

Berechnung der Abflusskonzentration und des Wellenablaufs in LARSIM

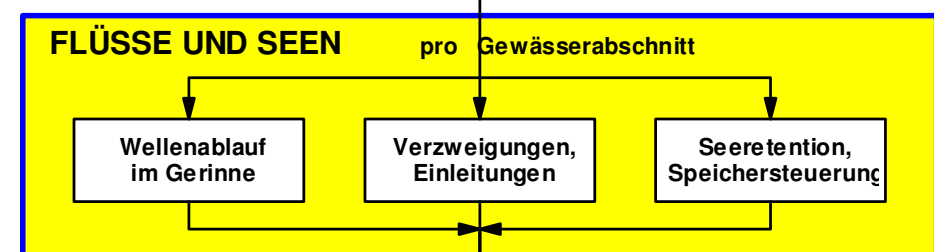
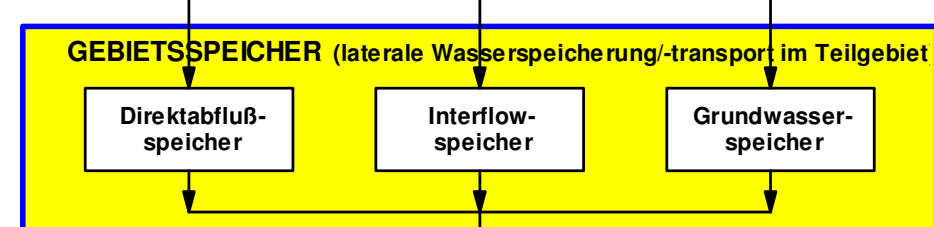
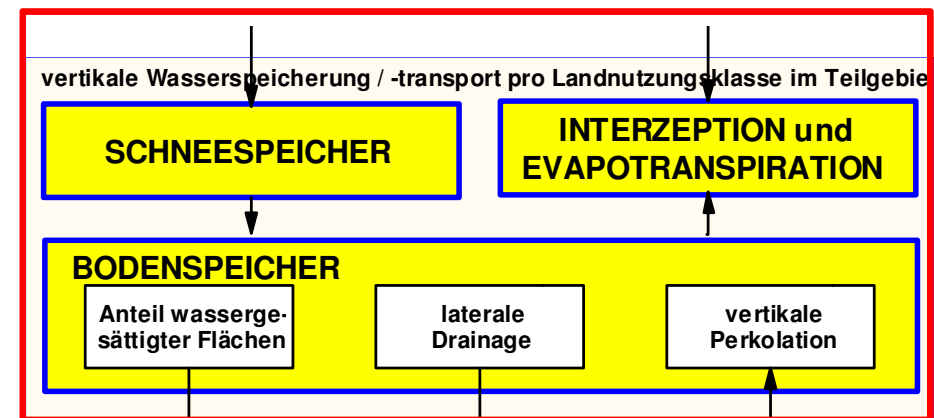
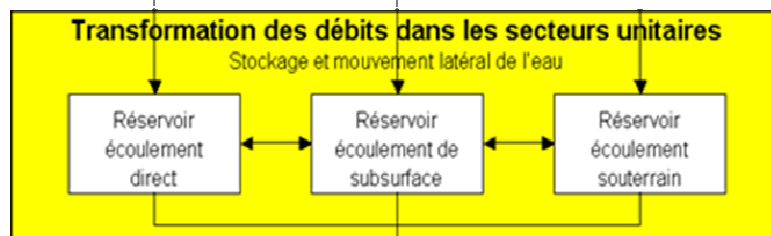
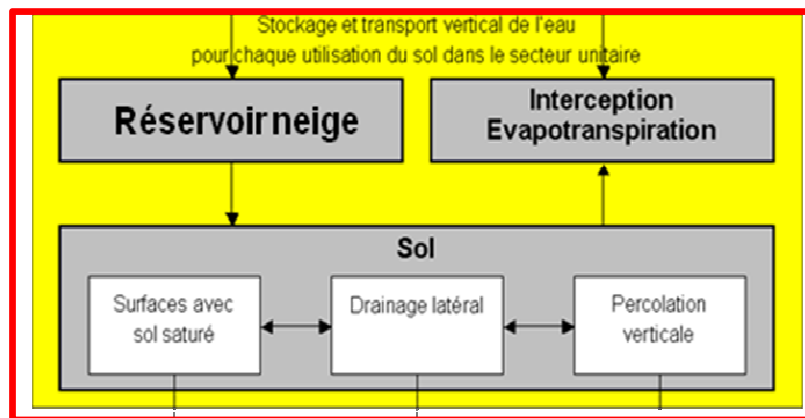
Kai Gerlinger

HYDRON Ingenieurgesellschaft für
Umwelt und Wasserwirtschaft mbH

März 2012

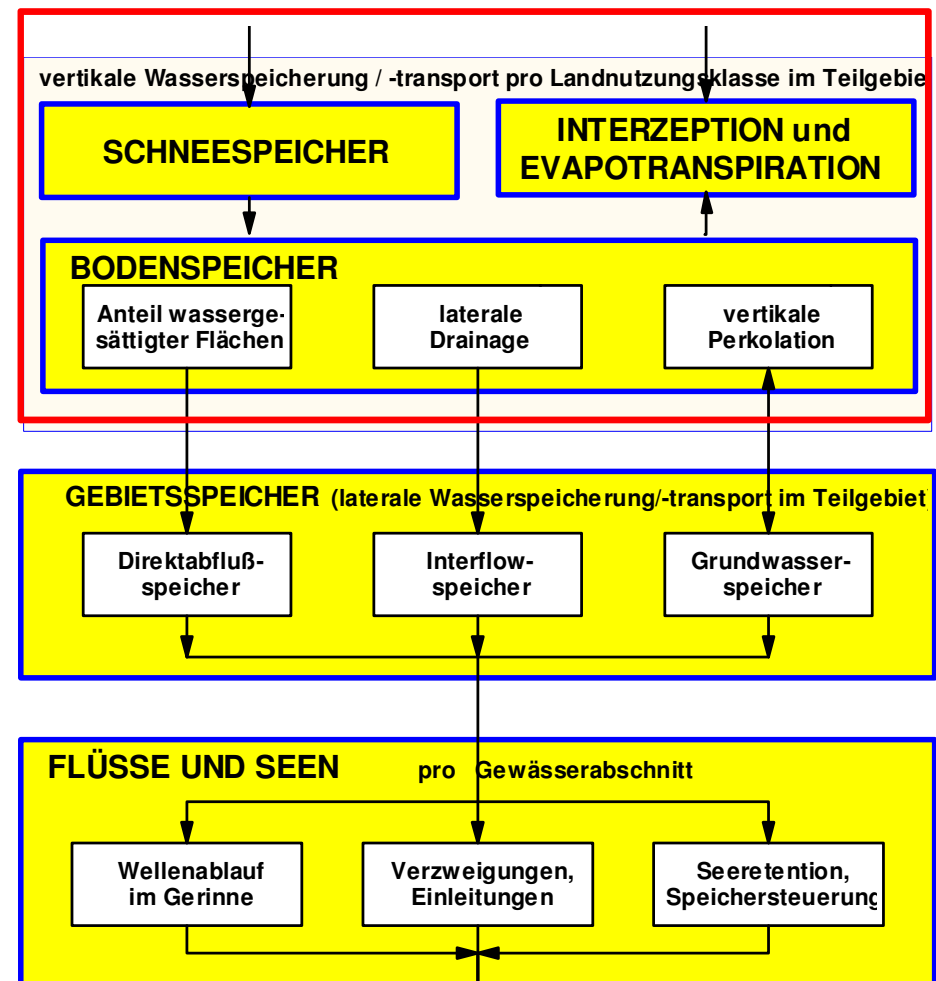
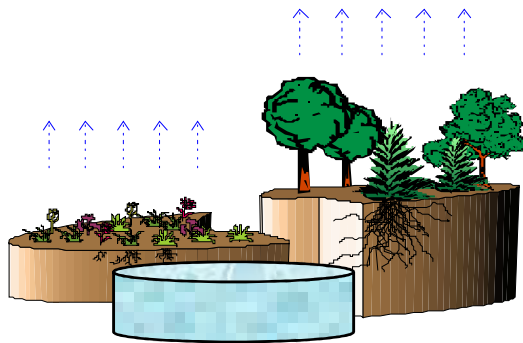
Berechnung der Abflussbildung

- Modellschema LARSIM:
 - Vertikaler Wassertransport in der Schnee-, Vegetations- und Bodenschicht



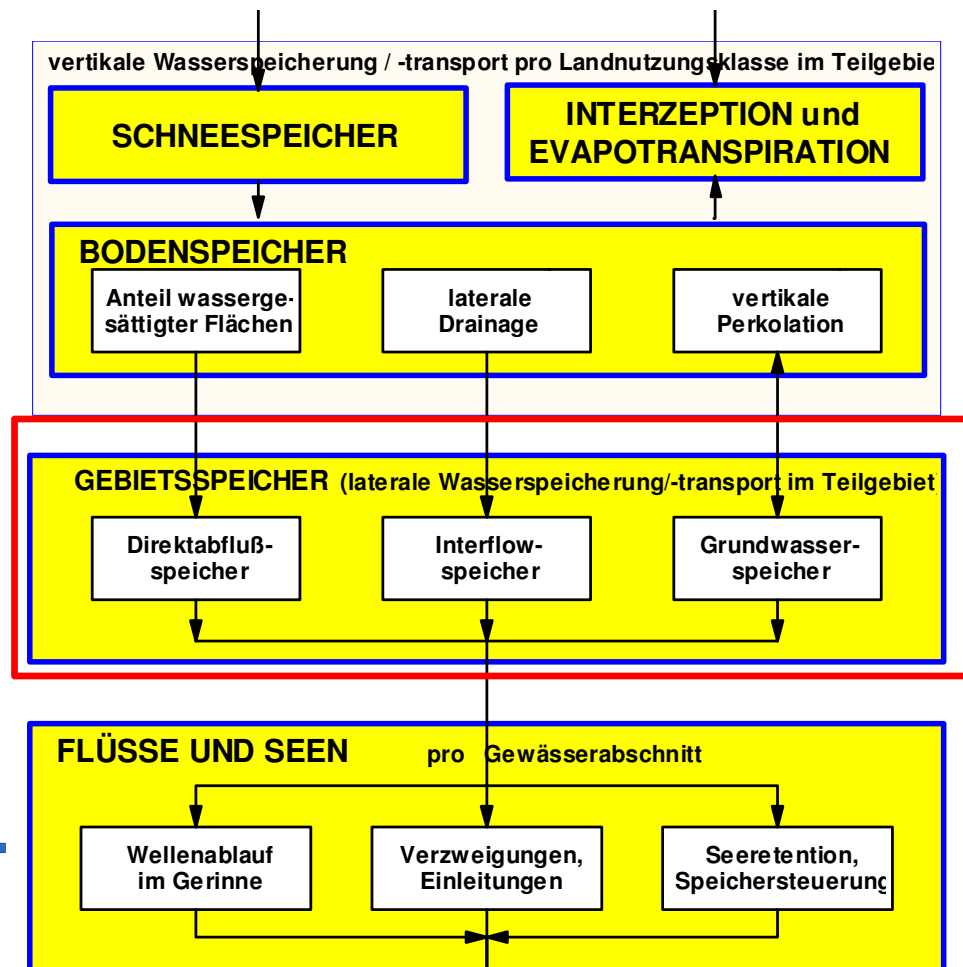
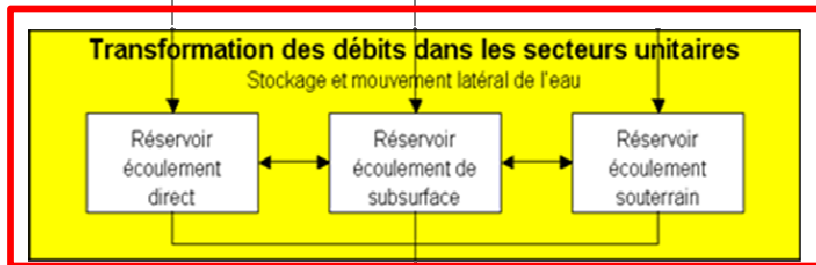
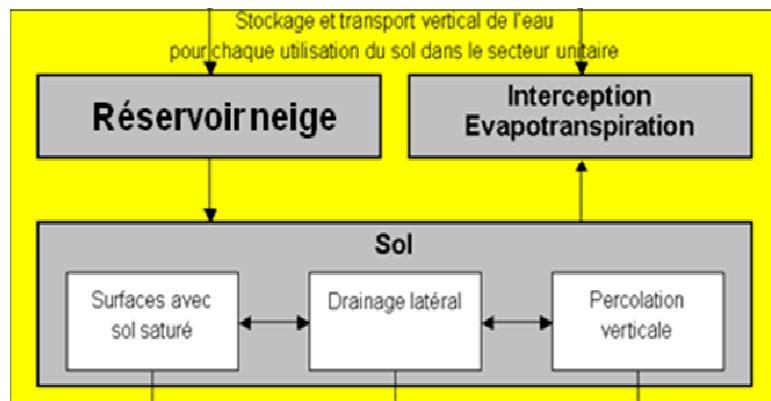
Berechnung der Abflussbildung

- Modellschema LARSIM:
 - Vertikaler Wassertransport in der Schnee-, Vegetations- und Bodenschicht



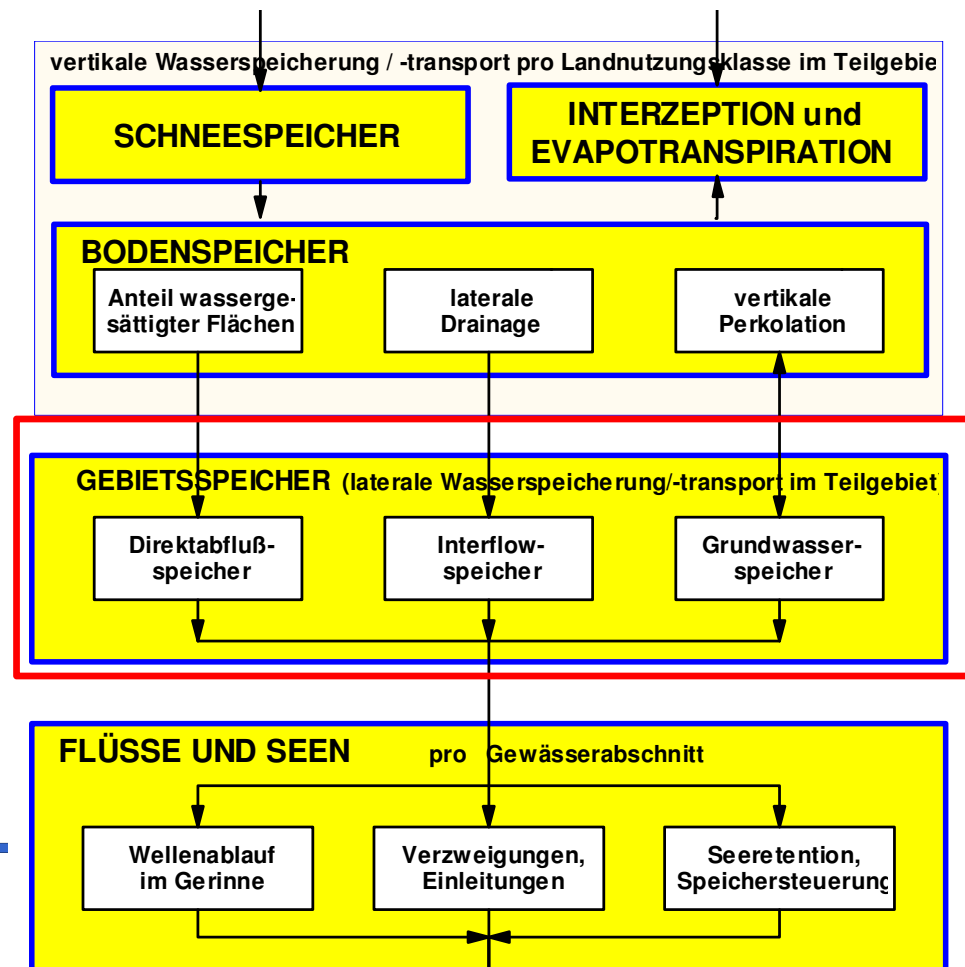
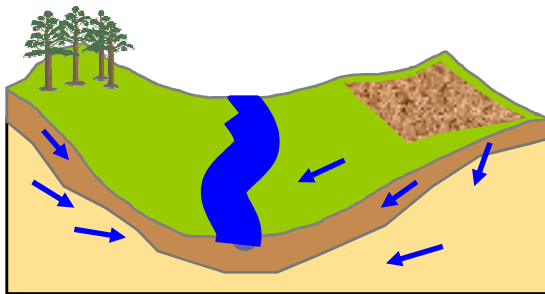
Berechnung der Abflussbildung

- Modellschema LARSIM:
 - Lateraler Wassertransport aus der Einzugsgebietsfläche in das Gerinne (flächenbezogener Prozess)



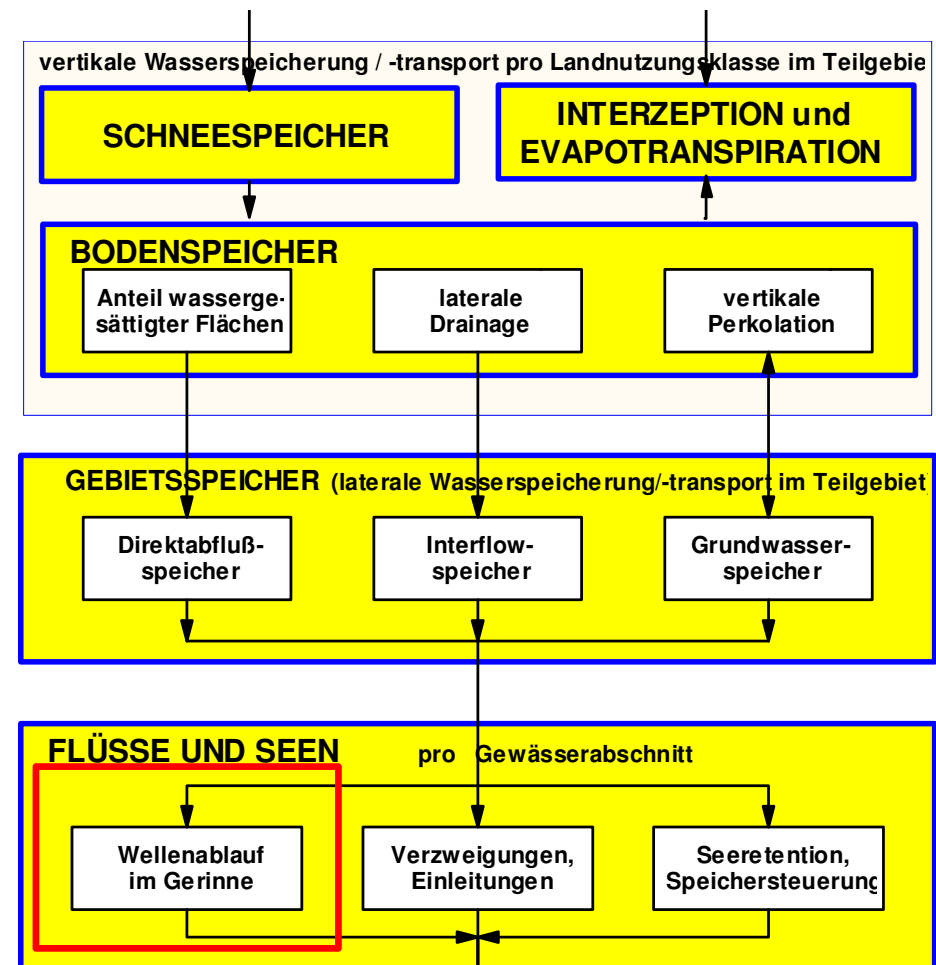
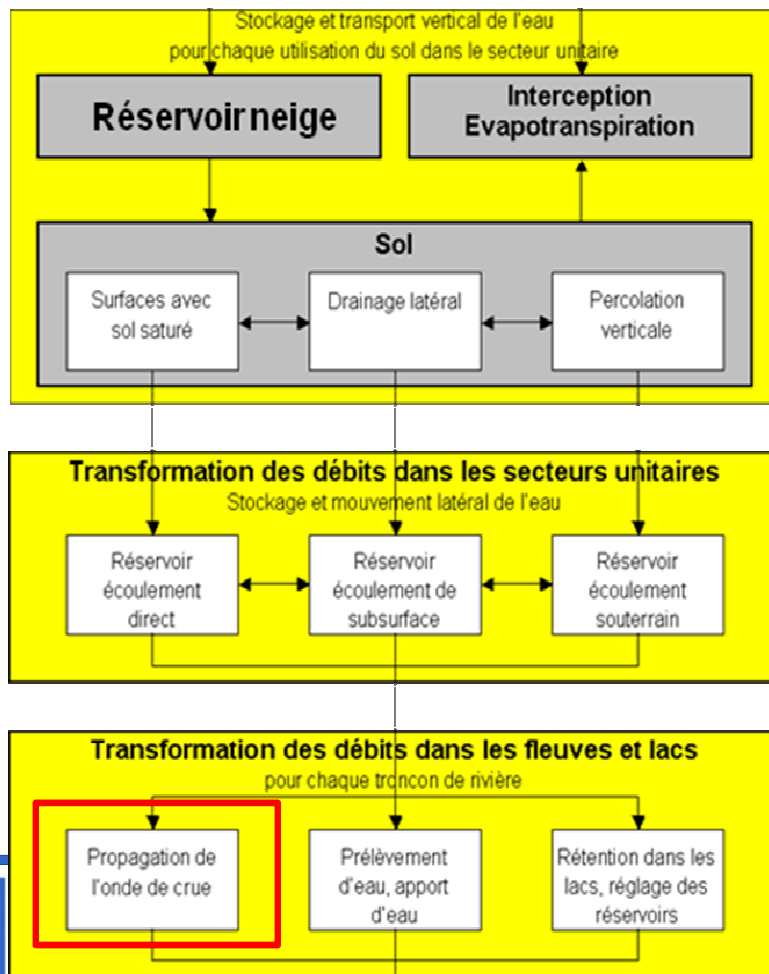
Berechnung der Abflussbildung

- Modellschema LARSIM:
 - Lateraler Wassertransport aus der Einzugsgebietsfläche in das Gerinne (flächenbezogener Prozess)



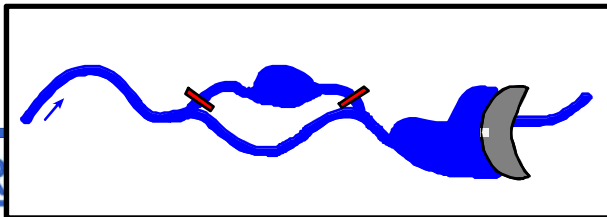
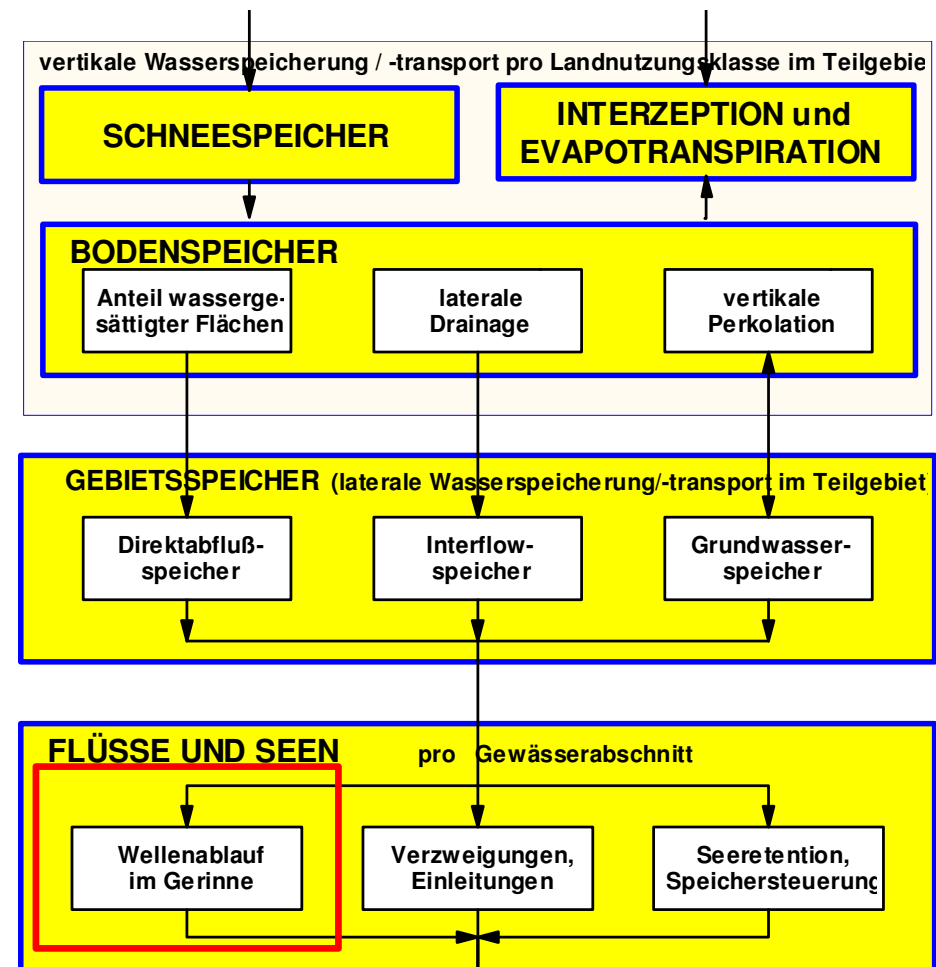
Berechnung der Abflussbildung

- Modellschema LARSIM:
 - Wassertransport im Gerinne (Flood-Routing)



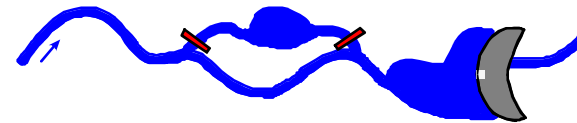
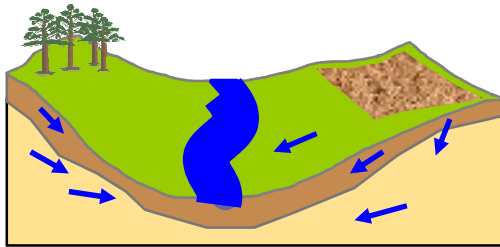
Berechnung der Abflussbildung

- Modellschema LARSIM:
 - Wassertransport im Gerinne (Flood-Routing)

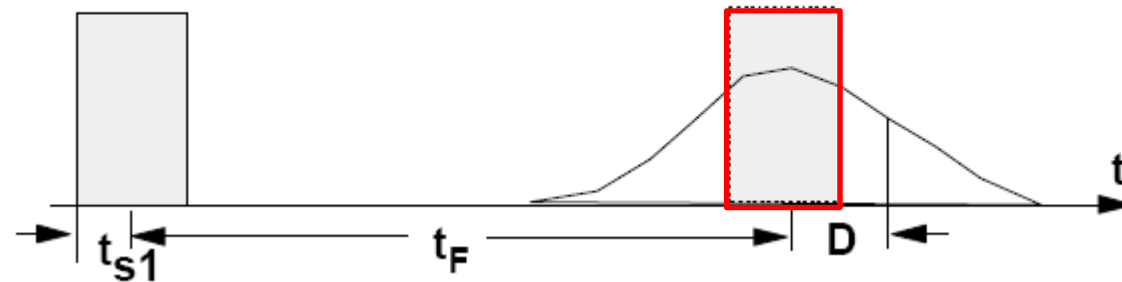


Translation und Retention

- Berücksichtigung der durch den Transport des Wassers in der Fläche und im Gerinne bedingten Translation...



