

Berechnung des Wellenablaufs im Gerinne (Flood-routing) im Wasserhaushaltsmodell LARSIM

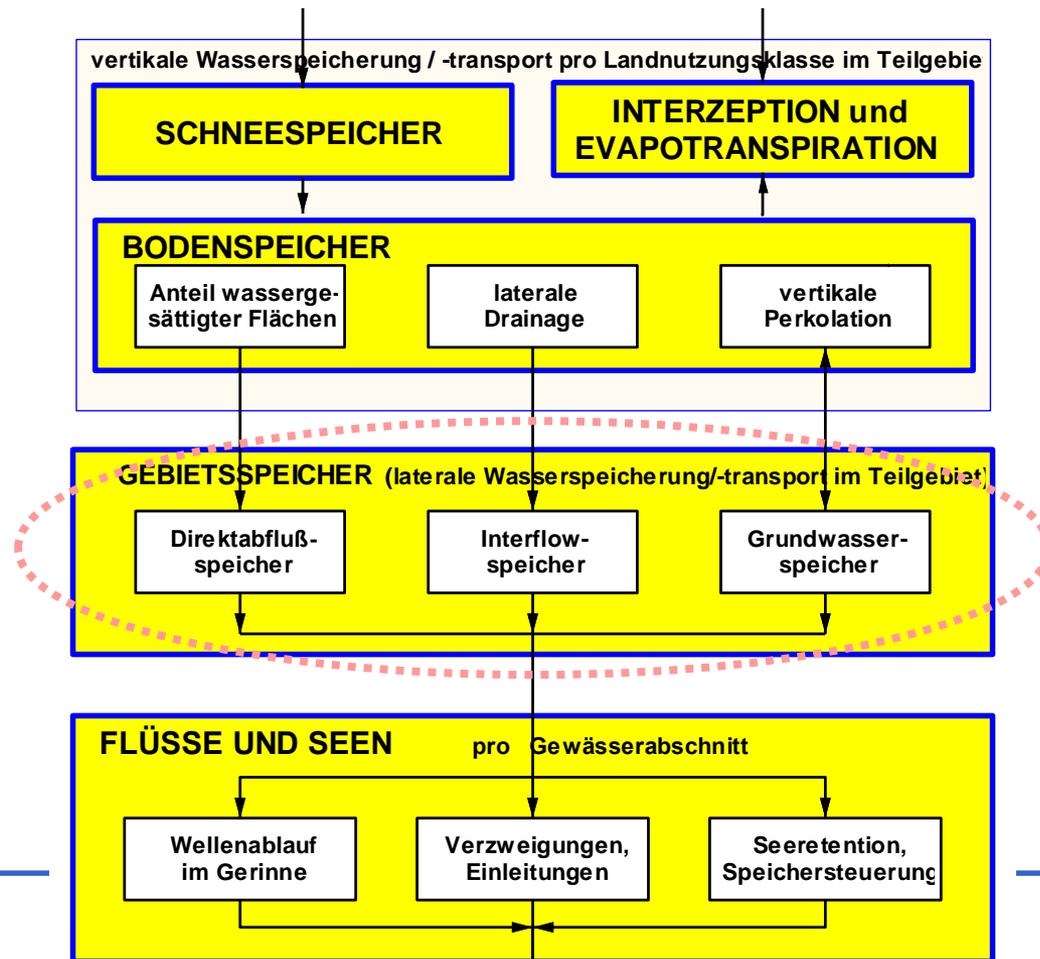
Dr.-Ing. Kai Gerlinger

HYDRON Ingenieurgesellschaft für Umwelt und Wasserwirtschaft

Juni 2020

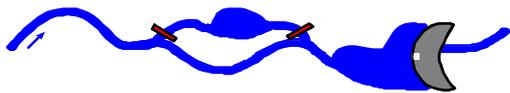
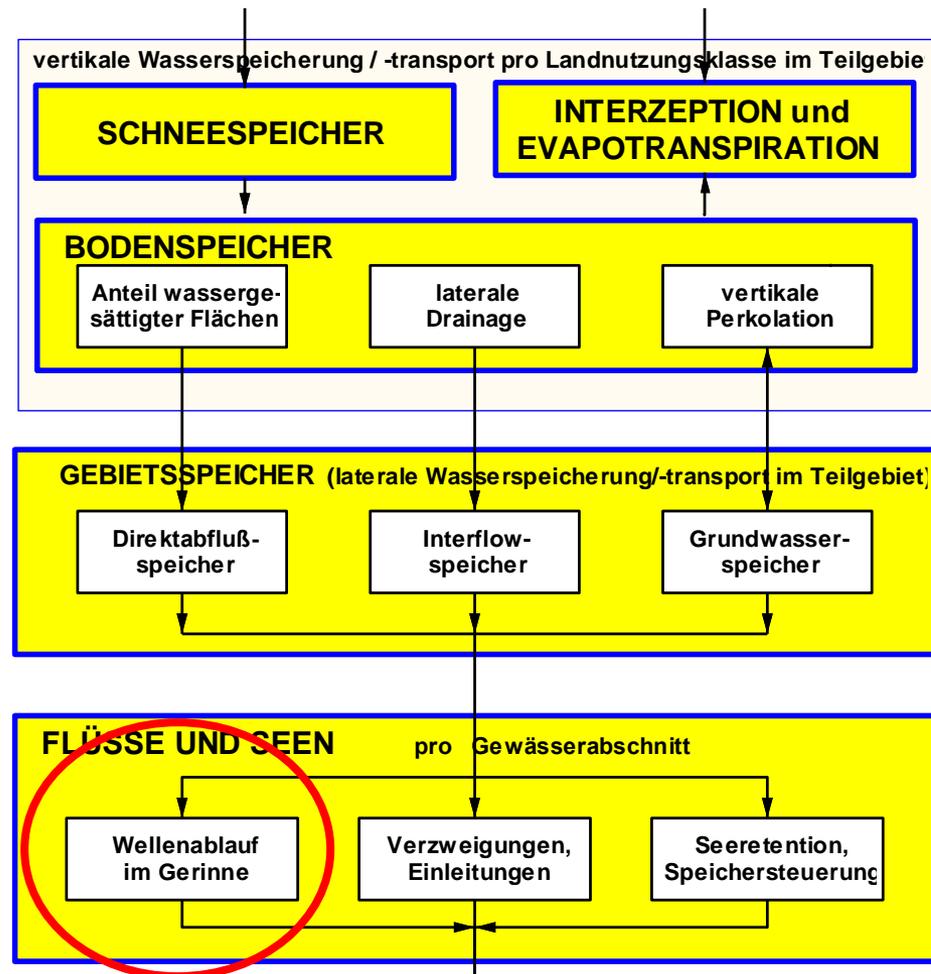
Translation und Retention im Gerinne

- Bisher: vertikaler Wassertransport in der Schnee-, Vegetations- und Bodenschicht sowie lateraler Wassertransport aus der Einzugsgebietsfläche in das Gerinne (flächenbezogener Prozess).



