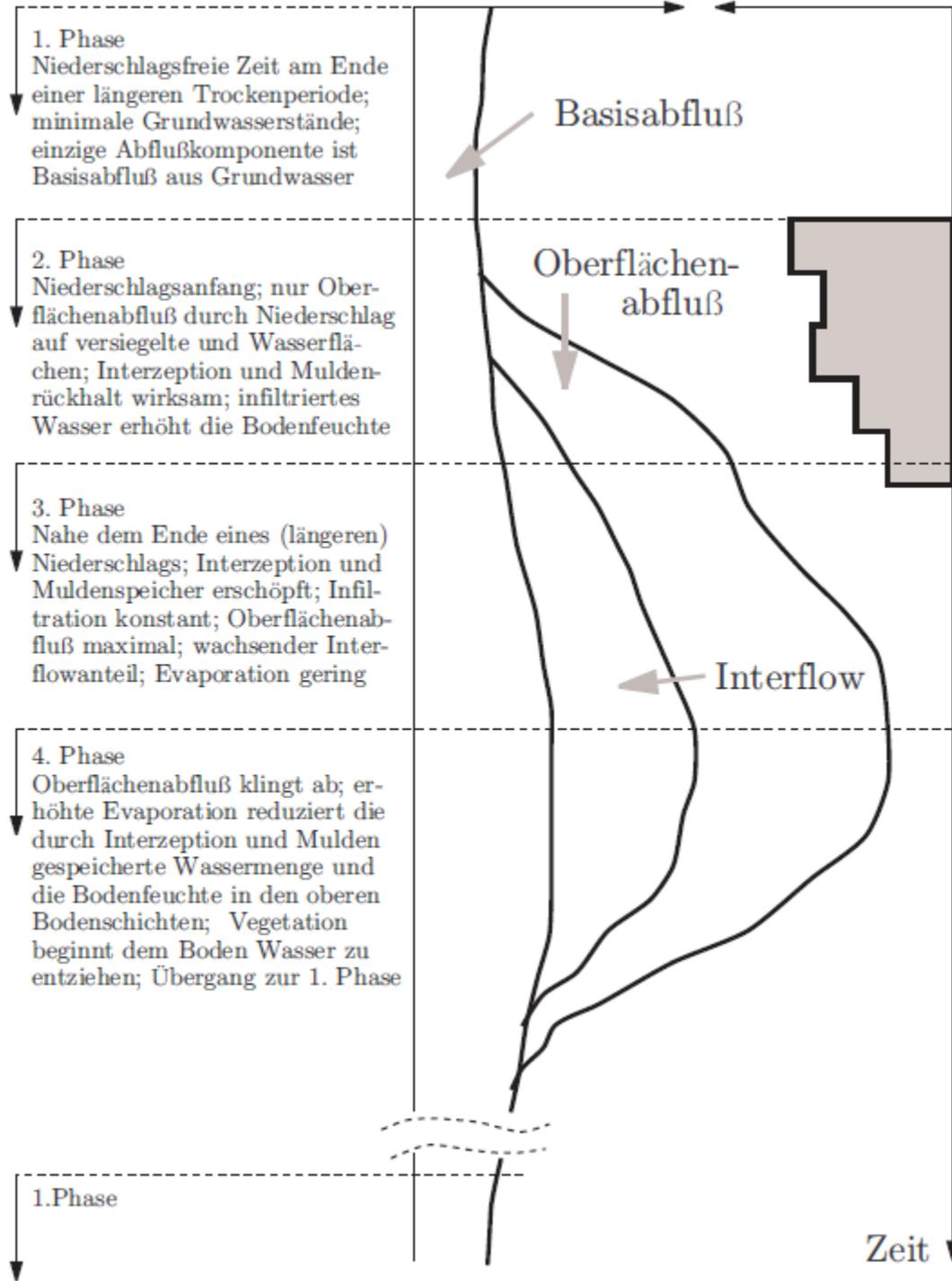


Hydrologische Modellierung mit LARSIM als Wasserhaushaltsmodell und als Niederschlags-Abfluss-Modell

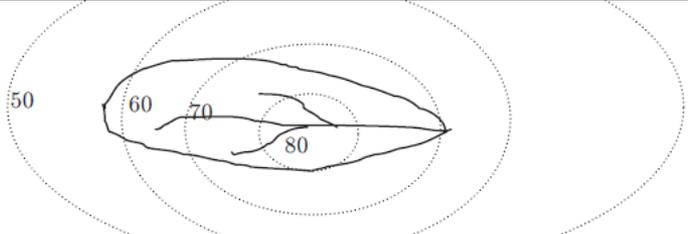
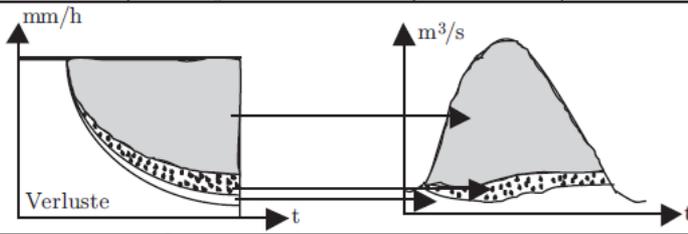
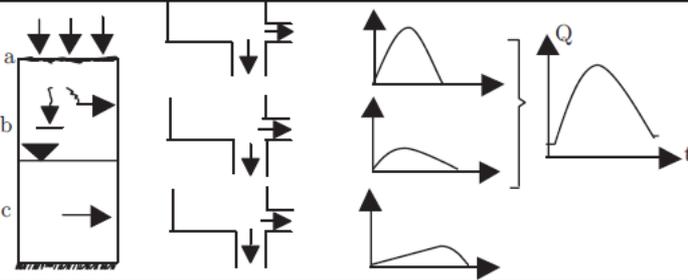
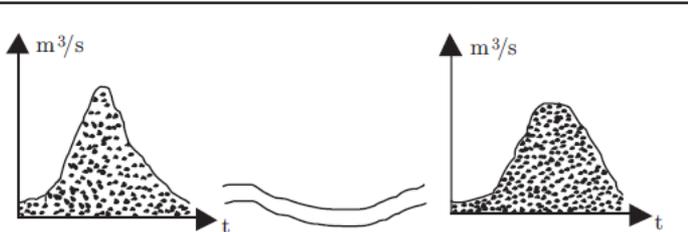
Dr.-Ing. Kai Gerlinger

HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft

Juni 2020



Grundlagen der hydrologischen Modellierung

<p>Belastungs- bildung</p>	<p>Bildung der Belastung aus Regen oder Schneeschmelze</p> 
<p>Belastungs- verteilung</p>	<p>Berechnung des Gebietsniederschlags</p> 
<p>Abfluss- bildung</p>	<p>Aufteilung der Belastung in Versickerung, Verdunstung und Abflußanteile</p> 
<p>Abfluß- konzentration</p>	<p>Transport und Verzögerung der Abflußanteile</p> 
<p>Wellentrans- formation</p>	<p>Verformung der Abflußwelle durch Gerinne- retention</p> 

Schneemodellierung

Interpolationsverfahren

z.B.: Konstanter Abflussbeiwert,
Bodenwasserhaushalt-
Modellierung

z.B.: Einheitsganglinie,
Einzellinearspeicher

z.B.: Muskingum-Verfahren,
Williams-Verfahren

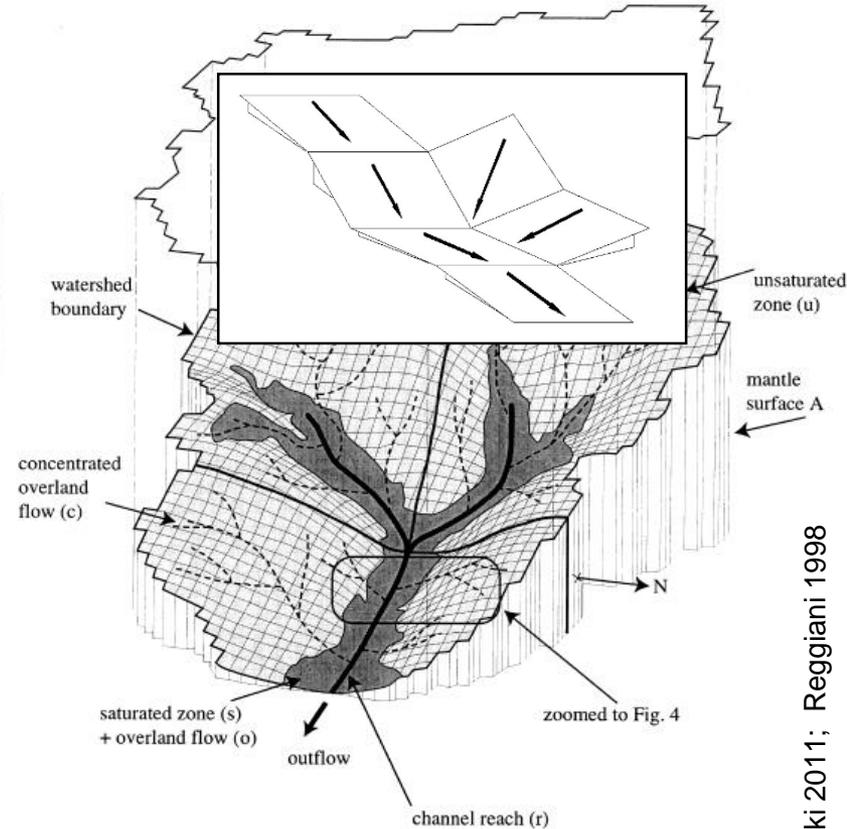
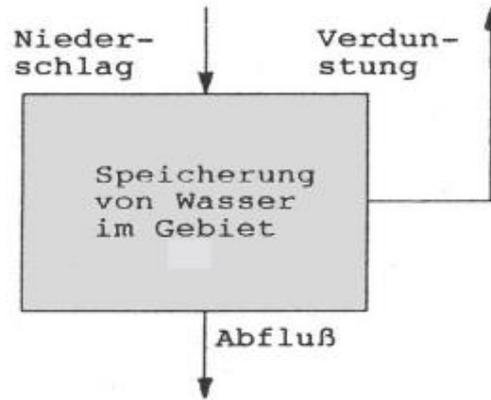
Ostrowski 2011

Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Realität



Modell



Ostrowski 2011; Reggiani 1998

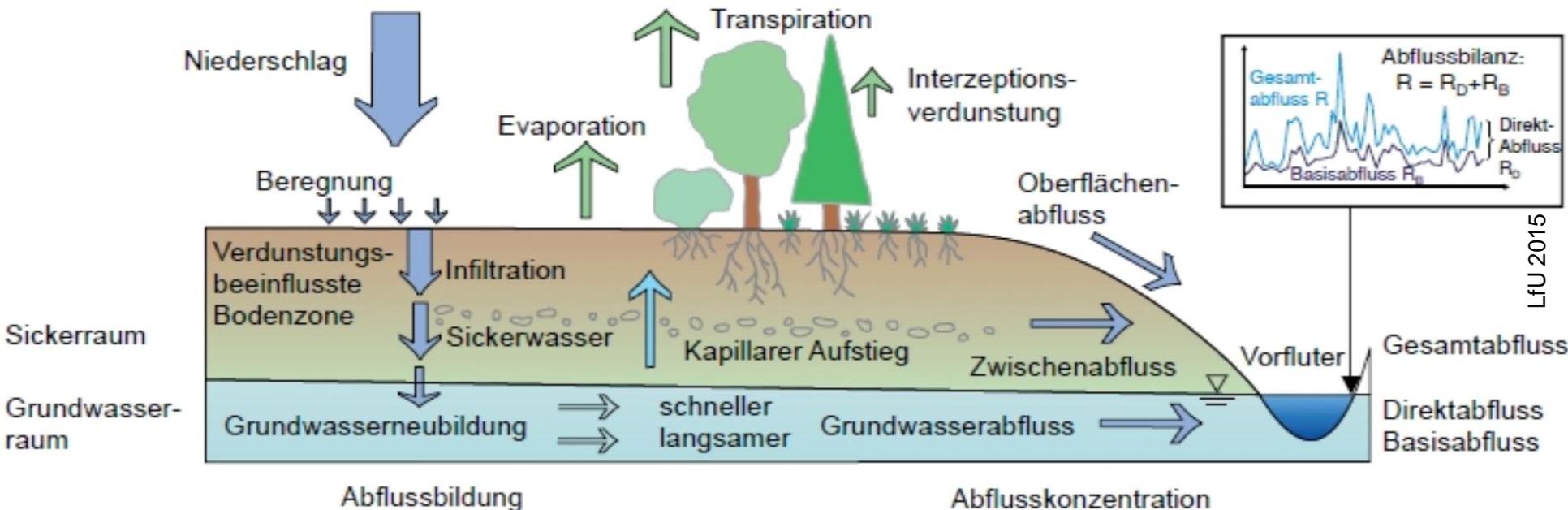
Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Wasserhaushaltsmodell:

Hydrologisches Modell zur Berechnung des Durchflusses in einem Fließgewässer aus einer Folge von Niederschlagsereignissen mit mehr oder weniger langen dazwischenliegenden, niederschlagsfreien Zeitspannen (Kontinuummodelle).

Im Gegensatz zu den Niederschlags-Abfluss-Modellen wird neben Niederschlags- und Abflussbeziehungen der gesamte Bodenwasserhaushalt in dem Modell mit simuliert.

Wasserhaushaltsmodelle dienen u.a. der Hoch- und Niedrigwasserberechnung sowie der Untersuchung des Einflusses von Klimaänderungen auf das Abflussregime.

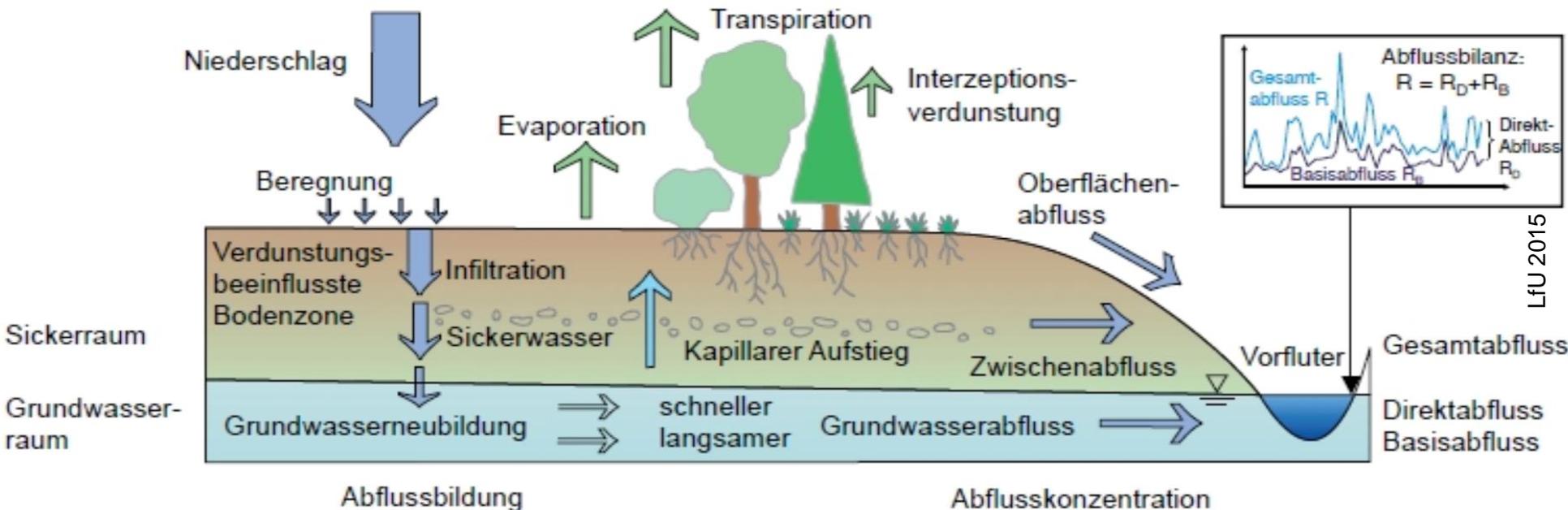


Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Niederschlags-Abfluss-Modell:

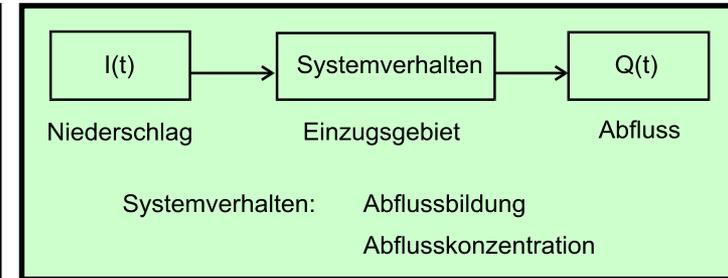
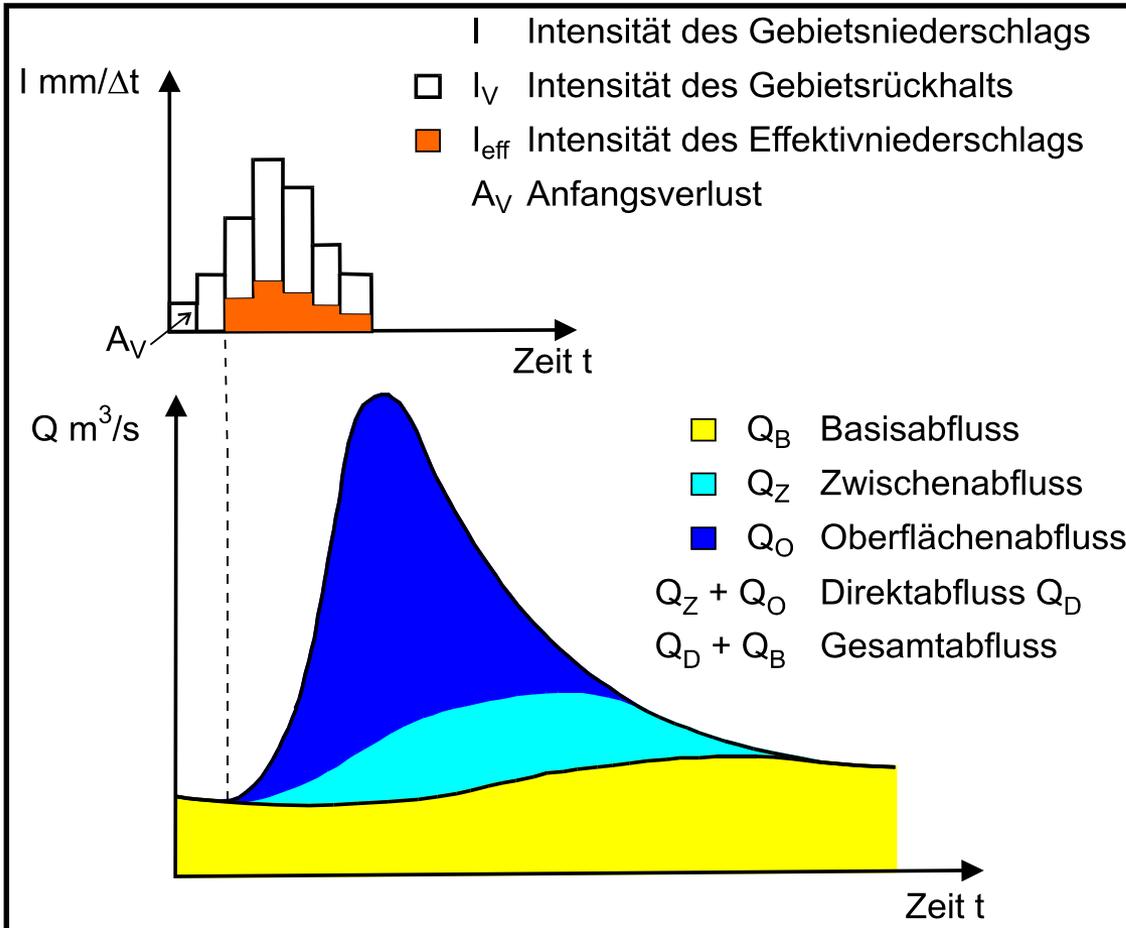
Hydrologisches Modell zur Berechnung des Durchflusses in einem Fließgewässer aus einzelnen Niederschlägen (Ereignismodell).

Die Simulation des Bodenwasserhaushaltes wird in N-A-Modellen im Gegensatz zu den Modellen zum Wasserhaushalt nicht durchgeführt. Sie dienen u.a. der Hochwasserberechnung aus einzelnen Niederschlagsereignissen.



Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung Niederschlag-Abfluss-Modell:



Ihringer 2019

Niederschlagsintensität
 $i \text{ [mm/h]} = N \text{ [mm]} / D \text{ [h]}$

Effektiver Niederschlag:
 Teil des Gebietsniederschlags, der
 als Abfluss wirksam wird.

Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung Niederschlag-Abfluss-Modell:

Aufteilung des Niederschlags in Effektivniederschlag und Gebietsrückhalt

Ermittlung des Effektivniederschlags aus beobachtetem NA-Ereignis:

- Ermittlung des Direkt- und Interflow-Abflusses $Q_D(t)$ (Abtrennung von Basisabfluss $Q_{Bas}(t)$)

- Berechnung des Direkt- und Interflow-Abflussvolumens

$$V_Q = \int_{t_A}^{t_E} (Q(t) - Q_{Bas}(t)) dt = \int_{t_A}^{t_E} Q_D(t) dt$$

- Berechnung des Niederschlagsvolumens im EZG der Fläche A_E

$$V_N = A_E \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

Empirisch zu bestimmende nur für das konkrete Einzugsgebiet zu bestimmende Größe

- Abflussbeiwert $0 \leq \psi < 1$

$$\psi = \frac{V_Q}{V_N} = \frac{A}{N} = \frac{\text{Abflusshöhe}}{\text{Niederschlagshöhe}}$$

- Verlustbeiwert

$$\varphi = 1 - \psi = \frac{N - A}{N} = \frac{R}{N} = \frac{\text{Gebietsrückhalt}}{\text{Niederschlagshöhe}}$$

Grundlagen der hydrologischen Modellierung

■ mittlerer Abflussbeiwert $\psi = \frac{h_{Neff}}{h_{Nges}} \frac{\int i_{eff}(t) dt}{\int i_{ges}(t) dt}$

Der Abflussbeiwert ist eine Funktion von:

Niederschlagsintensität

Niederschlagsdauer

Topographie

Bodeneigenschaften

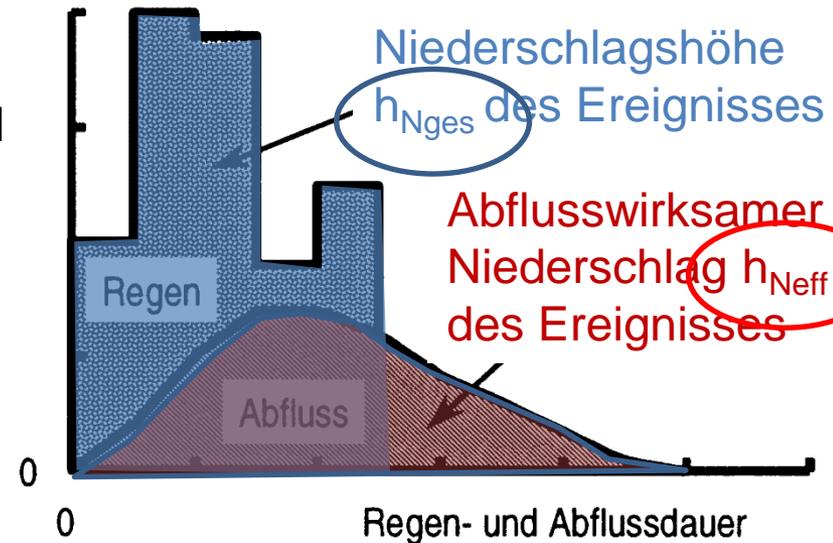
Vegetation

Landnutzung

Bodenfeuchte

Oft vereinfachend
als konstant
angenommen !!!

Regen- und Abflussintensität



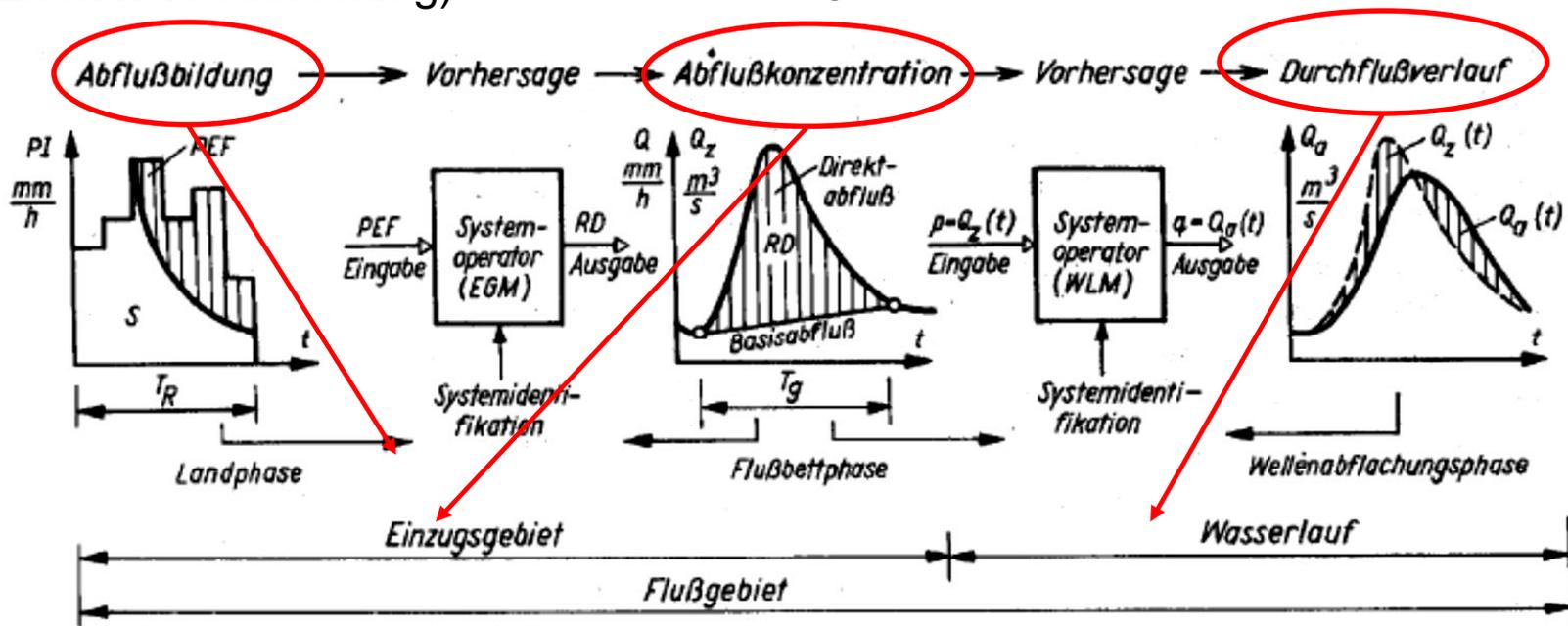
Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung Niederschlag-Abfluss-Modell:

Bestimmung des Anteils des Niederschlags, der nicht im EZG zurückgehalten wird und unmittelbar abfließt (Effektiv-Niederschlag)

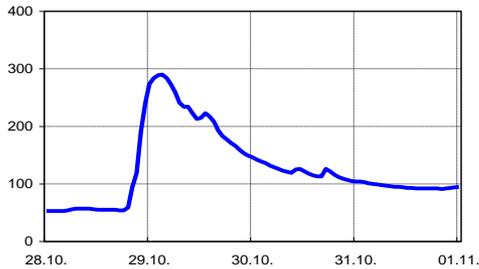
Bestimmung der Ganglinie des Abflusses aus dem EZG als Reaktion auf den Effektiv-Niederschlag

Beschreibung der Fortpflanzung der Hochwasserwelle im Fluss/Gewässernetz



Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Berechnungsmodus:



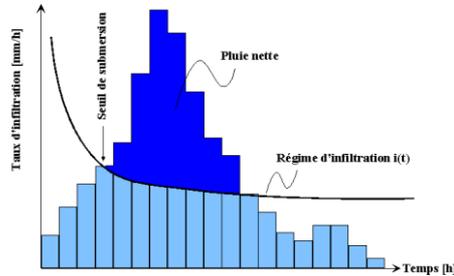
LARSIM

**Flussgebietsmodell
(Niederschlag-Abfluss-Modell)**

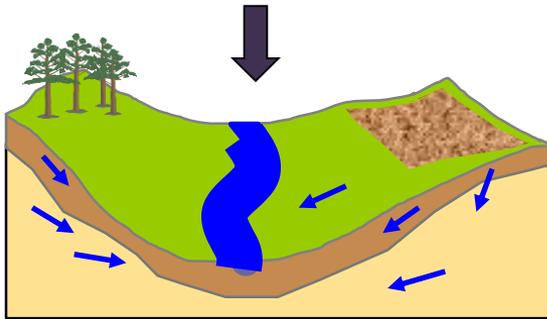
Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung Niederschlag-Abfluss-Modell:

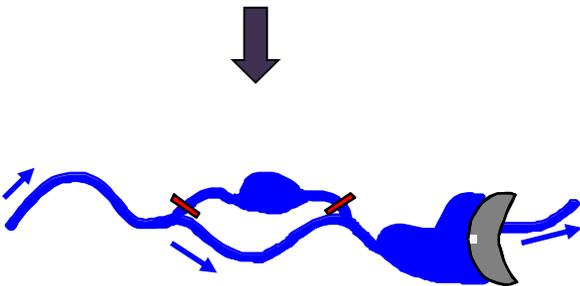
Abflussbildung



Abflusskonzentration



Wellenablauf



Effektivniederschlag

Abflussbeiwert

Einzugsgebiet \Rightarrow Gewässer

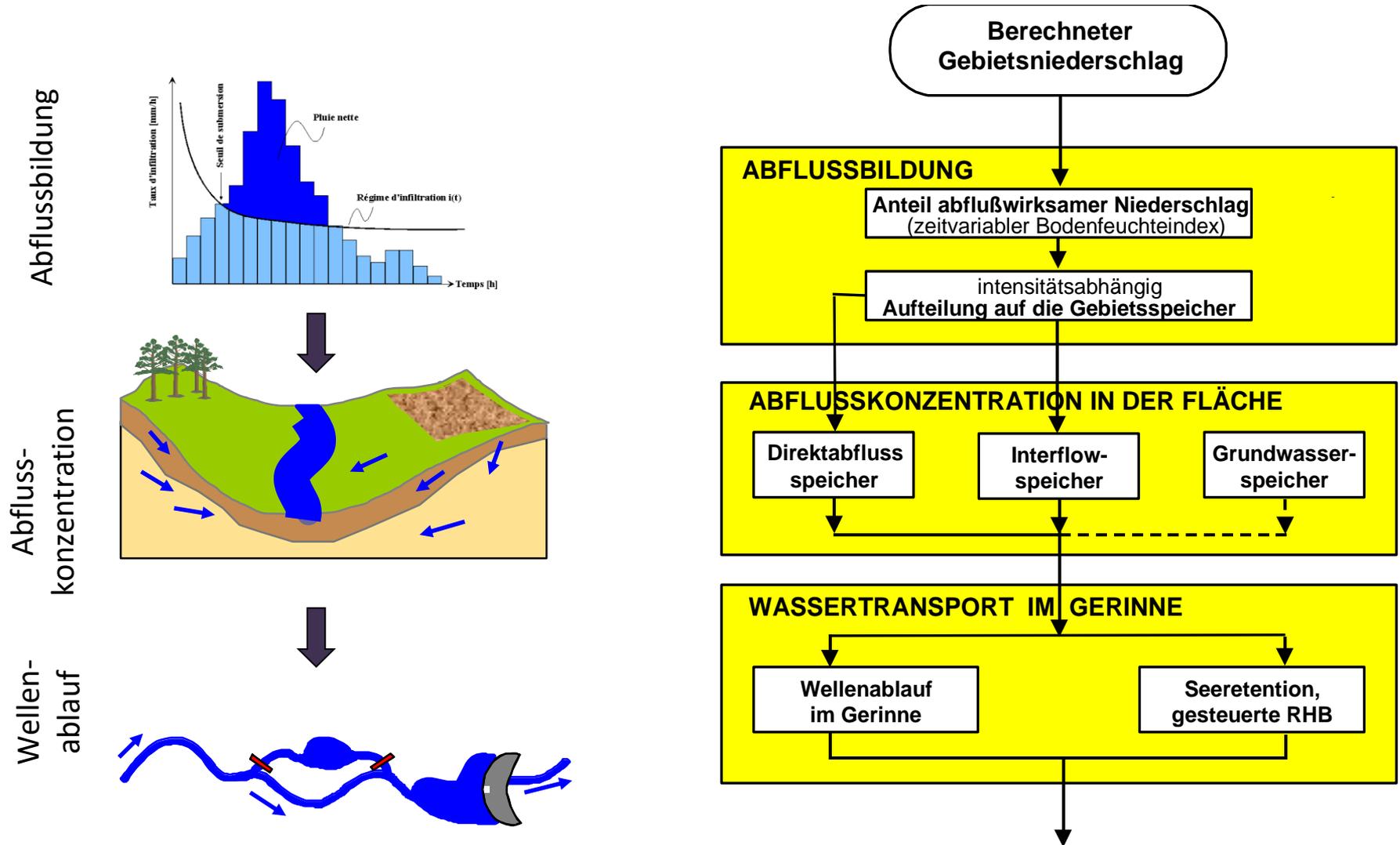
Speicherung und laterale
Wasserbewegung in der Fläche:
Basisabfluss, Interflow, Direktabfluss

Flussnetz, Seen

Translation und Retention im Gerinne,
Retentionswirkung von Seen und
Speicherbecken, Verzweigungen, Wasserein-
und überleitungen

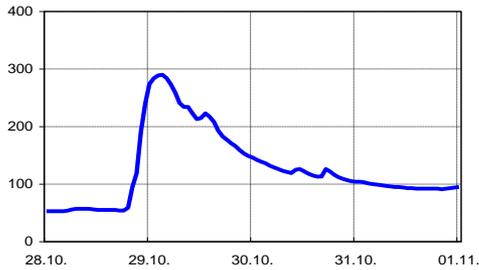
Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung LARSIM als Niederschlag-Abfluss-Modell:

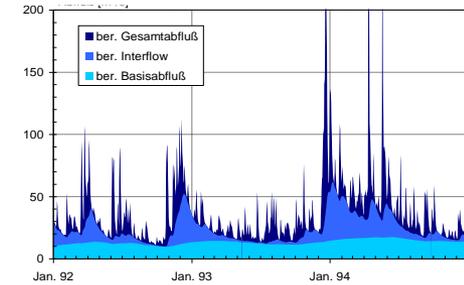


Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Berechnungsmodus:



LARSIM

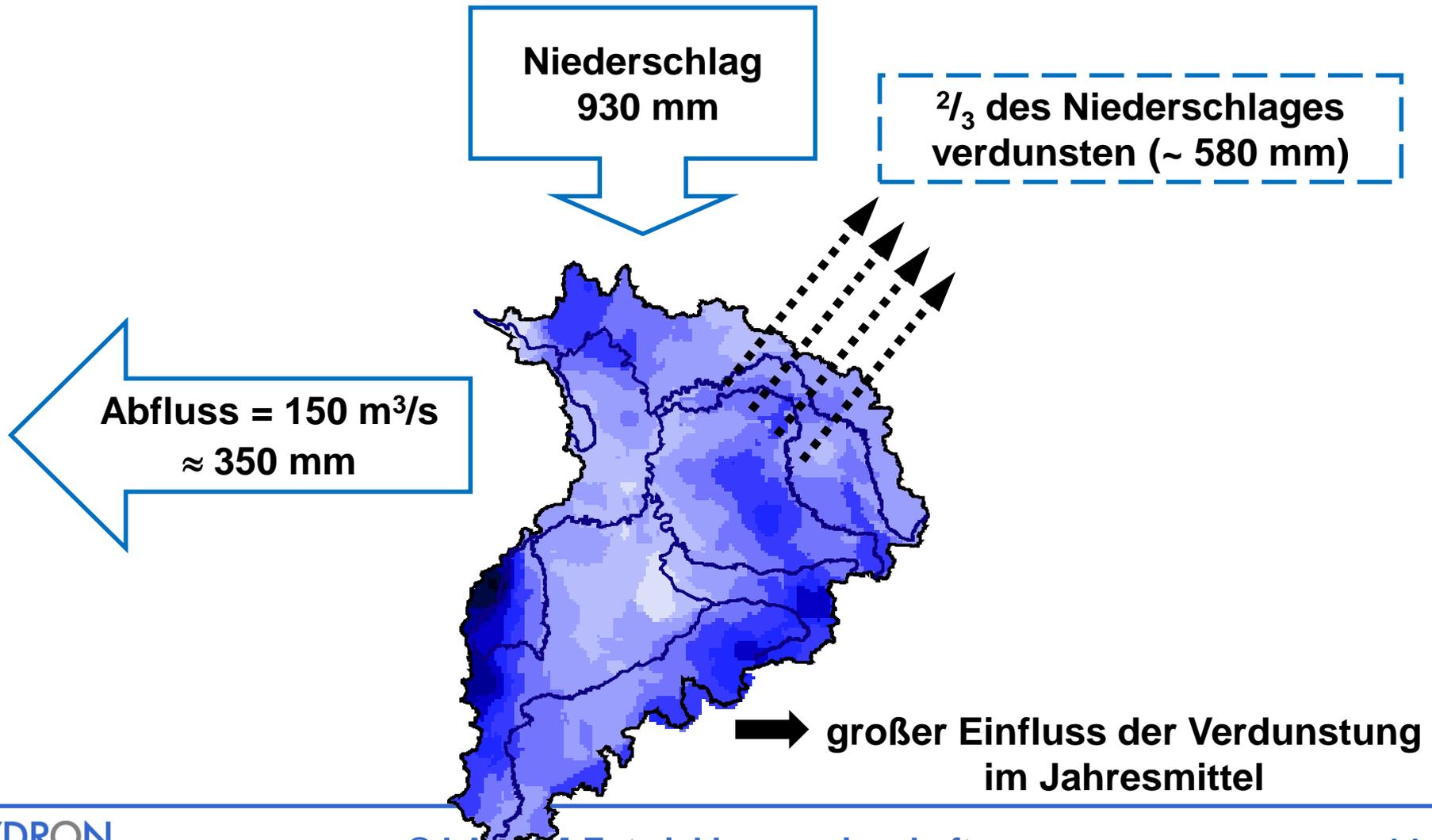


**Flussgebietsmodell
(Niederschlag-Abfluss-Modell)**

Wasserhaushaltsmodell

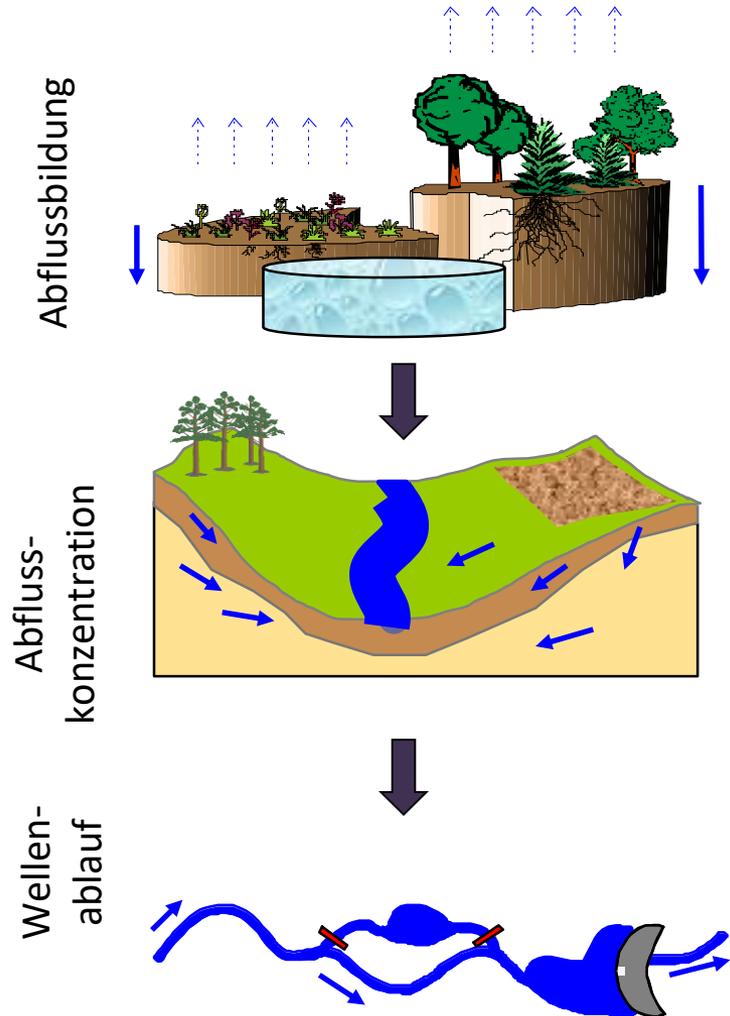
Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Wasserhaushalt Neckargebiet:



Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung LARSIM als Wasserhaushaltsmodell:



Vegetation ↔ Boden

Interzeption, Infiltration, Bodenwasser, Sättigungsflächen, Direktabfluss, Interflow, GW-Neubildung, Verdunstung, Schnee

versiegelte Flächen, freie Wasserflächen

Einzugsgebiet ⇒ Gewässer

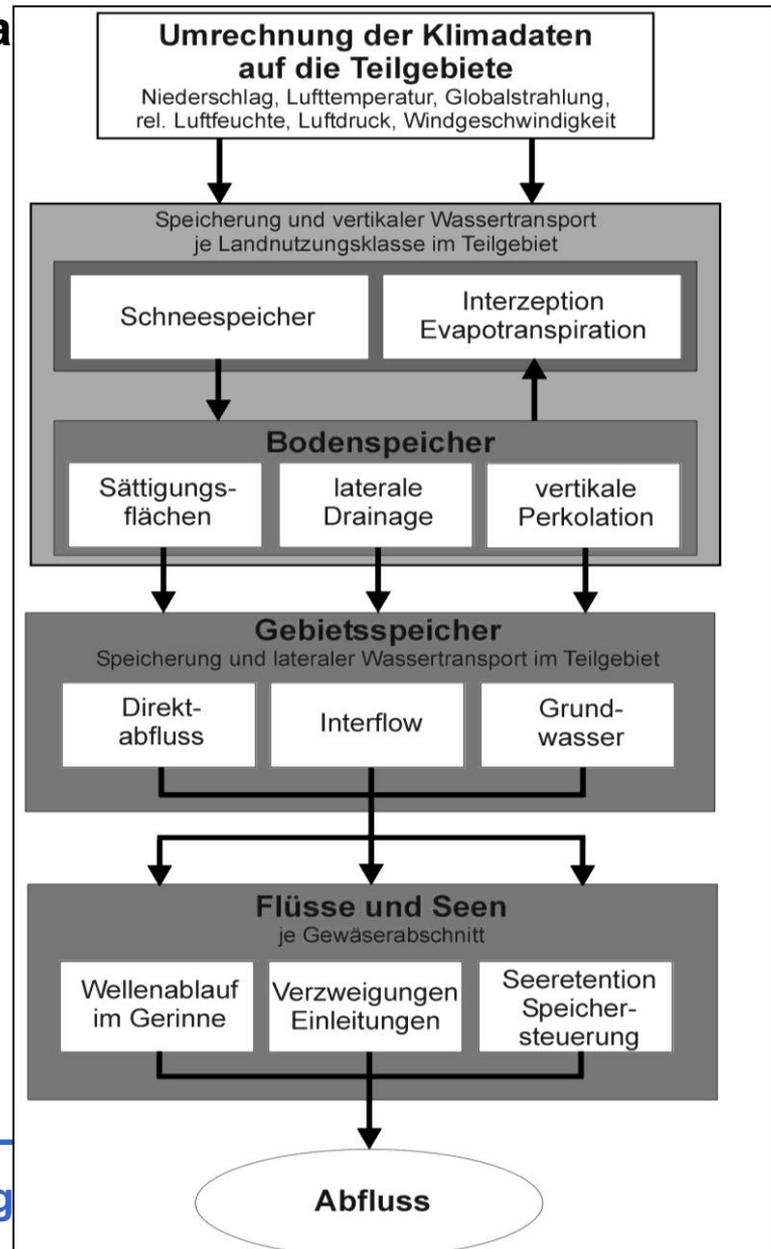
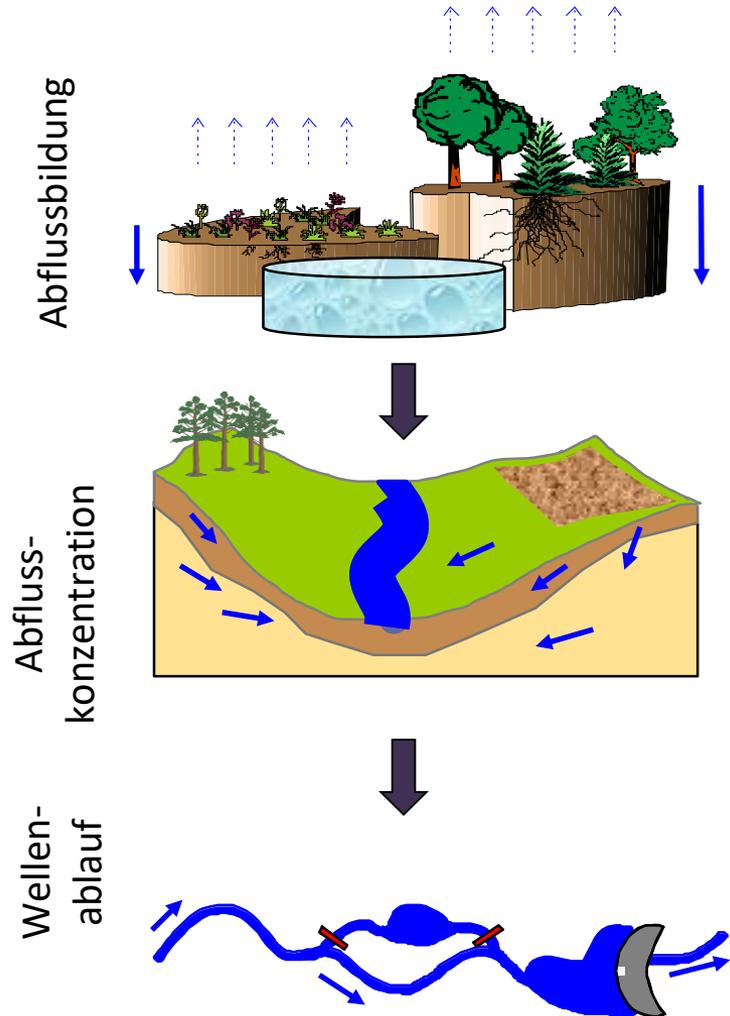
Speicherung und laterale Wasserbewegung in der Fläche:
Basisabfluss, Interflow, Direktabfluss