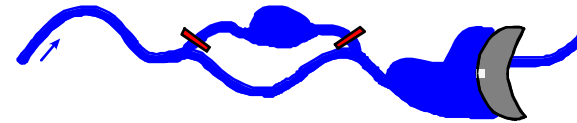
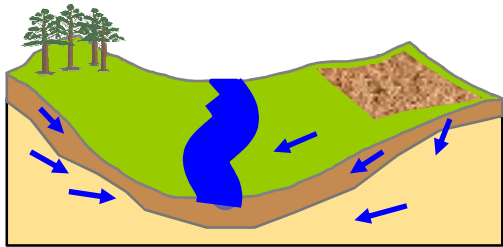
Translation



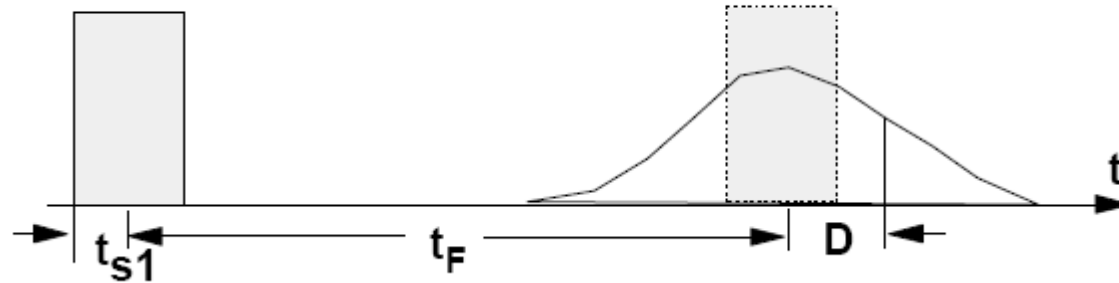
Disse (2009)

Translation und Retention

- Berücksichtigung der durch den Transport des Wassers in der Fläche und im Gerinne bedingten Translation und der Retention (Dispersion).



Translation

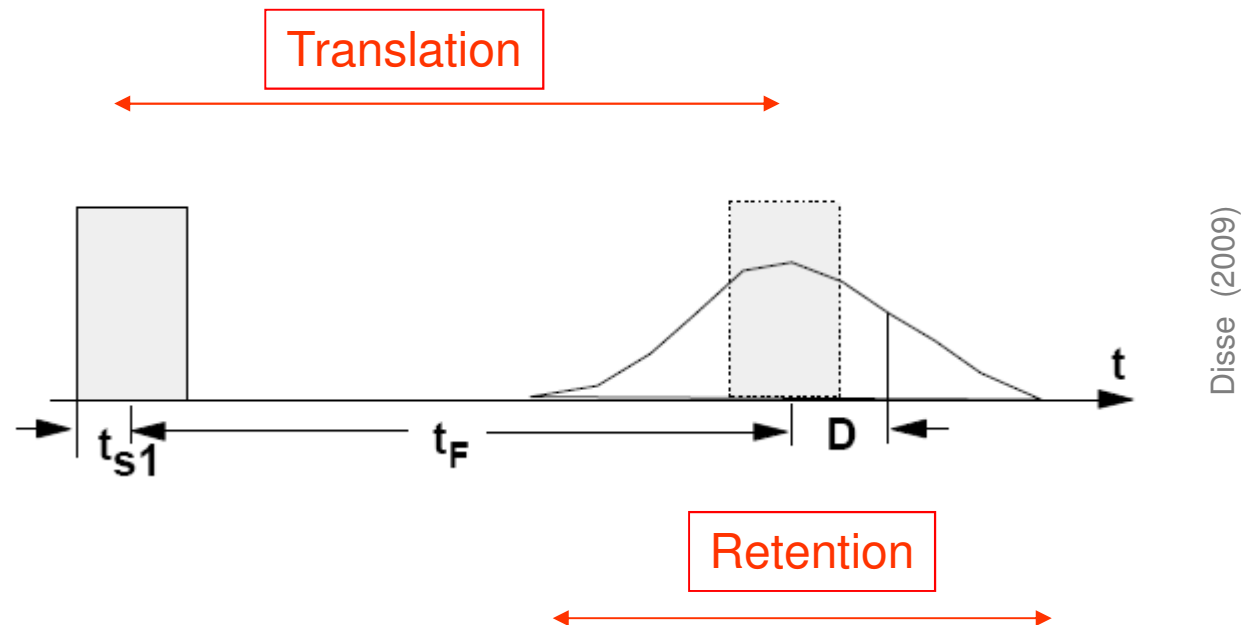


Disse (2009)

Retention

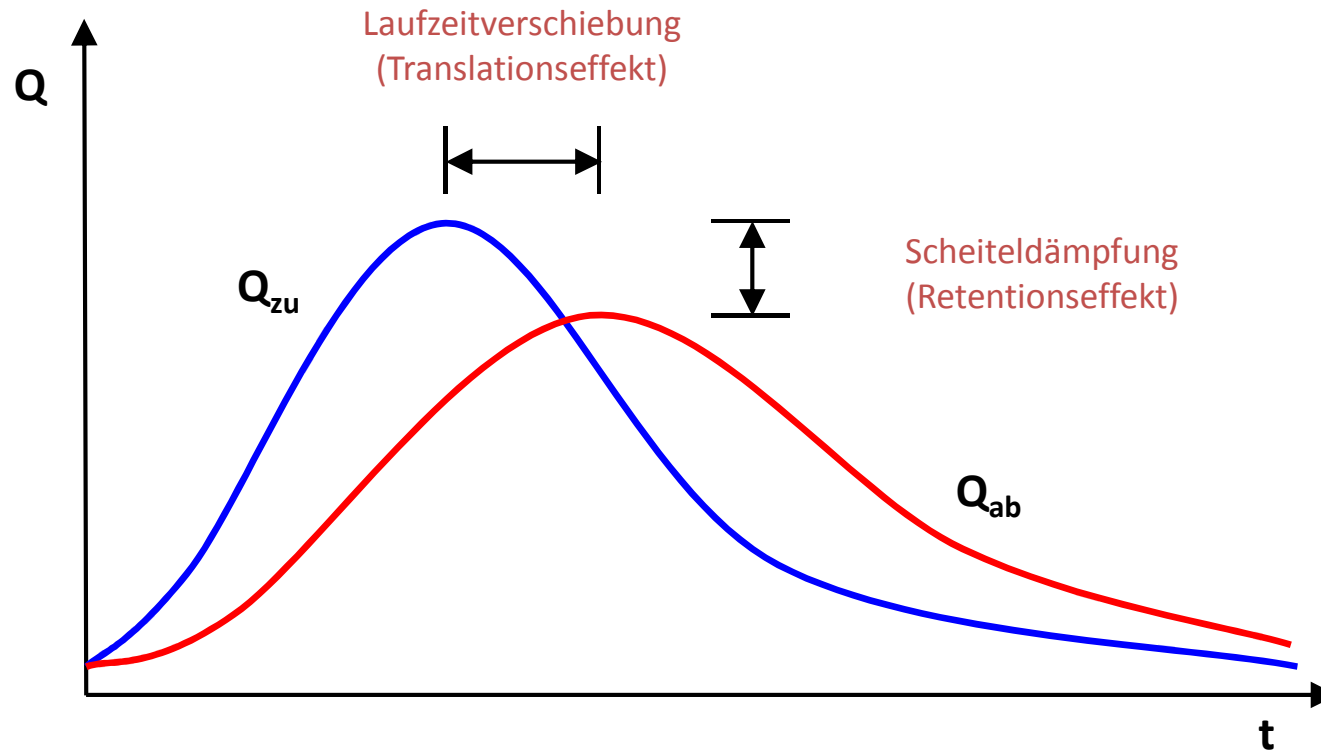
Translation und Retention

- Berücksichtigung der durch den Transport des Wassers in der Fläche und im Gerinne bedingten Translation und der Retention (Dispersion).
- Die Verformung des Abflusses wird durch das Rückhaltevermögen des Teilgebiets und des Flussabschnitts bedingt.



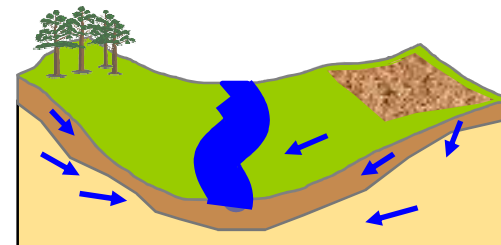
Translation und Retention

- Berücksichtigung der durch den Transport des Wassers in der Fläche und im Gerinne bedingten Translation und der Retention (Dispersion).
- Die Verformung des Abflusses wird durch das Rückhaltevermögen des Teilgebiets und des Flussabschnitts bedingt.



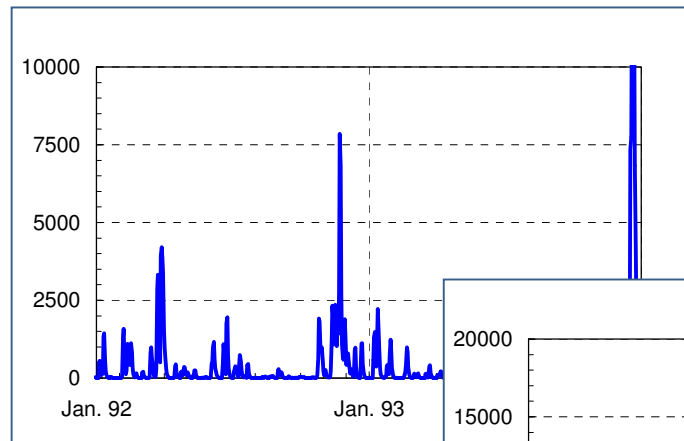
Abflusskonzentration

- Abflusskonzentration: lateraler Wassertransport (Translation) und Wasserspeicherung (Retention) der drei Abflusskomponenten (Direktabfluss, Interflow, Basisabfluss) innerhalb eines Teilgebietes.
- Viele LARSIM-WHM verwenden vier Abflusskomponenten, aber im Folgenden wird zur Vereinfachung die Berechnung von drei Abflusskomponenten erläutert.
- In LARSIM sind verschiedene, optional wählbare Modellansätze verfügbar; im Allgemeinen wird das Parallelspeichermodell verwendet.
- Dabei fließen die aus dem Bodenwassermodell abgegebenen Abflusskomponenten jeweils einem Gebietsspeicher für Direktabfluss, Interflow und Basisabfluss zu (pro Teilgebiet).
- Diese sind als obere bzw. tiefere Bodenschicht sowie als Grundwasserspeicher interpretierbar.

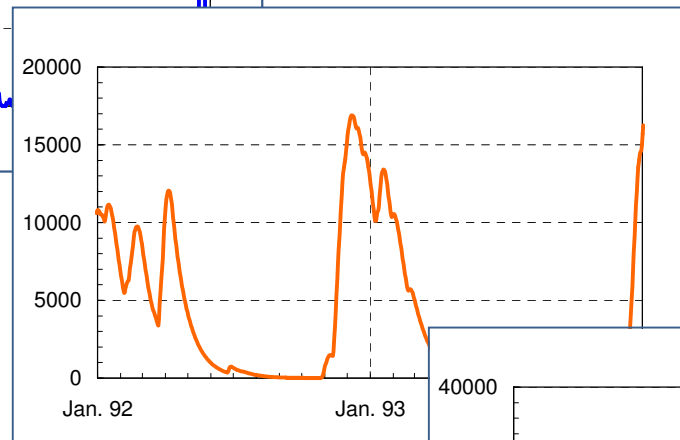
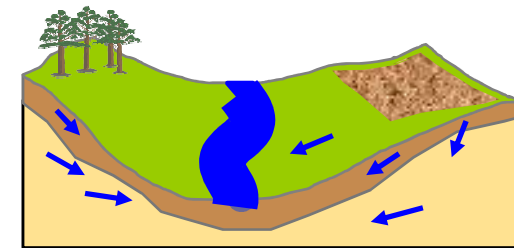


Abflusskonzentration

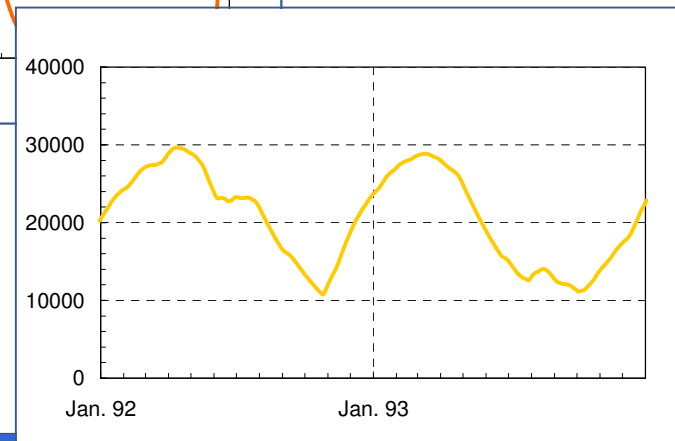
- Wasserspeicherung in der Fläche durch die drei Gebietspeicher:



Reaktionszeit:
Stunden bis Tage



Tage bis Wochen

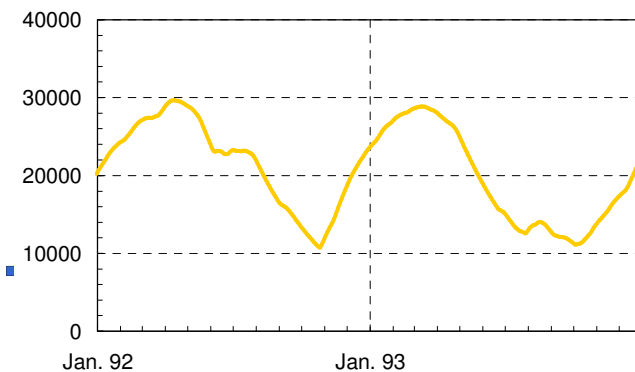
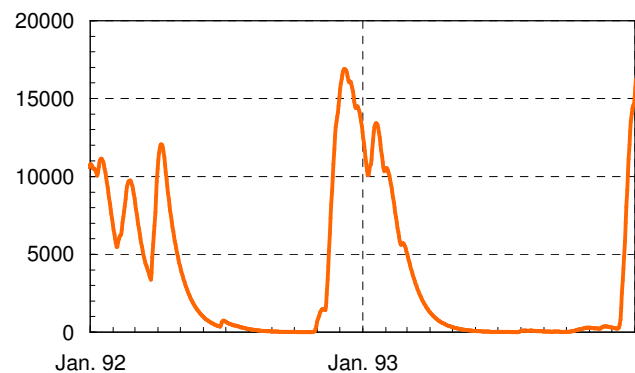
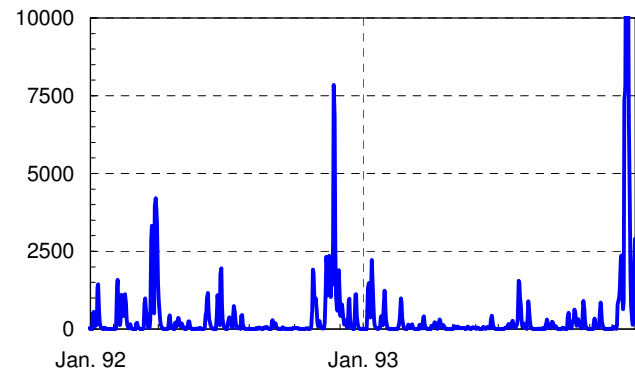


Monate
bis Jahre

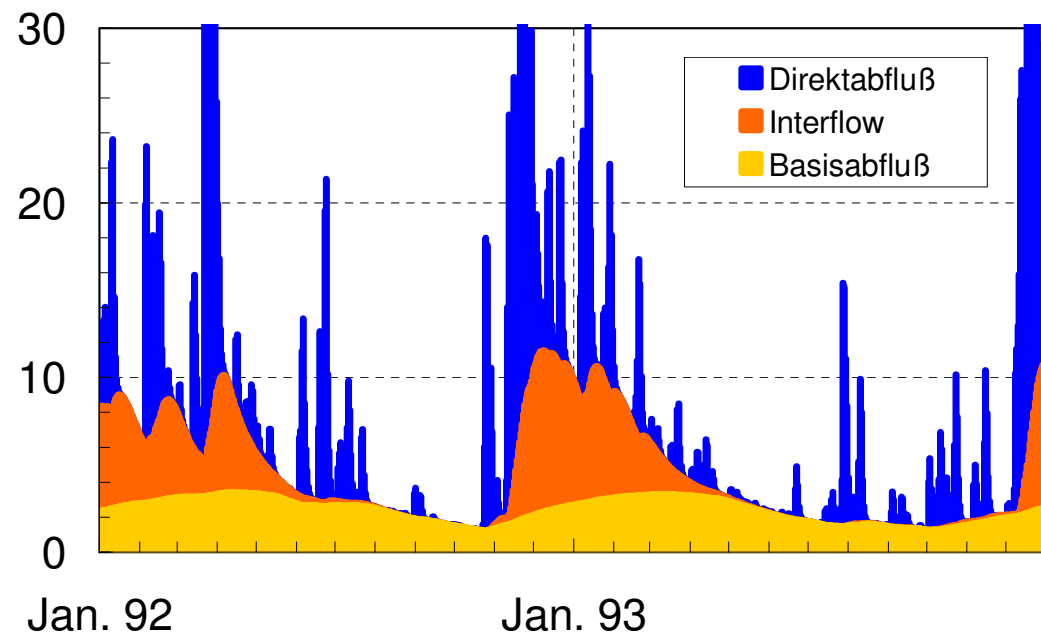
Abflusskonzentration

- Die drei Abflusskomponenten können auch beim Wassertransport im Gerinne separat modelliert und ausgegeben werden (sofern bei den Berechnungen keine gemessenen Abflussganglinien in das Modell eingelesen werden).

Abflusskonzentration



Berechnete Abflusskomponenten [l/s]

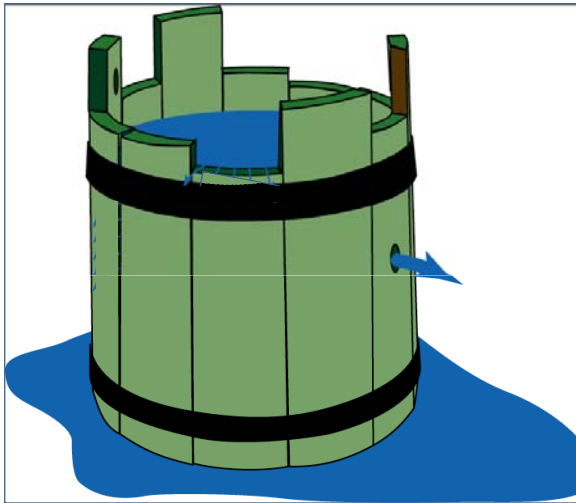


Einzellinearspeicher

- Die Gebietsspeicher werden jeweils als Einzellinearspeicher behandelt.

Einzellinearspeicher

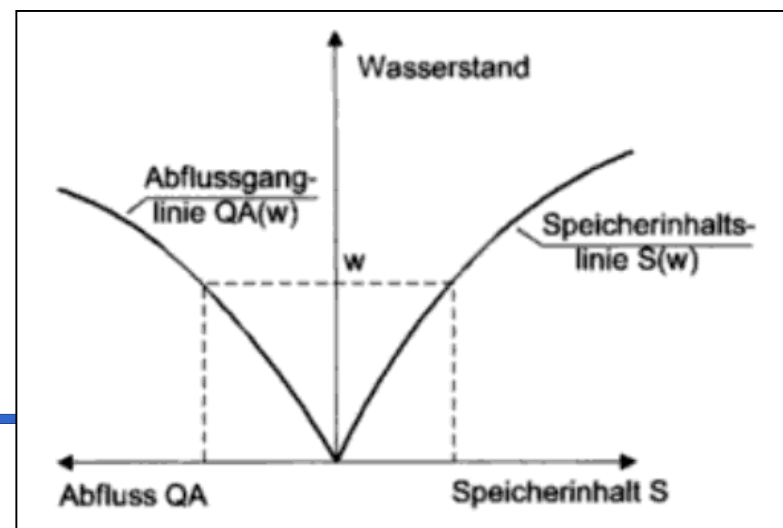
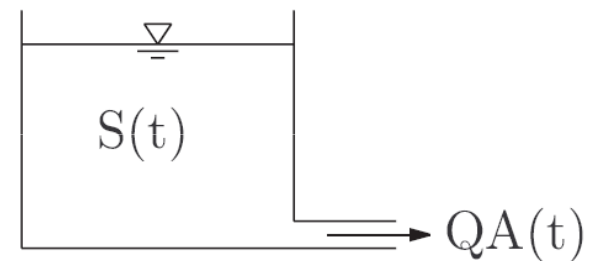
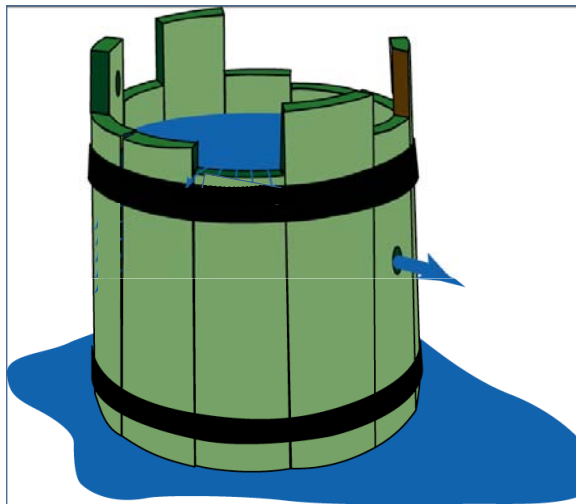
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



Welche Beziehung besteht zwischen Ausfluss Q_A und Speicherinhalt S ?

Einzellinearspeicher

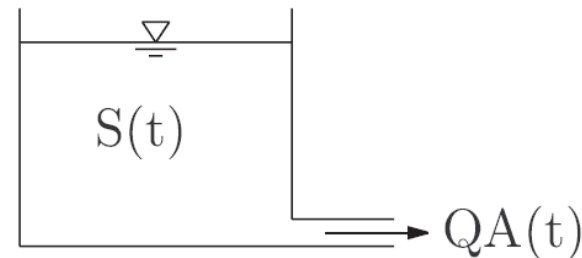
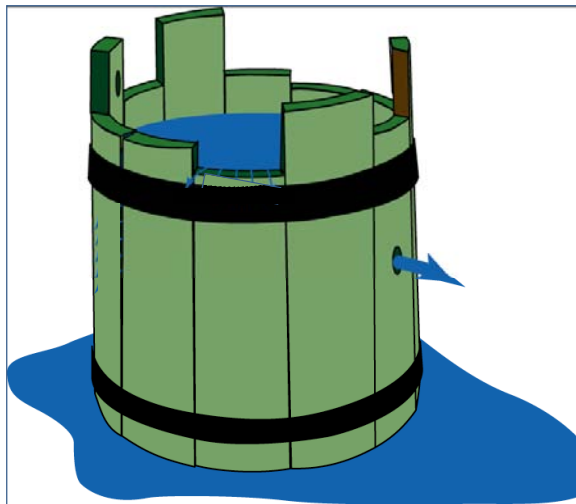
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



Patt (2001)

Einzellinearspeicher

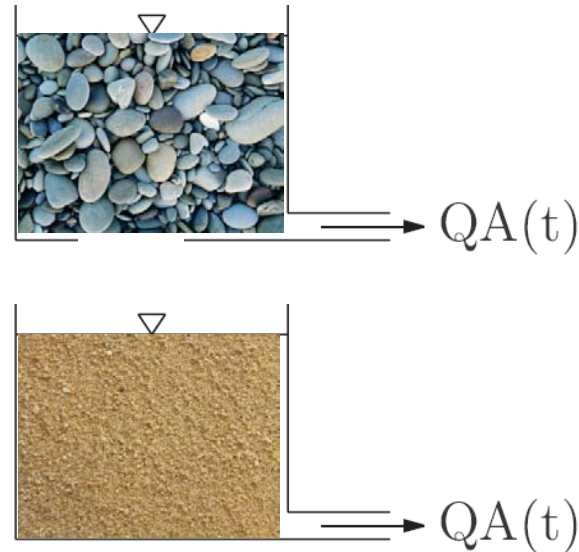
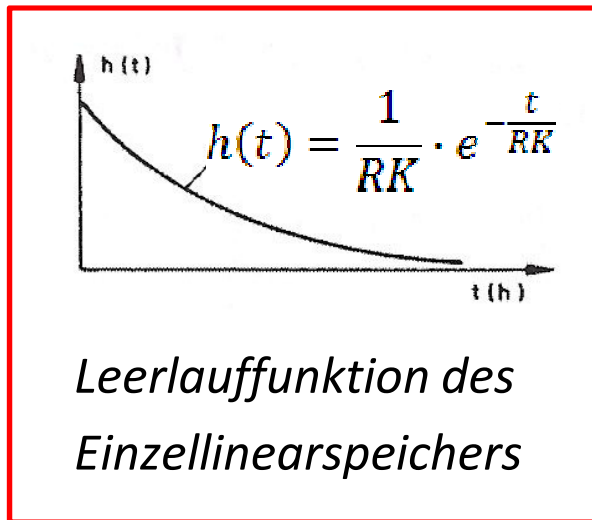
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



- $QA(t)$ [m^3/s] ist proportional zu $S(t)$ [m^3]: $QA(t) = \frac{1}{RK} \cdot S(t)$
mit: RK [s] = Rückhaltekonzstante (mittlere Verweilzeit des Wassers im Speicher)
- Somit: $S(t) = RK \cdot QA(t)$

Einzellinearspeicher

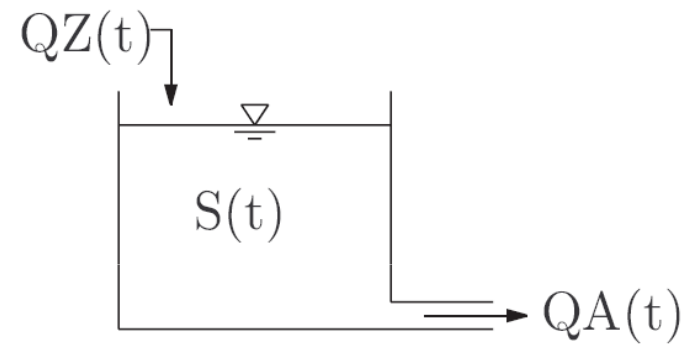
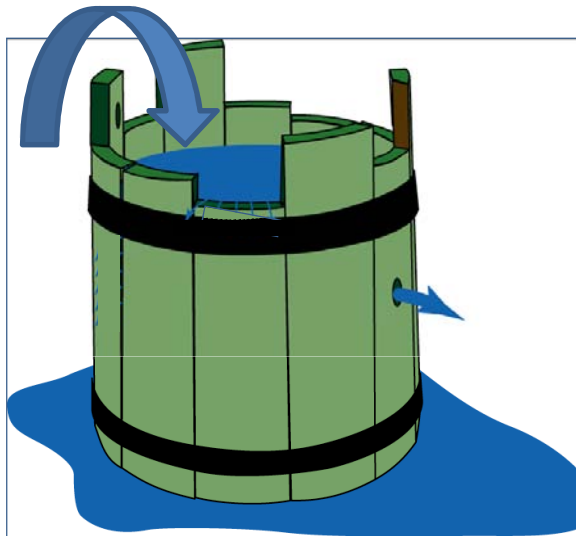
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



- $QA(t)$ [m^3/s] ist proportional zu $S(t)$ [m^3]: $QA(t) = \frac{1}{RK} \cdot S(t)$
mit: RK [s] = Rückhaltekonzstante (mittlere Verweilzeit des Wassers im Speicher)
- Somit: $S(t) = RK \cdot QA(t)$

Einzellinearspeicher

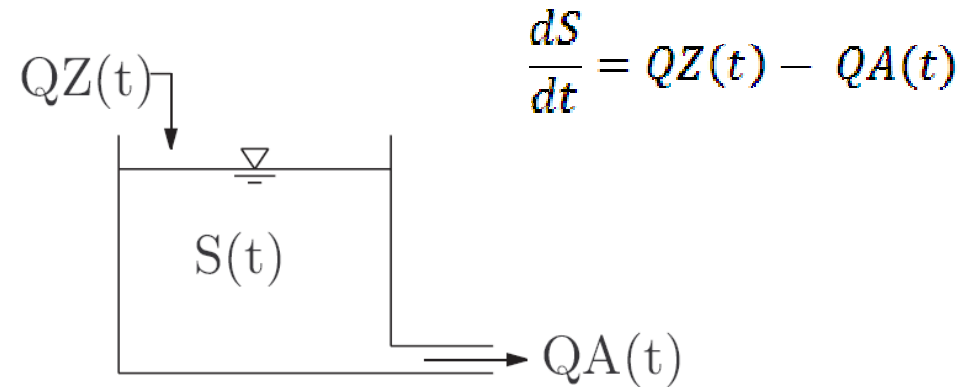
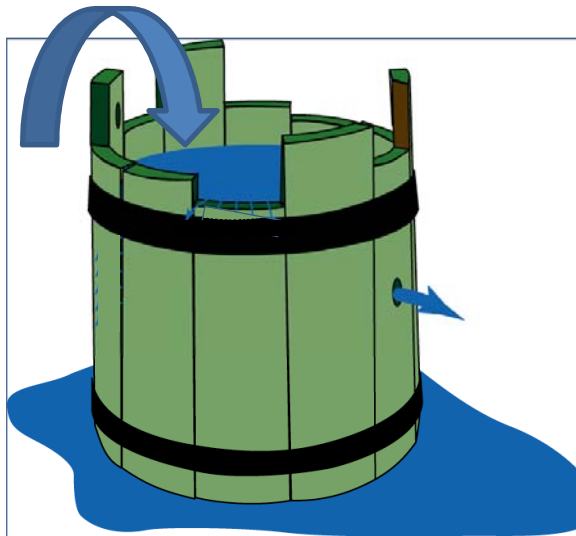
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



Veränderung der Beziehung bei gleichzeitigem Zufluss (Berücksichtigung der Kontinuitätsgleichung) ?

