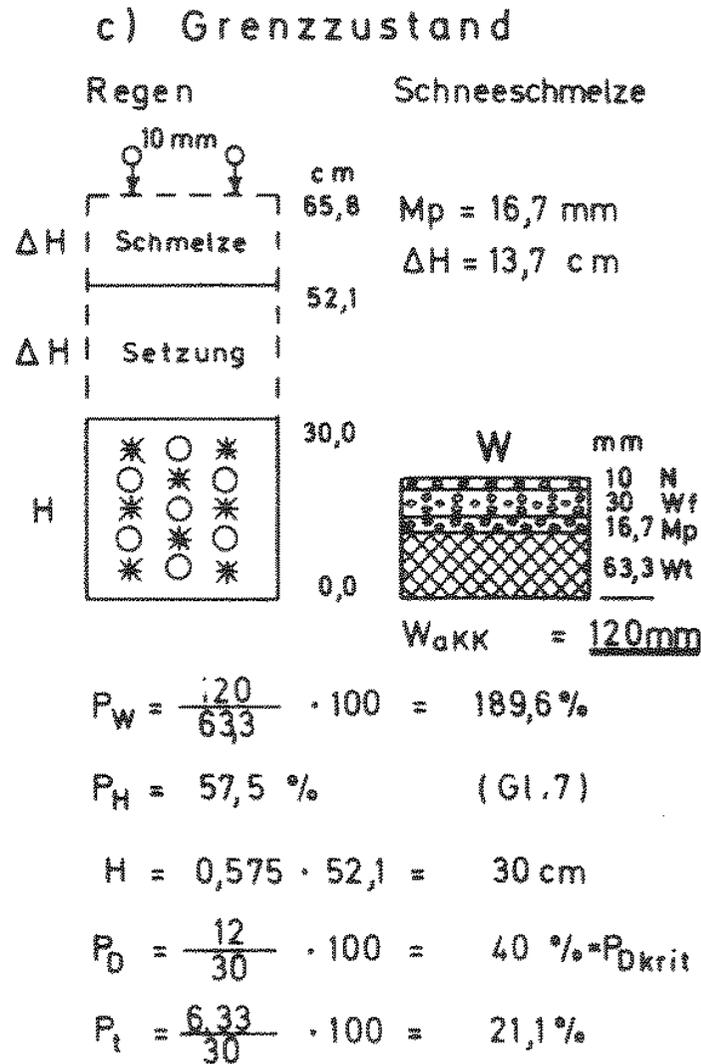
$$P_D = \frac{W_{akk}}{H} \cdot 100 = 16,7 \%$$

$$P_t = \frac{W_t}{H} \cdot 100 = 12,16 \%$$

Knauf 1980

- Potentielle Schmelzrate aus Energiebilanz:
 $M_p = 20 \text{ mm}$
- Zudem Regen: $N = 10 \text{ mm}$
- -> Aktueller Wassergehalt:
 $W_{akk} = 110 \text{ mm}$
- -> Freies Wasser: $W_f = 30 \text{ mm}$
- Akkumuliertes Wasseräquivalent in Schneedecke:
 $P_W = 110 \text{ mm} / 80 \text{ mm} = 137,5 \%$
- -> Schneehöhe in % von Ausgangshöhe nach Gleichung Snow Compaction:
 $P_H = 82,23 \%$
- -> Schneehöhe nach Setzung:
 $H = 0,822 \cdot 80 \text{ cm} = 65,8 \text{ cm}$
- -> Lagerungsdichte Schnee aktuell
 $P_D = 110 \text{ mm} / 658 \text{ mm} \cdot 100 = 16,7 \%$
- Lagerungsdichte Trockenschnee:
 $P_t = 80 \text{ mm} / 658 \text{ mm} \cdot 100 = 12,2 \%$

