

## **Berechnung der Abflusskonzentration und des Wellenablaufs in LARSIM**

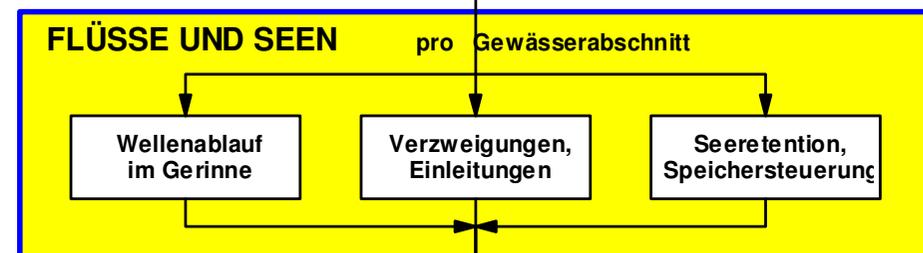
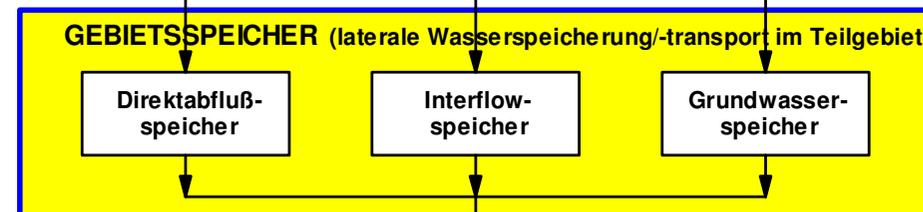
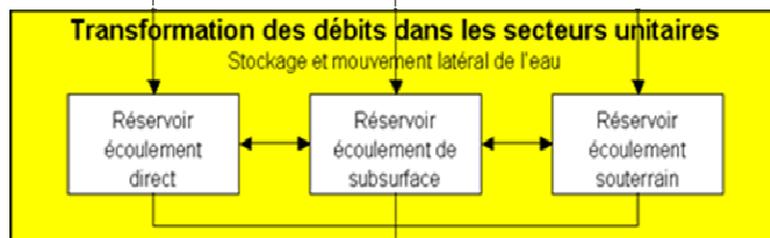
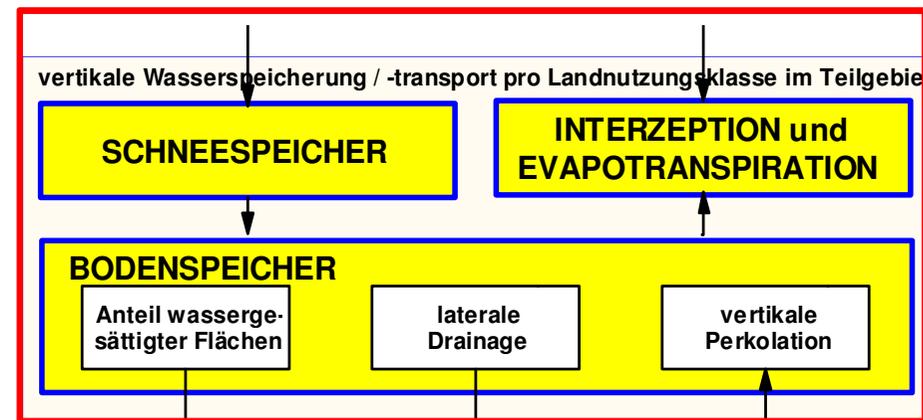
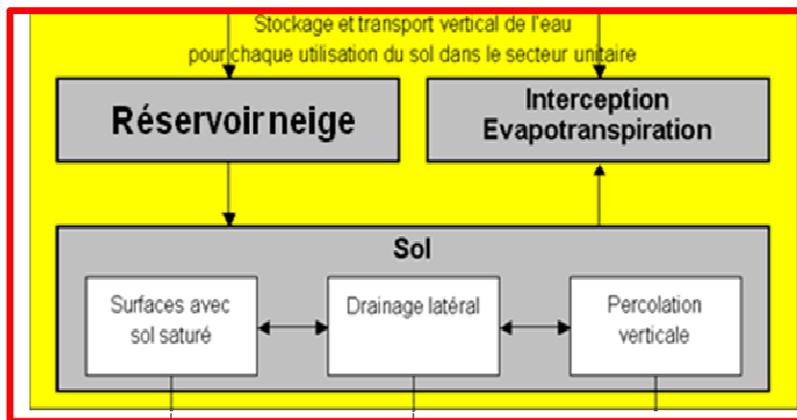
**Kai Gerlinger**

HYDRON Ingenieurgesellschaft für  
Umwelt und Wasserwirtschaft mbH

März 2012

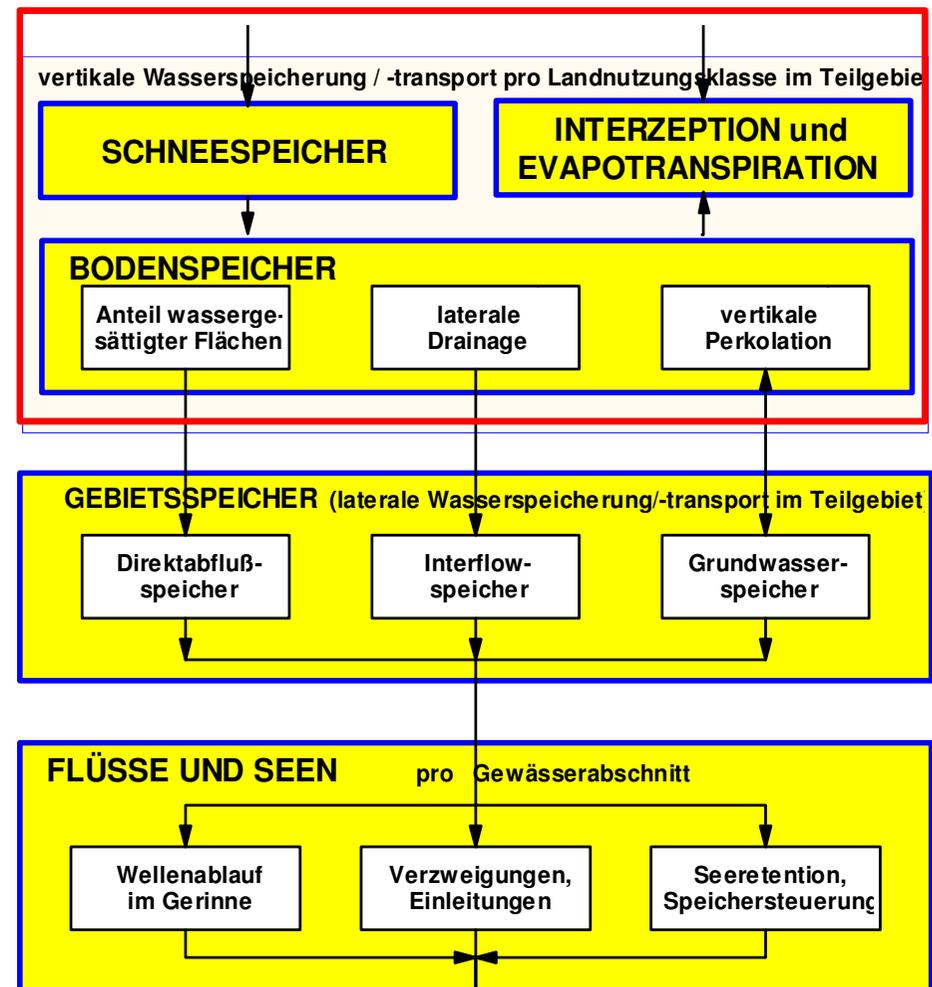
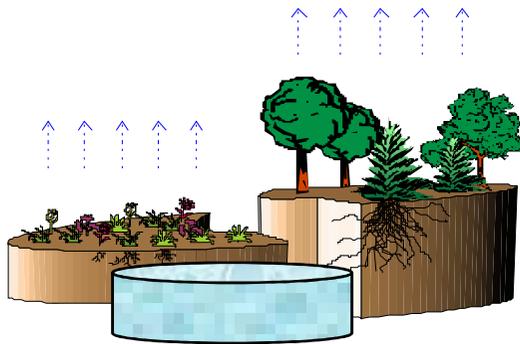
# Berechnung der Abflussbildung

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



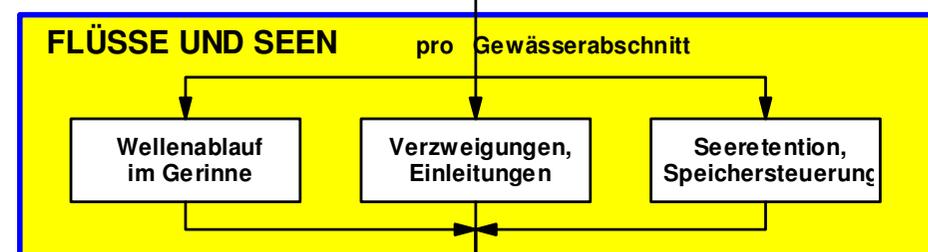
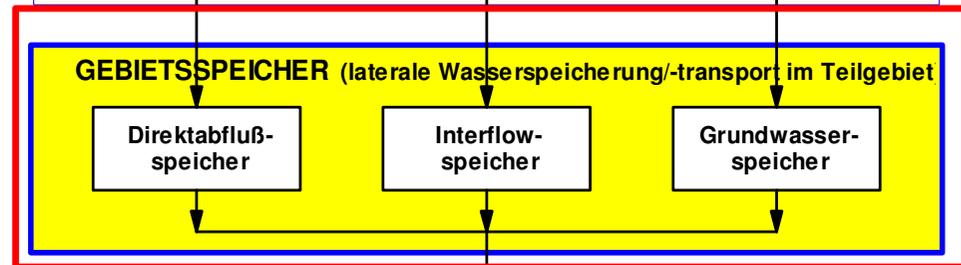
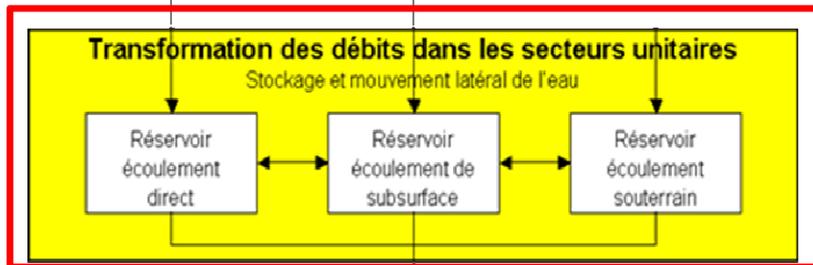
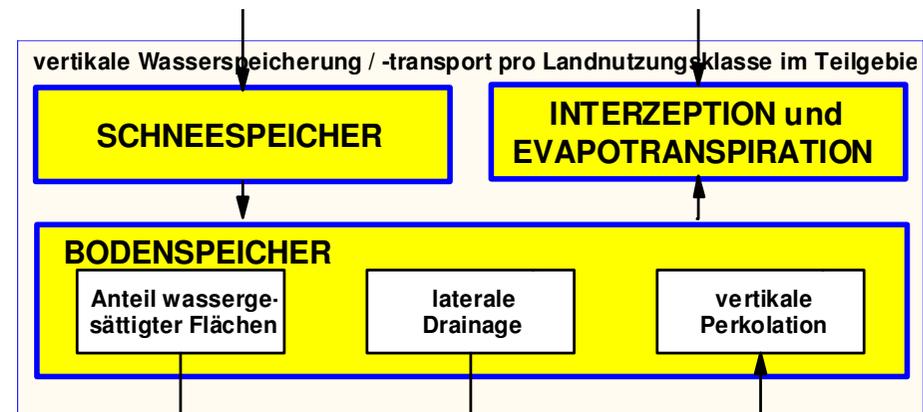
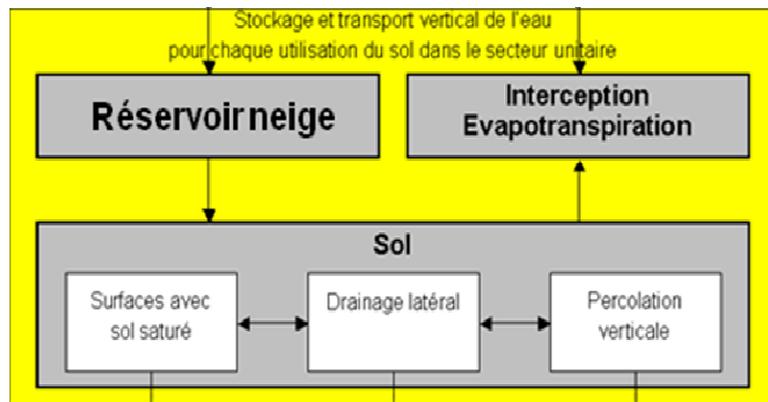
# Berechnung der Abflussbildung

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



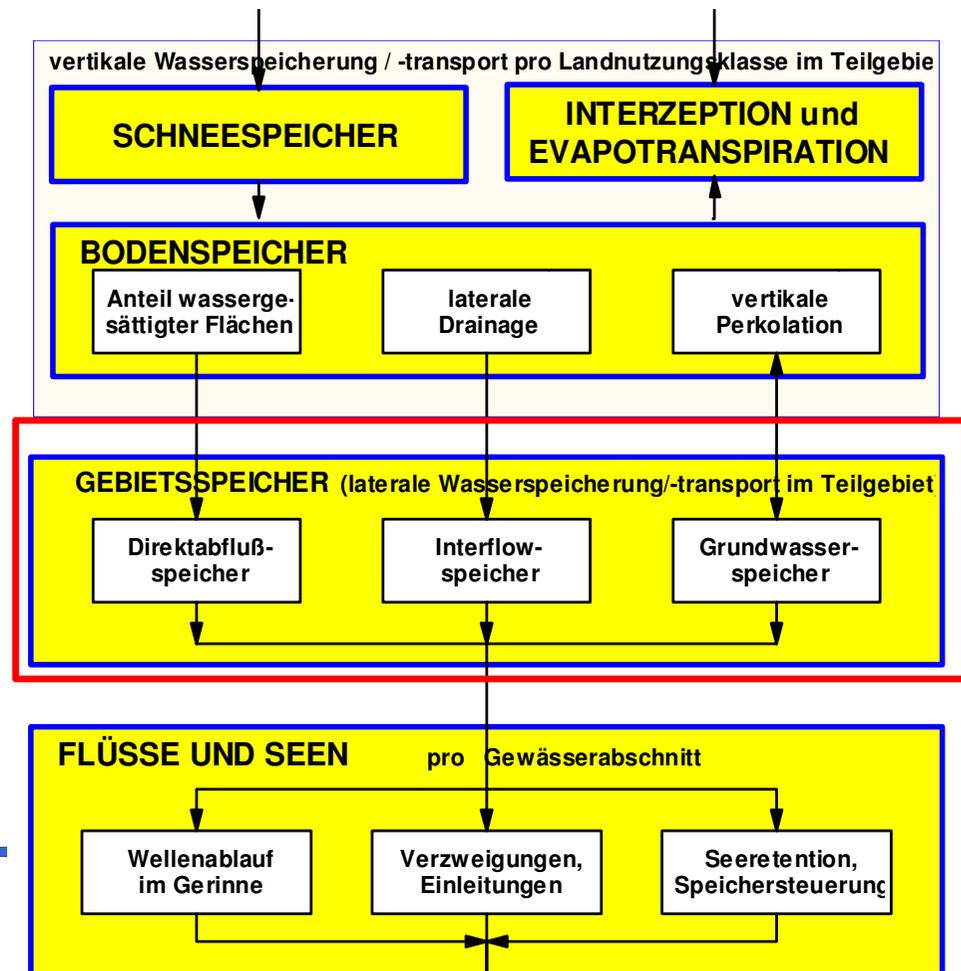
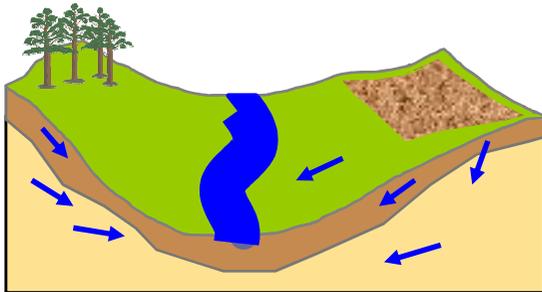
# Berechnung der Abflussbildung

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



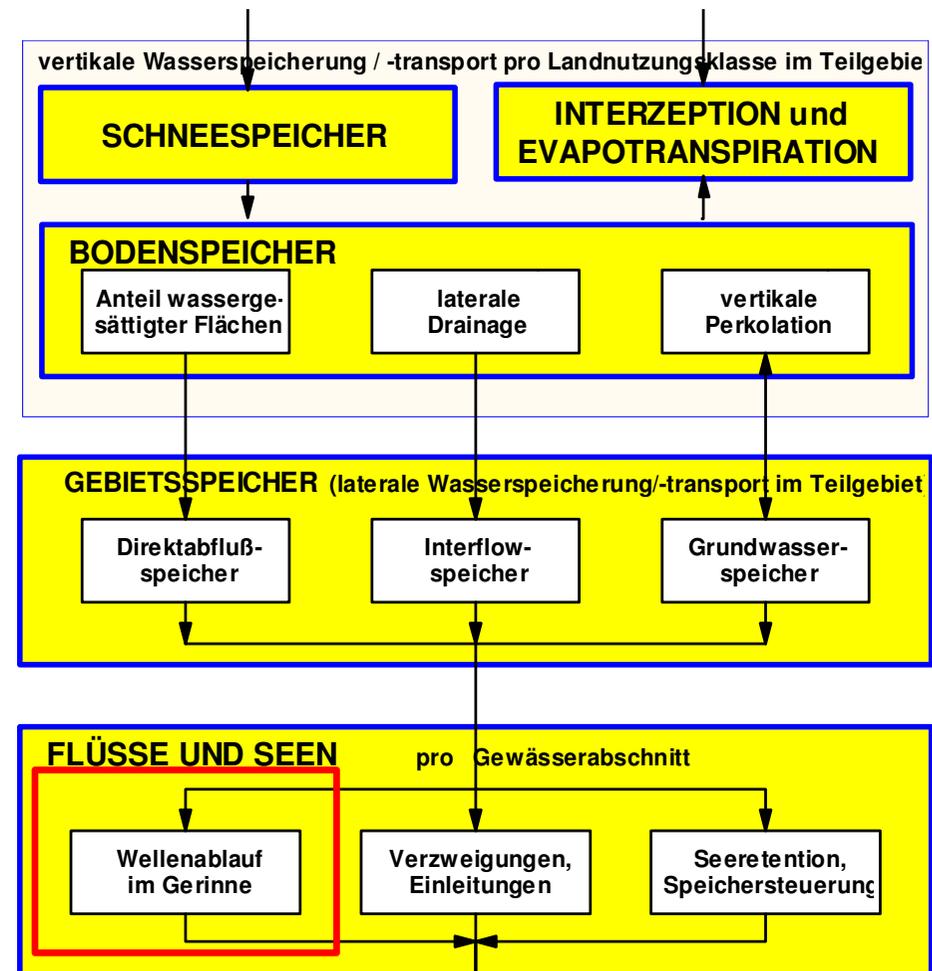
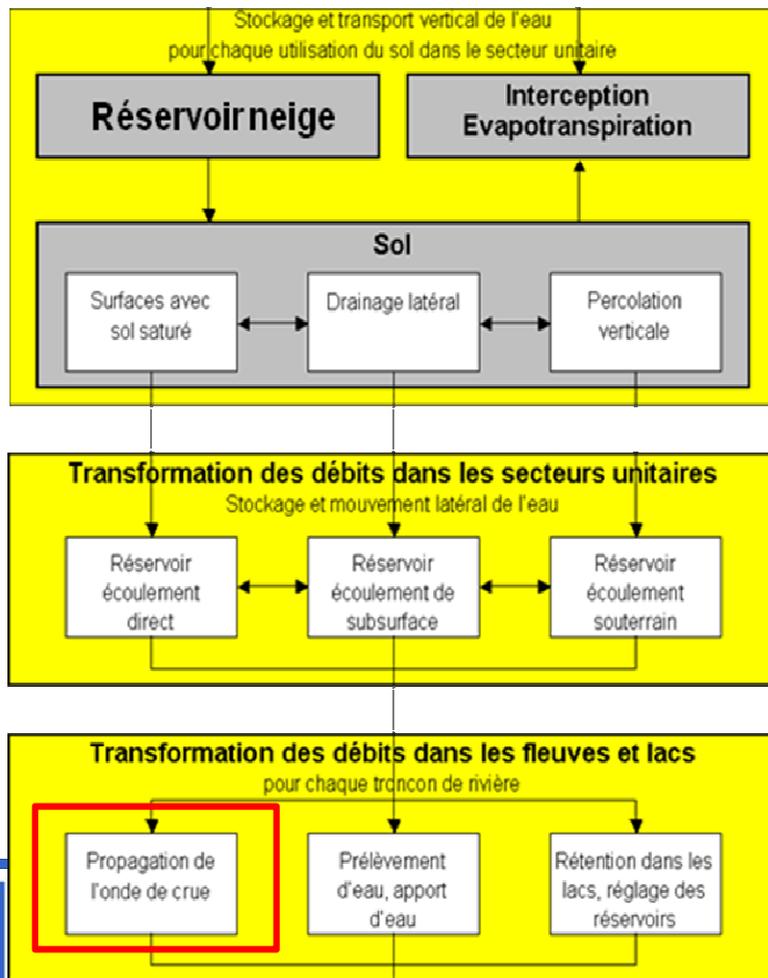
# Berechnung der Abflussbildung

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



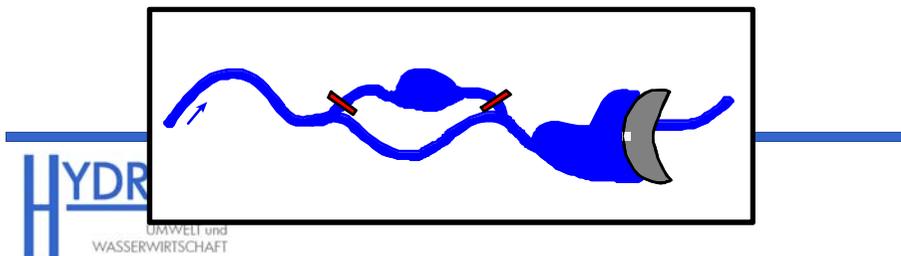
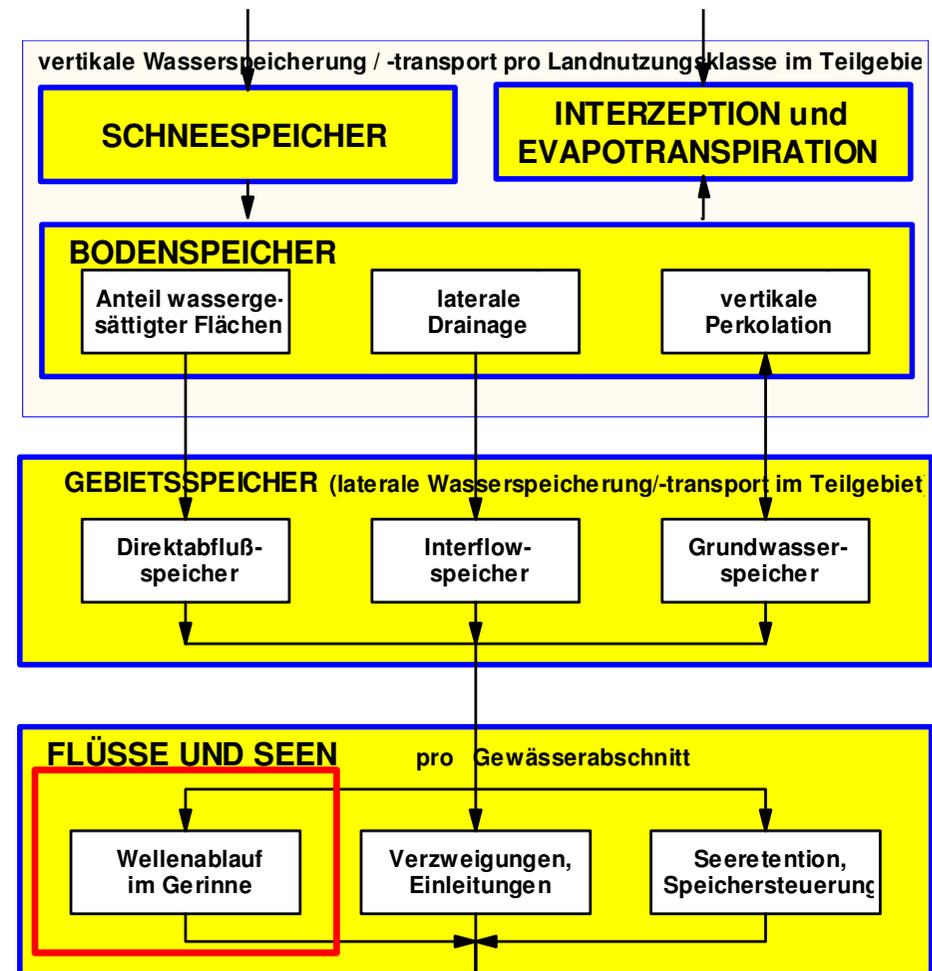
# Berechnung der Abflussbildung