Flussnetz, Seen

Translation und Retention im Gerinne,
Retentionswirkung von Seen und Speicherbecken, Verzweigungen, Wasserein- und überleitungen

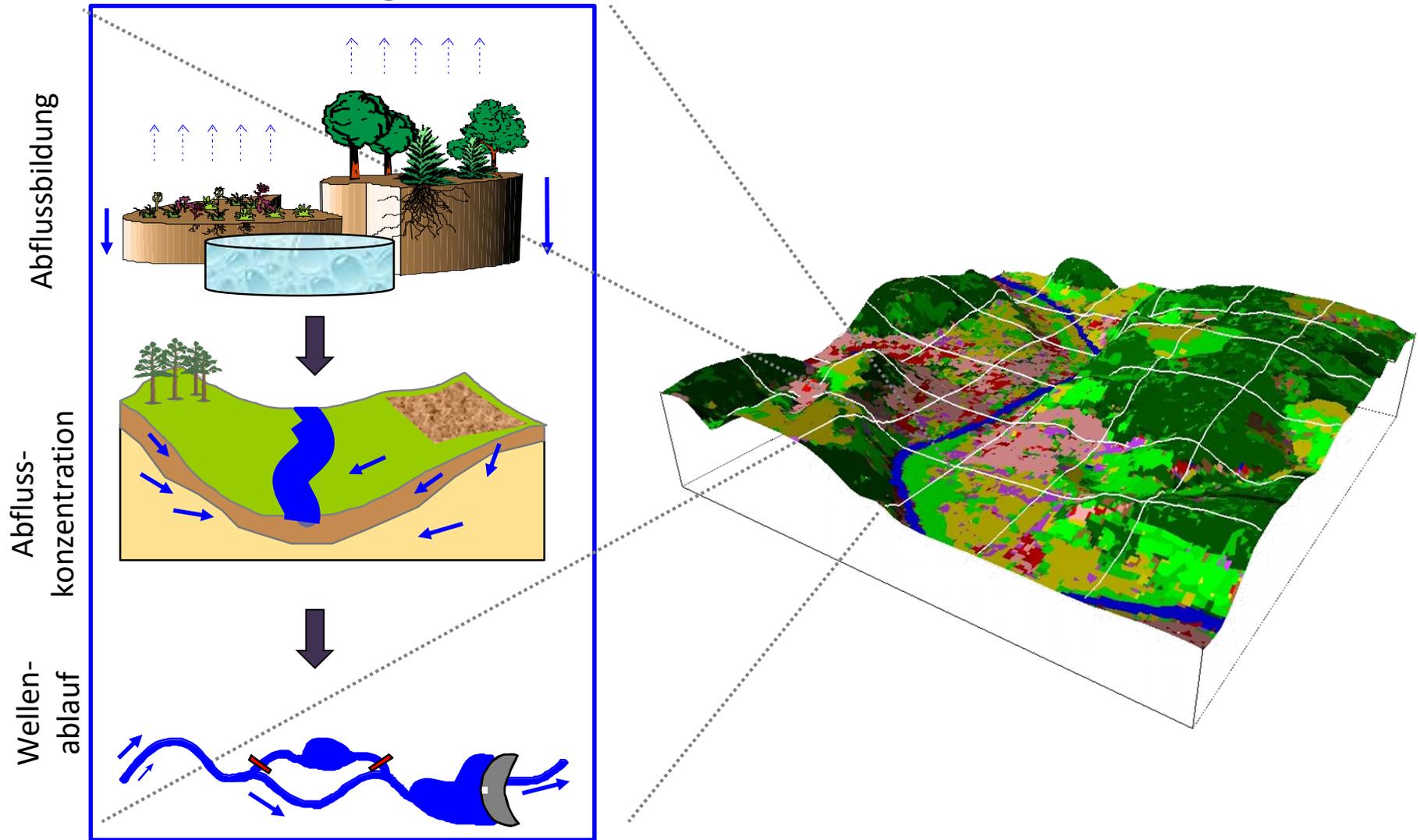
Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung LARSIM als Wasserha



Grundlagen der hydrologischen Modellierung

Prozessbeschreibung LARSIM als Wasserhaushaltsmodell:



Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Unterteilgebiete:

Das WHM-LARSIM erlaubt die räumliche Skala der Teilgebiete (TGB) feiner in Unterteilgebiete (UTGB) zu gliedern. Bei diesen UTGB handelt es sich um subskalige Landnutzungs-Boden-Kompartimente, in denen im WHM unter anderem die Berechnung des Bodenwasserhaushalts und der Abflussbildung erfolgt.

Im NA-Modus wird in der Regel keine räumliche Differenzierung innerhalb einzelner TGB durchgeführt.

Um bestimmte Parameter räumlich differenzierter vorzugeben, ist auch für LARSIM-NA die Möglichkeit der Definition von UTGB möglich. Dazu kann in der Gebietsdatei <utgb.dat> des WHM auch für LARSIM-NA neben der bereits (im WHM) verfügbaren Angabe der Landnutzungsnummer auch die Angabe eines Bodentyps vorliegen.

Die UTGB dienen bei LARSIM-NA lediglich einer räumlich stärker differenzierten Vorgabe bestimmter Modellparameter. Programmintern erfolgt eine flächengewichtete Mittelung der UTGB-Werte und die Berechnung findet im NA-Modus weiterhin vollständig auf Skala der TGB statt.

Um als Anwender einen Überblick der tatsächlich auf TGB-Skala zur Berechnung verwendeten Parameterwerte zu erhalten, ist die Option AUSGABE UTGB-MITTELWERTE zu aktivieren.

Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Schneemodellierung:

LARSIM-NA ermöglicht die Berechnung eines Schneemodells mit Akkumulation von Schnee, Berechnung der Energiebilanz der Schneedecke sowie der Setzung und tatsächlichen Schmelze der Schneedecke.

Die Berechnung der Energiebilanz der Schneedecke ist bei LARSIM-NA nur nach dem vereinfachten Knauf-Verfahren möglich. Dazu werden neben dem Niederschlag als weitere Eingabegrößen Lufttemperatur und Windgeschwindigkeit benötigt.

Die Berechnung komplexerer Verfahren im Zusammenhang mit der Schneemodellierung entsprechend dem LARSIM-WHM ist mit LARSIM-NA nicht vorgesehen (bspw. erweitertes Knauf-Verfahren, die Berechnung eines Schnee-Regen-Gemischs, Schneeinterzeption, Schnee-Massentransport, Schneekompartimente).

Eine höhenzonierte Schneemodellierung oder die Berechnung von Schneekompartimenten innerhalb von Teilgebieten ist mit LARSIM-NA möglich.

Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Zustandsdatei:

LARSIM-WHM als Kontinuummodell benötigt eine Zustandsdatei zu Beginn der Berechnung. In der Zustandsdatei sind die erforderlichen Werte für den Simulationsbeginn für sämtliche Speicher (u.a. Bodenspeicher, Schneespeicher, Gebietsspeicher, Gerinnespeicher) enthalten. Die WHM-Zustandsdatei enthält die Speicherzustände für jedes Teilgebiet.