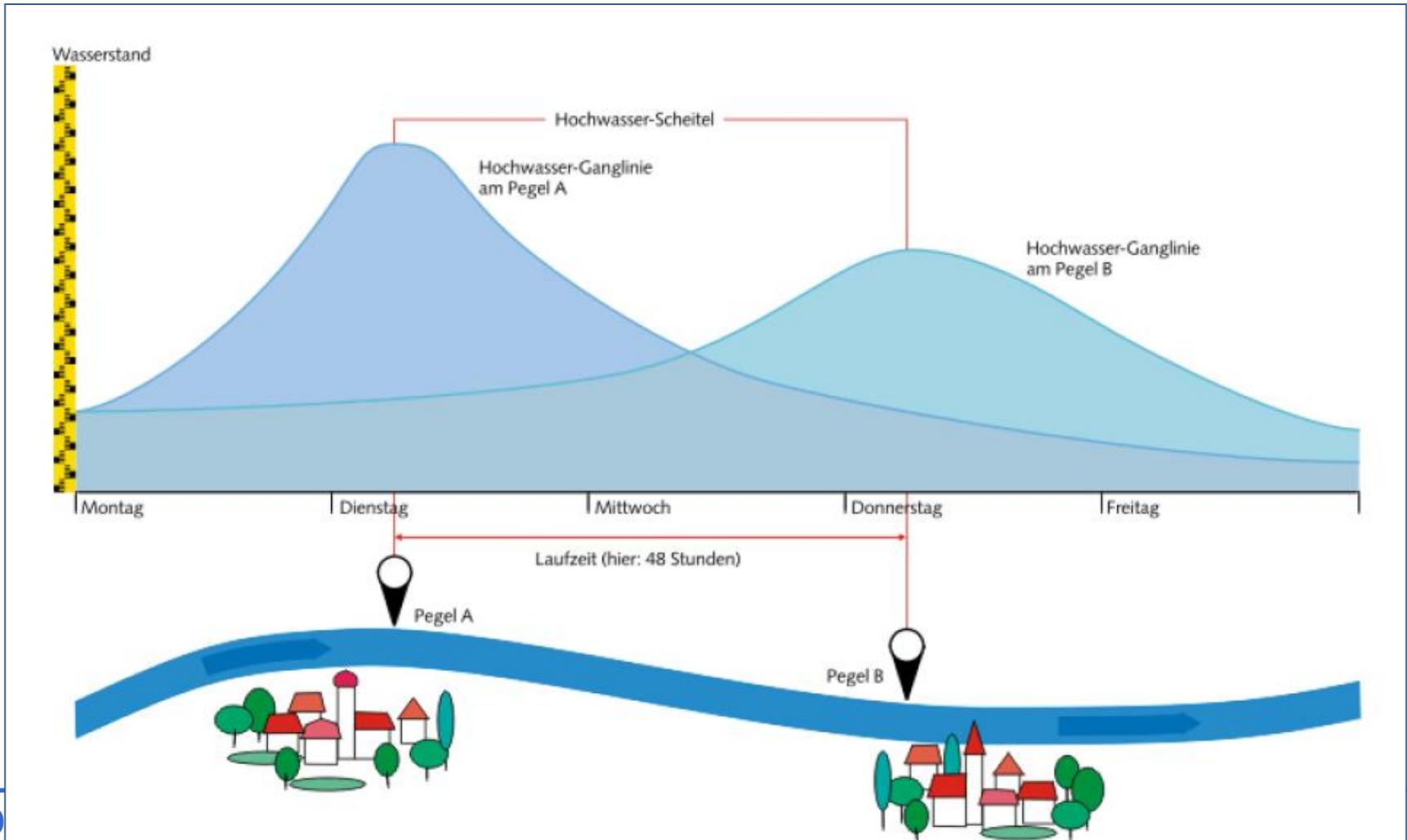
Translation und Retention im Gerinne

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



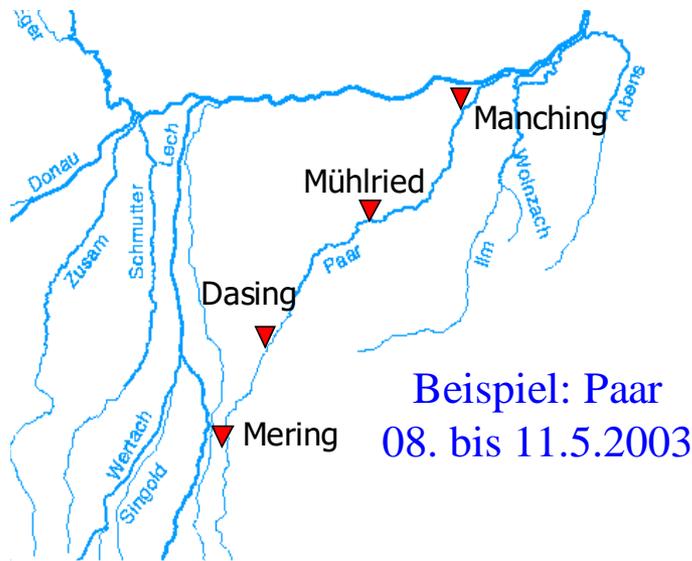
Translation und Retention im Gerinne

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

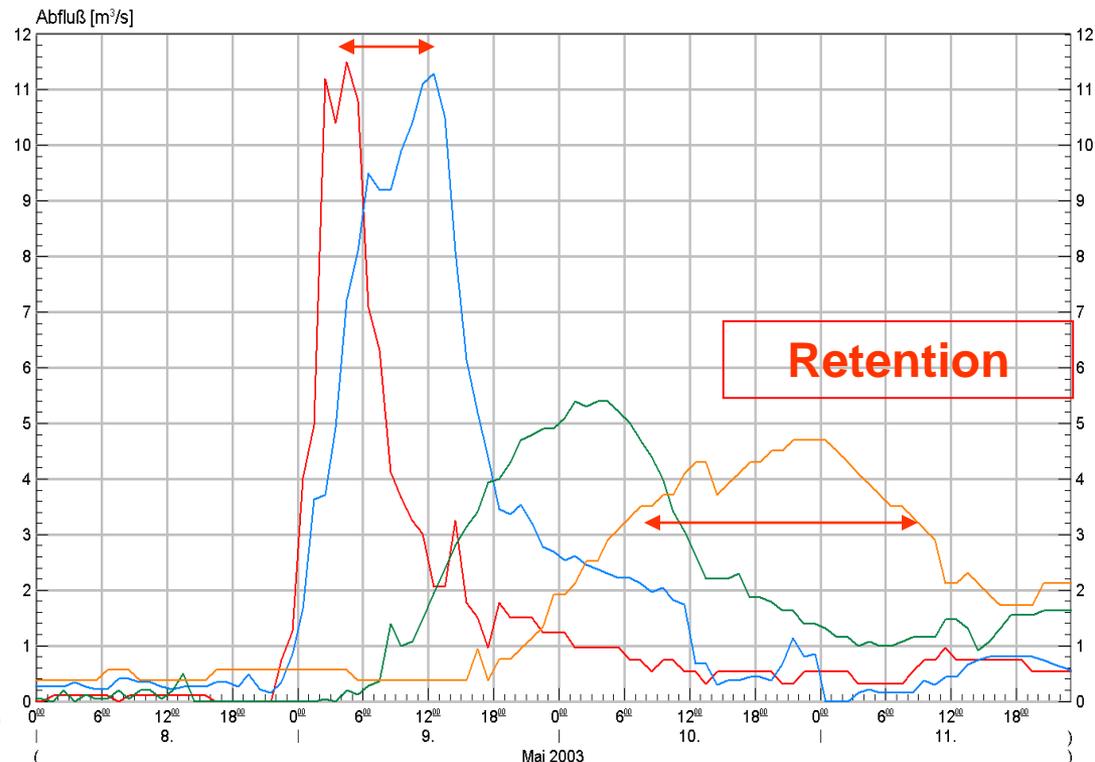


Translation und Retention im Gerinne

- 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

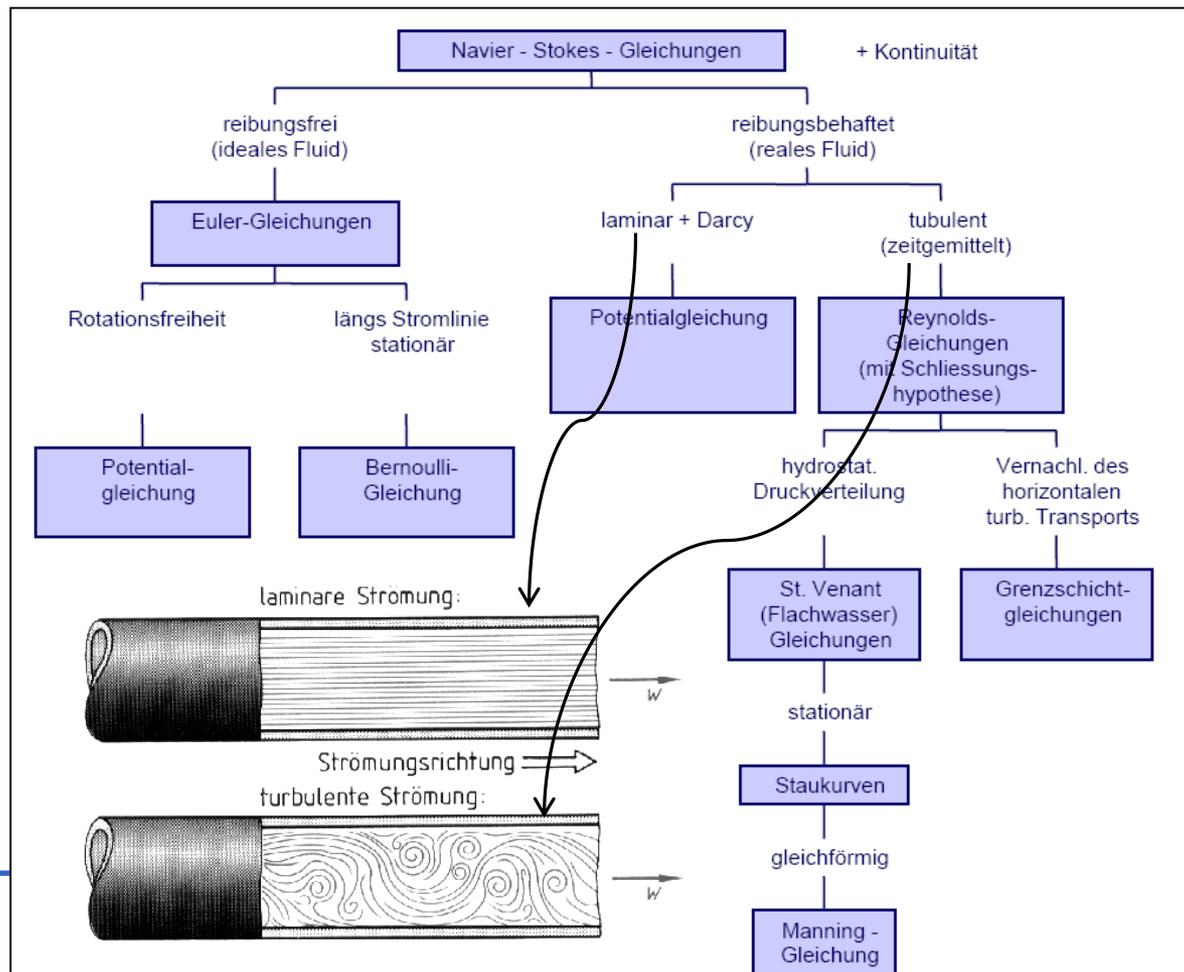


Retention

— Q — Mering — Q — Dasing — Q — Mühlried — Q — Manching (Ort)

Navier-Stokes-Gleichungen

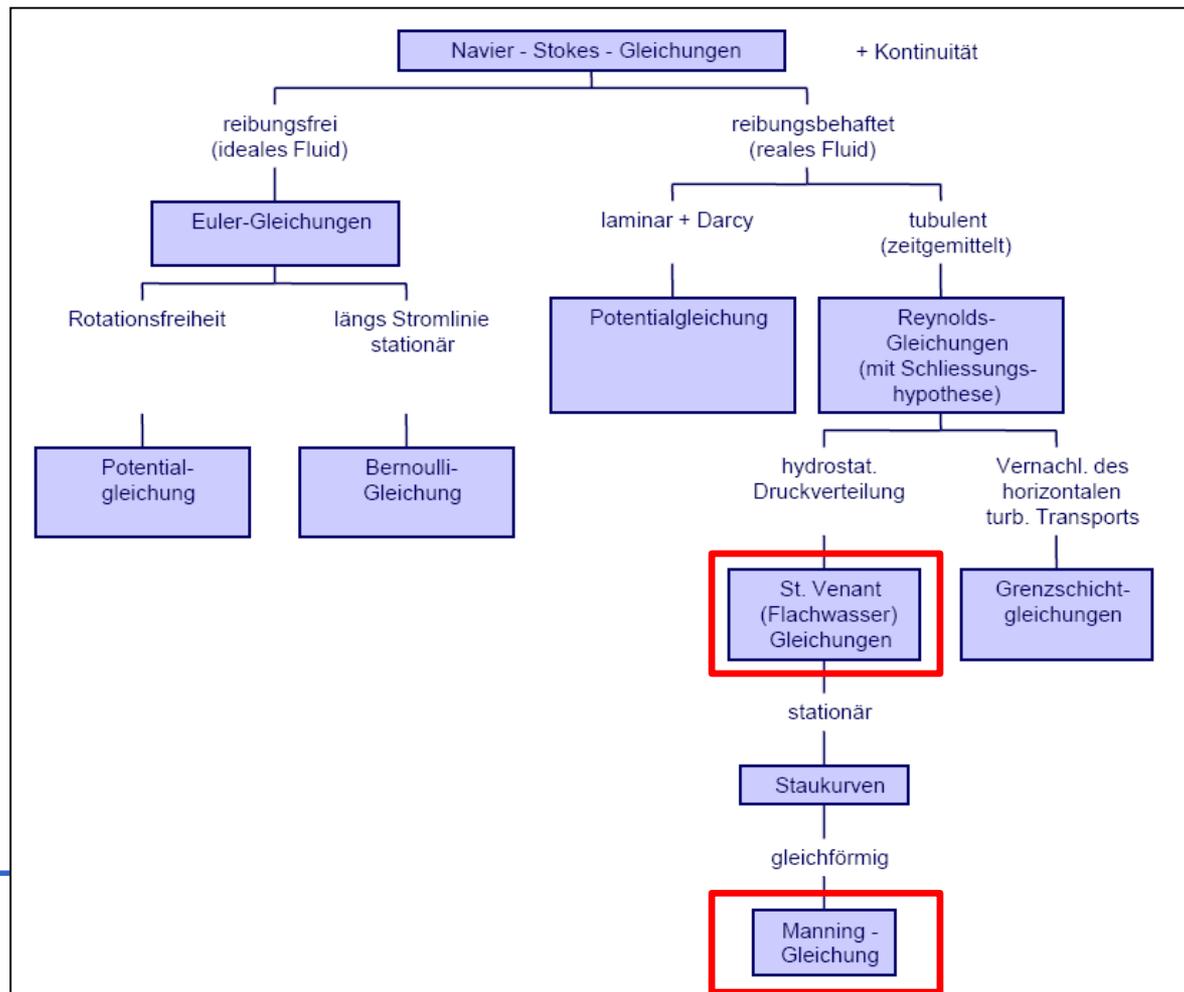
- Grundlagen der Strömungsberechnung:
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

