

Berechnung von Gebietsniederschlag, Interzeption, Verdunstung und Schnee im Wasserhaushaltsmodell LARSIM

Dr.-Ing. Kai Gerlinger

HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft

Juni 2020

Meteorologische Antriebsdaten

Erforderliche meteorologische Daten für das Wasserhaushaltsmodell:

- Niederschlag
- Sonnenscheindauer/Globalstrahlung
- Relative Luftfeuchte
- Lufttemperatur
- Windgeschwindigkeit
- Luftdruck

Niederschlag

Systematischer Niederschlagsmessfehler:

- Die Messung unterschätzt den wahren Niederschlag allgemein:
 - Deformation des Windfeldes über dem Messgerät
 - Verluste durch Spritzwasser und Schneeverfrachtung
- Der Messfehler entsteht also:
 - durch das Messgerät selbst
 - durch meteorologische Faktoren (v.a. Wind)
- Korrektur u.a. durch das Verfahren nach Sevruk in LARSIM möglich



BLfU 2020

Niederschlag

Korrektur des Gebietsniederschlags:

Zudem: Korrekturfaktor K_G für die Umrechnung der punktbezogenen Messdaten in Gebietsniederschläge. Dadurch kann berücksichtigt werden, dass die punktuellen Messungen möglicherweise nicht repräsentativ für das jeweilige Einzugsgebiet sind:

$$N_{G,korr} = N_{korr} \cdot K_G$$

$N_{G,korr}$	[mm]	Um den Messfehler korrigierter repräsentativer Gebietsniederschlag für ein Teileinzugsgebiet
K_G	[-]	Korrekturfaktor für die Umrechnung von punktuell gemessenen Niederschlägen auf die Teilgebietsfläche

Der K_G -Faktor wird bei der Modell-Kalibrierung bestimmt (Wertebereich 0,9 bis 1,1).

Anstelle des K_G -Faktors kann auch ein Faktor für die Korrektur des Wasserdargebots vorgegeben werden (KWD-Faktor) (v.a. Karstgebiete).

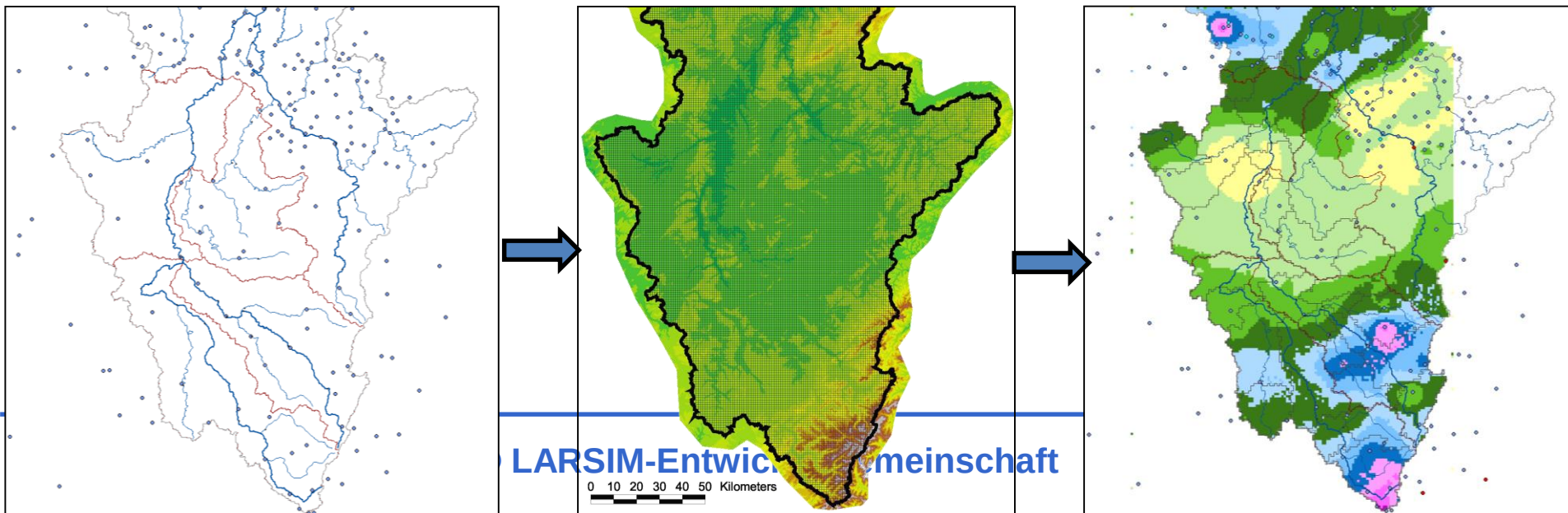
In der Regel wird für den operationellen Betrieb der Modelle K_G bzw. KWD auf den Wert 1 gesetzt, da dann durch die Modellnachführung des Wasserdargebots eine Veränderung des Wasserdargebots erfolgt. Zudem würde sonst K_G bzw. KWD auch auf die Radar-Niederschläge angewandt werden.

Interpolation

Interpolation der meteorologischen Daten:
Übertrag der punktuellen Messung auf das Einzugsgebiet:

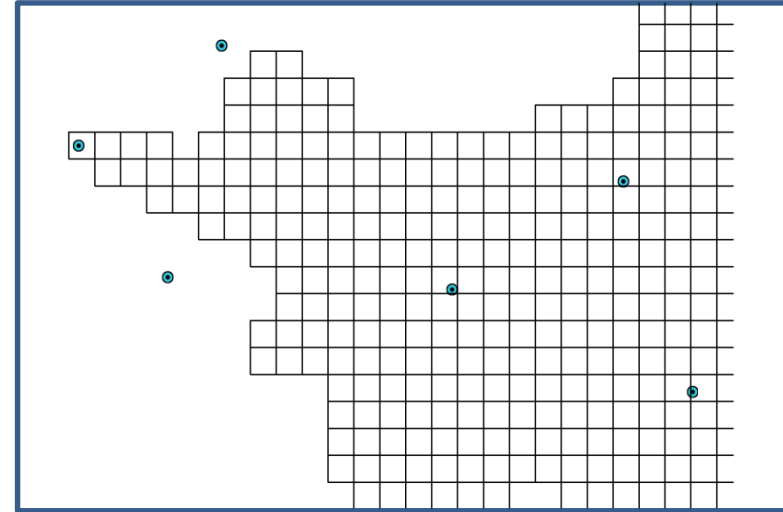
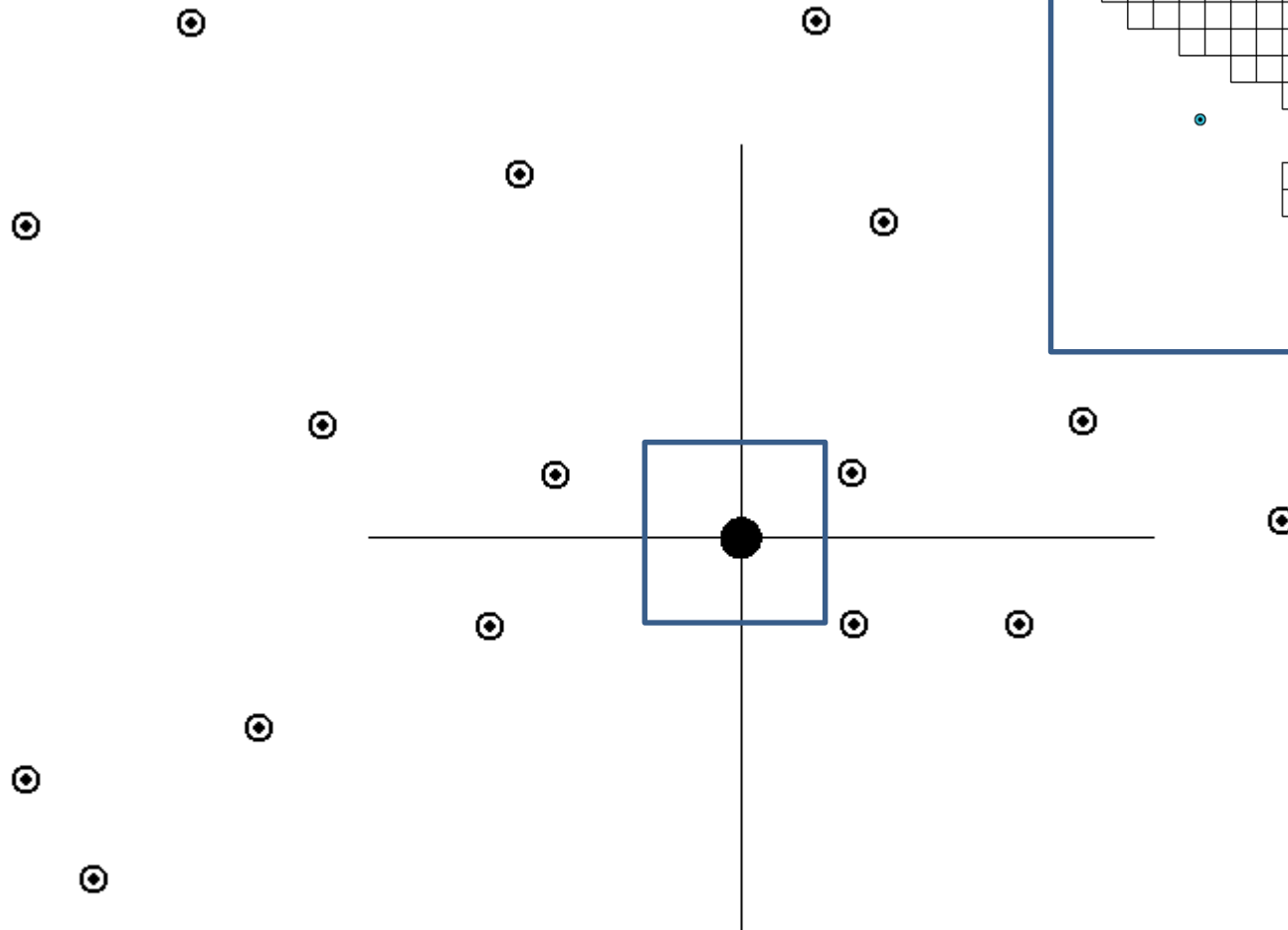


BLfU 2020



Interpolation

Niederschlagsinterpolation:
Übertrag der punktuellen Messung auf das Einzugsgebiet
mit dem Rasterpunktverfahren



Interpolation

Übertrag der punktuellen Messung auf das Einzugsgebiet:

Standard in LARSIM: Rasterpunktverfahren (oder: Inverses Distanz-Verfahren) mit Höhen-gewichtung (auf ähnlicher Höhe liegende Station wird stärker gewichtet als eine Station mit unterschiedlicher Höhe)

Optional für Niederschläge: Berücksichtigung eines Höhengradienten bei der Interpolation der Niederschläge zur Abbildung orographisch bedingter Niederschlagszunahmen mit der Höhe (v.a. in alpinen Gebieten)