LARSIM-NA als Ereignismodell benötigt keine Zustandsdatei.

LARSIM-NA bietet die Möglichkeit, die Zustandsgrößen einer ggf. berechneten Schneedecke sowie die Abflussverhältnisse aller Teilgebiete für einen bestimmten Zeitpunkt in eine spezielle Zustandsdatei auszugeben. Die Angaben dieser Zustandsdatei können in einem darauffolgenden Simulationslauf als Startniederschläge und ggf. als Anfangswerte zur Berechnung einer Schneedecke dienen.

Während die Schneegrößen in der Zustandsdatei exakt die Verhältnisse der Schneedecke einer vorangegangenen Simulation widerspiegeln, ermöglicht die Aus- und Eingabe der Startniederschläge über die Zustandsdatei nur eine grobe Abschätzung der Abflussverhältnisse der vorangegangenen Simulation.

Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

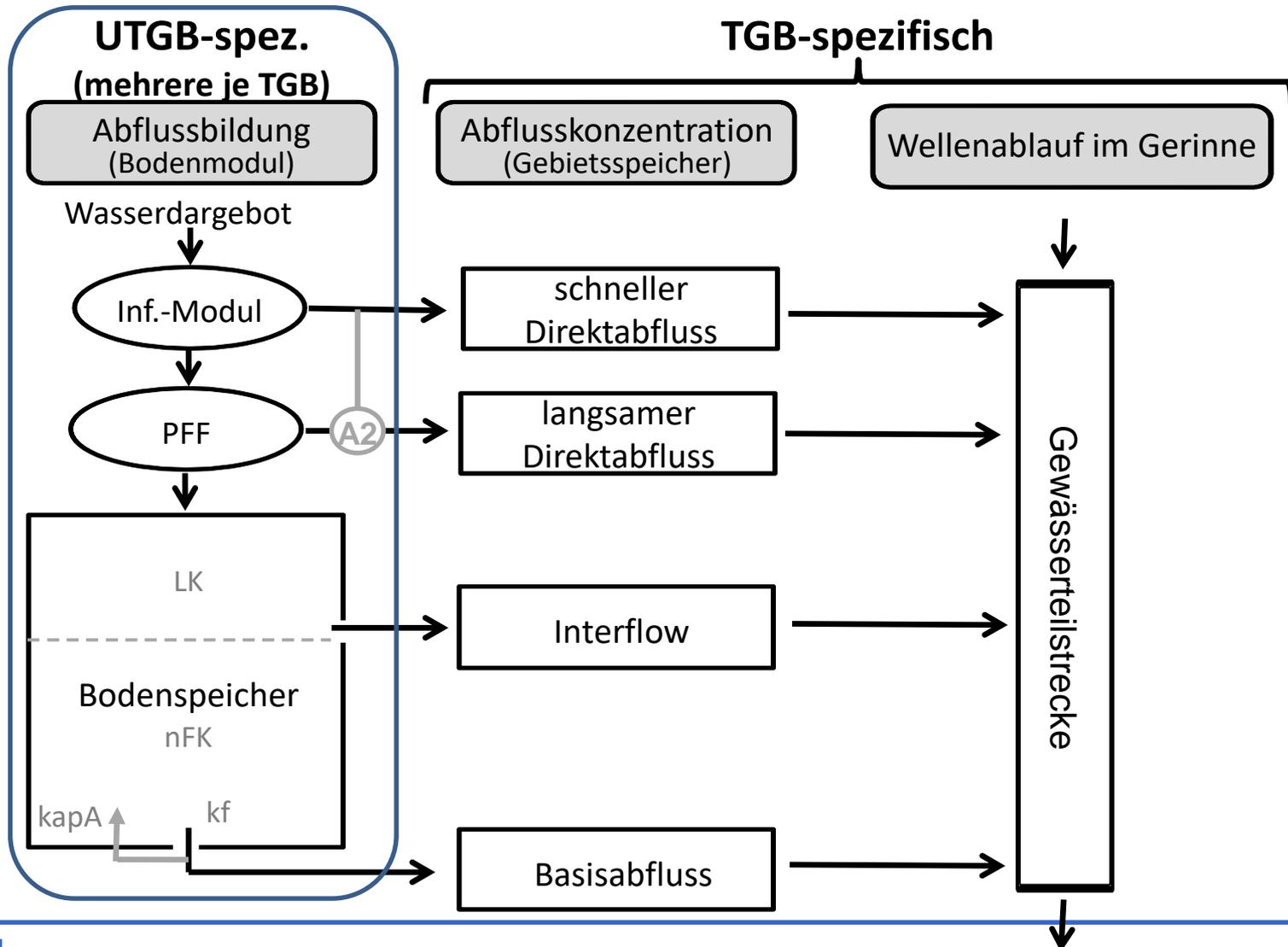
Abflussbildung:

Berechnung des abflusswirksamen Niederschlags im Teilgebiet (Effektivniederschlag) anhand folgender Verfahren:

- Abflussbeiwert-Verfahren
- Phi-Index-Verfahren
- Verfahren nach Koehler (Koehler 1971)
- Verfahren nach Horton (Horton 1937)
- SCS-Verfahren (Soil Conservation Service 1985)
- Verfahren nach Lutz (Lutz 1984)
- Abflussbeiwert-Funktion

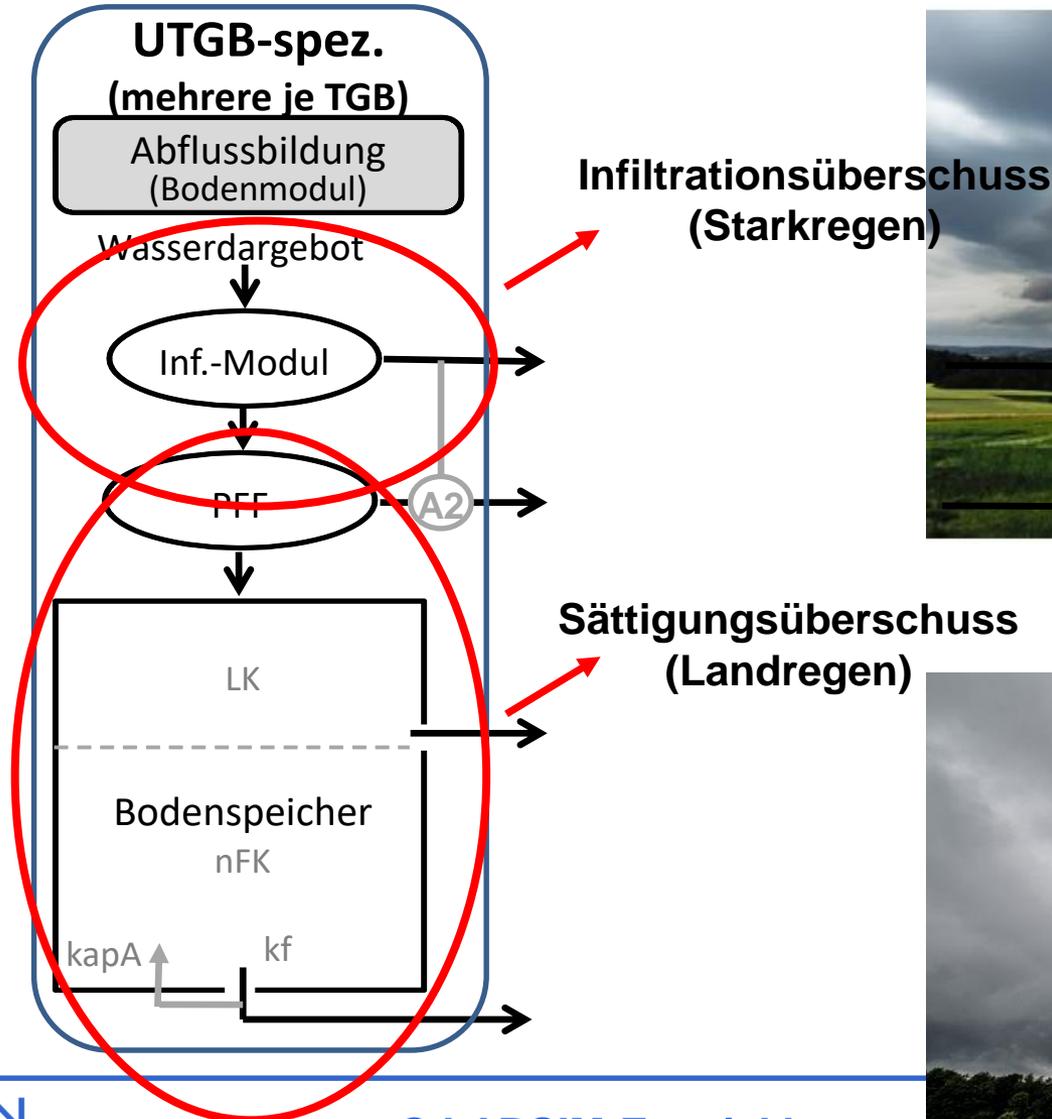
Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Modellschema LARSIM-WHM:



Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Modellschema LARSIM-WHM:



Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Infiltrationsüberschuss:

Die Option INFILTRATION GRENZWERT dient der Begrenzung der maximalen Infiltrationsrate zur verbesserten Abbildung von Abflussereignissen bei Starkregen. Die maximale Infiltrationsrate ist unabhängig von der aktuellen Füllung des Bodenspeichers. Damit kann ein Infiltrationsüberschuss bei hohen Niederschlagsintensitäten auf trockenen Boden besser abgebildet werden.

Im LARSIM-WHM kann alternativ mit der Option INFILTRATION DYNAMISCH die Infiltration und daraus resultierender Horton'scher Oberflächenabfluss physikalisch basiert (analog zum Modell RoGeR, Univ. Freiburg) berechnet werden (Berechnung der Infiltration über Bodenmatrix, Makroporen und Trockenrisse sowie der Wechselwirkungen zwischen Infiltration und Bodenmodul). Da die Bodenfeuchte einen großen Einfluss auf die Berechnung des Infiltrationsüberschusses hat, ist diese Option im LARSIM-WHM der Option INFILTRATION GRENZWERT vorzuziehen.

Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Infiltrationsüberschuss:

Bei der Option INFILTRATION GRENZWERT im LARSIM-NA ist der Grenzwert InfM (maximale Infiltrationsrate in mm/h) vorzugeben. Niederschlag mit einer Intensität größer InfM wird gleich dem Direktabfluss im Teilgebiet zugeschlagen. Der verbleibende Anteil des Gebietsniederschlags geht in die Berechnung des weiteren Effektivniederschlags nach der jeweils gewählten Methode ein. Der daraus ermittelte weitere Effektivniederschlag wird wie gewöhnlich über die Interflow-Index-Rate A auf Interflow und weiteren Direktabfluss aufgeteilt.

Da die Berechnung des Abflussbeiwerts ggf. erst nach der Abtrennung eines Anteils des Niederschlags über InfM erfolgt, können die von LARSIM ausgegebenen PSI-Werte zu gering sein. Wird ein Anteil des Niederschlags über InfM dem Direktabfluss zugeschlagen, wird dieser folglich nicht bei der Ermittlung des PSI-Werts für den verbleibenden Niederschlag berücksichtigt.

Im LARSIM-NA kann anhand des Einzelparameters VERSCHLAEMMUNG VF ein ereignisspezifischer Verschlämmungsfaktor zur Reduktion der maximalen Infiltrationsraten infolge von Verschlämmung für alle Ackerflächen im Modellgebiet vorgegeben werden. Dabei werden die maximalen Infiltrationsraten (InfM) für jedes Unterteilgebiet mit der Landnutzung 'Acker' mit dem Wert des Einzelparameters multipliziert.

Die Vorgabe eines monatlich variierenden Verschlämmungsgrads wie im LARSIM-WHM in der Datei <lanu.par> ist nicht möglich.

Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Interflow:

Die Aufteilung des abflusswirksamen Effektivniederschlages in Interflow und Direktabfluss erfolgt über die Interflow-Index-Rate:

$$RSD = \text{Maximum}\{(N_{\text{eff}} - A \cdot t_a), 0\}$$

$$RSI = N_{\text{eff}} - RSD$$

RSD	[mm]	Direktabflussanteil am Effektivniederschlag
RSI	[mm]	Interflow-Anteil am Effektivniederschlag
A	[mm/h]	Interflow-Index-Rate

Die Interflow-Index-Rate A wird Pegelkontrollbereichs-spezifisch in der Datei <tape35> vorgegeben.

Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

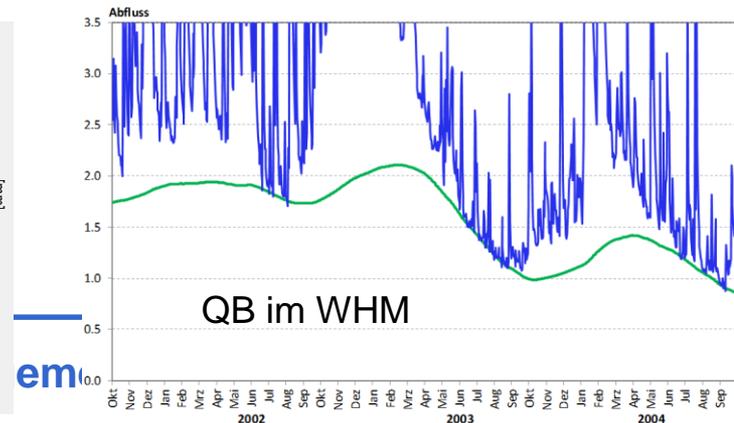
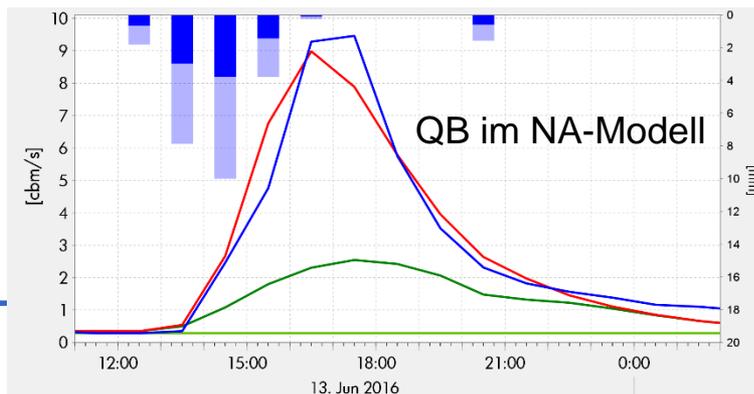
Basisabfluss:

Der Basisabfluss wird bei LARSIM-NA als konstant und unabhängig vom abflusswirksamen Niederschlag angenommen. Der konstante Basisabfluss wird aus der Basisabflussspende berechnet:

$$QB = QBSP \cdot F_{TGB}$$

QB	[m ³ /s]	Basisabfluss
QBSP	[m ³ /s*km ²]	Basisabflussspende
F _{TGB}	[km ²]	Fläche des Teilgebiets

QBSP kann direkt pegelkontrollbereichsspezifisch vorgegeben oder alternativ programmintern berechnet werden. Dabei werden die kleinsten Abflüsse vor dem aktuellen Hochwasserereignis aus den gemessenen Abflüssen der Pegel ermittelt und daraus die Basisabflussspenden in den Pegelkontrollbereichen berechnet



Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus

Berechnung der Abflusskonzentration:

In LARSIM-NA stehen drei Verfahren zur Berechnung der Abflusskonzentration zur Verfügung:

- Einzellinearspeicher
- Modifiziertes Clark-Verfahren (Clark 1945)
- Speicherkaskade (Nash 1959) (nur für Direktabfluss, wird in LARSIM-NA mit der Option EINHEITSGANGLINIE aktiviert)

Je nach gesetzter Kombination von Optionen werden verschiedene Verfahren angewandt:

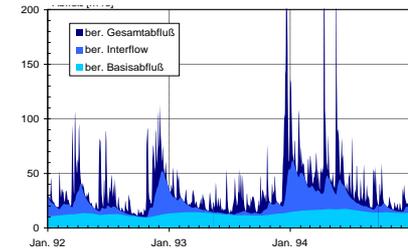
Teilgebietspeicher		zu setzende Optionen für Abflusskonzentration in den Teilgebieten
langsam	schnell	
Einzellinearspeicher	Clark	<keine>
Clark	Clark	CLARK FUER INTERFLOW
Einzellinearspeicher	Einzellinearspeicher	EINZELINEARSPEICHER
Clark	Einzellinearspeicher	EINZELINEARSPEICHER + CLARK FUER INTERFLOW
Einzellinearspeicher	Nash	EINHEITSGANGLINIE
Clark	Nash	EINHEITSGANGLINIE + CLARK FUER INTERFLOW

In LARSIM-WHM wird die Berechnung immer mit Einzellinearspeichern durchgeführt.

Unterschiede zwischen WHM- und NA-Modus



LARSIM



**LARSIM-Modus:
Flussgebietsmodell**

**LARSIM-Modus:
Wasserhaushaltsmodell**

Einsatzmodus:

ereignisbezogene
HW-Simulation

Simulation des
Abflusskontinuums

Prozessbeschr.

vereinfacht

detailliert (+Evap., +Boden)

meteorolog.
Antrieb:

Niederschlag

Niederschlag, Lufttemperatur,
Windgeschwind., Luftfeuchte,
Globalstrahlung, Luftdruck

offline-
Simulation:

HW-Schutzplanung, ...

zusätzlich: Auswirk. Klima-
änderungen, Daten für GW-
und Gütemodelle

operationelle
Vorhersage:

HW-Vorhersage

zusätzlich: NW-Vorhersage,
HW-Frühwarnung,
VH Wassertemperaturen

Literatur

- Reggiani, P., Sivapalan, M and Hassanizadeh, S.M. (1998): A unifying framework for watershed thermodynamics: balance equations for mass, momentum, energy and entropy, and the second law of thermodynamics. *Advances in Water Resources* 22, 367-398.
- Ihringer, J. (2019): Vorlesung Hydrologie – Niederschlags-Abfluss-Modell. Vorlesungsunterlagen, KIT, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung
- Ostrowski (2011): Ingenieurhydrologie I. Vorlesungsunterlagen. Technische Universität Darmstadt, Institut für Wasserbau und Wasserwirtschaft