Navier-Stokes-Gleichungen

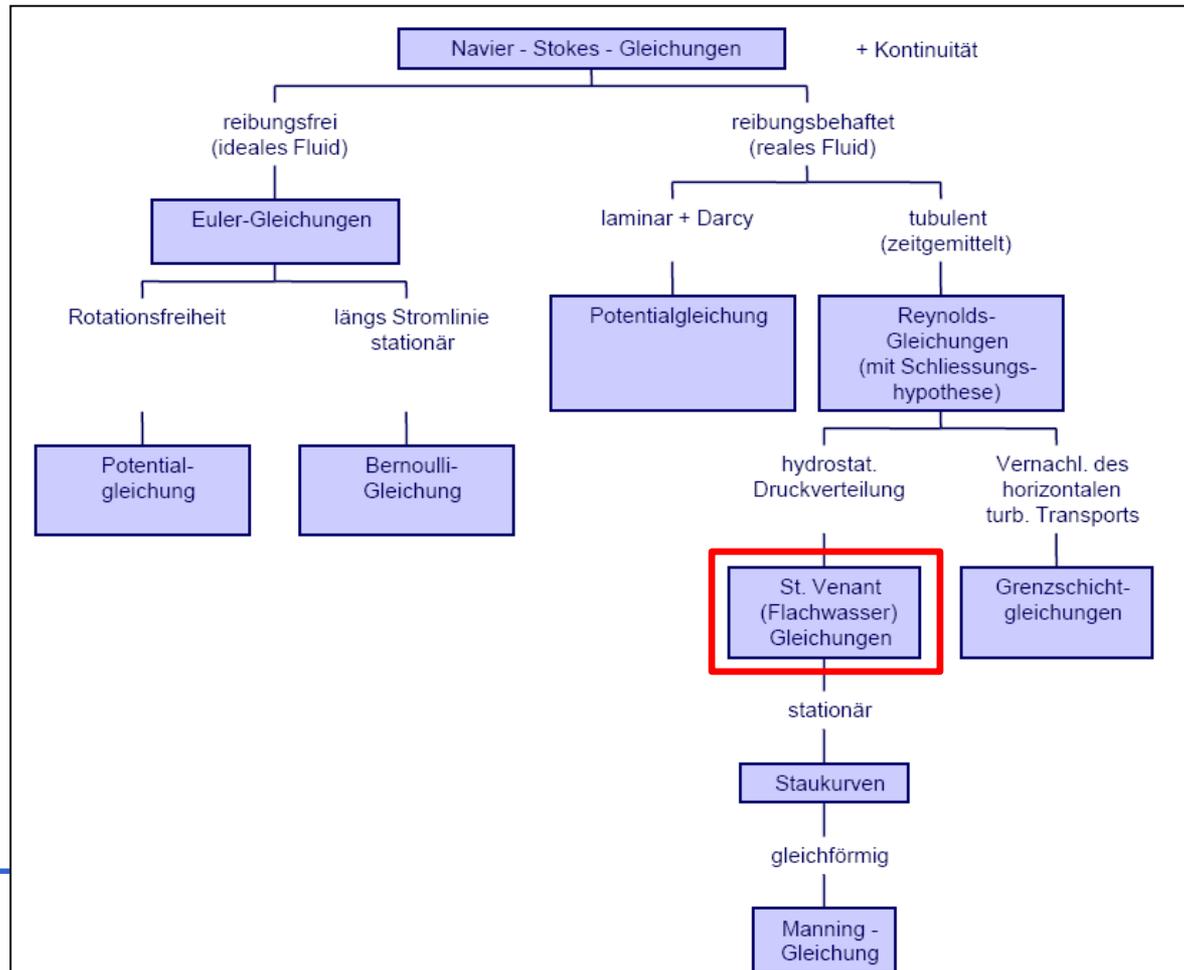
- Grundlagen der Strömungsberechnung:
Erhalt von Impuls, Masse und Energie → Gleichungen von Navier-Stokes
(nicht-lineares, partielles Differentialgleichungssystem)



Rutschmann (2009)

Hydrodynamische Modelle

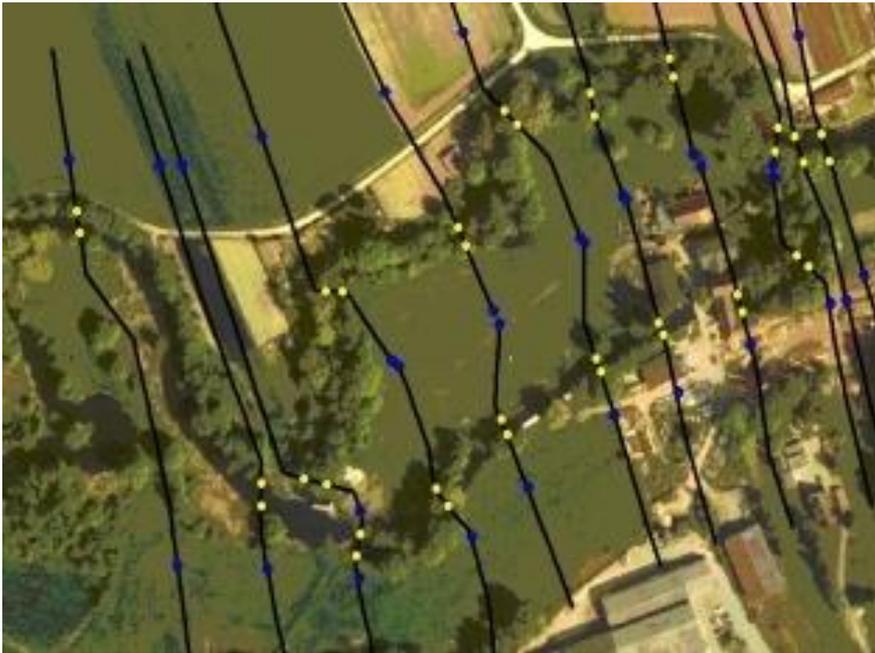
- Hydrodynamische Modelle: Lösung der Saint-Venant-Gleichungen



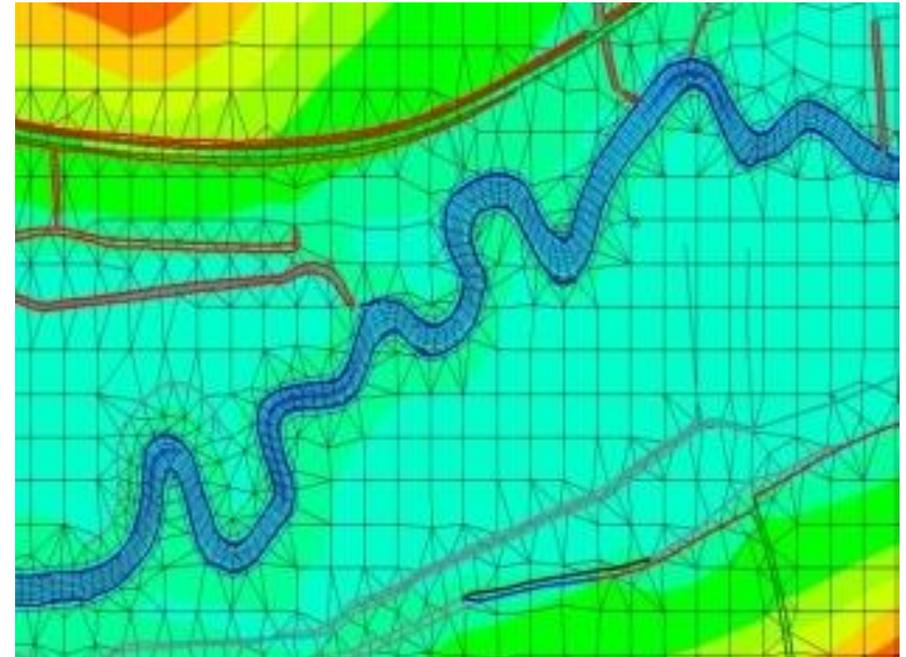
Rutschmann (2009)

Hydrodynamische Modelle

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



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



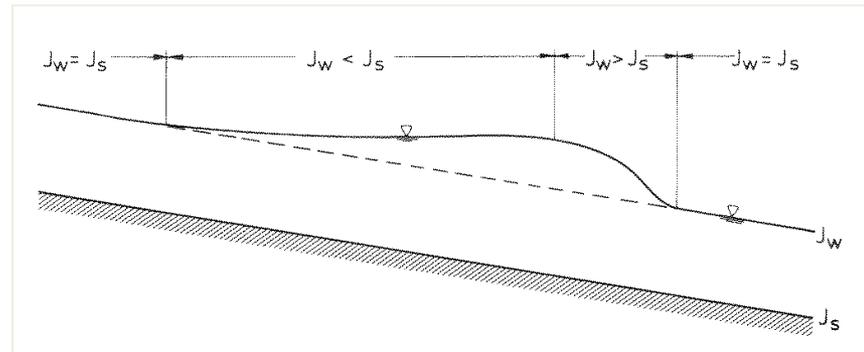
Beispiel für ein 2D-Gitternetz mit Geländepunkten und Bruchkanten

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

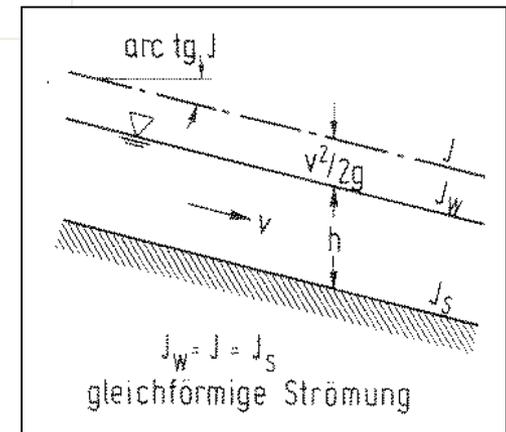
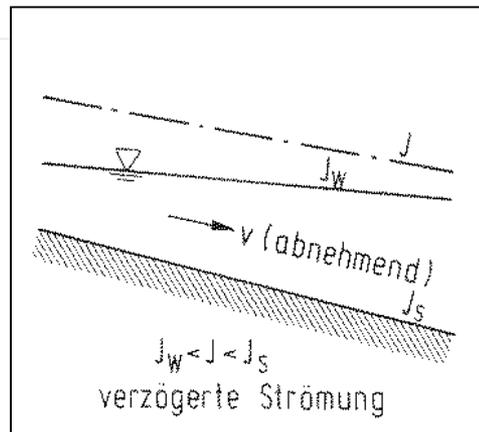
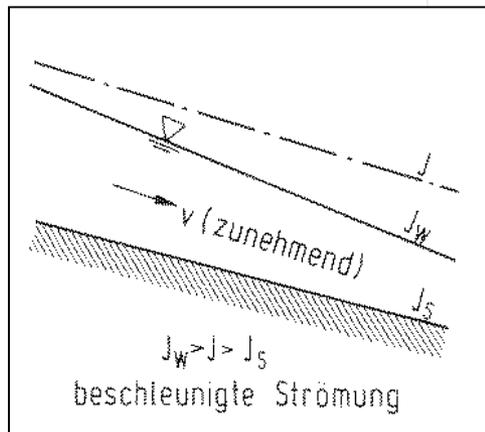
- Hydrologische Modelle:
Basierend auf Saint-Venant-Gleichungen, aber:
 - Kontinuitätsgleichung wird berücksichtigt
 - Energiegleichung wird vereinfacht, parametrisiert oder nicht berücksichtigt