Einzellinearspeicher

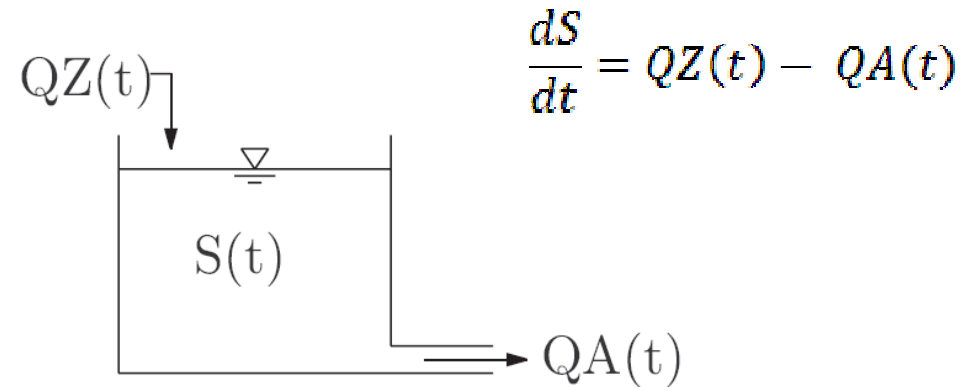
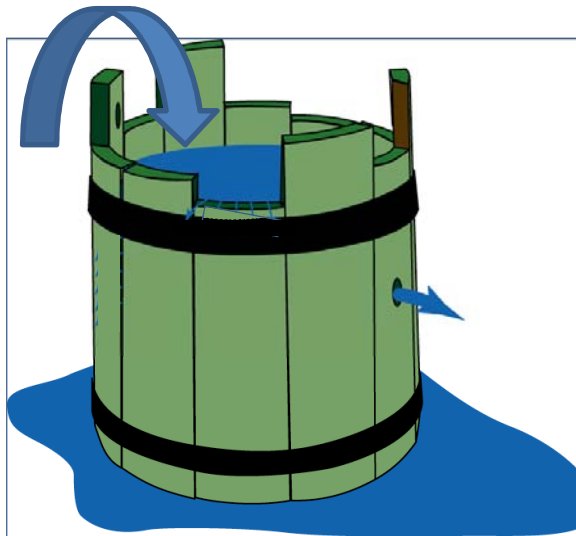
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



- Kontinuitätsgleichung: $QA(t) = QZ(t) - \frac{dS}{dt}$
- Da $S(t) = RK \cdot QA(t)$ folgt: $QA(t) = QZ(t) - RK \cdot \frac{dQA(t)}{dt}$

Einzellinearspeicher

- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss

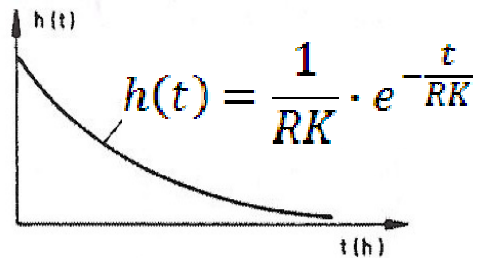


- Kontinuitätsgleichung: $QA(t) = QZ(t) - \frac{dS}{dt}$
- Da $S(t) = RK \cdot QA(t)$ folgt: $QA(t) = QZ(t) - RK \cdot \frac{dQA(t)}{dt}$

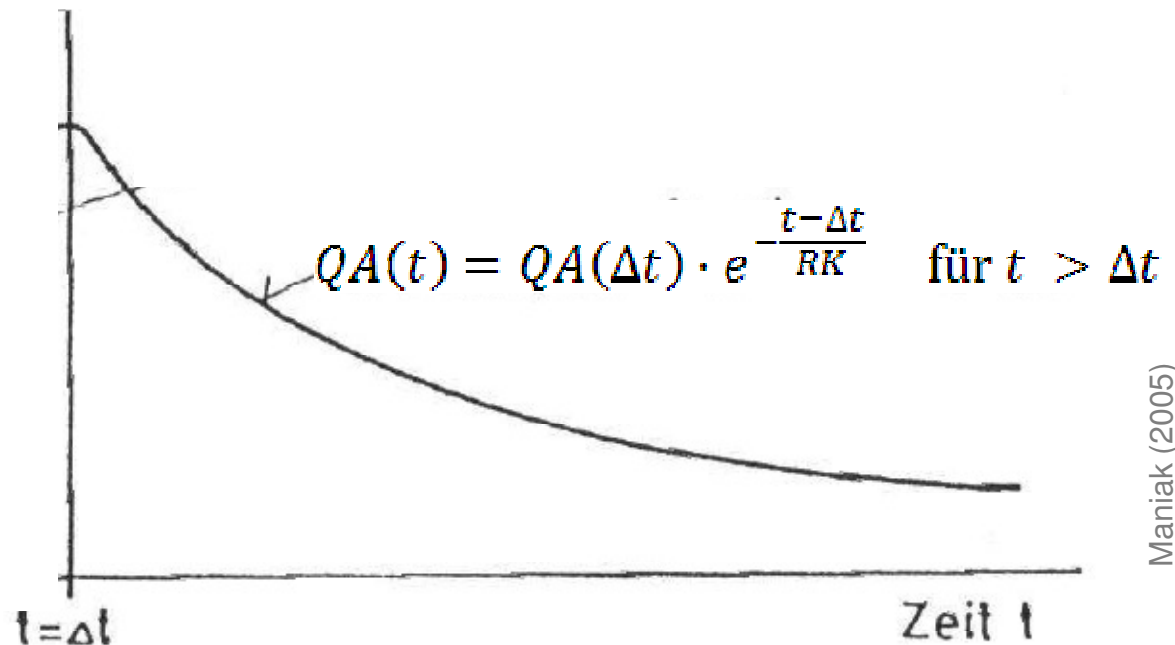
Differentialgleichung des Einzellinearspeichers

Einzellinearspeicher

- Lösung der Differentialgleichung des Einzellinearspeichers: Abfluss QA aus einem linearen Einzelspeicher im Zeitintervall dt:



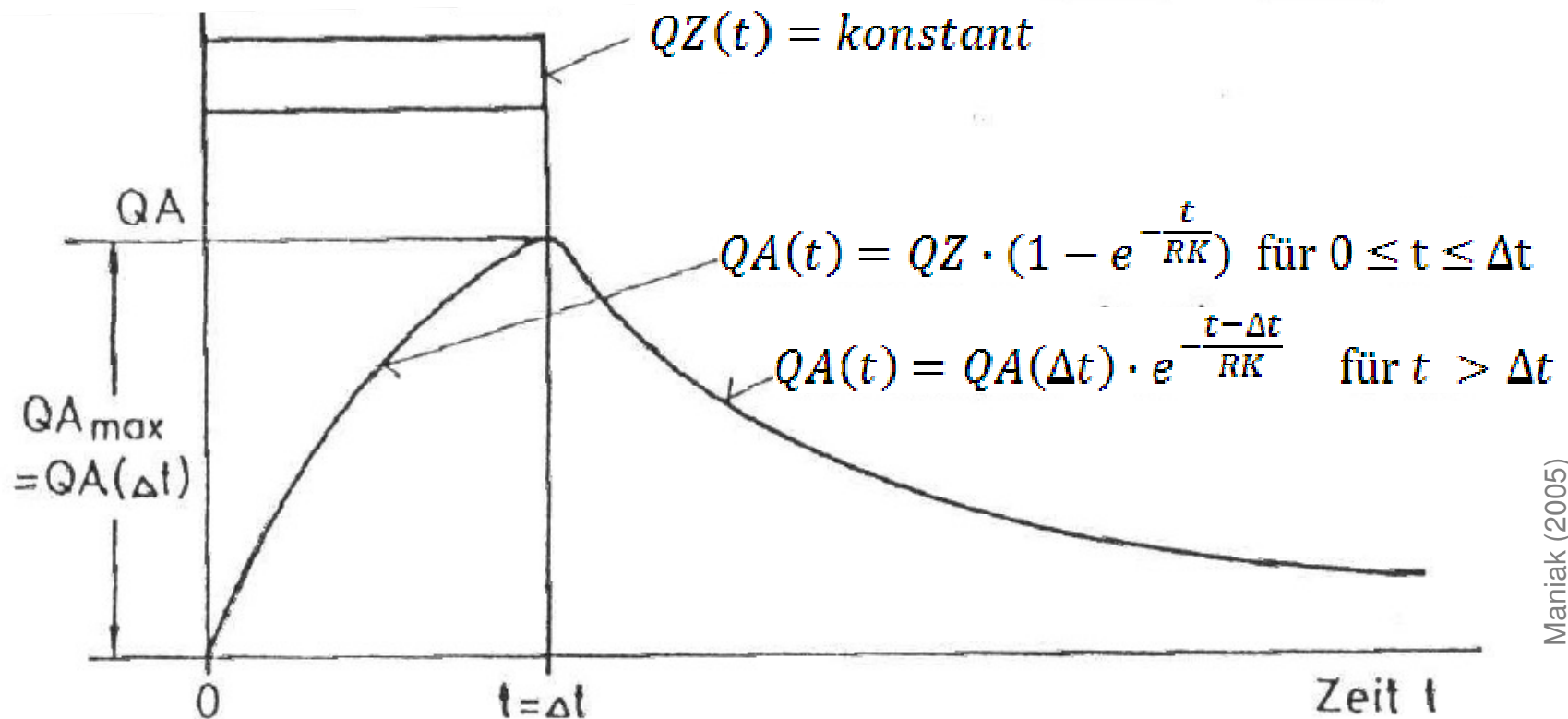
Leerlauffunktion des
Einzellinearspeichers



Maniak (2005)

Einzellinearspeicher

- Lösung der Differentialgleichung des Einzellinearspeichers: Abfluss Q_A aus einem linearen Einzelspeicher bei konstantem Zufluss Q_Z im Zeitintervall Δt



Maniak (2005)

Einzellinearspeicher

- Lösung der Differentialgleichung des Einzellinearspeichers:
 - Durch den Parameter RK mit der Dimension der Zeit wird die Größe des linearen Speichers beschrieben. Die allgemeine Speichergleichung lautet:

$$QA(t) = QZ(t) - RK \cdot \frac{dQA(t)}{dt}$$
$$\rightarrow \frac{dQA(t)}{dt} = \frac{1}{RK} \cdot [QZ(t) - QA(t)]$$

- Einbeziehung endlicher Zeitintervalle Δt und diskreter Zu- und Abflusswerte. Der mittlere Zufluss QZ und der mittlere Abfluss QA während eines Zeitintervalls Δt werden als Mittel der Werte zum Zeitpunkt t und $t+\Delta t$ berechnet:

$$\frac{\Delta QA}{\Delta t} = \frac{1}{RK} \cdot \left[\frac{QZ_i - QZ_{i-1}}{2} - \frac{QA_i - QA_{i-1}}{2} \right]$$

Einzellinearspeicher

- Lösung der Differentialgleichung des Einzellinearspeichers:
 - Eine direkte Berechnung der Abflussganglinie aus der Zuflussganglinie kann dann für den Einzellinearspeicher mit Hilfe der folgenden Gleichung erfolgen:

$$QA_i = c_0 \cdot QZ_i + c_1 \cdot QZ_{i-1} + c_2 \cdot QA_{i-1}$$

$$c_0 = 1 - RK/\Delta t (1 - c_2)$$

$$c_1 = RK/\Delta t [(1 - c_2) - c_2]$$

$$c_2 = \exp(-\Delta t/RK)$$

- Dies entspricht der in LARSIM umgesetzten Gleichung (mit $\Delta t = TA$):

$$QA_i = QZ_i \left(1 - \frac{RK_i}{TA} \left(1 - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) \right) + QZ_{i-1} \left(\frac{RK_i}{TA} \left(1 - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) + QA_{i-1} \cdot e^{-\frac{TA}{RK_i}}$$

Einzellinearspeicher

- Lösung der Differentialgleichung des Einzellinearspeichers:
 - Berechnung der Abflussverformung durch Lösung der Differentialgleichung des Einzellinearspeichers:

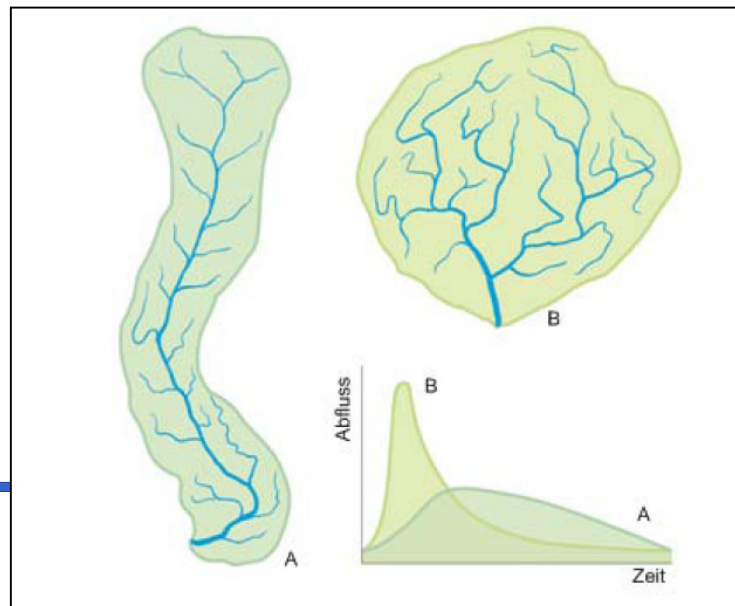
$$QA_i = QZ_i \left(1 - \frac{RK_i}{TA} \left(1 - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) \right) + QZ_{i-1} \left(\frac{RK_i}{TA} \left(1 - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) + QA_{i-1} \cdot e^{-\frac{TA}{RK_i}}$$

RK	$[s]$	<i>Speicherkonstante des Teilgebiets</i>
i	$[-]$	<i>Index für den Berechnungszeitschritt</i>
TA	$[s]$	<i>Berechnungszeitschritt</i>
QA	$[m^3/s]$	<i>Abfluss aus dem Teilgebiet</i>
QZ	$[m^3/s]$	<i>Zufluss in das Teilgebiet</i>

Abflusskonzentration

Bestimmung der Rückhaltekosten für die Gebietsspeicher:

- Berechnung der Rückhaltekosten nicht direkt aus Gebietsdaten möglich, da sie durch eine Vielzahl unterschiedlicher Faktoren beeinflusst werden.
- Die Werte für die Rückhaltekosten können mit Fließzeit im Teilgebiet in Verbindung gebracht werden:
 - Teilgebiete mit großem Fließzeitindex (flache Gebiete, langgestreckte Gebietsform) haben große Rückhaltekosten.
 - Teilgebiete mit kleinem Fließzeitindex (steile Gebiete, gedrungene Gebietsform) haben geringe Rückhaltekosten.



Nach Baumgartner & Liebscher (1990)

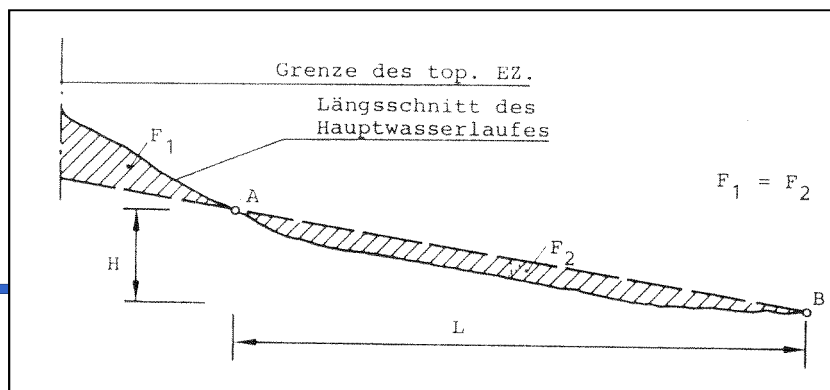
Abflusskonzentration

Bestimmung der Rückhaltekosten für die Gebietsspeicher:

- Als Index für die Fließzeit im Teilgebiet wird die vom U.S. Soil Conservation Service entwickelte Kirpich-Formel verwendet:

$$T_{ind} = u_F \cdot \left(0,868 \cdot \frac{L^3}{\Delta H} \right)^{0,385}$$

T_{ind}	[s]	Index für die Fließzeit im Teilgebiet
u_F	[s/h]	Umrechnungsfaktor Stunde in Sekunde (= 3600 s/h)
L	[km]	Mittlere Länge der Hauptwasserläufe im Teilgebiet
ΔH	[m]	Mittlere Höhendifferenz für die Hauptwasserläufe im Teilgebiet



*Hauptwasserlauf:
nicht Hauptvorfluter !*

Abflusskonzentration

Bestimmung der Rückhaltekosten für die Gebietsspeicher:

- Die Rückhaltekosten für die Gebietsspeicher ergibt sich aus dem nach der Kirpich-Formel ermittelten Fließzeitindex multipliziert mit einem dimensionslosen Kalibrierungsparameter:

$$RK_D = EQ_D \cdot T_{ind}$$

$$RK_I = EQ_I \cdot T_{ind}$$

$$RK_B = EQ_B \cdot T_{ind}$$

RK_D [s] Rückhaltekosten für den Direktabfluss

EQ_D [-] Kalibrierungsparameter für die Rückhaltekosten Direktabfluss

T_{ind} [s] Index für die Fließzeit im Teilgebiet

RK_I [s] Rückhaltekosten für den Interflow

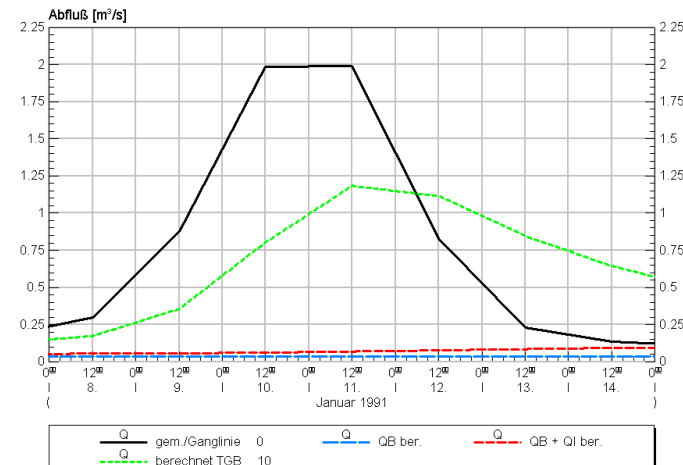
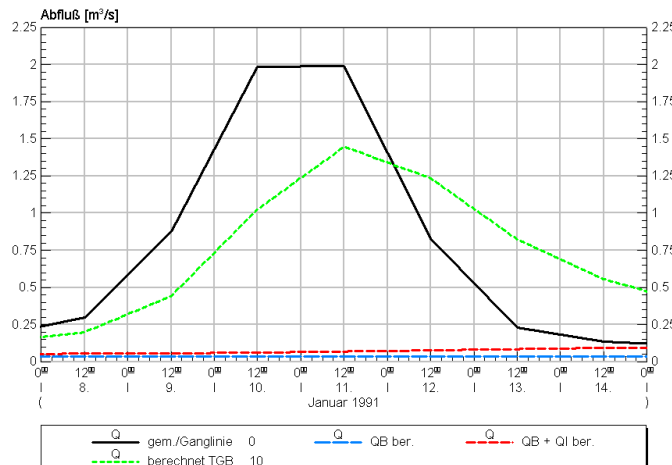
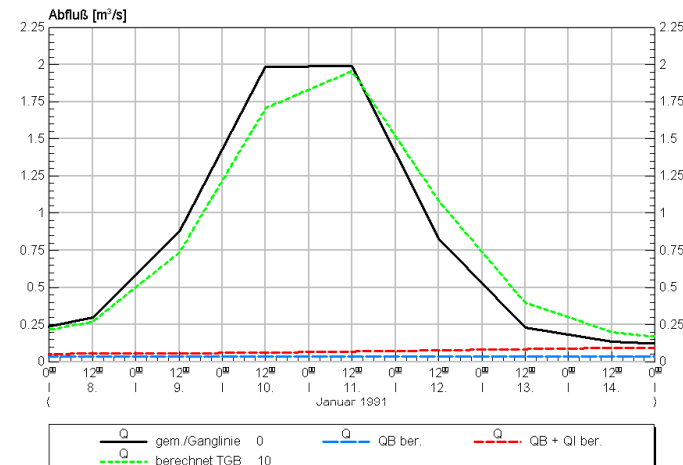
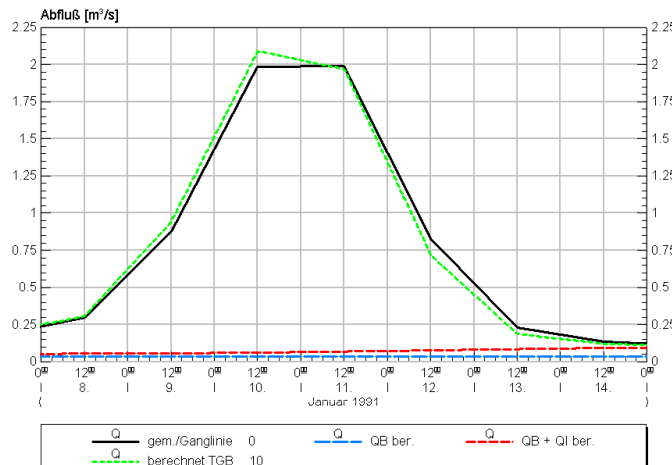
EQ_I [-] Kalibrierungsparameter für die Rückhaltekosten Interflow

RK_G [s] Rückhaltekosten für den Grundwasserabfluss

EQ_G [-] Kalibrierungsparameter für die Rückhaltekosten
Grundwasserabfluss

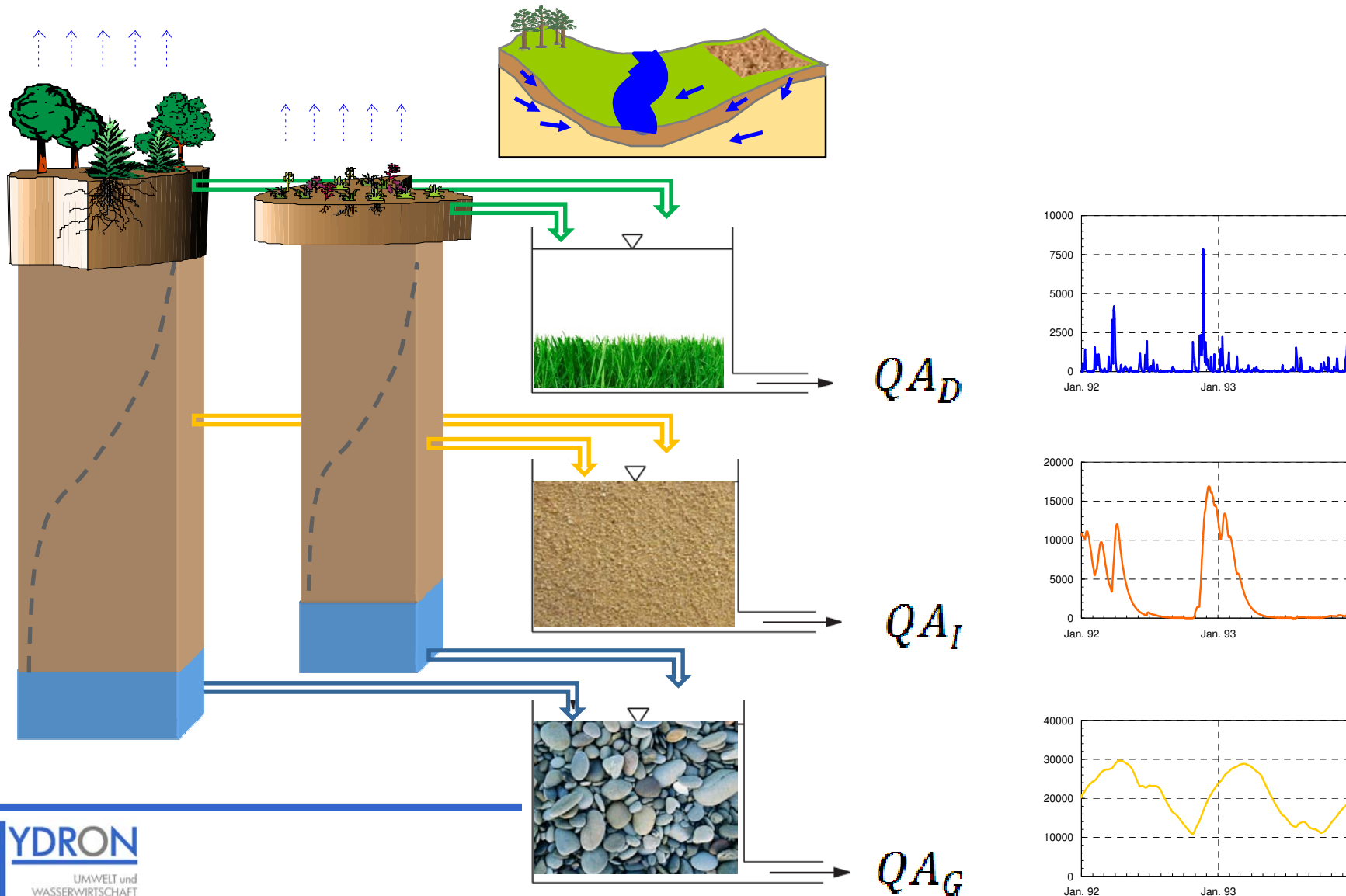
Abflusskonzentration

Beispiel der Abflussänderung bei Zunahme der Werte für den Parameter EQ_D :