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



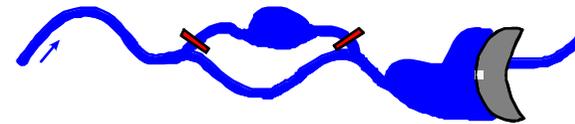
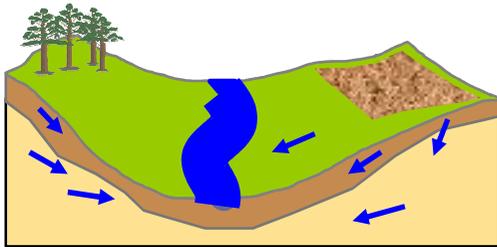
# Berechnung der Abflussbildung

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

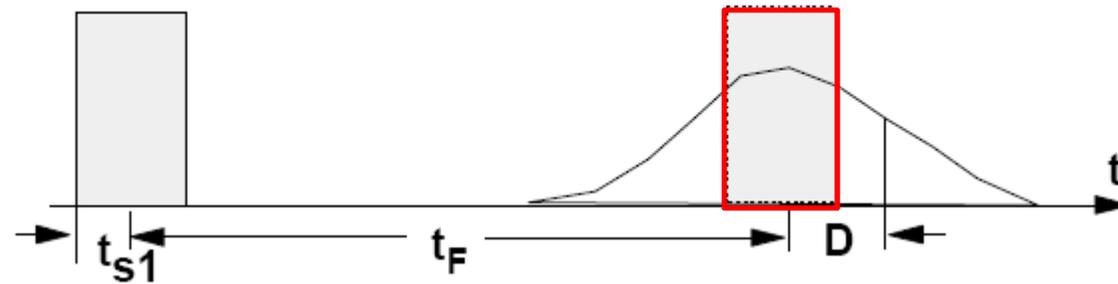


# Translation und Retention

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



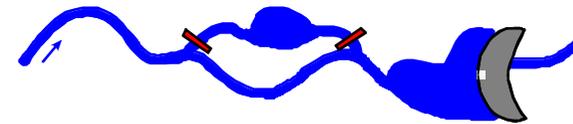
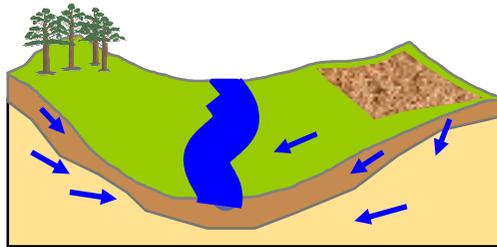
Translation



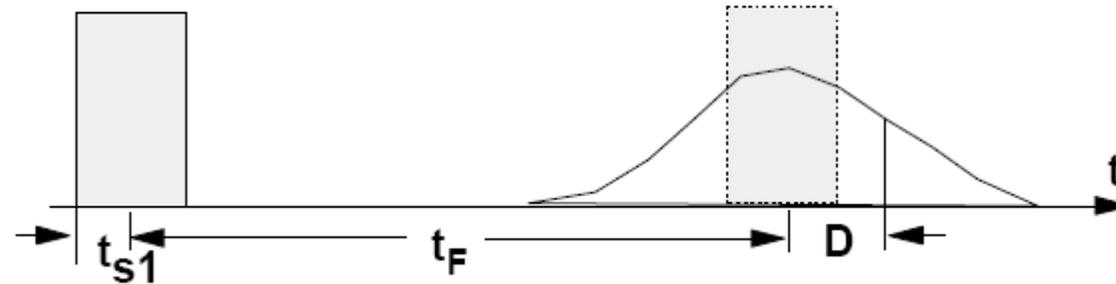
Disse (2009)

# Translation und Retention

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



Translation

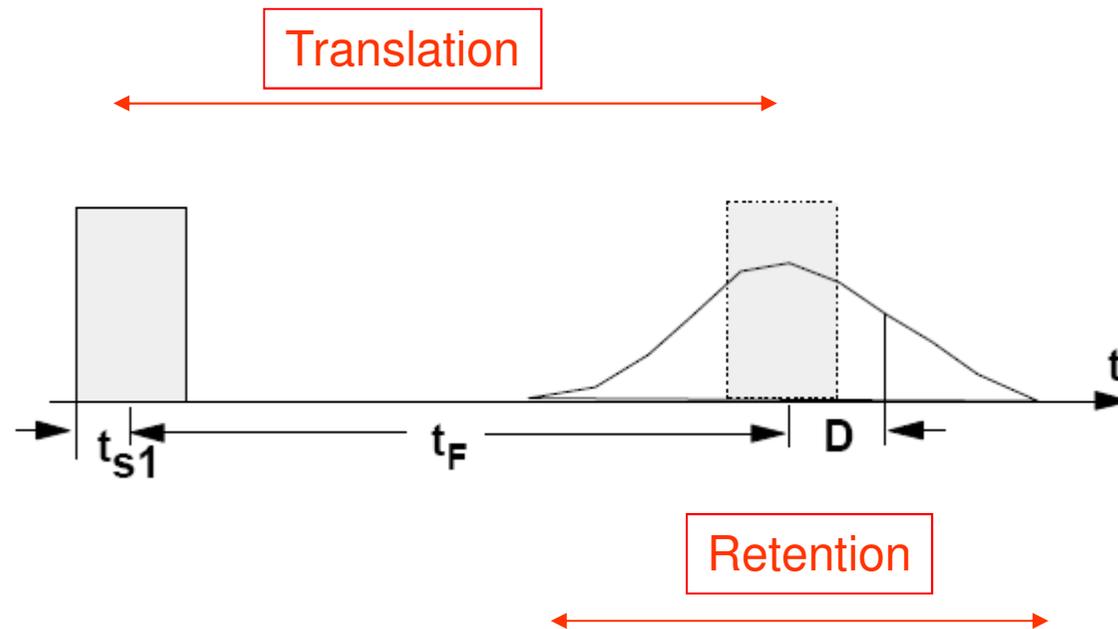


Disse (2009)

Retention

# Translation und Retention

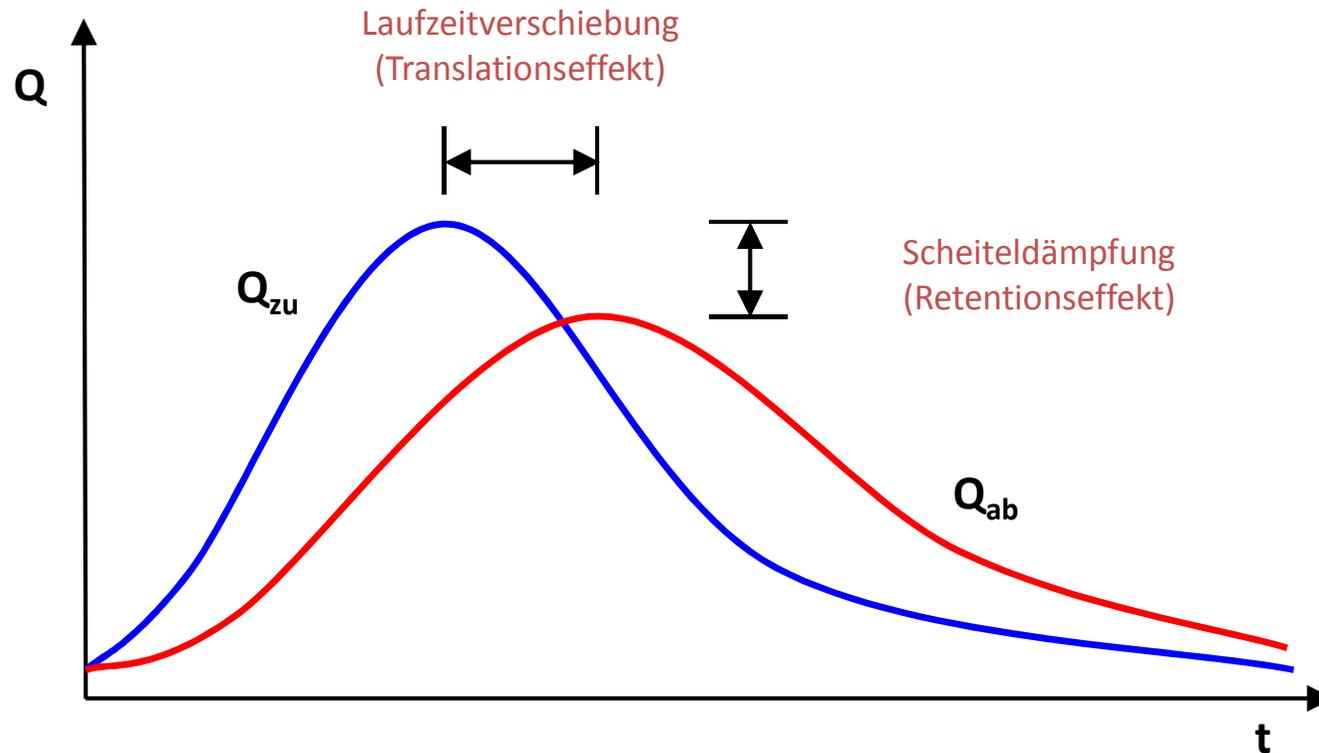
- Berücksichtigung der durch den Transport des Wassers in der Fläche und im Gerinne bedingten Translation und der Retention (Dispersion).
- Die Verformung des Abflusses wird durch das Rückhaltevermögen des Teilgebiets und des Flussabschnitts bedingt.



Disse (2009)

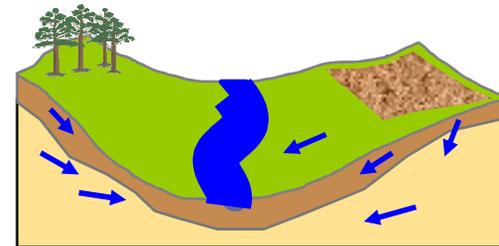
# Translation und Retention

- 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.



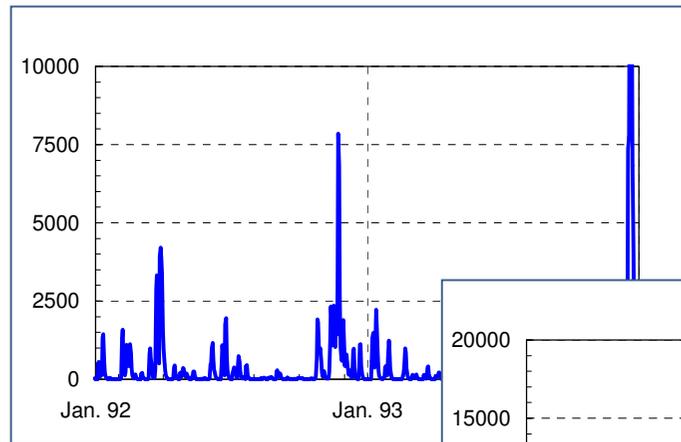
# Abflusskonzentration

- 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 Gebietspeicher für Direktabfluss, Interflow und Basisabfluss zu (pro Teilgebiet).
- Diese sind als obere bzw. tiefere Bodenschicht sowie als Grundwasserspeicher interpretierbar.

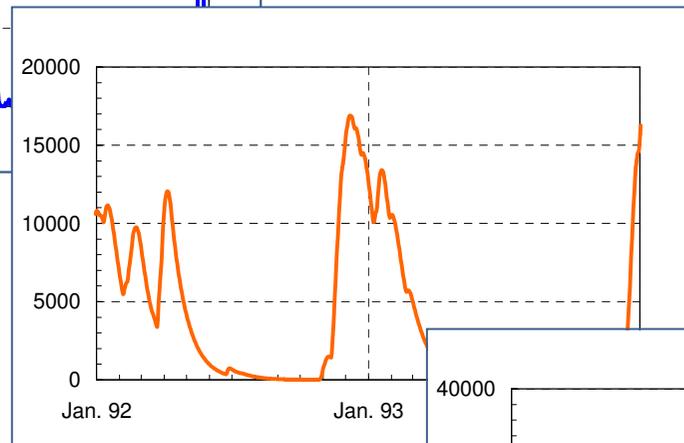
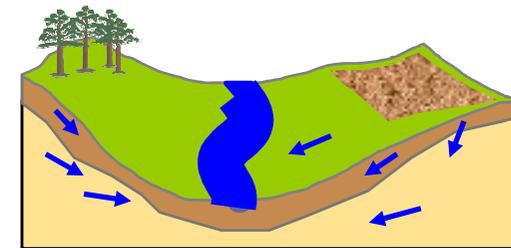


# Abflusskonzentration

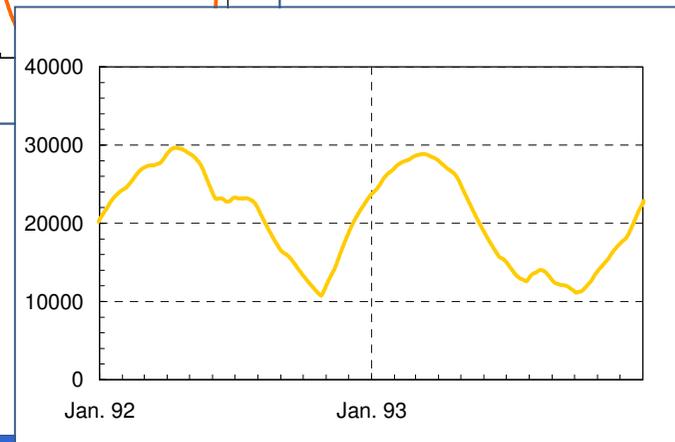
- Wasserspeicherung in der Fläche durch die drei Gebietspeicher:



Reaktionszeit:  
Stunden bis Tage



Tage bis Wochen

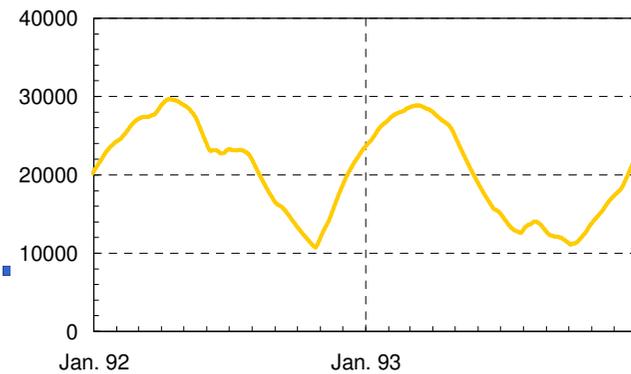
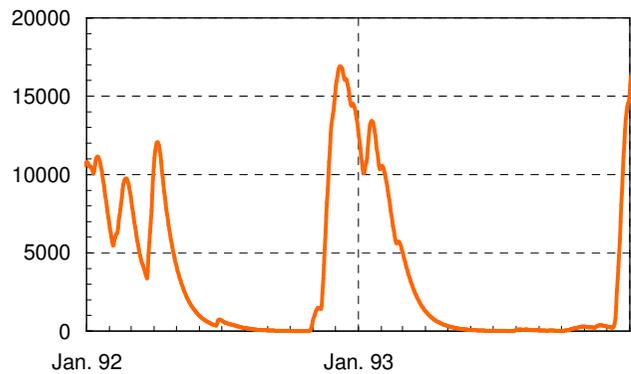
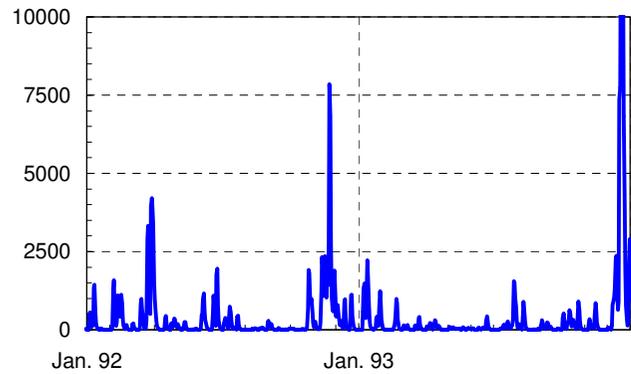


Monate  
bis Jahre

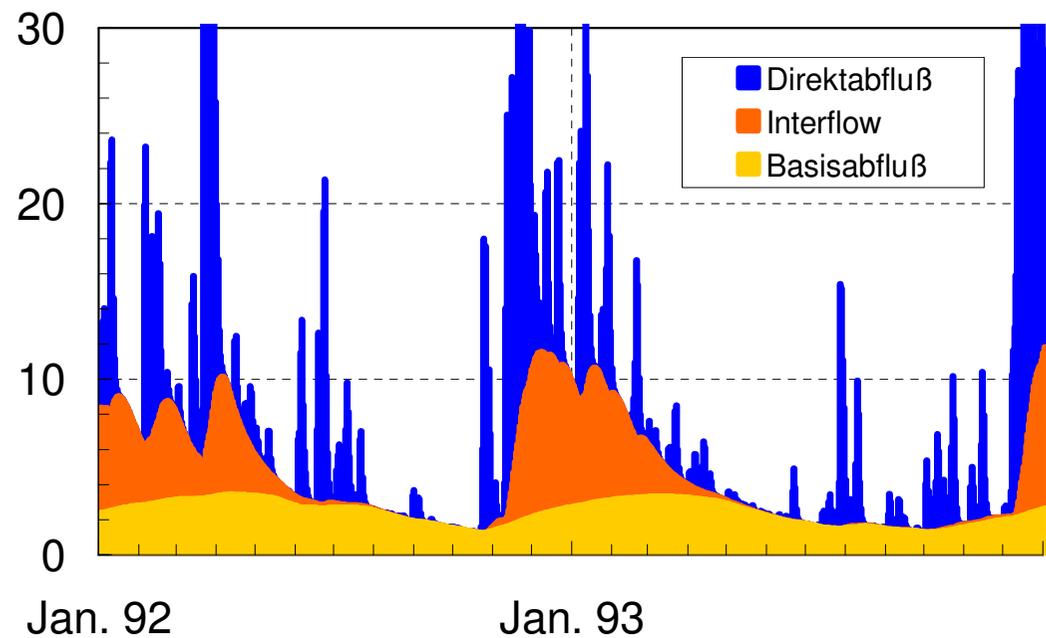
# Abflusskonzentration

- 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]

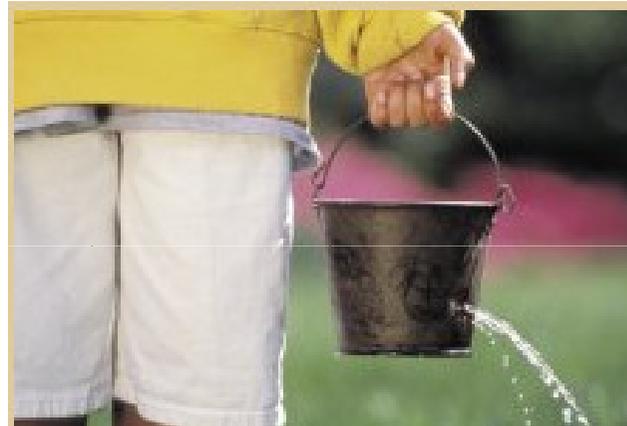
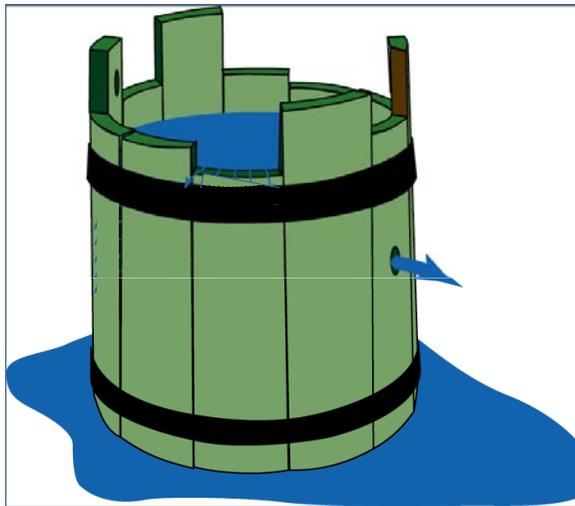


# Einzellinearspeicher

- Die Gebietspeicher werden jeweils als Einzellinearspeicher behandelt.

# Einzellinearspeicher

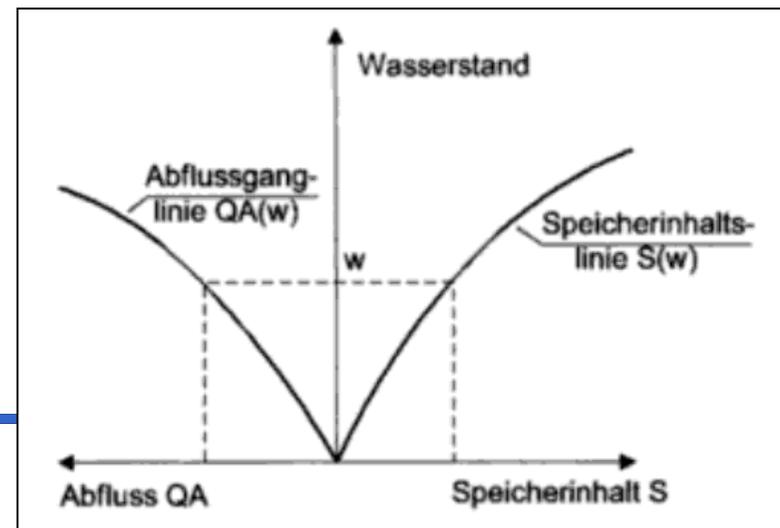
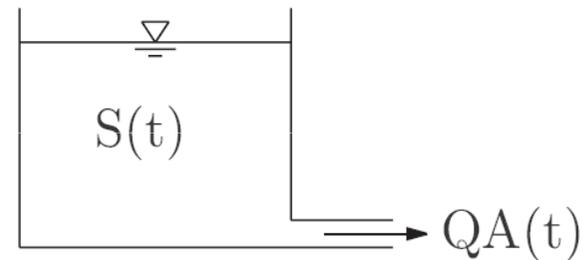
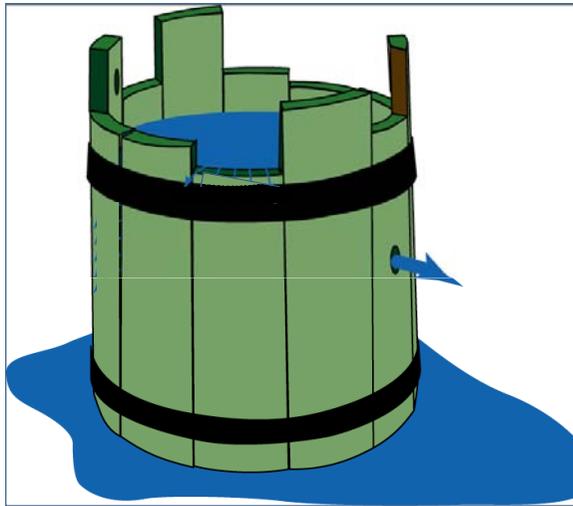
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



Welche Beziehung besteht zwischen Ausfluss  $Q_A$  und Speicherinhalt  $S$  ?

# Einzellinearspeicher

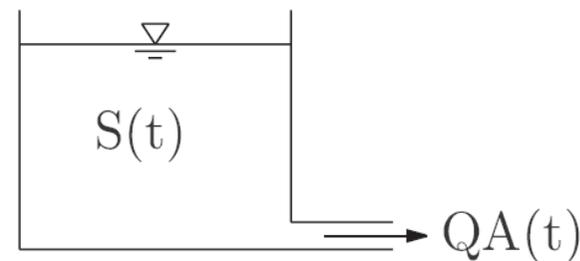
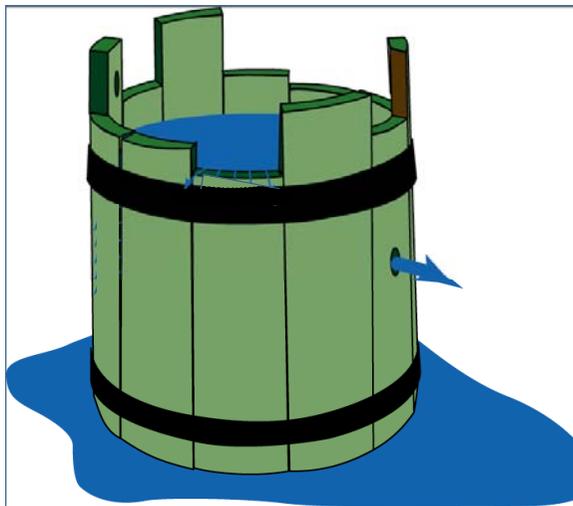
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



Patt (2001)

# Einzellinearspeicher

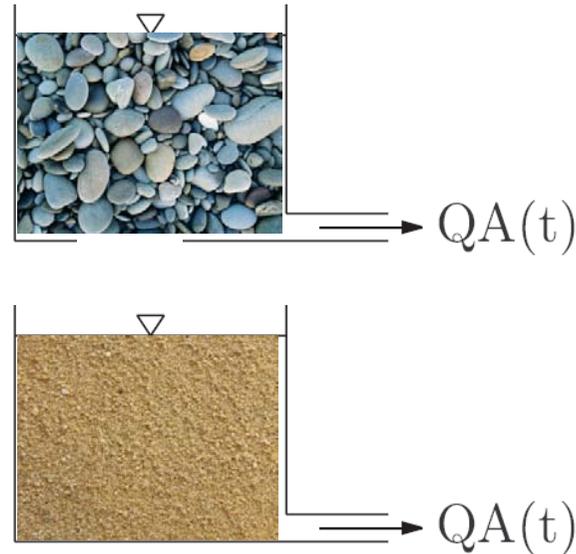
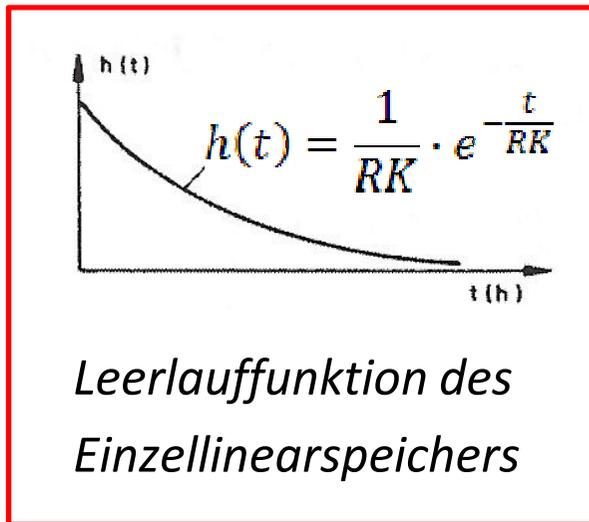
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



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

# Einzellinearspeicher

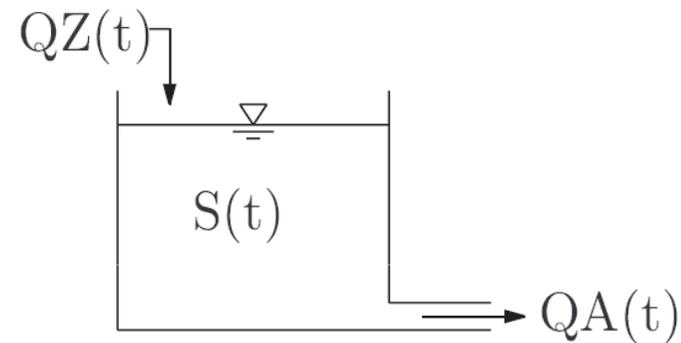
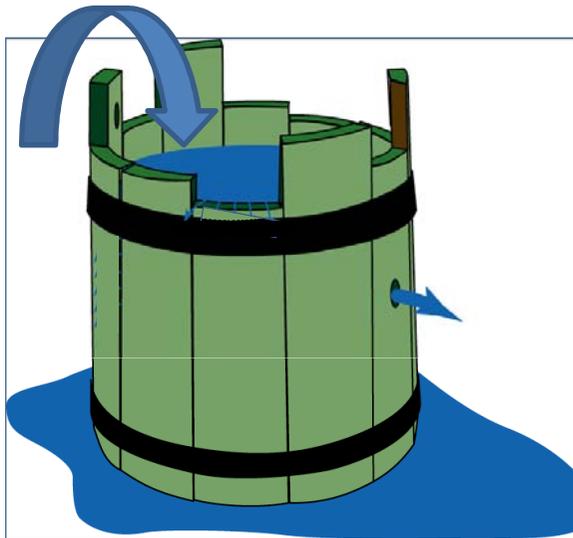
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



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

# Einzellinearspeicher

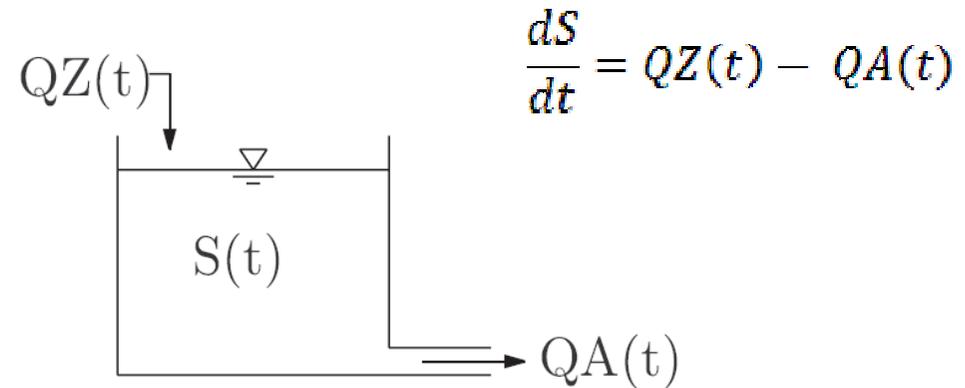
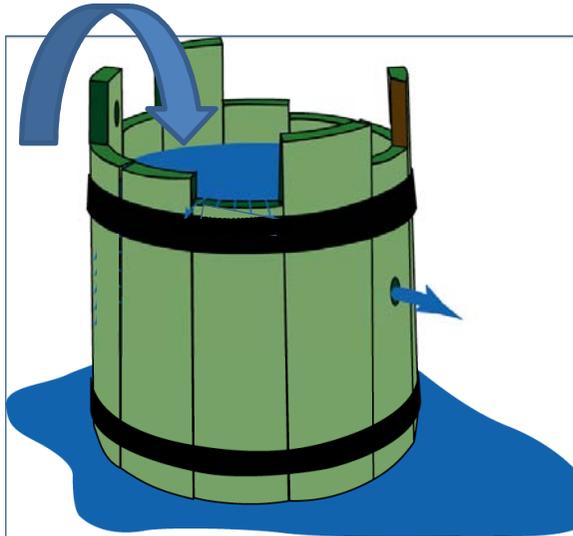
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



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

# Einzellinearspeicher

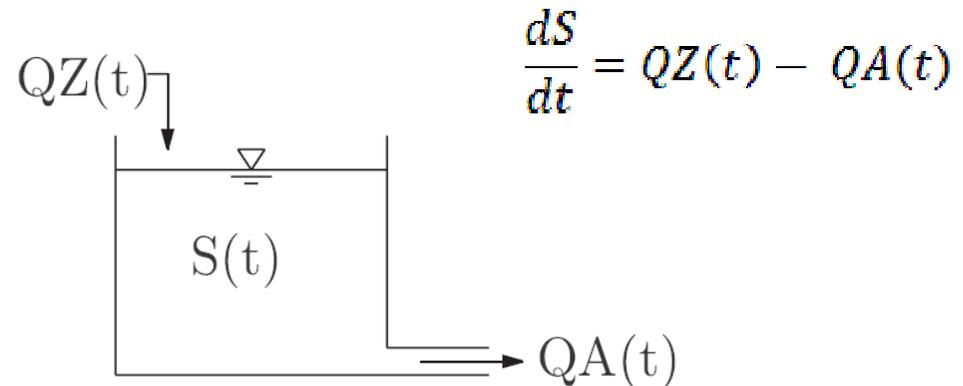
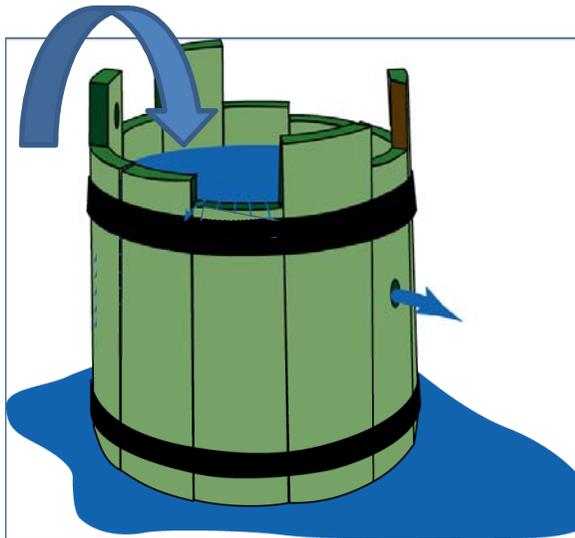
- Hydraulisches Analogon zum Einzellinearspeicher: Gefäß mit Ausfluss



- 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



$$\frac{dS}{dt} = QZ(t) - QA(t)$$

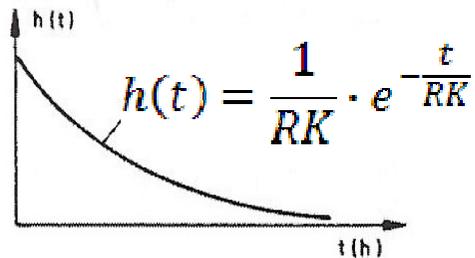
- Kontinuitätsgleichung:  $QA(t) = QZ(t) - \frac{dS}{dt}$

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

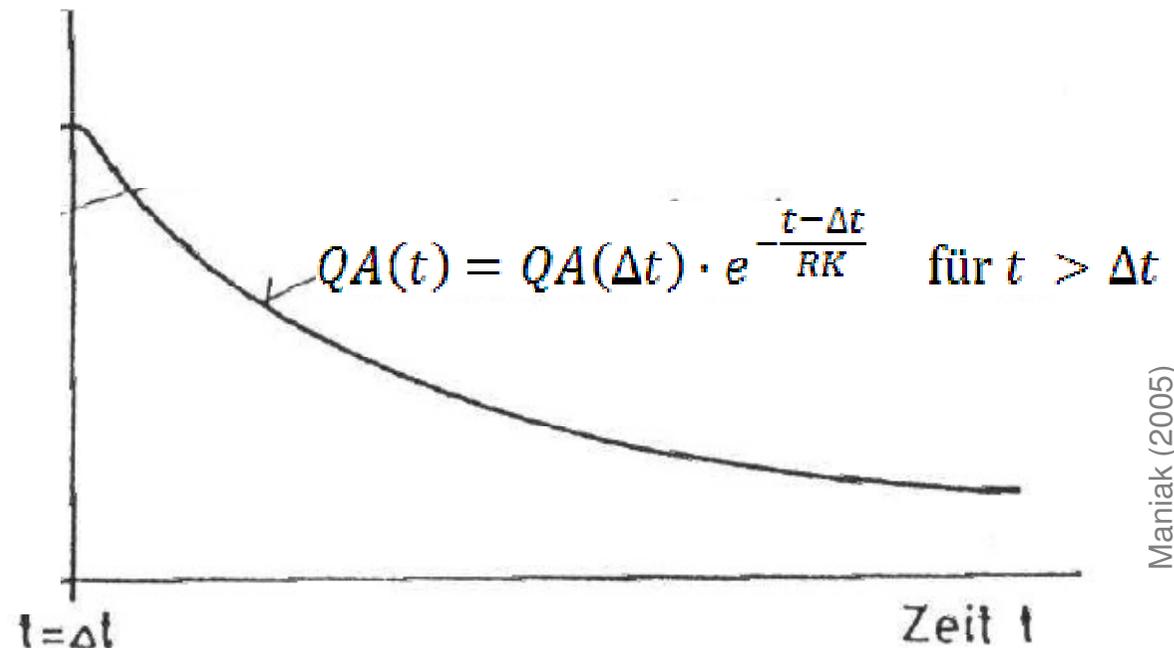
*Differentialgleichung des Einzellinearspeichers*

# Einzellinearspeicher

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



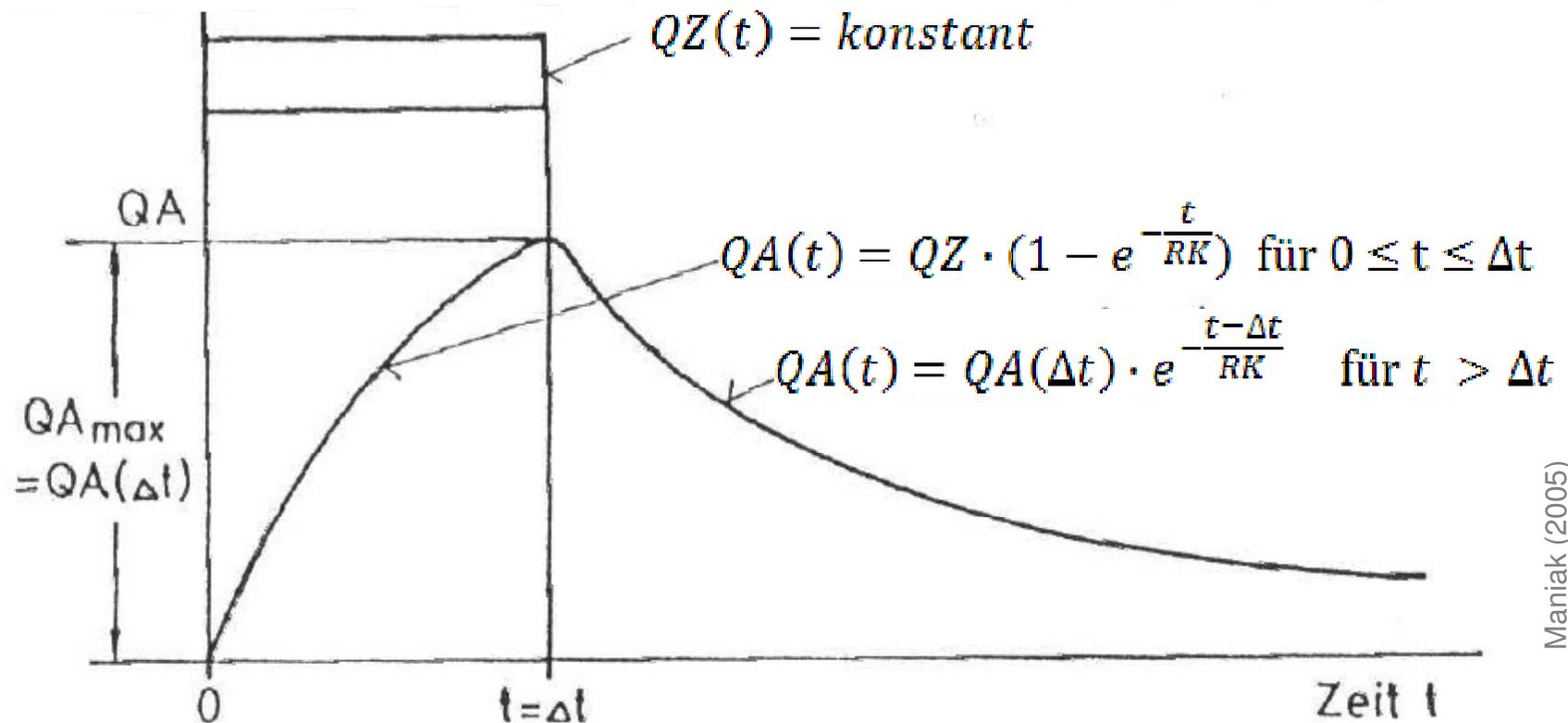
Leerlauf-funktion des  
Einzellinearspeichers



Maniak (2005)

# Einzellinearspeicher

- Lösung der Differentialgleichung des Einzellinearspeichers: Abfluss  $QA$  aus einem linearen Einzelspeicher bei konstantem Zufluss  $QZ$  im Zeitintervall  $dt$



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  $\Delta t$  und diskreter Zu- und Abflusswerte. Der mittlere Zufluss QZ und der mittlere Abfluss QA während eines Zeitintervalls  $\Delta t$  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:

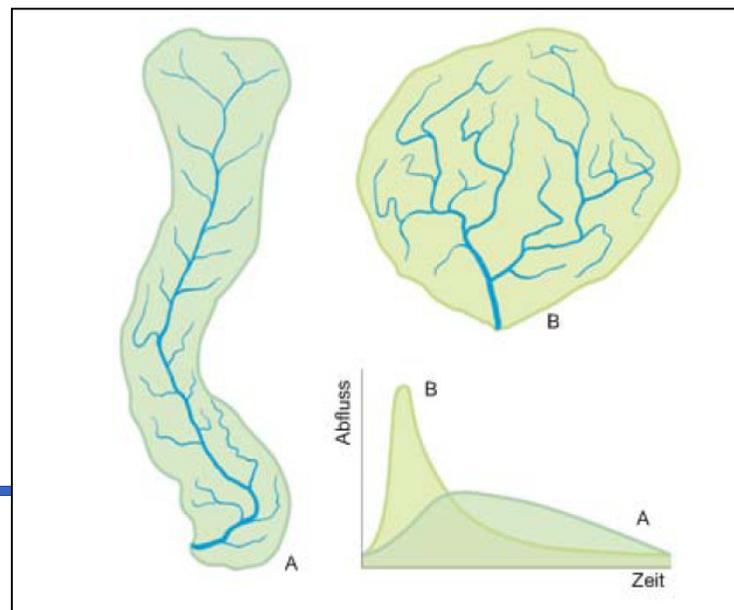
$$QA_i = QZ_i \left( 1 - \frac{RK_i}{TA} \left( 1 - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) \right) + QZ_{i-1} \left( \frac{RK_i}{TA} \left( 1 - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) - e^{-\frac{TA}{RK_i}} \right) + QA_{i-1} \cdot e^{-\frac{TA}{RK_i}}$$

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

# Abflusskonzentration

Bestimmung der Rückhaltekonstanten für die Gebietspeicher:

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



Nach Baumgartner & Liebscher (1990)

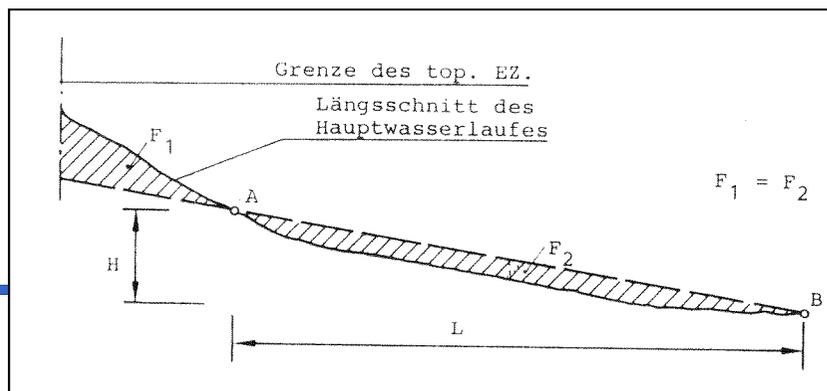
# Abflusskonzentration

Bestimmung der Rückhaltekonstanten für die Gebietspeicher:

- 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
$\Delta H$	[m]	Mittlere Höhendifferenz für die Hauptwasserläufe im Teilgebiet



*Hauptwasserlauf:  
nicht Hauptvorfluter !*

# Abflusskonzentration

Bestimmung der Rückhaltekonstanten für die Gebietspeicher:

- Die Rückhaltekonstante für die Gebietspeicher 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] Rückhaltekonstante für den Direktabfluss

$EQ_D$  [-] Kalibrierungsparameter für die Rückhaltekonstante Direktabfluss

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

$RK_I$  [s] Rückhaltekonstante für den Interflow

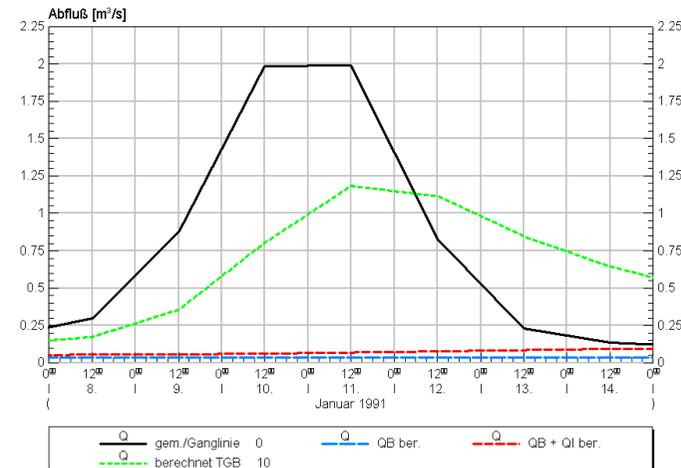
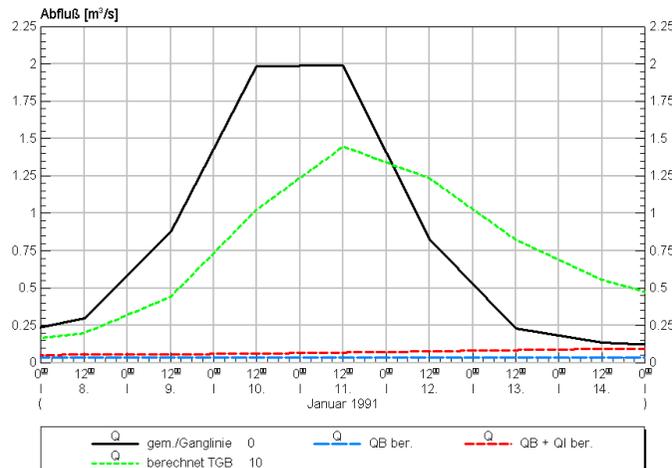
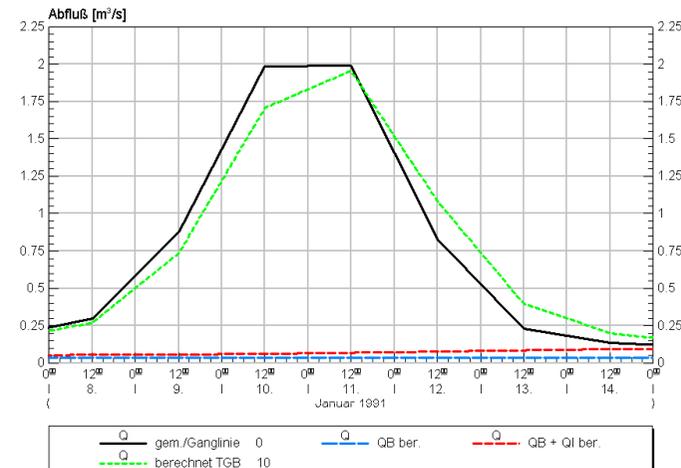
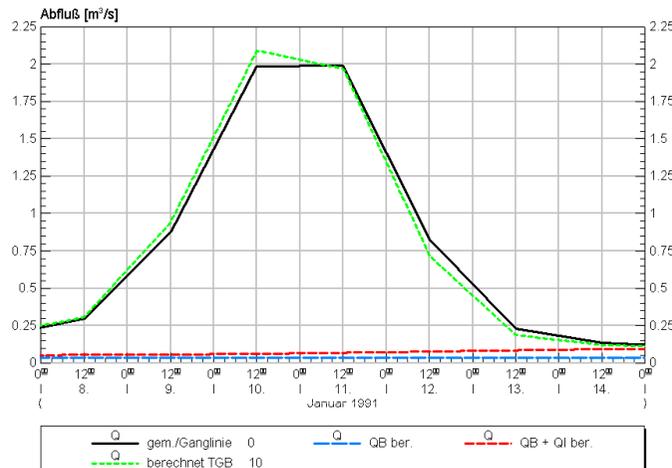
$EQ_I$  [-] Kalibrierungsparameter für die Rückhaltekonstante Interflow

$RK_G$  [s] Rückhaltekonstante für den Grundwasserabfluss

$EQ_G$  [-] Kalibrierungsparameter für die Rückhaltekonstante Grundwasserabfluss

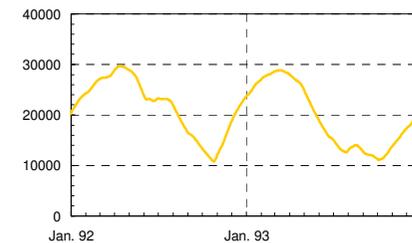
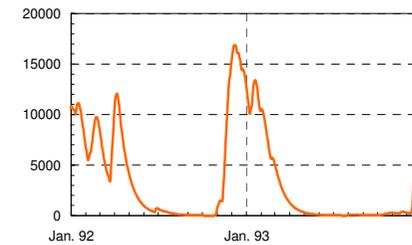
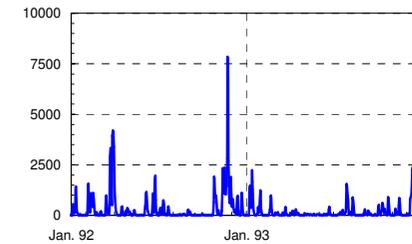
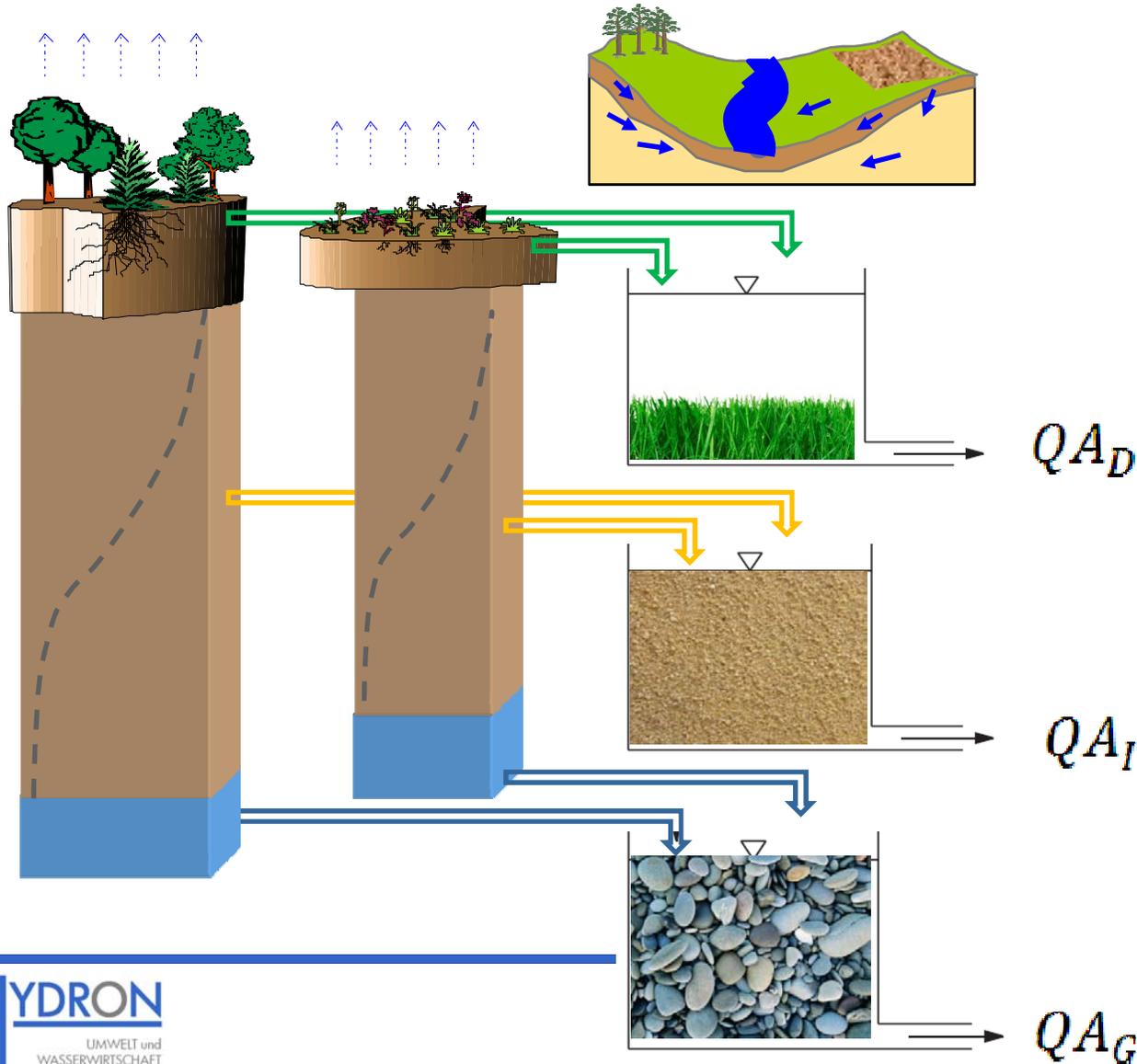
# Abflusskonzentration

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



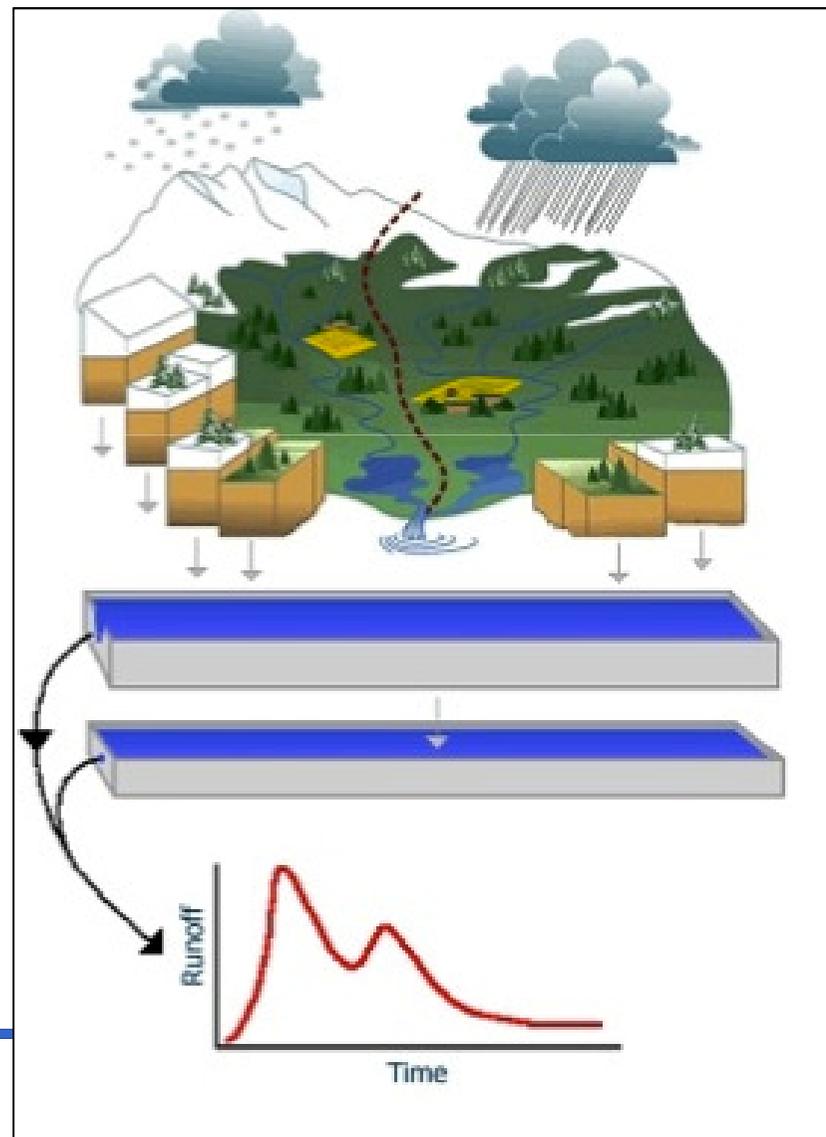
# Abflusskonzentration

Zusammenfassung der Berechnung der Abflusskonzentration:



# Abflusskonzentration

Zusammenfassung der Berechnung der Abflusskonzentration:

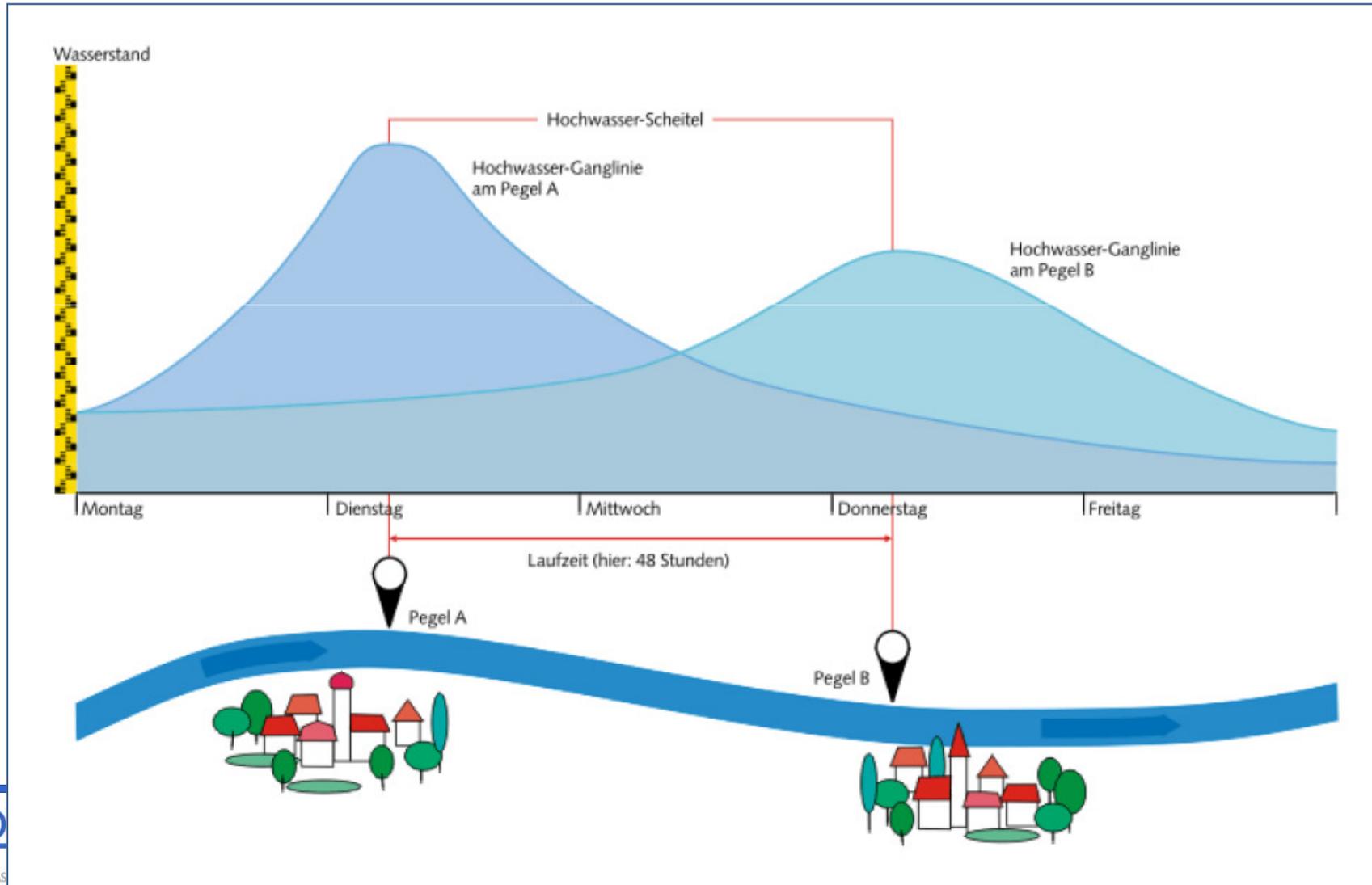


Nach Lindstrom (1997)

# Berechnung des Wellenablaufs

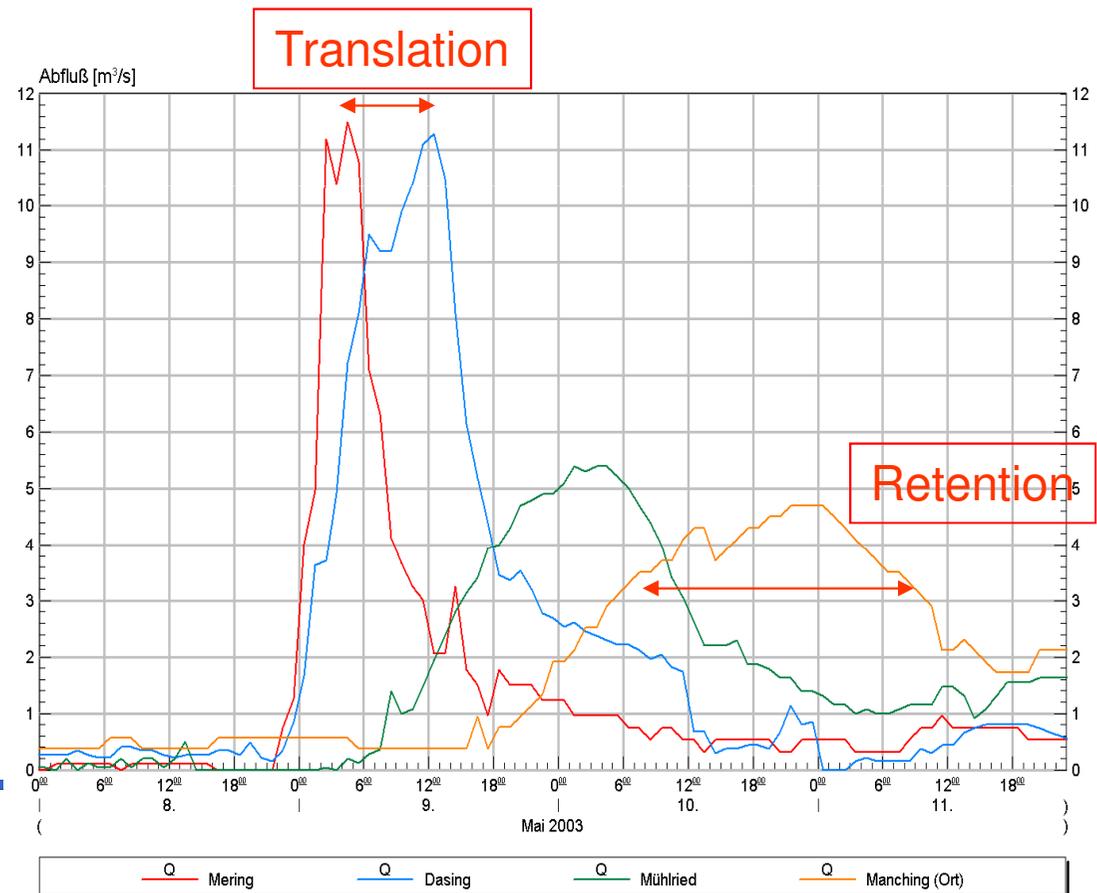
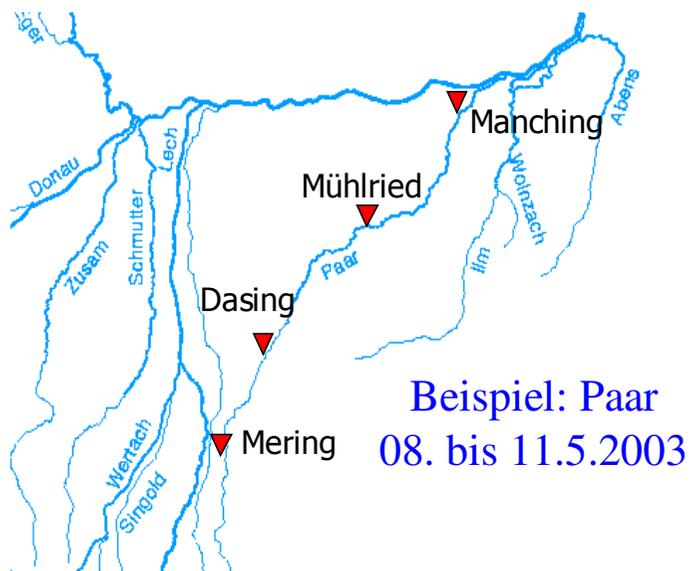
# Translation und Retention im Gerinne

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



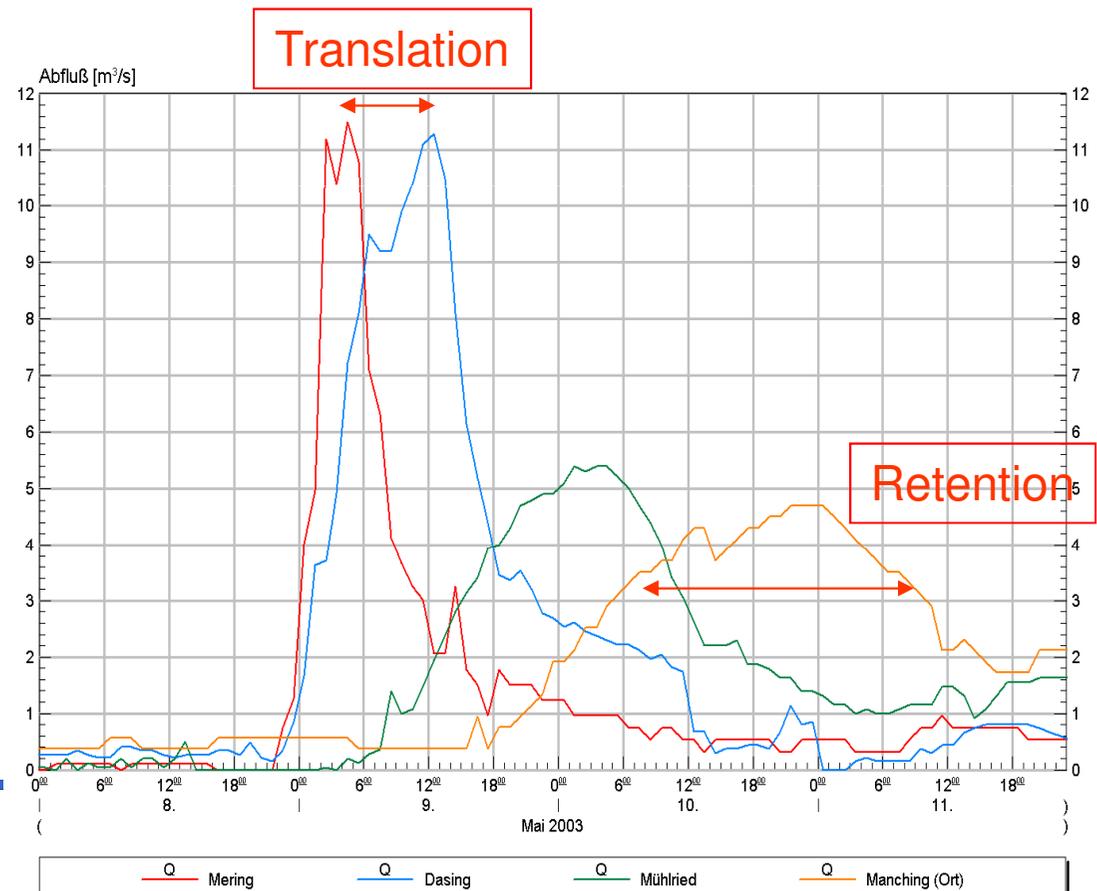
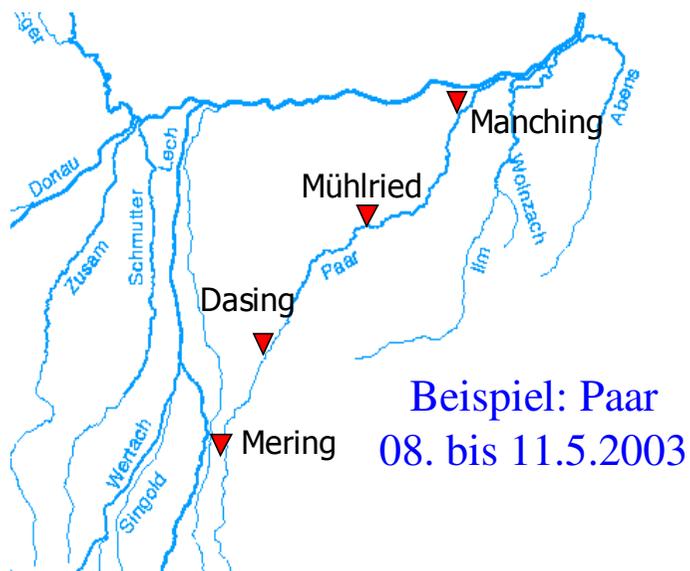
# Translation und Retention im Gerinne

- 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.

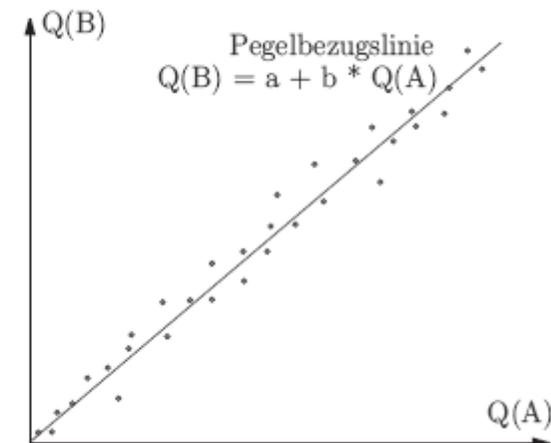
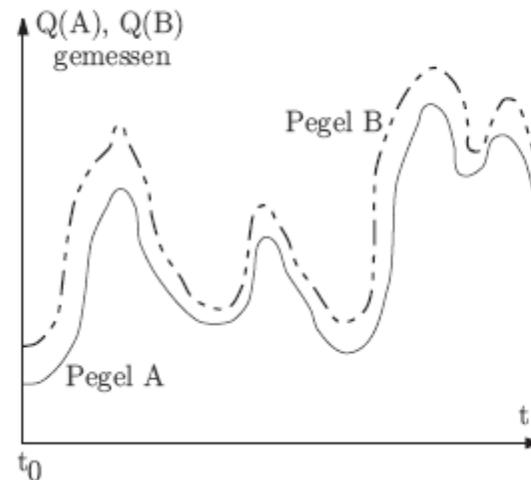
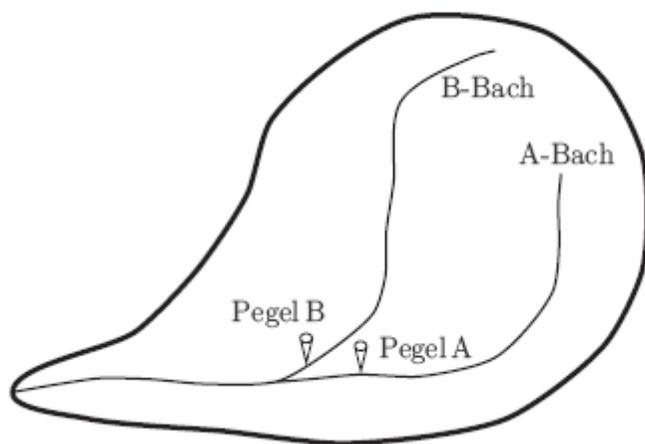


# Translation und Retention im Gerinne

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

# Stochastische Methoden

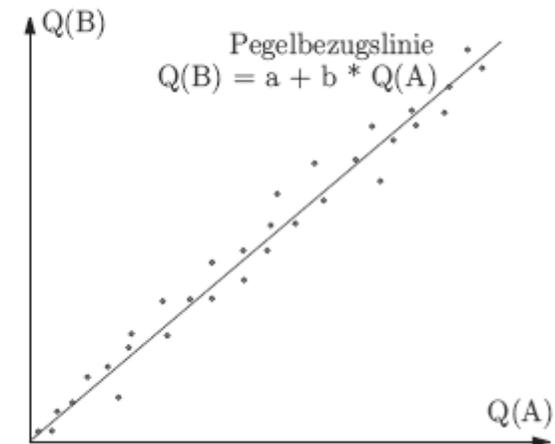
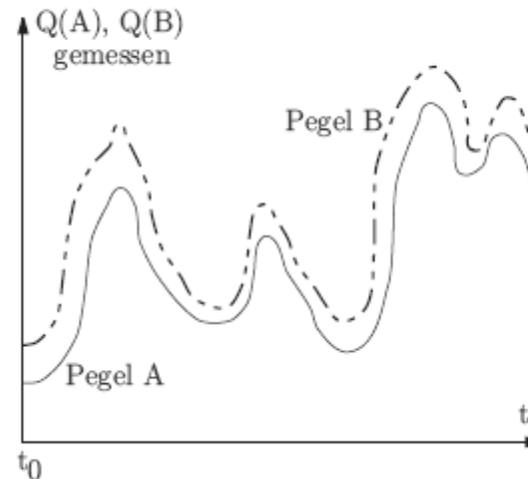
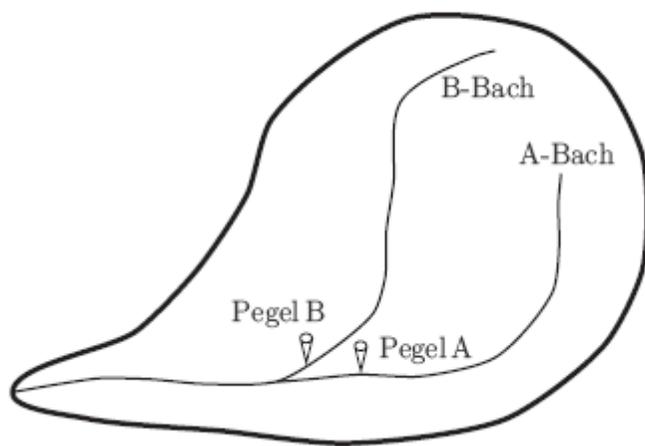
- Stochastische Verfahren:  
Basieren auf statistischen Beziehungen zwischen Zeitreihen, z.B.
  - Pegelbezugslinienverfahren



Ostrowski (2009)

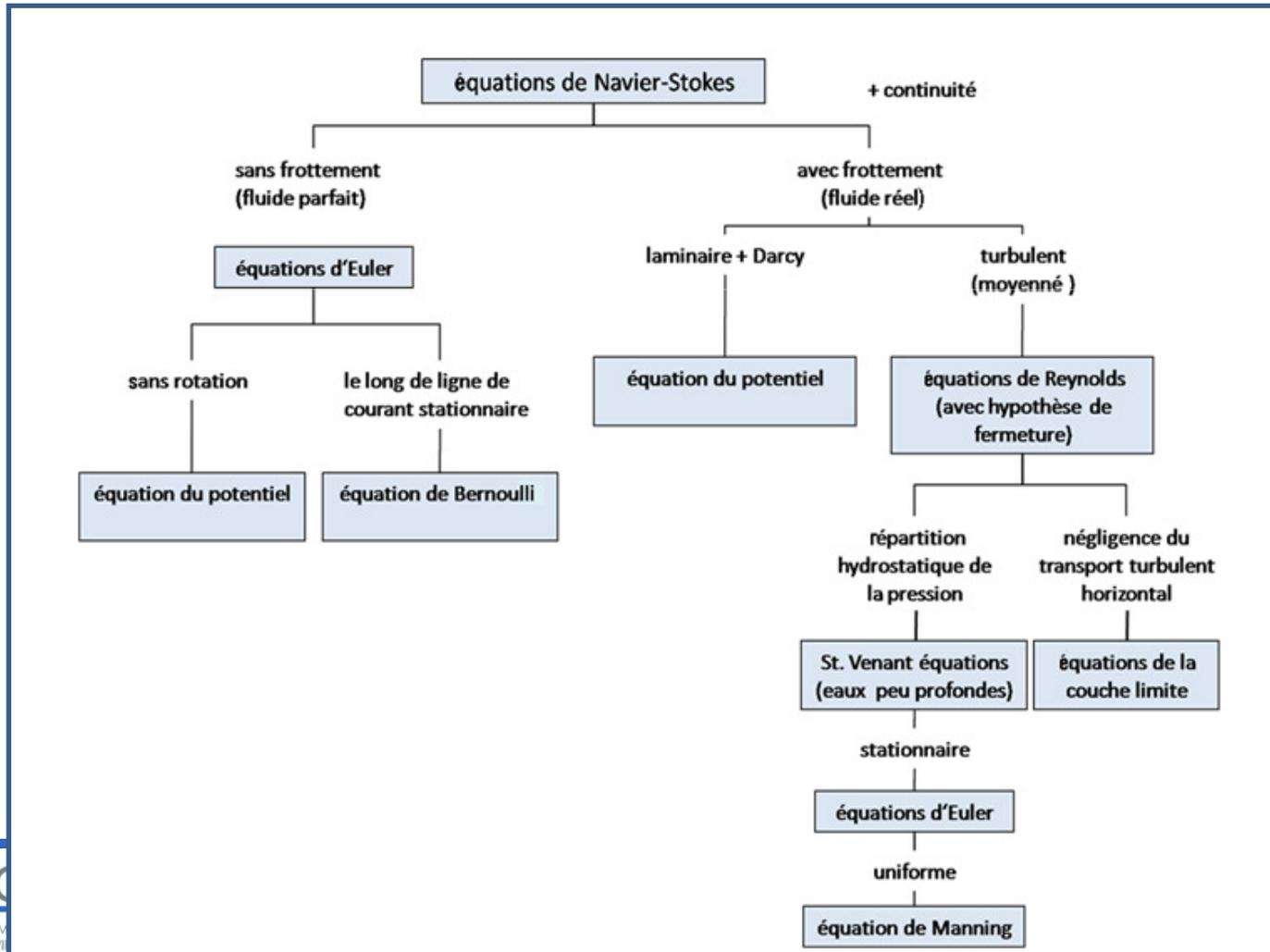
# Stochastische Methoden

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



# Navier-Stokes-Gleichungen

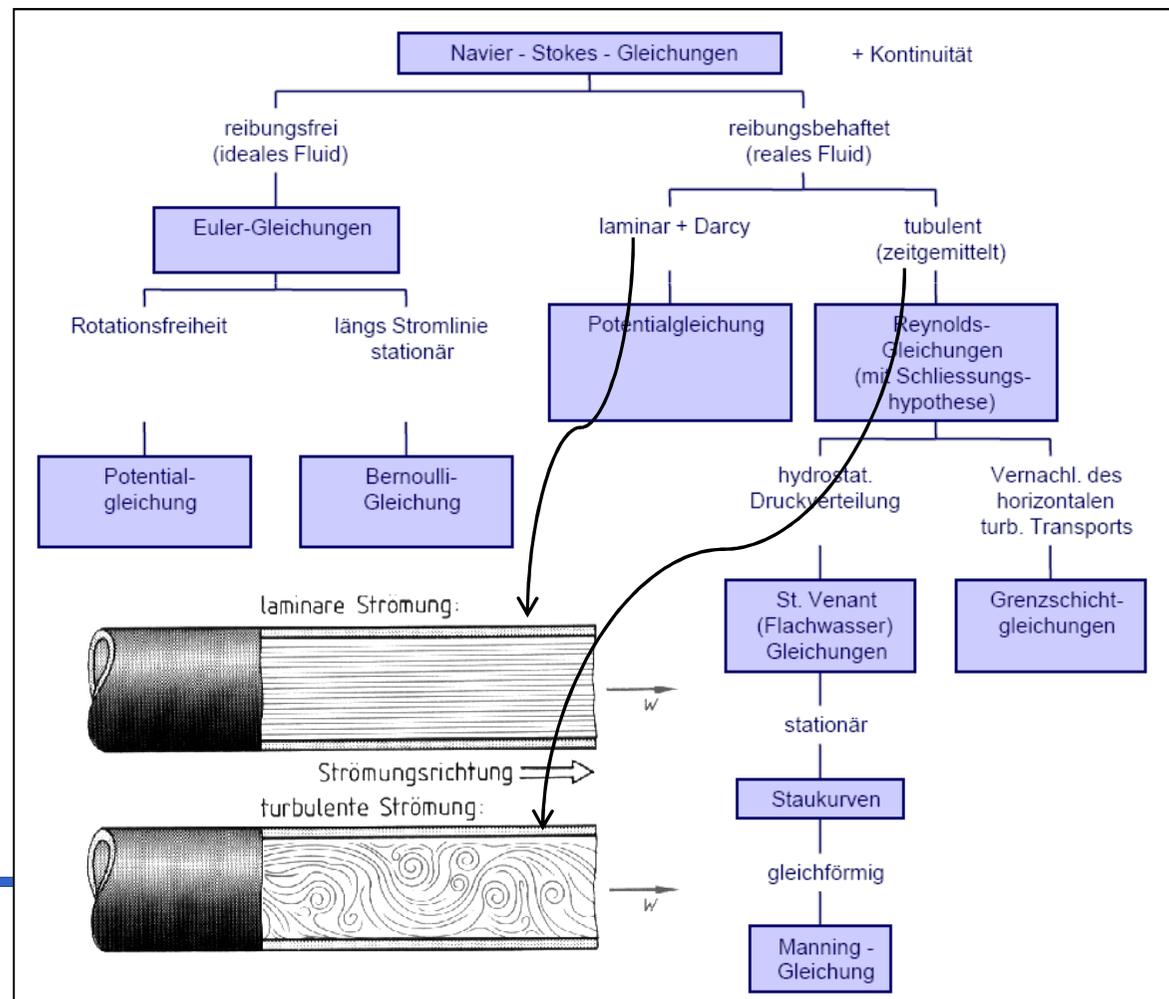
- Grundlagen der Strömungsberechnung:  
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes  
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

# Navier-Stokes-Gleichungen

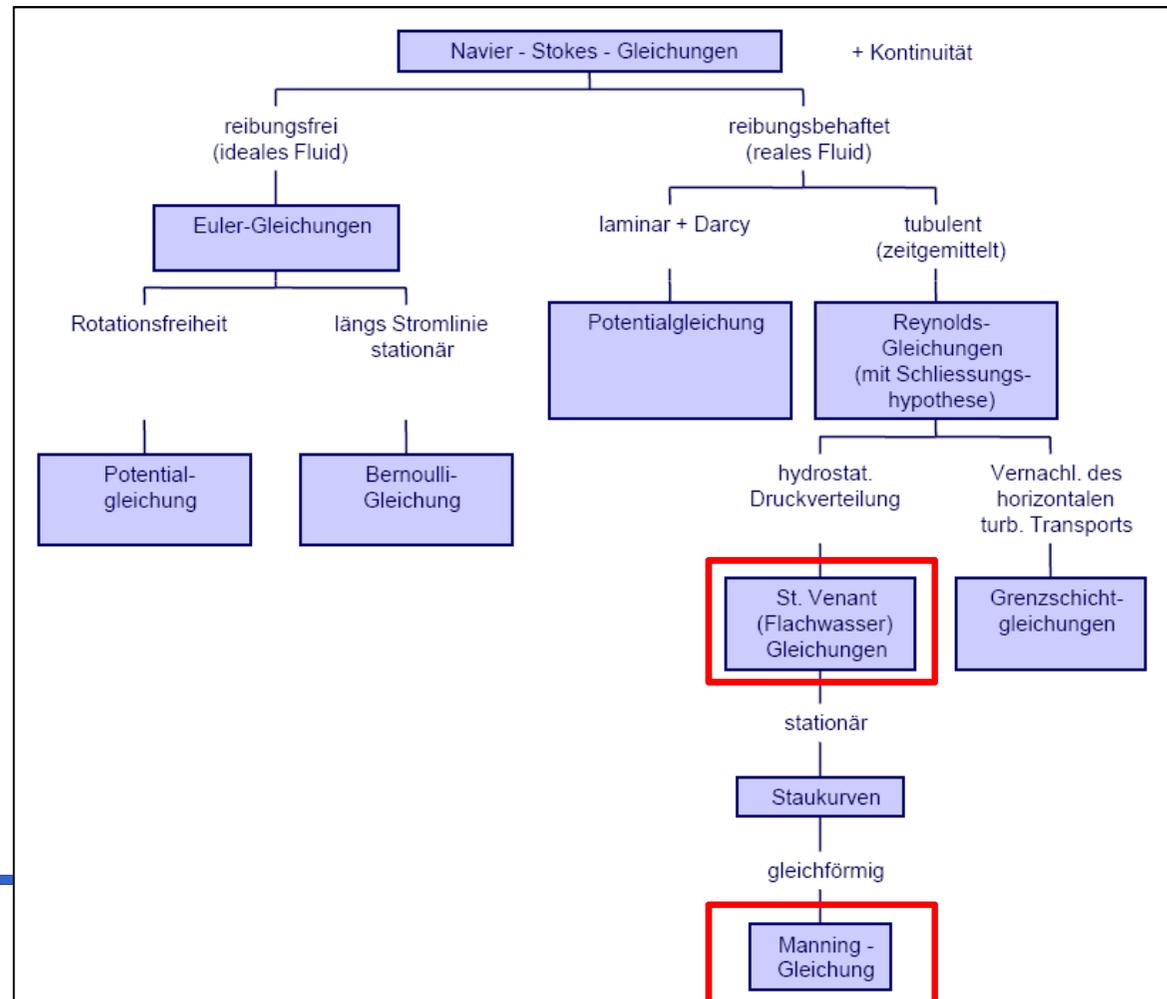
- Grundlagen der Strömungsberechnung:  
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes  
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

# Navier-Stokes-Gleichungen

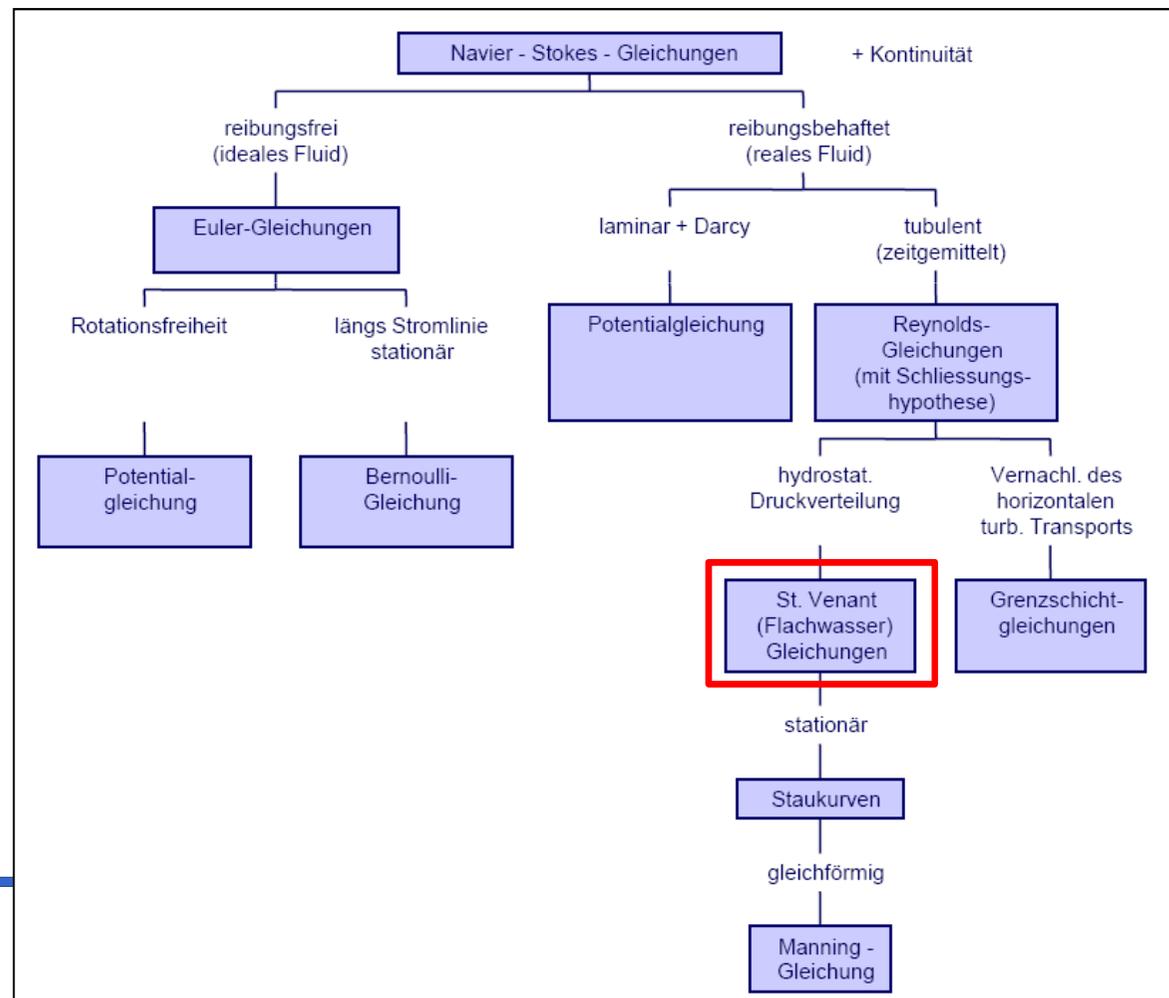
- Grundlagen der Strömungsberechnung:  
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes  
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

# Hydrodynamische Modelle

- Hydrodynamische Modelle: Lösung der Saint-Venant-Gleichungen



Rutschmann (2009)

# Hydrodynamische Modelle

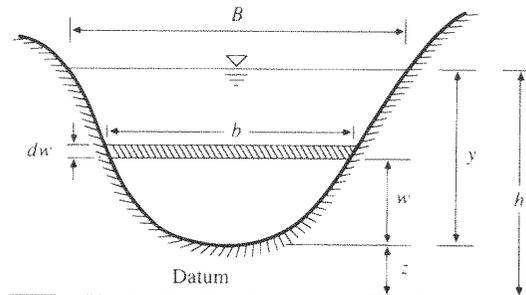
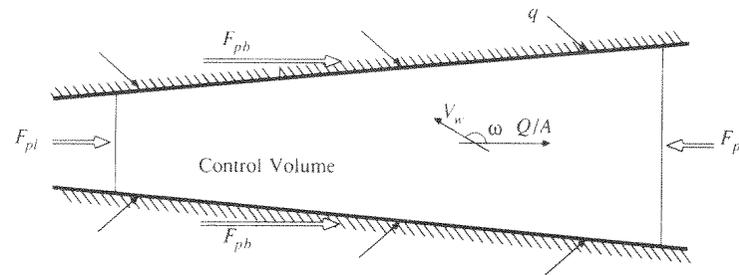
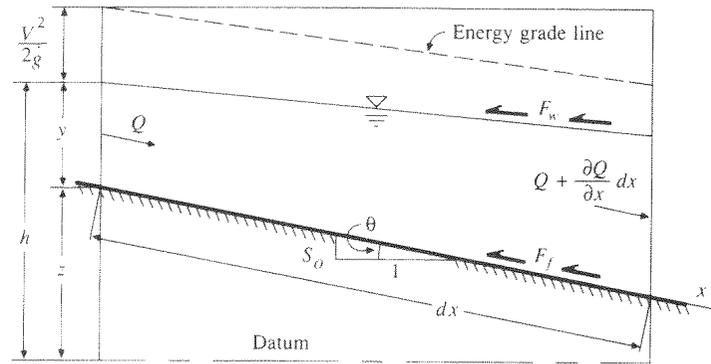
- Hydrodynamische Modelle:

## 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 Teilen 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



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

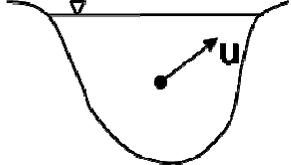
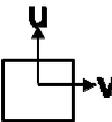
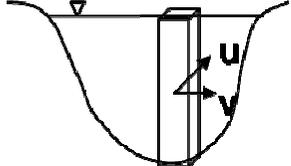
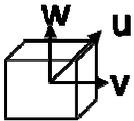
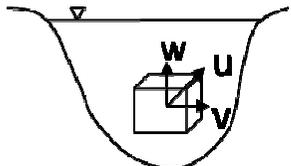
<i>Lokale Beschleunigung</i>	<i>Konvektive</i>	<i>Druck</i>	<i>Reibung</i>
$Q$	$[m^3/s]$	$Abfluss$	
$A$	$[m^2]$	$Benetzter Querschnitt des Flussprofils$	
$q$	$[m^2/s]$	$Effektiver seitlicher Zufluss$	
$x$		$Raumkoordinate in Fließrichtung$	
$t$		$Zeitkoordinate$	
$g$	$[m/s^2]$	$Erdbeschleunigung$	
$I_0$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

# 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

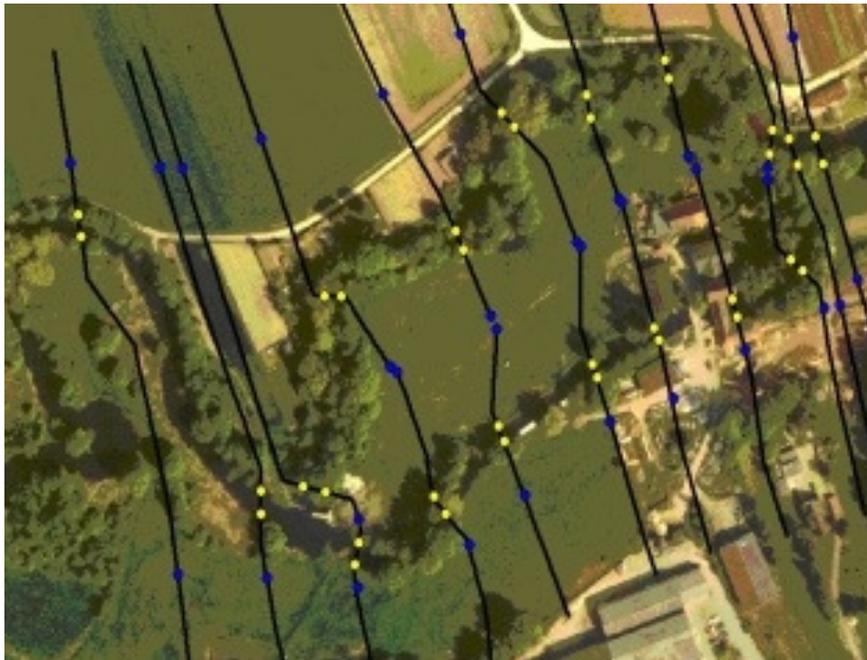
- Hydrodynamische Modelle: Saint-Venant-Gleichungen
  - Lösung der Kontinuitäts- und Energiegleichung durch 1D- bzw. 2D-Modelle

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 	

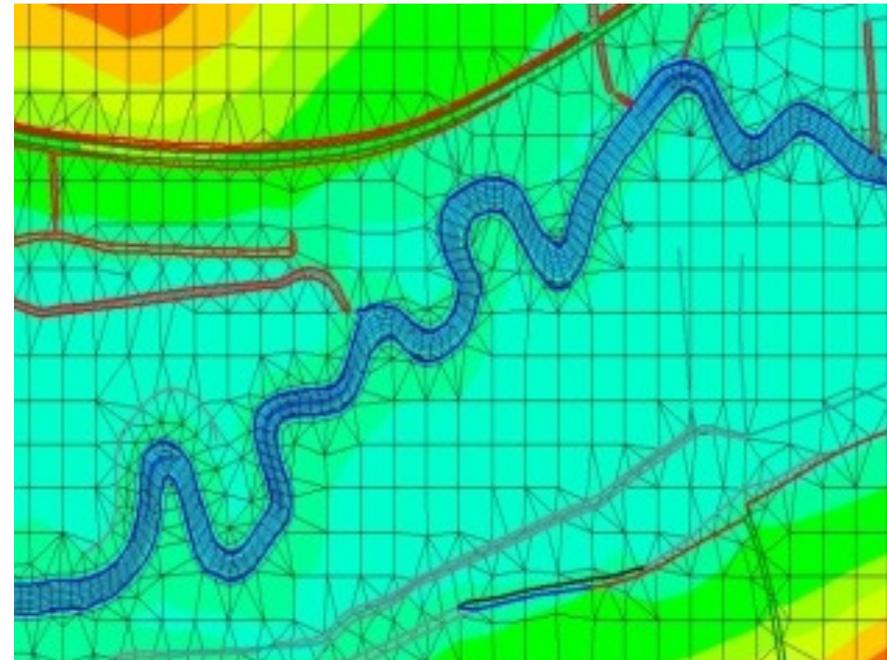
HYDRON (2009)

# 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

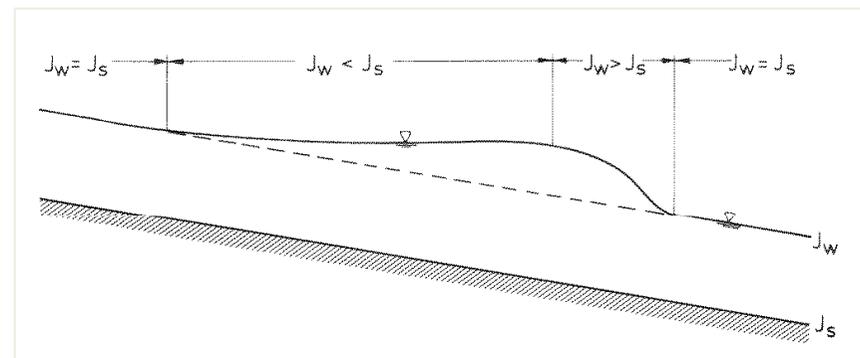
BayLFU (2009)

# Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

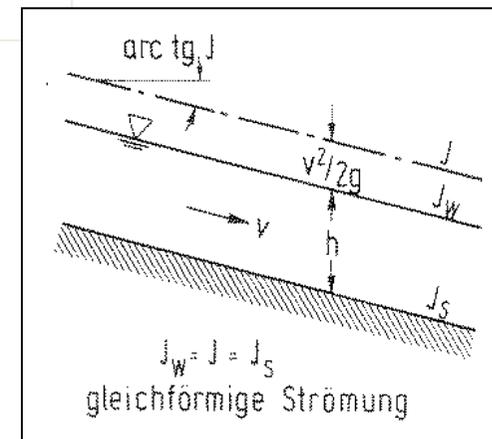
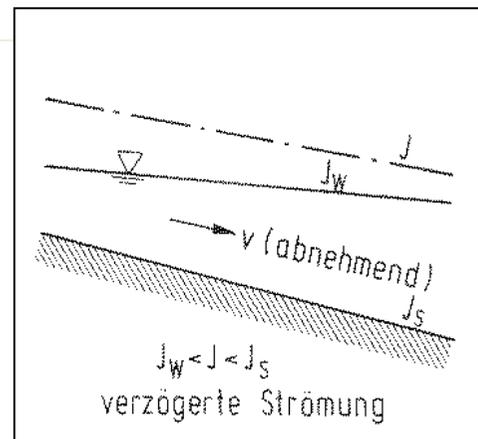
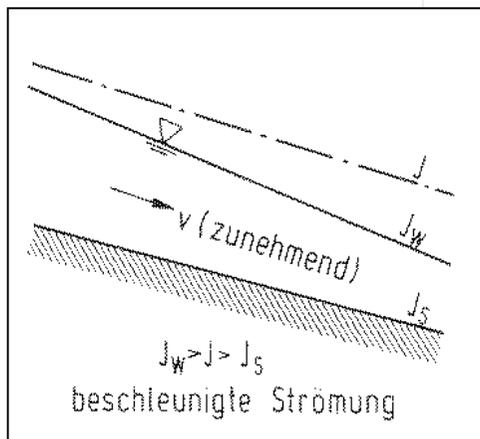
- Hydrologische Modelle:  
Basierend auf Saint-Venant-Gleichungen, aber:
  - Kontinuitätsgleichung wird berücksichtigt
  - Energiegleichung wird vereinfacht, parametrisiert oder nicht berücksichtigt

# 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



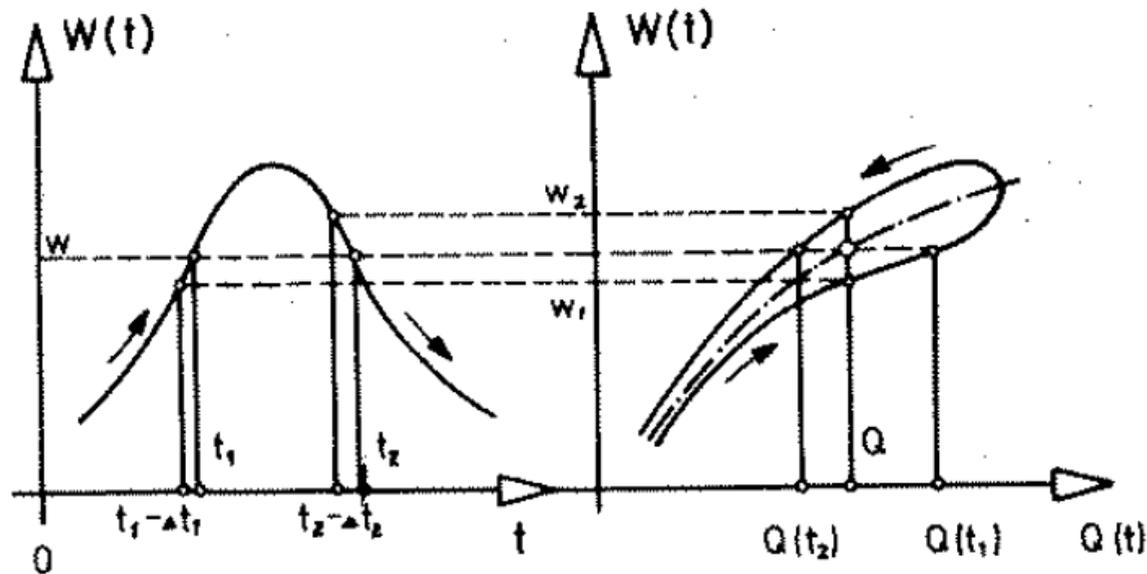
Längsschnitt durch eine Hochwasserwelle



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



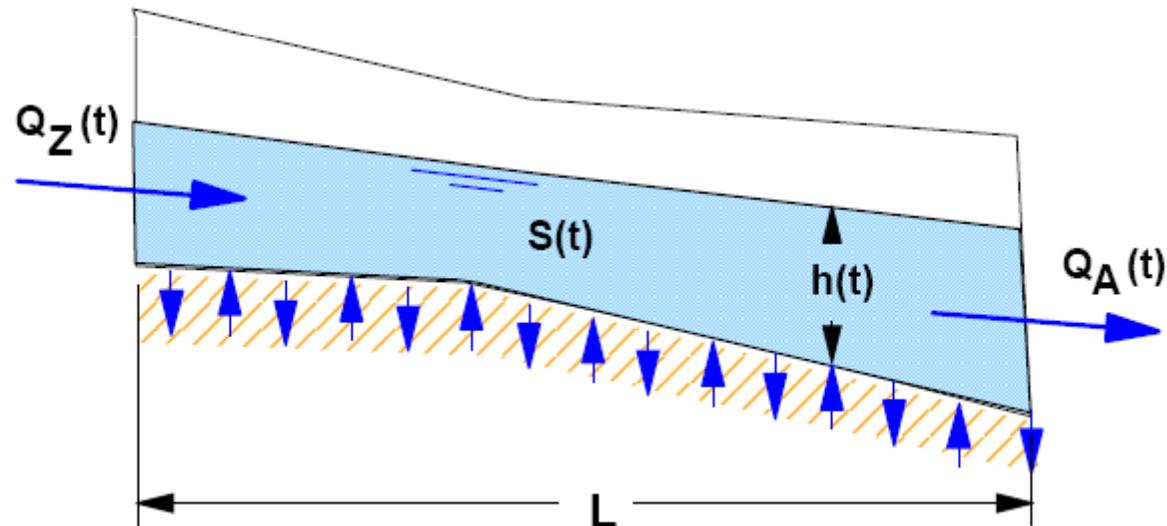
Beziehungen zwischen der ansteigenden und abfallenden Wasserstandsganglinie (links) und der Abflussschleife (WQ-Beziehung, rechts) während einer Hochwasserwelle in einem Flussprofil ( $Q(t)$  = Abfluss;  $W(t)$  = Wasserspiegelniveau;  $t$  = Zeit)

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.

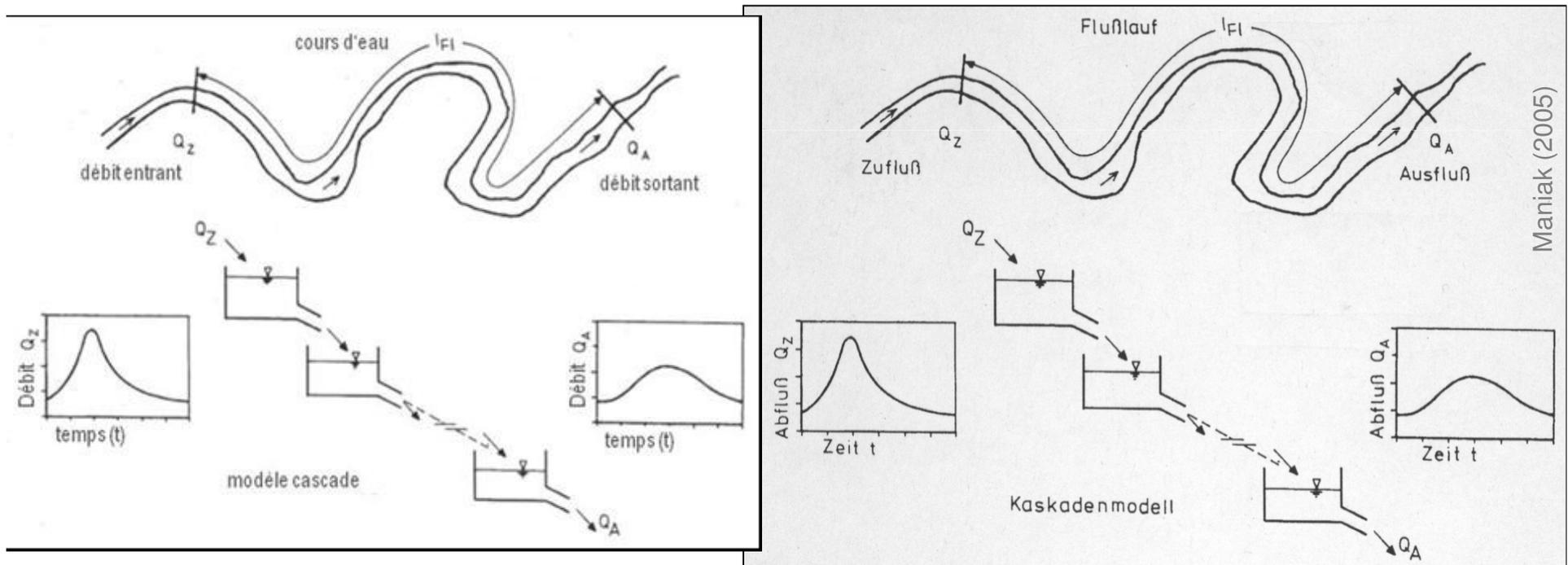
# Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- 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

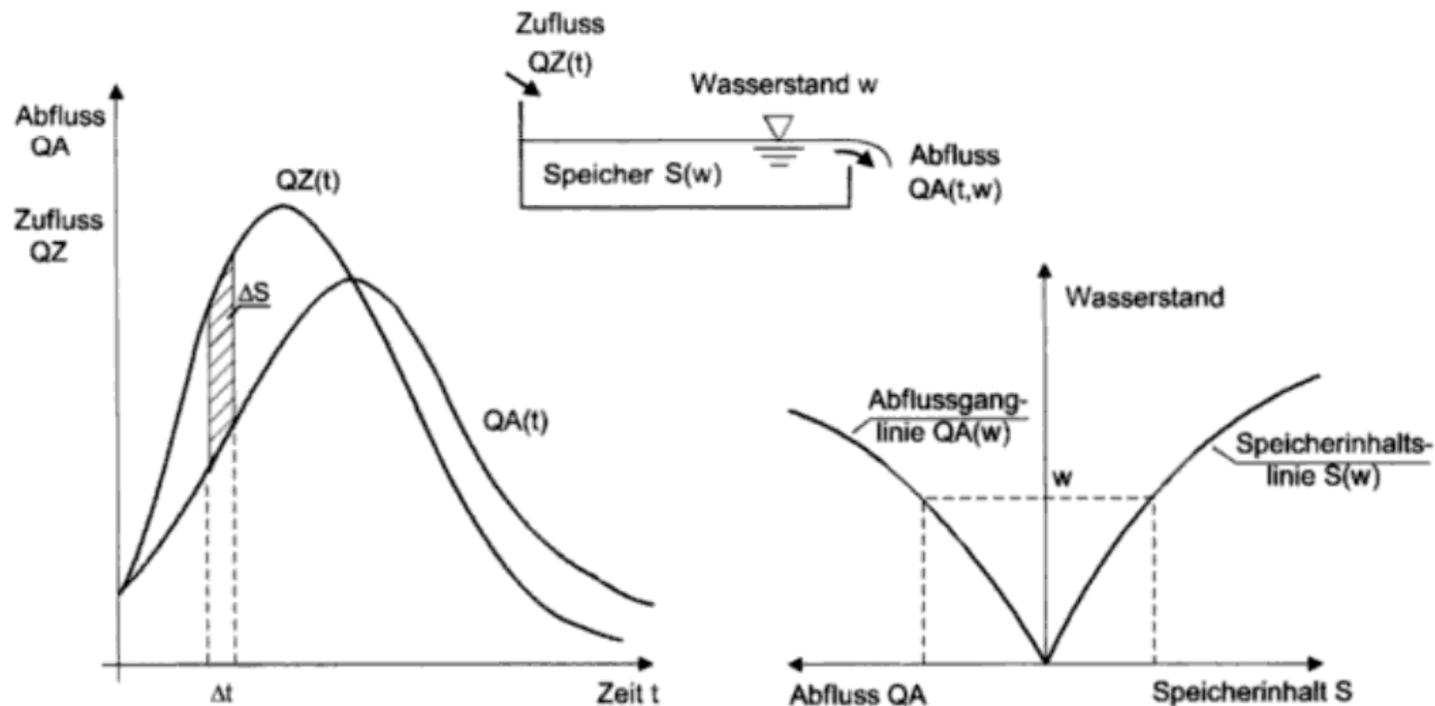
- Einzellinearspeicher:
  - Das hydrologische Verhalten der Gewässerteilstrecke kann auf Grundlage der Kontinuitätsgleichung durch einen Einzellinearspeicher beschrieben werden.

# 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

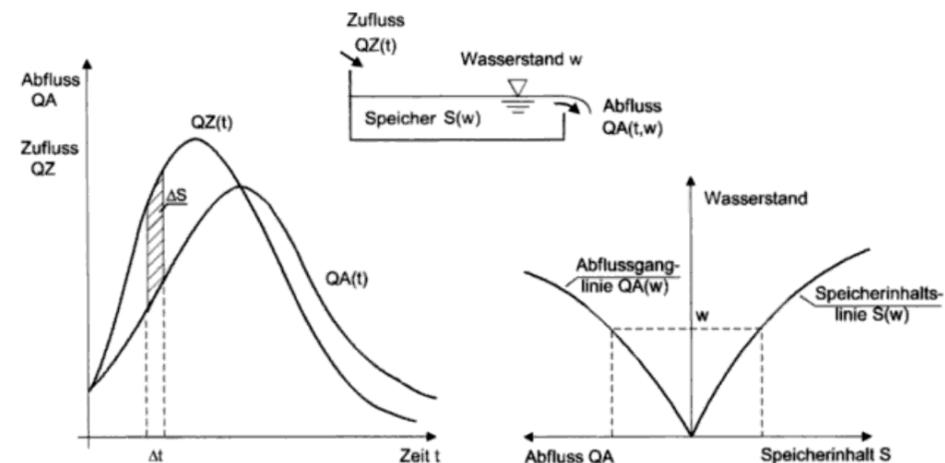
- Einzellinearspeicher:
  - Das hydrologische Verhalten der Gewässerteilstrecke kann auf Grundlage der Kontinuitätsgleichung durch einen Einzellinearspeicher beschrieben werden.

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

- 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  $S(w)$ :

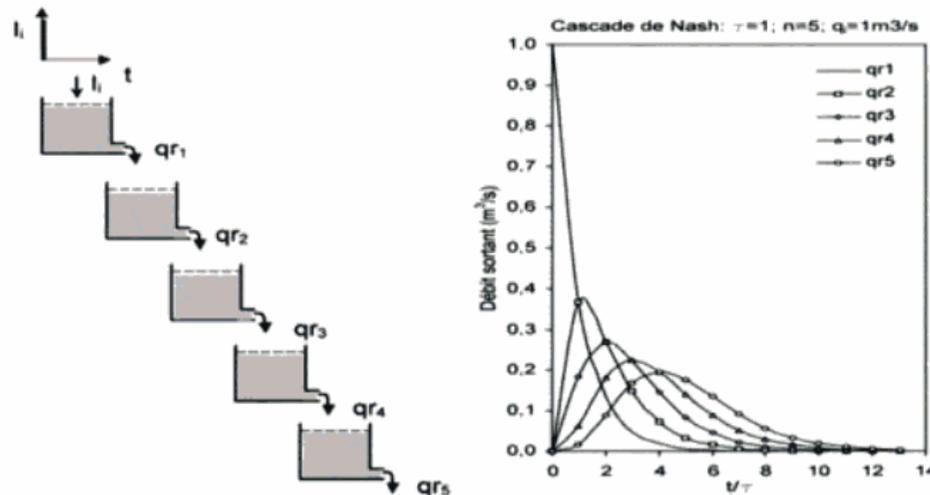
$$S(w) = RK \cdot QA(w)$$

$S(w)$	Volumen (Speicherinhalt) beim Wasserstand $w$
$QA(w)$	Abfluss aus dem Speicher beim Wasserstand $w$
$RK$	Rückhaltekonstante (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.



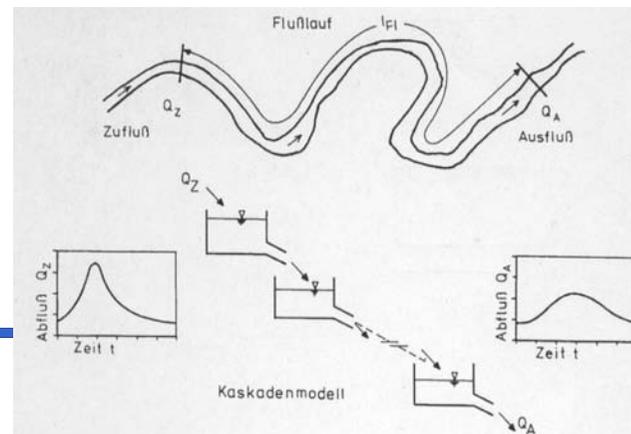
Besbes (2006)

# Einzellinearspeicher

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

Verwendung der Rückhaltekonstanten für den Einzellinearspeicher

Berechnung der Speicherkaskade



# Einzellinearspeicher

- Bestimmung der Rückhaltekonstanten des Einzellinearspeichers:
  - Die einzige Unbekannte in der Gleichung der jeweiligen Einzellinearspeicher für jede Gewässerstrecke ist die jeweilige Rückhaltekonstante 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

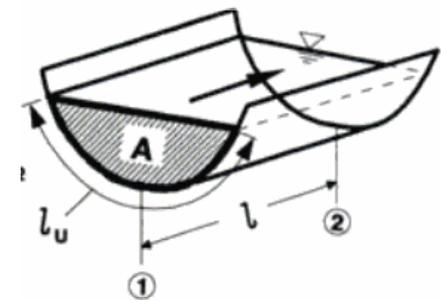
- Bestimmung der Rückhaltekonstanten des Einzellinearspeichers:  
Um den Berechnungsaufwand einzugrenzen, werden bei dem in LARSIM verwendeten hydrologischen Ansatz einige vereinfachende Annahmen getroffen:
  - Einheitliche geometrische Verhältnisse innerhalb der betrachteten Gerinnestrecke
  - Annahme 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:

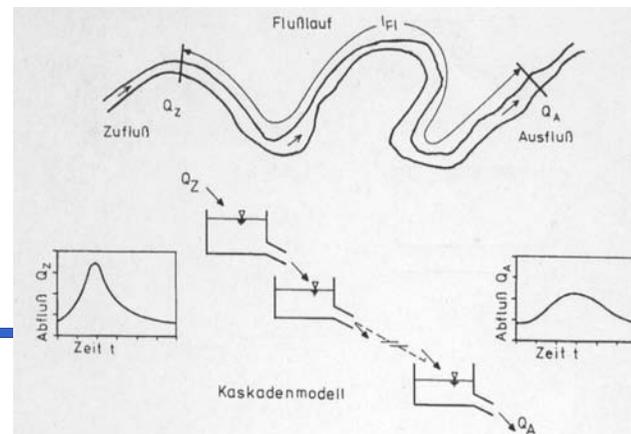
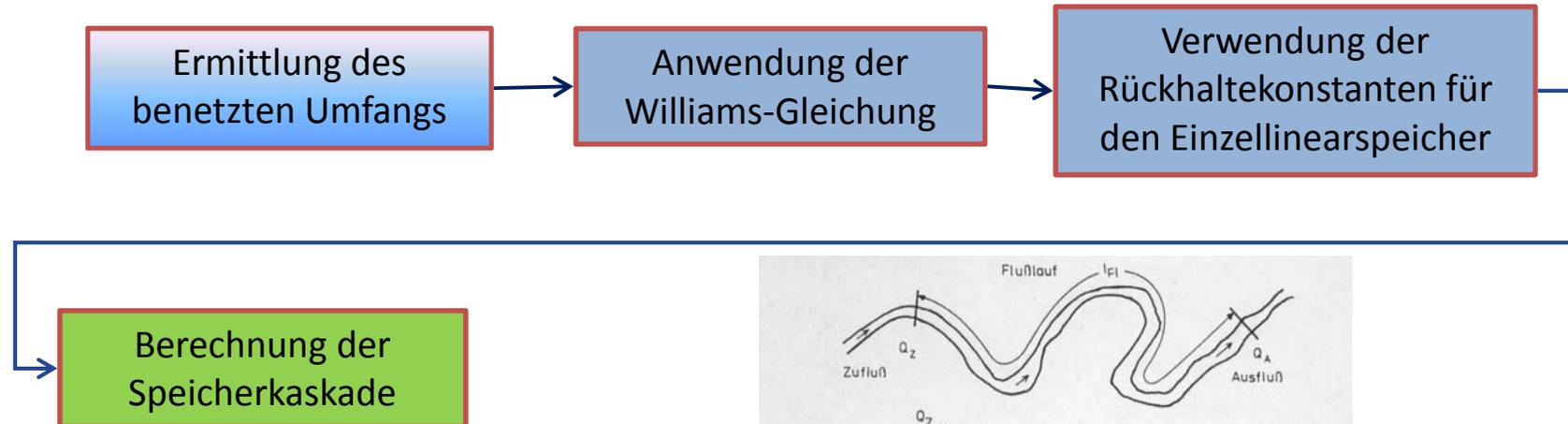
$$RK_i = \frac{L \cdot A_{n,i}}{3600} \cdot \frac{3}{QZ_{i-1} + QZ_i + QA_{i-1}}$$

$RK$	[h]	Speicherkonstante für die Gewässerteilstrecke
$i$	[-]	Index für den Berechnungszeitschritt
$L$	[m]	Länge der Gewässerteilstrecke
$A$	[m <sup>2</sup> ]	Benetzter Querschnitt des Flussprofils
$n$	[-]	Index für den Wasserstand im Gewässerprofil
$QA$	[m <sup>3</sup> /s]	Abfluss aus der Gewässerteilstrecke
$QZ$	[m <sup>3</sup> /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  $Q_{\text{Manning}}$ : Für jede Gewässerteilstrecke wird unter Verwendung der geometrischen Verhältnissen des Querprofils der Profildaten der Abfluss  $Q_{\text{Manning}}$  nach der Beziehung von Manning-Strickler berechnet:

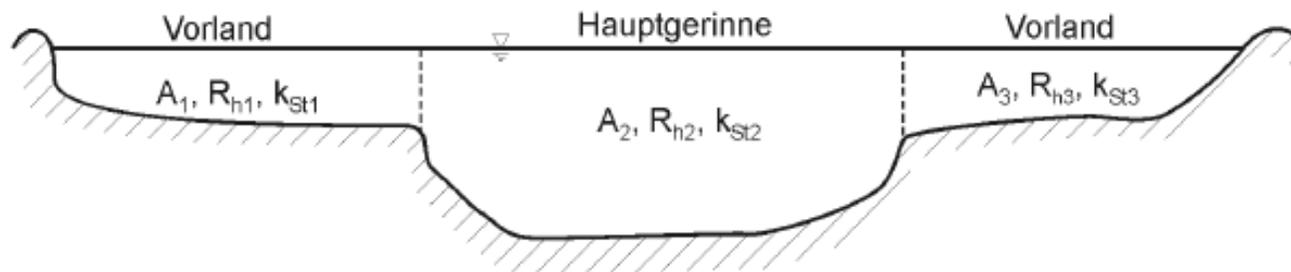
$$Q_n = A_n \cdot EK \cdot K_S \cdot \left(\frac{A_n}{U}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

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

# 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  $Q_{\text{Manning}}$  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 GEWAESSESTEILSTRECKE 1486 ( 53323380)
-----
HOEHE DURCHFLUSS BREITE GESCHW. VOLUMEN
WSP WSP
(M) (CBM/S) (M) (M/S) (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:

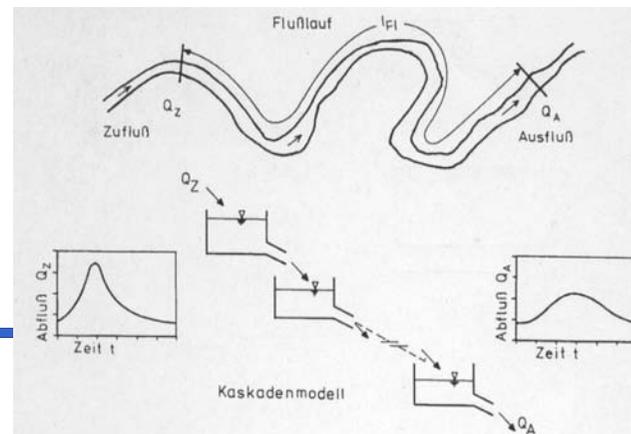
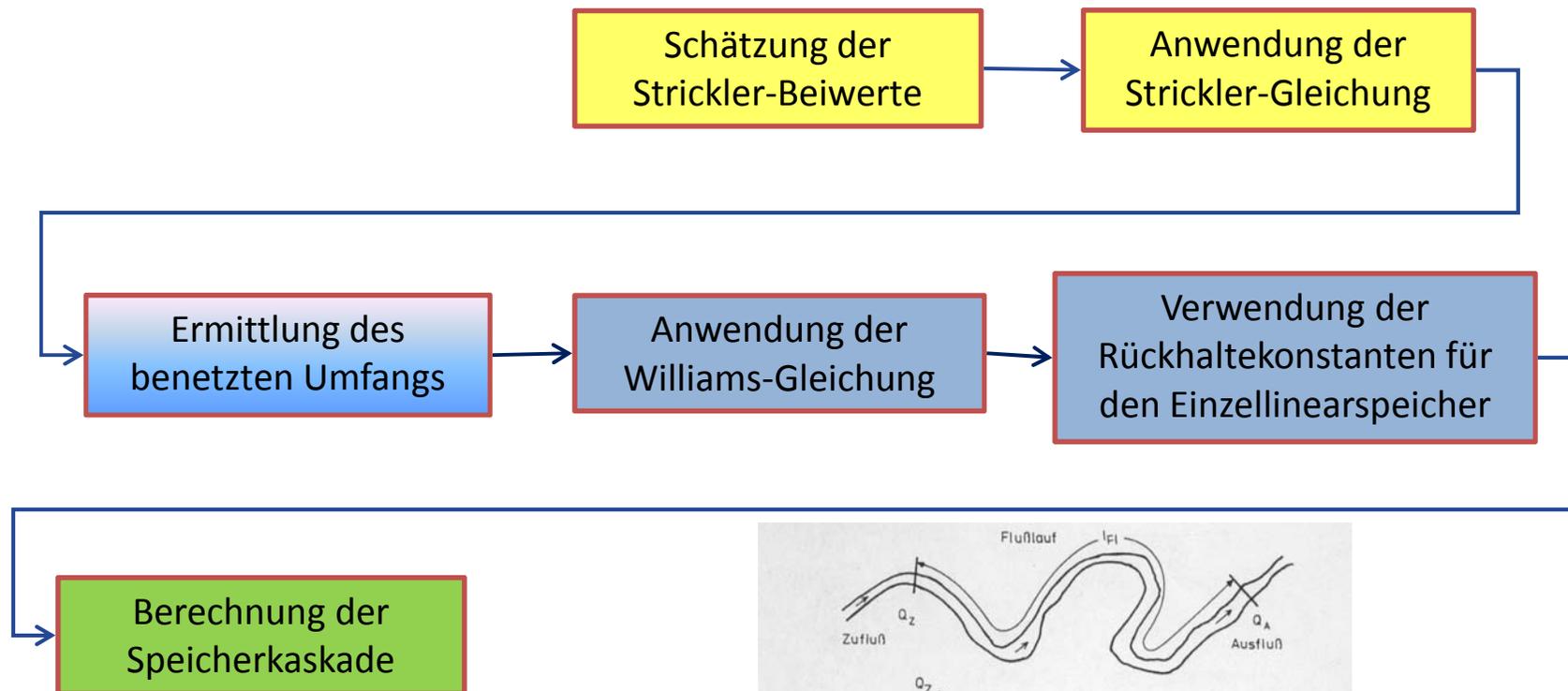
$$Q_n \leq \frac{QZ_{i-1} + QZ_i + QA_{i-1}}{3} \leq Q_{n+1}$$

3) Vergleich  $Q_{\text{Schätzung}}$  und  $Q_{\text{Manning}}$ : Die beiden Abflüsse  $Q_{\text{Schätzung}}$  und  $Q_{\text{Manning}}$  werden vom Programm miteinander verglichen. Für den Abfluss  $Q_{\text{Manning}}$ , 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  $Q_{\text{Manning}}$  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

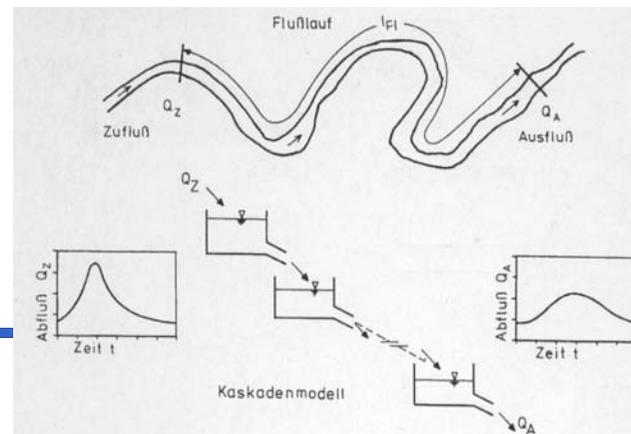
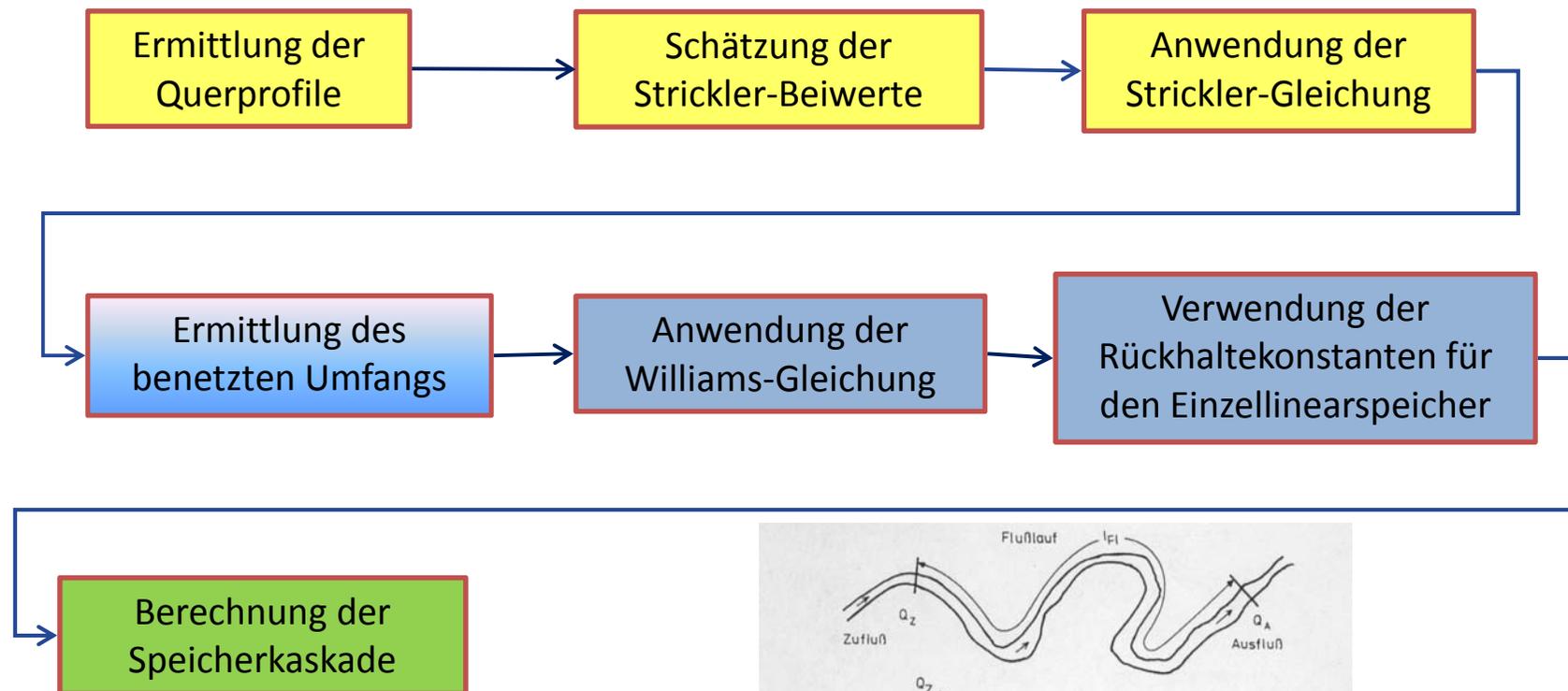
- Um den Abfluss  $Q_{\text{Manning}}$  berechnen zu können, sind weitere Angaben erforderlich:
  - 1) Strickler-Beiwerte: Bei der Modellkalibrierung können die geschätzten Kst-Werte durch Eichparameter modifiziert werden. Der Kst-Wert geht linear in die Berechnung der Fließgeschwindigkeit und damit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

# Bestimmung des benetzten Querschnitts

- Um den Abfluss  $Q_{\text{Manning}}$  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:

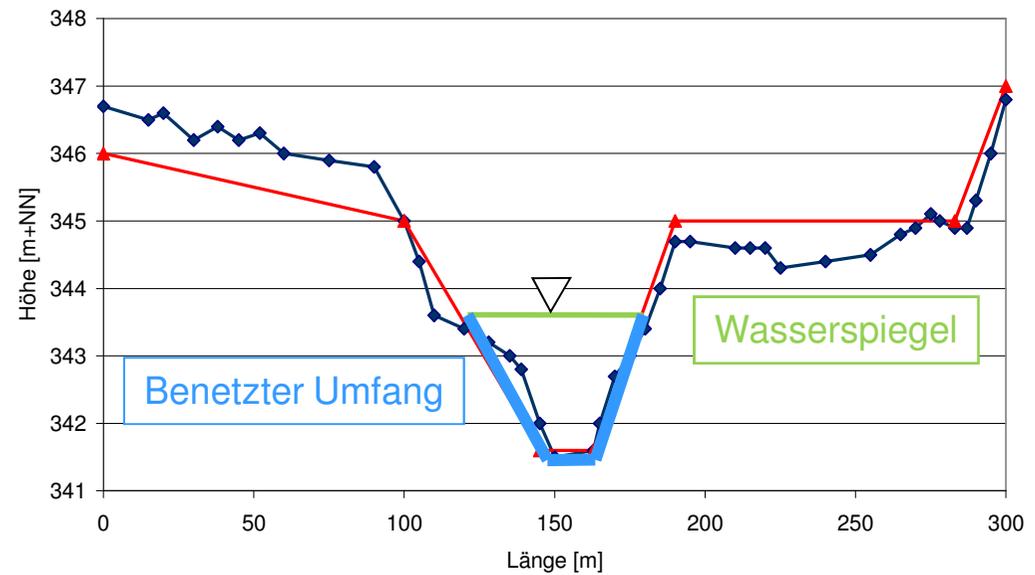
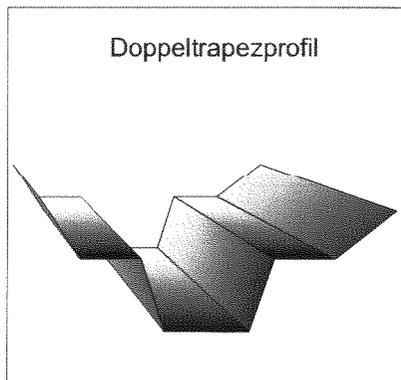


# Bestimmung der Querprofile

- 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.

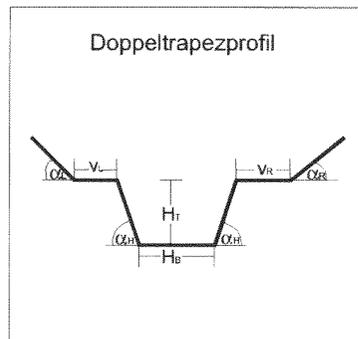
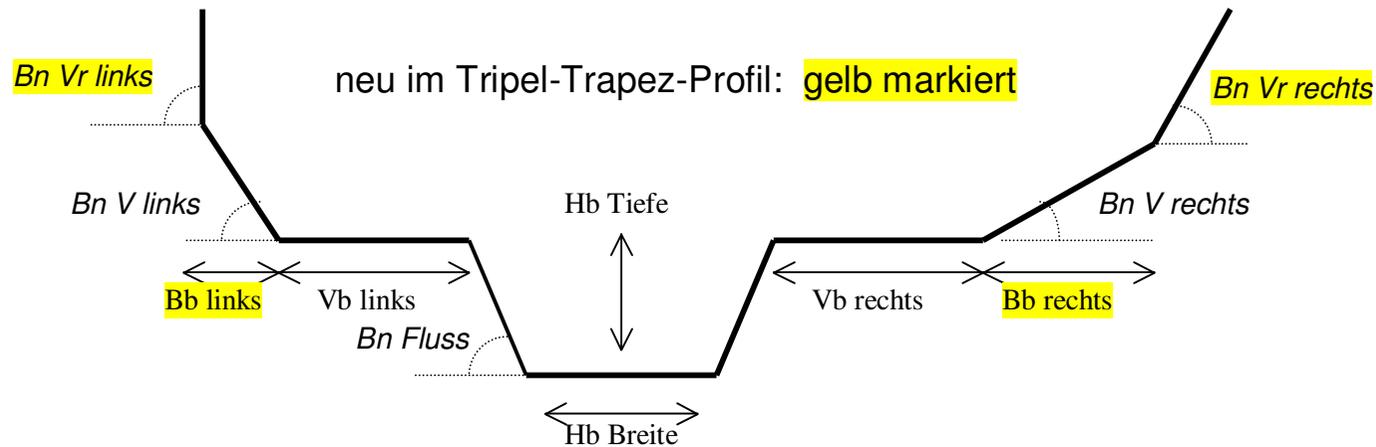
# Bestimmung der Querprofile

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



# Bestimmung der Querprofile

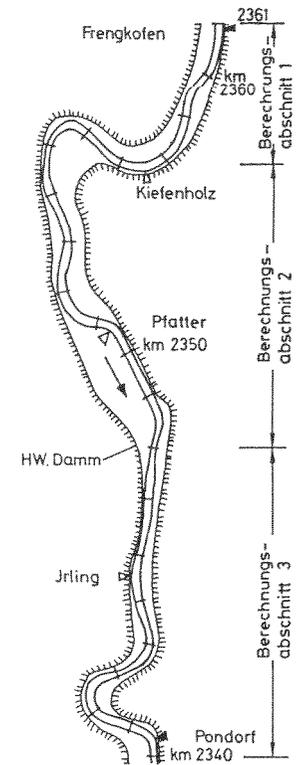
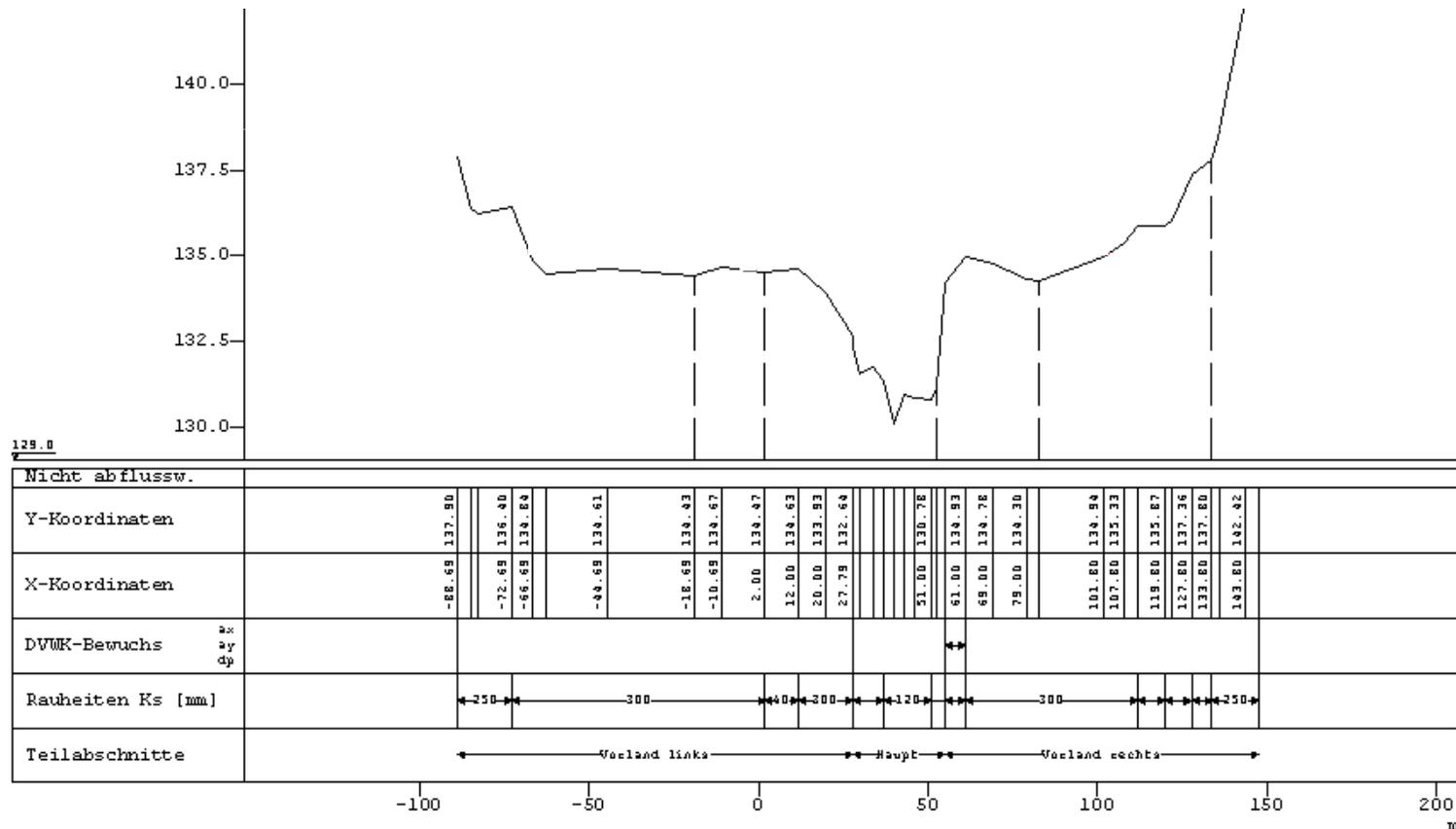
- Annäherung der Querprofile in LARSIM durch *Tripeltrapez*-Querprofil:



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

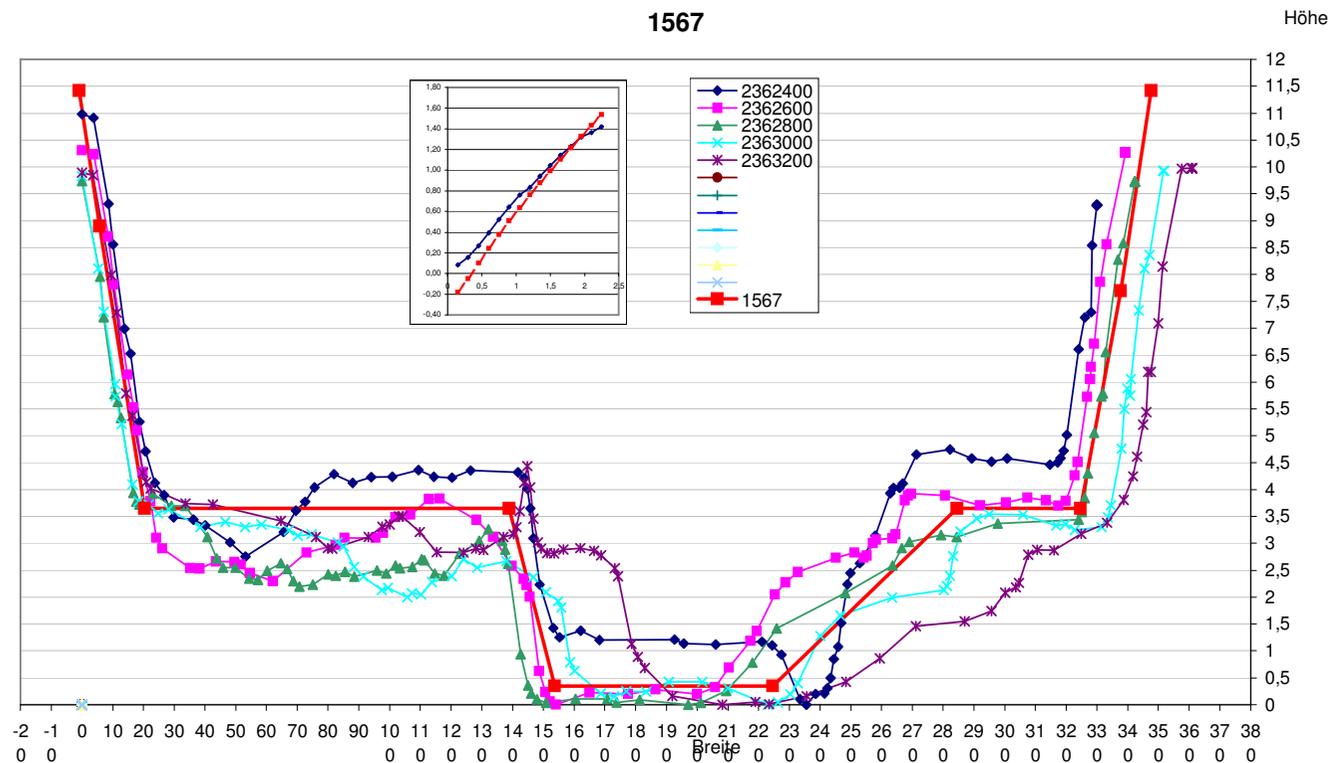
# Bestimmung der Querprofile

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



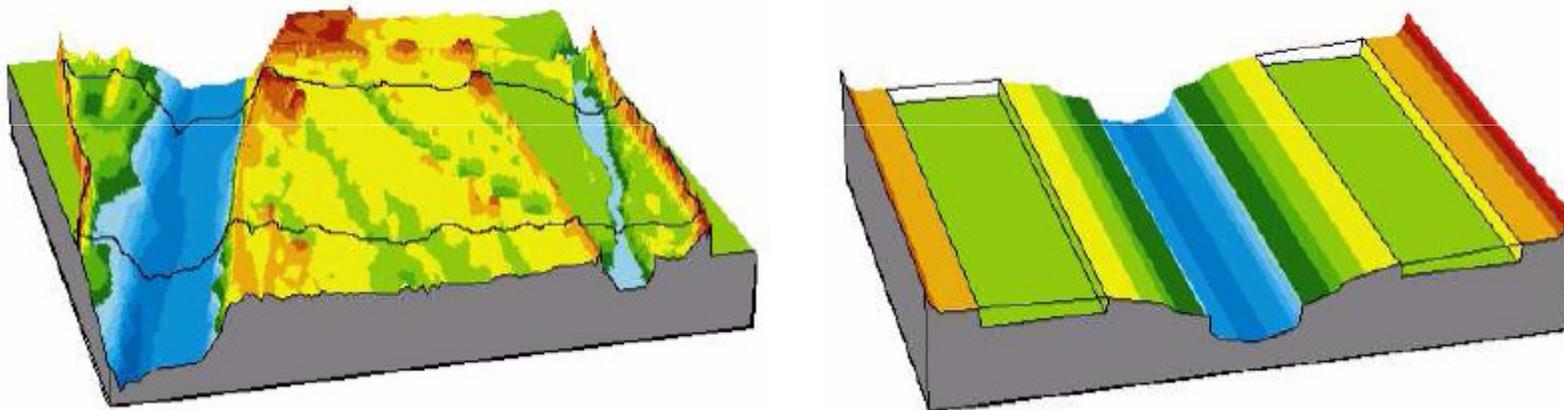
# Bestimmung der Querprofile

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



# Bestimmung der Querprofile

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



Hoefslot et al. (1999)

# Bestimmung der Querprofile

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

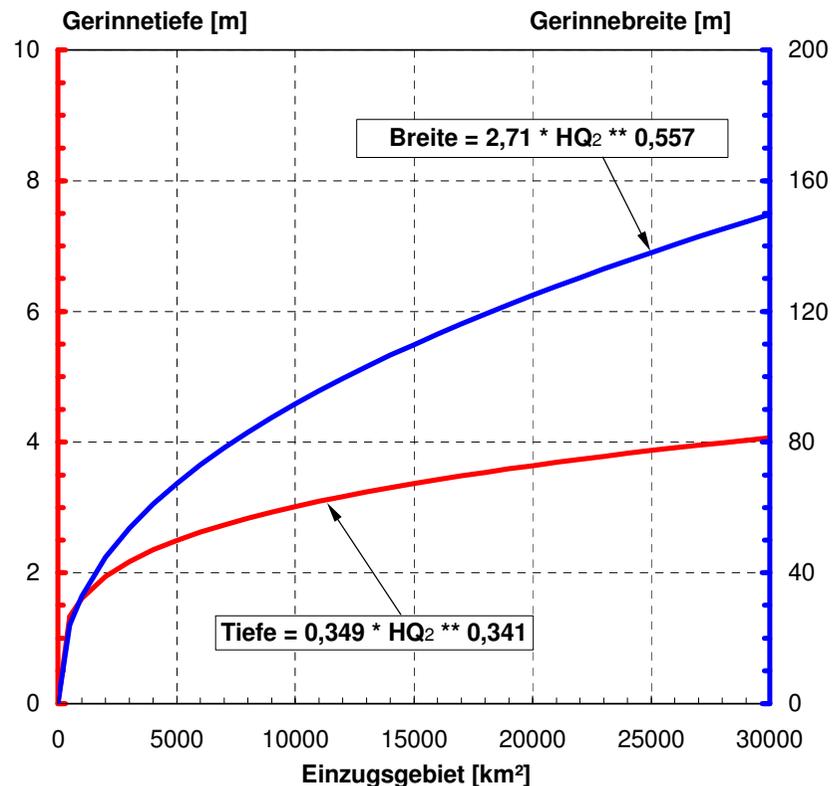
# Bestimmung der Querprofile

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

# Bestimmung der Querprofile

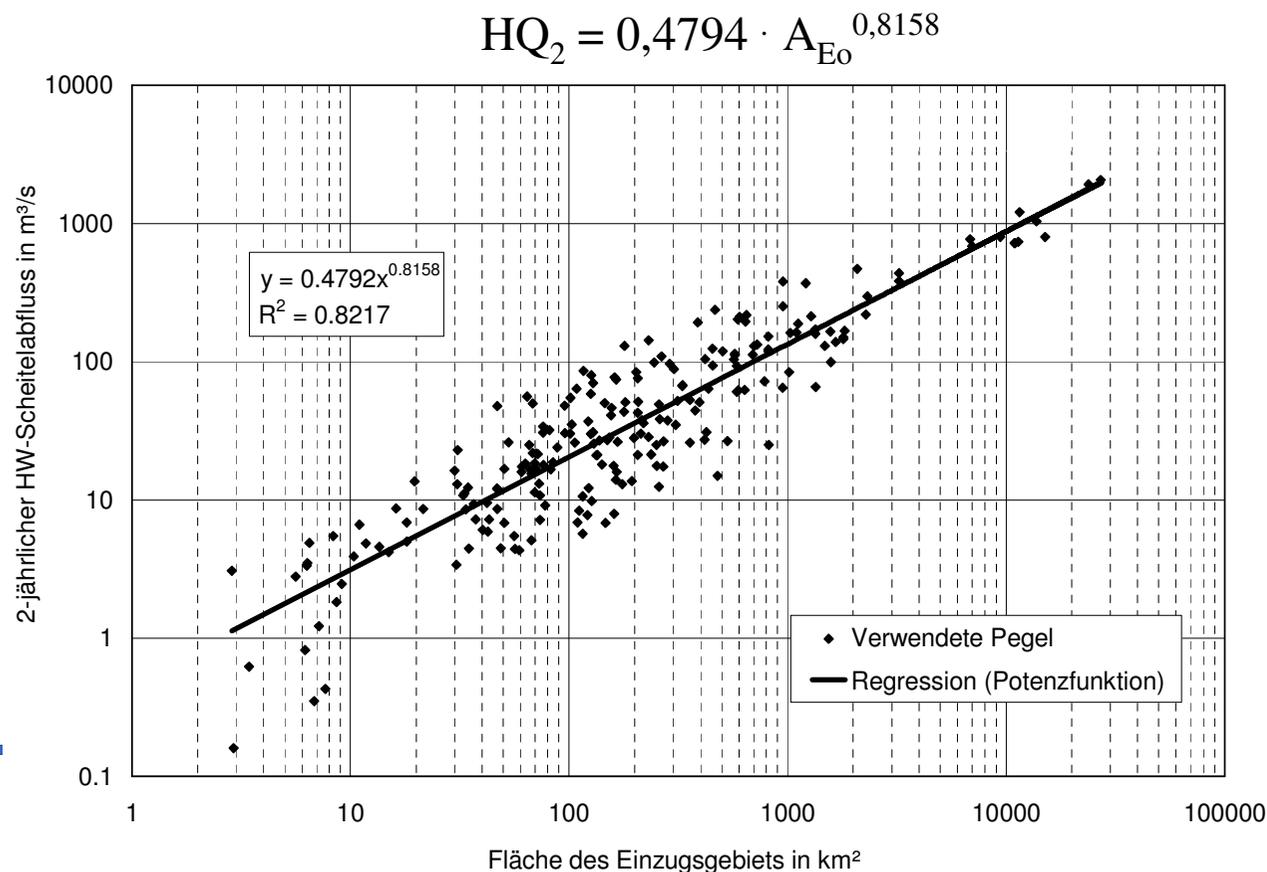
- Ermittlung der Gerinnedaten:
  - Von Allen et al. (1994) wurden Exponenten bzw. Koeffizienten für die Formel anhand von 674 Querprofilen unterschiedlicher Flüsse in den USA ermittelt.
  - Vorlandbreiten werden gleich der Sohlbreite des Hauptbetts gesetzt.
  - Böschungsneigung für das Hauptbett 1,5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

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



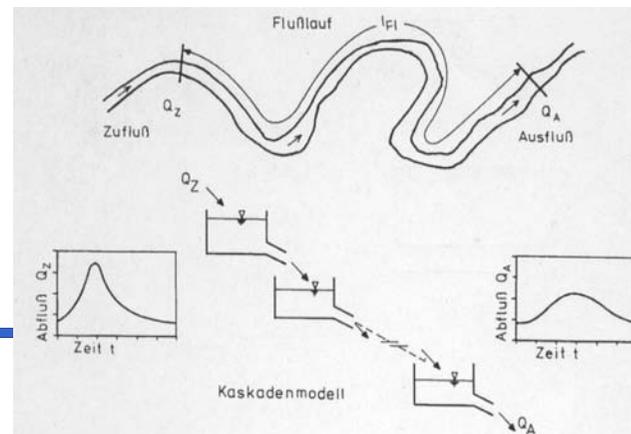
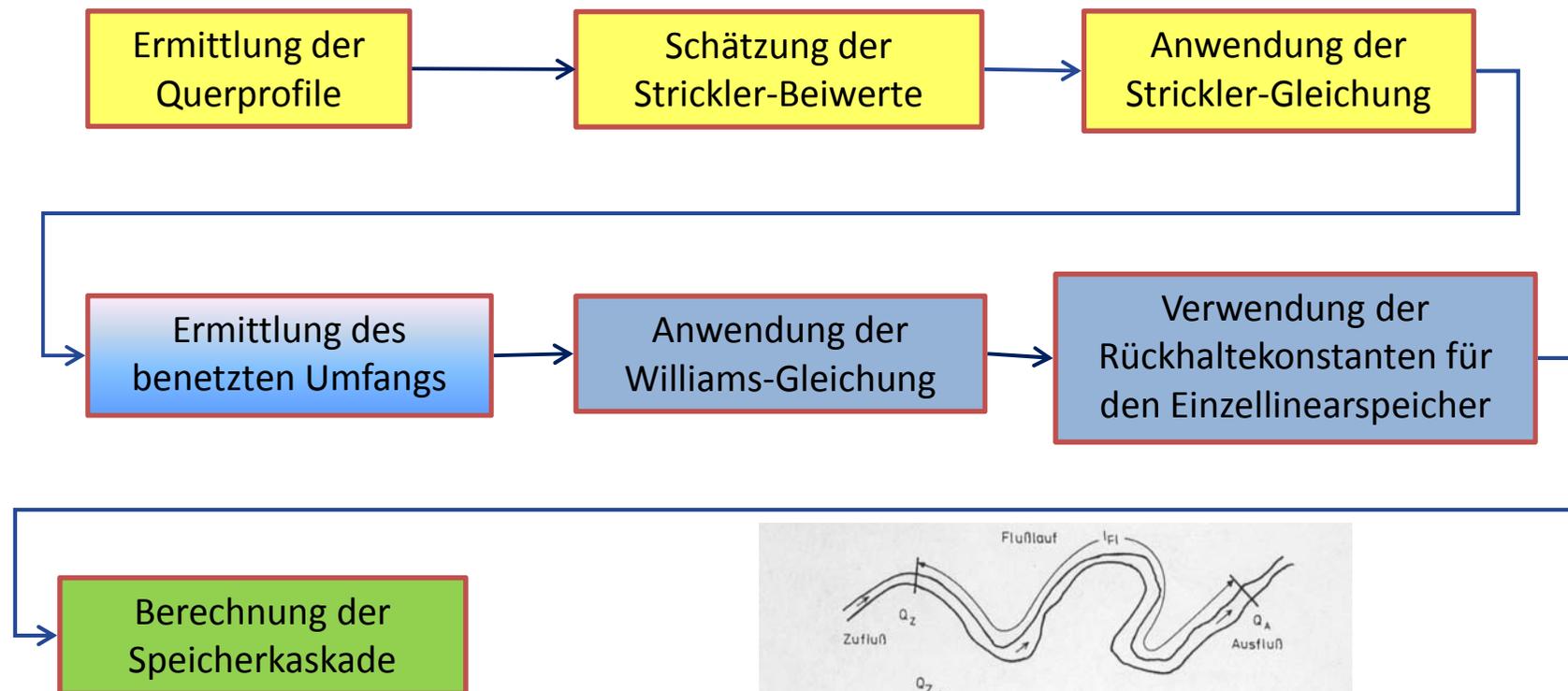
# Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinnewdaten:
  - 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).



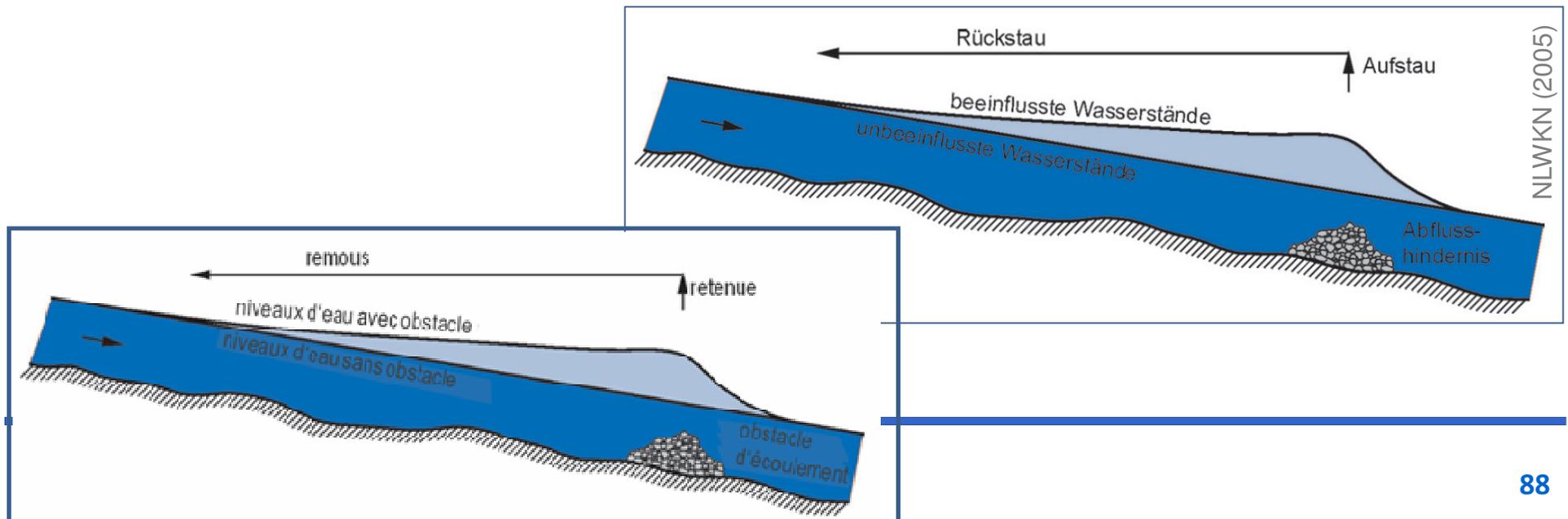
# Bestimmung der Querprofile

- 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:

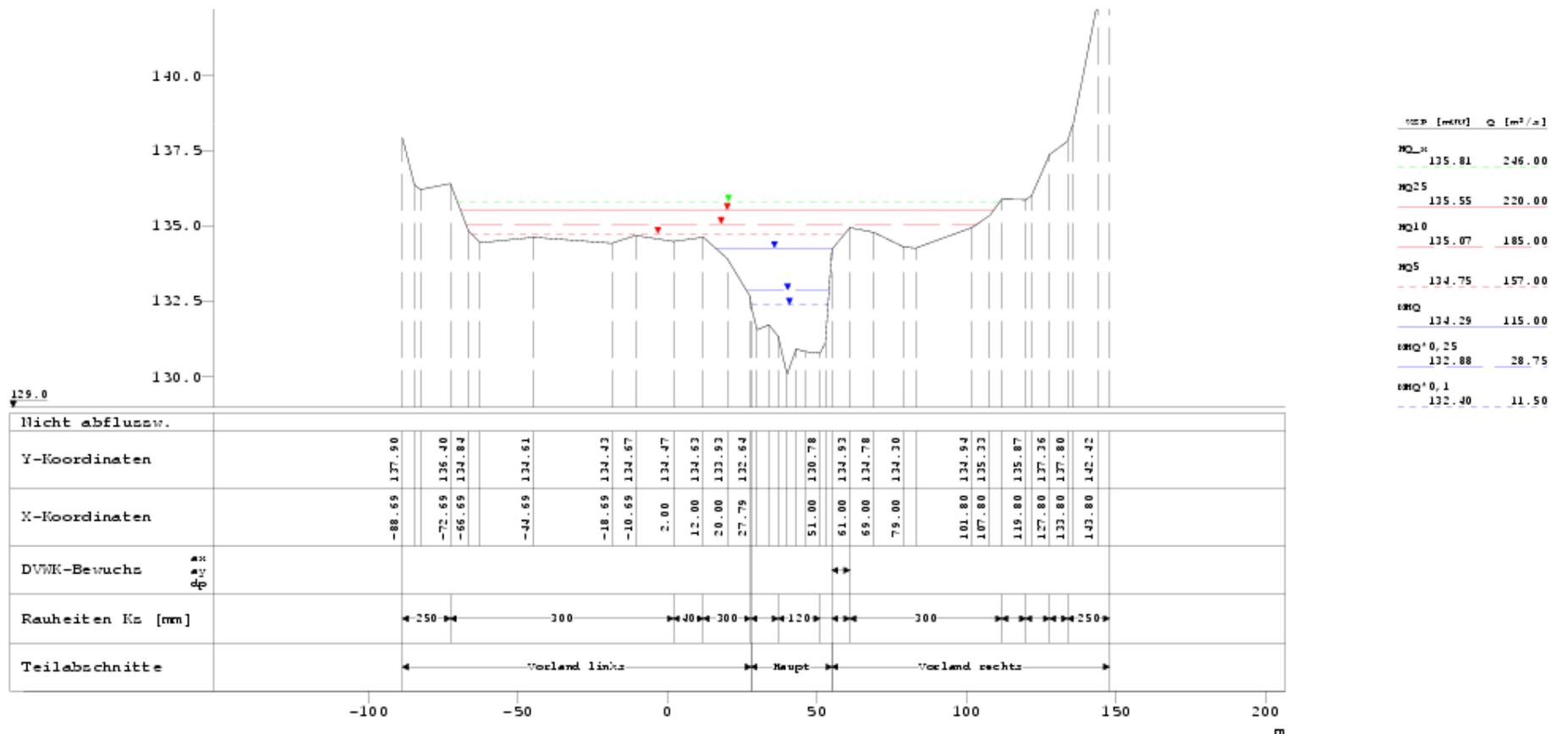
2. Zuverlässige Datenbereitstellung: Für die hydrologischen Verfahren sind Angaben zu den mittleren Gerinnegeometrien für jede berücksichtigte Teilstrecke erforderlich. Dabei ist besonders eine möglichst präzise Erfassung des Übergangs zwischen dem Hauptbett und den Vorländern für die Berechnung der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

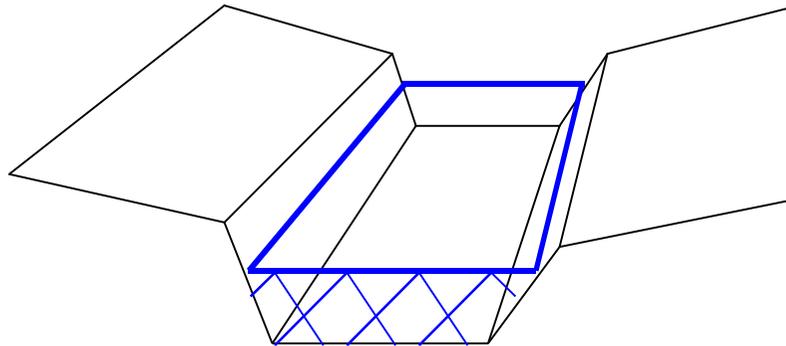
- Verbesserung der Ergebnisse der hydrologischen Flood-Routing-Verfahren auf der Seite der Datenbereitstellung: bei Vorliegen eines hydraulischen Flood-Routing-Modells Übernahme von Ergebnissen aus dem hydraulischen Modell (1D- oder 2D-Modell) in das hydrologische Modell.
- Voraussetzung: stationäre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



# Übernahme von dV/dQ-Beziehungen

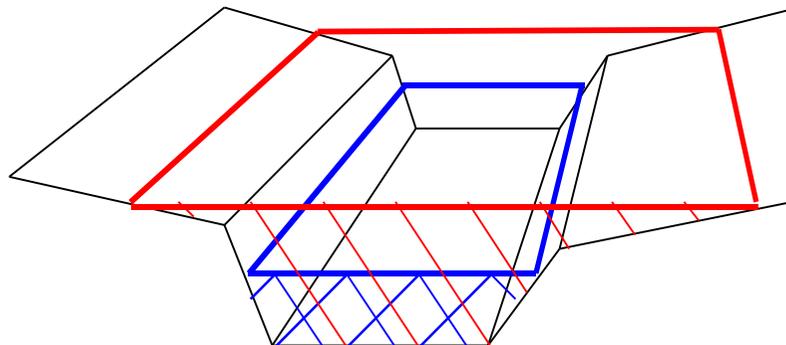
- Ausgehend von den mit den hydraulischen Modellen berechneten Wasser-spiegellinien kann für jede Fließstrecke eine Abfluss-Volumen-Beziehung aufgestellt werden, d.h. einem bestimmten Abfluss in der Fließstrecke ist ein entsprechendes Volumen zugeordnet.

**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

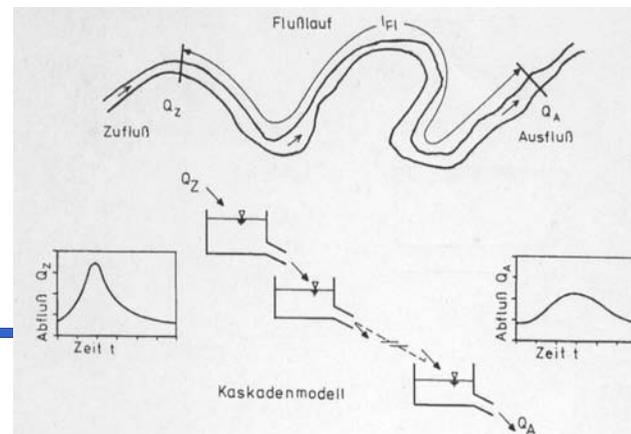
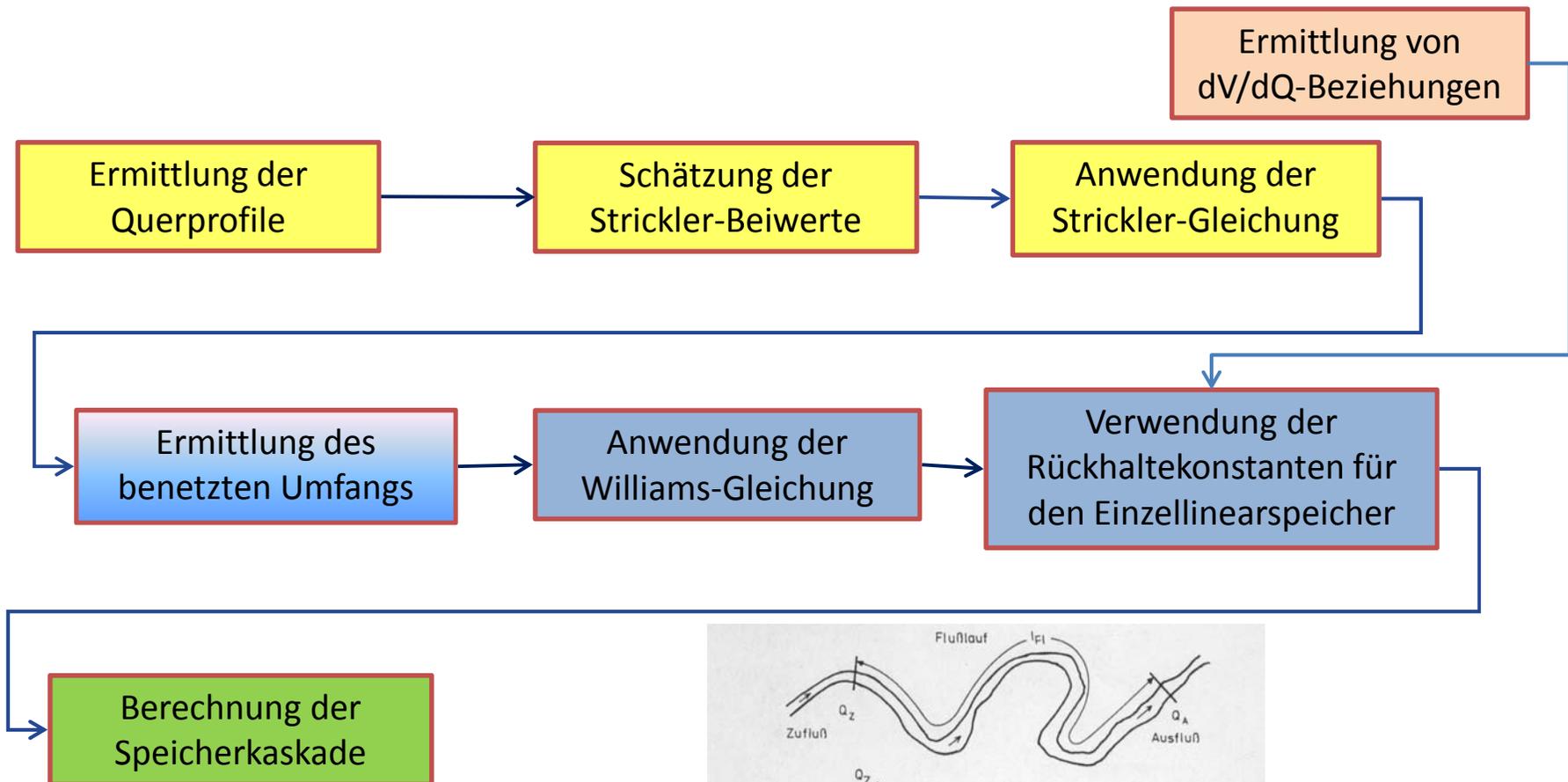
- Die  $dV/dQ$ -Beziehungen haben den Vorteil, dass die Informationen aus den vermessenen Querprofilen, die Ausuferungseffekte und die Wirkung der Rauigkeiten bereits in dem hydraulischen Modell berücksichtigt worden sind.
- Somit sind diese Informationen auch in den  $dV/dQ$ -Beziehungen enthalten.
- 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 Rückhaltekonstante 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 Rückhaltekonstante entsprechend groß. Somit bleibt das Wasser in der Fließstrecke länger gespeichert.
- Diese Rückhaltekonstante  $RK = dV/dQ$  kann direkt in der Gleichung des Einzelinearspeichers verwendet werden.
- Die Rückhaltekonstante 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 werkdocument 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