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



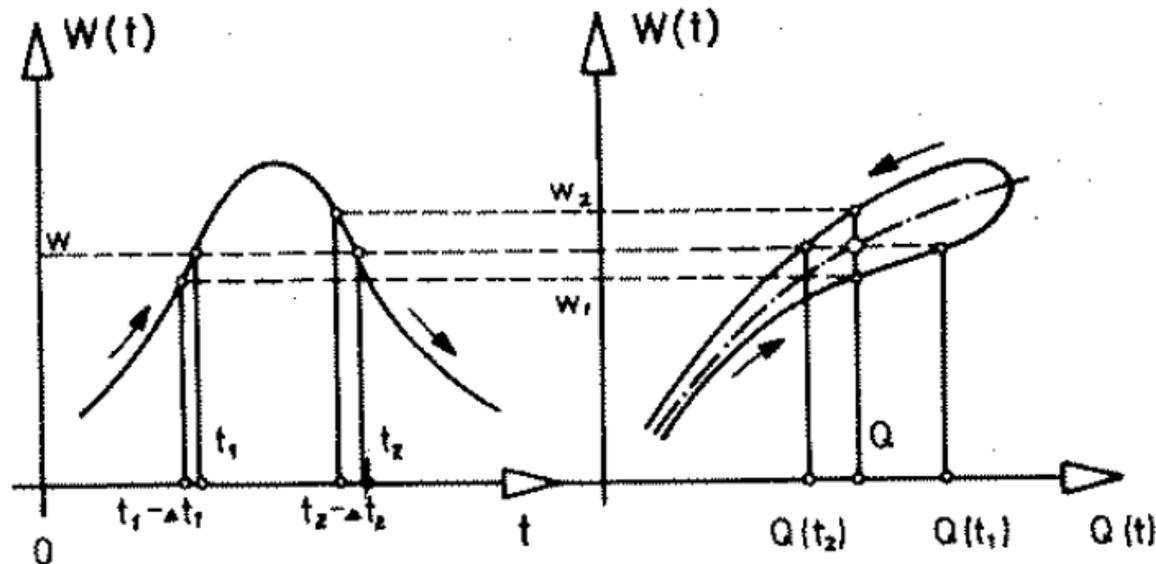
Längsschnitt durch eine Hochwasserwelle



Baumgartner & Liebscher (1990)

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

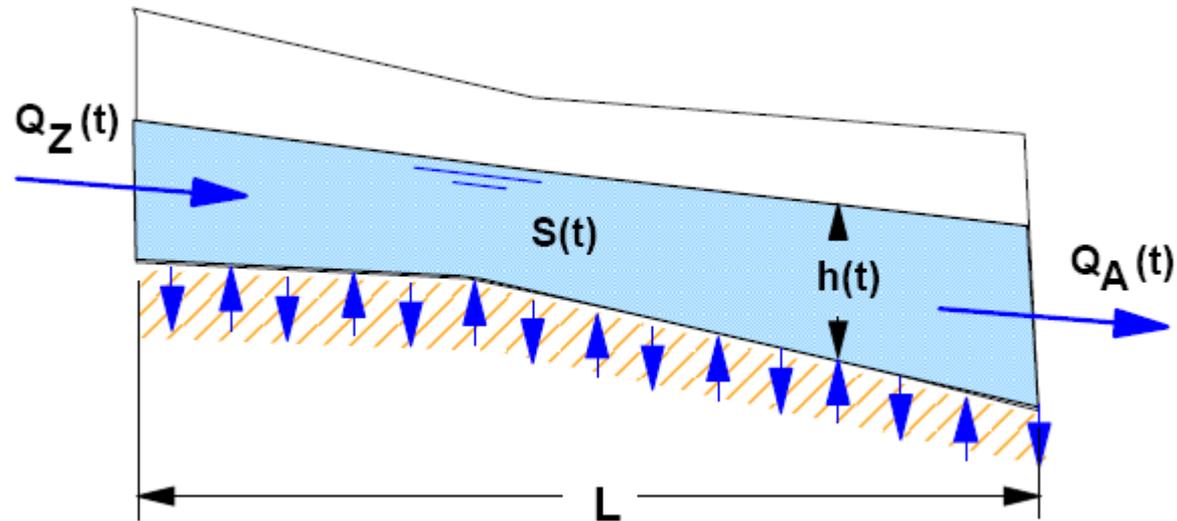


Beziehungen zwischen der ansteigenden und abfallenden Wasserstandsganglinie (links) und der Abflussschleife (WQ-Beziehung, rechts) während einer Hochwasserwelle in einem Flussprofil ($Q(t)$ = Abfluss; $W(t)$ = Wasserspiegelniveau; t = Zeit)

Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

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

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



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 (V/Q-Beziehungen) erfolgen, die z.B. aus Wasserspiegellagen-Berechnungen 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.

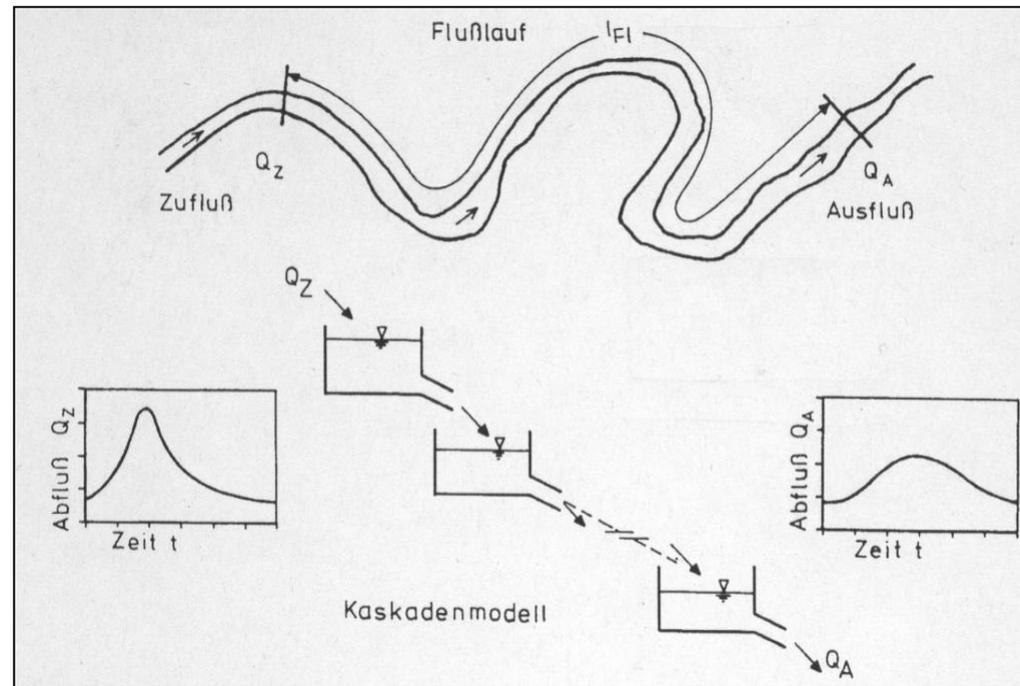
Hydrologische Flood-Routing-Verfahren

- 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.



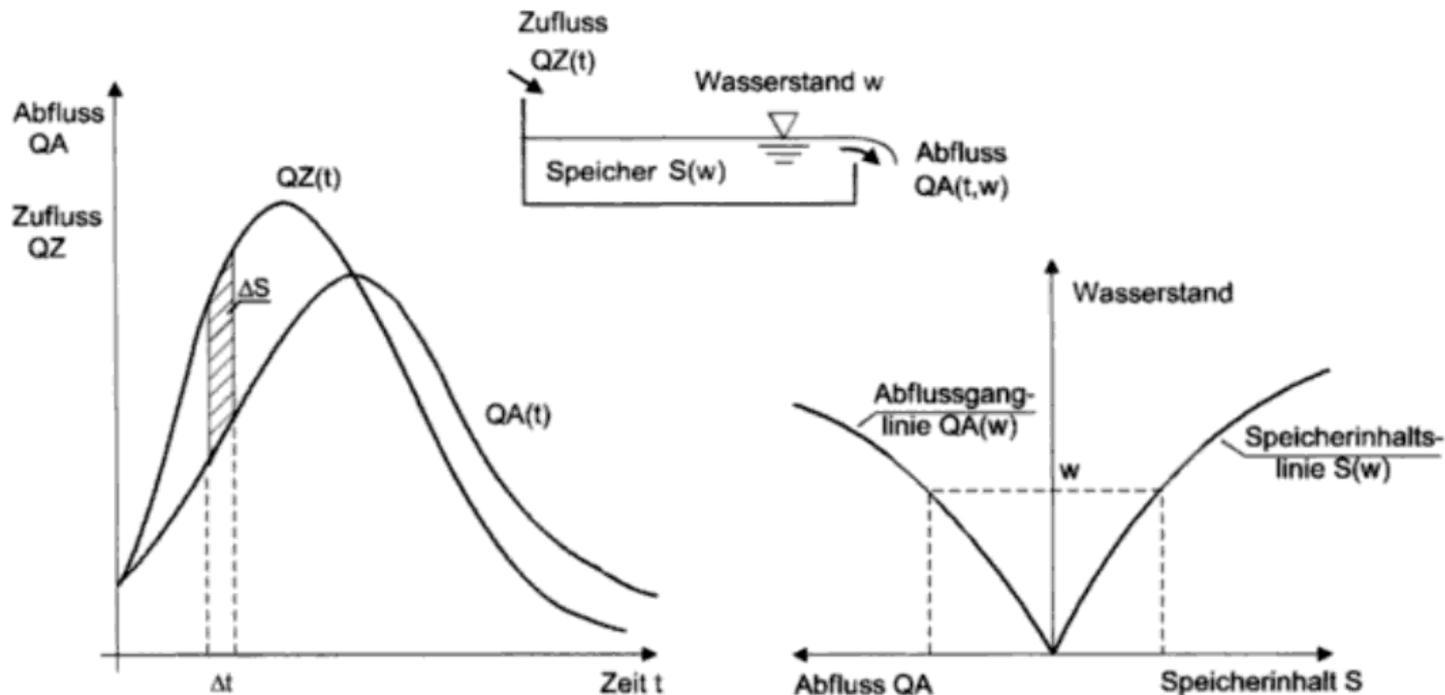
Maniak (2005)

Einzellinearspeicher

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

$$Q_z(t) - Q_a(t) = dS(t)/dt$$

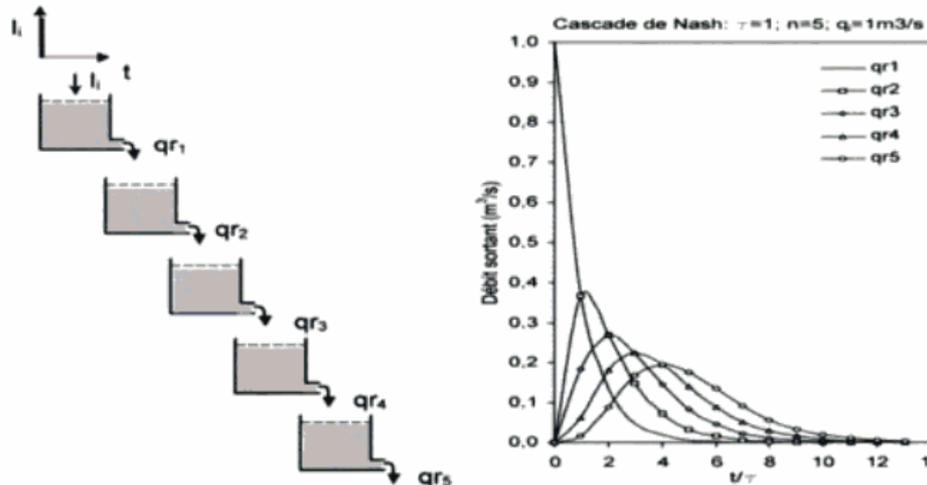
$$dQ/dt = QZ - QA = dV/dt$$



Patt (2001)

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.