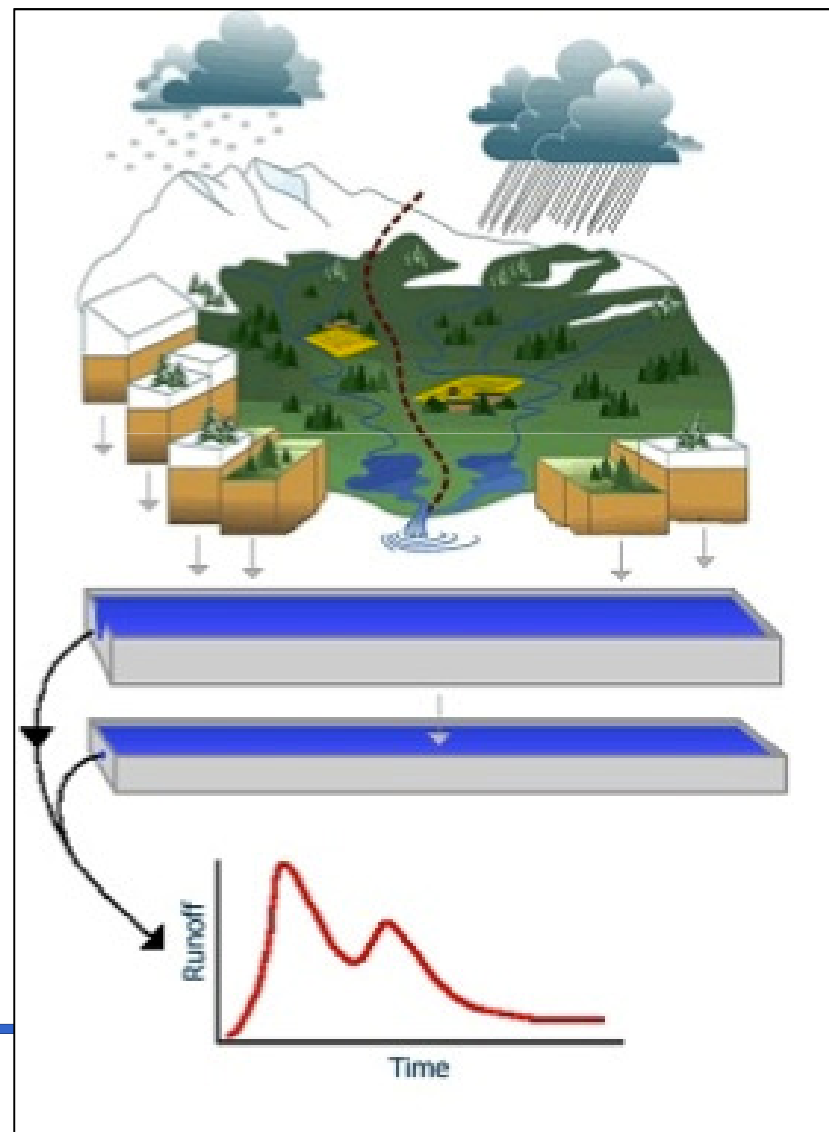
Abflusskonzentration

Zusammenfassung der Berechnung der Abflusskonzentration:



Abflusskonzentration

Zusammenfassung der Berechnung der Abflusskonzentration:

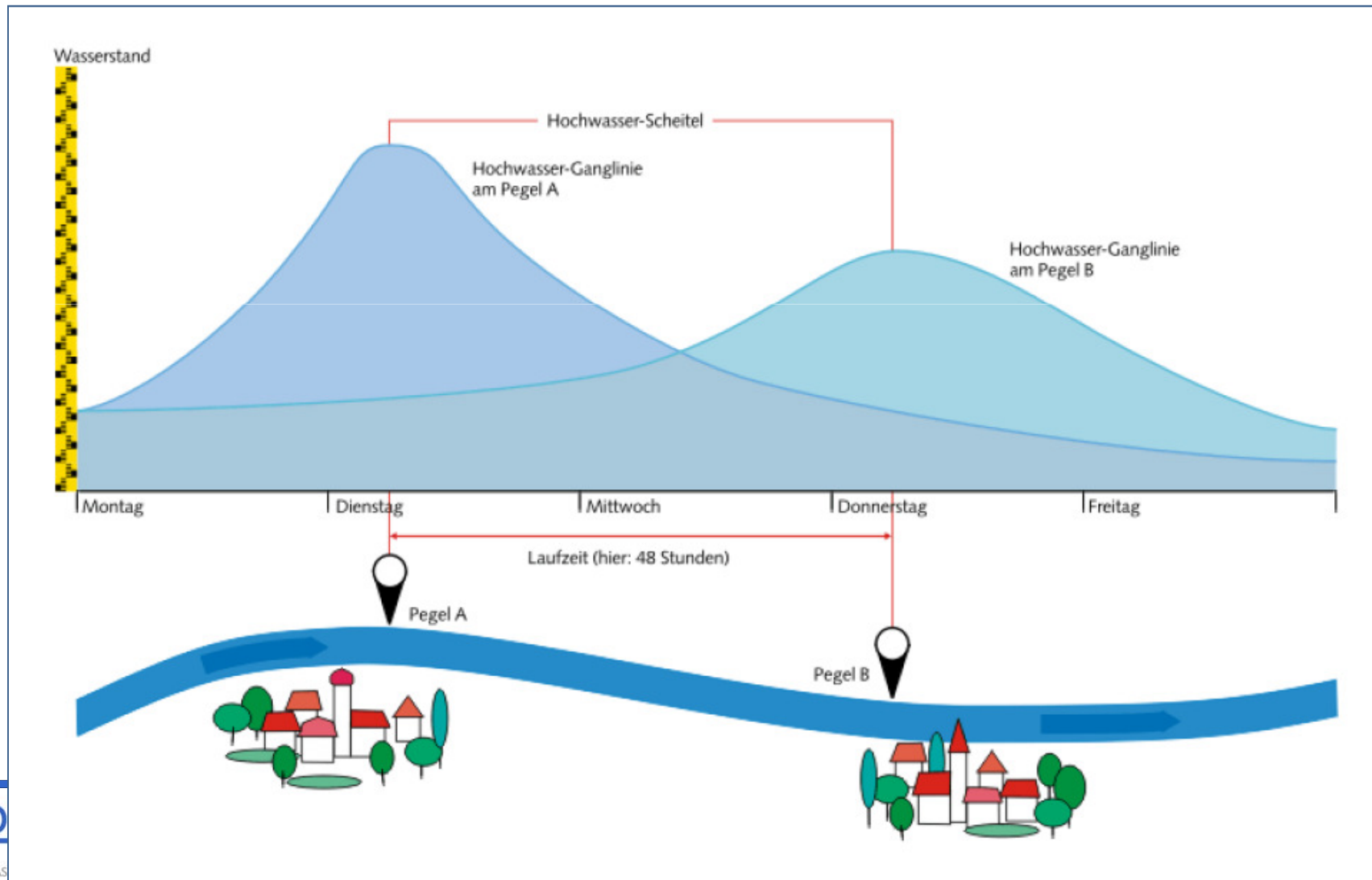


Nach Lindstrom (1997)

Berechnung des Wellenablaufs

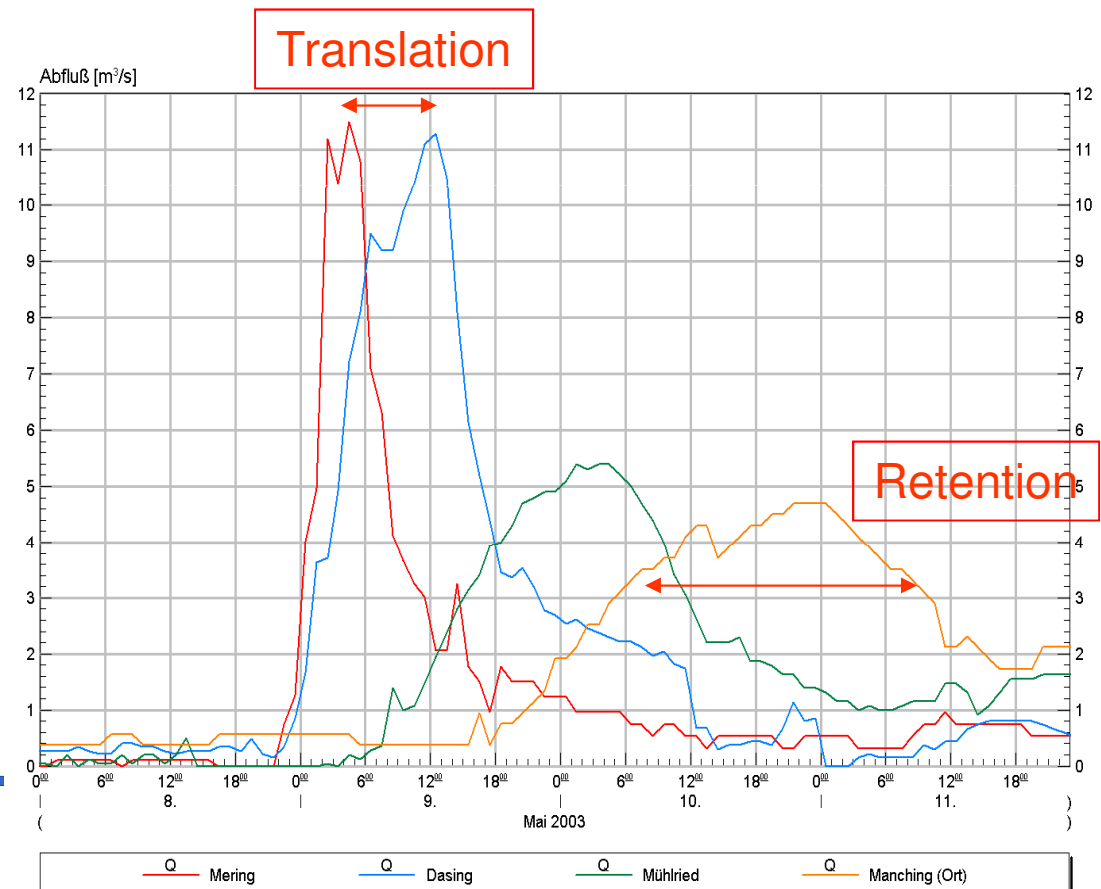
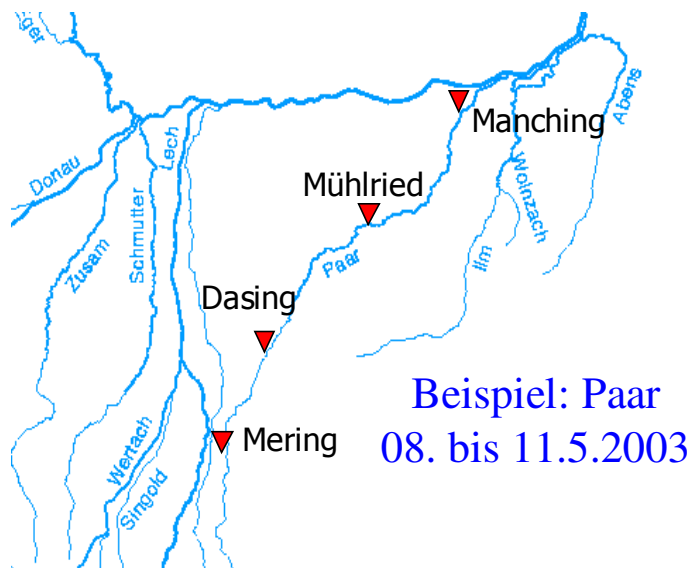
Translation und Retention im Gerinne

- Berücksichtigung der durch die Laufzeit des Wassers im Gerinne bedingten Translation und der durch Ausuferungen bewirkten Retention.



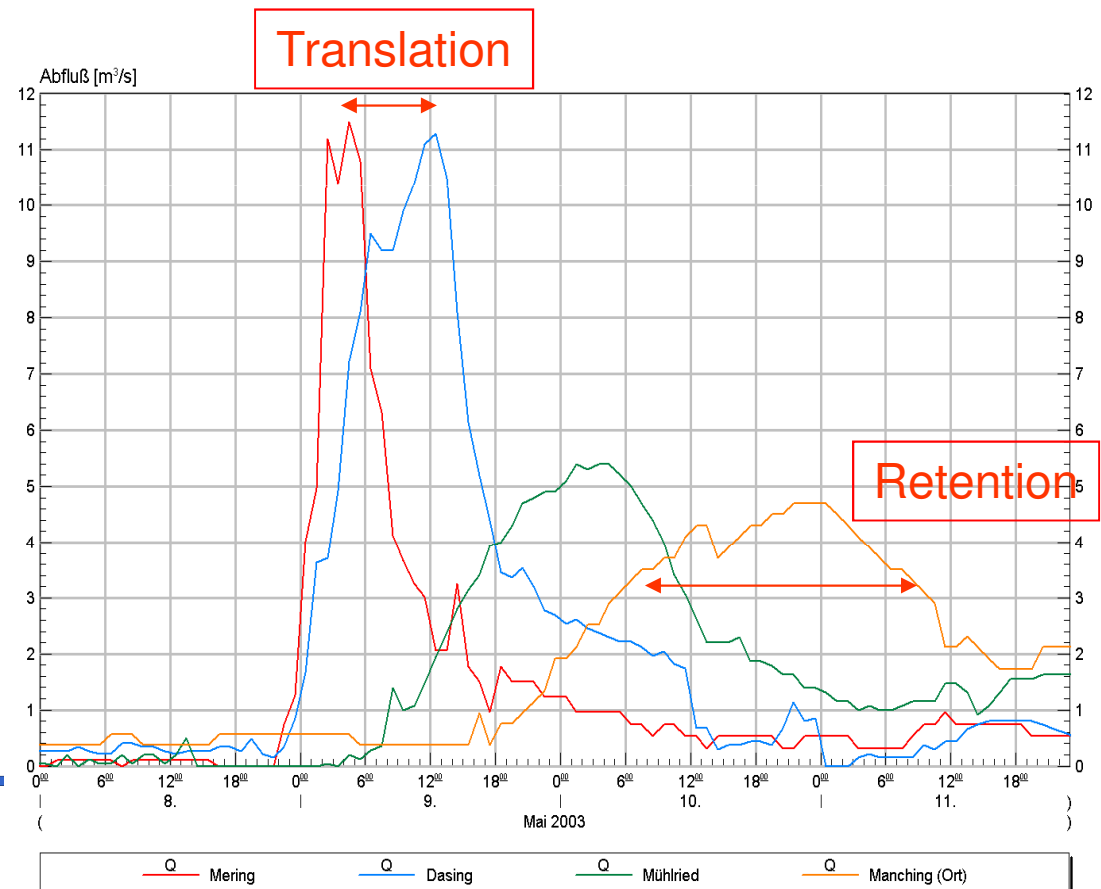
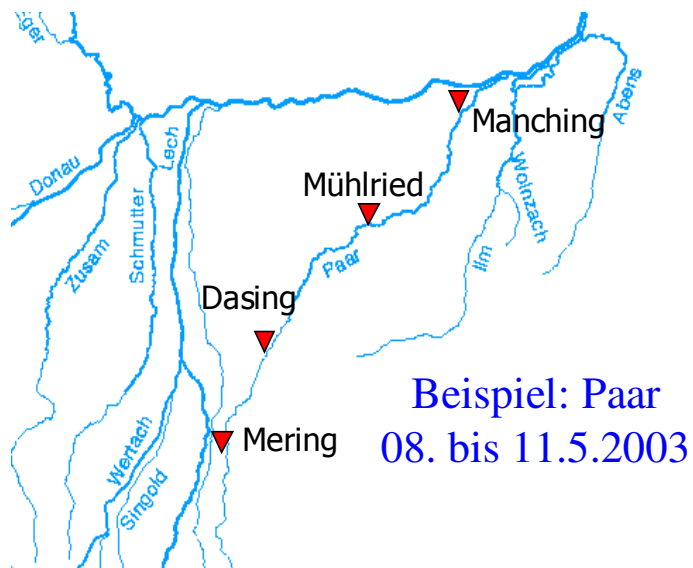
Translation und Retention im Gerinne

- Berücksichtigung der durch die Laufzeit des Wassers im Gerinne bedingten Translation und der durch Ausuferungen bewirkten Retention.



Translation und Retention im Gerinne

- Berücksichtigung der durch die Laufzeit des Wassers im Gerinne bedingten Translation und der durch Ausuferungen bewirkten Retention.
- Andere gerinnebezogene Prozesse, wie beispielsweise eine Interaktion zwischen Gerinne und Grundwasserkörper, werden in LARSIM hingegen vernachlässigt.

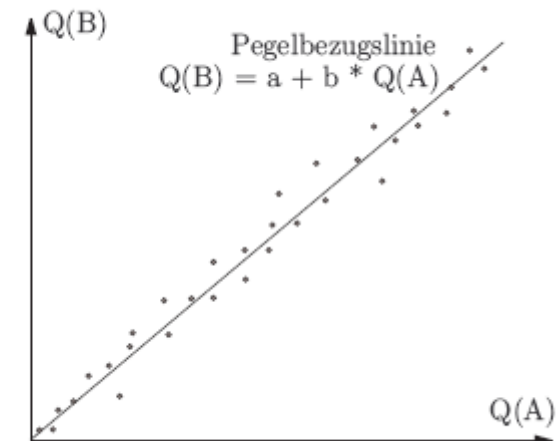
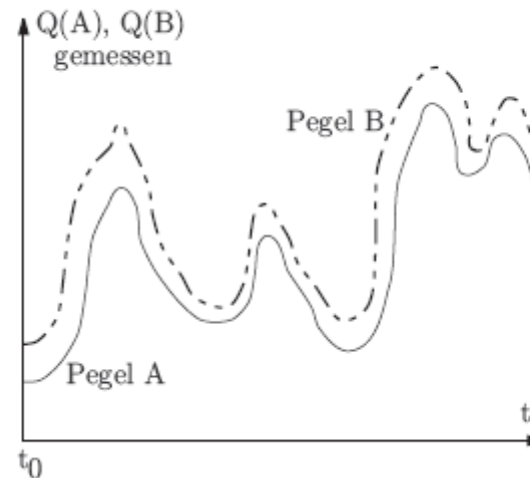
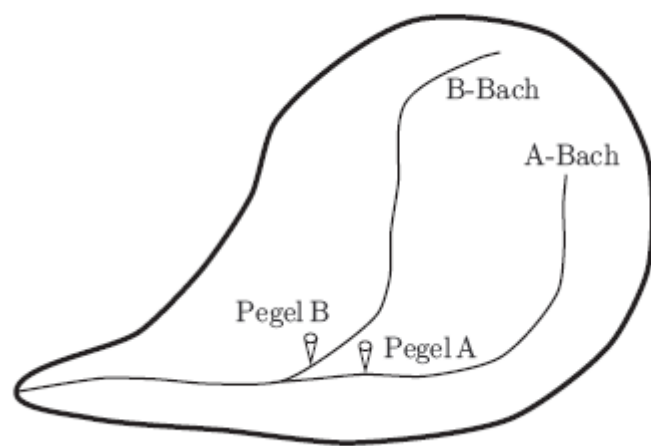


Translation und Retention im Gerinne

- Methoden zur Berechnung der Transformation von Hochwasserwellen zwischen zwei Querschnitten einer Flusstrecke:
 - stochastisch
 - hydrodynamisch
 - hydrologisch

Stochastische Methoden

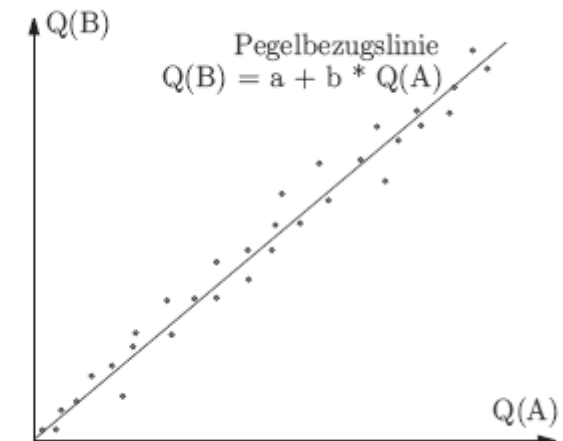
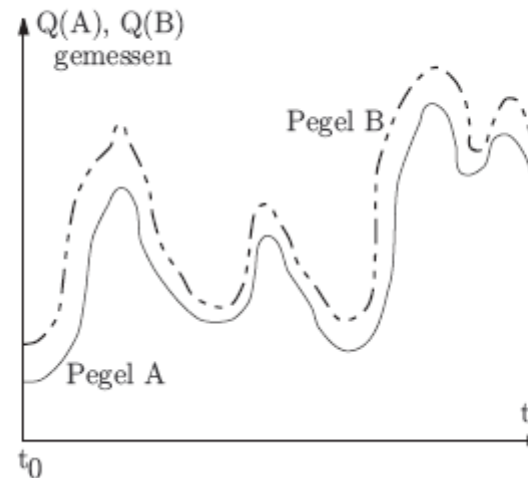
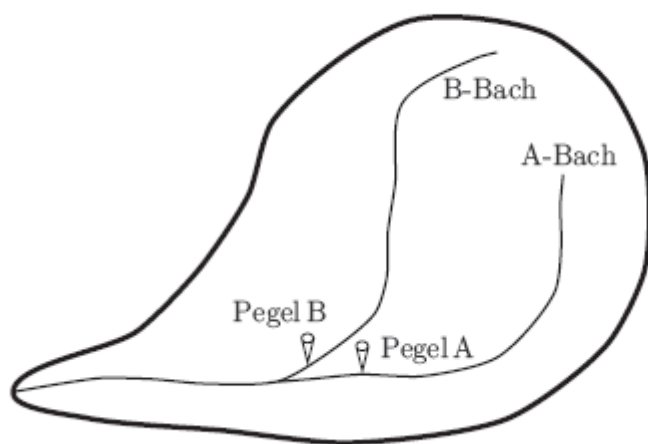
- Stochastische Verfahren:
 - Basieren auf statistischen Beziehungen zwischen Zeitreihen, z.B.
 - Pegelbezugslinienverfahren



Ostrowski (2009)

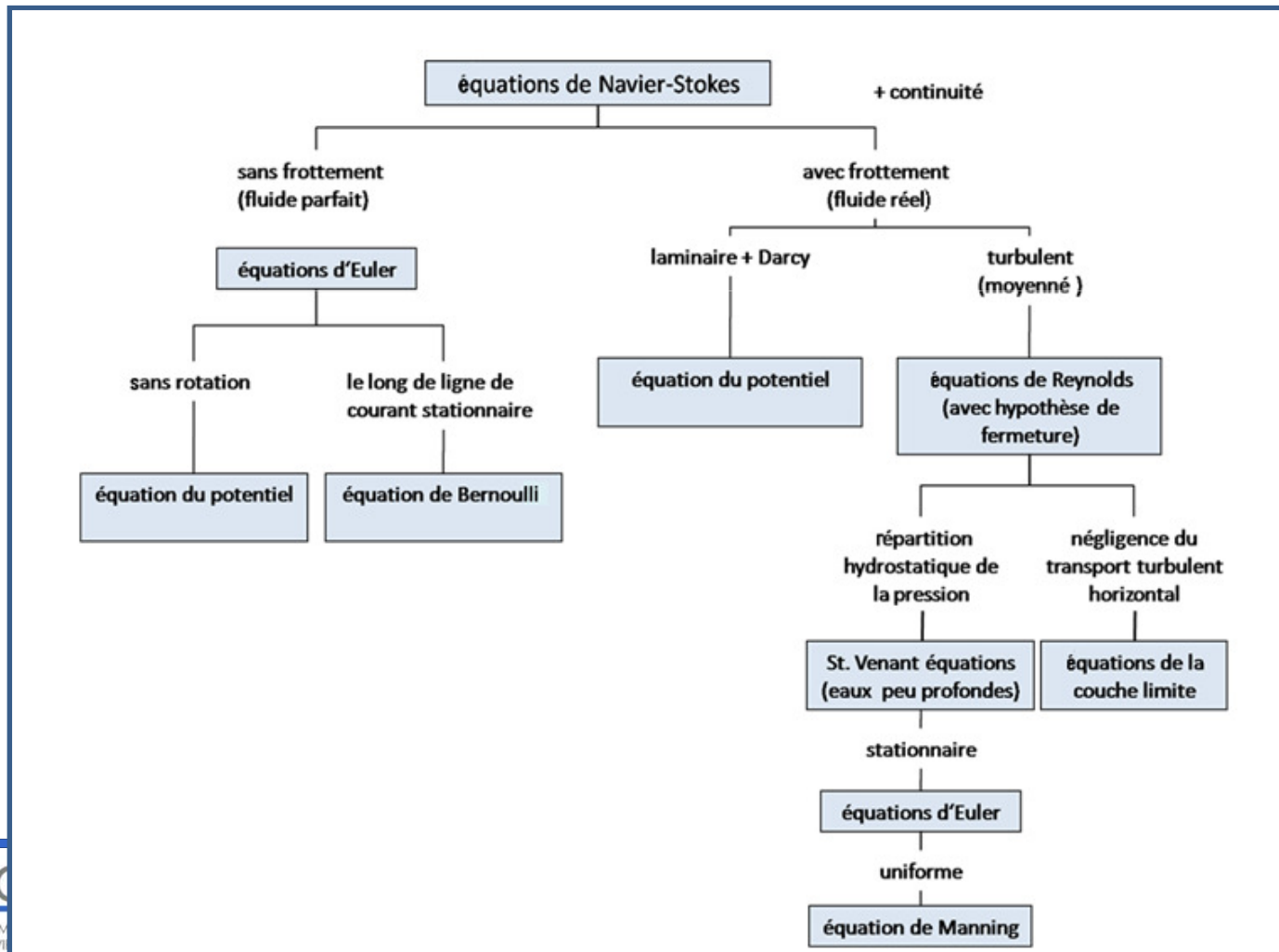
Stochastische Methoden

- Stochastische Verfahren:
Basieren auf statistischen Beziehungen zwischen Zeitreihen, z.B.
 - Pegelbezugslinienverfahren
 - Filtermodelle (z.B. Kalmanfilter, Wiener'sches Mehrkanalfilter)



Navier-Stokes-Gleichungen

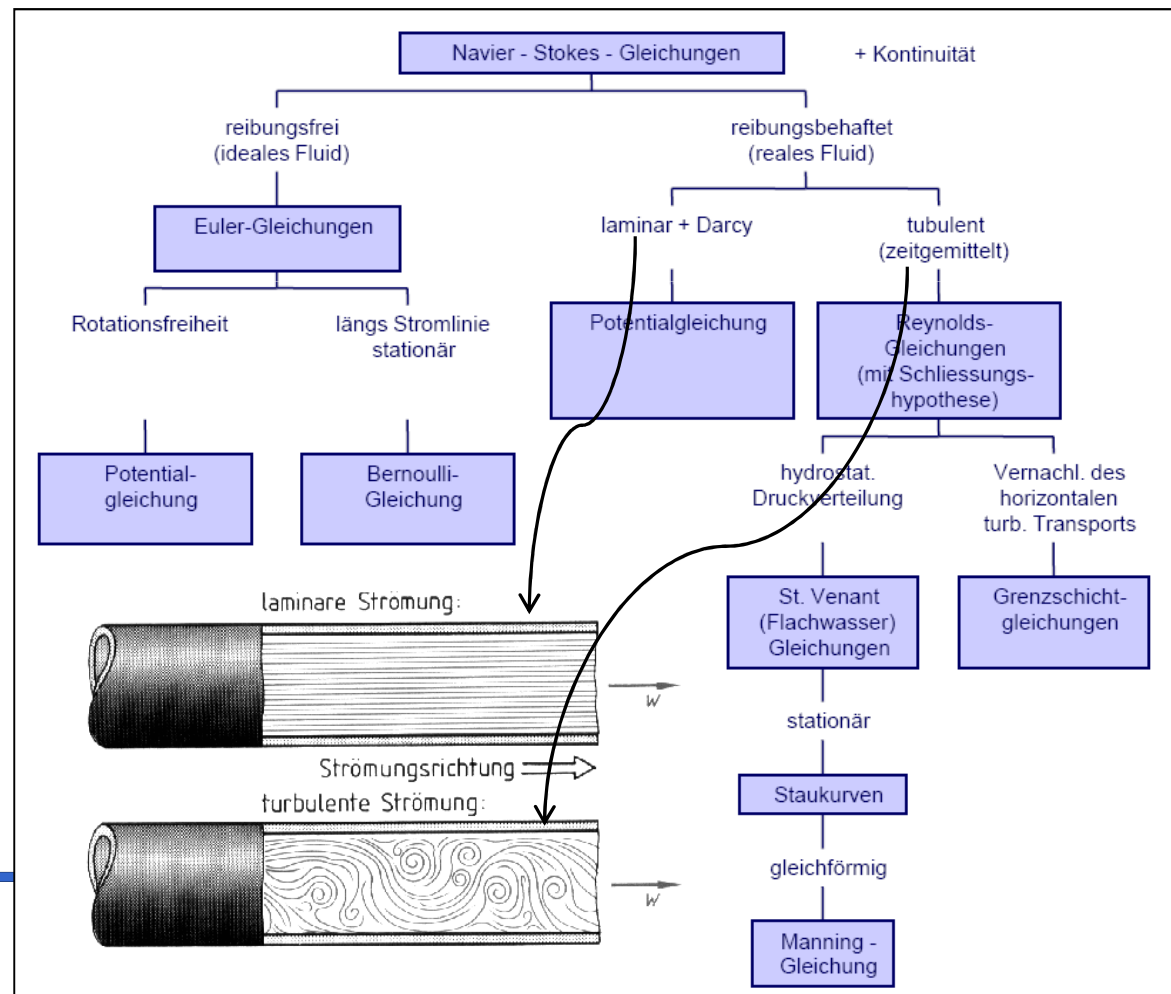
- Grundlagen der Strömungsberechnung:
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