Niederschlag

Erfassung des Niederschlags mit RADAR



DWD 2012

Niederschlag

Erfassung des Niederschlags mit RADAR

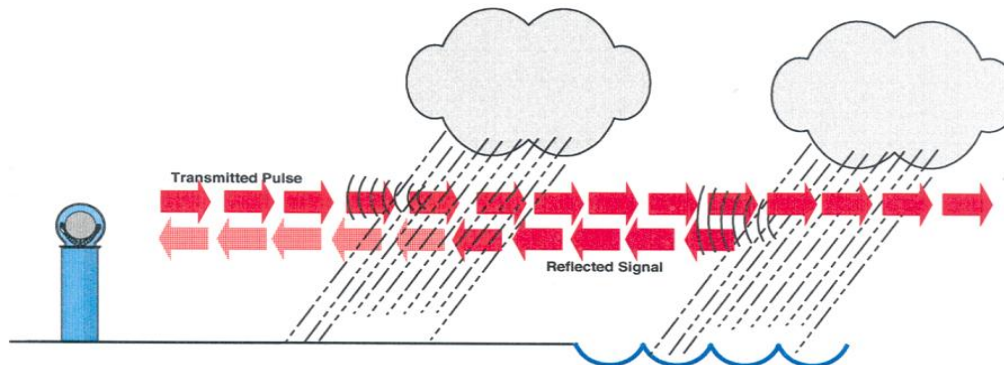
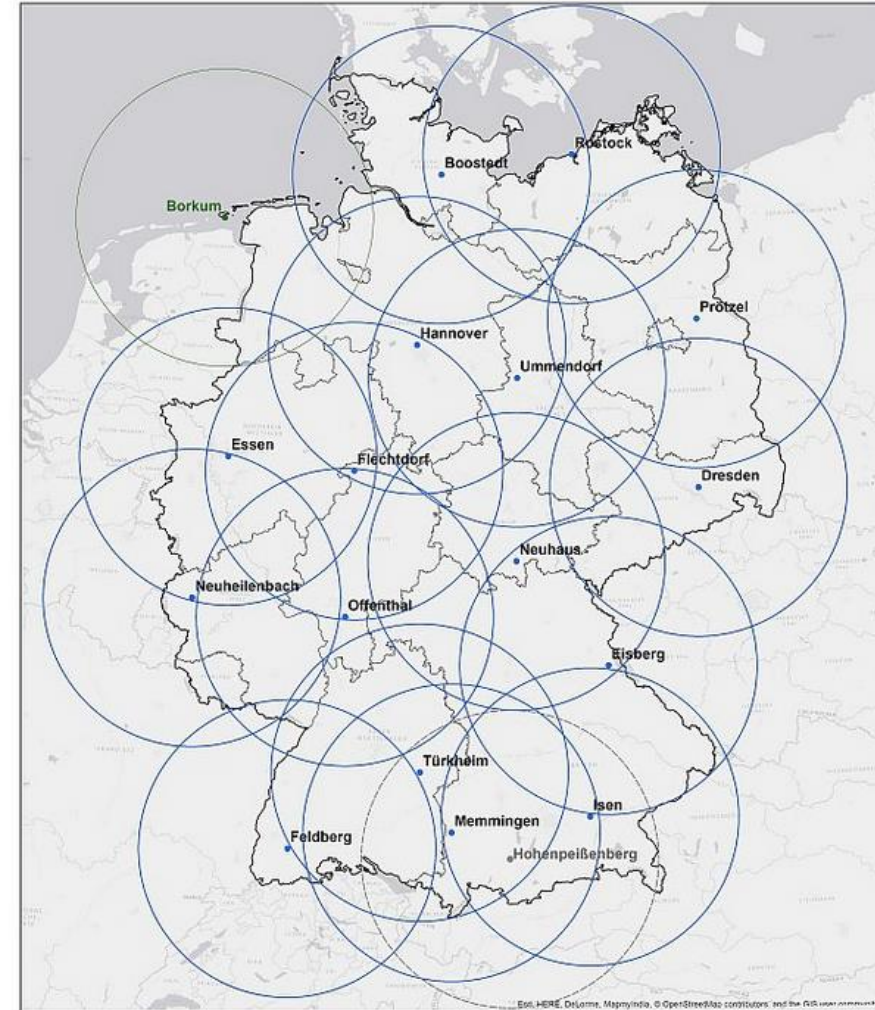


Figure 3b- Proper Wavelengths Pass Through Precipitation And Produce Useful Reflections

Radarverbund des Deutschen Wetterdienstes Deutscher Wetterdienst
Wetter und Klima aus einer Hand



- Legende**
- operationelles Verbundradar
 - Qualitätssicherungsradar
 - Ausfallsicherungsradar (Ersatz für Radarstandort Emden)
 - 150 km Abdeckungsradius

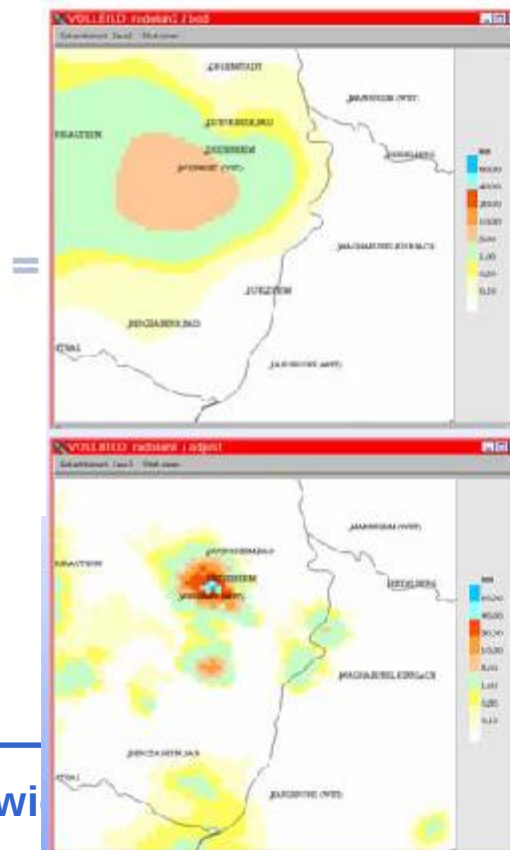
0 20 40 80 120 160
Kilometer
Maßstab 1:3.000.000
Stand: 07.03.2018 © GeoBasis-DE / BKG 2017

DWD 2020

Niederschlag

Erfassung des Niederschlags mit RADAR

RADOLAN: Verbesserung der räumliche Verteilung der Messdaten unter Zuhilfenahme von Radarbildern (stündlich angeeichte Radarniederschlags-Daten im 1 x 1 km-Raster)



**Interpoliertes
Bodennieder-
schlagsbild**

**07.08.2004
13.50 UTC**

**Angeeichtes
Radarnieder-
schlagsbild
aus RADOLAN1
(„Onlineaneichung“)**

**07.08.2004
13.50 UTC**

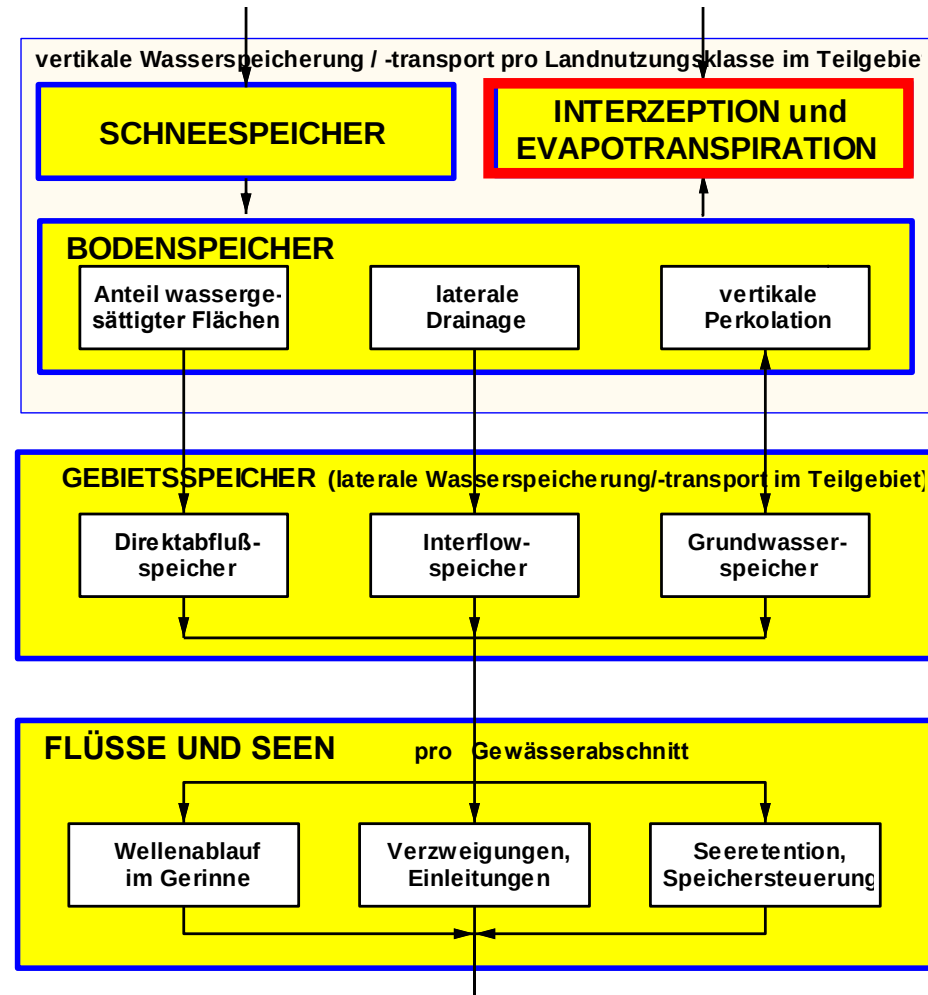
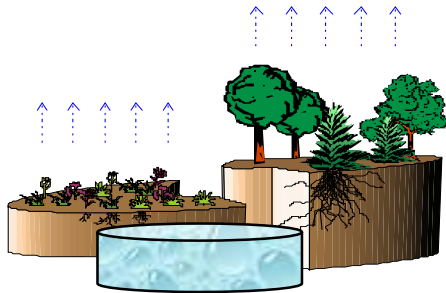
Guenther 2005

Meteorologische Daten

- Aufgaben für den Anwender:
 - Sehr genaue Prüfung der gemessenen Stationsdaten auf Plausibilität, räumliche bzw. zeitliche Konsistenz, ...
 - Prüfung der interpolierten Daten
 - Vergleich der gemessene Stationsdaten des Niederschlags mit Radolan-Daten
 - Einfluss Korrekturfaktor KG (bzw. KWD) beim Niederschlag berücksichtigen
 - Einfluss systematischer Niederschlagsmessfehler berücksichtigen
- Einflussmöglichkeiten des Anwenders:
 - Eingriff in Meteo-Daten wenn erforderlich (Station auf Fehlwerte setzen z.B.)
 - Wahl, ob gemessener Niederschlag oder RADOLAN verwendet wird
 - Veränderung Korrekturfaktor KG/KWD
 - Begrenzung maximale Sevruk-Korrektur beim Niederschlag
 - Berechnung ohne Niederschlagskorrektur

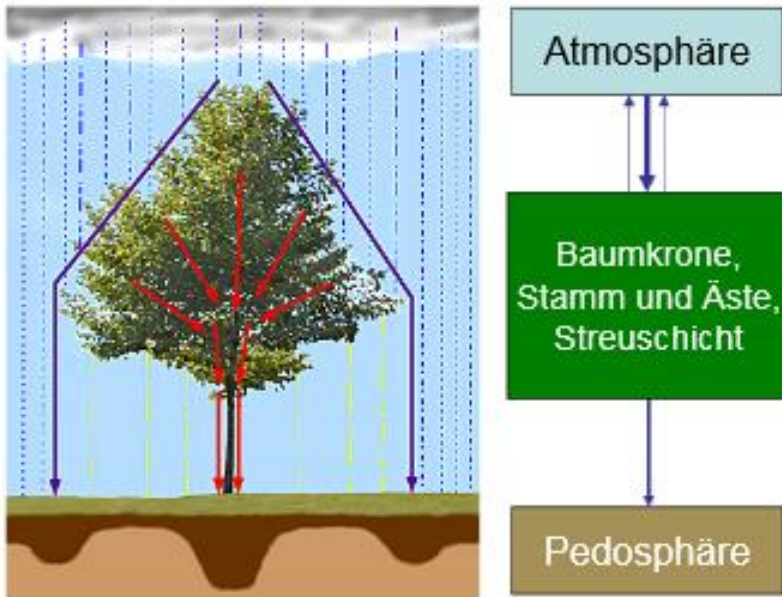
Interzeption und Evapotranspiration

- Vertikale Wasserspeicherung /-entzug durch Interzeption und Evapotranspiration pro Landnutzungs-kategorie und Teilgebiet



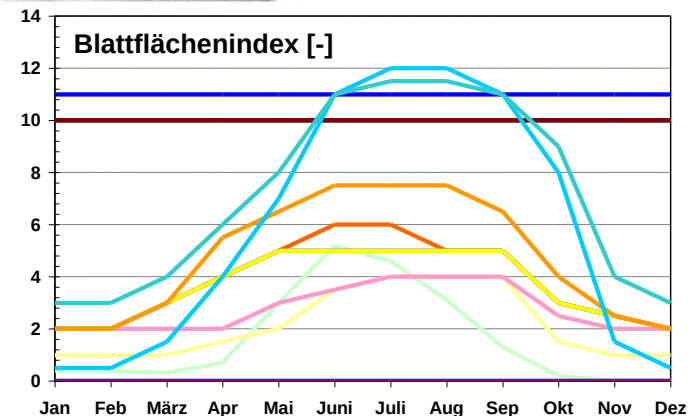
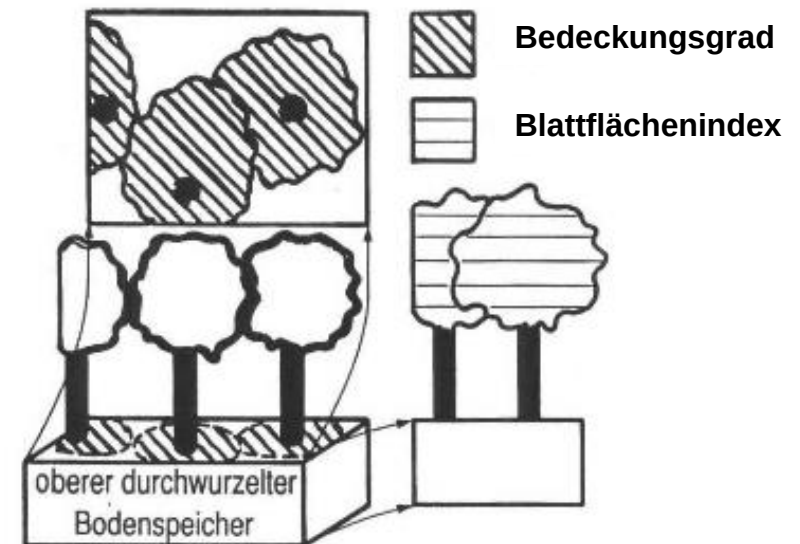
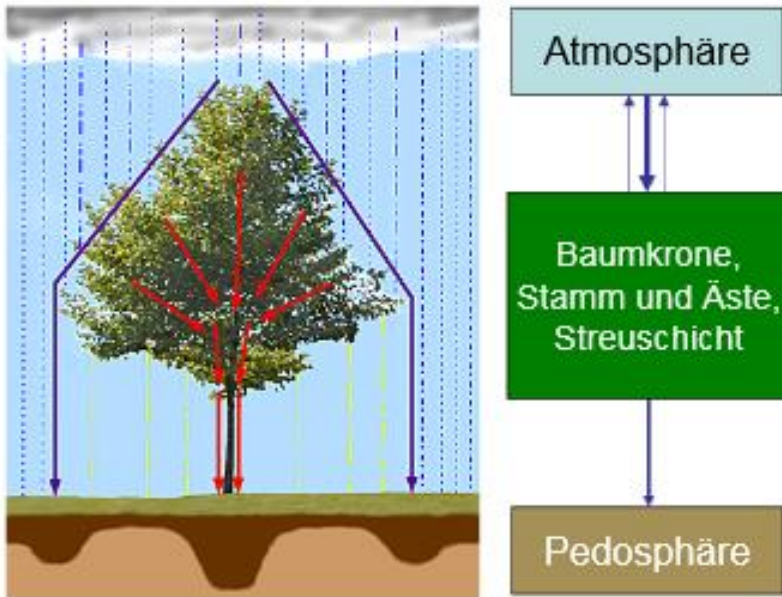
Interzeption

Interzeption des Regens: Berechnung in Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Entwicklung des Blattflächenindex



Interzeption

Interzeption des Regens: Berechnung in Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Entwicklung des Blattflächenindex



Evapotranspiration

- Verdunstung wird gesteuert von:
 - der Energiezufuhr (z.B. Globalstrahlung),
 - den Bindungskräften des Wassers in dem Körper, aus dem Wasser verdunstet (Boden, Pflanze (z.B. Stomatawiderstand), Gewässer),
 - dem Verdunstungsvermögen der Luft (z.B. Luftfeuchte) und
 - dem Abtransport des Wasserdampfs (z.B. Windgeschwindigkeit).
- Berechnung der aktuellen Evapotranspiration in LARSIM über die Penman-Monteith-Gleichung

Evapotranspiration

- Grundgleichung:

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_{NE} - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a C}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a) C}$$

λ	[J/kg]	Latente Verdunstungswärme (= 2.465.000 J/kg)
E	[kg/(m ² s)]	Verdunstungsrate des Wassers ("rate of water loss")
R_{NE}	[W/m ²]	Nettostrahlung für Bodenoberfläche mit T_{scr}
G	[W/m ²]	Bodenwärmestrom
γ	[hPa/°C]	Psychrometerkonstante (= 0,66 für Temperaturen in °C)
r_s	[s/m]	Gesamt-Oberflächenwiderstand
r_a	[s/m]	Aerodynamischer Widerstand für Wärme- und Wasserdampftransport
ρ	[kg/m ³]	Luftdichte (2 m über Boden)
c_p	[J / (kg °K)]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (=1005 J/(kg °K)) (Energie, um 1 kg um 1 Grad zu erwärmen)
Δ	[hPa/°C]	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
e_s	[hPa]	Sättigungswasserdampfdruck bei Lufttemperatur (2 m Höhe)
e	[hPa]	Aktueller Wasserdampfdruck (2 m über Boden)

Evapotranspiration

- Grundgleichung:

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_{NE} - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a C}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a) C}$$

mit

$$C = 1 + \frac{b' r_a}{\rho c_p}$$

$$b' = 4 \varepsilon \sigma (273.15 + T_{scr})^3 \approx 6 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ K}$$

ε	$[-]$	Emissivität der Oberfläche (= 0,95)
σ	$[W/(m^2 \text{ } ^\circ K^4)]$	Stefan-Boltzmann-Konstante (= $5,67 \cdot 10^{-8} W/(m^2 \text{ } ^\circ K^4)$)
T_{scr}	$[^\circ C]$	Gemessene Lufttemperatur (2 m über Boden)
r_a	$[s/m]$	Aerodynamischer Widerstand für Wärme- und Wasserdampftransport
c_p	$[J/(kg \text{ } ^\circ K)]$	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (= $1005 J/(kg \text{ } ^\circ K)$)
γ	$[hPa/^\circ C]$	Psychrometerkonstante (= 0,66 für Temperaturen in $^\circ C$)
ρ	$[kg/m^3]$	Luftdichte (2 m über Boden), in LARSIM ermittelt aus Luftdruck und Mischungsverhältnis von Wasserdampf und trockener Luft

Evapotranspiration

- Grundgleichung: **Strahlungsterm**

$$\lambda E = \frac{\Delta(R_{NE} - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a C}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a) C}$$

λ	[J/kg]	Latente Verdunstungswärme (= 2.465.000 J/kg)
E	[kg/(m ² s)]	Verdunstungsrate des Wassers ("rate of water loss")
R_{NE}	[W/m ²]	Nettostrahlung für Bodenoberfläche mit T_{scr}
G	[W/m ²]	Bodenwärmestrom
γ	[hPa/°C]	Psychrometerkonstante (= 0,66 für Temperaturen in °C)
r_s	[s/m]	Gesamt-Oberflächenwiderstand
r_a	[s/m]	Aerodynamischer Widerstand für Wärme- und Wasserdampftransport
ρ	[kg/m ³]	Luftdichte (2 m über Boden)
c_p	[J / (kg °K)]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (=1005 J/(kg °K)) (Energie, um 1 kg um 1 Grad zu erwärmen)
Δ	[hPa/°C]	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
e_s	[hPa]	Sättigungswasserdampfdruck bei Lufttemperatur (2 m Höhe)
e	[hPa]	Aktueller Wasserdampfdruck (2 m über Boden)

Evapotranspiration

- Grundgleichung:

Ventilations-Feuchteterm

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_{NE} - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a C}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a) C}$$

λ	[J/kg]	Latente Verdunstungswärme (= 2.465.000 J/kg)
E	[kg/(m ² s)]	Verdunstungsrate des Wassers ("rate of water loss")
R_{NE}	[W/m ²]	Nettostrahlung für Bodenoberfläche mit T_{scr}
G	[W/m ²]	Bodenwärmestrom
γ	[hPa/°C]	Psychrometerkonstante (= 0,66 für Temperaturen in °C)
r_s	[s/m]	Gesamt-Oberflächenwiderstand
r_a	[s/m]	Aerodynamischer Widerstand für Wärme- und Wasserdampftransport
ρ	[kg/m ³]	Luftdichte (2 m über Boden)
c_p	[J / (kg °K)]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (=1005 J/(kg °K)) (Energie, um 1 kg um 1 Grad zu erwärmen)
Δ	[hPa/°C]	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
e_s	[hPa]	Sättigungswasserdampfdruck bei Lufttemperatur (2 m Höhe)
e	[hPa]	Aktueller Wasserdampfdruck (2 m über Boden)

Evapotranspiration

- Grundgleichung:

$$\lambda E = \frac{\Delta (R_{NE} - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a}{\Delta + \gamma (1 + r_s / r_a) C} \quad \text{Widerstandsterm}$$

λ	[J/kg]	Latente Verdunstungswärme (= 2.465.000 J/kg)
E	[kg/(m ² s)]	Verdunstungsrate des Wassers ("rate of water loss")
R_{NE}	[W/m ²]	Nettostrahlung für Bodenoberfläche mit T_{scr}
G	[W/m ²]	Bodenwärmestrom
γ	[hPa/°C]	Psychrometerkonstante (= 0,66 für Temperaturen in °C)
r_s	[s/m]	Gesamt-Oberflächenwiderstand
r_a	[s/m]	Aerodynamischer Widerstand für Wärme- und Wasserdampftransport
ρ	[kg/m ³]	Luftdicke (2 m über Boden)
c_p	[J / (kg °K)]	Spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck (=1005 J/(kg °K)) (Energie, um 1 kg um 1 Grad zu erwärmen)
Δ	[hPa/°C]	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve
e_s	[hPa]	Sättigungswasserdampfdruck bei Lufttemperatur (2 m Höhe)
e	[hPa]	Aktueller Wasserdampfdruck (2 m über Boden)

- Grundgleichung:

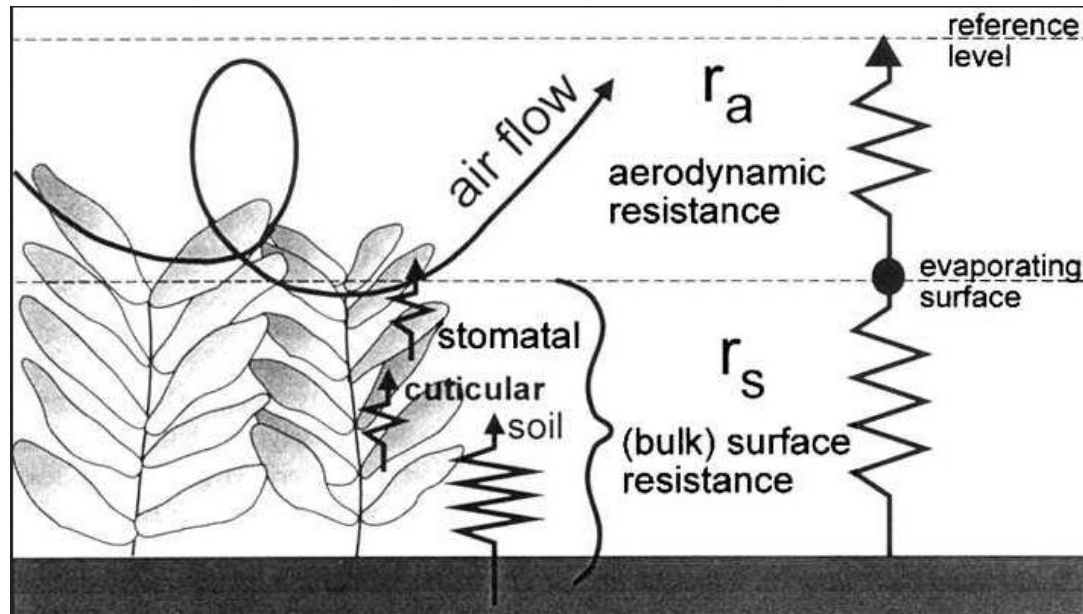
$$\lambda E = \frac{\Delta(R_{NE} - G) + \rho c_p (e_s - e) / r_a C}{\Delta + \gamma(1 + r_s / r_a) C} \quad \text{Widerstandsterm}$$

r_s [s/m]

Gesamt-Oberflächenwiderstand

r_a [s/m]

Aerodynamischer Widerstand für Wärme- und Wasserdampftransport

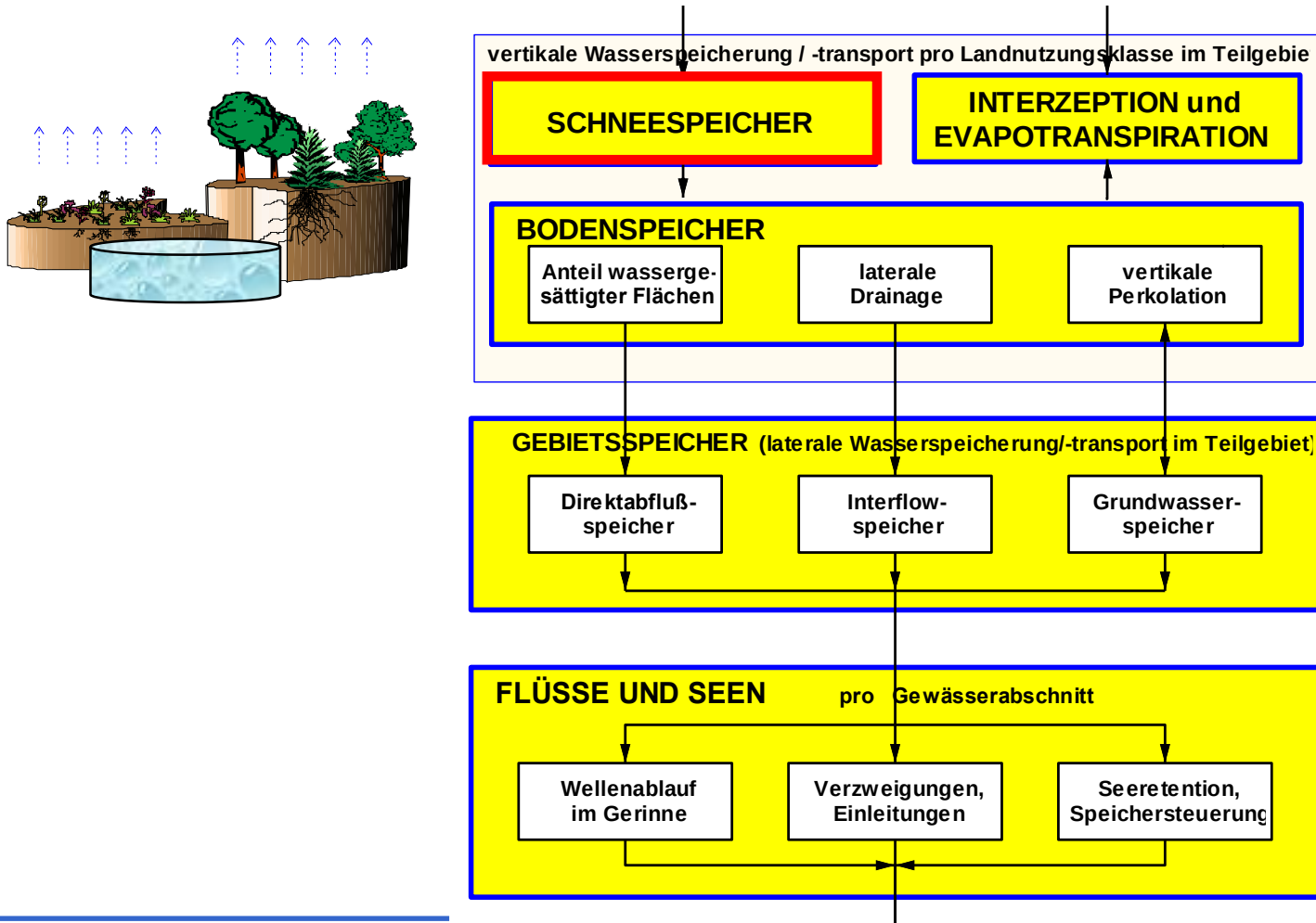


Evapotranspiration

- Aufgaben für den Anwender (Evapotranspiration):
 - Zahlreiche Vorgaben für gewisse Parameter:
 - Feste Parametrisierungen in den Gleichungen
 - Parameter, die an Hand von Literaturstudien ermittelt wurden (z.B. jahreszeitliche Entwicklung des Blattflächenindex und der Albedo)
 - Keine Parameter, die während der Eichung kalibriert werden
 - Kontrolle der berechneten Verdunstungswerte
- Einflussmöglichkeiten des Anwenders:
 - gering (z.B. Korrektur der landnutzungsabhängigen Parameter)

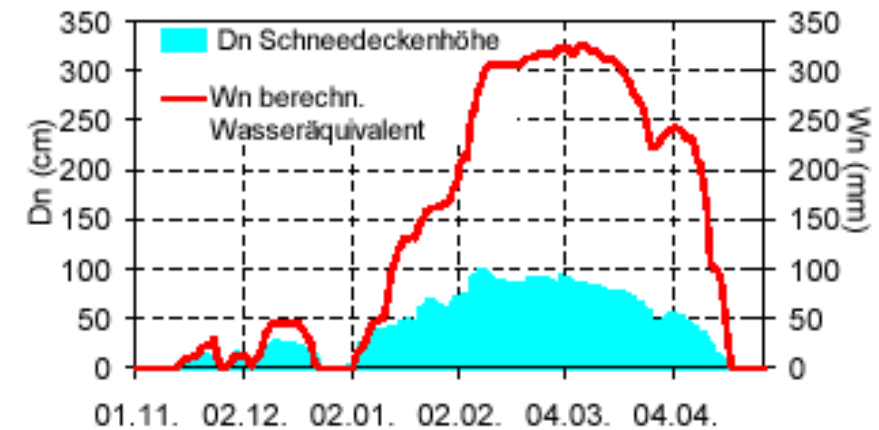
Schnee

- Vertikale Wasserspeicherung und Wasserabgabe durch Schnee pro Landnutzungs-kategorie und Teilgebiet

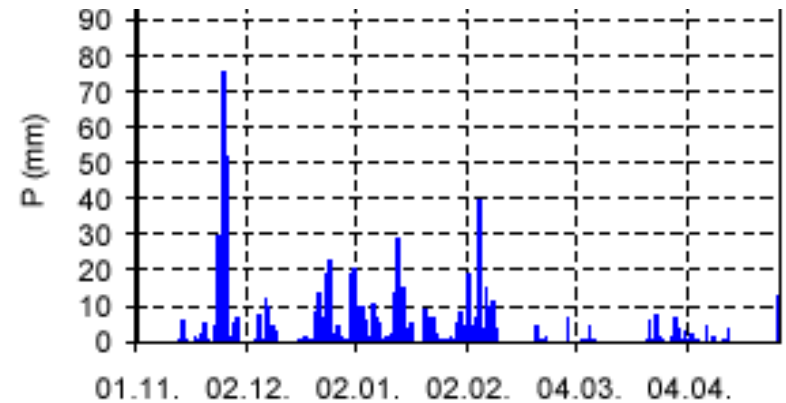


Schnee

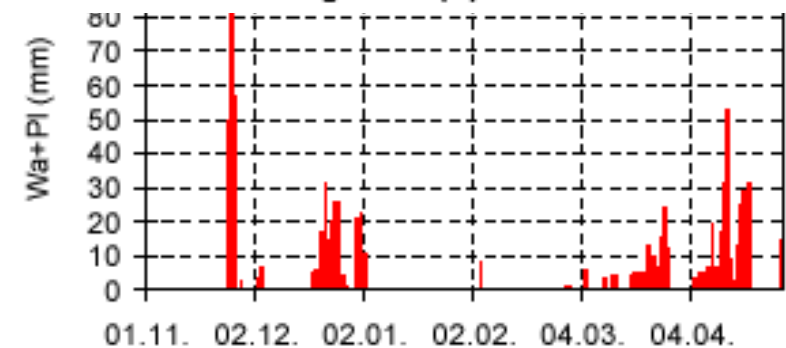
- Verlauf von Schneehöhe, Schneewasseräquivalent, Niederschlag und Wasserdargebot während des Winters-Halbjahrs



Schneedeckenhöhe (D_n) und Wasseräquivalent der Schneedecke (W_n)



Niederschlagshöhe (P)



Wasserdargebot

Schneemodellierung in LARSIM

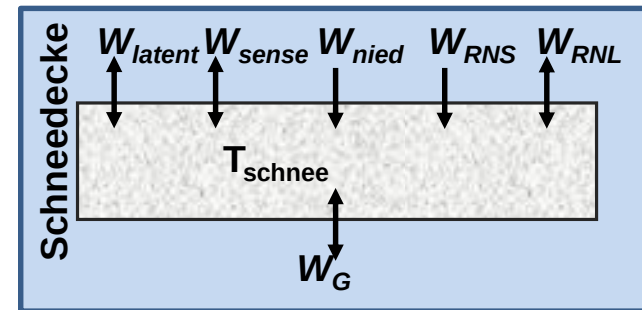
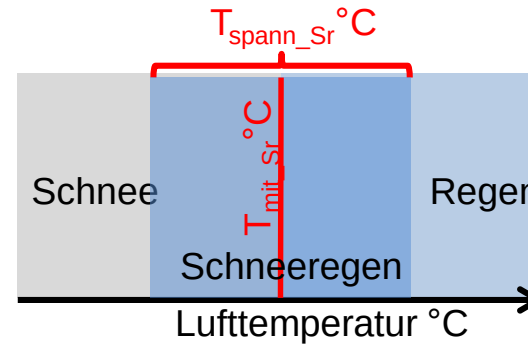
- **Akkumulation von Schnee**

- Aufbau der Schneedecke mit Neuschnee
- Schneeinterzeption

- **Energiebilanz der Schneedecke**

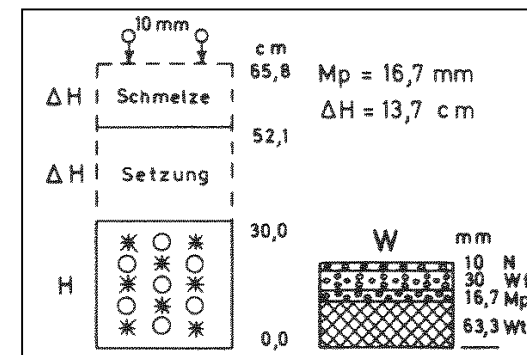
Temperatur der Schneedecke und potentielle Schmelze

- Vollständige Energiebilanz



- **Setzung und Wasserabgabe**

Rückhalt flüssigen Wassers in der Schneedecke und tatsächliche Wasserabgabe



- **Schneemassentransport**

Akkumulation von Schnee

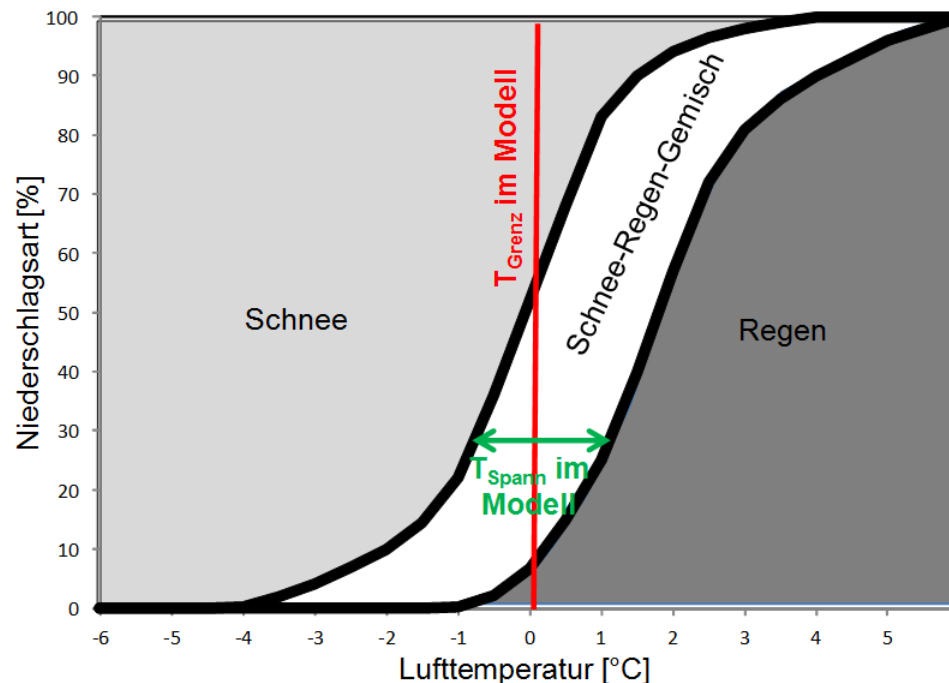
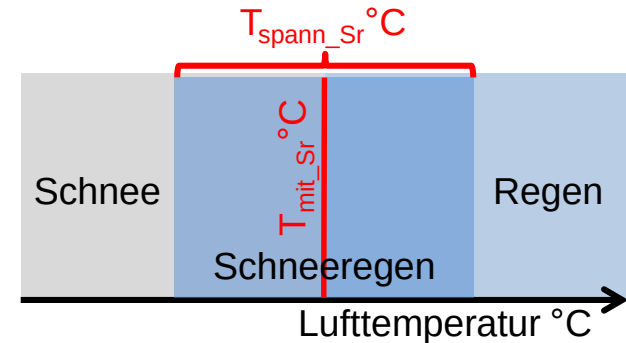
- Betrachtete Teilprozesse:
 - a) Akkumulation von Schnee: abhängig von der Grenztemperatur Schnee bzw. Schneeregen und der Schneeeinterzeption



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

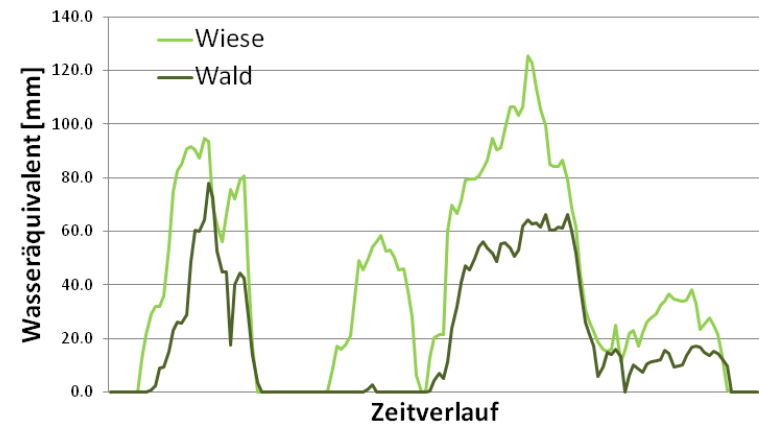


Akkumulation von Schnee: Schneeinterzeption

- 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. bis zu ~50%

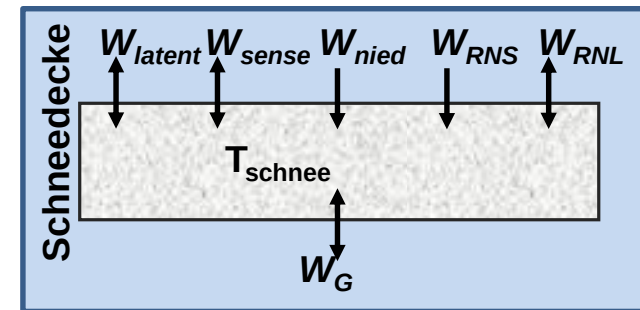


Berechnung in Abhängigkeit von der jahreszeitlichen Entwicklung des Blattflächenindex sowie zwei Parametern (Schneeinterzeptions-Kapazität und Schneeinterzeptions-Rate)



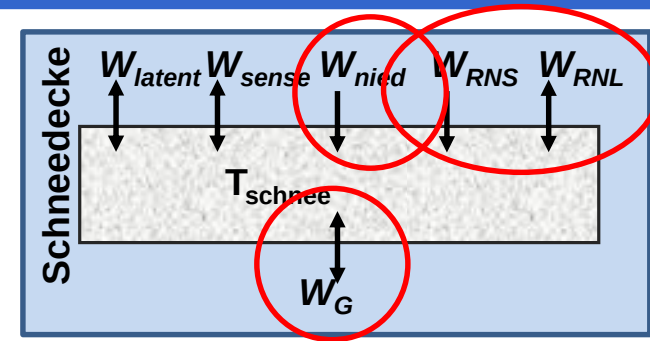
Potentielle Schneeschmelze

- Betrachtete Teilprozesse:
 - a) Akkumulation von Schnee
 - b) Potentielle Schneeschmelze durch Wärmezufuhr: Modellierung des Wärmehaushaltes und Strahlungshaushalts der Schneedecke
 - Eingetragene Wärme aus Niederschlag W_{nied}
 - Bodenwärmestrom W_G
 - Kurzwellige Strahlungsbilanz W_{RNS}
 - Langwellige Strahlungsbilanz W_{RNL}
 - Turbulenter Strom fühlbarer Wärme W_{sense}
 - Turbulenter Strom latenter Wärme W_{latent}



Potentielle Schneeschmelze

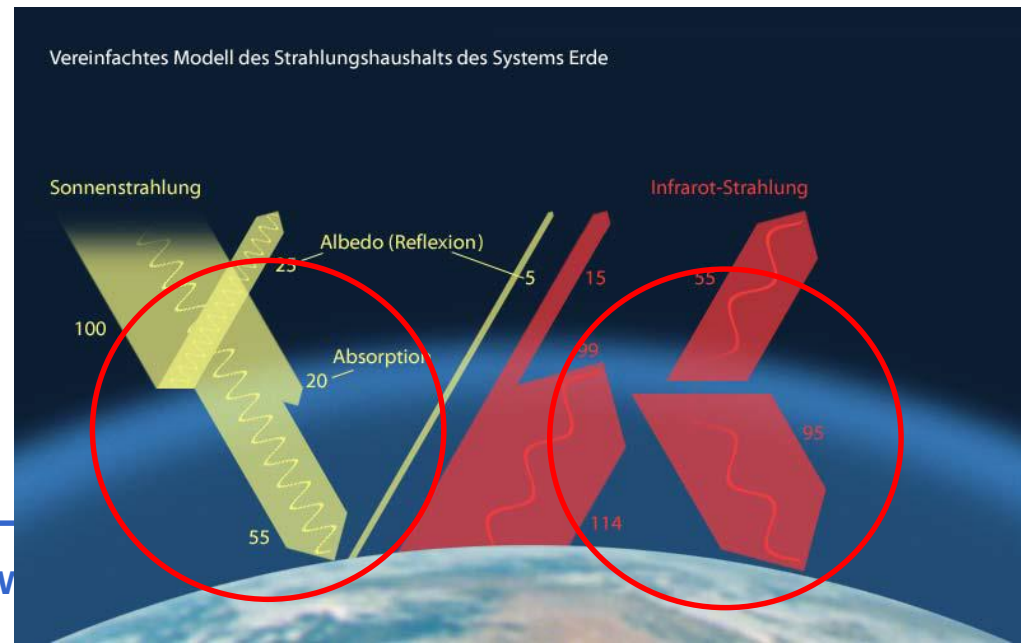
1. Eingetragene Wärme aus Niederschlag



2. Dynamischer Bodenwärmestrom

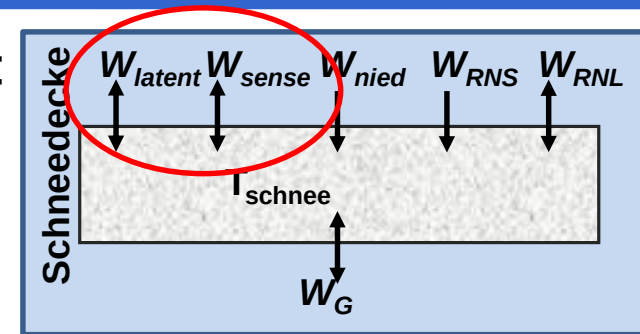
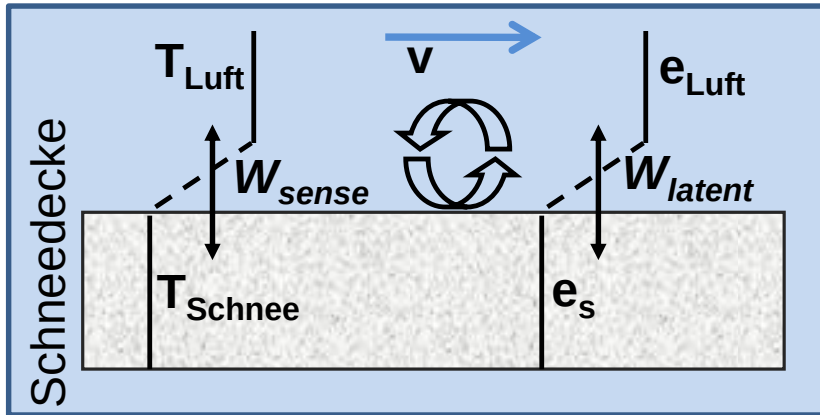
Vereinfachte dynamische Berechnung des Bodenwärmestroms für das oberflächen-
nahe Bodenvolumen

3. Kurzwellige und langwellige Strahlungsbilanz



Potentielle Schneeschmelze

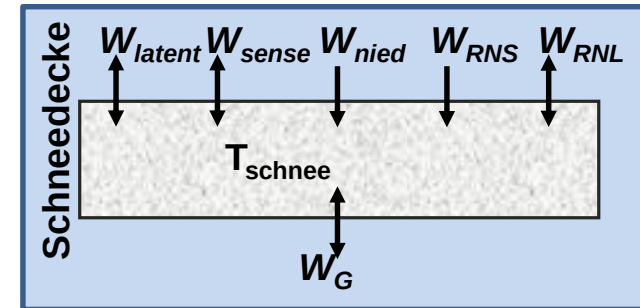
4. Turbulenter Strom fühlbarer und latenter Wärme:



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

- Betrachtete Teilprozesse:
 - a) Akkumulation von Schnee
 - b) Potentielle Schneeschmelze durch Wärmezufuhr: Modellierung des Wärmehaushaltes und Strahlungshaushalts der Schneedecke
 - Eingetragene Wärme aus Niederschlag W_{nied}
 - Bodenwärmestrom W_G
 - Kurzwellige Strahlungsbilanz W_{RNS}
 - Langwellige Strahlungsbilanz W_{RNL}
 - Turbulenter Strom fühlbarer Wärme W_{sense}
 - Turbulenter Strom latenter Wärme W_{latent}

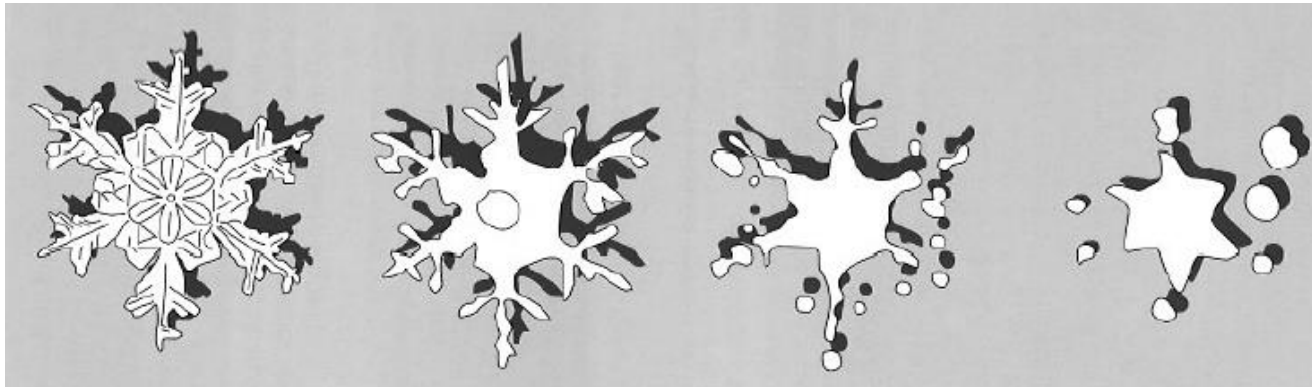


W_{tot} (Energiebilanz der Schneedecke [W/m^2]):

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

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

<i>Schneearten</i>	<i>Dichte</i>	<i>Porenanteil</i>
	kg / m ³	% Luft
Neuschnee, trocken + locker	30 - 50	93 - 97
Neuschnee, schwach gebunden	50 - 100	89 - 93
filziger Schnee	150 - 300	67 - 84
rundkörniger Altschnee, trocken	200 - 400	51 - 78
rundkörniger Altschnee, feucht - naß	300 - 500	40 - 65
kantig-körniger Schnee	250 - 400	56 - 73
Schwimmschnee	150 - 300	62 - 84
Nassschnee	300 - 600	35 - 67
Firn (mehrjährig)	500 - 800	13 - 35
Gletschereis	800 - 900	2 - 13
Wasser	1000	0

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

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

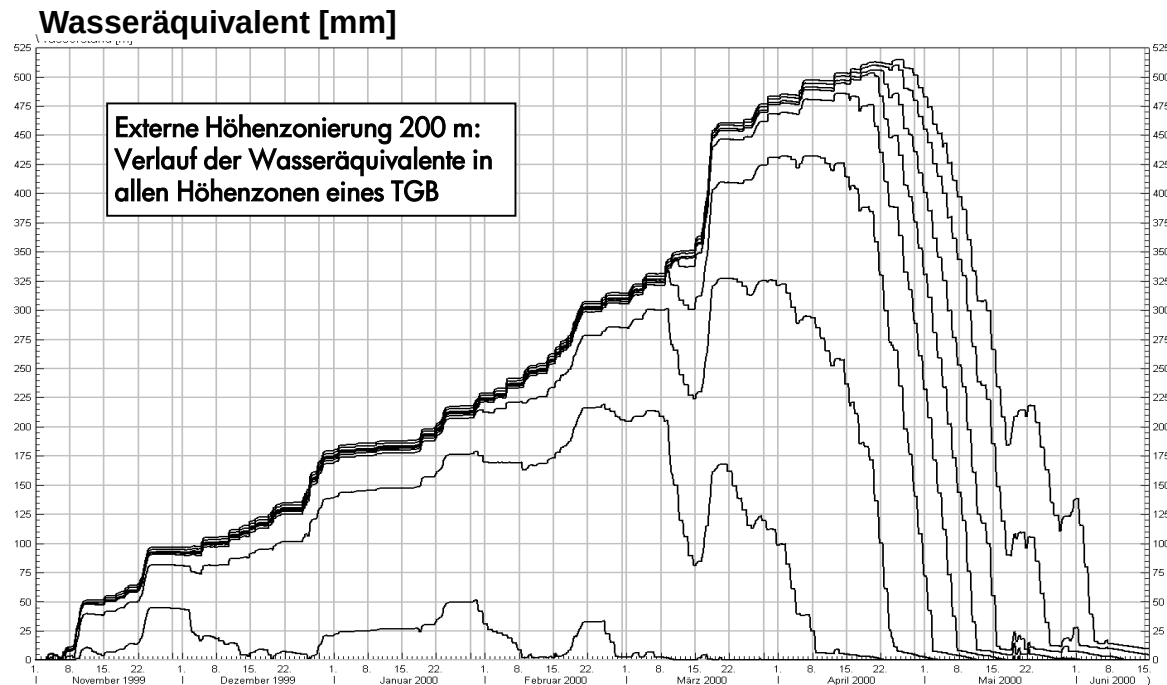
Variante 1: Höhenzonierte Schneemodellierung

- Höhenabhängige Übertragung der Lufttemperatur im WHM auf Grundlage der mittleren Höhe eines TGB → jedes TGB weist für alle Landnutzungs-Boden-Kompartimente eine einheitliche Lufttemperatur auf.
 - Sehr stark relieffierte alpinen Einzugsgebiete: ggf. Höhendifferenzen von mehreren hundert Metern innerhalb eines TGB auftreten → erhebliche Temperaturunterschiede innerhalb des TGB → großer Einfluss auf die Akkumulation und Schmelze der Schneedecke.
 - Schneeschmelze folgt in Realität dem Höhengradienten im Gebiet und verläuft somit gedämpft. Beim Ansatz einer mittleren Höhe setzt die simulierte Schneeschmelze hingegen zu spät ein, verläuft zu intensiv und ist dann zu früh beendet.
- Höhendifferenzierte Berechnung der Schneedynamik innerhalb eines TGB

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 1: Höhenzonierte Schneemodellierung

- Berücksichtigung der Höhenschichten bei der räumlichen Interpolation der Lufttemperatur → Lufttemperaturgradient innerhalb des Teilgebiets → Schneemodellierung getrennt für die einzelnen Höhenschichten unter Berücksichtigung der jeweiligen höhenschichtspezifischen Lufttemperatur.
- Realistischere Abbildung der höhenabhängigen Schneedynamik und eine zeitliche Entzerrung der Schneeschmelze → Verbesserung der Simulationsgüte in stark reliefierten und stark schneebeeinflussten Gebieten.



Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 1: Höhenzonierte Schneemodellierung

- Reale Höhenverteilung: möglichst Ableitung innerhalb der Teilgebiete aus einem digitalen Höhenmodell → Ermittlung der Flächenanteile der einzelnen Höhengschichten in den Teilgebieten für vorzugebende Höhenstufenabstände (z.B. 100 m).
- Vorgaben der Höhenverteilung in der <h-zonen.dat>:

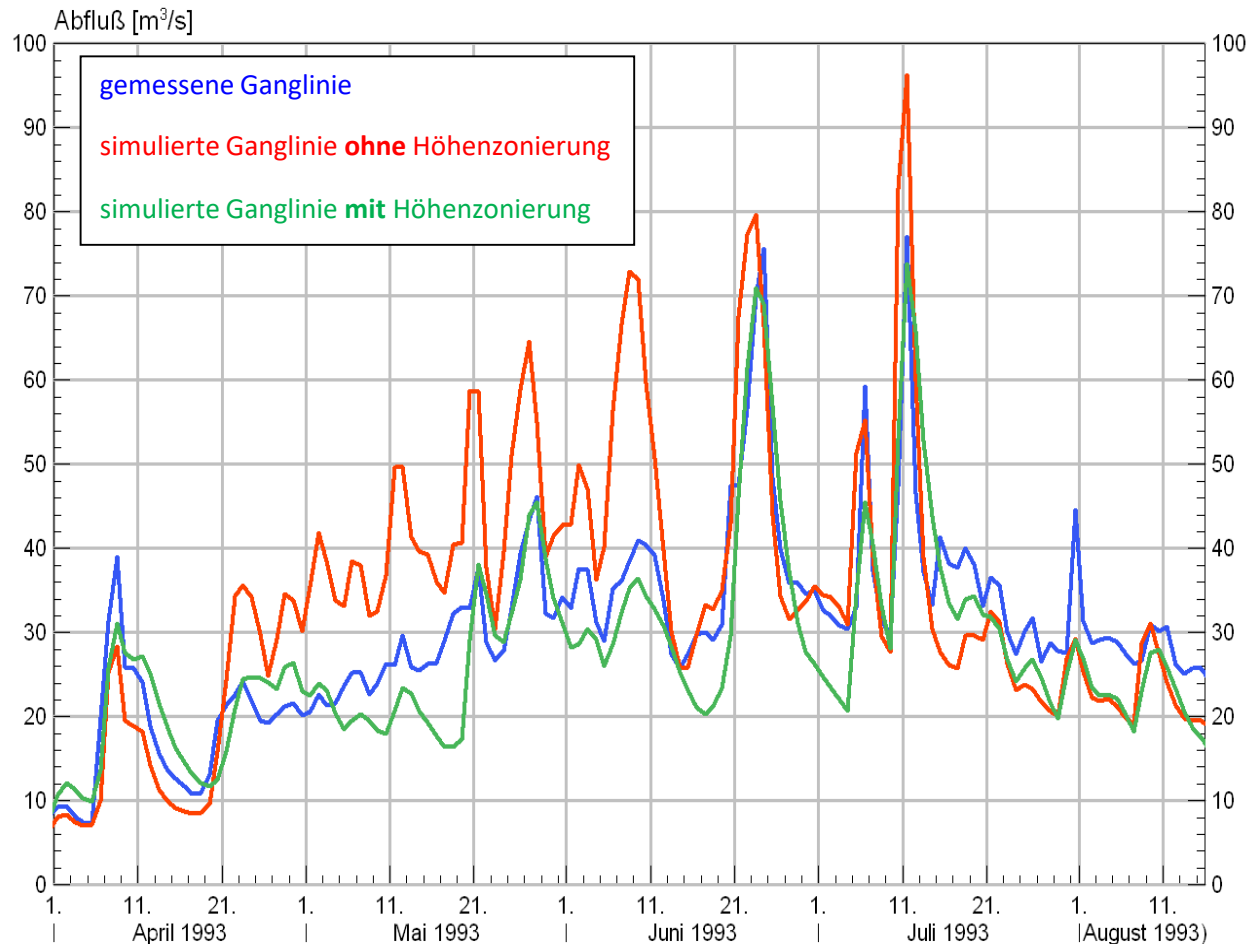
Beispiel für die Datei <h-zonen.dat>:

TGB;	500.0;	1000.0;	1500.0;	2000.0;	2500.0;	3000.0;	3500.0;
27;	10.0;	20.0;	20.0;	25.0;	10.0;	10.0;	5.0;
28;	22.0;	20.0;	8.0;	10.0;	25.0;	15.0;	0.0;
29;	25.0;	25.0;	25.0;	25.0;	0.0;	0.0;	0.0;
30;	0.0;	10.0;	60.0;	10.0;	10.0;	10.0;	0.0;
31;	10.0;	20.0;	20.0;	25.0;	10.0;	10.0;	5.0;
32;	20.0;	20.0;	13.0;	10.0;	22.0;	15.0;	0.0;
33;	24.0;	25.0;	26.0;	25.0;	0.0;	0.0;	0.0;
34;	0.0;	10.0;	60.0;	13.0;	7.0;	10.0;	0.0;

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 1: Höhenzonierte Schneemodellierung

- Verbesserung der Simulationsgüte in stark relieffierten und stark schneebeeinflussten Gebieten: Beispiel Pegel Hondrich/Kander (mit <h-zonen.dat>).



© LARSIM-Entwicklergemeinschaft

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 1: Höhenzonierte Schneemodellierung

- Automatische Höhenzonierung: Aufteilung der TGB-Höhen auf Basis eines definierten Werts in horizontale Höhenschichten → Bestimmung der Anzahl der vorkommenden Höhenschichten im TGB anhand der minimalen und maximalen Geländehöhe → Verteilung der prozentualen Flächenanteile auf alle vorkommenden Höhenschichten (mit Ausnahme der untersten und obersten Höhenschicht).
- Vorgabe der automatischen Höhenzonierung in der <gebietsdaten.dat>:

Beispiel für die Datei <gebietsdaten.dat>:

TGB;	minHoehe;	maxHoehe;	mitlHoehe;	HZoneAuto;	HZoneExt;
20;	1342.0;	2418.0;	1869.3;	100.0;	N;
21;	1276.0;	2227.0;	1602.8;	100.0;	N;
22;	1206.0;	2042.0;	1490.2;	100.0;	N;
23;	1196.0;	1893.0;	1354.9;	100.0;	N;
24;	1722.0;	2739.0;	2280.9;	100.0;	N;
25;	1738.0;	2681.0;	2270.6;	-;	J;
26;	1488.0;	2610.0;	2015.2;	-;	J;
27;	1483.0;	2547.0;	2034.7;	-;	J;
28;	1198.0;	2558.0;	1727.8;	-;	J;
29;	1140.0;	2438.0;	1536.2;	-;	J;

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 2: Schneekompartimente

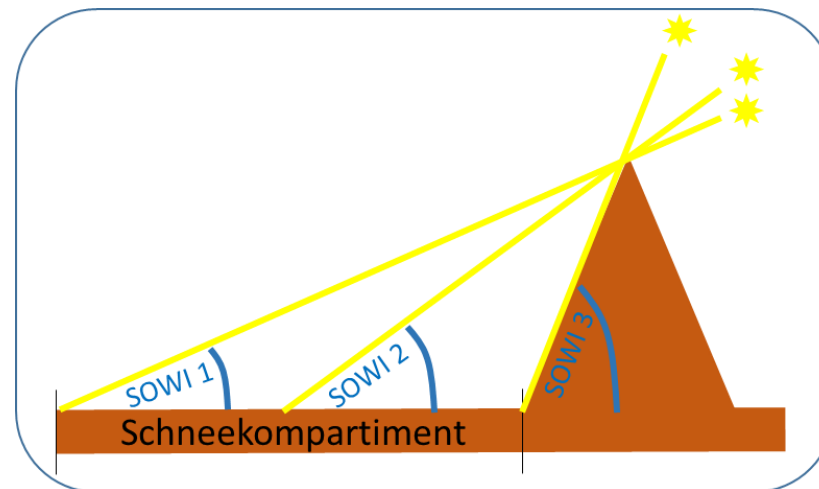
- Schnee-Kompartimente: subskalige Teilflächen eines TGB, für die jeweils eine separate Simulation der Schneedynamik erfolgt → prozessorientierter Ansatz zur Berücksichtigung von Hangneigung, Exposition und Abschattung bei der Schneemodellierung.



Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 2: Schneekompartimente

- Globalstrahlung steuert maßgeblich die Energiebilanz der Schneedecke und damit ihr Abschmelzverhalten → Topographie entscheidend für die tatsächlich auf eine Fläche einwirkende Globalstrahlung.
- Charakteristische Eigenschaften der betrachteten Fläche:
 - Exposition (Himmelsrichtung, in der die betrachtete Fläche ausgerichtet ist)
 - Hangneigung (Neigung der betrachteten Fläche)
 - Abschattung (durch Objekte, die die betrachtete Fläche von direkter Sonnenstrahlung abschirmen)



Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

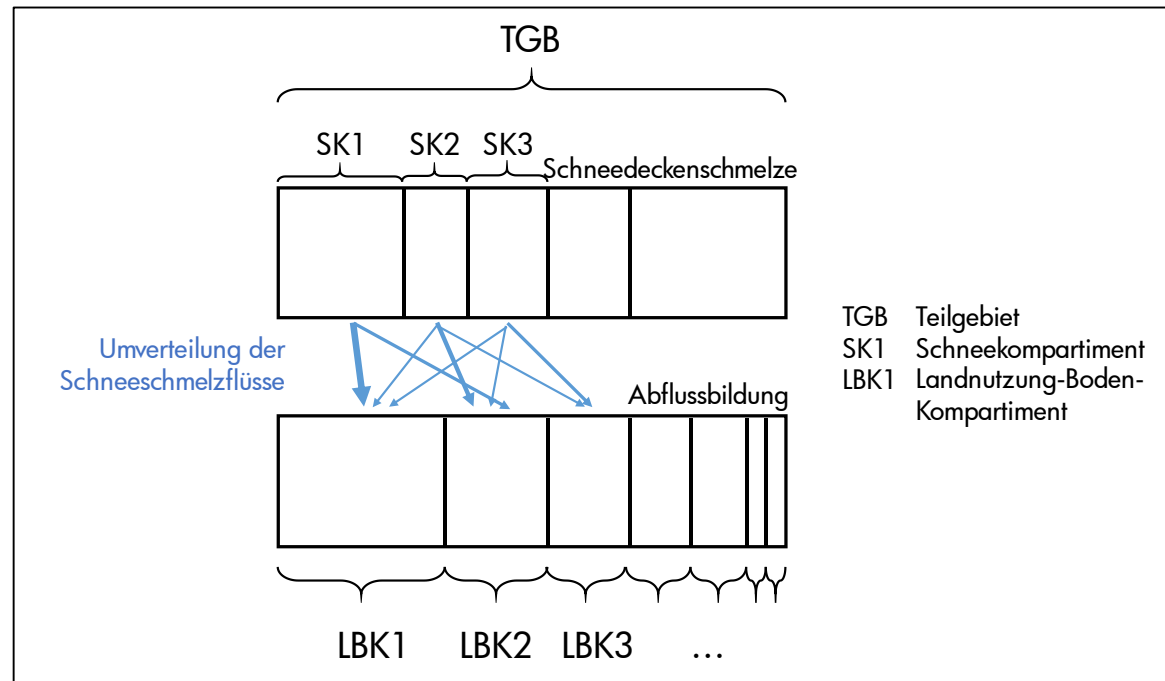
Variante 2: Schneekompartimente

- Erweiterung des Konzepts der Höhenzonierung durch die Schnee-Kompartimente (SK): Schneemodellierung wird komplett von den Landnutzungs-Boden-Kompartimenten (LBH) getrennt und erfolgt auf der Ebene separater, unabhängig ausgewiesener SK.
- Auch die SK sind als subskalige Kompartimente von TGB definiert und bestehen wie die LBK aus räumlich getrennten Bereichen innerhalb eines TGB. Entscheidend für die Zusammenfassung von Flächen als SK ist lediglich die Ähnlichkeit der Eigenschaften, unabhängig von der genauen Lage innerhalb des TGB.
- In SK werden Flächen innerhalb eines TGB zusammengefasst, die ähnliche für die Schneemodellierung relevante Eigenschaften besitzen. Dabei können folgende Eigenschaften berücksichtigt werden:
 - Landnutzung
 - Höhenlage
 - Hangneigung
 - Exposition
 - Abschattung (als Funktion von Azimut und Sonneneinfallswinkel)

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 2: Schneekompartimente

- SK besitzen nicht die gleichen Flächen wie die LBK → Umverteilung des Wasserdargebots aus der Schneeschmelze aus den SK auf die LBK → Angabe des Anteils der Entwässerung des anfallenden Schmelzwassers auf die einzelnen LBK des TGB für jedes SK erforderlich. Diese prozentualen Anteile entsprechen den Flächenanteilen der SK an den LBK (Ermittlung durch räumliches Verschneiden der SK-Flächen mit den LBK-Flächen).



Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 2: Schneekompartimente

- Definition der SK in der Datei <schneekompartimente.dat>
 - HAEX: Hangexposition in Grad
 - HAWI: Hangneigung in Grad
 - Next_ID: Nachfolgendes SK für den Massentransport von Schnee
 - 1, 2, 3 usw: Anteil des SK am Landnutzungs-Boden-Kompartiment [%]
- Ausweisung der Schneekompartimente durch Programm „SK-Toolbox“

Beispiel für den Aufbau einer <schneekompartimente.dat>:

```
Maximale Anzahl TGB mit SK ;    9
Maximale Anzahl SK pro TGB ;    6
Maximale Anzahl LBK pro TGB;    9
#
TGB;  ID;      Lanu;  Hoehe;    HAEX;    HAWI; Next_ID;    1;    2;    3;    4;    5;    6;    7;
3;   1;   Freiland; 2618.;    5.0;    1.0;    3;  10.0;  30.0;  70.0;  0.0;  0.0;    ;    ;
3;   2;   Freiland; 2500.;   30.0;   75.0;    4;  70.0;  10.0;  20.0;  0.0;  0.0;    ;    ;
3;   3;  Nadelwald; 2400.;   90.0;   10.0;    5;   0.0;   0.0;   0.0;  40.0;  50.0;    ;    ;
3;   4;  Nadelwald; 2200.;  180.0;   85.0;    5;   0.0;   0.0;   0.0;  60.0;  50.0;    ;    ;
3;   5;   Freiland; 2135.;  275.0;   15.0;   -;  20.0;  60.0;  10.0;   0.0;   0.0;    ;    ;
5;   1;  Gletscher; 2909.;  180.0;   20.0;    2;   0.0;   0.0;   0.0;  40.0;    ;    ;    ;
5;   2;  Gletscher; 2700.;   90.0;   60.0;    3;   0.0;   0.0;   0.0;  60.0;    ;    ;    ;
5;   3;    Wasser; 2500.;   30.0;   75.0;    4; 100.0;   0.0;   0.0;   0.0;    ;    ;    ;
5;   4;  Nadelwald; 2300.;  210.0;   30.0;    5;   0.0;  20.0;  30.0;   0.0;    ;    ;    ;
5;   5;  Nadelwald; 2276.;  270.0;   10.0;   -;   0.0;  80.0;  70.0;   0.0;    ;    ;    ;
```

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 2: Schneekompartimente

- Mit variablem Detailgrad, wahlweise auch nur für ausgesuchte Bereiche des Modellgebiets (Verringerung Rechenaufwand).
- Beispiel alpiner Oberlauf: innerhalb einzelner TGB unterschiedliche SK aufgrund Höhenlagen, Hangneigungen, Expositionen und Abschattungseffekte ↔ im Flachland des Unterlaufs wird darauf verzichtet.

Räumliche Auflösung der Schneemodellierung

Variante 2: Schneekompartimente

- Vorgabe der Abschattung der SK in separater Datei <abschattung.dat> (optional):
 - Azimut: Einfallsrichtung der direkten Sonnenstrahlung in Grad (0 = N, 90 = Ost, 180 = Süd, 270 = West)
 - 100, ..., 0: Sonnenwinkel in Grad, bis zu der das SK prozentual entsprechend der Spaltenüberschrift abgeschattet ist

Beispiel für den Aufbau einer <abschattung.dat>:

Maximale Anzahl Azimut pro SK; 4

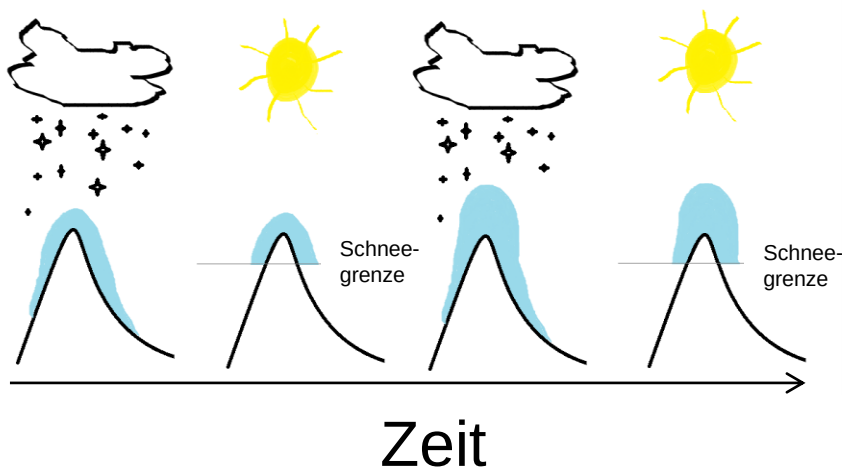
#

TGB;	ID;	Azimut;	100;	50;	0;
5;	1;	90.;	32.4;	34.4;	36.4;
5;	1;	110.;	22.4;	24.4;	26.4;
5;	1;	180.;	10.4;	13.4;	16.4;
5;	1;	270.;	8.2;	11.2;	14.2;
5;	2;	180.;	10.0;	10.0;	10.0;
5;	3;	90.;	25.0;	27.5;	30.0;
5;	3;	180.;	12.0;	18.0;	24.0;
5;	3;	270.;	3.0;	4.5;	6.0;
5;	4;	90.;	40.0;	50.0;	60.0;
5;	4;	180.;	20.0;	25.0;	30.0;
5;	4;	270.;	10.0;	12.5;	15.0;
5;	5;	180.;	20.0;	20.0;	20.0;
8;	2;	90.;	32.4;	34.4;	36.4;
8;	2;	110.;	22.4;	24.4;	26.4;
8;	2;	180.;	10.4;	13.4;	16.4;
8;	2;	270.;	8.2;	11.2;	14.2;
8;	4;	180.;	10.0;	10.0;	10.0;
8;	6;	90.;	25.0;	27.5;	30.0;

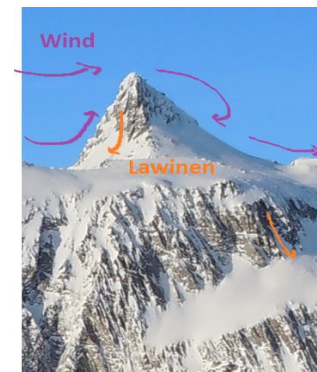
Schneemassentransport

- In sehr hoch gelegenen, nivalen Gebieten (wie z.B. im Alpenraum) wird in der Realität in der Jahressumme mehr Schnee auf- als abgebaut. Infolgedessen wird in diesen Bereichen Schnee und Eis in fester Form talwärts verfrachtet (Lawinenabgänge, Schneeverwehungen und Gletscherfließen).
- Konzeptioneller Ansatz in LARSIM mit folgende Randbedingungen:
 - Kein kontinuierlicher Aufbau der Schneedecke
 - Einhaltung der Massenbilanz
 - Grundlegende, überschlägige Abbildung des Massentransports

Im Modell



In der Realität



Schneemassentransport

- Grundannahme: Schnee kann nur bis zu einer gefälleabhängigen maximalen Menge akkumulieren. Überschreitung eines Schwellenwerts: Massentransport des Schnees in ein tiefer gelegenes Gebiet.
- Überschreitet das berechnete Schneewasseräquivalent den Schwellenwert, so wird der Anteil des Schnees, der den Schwellenwert überschreitet, vollständig in das (gemäß der hydrologischen Vernetzung) nachfolgende Teilgebiet verfrachtet.
- Der Schwellenwert für die maximale Schneeakkumulation wird in Abhängigkeit der Gefälleverhältnisse im jeweiligen Teilgebiet ermittelt. Dabei wird davon ausgegangen, dass bei steilerem Relief der Massentransport von Schnee bereits früher einsetzt.
- Schnee Berechnung und Schwellenwertbetrachtung werden spezifisch für die Landnutzungs-Boden-Kompartimente (bzw. ggf. Schnee-Kompartimente) durchgeführt.

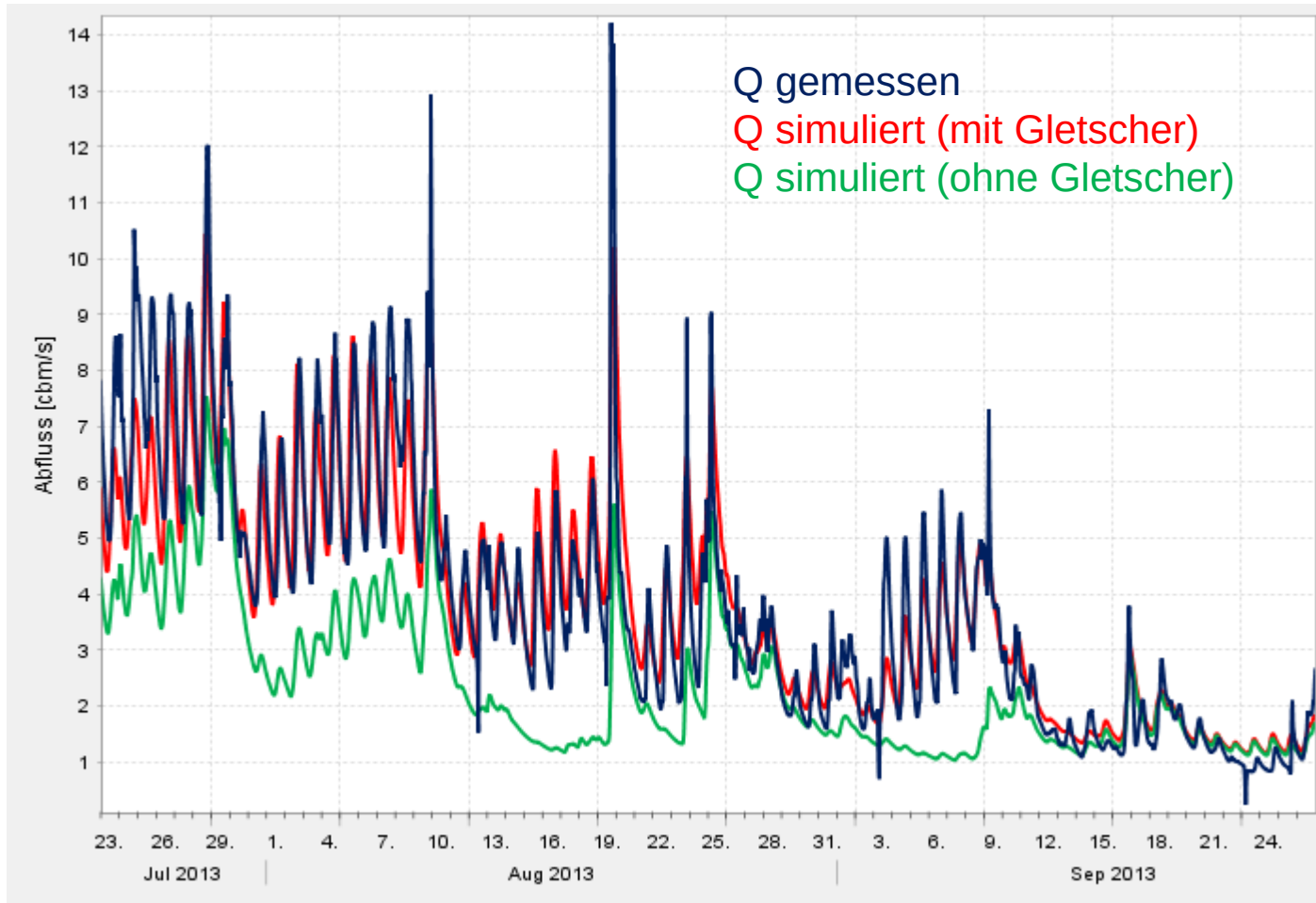
Gletscher

- Annahmen:
 - Stationärer Gletscher mit definierter, zeitlich konstanter Ausdehnung
 - Langjährige Dynamik (Vorrücken, Abschmelzen) nicht für kurzfristige Abflussdynamik relevant
- Stationäres Gletscher-Modul als „Landnutzung“ in LARSIM-WHM verfügbar
- Handhabbares Modul im Rahmen der bestehenden LARSIM-Gegebenheiten
- Nachbildung der wesentlichen Wirkung von Gletschern auf das Abflussgeschehen:
 - Abflussregime + erhöhtes Abflussniveau und Tagesamplitude im Spätsommer
 - Schneefrei-Werden des Gletschers mit folglich hoher Abflussbereitschaft
- Ausreichende Komplexität des relativ einfachen Ansatzes
- Nutzung auch für andere gletscherbeeinflusste alpine Gebiete sinnvoll
- Relevanz auch für größere Einzugsgebiete bereits mit Gletscheranteilen ab 5%



Stahl et al. (2016)

Gletscher



Beeinflussung der Schnee-Ergebnisse

- Aufgaben des Anwenders:
 1. Kontrolle der gemessenen Niederschlags- und Temperaturdaten
 2. Kontrolle der Vorhersagen der Lufttemperatur
 3. Kontrolle der berechneten Werte des Wasserdargebots und des Wasseräquivalents
 4. (Anpassungen der Schnee-Modellparameter)
 5. Nachführung der Schnee-Ergebnisse des Modells

- BLfU 2020:
https://www.lfu.bayern.de/wasser/hydrometeorologische_parameter/niederschlagserfassung/index.htm
- DWD 2012: <https://www.dwd.de>
- DWD 2020:
https://www.dwd.de/DE/derdwd/messnetz/atmosphaerenbeobachtung/functions/Teasergroup/radarverbund_teaser5.html;jsessionid=A19338664E0F600250C7A0968D5DC6C2.live31082?nn=16102
- FAO 2017: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/x0490e06.htm>
- Stahl K, Weiler M, Kohn I, Freudiger D, Seibert J, Vis M, Gerlinger K, Böhm M (2016): Abflussanteile aus Schnee- und Gletscherschmelze im Rhein und seinen Zuflüssen vor dem Hintergrund des Klimawandels – Synthesebericht. KHR Bericht CHR I-25 2017. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebiets (CHR/KHR), Lelystad. http://www.chr-khr.org/sites/default/files/chrpublications/asg-rhein_synthese_dt.pdf