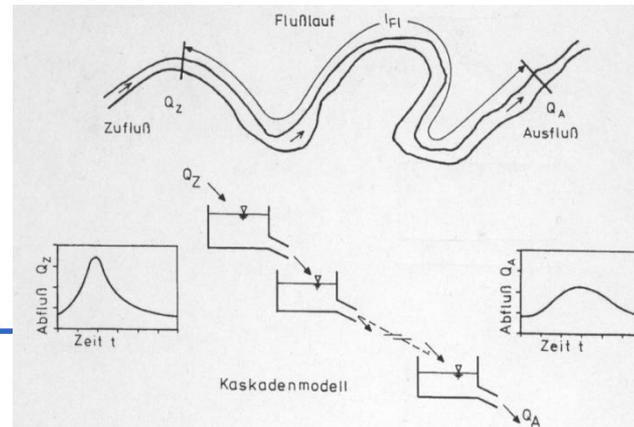
Besbes (2006)

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

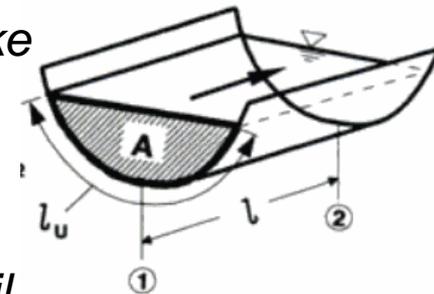
- Bestimmung der Rückhaltekonstanten des Einzellinearspeichers:
Um den Berechnungsaufwand einzugrenzen, werden bei dem in LARSIM verwendeten hydrologischen Ansatz einige vereinfachende Annahmen getroffen:
 - Einheitliche geometrische Verhältnisse innerhalb der betrachteten Gerinnestrecke
 - Annahme stationär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

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

<i>RK</i>	<i>[h]</i>	<i>Speicherkonstante für die Gewässerteilstrecke</i>
<i>i</i>	<i>[-]</i>	<i>Index für den Berechnungszeitschritt</i>
<i>L</i>	<i>[m]</i>	<i>Länge der Gewässerteilstrecke</i>
<i>A</i>	<i>[m²]</i>	<i>Benetzter Querschnitt des Flussprofils</i>
<i>n</i>	<i>[-]</i>	<i>Index für den Wasserstand im Gewässerprofil</i>
<i>QA</i>	<i>[m³/s]</i>	<i>Abfluss aus der Gewässerteilstrecke</i>
<i>QZ</i>	<i>[m³/s]</i>	<i>Zufluss in die Gewässerteilstrecke</i>



Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

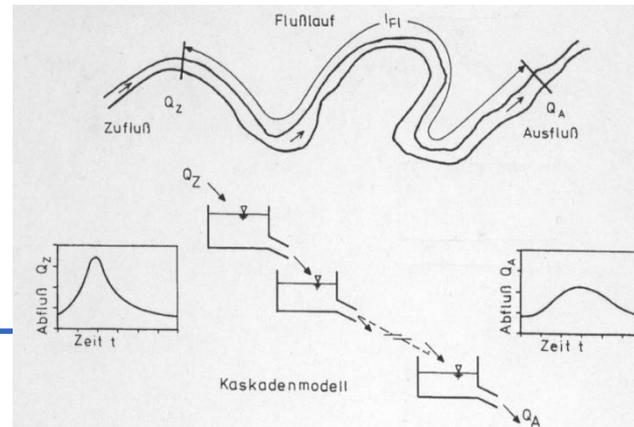
- Vorgehen bei der Berechnung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM:

Ermittlung des benetzten Umfangs

Anwendung der Williams-Gleichung

Verwendung der Rückhaltekonstanten für den Einzellinearspeicher

Berechnung der Speicherkaskade



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:

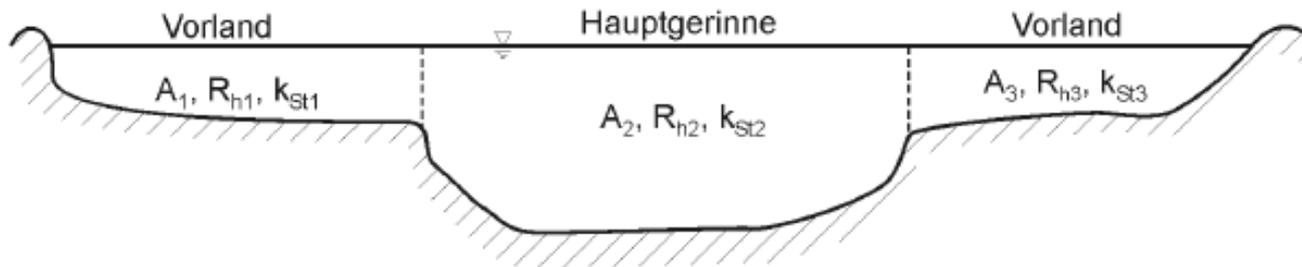
$$Q_n = A_n \cdot EK \cdot K_S \cdot \left(\frac{A_n}{U}\right)^{\frac{2}{3}} \cdot I^{\frac{1}{2}}$$

Q	<i>Stationär gleichförmiger Abfluss nach Manning-Strickler [m³/s]</i>
A	<i>Benetzter Querschnitt des Flussprofils [m²]</i>
n	<i>Index für den Wasserstand im Gewässerprofil []</i>
EK	<i>Mögliche Kalibrierungsgröße in LARSIM zur Modifizierung der Rauigkeitsbeiwerte []</i>
KS	<i>Geschwindigkeitsbeiwert nach Manning-Strickler [m^{1/3}/s]</i>
U	<i>Benetzter Umfang des Flussprofils [m]</i>
I	<i>Gefälle der Flussstrecke []</i>

Bestimmung des benetzten Querschnitts

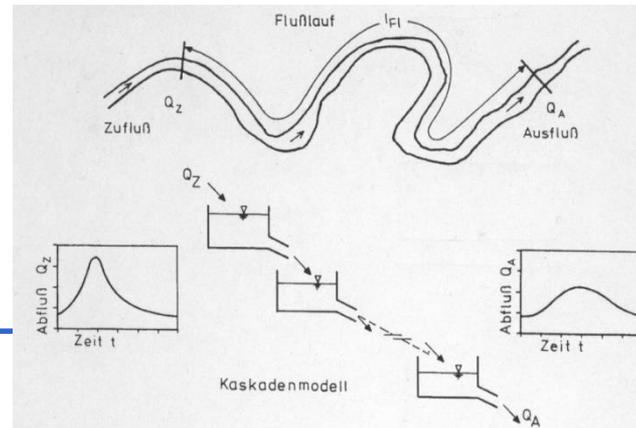
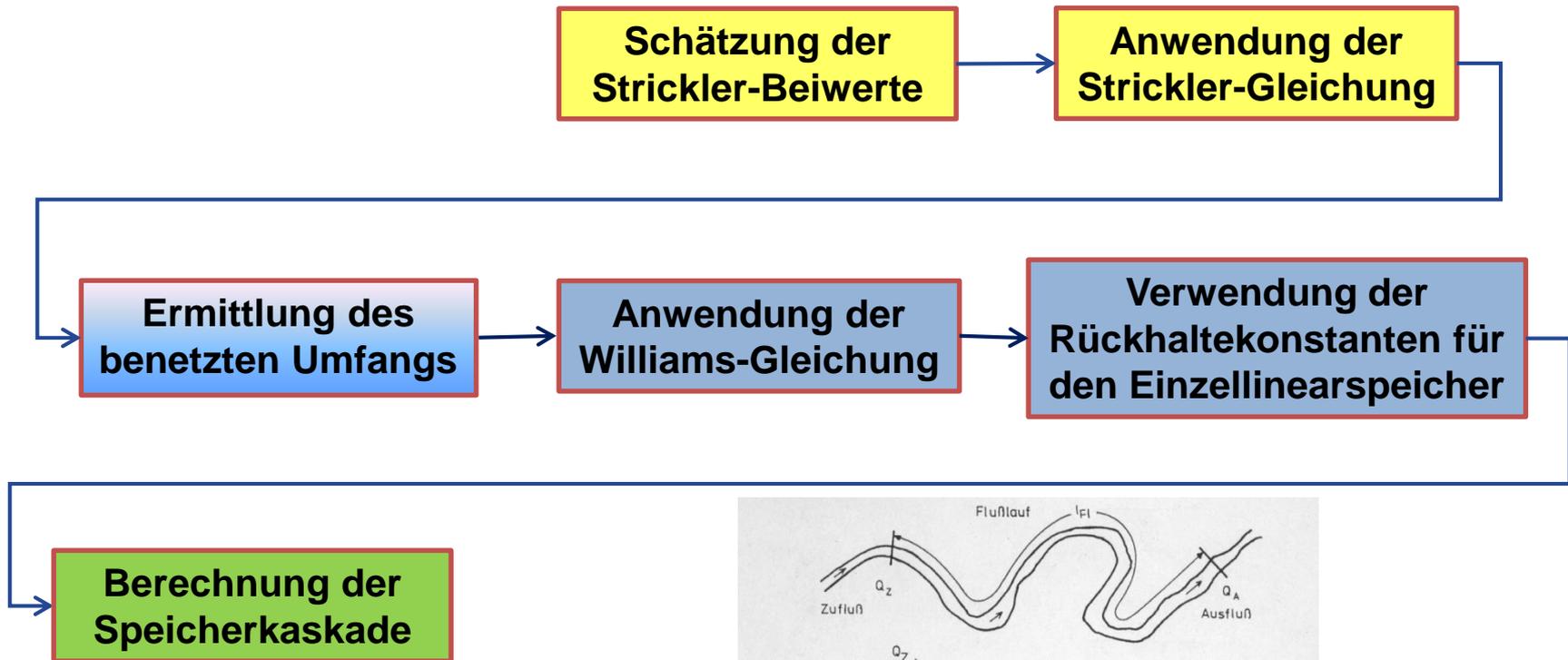
- In LARSIM erfolgt die Ermittlung des Gesamtabflusses in gegliederten Profilen (Hauptgerinne und Vorländer getrennt) mit unterschiedlichen Wassertiefen bzw. Rauigkeitsverhältnissen durch die Berechnung der Summe der Teilabflüsse:

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



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 Rauhigkeit 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 Rauheitsbeiwerten 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