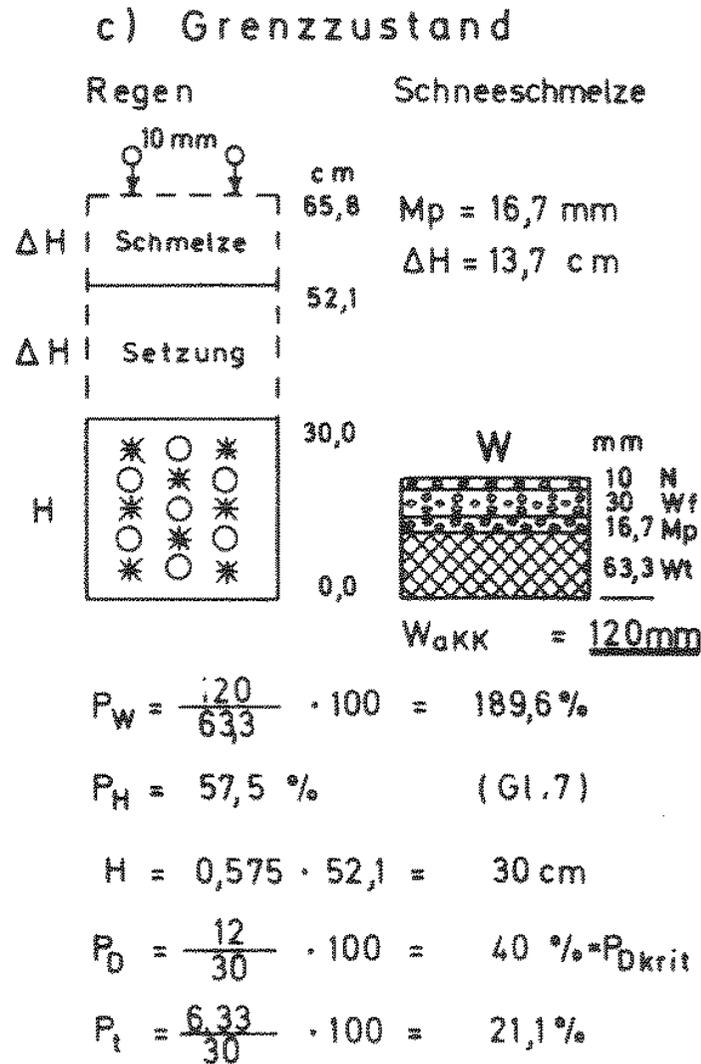
Setzung der Schneedecke



Knauf 1980

- Potentielle Schmelzrate aus Energiebilanz:
 $M_p = 16,7 \text{ mm}$
- Mit $P_t = 12,16\%$ aus b) ergibt sich Trockenschneehöhenänderung
 $dH = 16,7 \text{ mm} / 0,1216 = 137 \text{ mm}$
- $\rightarrow H \text{ vor Setzung} = 65,8 \text{ cm} - 13,7 \text{ cm} = 52,1 \text{ cm}$
- M_p stammt aus Wasseräquivalent Trockenschnee W_t , somit
 $W_t = 80 \text{ mm} - 16,7 \text{ mm} = 63,3 \text{ mm}$
- Weiterhin Regen: $N = 10 \text{ mm}$, zudem W_f aus b) = 30 mm \rightarrow Aktueller Wassergehalt:
 $W_{akk} = 120 \text{ mm}$
- \rightarrow Freies Wasser: $W_f = 56,7 \text{ mm}$
- Akkumuliertes Wasseräquivalent in Schneedecke:
 $P_W = W_{akk} / W_t = 189,6\%$

Setzung der Schneedecke



Knauf 1980

- > Schneehöhe in % von Ausgangshöhe nach Gleichung:
 $P_H = 57,5\%$
- > Schneehöhe:
 $H = 0,575 \cdot 52,1 = 30\text{ cm}$
- > Lagerungsdichte Schnee aktuell $P_D = W_{akk}/H \cdot 100 = 40\%$
- Kritische Lagerungsdichte $P_{Dkrit} = 40\%$ - 45%, daher bisher noch alles Wasser in Schneedecke
- > Lagerungsdichte Trockenschnee:
 $P_t = W_t/H \cdot 100 = 21,1\%$

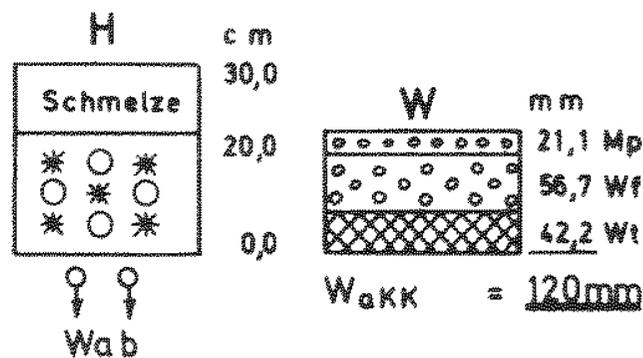
Setzung der Schneedecke

d) Wasserabgabe

Schneeschnmelze

$$M_p = 21,1 \text{ mm}$$

$$\Delta H = 10,0 \text{ cm}$$



$$W_{\max} = P_{D_{\text{krit}}} \cdot H = 80 \text{ mm}$$

$$W_{\text{ab}} = W_{\text{akk}} - W_{\max} = 40 \text{ mm}$$

$$P_D = \frac{80}{20} \cdot 100 = 40 \%$$

$$P_t = \frac{4,22}{20} \cdot 100 = 21,1 \%$$

- Da keine Setzung erfolgt, kann aus dem überschüssigen Wasseräquivalent eine Entleerung der Schneedecke durch die Wasserabgabe W_{ab} erfolgen:

- $W_{\text{ab}} = 120 \text{ mm} - 80 \text{ mm} = 40 \text{ mm}$

- Lagerungsdichte Schnee aktuell

$$P_D = W_{\text{akk}}/H * 100 = 40 \%$$

- Lagerungsdichte Trockenschnee:

$$P_t = W_t/H * 100 = 21,1\%$$

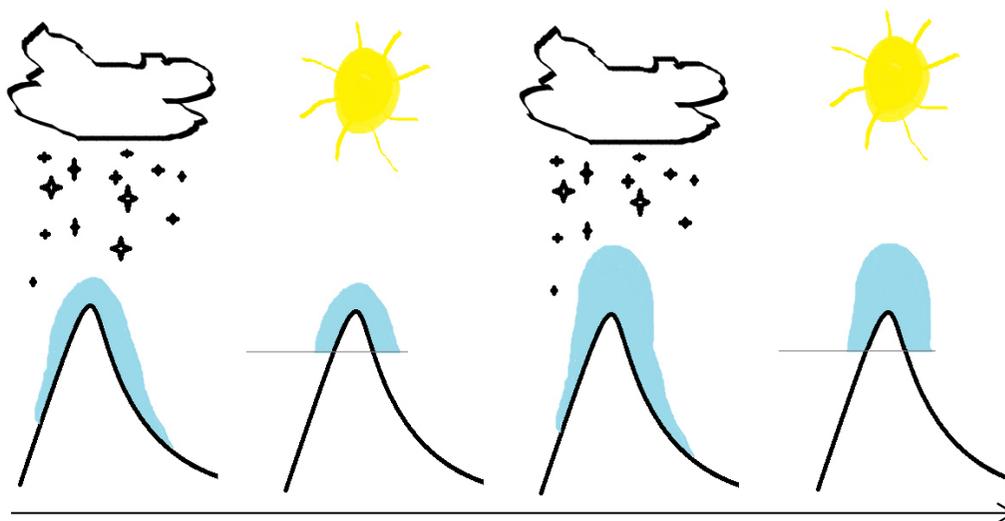
Knauf 1980

Schneemassentransport

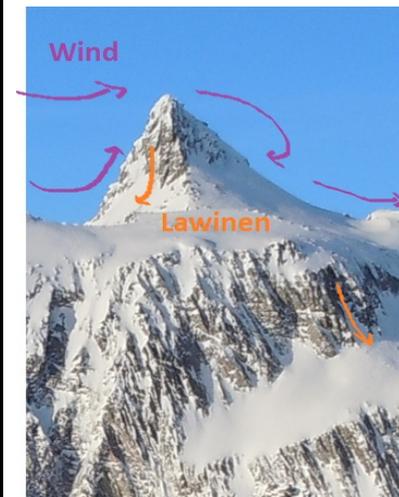
Option Massentransport Schnee:

- Einfache Berücksichtigung des Massentransports von Schnee und Eis (Schneedrift, Lawinen, Gletscherfließen) zur Vermeidung eines kontinuierlichen Aufbaus der Schneedecke, wenn in sehr hochgelegenen (nivalen) Gebieten in der Bilanz mehr Schnee akkumuliert als abschmilzt und sublimiert.

Im Modell



In der Realität



Schneemassentransport

Option Massentransport Schnee:

- Einfache Berücksichtigung des Massentransports von Schnee und Eis (Schneedrift, Lawinen, Gletscherfließen) zur Vermeidung eines kontinuierlichen Aufbaus der Schneedecke, wenn in sehr hochgelegenen (nivalen) Gebieten in der Bilanz mehr Schnee akkumuliert als abschmilzt und sublimiert.
- Annahmen:
 - Schnee kann in Abhängigkeit vom Gefälle nur bis zu einer bestimmten Menge akkumulieren.
 - Wird der Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation überschritten, wird der den Schwellenwert überschreitende Anteil des Schnees in das nachfolgende Teilgebiet verfrachtet.
 - Wird auch für dieses Teilgebiet der Schwellenwert überschritten, wird der überschüssige Schnee weiter flussabwärts verfrachtet usw.
- Der Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation (ausgedrückt als Schneewasseräquivalent in mm) wird teilgebietsspezifisch als Funktion des mittleren Gefälles im Teilgebiet bestimmt.