Navier-Stokes-Gleichungen

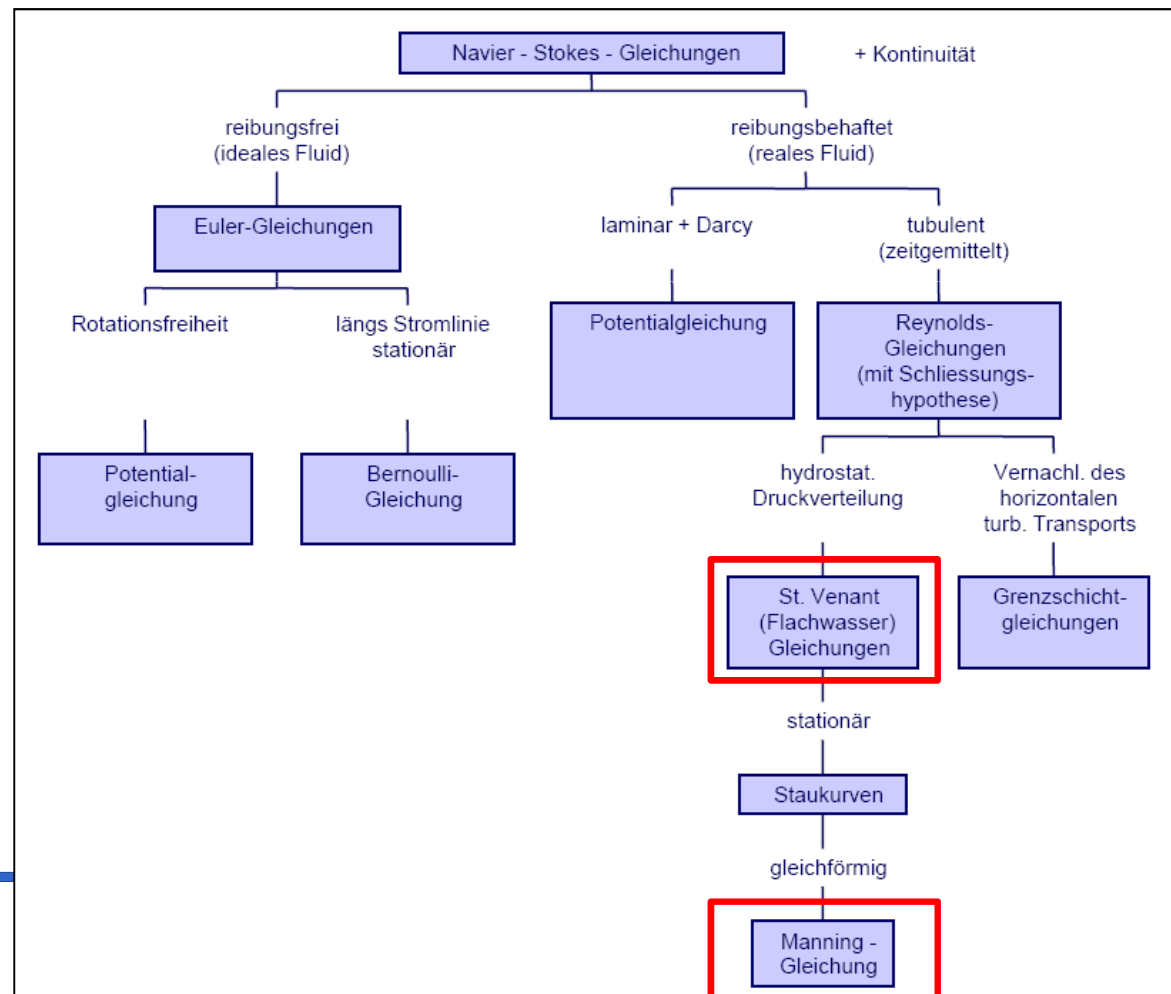
- Grundlagen der Strömungsberechnung:
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

Navier-Stokes-Gleichungen

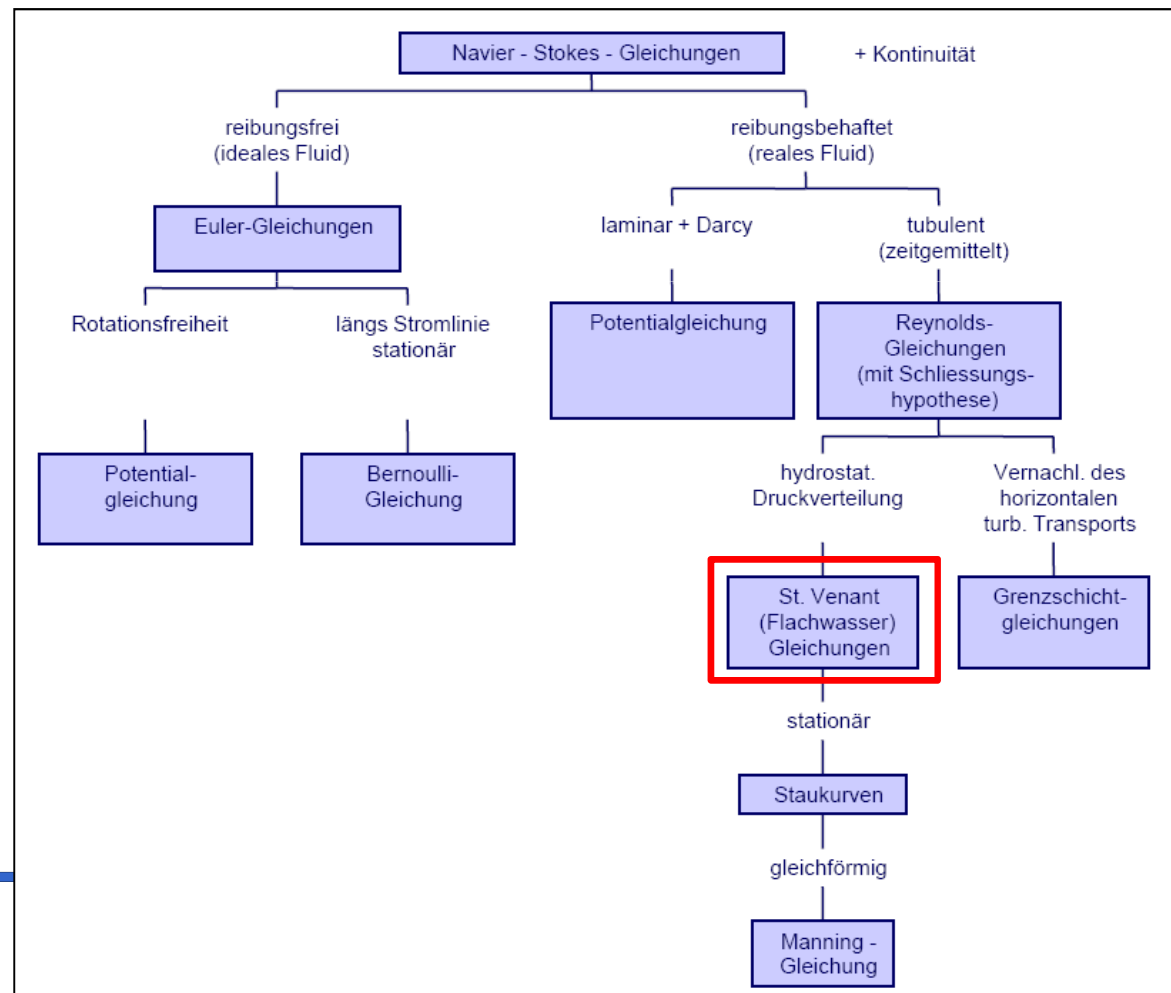
- Grundlagen der Strömungsberechnung:
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

Hydrodynamische Modelle

- Hydrodynamische Modelle: Lösung der Saint-Venant-Gleichungen



Rutschmann (2009)

Hydrodynamische Modelle

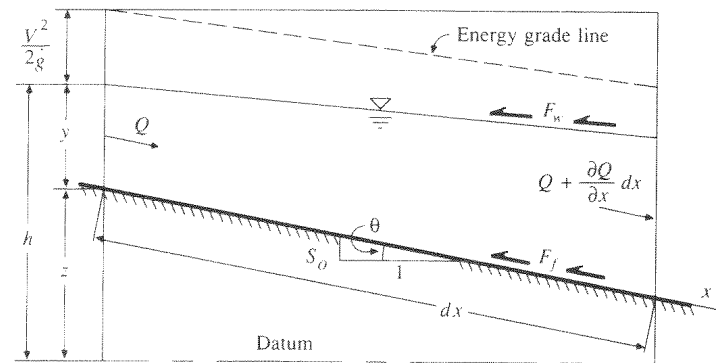
- Hydrodynamische Modelle:

Erhalt von Masse und Energie (Saint-Venant-Gleichungen)

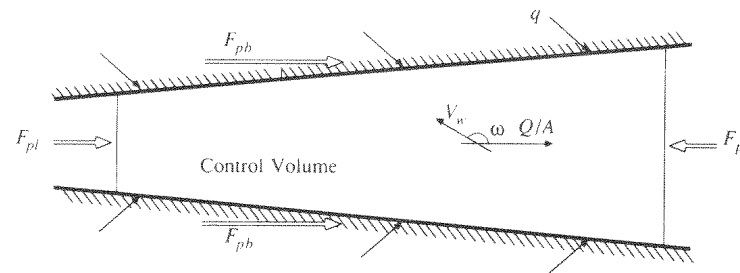
- Kontinuitätsgleichung: Änderung der Flüssigkeitsmasse in einem durchströmten Raum zu einem Zeitpunkt muss gleich der Differenz zwischen zuströmender und ausströmender Masse sein
- Energiegleichung: unterschiedliche Teile entsprechend der auf den Durchfluss einwirkenden Kräfte: Schwerkraft, Reibungskraft, Druckkraft sowie den Trägheitsglieder aufgrund der Beschleunigung des Wassers (kinetischer Energie)

Hydrodynamische Modelle

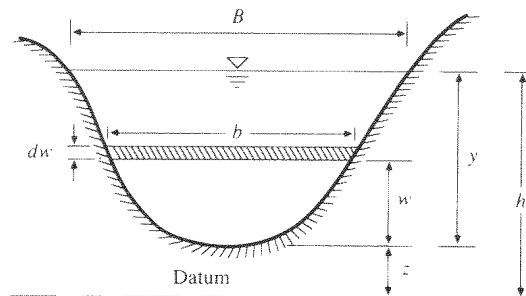
- Hydrodynamische Modelle: Saint-Venant-Gleichungen



(a) Elevation view.



(b) Plan view.



(c) Cross section.

Ven Te Chow et al. (1988)

Hydrodynamische Modelle

- Hydrodynamische Modelle: Saint-Venant-Gleichungen

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q(x, t)$$

Kontinuitäts-
gleichung

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(I_0 - I_f) = 0$$

Energie-
gleichung

Lokale
Beschleunigung

Konvektive

Druck

Reibung


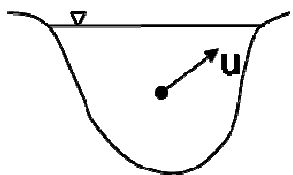
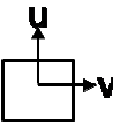
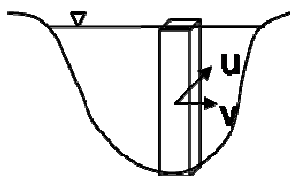
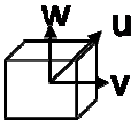
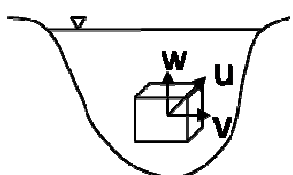
Q	$[m^3/s]$	Abfluss
A	$[m^2]$	Benetzter Querschnitt des Flussprofils
q	$[m^2/s]$	Effektiver seitlicher Zufluss
x		Raumkoordinate in Fließrichtung
t		Zeitkoordinate
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
I_0	$[]$	Hangneigung
I_f	$[]$	Reibungsgefälle bzw. –verlust
h	$[m]$	Fließtiefe des Abflusses

Hydrodynamische Modelle

- Hydrodynamische Modelle: Saint-Venant-Gleichungen
 - System der beiden partiellen, quasilinearen Differentialgleichungen enthält zwei unabhängige Variablen (x und t) und drei abhängige Variablen. Das Gleichungssystem ist geschlossen nicht lösbar. Daher müssen numerische Integrationen zur Lösung verwendet werden (z.B. explizites oder implizites Differenzenverfahren).
 - Zur Stabilität der Lösung ist es erforderlich, kleine Zeitschritte zu rechnen, was eine hohe Rechnerleistung erfordert. Zudem sind Profil- und Rauigkeitsdaten am gesamten Gewässer sowie Anfangs- und Randbedingungen erforderlich.
 - Da die hydraulischen Modelle nur unter Verwendung numerischer Verfahren gelöst werden können, werden sie auch als hydrodynamisch-numerische Modelle bezeichnet

Hydrodynamische Modelle

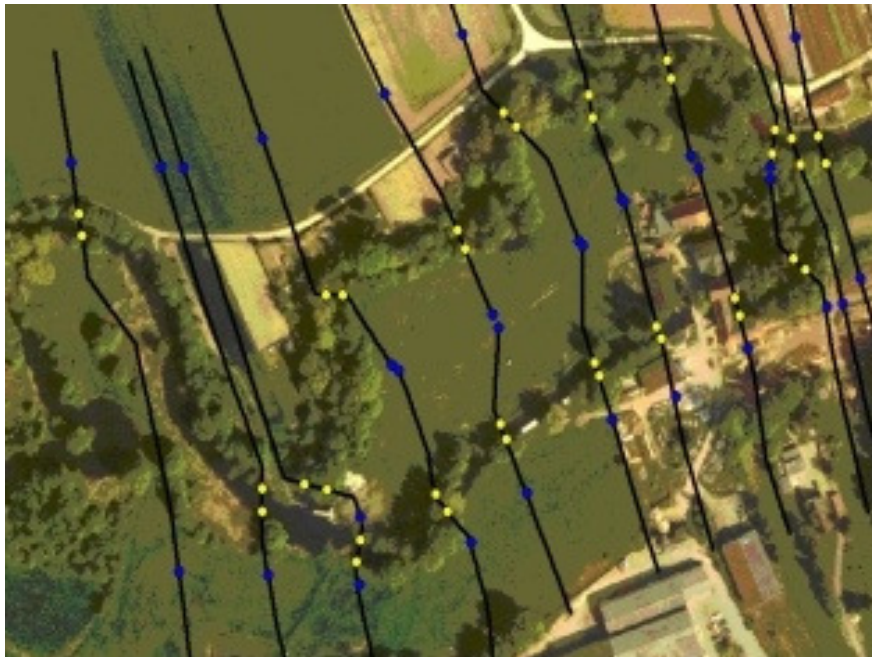
- Hydrodynamische Modelle: Saint-Venant-Gleichungen
 - Lösung der Kontinuitäts- und Energiegleichung durch 1D- bzw. 2D-Modelle

dimension	type de répartition	principe	Position dans l'espace
1D	ponctuel points de calcul	écoulement principal 	
2D	dans la surface colonnes de calcul	écoulement plan 	
3D	dans l'espace cellules de calcul	écoulement 3-D 	

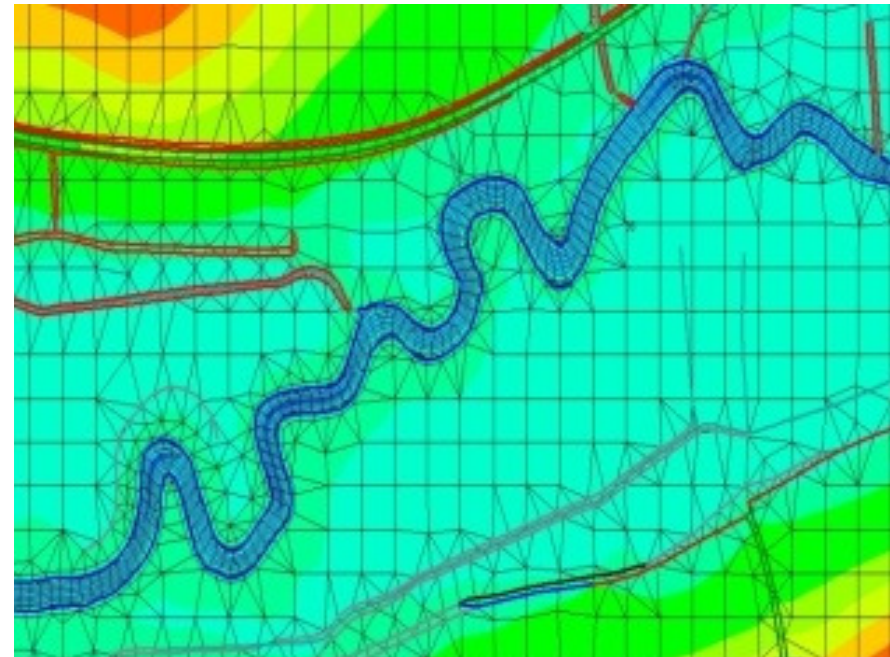
HYDRON (2009)

Hydrodynamische Modelle

- Hydrodynamische Modelle: Saint-Venant-Gleichungen
 - Lösung der Kontinuitäts- und Energiegleichung durch 1D- bzw. 2D-Modelle



Beispiel für die Lage von Querprofilen
für ein hydraulisches 1D-Modell



Beispiel für ein 2D-Gitternetz mit
Geländepunkten und Bruchkanten

BayLFU (2009)

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

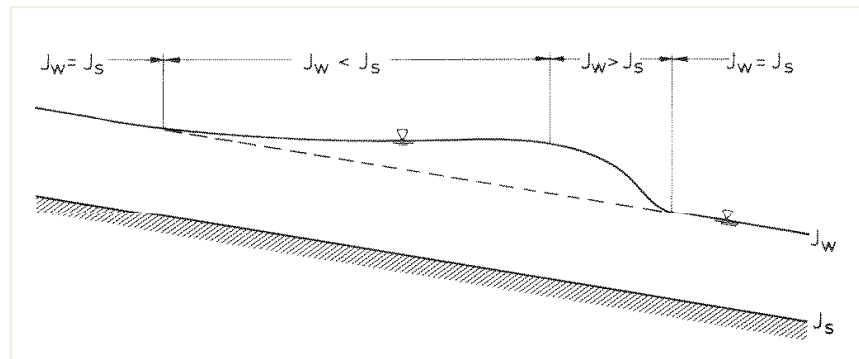
- Hydrologische Modelle:

Basierend auf Saint-Venant-Gleichungen, aber:

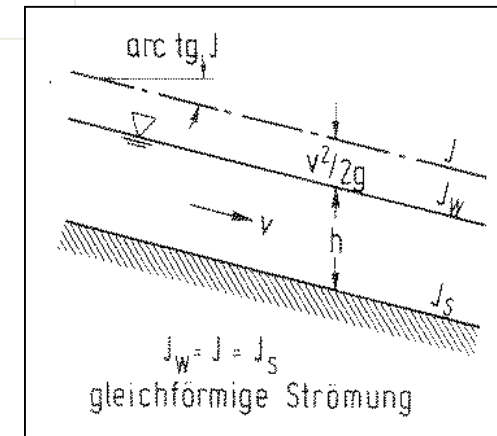
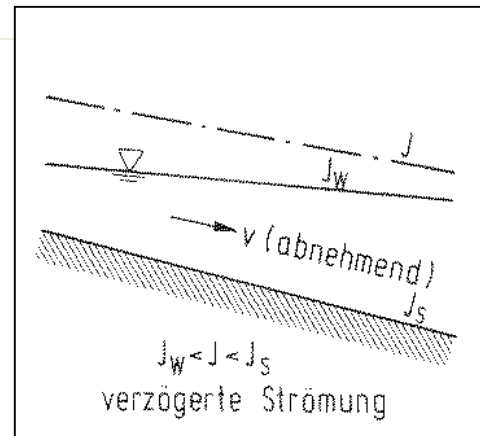
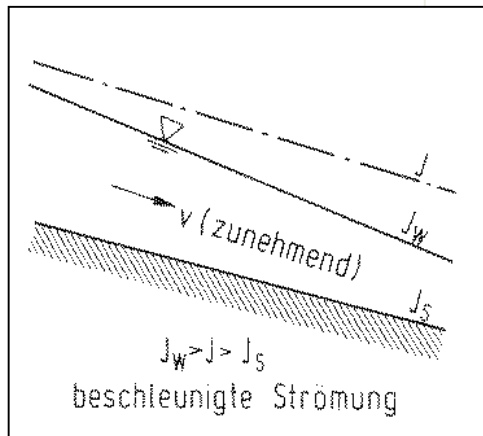
- Kontinuitätsgleichung wird berücksichtigt
- Energiegleichung wird vereinfacht, parametrisiert oder nicht berücksichtigt

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- Hydrologischer Ansatz mit folgenden vereinfachenden Annahmen:
 - einheitliche geometrische Verhältnisse innerhalb der betrachteten Gerinnestrecke
 - stationär gleichförmiger Abfluss für die Ermittlung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung



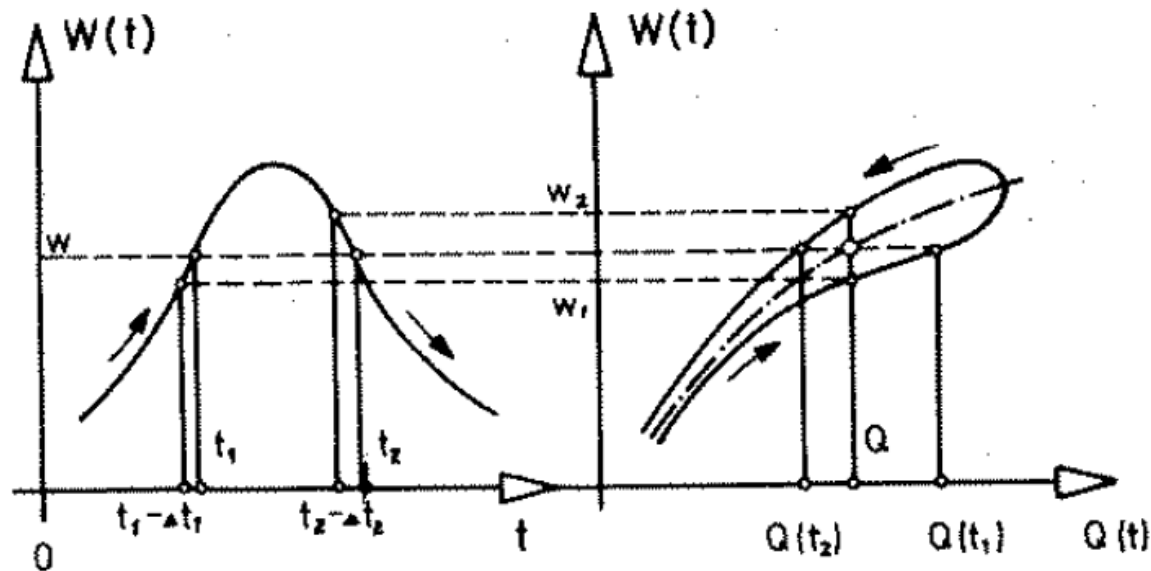
Längsschnitt durch eine Hochwasserwelle



Baumgartner & Liebscher 1988

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- Hydrologischer Ansatz mit folgenden vereinfachenden Annahmen:
 - einheitliche geometrische Verhältnisse innerhalb der betrachteten Gerinnestrecke
 - stationär gleichförmiger Abfluss für die Ermittlung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung



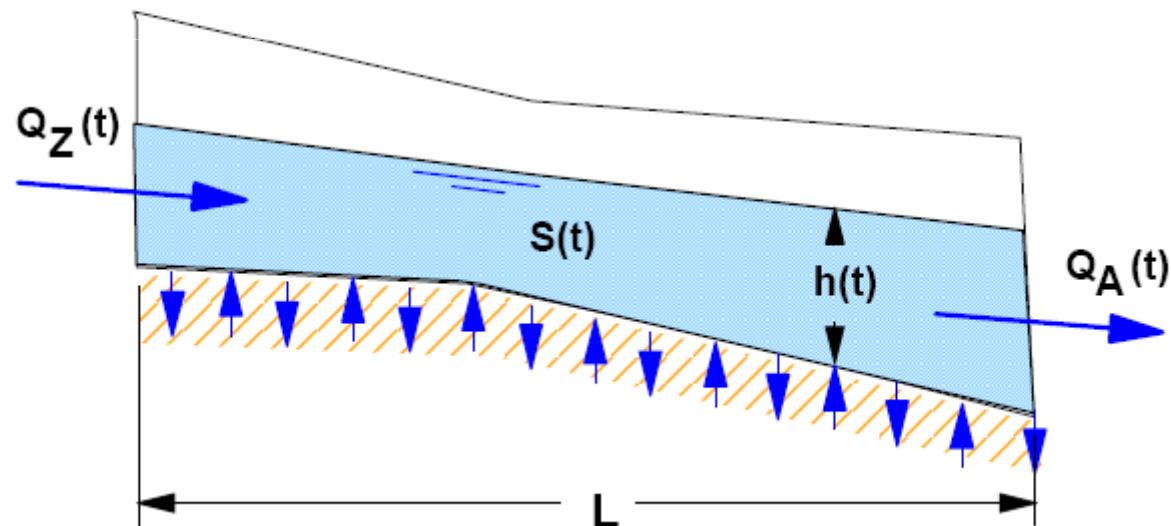
Beziehungen zwischen der ansteigenden und abfallenden Wasserstandsganglinie (links) und der Abflussschleife (WQ-Beziehung, rechts) während einer Hochwasserwelle in einem Flussprofil ($Q(t)$ = Abfluss; $W(t)$ = Wasserspiegelniveau; t = Zeit)

Plate et al. (1977)

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- Hydrologische Modelle:
Vereinfachung der Saint-Venant-Gleichungen:
 - Vereinfachung der Kontinuitätsgleichung (ohne seitliche Zuflüsse):

$$Q_Z(t) - Q_A(t) = \frac{dS}{dt}$$



Disse (2009)

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- Hydrologische Modelle:

Vereinfachung der Saint-Venant-Gleichungen: Vereinfachung der Energiegleichung:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + g \frac{\partial h}{\partial x} - g(I_0 - I_f) = 0$$

stationär, gleichförmig

stationär, ungleichförmig

instationär, ungleichförmig

Q	$[m^3/s]$	Abfluss
A	$[m^2]$	Benetzter Querschnitt des Flussprofils
q	$[m^2/s]$	Effektiver seitlicher Zufluss
x		Raumkoordinate in Fließrichtung
t		Zeitkoordinate
g	$[m/s^2]$	Erdbeschleunigung
I_0	$[]$	Hangneigung
I_f	$[]$	Reibungsgefälle bzw. -verlust
h	$[m]$	Fließtiefe des Abflusses

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- In LARSIM stehen verschiedene Verfahren zur Berechnung der Abflussverformung in den Gewässerteilstrecken zur Verfügung:
 - Option KONSTANTE TRANSLATION
 - Option TRANSLATION-RETENTION
 - Option FLIESSGESCHWINDIGKEIT
 - Option KALININ-MILJUKOV
 - Option WILLIAMS
 - Option dV/dQ FUER WILLIAMS
 - Alternativ kann die Berechnung der Abflussverformung in den Gewässerteilstrecken über vorgegebene Volumen-Abfluss-Beziehungen erfolgen, die z.B. aus Wasserspiegellagenberechnungen oder anderen Modellen wie dem Synoptischen Modell übernommen sind
- Mit der Option KEIN FLOOD-ROUTING IN TGB kann die Berechnung der Abflussverformung in einzelnen Gewässerteilstrecken ausgeschaltet werden.

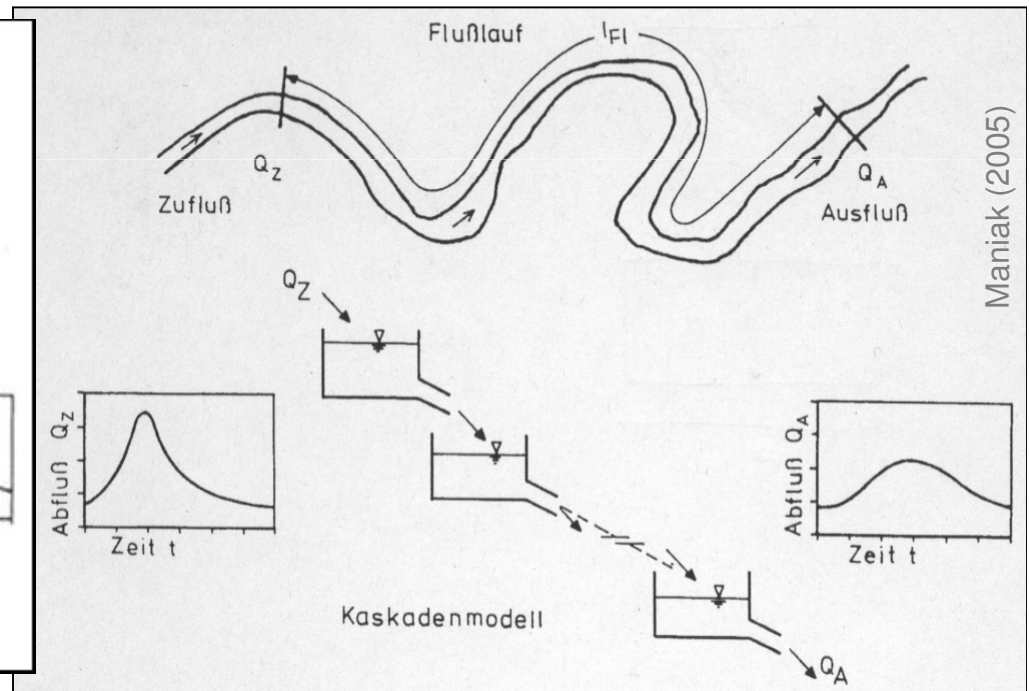
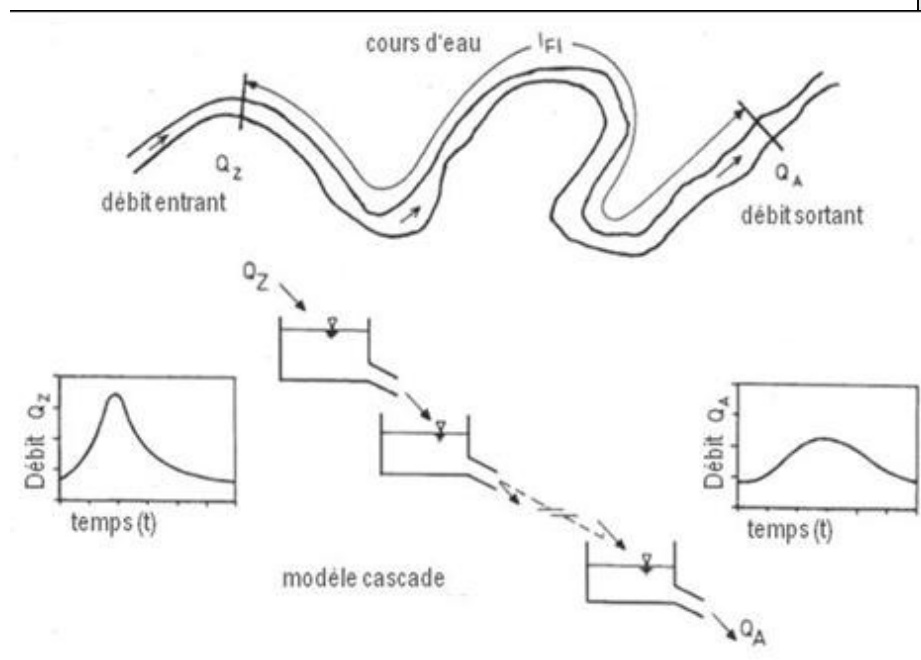
Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- Standardmäßig werden die LARSIM-WHM-Simulationen mit der Option WILLIAMS in Kombination mit der Option dV/dQ FUER WILLIAMS gerechnet.
- Dabei wird die Retention in Gewässerteilstrecken durch Einzellinearspeicher beschrieben. Die Retentionskonstanten hängen sowohl vom Zufluss als auch vom Abfluss ab.



Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- Standardmäßig werden die LARSIM-WHM-Simulationen mit der Option WILLIAMS in Kombination mit der Option dV/dQ FUER WILLIAMS gerechnet.
- Dabei wird die Retention in Gewässerteilstrecken durch Einzellinearspeicher beschrieben. Die Retentionskonstanten hängen sowohl vom Zufluss als auch vom Abfluss ab.



Einzellinearspeicher

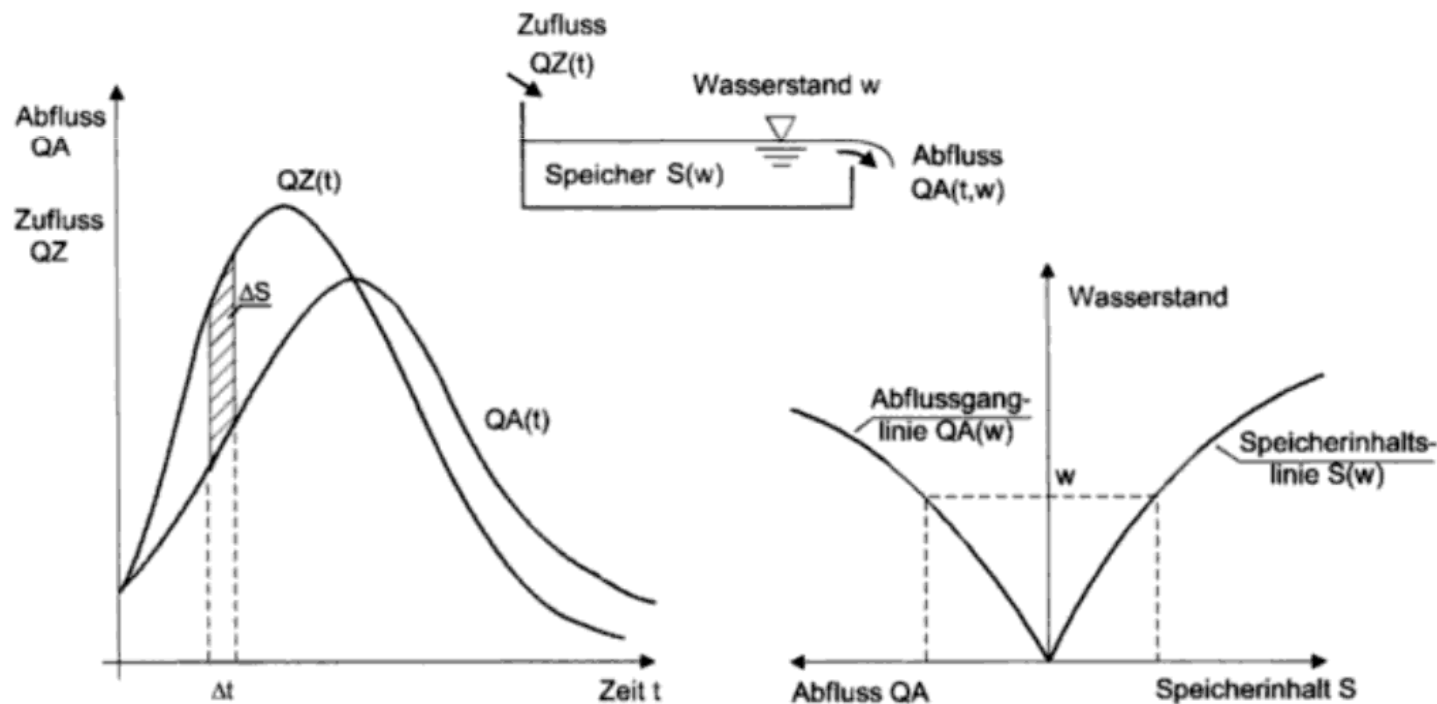
- Einzellinearspeicher:
 - Das hydrologische Verhalten der Gewässerteilstrecke kann auf Grundlage der Kontinuitätsgleichung durch einen Einzellinearspeicher beschrieben werden.

Einzellinearspeicher

- Einzellinearspeicher:
 - Das hydrologische Verhalten der Gewässerteilstrecke kann auf Grundlage der Kontinuitätsgleichung durch einen Einzellinearspeicher beschrieben werden.

$$Q_Z(t) - Q_A(t) = dS(t)/dt$$

$$dQ/dt = Q_Z - Q_A = dV/dt$$



Patt (2001)

Einzellinearspeicher

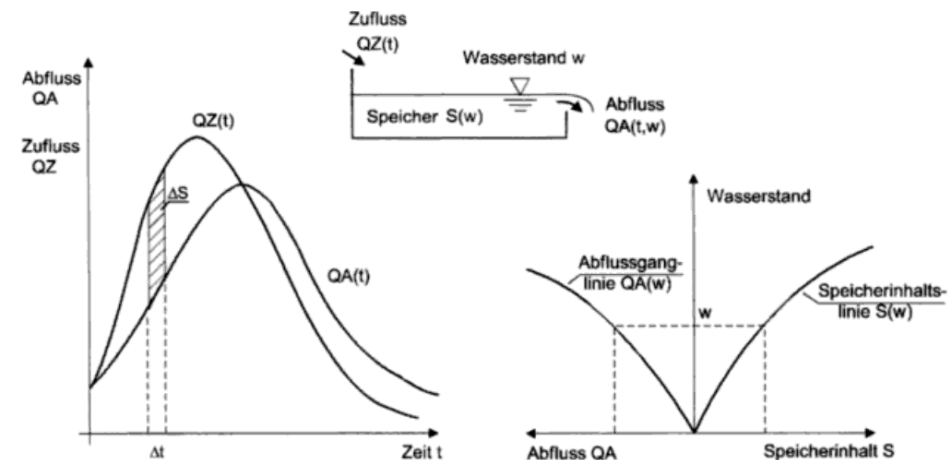
- Einzellinearspeicher:
 - Das hydrologische Verhalten der Gewässerteilstrecke kann auf Grundlage der Kontinuitätsgleichung durch einen Einzellinearspeicher beschrieben werden.

$$dQ/dt = QZ - QA = dV/dt$$

- Abfluss und Speicherinhalt sind über $S = f(w)$ und $QA = f(w)$ eindeutig miteinander verknüpft. Vereinfacht kann davon ausgegangen werden, dass Speicherfunktion und Abflusskurve linear abhängig sind. Der Ausfluss $QA(w)$ ist somit direkt proportional zum Speicherinhalt $S(w)$:

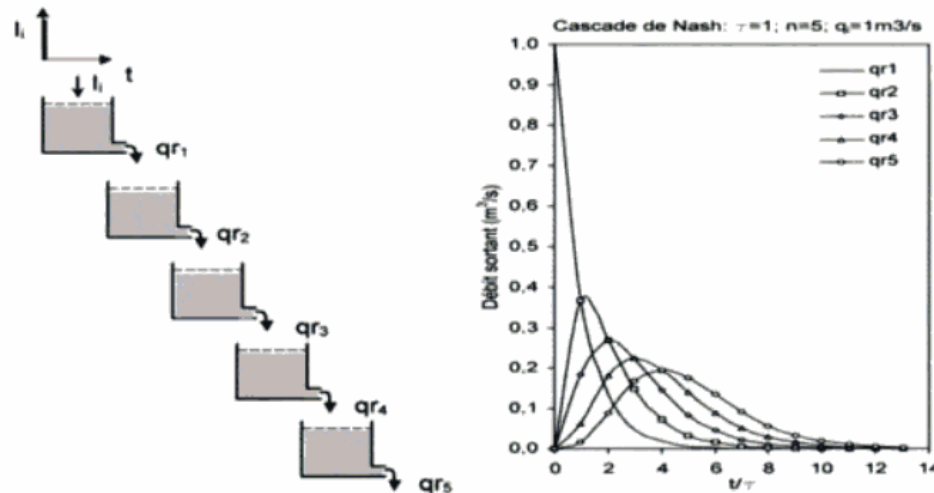
$$S(w) = RK \cdot QA(w)$$

$S(w)$	Volumen (Speicherinhalt) beim Wasserstand w
$QA(w)$	Abfluss aus dem Speicher beim Wasserstand w
RK	Rückhaltekongstante (Speicherkonstante)



Einzellinearspeicher

- Bestimmung der Rückhaltekonstanten des Einzellinearspeichers:
 - In LARSIM wird der gesamte Flusslauf in Gewässerteilstrecken unterteilt, die mit der Unterteilung des Einzugsgebiets in Rasterelemente oder Teileinzugsgebiete übereinstimmt. So hat jedes Rasterelement, die keine Quellzelle ist, im Modell genau eine Gewässerteilstrecke.
 - Das hydrologische Verhalten jeder einzelnen Gewässerteilstrecke kann dann durch einen Einzellinearspeicher beschrieben werden.
 - Durch die Vernetzung des Gewässersystems und damit der einzelnen Rasterelemente, wobei jeder ein Einzellinearspeicher darstellt, ergibt sich somit im Endeffekt eine Speicherkaskade.



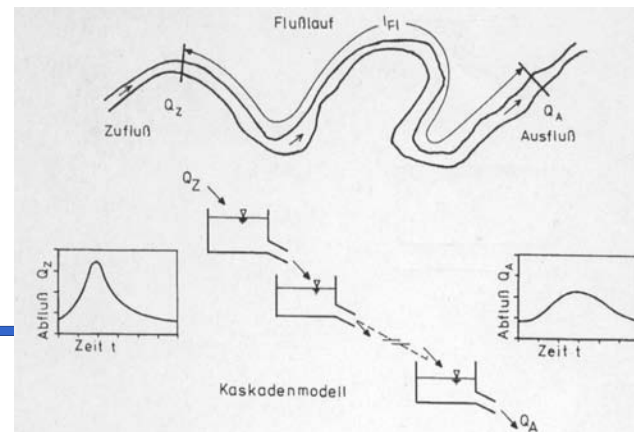
Besbes (2006)

Einzellinearspeicher

- Vorgehen bei der Berechnung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM:

Verwendung der
Rückhaltekosten für
den Einzellinearspeicher

Berechnung der
Speicherkaskade



Einzellinearspeicher

- Bestimmung der Rückhaltekonzanten des Einzellinearspeichers:
 - Die einzige Unbekannte in der Gleichung der jeweiligen Einzellinearspeicher für jede Gewässerstrecke ist die jeweilige Rückhaltekonzante RK.
 - Die Zu- und Abflüsse QZ_i und QZ_{i-1} sowie QA_{i-1} für jede Gewässerstrecke liegen aus dem vorherigen Berechnungszeitschritt (für QZ_{i-1} sowie QA_{i-1}) bzw. der stromaufwärts liegenden Gewässerstrecke (für QZ_i) vor. Dabei wird in QZ_i zudem der in der Rasterzelle gebildete Abfluss berücksichtigt.
 - Die Berechnung von Translation und Retention im Gerinne wird in LARSIM in Abhängigkeit von der Gerinnegeometrie und den Rauigkeitsverhältnissen im Gerinne durchgeführt, um so das Einführen weiterer Eichparameter in das Modell zu vermeiden.

Einzellinearspeicher

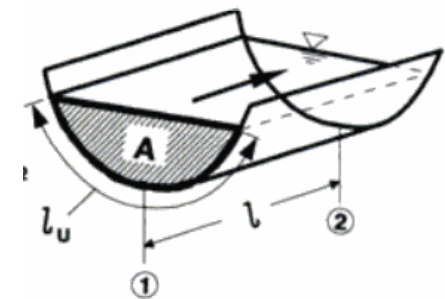
- Bestimmung der Rückhaltekonstanten des Einzellinearspeichers:
Um den Berechnungsaufwand einzugrenzen, werden bei dem in LARSIM verwendeten hydrologischen Ansatz einige vereinfachende Annahmen getroffen:
 - Einheitliche geometrische Verhältnisse innerhalb der betrachteten Gerinnestrecke
 - Annahme stationär gleichförmiger Abfluss bei der Ermittlung der Wasserstands-Durchfluss-Beziehung
 - Die (variable) Rückhaltekonstante ist abhängig vom aktuellen Wasserstand bzw. von Abfluss und Fließgeschwindigkeit im Profil
 - Die Rückhaltekonstante der Gewässerteilstrecke kann dabei als Schwerpunktlaufzeit einer Hochwasserwelle gedeutet werden.

Einzellinearspeicher

- Bestimmung der Rückhaltekonstanten des Einzellinearspeichers:
 - Von Williams (1969) wird eine Gleichung zur abfluss- bzw. wasserstandsabhängigen Ermittlung der Rückhaltekonstanten gegeben:

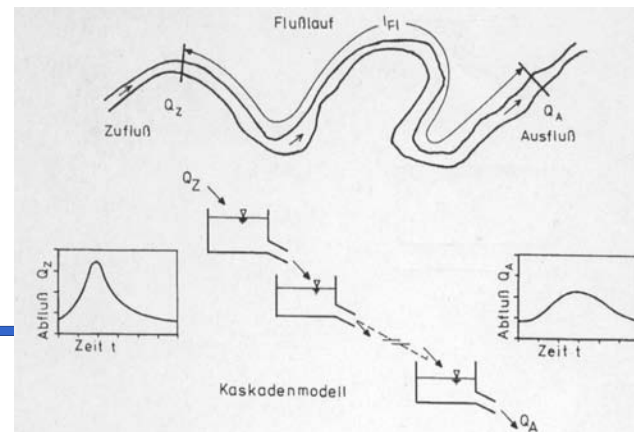
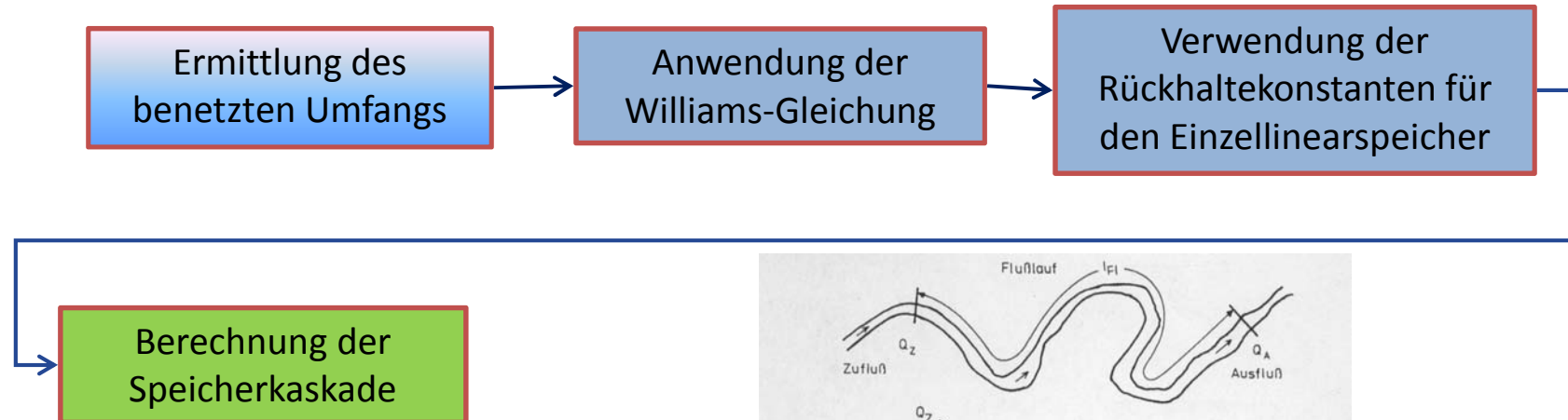
$$RK_i = \frac{L \cdot A_{n,i}}{3600} \cdot \frac{3}{QZ_{i-1} + QZ_i + QA_{i-1}}$$

RK	$[h]$	Speicherkonstante für die Gewässerteilstrecke
i	$[-]$	Index für den Berechnungszeitschritt
L	$[m]$	Länge der Gewässerteilstrecke
A	$[m^2]$	Benetzter Querschnitt des Flussprofils
n	$[-]$	Index für den Wasserstand im Gewässerprofil
QA	$[m^3/s]$	Abfluss aus der Gewässerteilstrecke
QZ	$[m^3/s]$	Zufluss in die Gewässerteilstrecke



Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

- Vorgehen bei der Berechnung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM:



Bestimmung des benetzten Querschnitts

Der benetzte Querschnitt des Flussprofils A_n ist abhängig vom Wasserstand im Fluss. Um diesen Wert A_n zu erhalten, wird zunächst der Abfluss bei unterschiedlichen Wasserständen ermittelt:

- 1) Berechnung des Abflusses Q_{Manning} : Für jede Gewässerteilstrecke wird unter Verwendung der geometrischen Verhältnissen des Querprofils der Profildaten der Abfluss Q_{Manning} nach der Beziehung von Manning-Strickler berechnet:

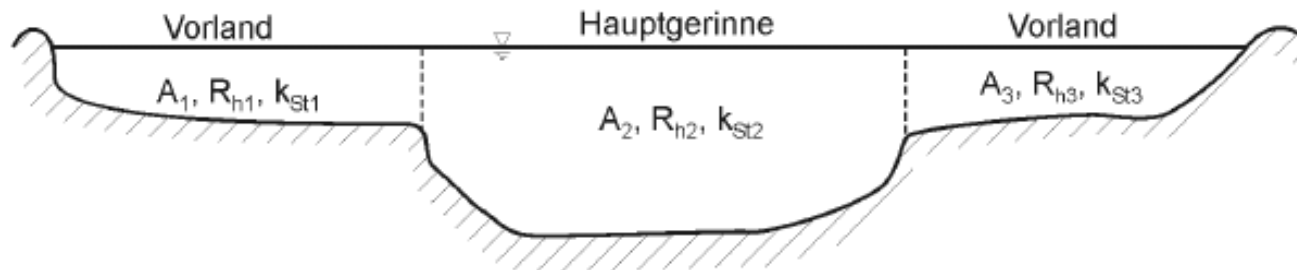
$$Q_n = A_n \cdot EK \cdot K_S \cdot \left(\frac{A_n}{U} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

Q	Stationär gleichförmiger Abfluss nach Manning-Strickler [m^3/s]
A	Benetzter Querschnitt des Flussprofils [m^2]
n	Index für den Wasserstand im Gewässerprofil []
EK	Mögliche Kalibrierungsgröße in LARSIM zur Modifizierung der Rauigkeitsbeiwerte []
K_S	Geschwindigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]
U	Benetzter Umfang des Flussprofils [m]
I	Gefälle der Flusstrecke []

Bestimmung des benetzten Querschnitts

- In LARSIM erfolgt die Ermittlung des Gesamtabflusses in gegliederten Profilen (Hauptgerinne und Vorländer getrennt) mit unterschiedlichen Wassertiefen bzw. Rauigkeitsverhältnissen durch die Berechnung der Summe der Teilabflüsse:

$$Q_n = \left(\sum_{i=1}^n k_{St_i} R_{h_i}^{\frac{2}{3}} A_i \right) I_0^{\frac{1}{2}}$$



Jirka & Lang 2004

Bestimmung des benetzten Querschnitts

- Die Berechnung des Abflusses Q_{Manning} nach Manning-Strickler erfolgt immer für ein Diskretisierungsintervall von 0,1 m Wassertiefe unter Verwendung der Profilgeometrie.
- Ausgabe der berechneten W-Q-Beziehung in das <tape11> für jede Gewässerteilstrecke in LARSIM durch die Option SCHLUESSELKURVEN möglich.

SCHLUESSELKURVE DER GEWAESSERTEILSTRECKE 1486 (53323380)				

HOEHE WSP (M)	DURCHFLUSS (CBM/S)	BREITE WSP (M)	GESCHW. (M/S)	VOLUMEN (CBM)
0.1	0.821	19.3	0.43	2018.2
0.2	2.614	19.7	0.68	4081.2
0.3	5.151	20.2	0.88	6189.0
0.4	8.345	20.6	1.06	8341.6
0.5	12.140	21.0	1.22	10538.9
0.6	16.502	21.4	1.36	12781.0
0.7	21.405	21.9	1.50	15067.9
0.8	26.830	22.3	1.63	17399.5
0.8				MAX. IM EREIGNISZEITRAUM
0.9	32.762	22.7	1.75	19775.9
1.0	39.190	23.1	1.86	22197.1
1.1	46.104	23.6	1.97	24663.1
1.2	53.498	24.0	2.08	27173.8
1.3	61.366	24.4	2.18	29729.4
1.4	69.702	24.8	2.28	32329.7
1.5	78.505	25.3	2.37	34974.7
1.6	87.770	25.7	2.46	37664.6
1.7	97.497	26.1	2.55	40399.2
1.8	107.684	26.5	2.63	43178.6
1.9	118.329	27.0	2.72	46002.7
2.0	129.434	27.4	2.80	48871.7
2.1	140.997	27.8	2.88	51785.4
2.10				BORDVOLL
2.2	154.759	47.8	2.93	55777.5
2.3	169.862	65.7	2.90	61869.3
2.29				VORLANDRAND LINKS
2.29				VORLANDRAND RECHTS
2.4	186.886	66.5	2.87	68848.7

Bestimmung des benetzten Querschnitts

- 2) Abschätzung des Abflusses $Q_{\text{Schätzung}}$: Der Abfluss $Q_{\text{Schätzung}}$ für einen bestimmten Wasserstand n wird abgeschätzt aus den Zu- und Abflüssen:

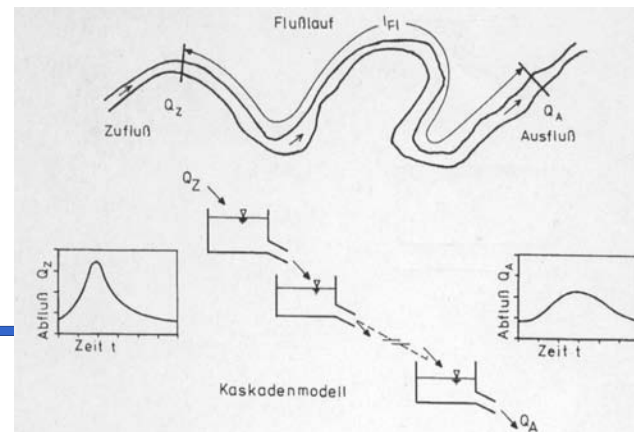
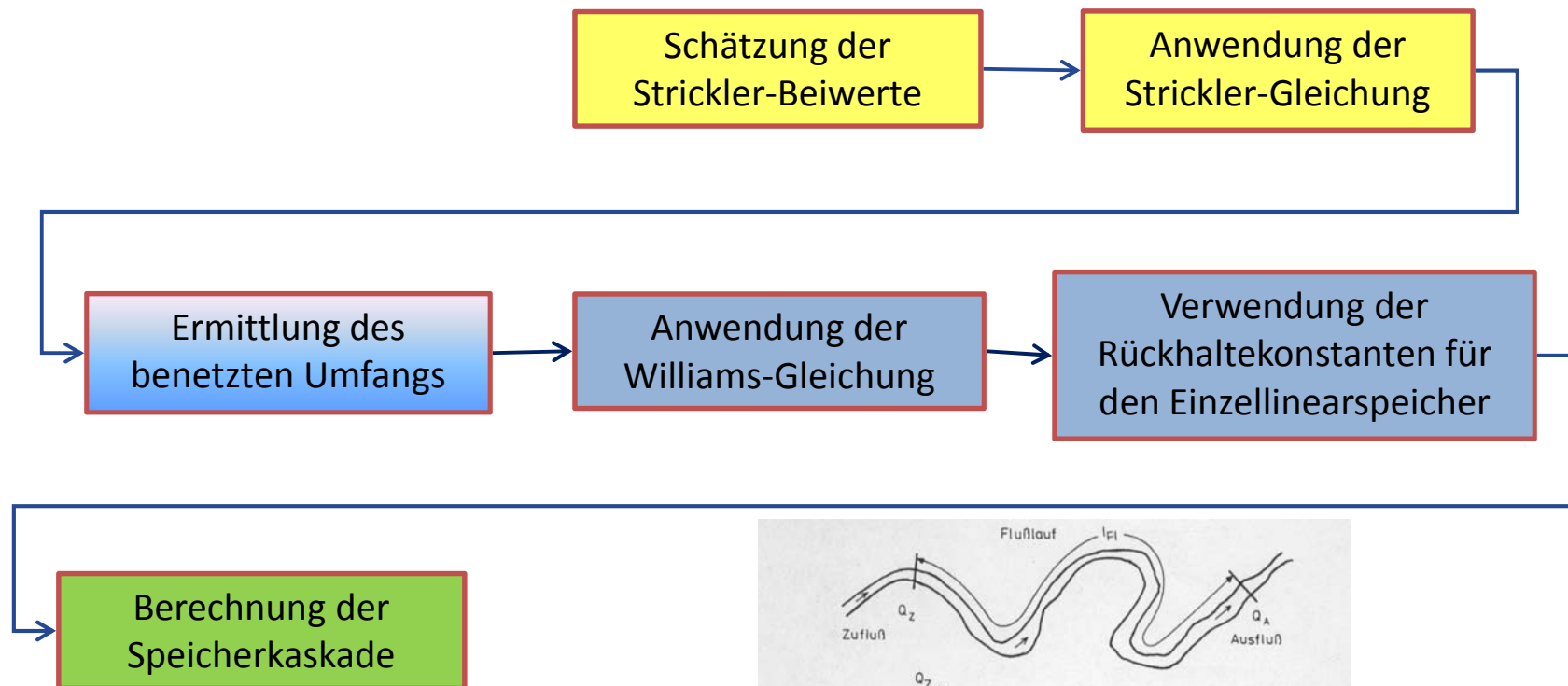
$$Q_n \leq \frac{QZ_{i-1} + QZ_i + QA_{i-1}}{3} \leq Q_{n+1}$$

- 3) Vergleich $Q_{\text{Schätzung}}$ und Q_{Manning} : Die beiden Abflüsse $Q_{\text{Schätzung}}$ und Q_{Manning} werden vom Programm miteinander verglichen. Für den Abfluss Q_{Manning} , der dem Abfluss $Q_{\text{Schätzung}}$ am nächsten kommt, wird der Wasserstand und darüber der benetzte Querschnitt A_n ermittelt.

Dieser Wert für A_n wird dann in die Williams-Gleichung eingesetzt, um so die Rückhaltekonzante für die jeweilige Gewässerteilstrecke zu bestimmen.

Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

- Vorgehen bei der Berechnung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM:



Bestimmung des benetzten Querschnitts

- Um den Abfluss Q_{Manning} berechnen zu können, sind weitere Angaben erforderlich:
 - 1) Strickler-Beiwerte: Die für die Anwendung der Manning-Strickler-Gleichung erforderlichen Strickler-Beiwerte (Kst-Werte) können z.B. aus Tabellen in Abhängigkeit von der Rauigkeit der Gewässerstrecke geschätzt werden. In LARSIM wird in der Regel für das Hauptbett ein Kst-Wert von $30 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ und für die Vorländer ein Kst-Wert von $20 \text{ m}^{1/3}/\text{s}$ gesetzt. Diese Werte entsprechen den in der Literatur häufig angegebenen Rauigkeitsbeiwerten für natürliche Flüsse mit mäßigem Geschiebe bzw. für Vorländer.

	st [$\text{m}^{1/3}/\text{s}$]
Erdkanäle in festem Material, glatt	60
Erdkanäle in festem Sand mit etwas Ton oder Schotter	50
Erdkanäle mit Sohle aus Sand und Kies mit gepflasterten Böschungen	45–50
Erdkanäle aus Feinkies, etwa 10/20/30 mm	45
Erdkanäle aus mittlerem Kies, etwa 20/40/60 mm	40
Erdkanäle aus Grobkies, etwa 50/100/150 mm	35
Erdkanäle aus scholligem Lehm	30
Erdkanäle, mit groben Steinen angelegt	25–30
Erdkanäle aus Sand, Lehm oder Kies, stark bewachsen	20–25
Natürliche Flußbetten mit fester Sohle, ohne Unregelmäßigkeiten	40
Natürliche Flußbetten mit mäßigem Geschiebe	33–35
Natürliche Flußbetten, verkrautet	30–35
Natürliche Flußbetten mit Geröll und Unregelmäßigkeiten	30
Natürliche Flußbetten, stark geschiebeführend	28
Wildbäche mit grobem Geröll (kopfgroße Steine) bei ruhendem Geschiebe	25–28
Wildbäche mit grobem Geröll, bei in Bewegung befindlichem Geschiebe	19–22

Jirka & Lang 2004

Bestimmung des benetzten Querschnitts

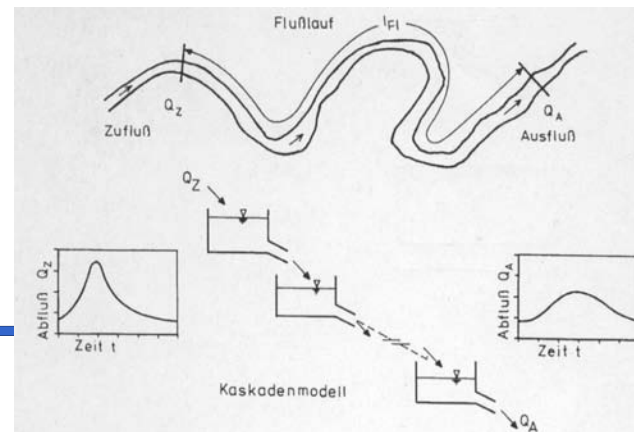
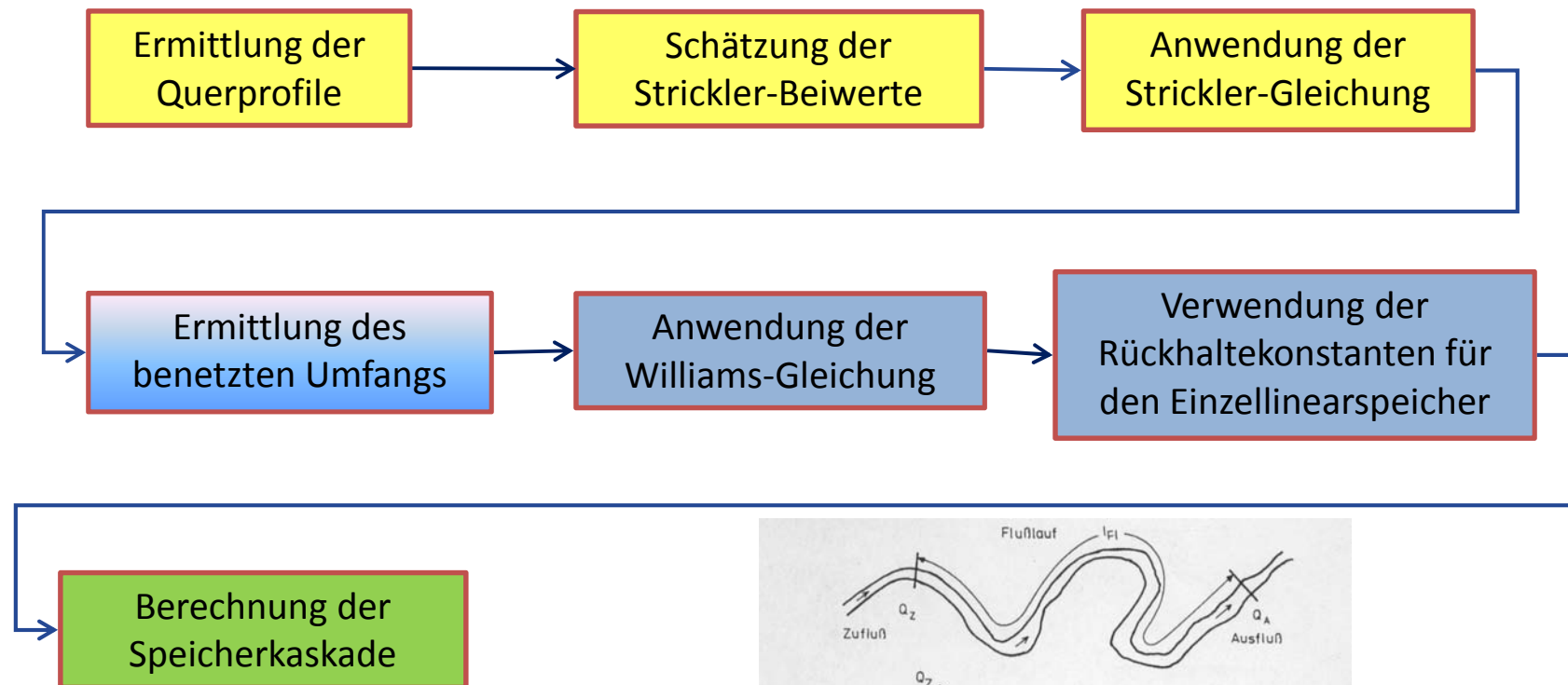
- Um den Abfluss Q_{Manning} berechnen zu können, sind weitere Angaben erforderlich:
 - 1) Strickler-Beiwerte: Bei der Modellkalibrierung können die geschätzten Kst-Werte durch Eichparameter modifiziert werden. Der Kst-Wert geht linear in die Berechnung der Fließgeschwindigkeit und damit auch in den Abfluss ein. Die Berechnungsergebnisse werden von der Genauigkeit der Schätzung bzw. Kalibrierung beeinflusst.

Bestimmung des benetzten Querschnitts

- Um den Abfluss Q_{Manning} berechnen zu können, sind weitere Angaben erforderlich:
 - 2) Angaben zum Querprofil: Die Berechnungen mit der Manning-Strickler-Gleichung werden für jede Gewässerteilstrecke einzeln durchgeführt. Daher müssen auch für jede Gewässerteilstrecke Informationen über ein Querprofil in LARSIM vorliegen.

Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

- Vorgehen bei der Berechnung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM:

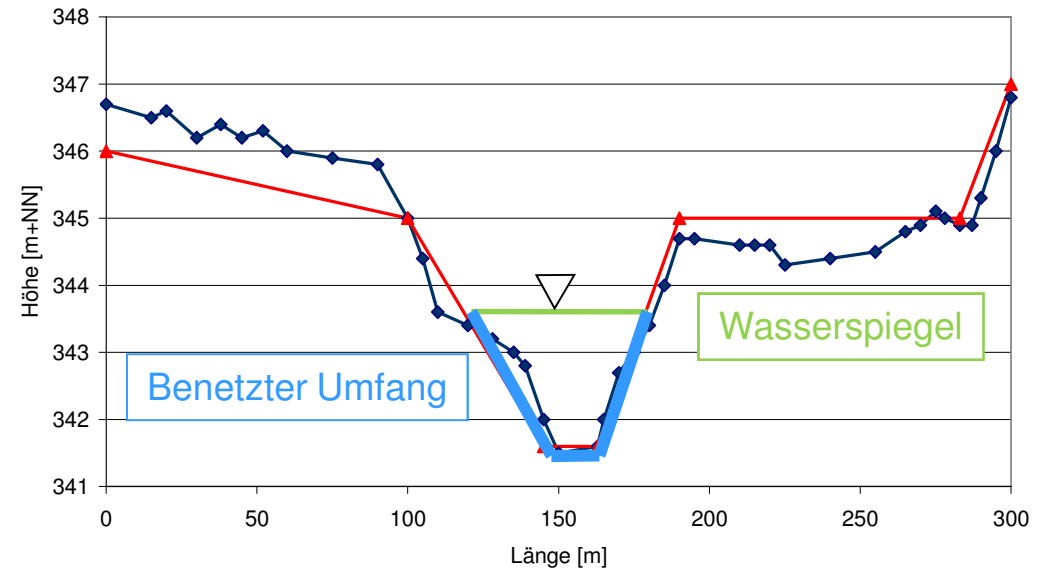
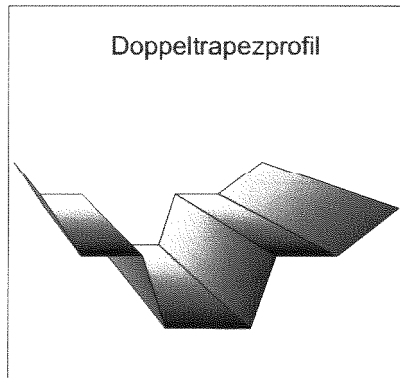


Bestimmung der Querprofile

- Die hydrologischen Verfahren des Flood-Routings werden für die Gewässerteilstrecke in jedem LARSIM-Modellelement (außer Quellzellen) angewandt.
- Für alle Modellelemente mit Flood-Routing-Berechnung sind Angaben zu den Querprofilen erforderlich.

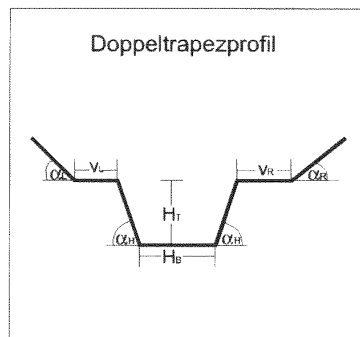
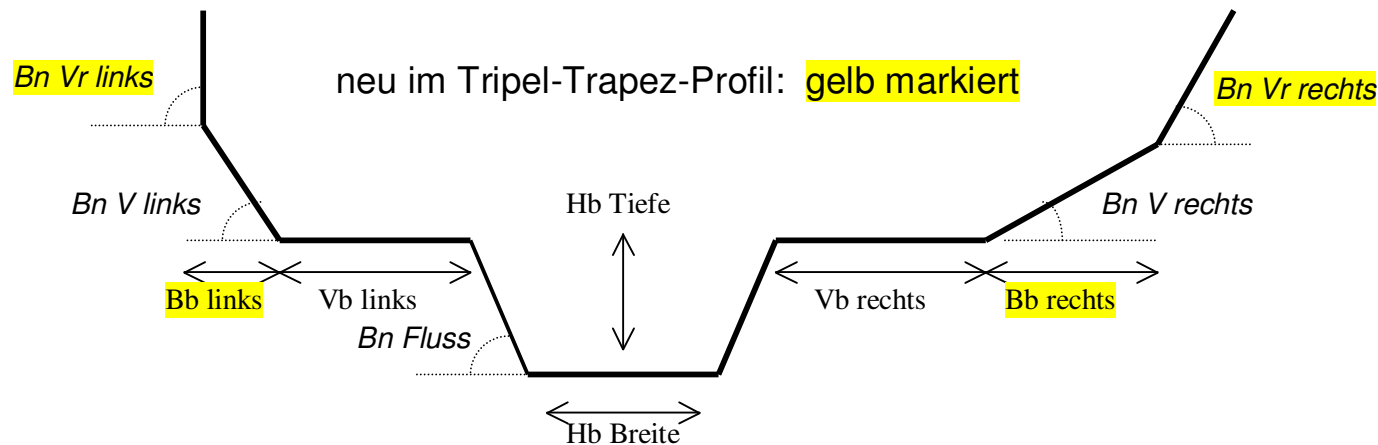
Bestimmung der Querprofile

- Annäherung der Querprofile in LARSIM durch *Doppeltrapez*-Querprofil:



Bestimmung der Querprofile

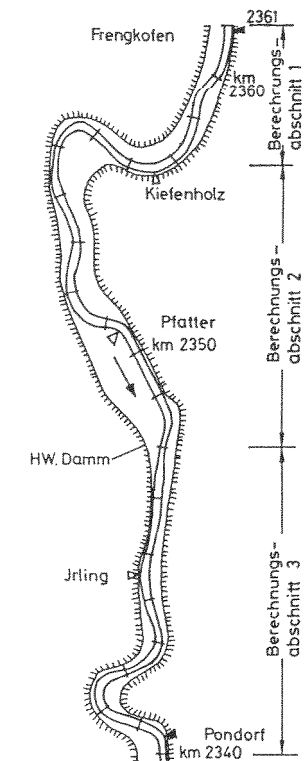
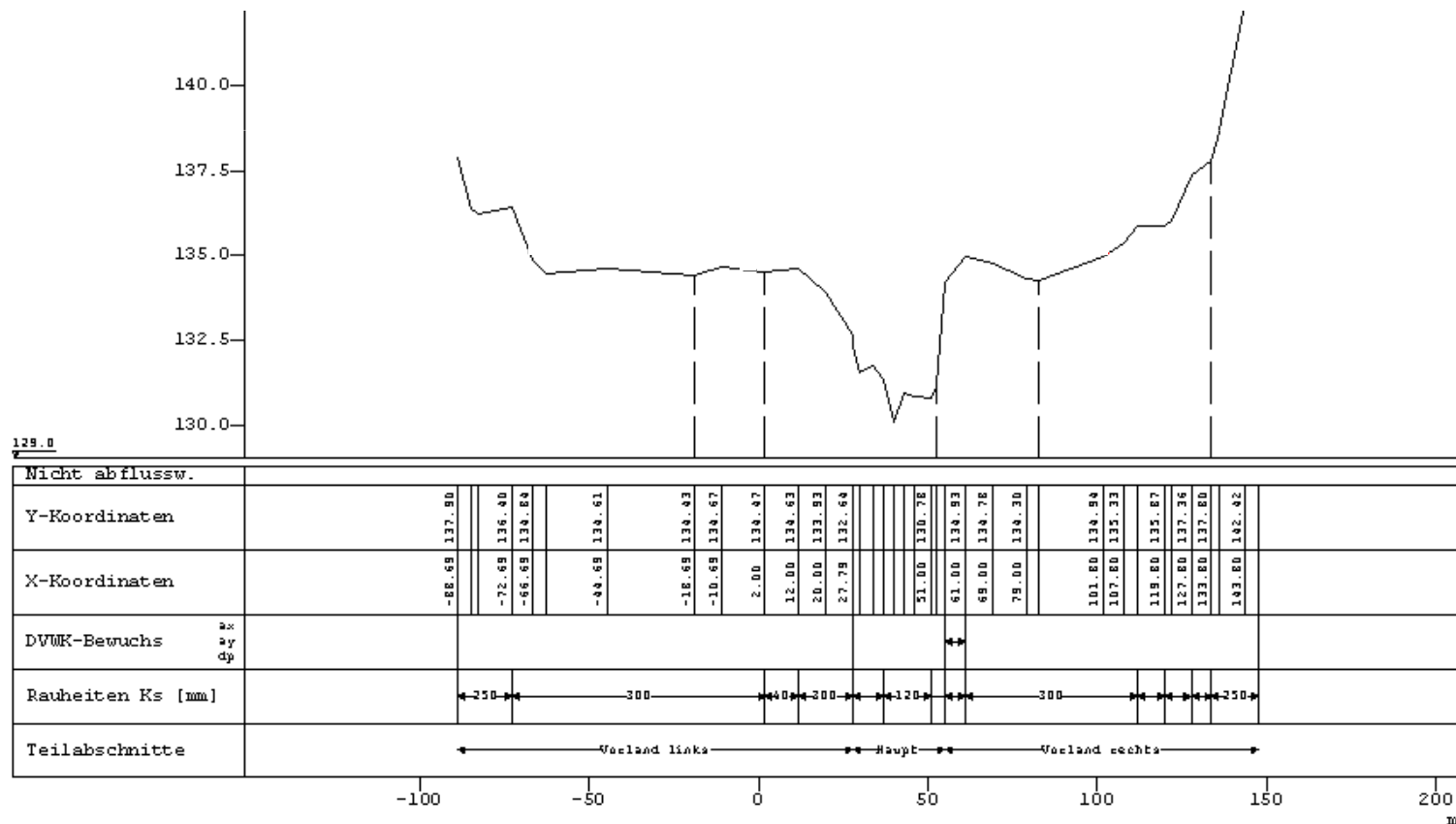
- Annäherung der Querprofile in LARSIM durch *Tripeltrapez*-Querprofil:



Hb Tiefe:	Tiefe Hauptbett
Hb Breite:	Breite Hauptbett
Bn Fluss:	Böschungsneigung Hauptbett
Vb links/rechts:	linke/rechte Vorlandbreite
Bb links/rechts:	Böschungsbreite linkes/rechtes Vorland
Bn V links/rechts:	Böschungsneigung linkes/rechtes Vorland
Bn Vr links/rechts:	Böschungsneigung linker/rechter Vorlandrand

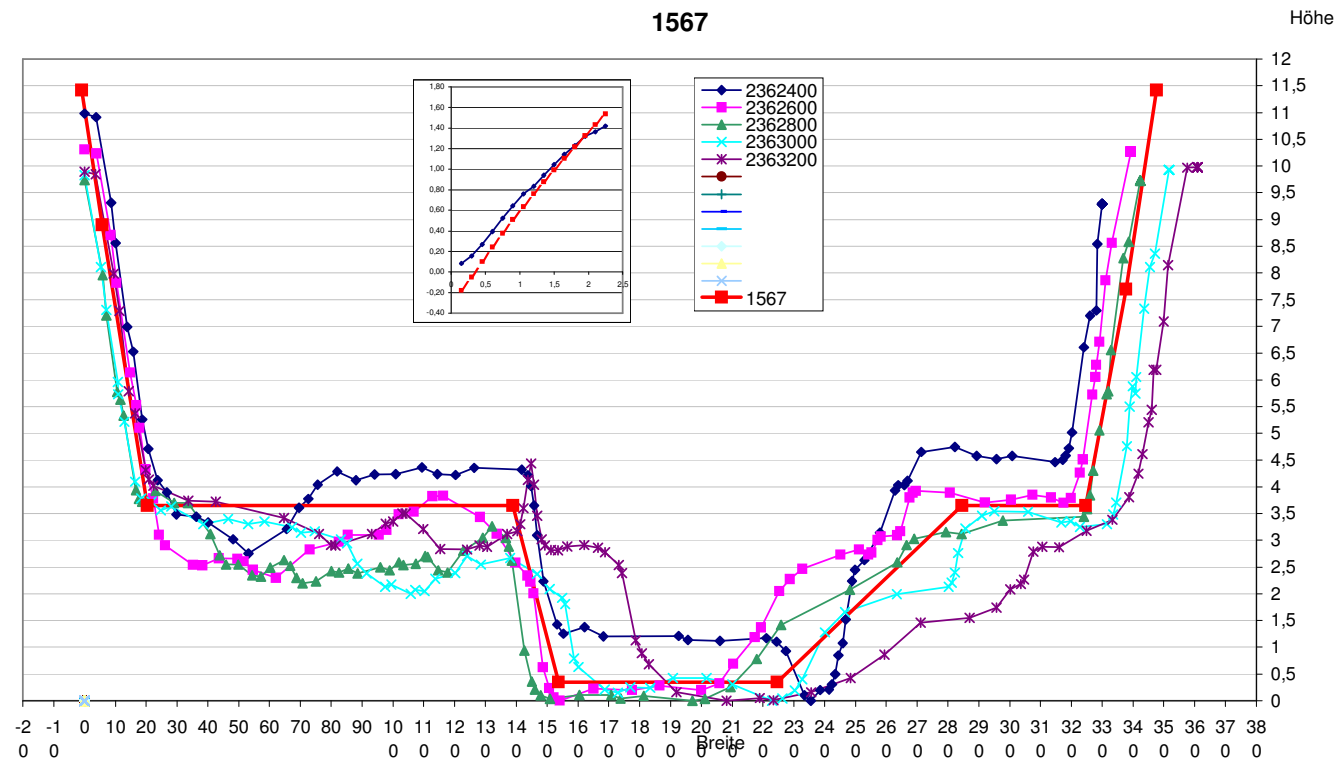
Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinnedaten:
 - Profilschätzung vor Ort
 - Ermittlung eines mittleren Profils aus vorhandenen Vermessungen



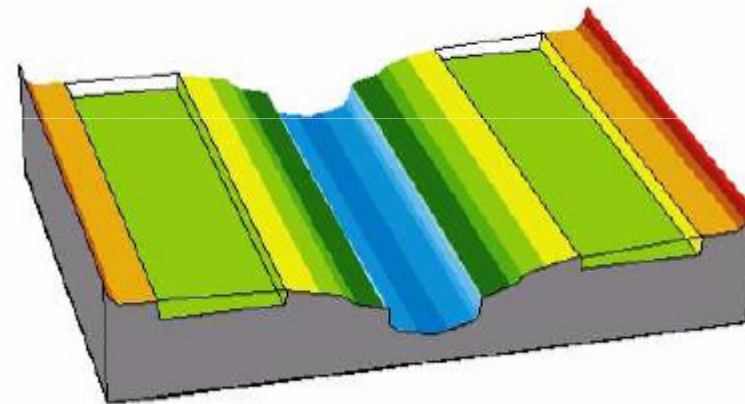
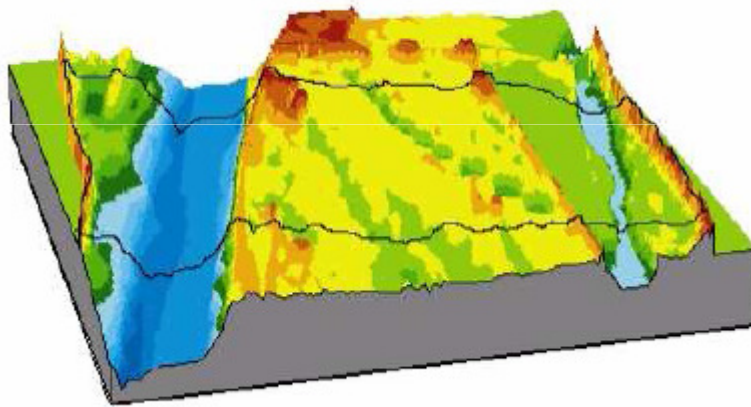
Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinneedaten:
 - Profilschätzung vor Ort
 - Ermittlung eines mittleren Profils aus vorhandenen Vermessungen



Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinnedaten:
 - Profilschätzung vor Ort
 - Ermittlung eines mittleren Profils aus vorhandenen Vermessungen



Hoefslot et al. (1999)

Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinnewdaten:
 - Profilschätzung vor Ort
 - Ermittlung eines mittleren Profils aus vorhandenen Vermessungen
 - Morphologischer Ansatz zur Abschätzung der Hauptbetttiefen und -breiten. Ermittelt aus Korrelationsanalysen vieler Flüsse mit unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen.

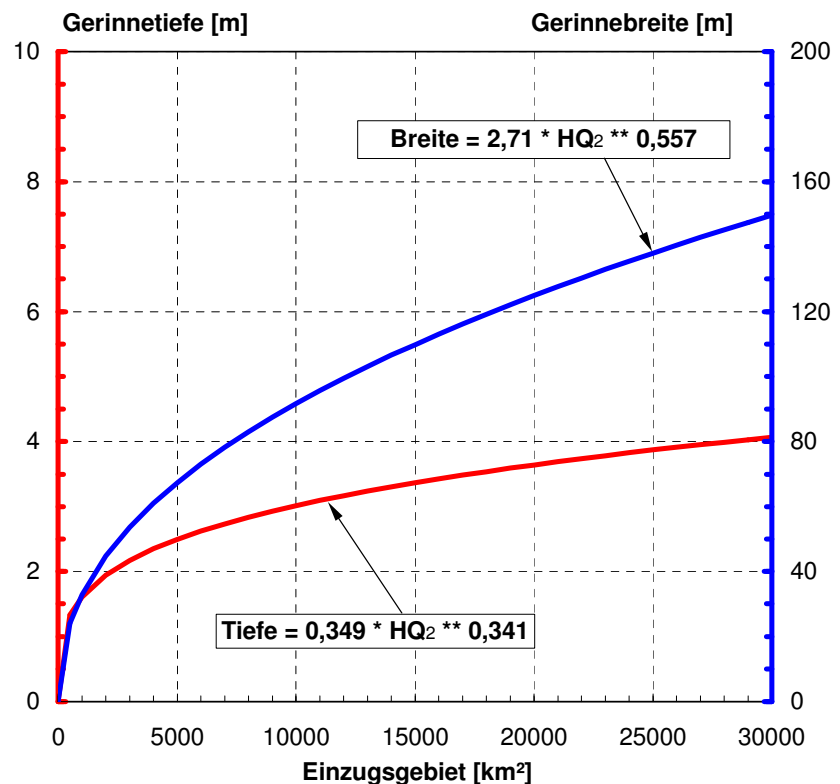
Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinneedaten:
 - Morphologischer Ansatz: Abschätzung der mittleren Querprofilaten anhand der Flächengröße des Einzugsgebietes sowie des gerinnebildenden Abflusses (hier: 2-jährlicher Hochwasserabfluss)

Bestimmung der Querprofile

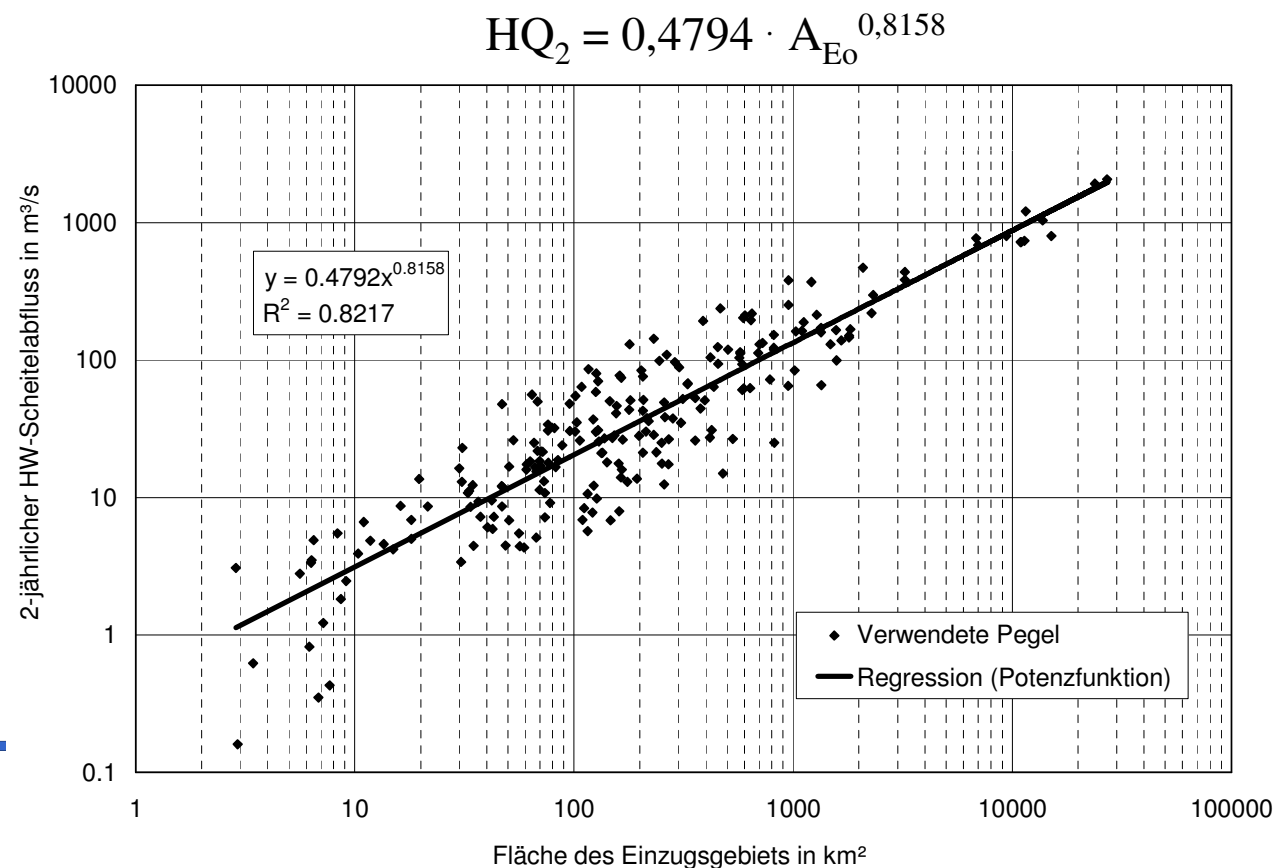
- Ermittlung der Gerinneedaten:
 - Von Allen et al. (1994) wurden Exponenten bzw. Koeffizienten für die Formel anhand von 674 Querprofilen unterschiedlicher Flüsse in den USA ermittelt.
 - Vorlandbreiten werden gleich der Sohlbreite des Hauptbetts gesetzt.
 - Böschungsneigung für das Hauptbett 1,5 und Böschungsneigung für die Vorländer von 4,0 (Breite Böschung/Höhe Böschung)

$$\begin{aligned}
 B_w &= 1,696 \pm 0,166 Q_{MHQ}^{0,552 \pm 0,026} && \text{Moseldaten} \\
 &= 2,710 Q_{GB}^{0,557} && \text{Allen et al.} \\
 T_m &= 0,328 \pm 0,028 Q_{MHQ}^{0,388 \pm 0,022} && \text{Moseldaten} \\
 &= 0,349 Q_{GB}^{0,341} && \text{Allen et al.}
 \end{aligned}$$



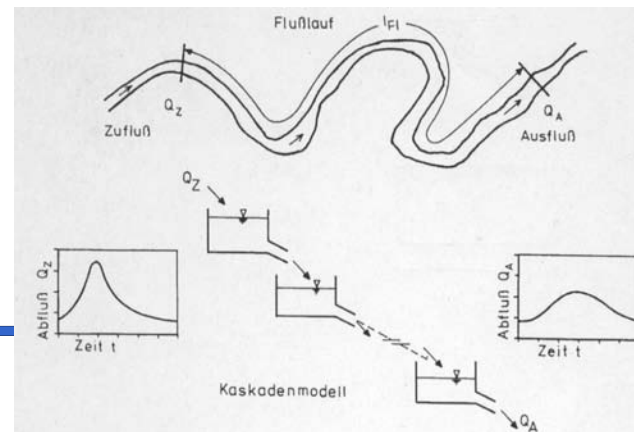
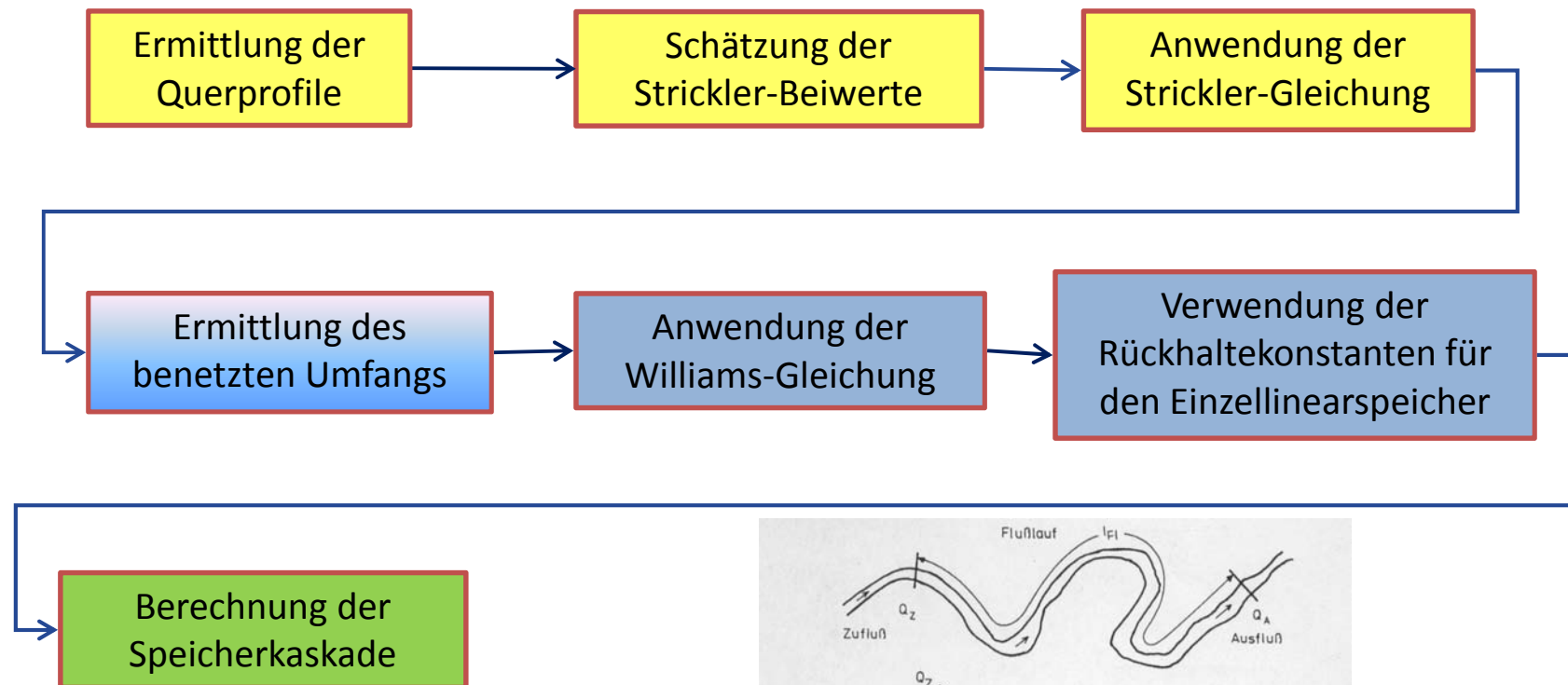
Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinneedaten:
 - Ermittlung des zweijährlichen Hochwasserscheitelabfluss HQ_2 aus einer Regression unter Einbeziehung der Einzugsgebietsfläche:
 - Datengrundlage: Hochwasserstatistiken mit HQ_2 -Werten für 218 Pegel in Deutschland und Frankreich (Einzugsgebiete der Mosel, der bayerischen Donau, des Schwarzwalds, der Bodenseezuflüsse sowie der Tauber).



Bestimmung der Querprofile

- Zusammenfassung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM unter Verwendung von Querprofilen:

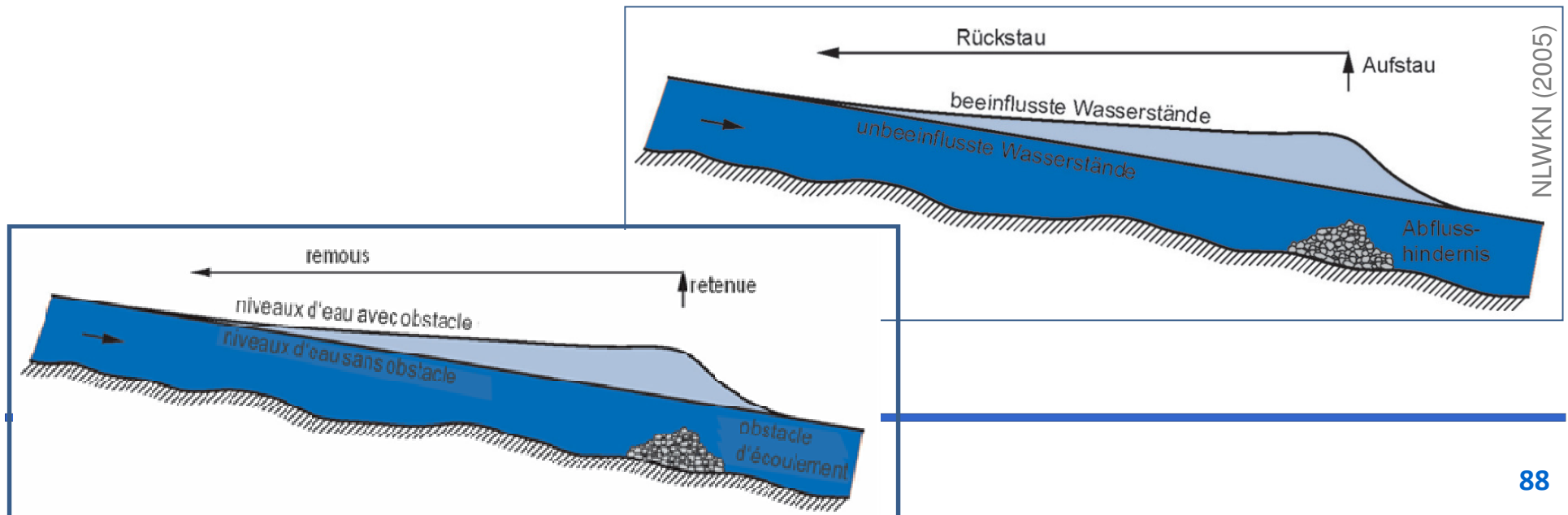


Bestimmung der Querprofile

- Die hydrologischen Flood-Routing-Verfahren können unter gewissen Voraussetzungen den Wellenablauf im Gerinne so gut abbilden, dass auf die Anwendung eines hydraulischen Modells verzichtet werden kann. Dabei müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

1. Einhaltung der Modellannahmen: Die Einhaltung der Modellannahmen bezieht sich auf die Annahmen zur Stationarität und Gleichförmigkeit des Abflusses. Die Anwendung der hydrologischen Flood-Routing-Verfahren ist immer dann möglich, wenn eine enge Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss besteht.

Bei bedeutenden Rückstauwirkungen, z.B. in Tieflandflüssen mit Rückstaubereichen, ist eine Anwendung nicht sinnvoll. Auch im Mündungsbereich großer Nebenflüsse gibt es Anwendungsprobleme in Folge wechselseitiger Rückstauwirkungen.



Bestimmung der Querprofile

- Die hydrologischen Flood-Routing-Verfahren können unter gewissen Voraussetzungen den Wellenablauf im Gerinne so gut abbilden, dass auf die Anwendung eines hydraulischen Modells verzichtet werden kann. Dabei müssen zwei Voraussetzungen erfüllt sein:

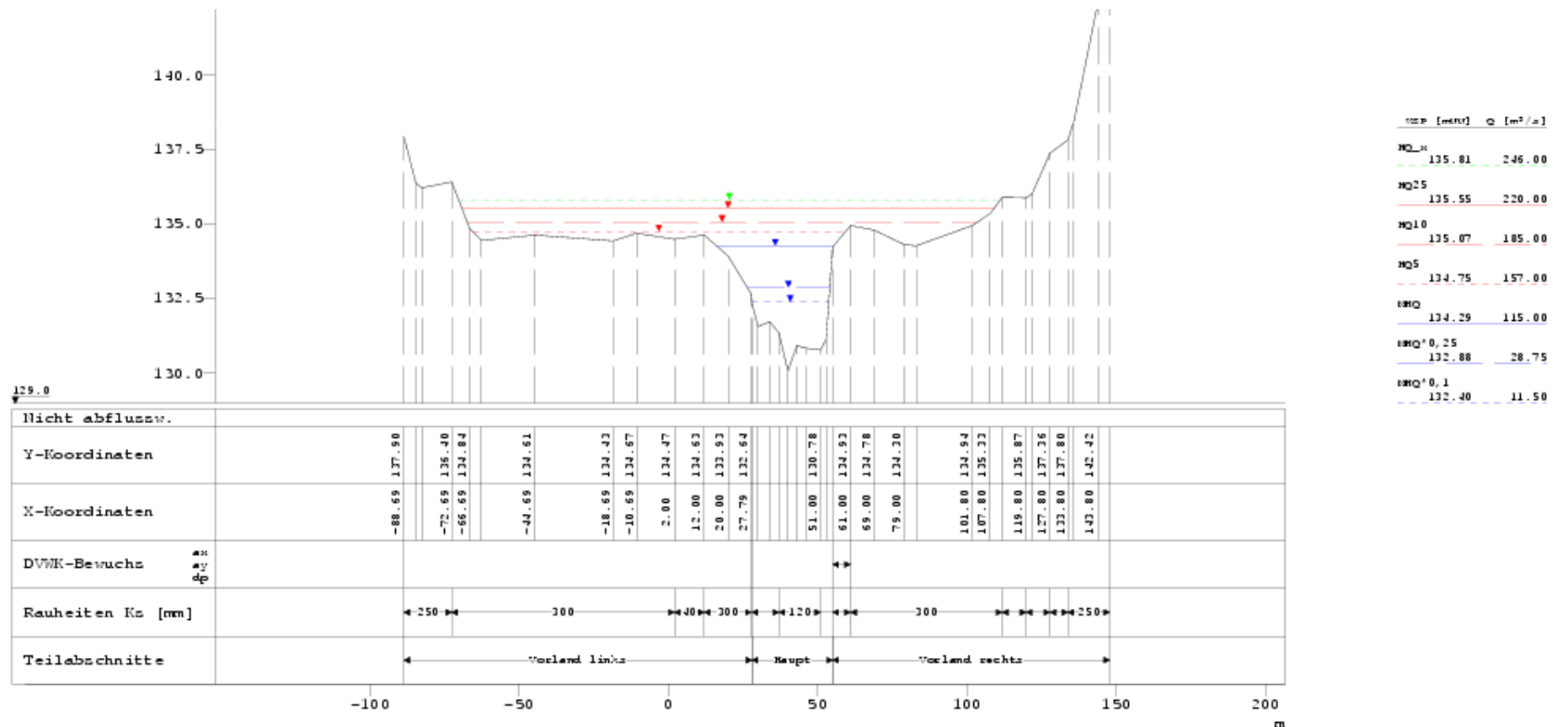
2. Zuverlässige Datenbereitstellung: Für die hydrologischen Verfahren sind Angaben zu den mittleren Gerinnegeometrien für jede berücksichtigte Teilstrecke erforderlich. Dabei ist besonders eine möglichst präzise Erfassung des Übergangs zwischen dem Hauptbett und den Vorländern für die Berechnung der Retention wichtig.

Aber auch die Breite des Hauptbetts und der Vorländern sind von Bedeutung. Dabei müssen für jede Gewässerteilstrecke die für das Translations- und Retentionsverhalten repräsentativen Angaben gefunden werden.

Neben den Querprofilangaben sind auch noch die Rauigkeitsbeiwerte für die hydrologischen Verfahren vorzugeben.

Übernahme von dV/dQ-Beziehungen

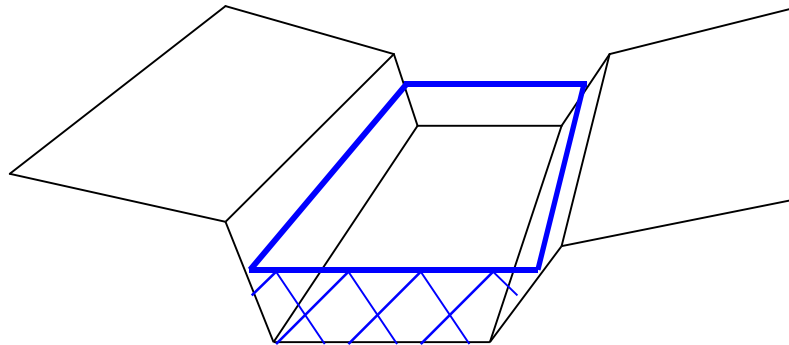
- Verbesserung der Ergebnisse der hydrologischen Flood-Routing-Verfahren auf der Seite der Datenbereitstellung: bei Vorliegen eines hydraulischen Flood-Routing-Modells Übernahme von Ergebnissen aus dem hydraulischen Modell (1D- oder 2D-Modell) in das hydrologische Modell.
- Voraussetzung: stationäre Spiegellagenberechnungen durch das hydraulische Modell, die das gesamte zu erwartende Abflussspektrum abdecken



Übernahme von dV/dQ-Beziehungen

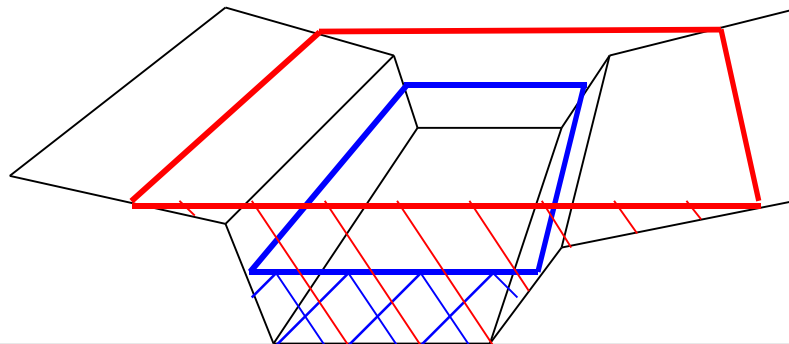
- Ausgehend von den mit den hydraulischen Modellen berechneten Wasser-spiegellinien kann für jede Fließstrecke eine Abfluss-Volumen-Beziehung aufgestellt werden, d.h. einem bestimmten Abfluss in der Fließstrecke ist ein entsprechendes Volumen zugeordnet.

Abfluss Q_1 und Fläche A_1 (mit Volumen V_1 und mittl. Fliesstiefe h_1)



$$\frac{dV}{dQ} = \frac{V_2 - V_1}{Q_2 - Q_1}$$

Abfluss Q_2 mit Fläche A_2 (mit Volumen V_2 und mittl. Fliesstiefe h_2)



Übernahme von dV/dQ -Beziehungen

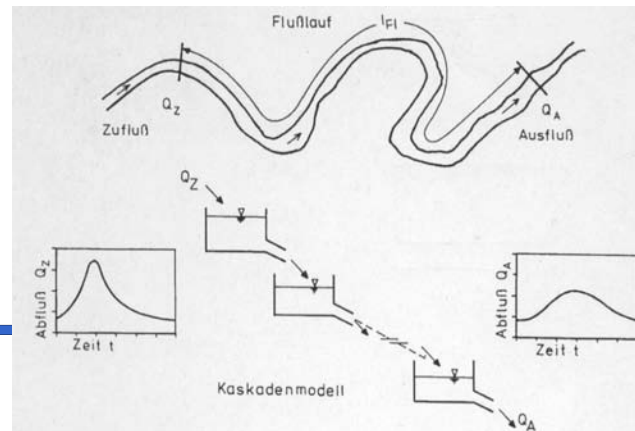
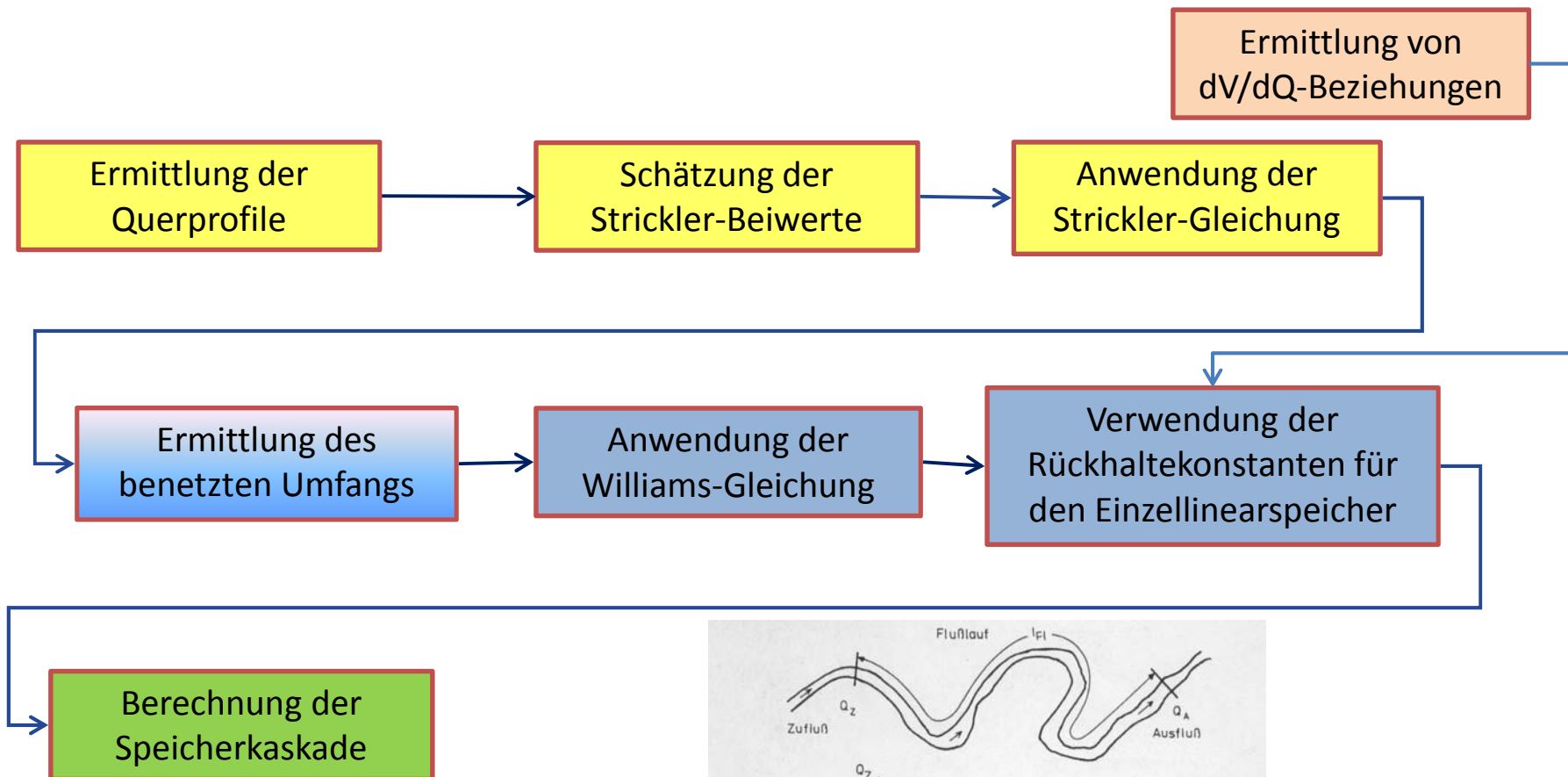
- Die dV/dQ -Beziehungen haben den Vorteil, dass die Informationen aus den vermessenen Querprofilen, die Ausuferungseffekte und die Wirkung der Rauigkeiten bereits in dem hydraulischen Modell berücksichtigt worden sind.
- Somit sind diese Informationen auch in den dV/dQ -Beziehungen enthalten.
- Dem hydrologischen Modell sind keine Angaben mehr zu den Querprofilen bereitzustellen und auch die Notwendigkeit von Rauigkeitsangaben entfällt.

Übernahme von dV/dQ -Beziehungen

- Das Verhältnis zwischen der Volumensänderung in der Teilstrecke dV und der zugehörigen Abflussänderung dQ hat die Dimension der Zeit und entspricht der Rückhaltekonzstante der Kontinuitätsgleichung.
- Verändert sich somit in einer Fließstrecke der Abfluss um einen verhältnismäßig geringen Betrag, während das Volumen dagegen sehr stark zunimmt (z.B. bei Ausuferung in die Vorländer), so ist die Rückhaltekonzstante entsprechend groß. Somit bleibt das Wasser in der Fließstrecke länger gespeichert.
- Diese Rückhaltekonzstante $RK = dV/dQ$ kann direkt in der Gleichung des Einzellinearspeichers verwendet werden.
- Die Rückhaltekonzstante für die Berechnung mit dem Einzelspeicher wird für jede Fließstrecke und für jeden Abflussbereich getrennt betrachtet.

Berechnung des Wellenablaufs

- Zusammenfassung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM:



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit !

Literatur

- Baumgartner A. & Liebscher H.-J. (1998): Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. - 2. Auflage. Gebrüder Bornträger
- Besbes M. (2006) : Recharge des aquifères par les crues d'oueds. – Congrès « Frontiers in flood research », Kovacs Colloquium, Paris, France, vol. 305, p. 43-72
- BLfU (2012): <http://www.lfu.bayern.de>
- Disse (2009): Vorlesungsunterlagen. – Universität der Bundeswehr München
- Ehret (2009): Hydrologie II für Umweltingenieure. - Institut für Wasser und Umwelt, Fachgebiet für Hydrologie und Flussgebietsmanagement, Technische Universität München. -
- Hoefsloot F., Immerzeel W.W., Pakes U. en Veen R.v.d. (1999): GIS and SOBEK modelling. A manual for constructing schematisations. RIZA, GEODAN, RIZA werkdokument 99.121X, 75 S., Lelystad.
- Maniak U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. - 5. bearb. u. erw. Auflage, Springer Berlin
- NLWKN (2005) : Hochwasserschutz in Niedersachsen. - Oberirdische Gewässer Band 23, Niedersächsischer Landesbetrieb für Wasserwirtschaft, Küsten- und Naturschutz Betriebsstelle Hannover-Hildesheim
- Ostrowski (2009): Skript Ingenieurhydrologie 1. – Technische Universität Darmstadt
- Patt H. (2001) (Hrsg.): Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. – Springerverlag
- Rutschmann (2009): Vorlesungsunterlagen Numerische Modelle. - Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München. –
- Ven Te Chow, Maidment D.R., Mays L.W. (1988): Applied Hydrology. – McGraw Hill College