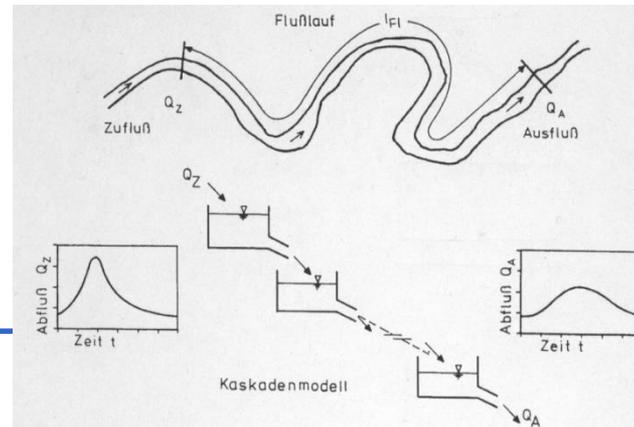
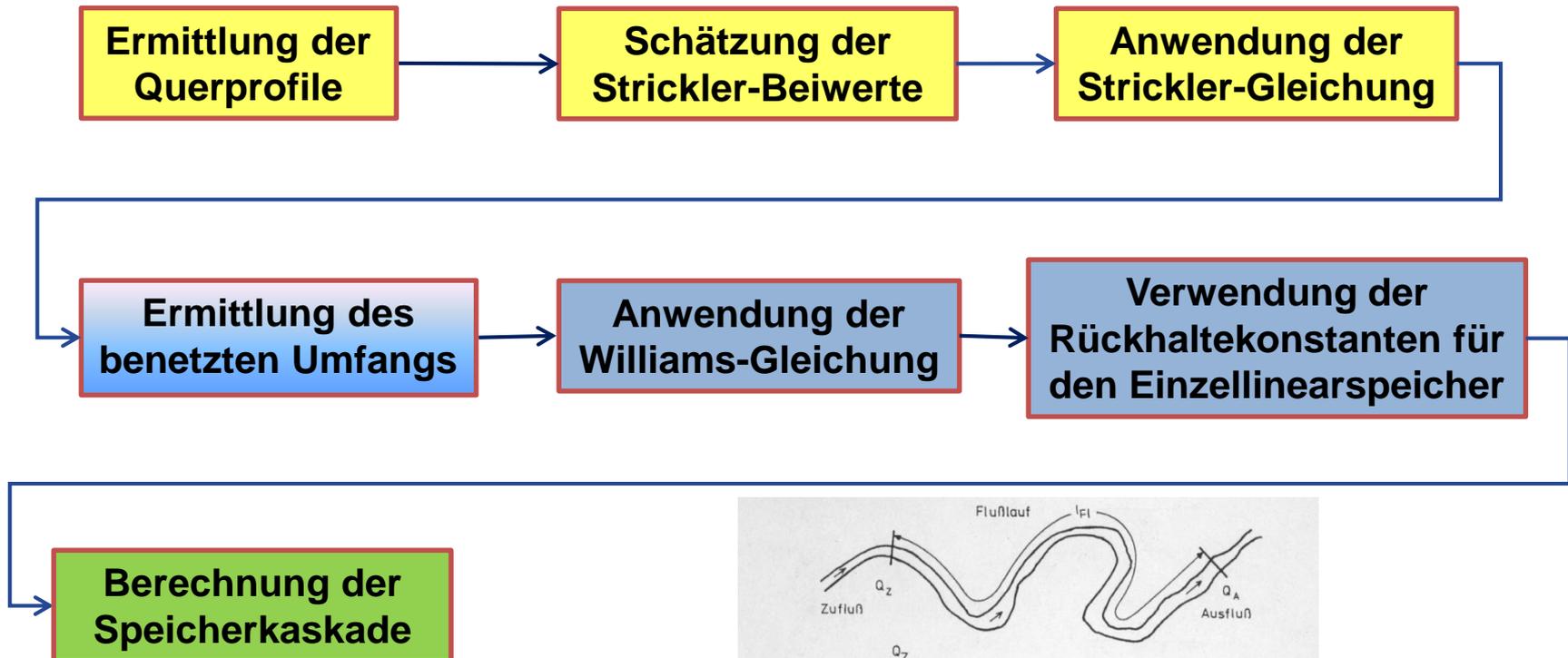
- Um den Abfluss Q_{Manning} berechnen zu können, sind weitere Angaben erforderlich:
 - 1) Strickler-Beiwerte: Bei der Modellkalibrierung können die geschätzten Kst-Werte durch Eichparameter modifiziert werden. Der Kst-Wert geht linear in die Berechnung der Fließgeschwindigkeit und damit auch in den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

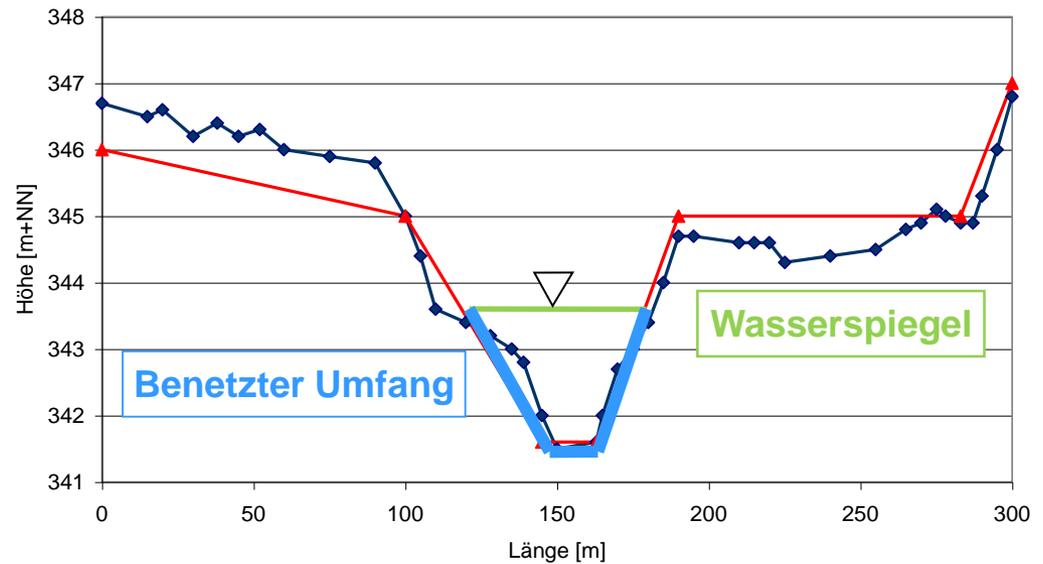
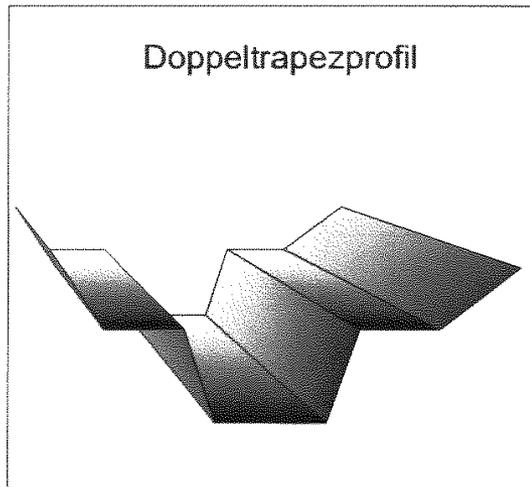


Bestimmung der Querprofile

- 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.

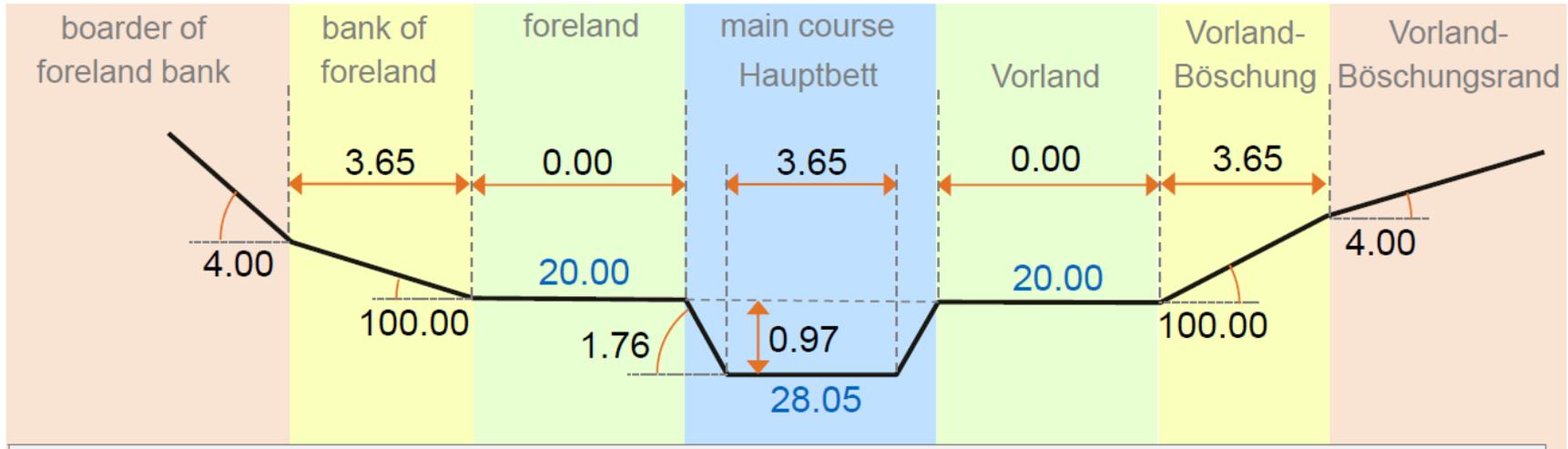
Bestimmung der Querprofile

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



Bestimmung der Querprofile

- Annäherung der Querprofile in LARSIM durch *Tripel-Trapez-Querprofil*:



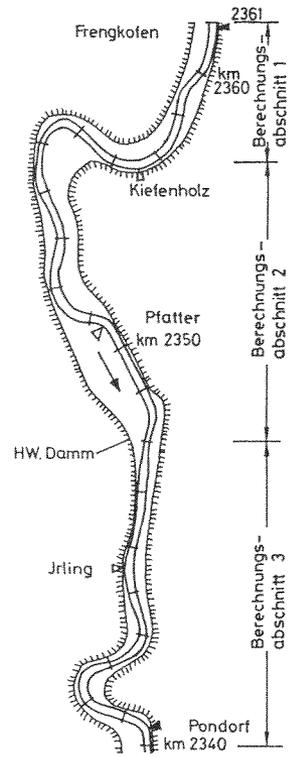
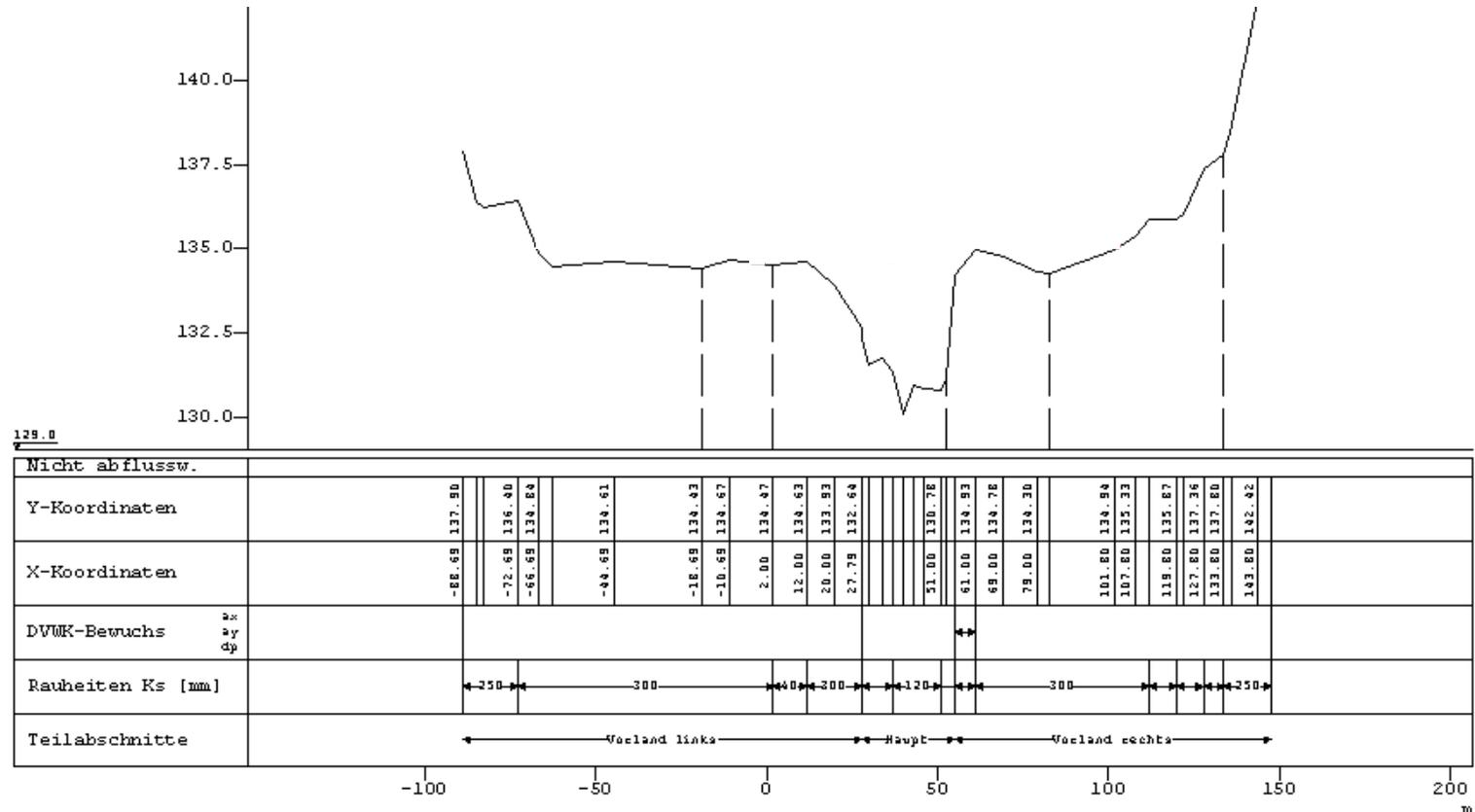
*															
* Gesamtes Einzugsgebiet [qkm] = 53.00															
* Gerinnebildender Abfluss [cbm/s] = 12.64															
60	43378	1.000	0.500	541.300	381.800	4477.500	5544.500	1							
60	109828	108069	0.01238	0.97	3.65	0.00	0.00	2							
60	3.65	3.65	1.76	100.00	100.00	4.00	4.00	3a							
60	28.05	20.00	20.00						3b						
60	0	17	0	0	0	0	0	0	50	0	0	11	6	0	4a
60	16	0													4b
60	0	138	0	0	0	0	0	0	139	0	0	143	143	0	5a
60	120	0													5b

<tgb.dat>:

HM	BM	BL	BR	BBL	BBR	BNM	BNL	BNR	BNVRL	BNVRR	SKM	SKL	SKR
0.97	3.65	0	0	3.65	3.65	1.76	100.0	100.0	4.0	4.0	28.05	20.00	20.00

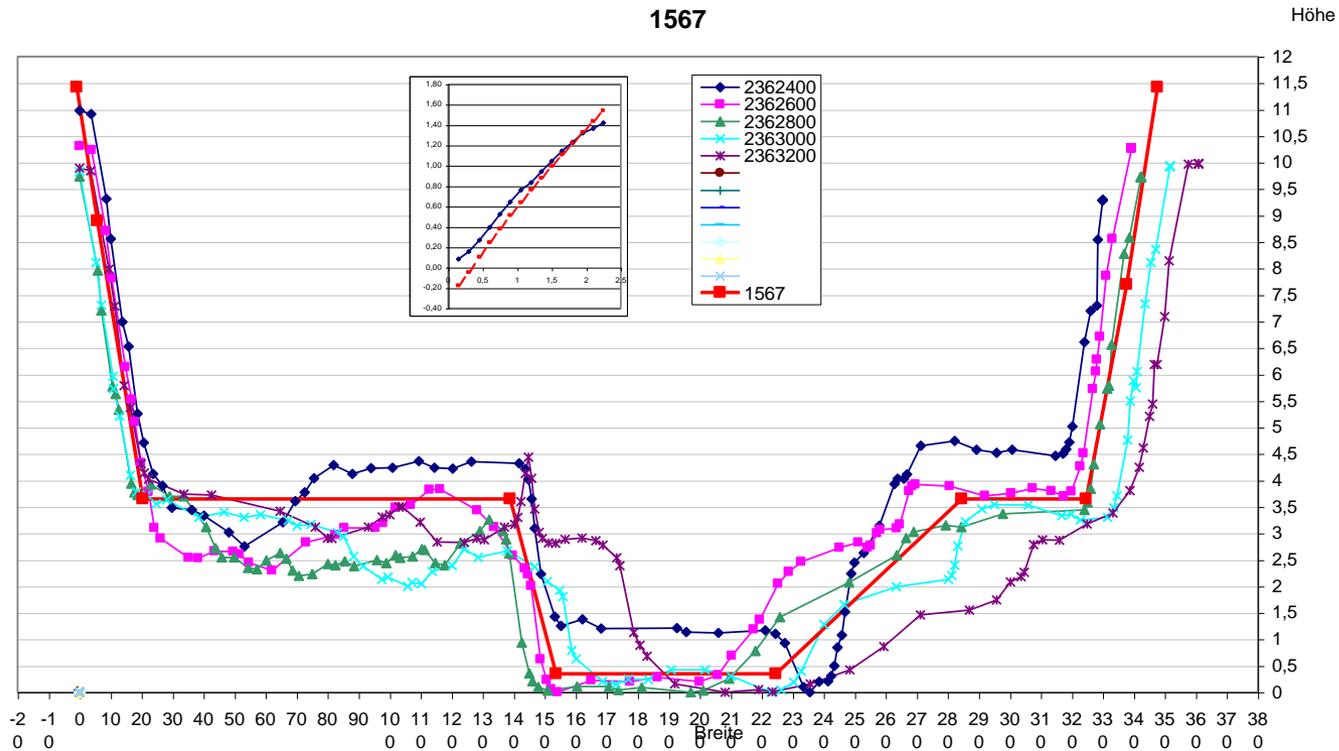
Bestimmung der Querprofile

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



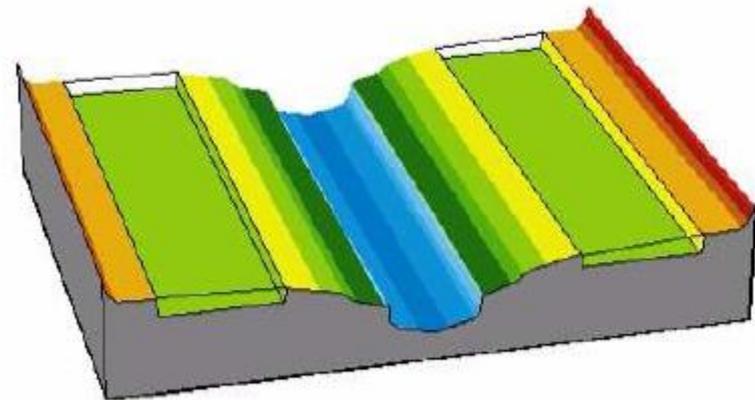
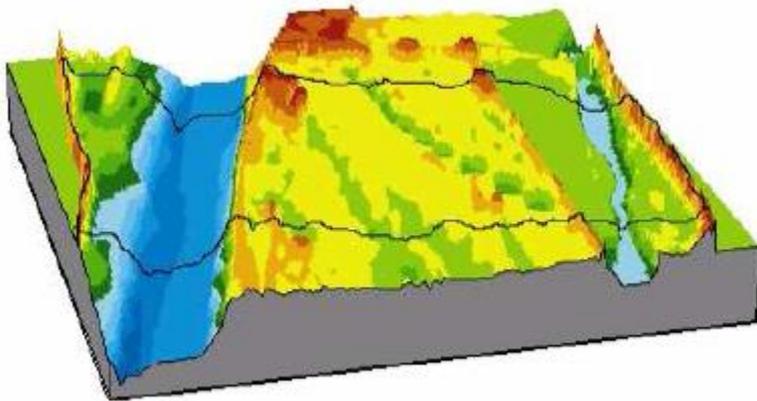
Bestimmung der Querprofile

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



Bestimmung der Querprofile

- Ermittlung der Gerinnedaten:
 - 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
 - Morphologischer Ansatz zur Abschätzung der Hauptbettiefen und -breiten. Ermittelt aus Korrelationsanalysen vieler Flüsse mit unterschiedlichen Einzugsgebietsgrößen.

Bestimmung der Querprofile

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

Bestimmung der Querprofile

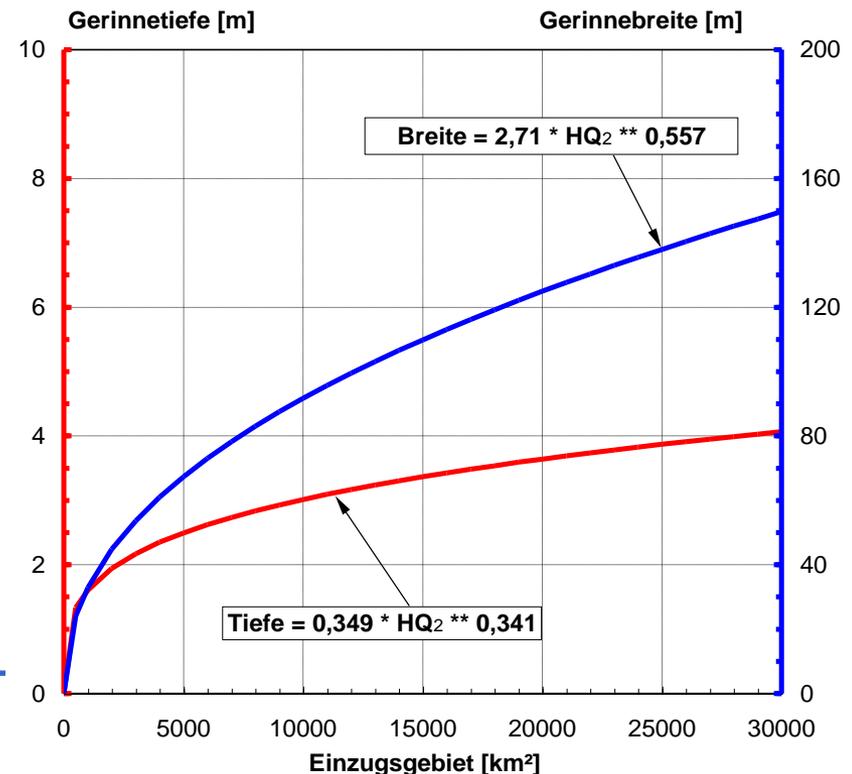
- Ermittlung der Gerinnedaten:
 - Von Allen et al. (1994) wurden Exponenten bzw. Koeffizienten für die Formel anhand von 674 Querprofilen unterschiedlicher Flüsse in den USA ermittelt.
 - Vorlandbreiten werden gleich der Sohlbreite des Hauptbetts gesetzt.
 - Böschungsneigung für das Hauptbett 1,5 und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

$$B_w = 1,696 \pm 0,166 Q_{MHQ}^{0,552 \pm 0,026} \quad \text{Moseldaten}$$

$$= 2,710 Q_{GB}^{0,557} \quad \text{Allen et al.}$$

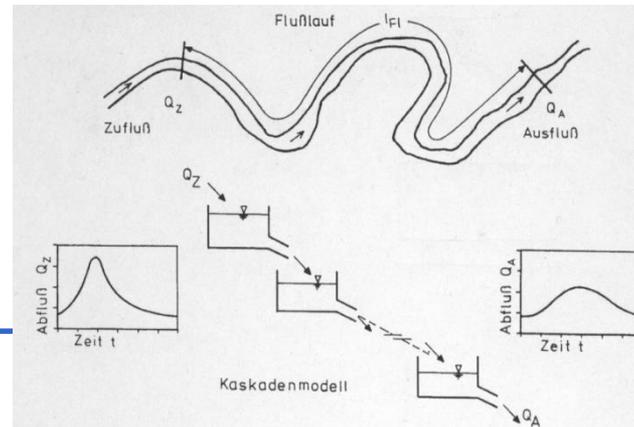
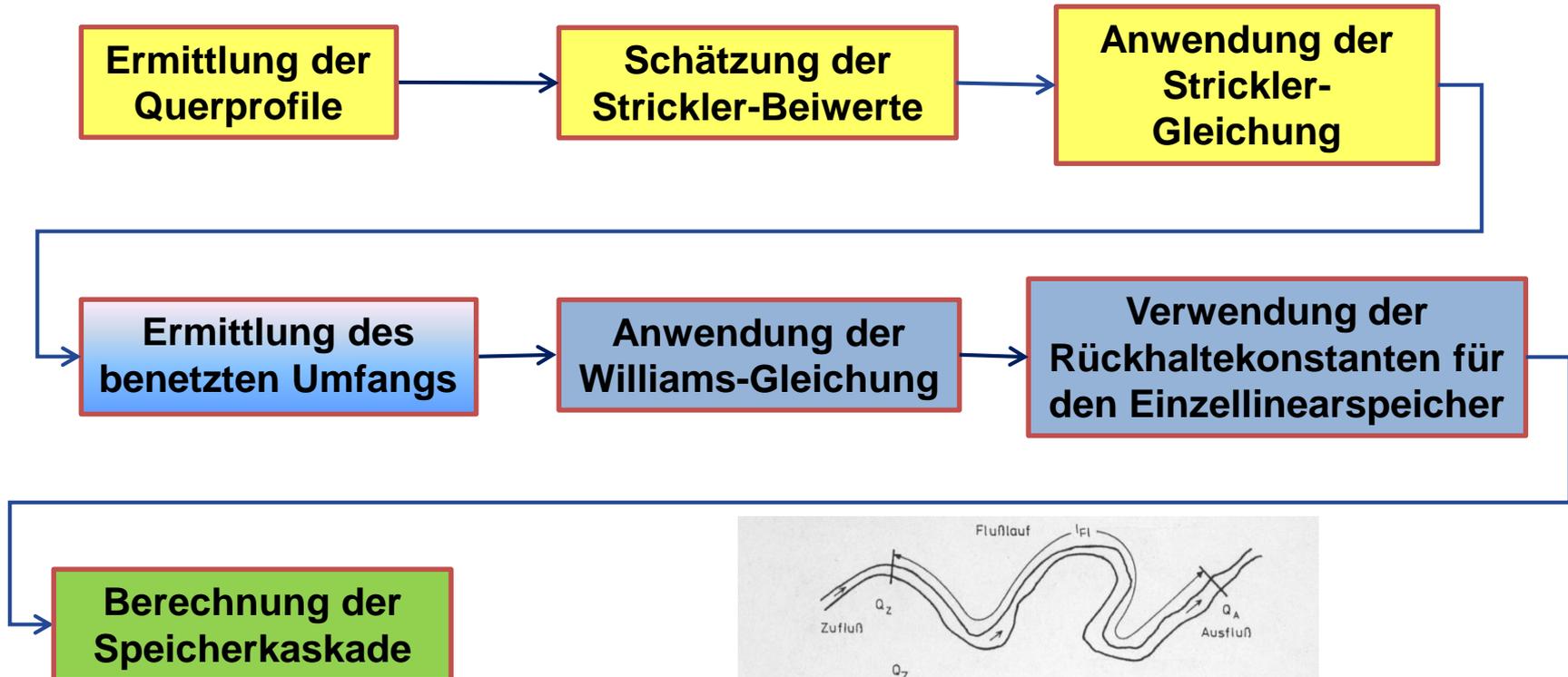
$$T_m = 0,328 \pm 0,028 Q_{MHQ}^{0,388 \pm 0,022} \quad \text{Moseldaten}$$

$$= 0,349 Q_{GB}^{0,341} \quad \text{Allen et al.}$$



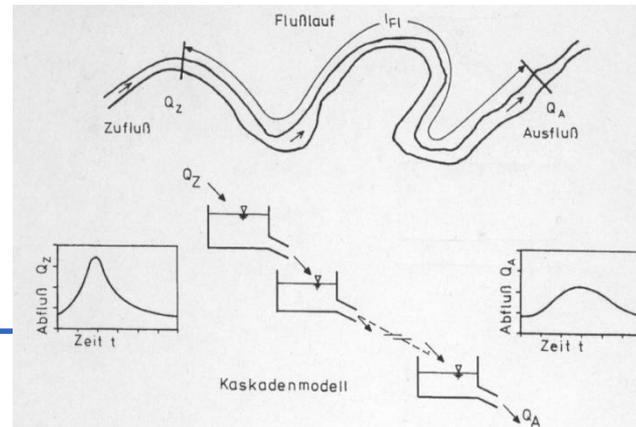
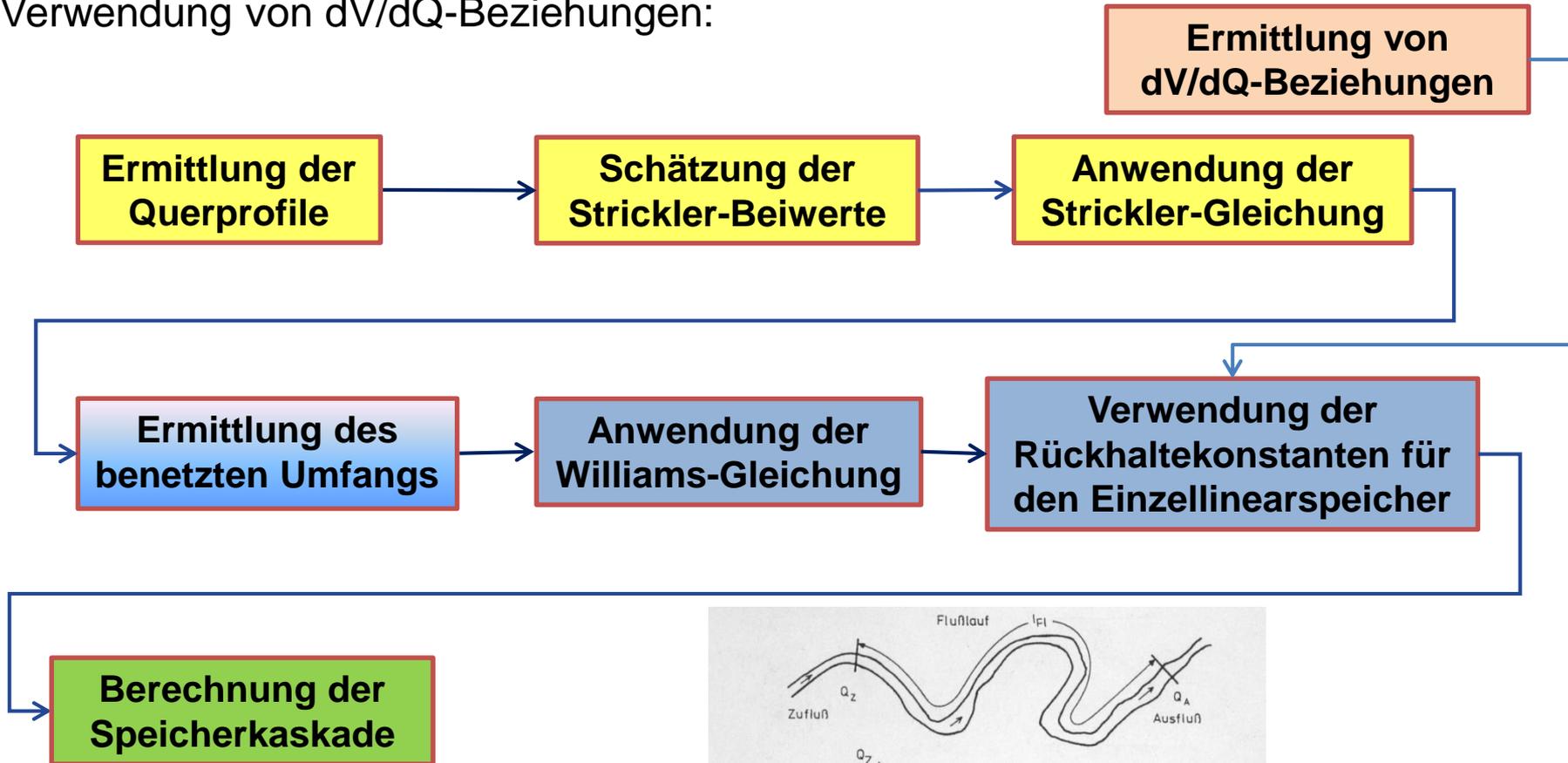
Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

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



Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

- Zusammenfassung des hydrologischen Flood-Routing in LARSIM unter Verwendung von dV/dQ -Beziehungen:

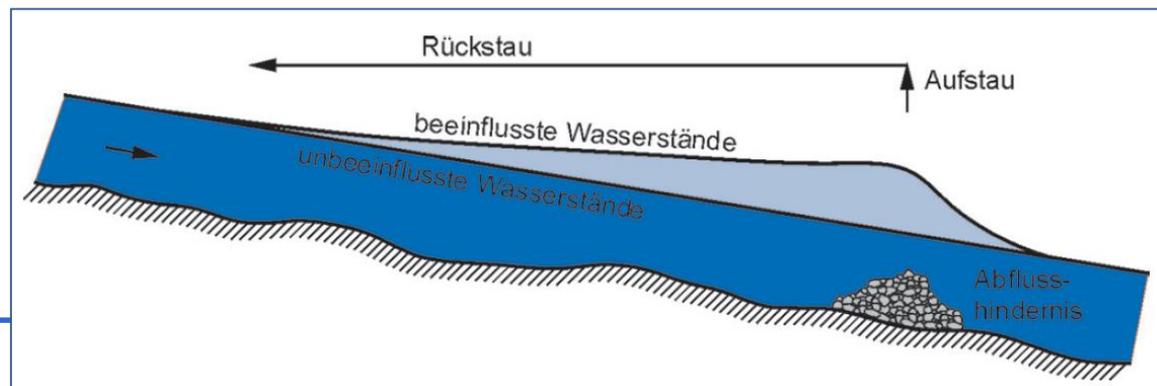


Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

- 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 Stationarität und Gleichförmigkeit des Abflusses: Anwendung hydrologischer Flood-Routing-Verfahren ist immer dann möglich, wenn eine enge Beziehung zwischen Wasserstand und Abfluss besteht.

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



Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

- 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 (insbesondere präzise Erfassung des Übergangs zwischen dem Hauptbett und den Vorländern, aber Breite des Hauptbetts und der Vorländern). 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.

Hydrologisches Flood-Routing in LARSIM

- Aufgaben für die Anwender (Flood-Routing):
 - Bei der Kalibrierung des Modells werden z.T. die Rauigkeitsbeiwerte der Gerinne angepasst.
 - Kontrolle der berechneten Abflüsse hinsichtlich eines systematischen Zeitversatzes zwischen gemessener und berechneter Ganglinie (v.a. in größeren Einzugsgebieten)
 - Kontrolle auf Auffälligkeiten in den Abflussganglinien, die auf Ausuferungen hindeuten
- Einflussmöglichkeiten des Anwenders:
 - Nachkalibrierung, Bereitstellung verbesserter Gerinneinformation, Einbindung dV/dQ -Beziehungen

Literatur

- Baumgartner A. & Liebscher H.-J. (1990): Allgemeine Hydrologie. Quantitative Hydrologie. - 2. Auflage. Gebrüder Bornträger
- BLfU (2012): <https://www.lfu.bayern.de/wasser/hydraulik/einsatzgebiete/index.htm>
- Disse M. & Mitterer J. (2017): Flood Risk and Flood Management – Exercise. TU München
- Maniak U. (2005): Hydrologie und Wasserwirtschaft. Eine Einführung für Ingenieure. - 5. bearb. u. erw. Auflage, Springer Berlin
- Patt H. (2001) (Hrsg.): Hochwasser-Handbuch – Auswirkungen und Schutz. – Springer-Verlag
- Rutschmann P. (2009): Vorlesungsskript TU München