Schneemassentransport

Option Massentransport Schnee:

- Der zu verfrachtende Schnee wird für jede Landnutzung bzw. für jedes Unterteilgebiet separat bestimmt.
- Das mittlere Gefälle des Teilgebiets wird anhand der Höhenangaben aus der Gebietsdatei <tape12> bestimmt.
- Zuführung von Schnee zu einem Teilgebiet, in dem bereits Schnee liegt: die internen Schneezustandsgrößen zur Berechnung der Setzung (wie z.B. Schneedichte und Temperatur der Schneedecke) bleiben für das Teilgebiet unverändert. Das Wasseräquivalent des Trockenschnees sowie die Schneehöhe des Trockenschnees bzw. Gesamtschnees werden im selben Verhältnis, in dem das Wasseräquivalent der Schneedecke verändert wurde, korrigiert.
- Zuführung von Schnee zu einem schneefreien Teilgebiet: Zuordnung von plausiblen Standardwerten zu den internen Schneezuständen.

Schneemassentransport

Massentransport Schnee:

- Teilgebietsspezifischer Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation:

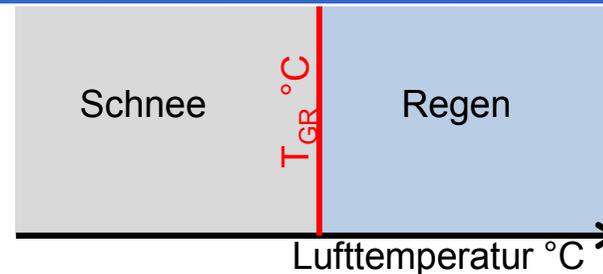
$$SW_{\text{transp}} = MSW \cdot \left(\frac{100 + SpwPr}{100} - \frac{SpwPr}{50 \cdot (1 + \exp(\gamma \cdot (MGef - Gef)))} \right)$$

<i>MSW</i>	<i>[mm]</i>	<i>Mittlerer Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation bei mittlerem Gefälle (SCHNEEAKKU MAX MM)</i>
<i>SpwPr</i>	<i>[%]</i>	<i>Spannweite des Schwellenwerts bezogen auf den mittleren Schwellenwert (SCHNEEAKKU SPANNE %)</i>
<i>Mgef</i>	<i>[%]</i>	<i>Gefälle bei dem der Schwellenwert dem mittleren Schwellenwert entspricht (SCHNEEAKKU GEFAEL %)</i>
<i>γ</i>	<i>[]</i>	<i>Maß für die Steigung der Funktion bei mittlerem Gefälle (SCHNEEAKKU STEIGUNG)</i>

Zusammenfassung: Schneemodellierung in LARSIM

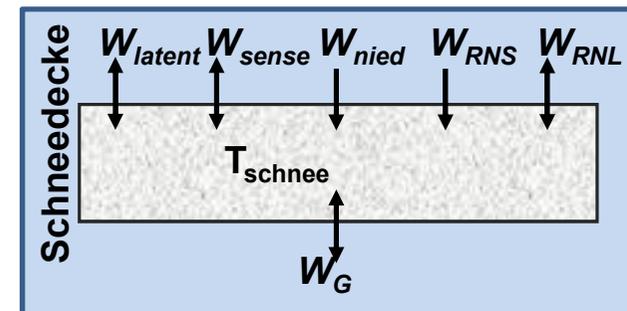
• Akkumulation von Schnee

- $T_{\text{Luft}} < T_{\text{Gr}} \rightarrow$ Schneefall
Aufbau der Schneedecke mit trockenem Neuschnee
- Schneeinterzeption



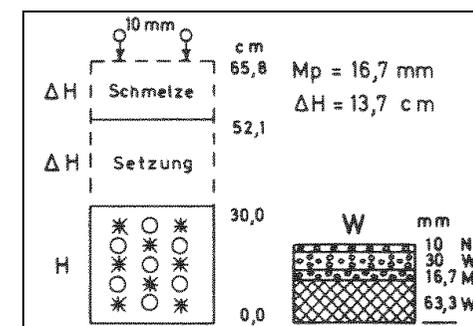
• Energiebilanz der Schneedecke

- Temperatur der Schneedecke und potentielle Schmelze
- Vollständige Energiebilanz



• Setzung und Wasserabgabe

- Rückhalt flüssigen Wassers in der Schneedecke und tatsächliche Wasserabgabe
- Bertle-Verfahren



• Schneemassentransport

Literatur

Knauf 1980: Die Berechnung des Abflusses aus einer Schneedecke. In: DVWK (Hrsg.) (1980): Analyse und Berechnung oberirdischer Abflüsse. DVWK-Schriften, Heft 46, 95-135. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn.