

Abfluss & Abflussbildung

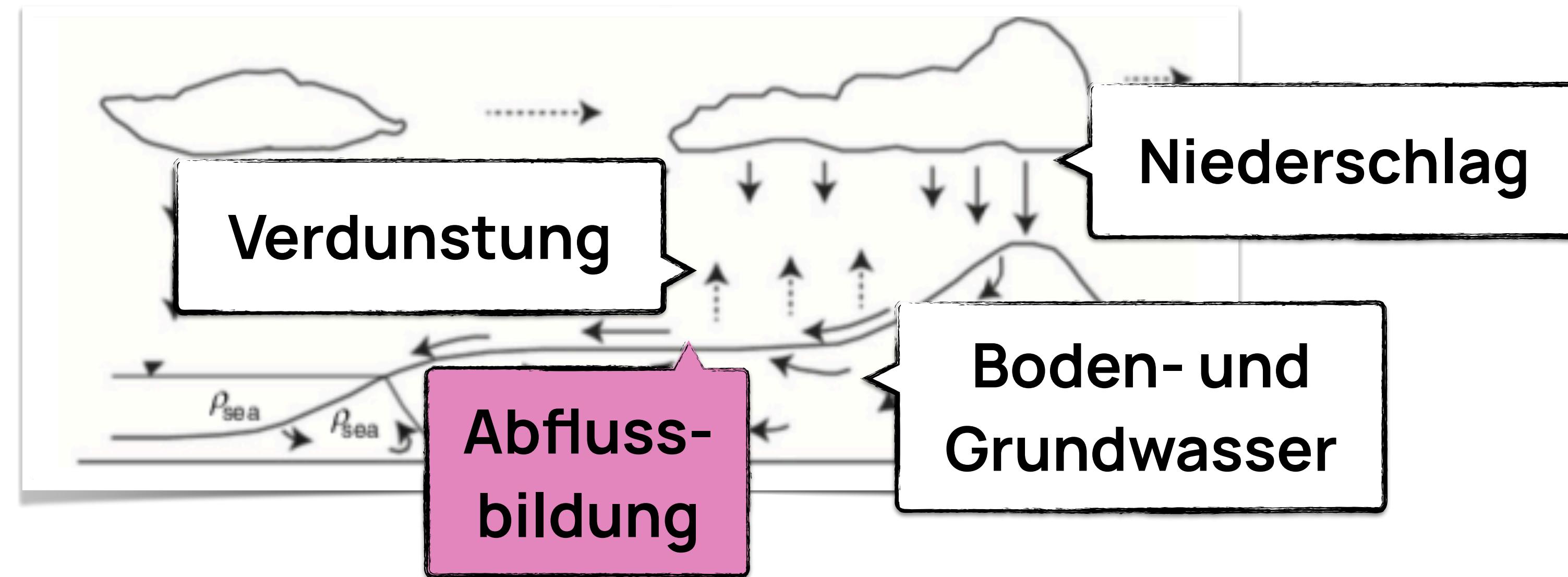
Grundlagen der Hydrologie

Primer in Hydrology

4

Elemente des Wasserkreislaufs

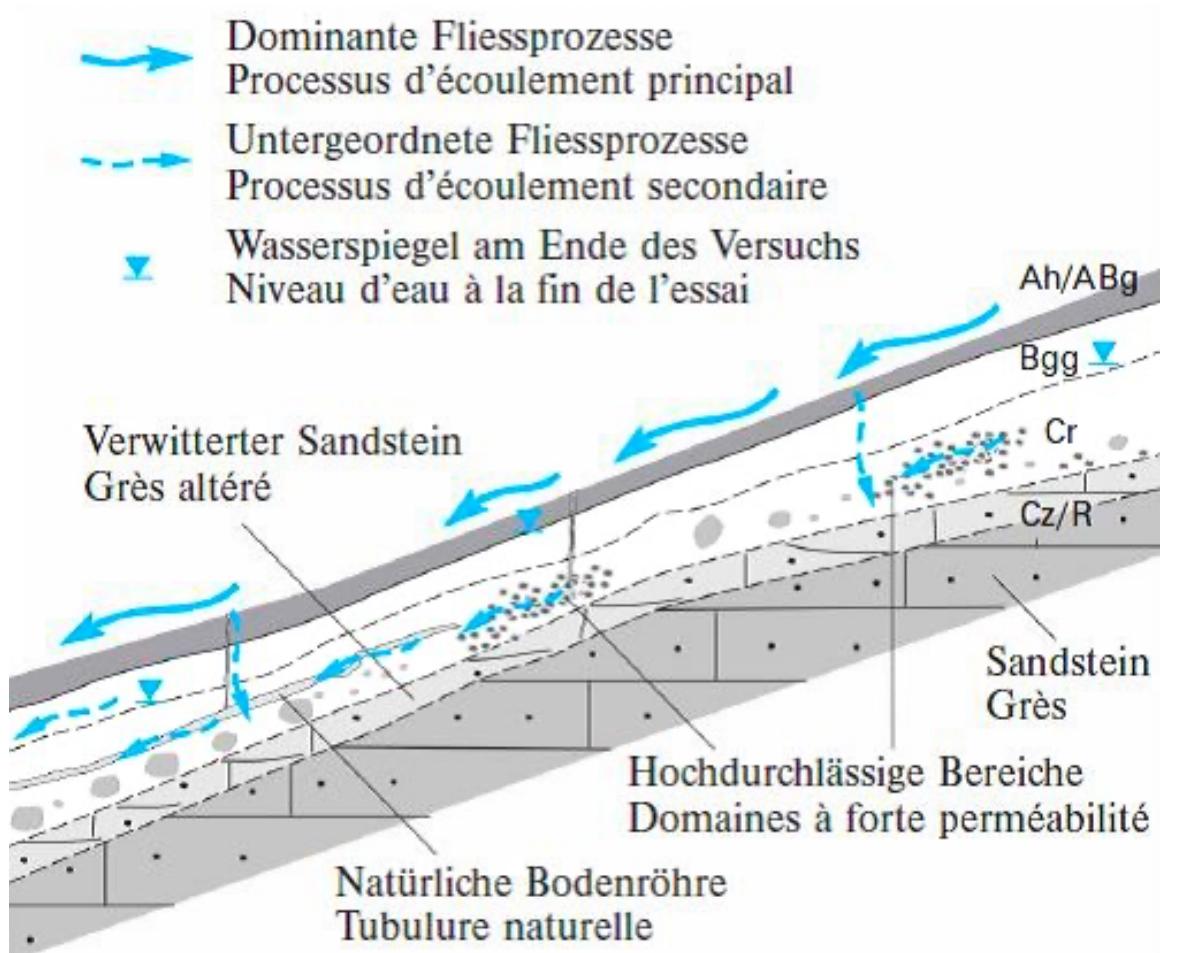
Kapitel 3...



Die Abflussbildung findet in der Wechselwirkung von Niederschlag und Boden/Vegetation statt und bestimmt die Pfade des terrestrischen Wasserkreislaufs.

Ziel der heutigen Vorlesung

Wie wird aus Niederschlag Abfluss und welche Eigenschaften sind damit verknüpft?



Naef et al. Hydrologischer Atlas CH (HADES)

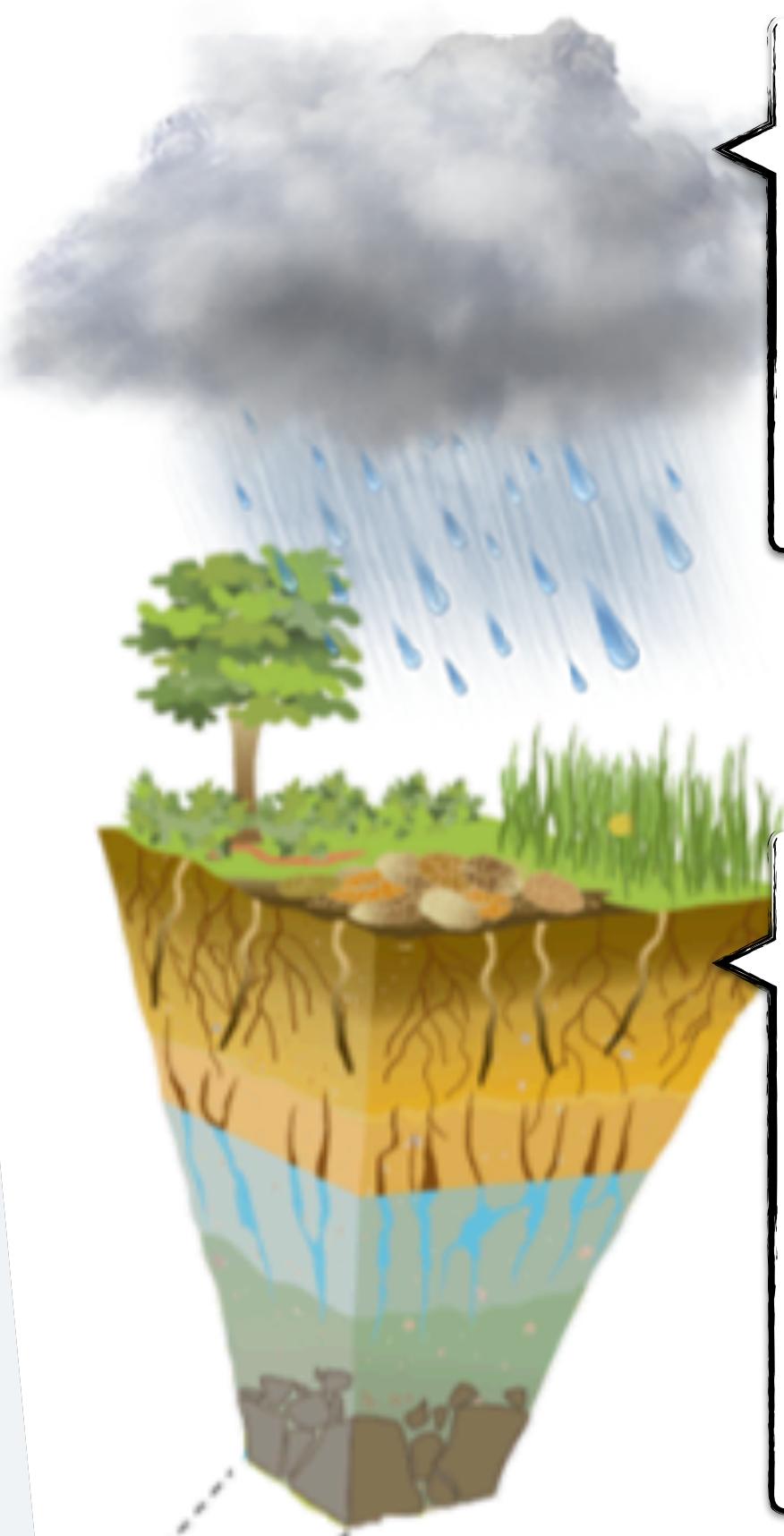
4

Ziele:

- Prozesse der Abflussbildung unterscheiden und verstehen
- Konzepte für Infiltration als zentrale Steuerung kennenlernen
- Abflussverhalten von EZG einordnen
- EZG vergleichen können

Abflussbildung

die Zutaten kennen wir schon



Niederschlag

- › Menge
- › Intensität

Boden- und Grundwasser

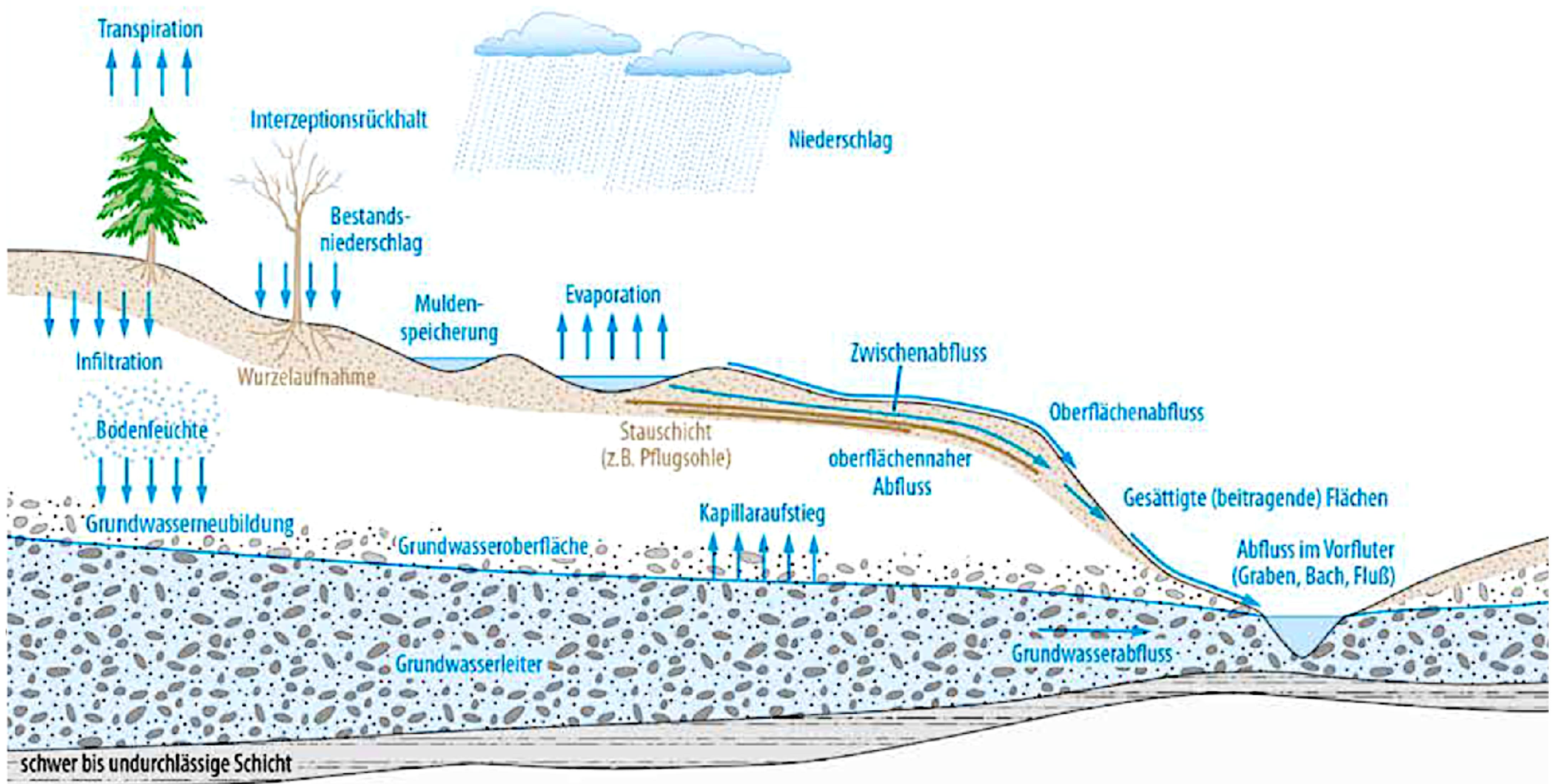
- › Speicher
- › Dränage

die hydrol. Prozesse, die zum Abfluss im Gewässer beitragen

- › wieviel Wasser wird in einer bestimmten Zeit zu Abfluss
- › Abfluss(spende) (q in mm)
- › Abfluss (Q in m^3s^{-1})

Abflussbildung

allgemeine Übersicht über Prozesse



Abflussbildung

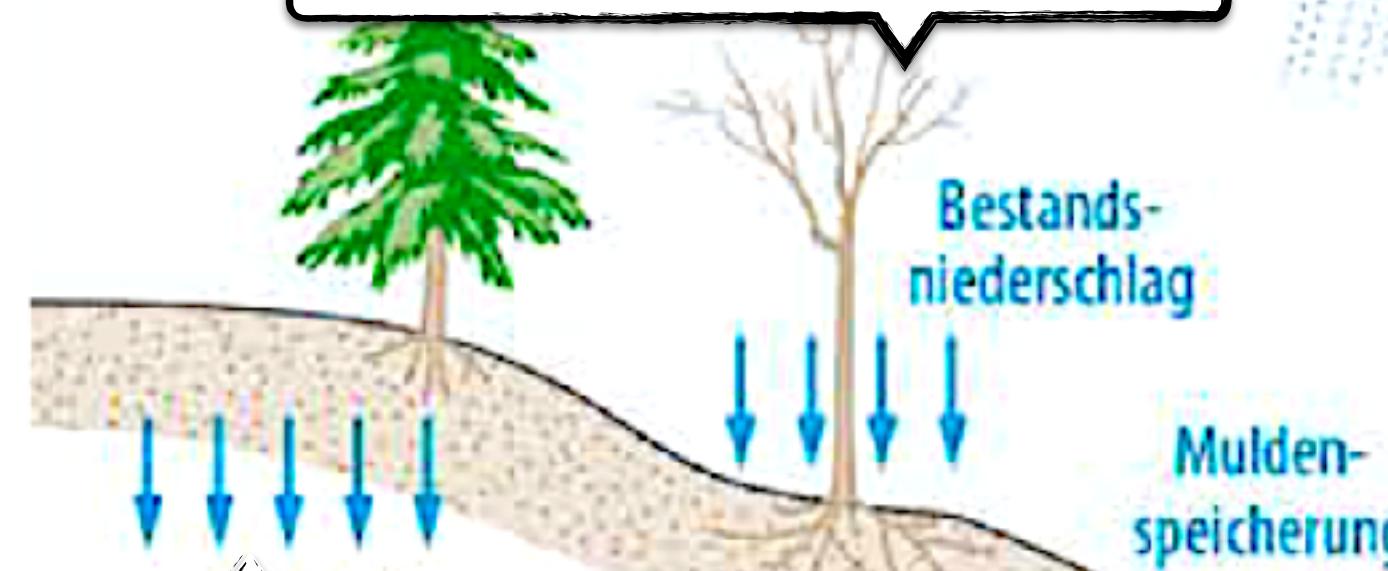
Allgemeine Übersicht über Prozesse

Niederschlag

- Menge
- Intensität

Interzeption

- Rückhalt an Vegetation

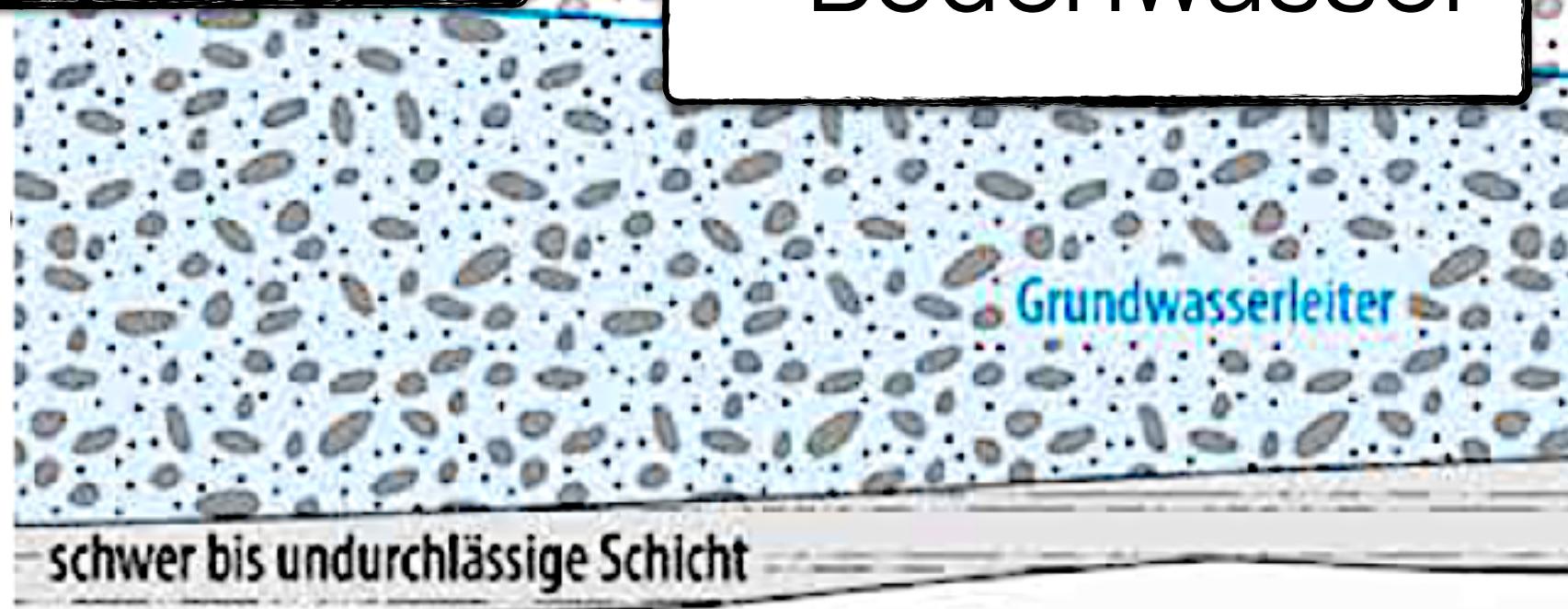


Infiltration

- Übergang in den Boden

Vorfeuchte

- Zustand Bodenwasser



Zwischenabfluss

- oberflächennahes direktes Abfließen

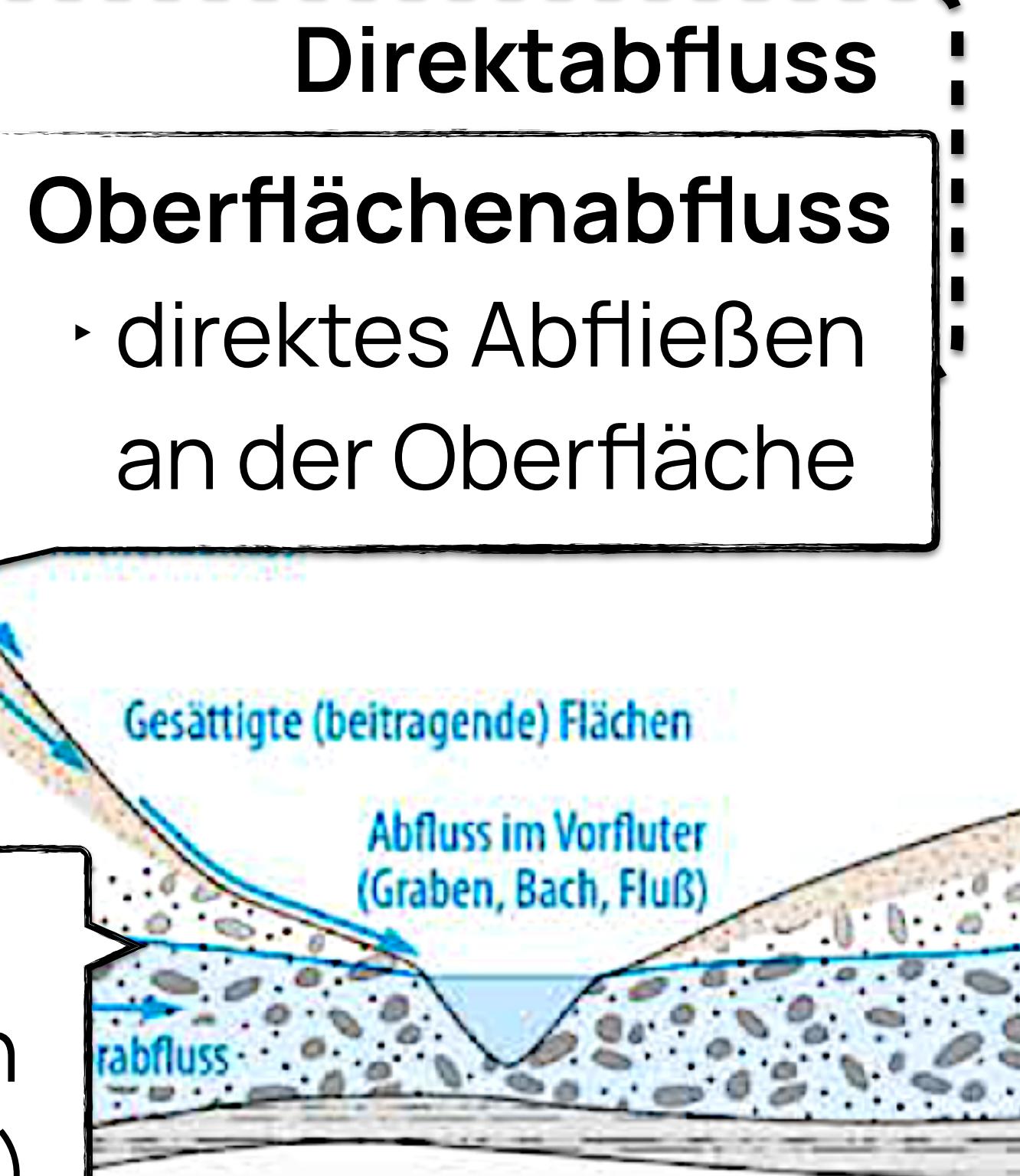
Direktabfluss

Oberflächenabfluss

- direktes Abfließen an der Oberfläche

Basisabfluss

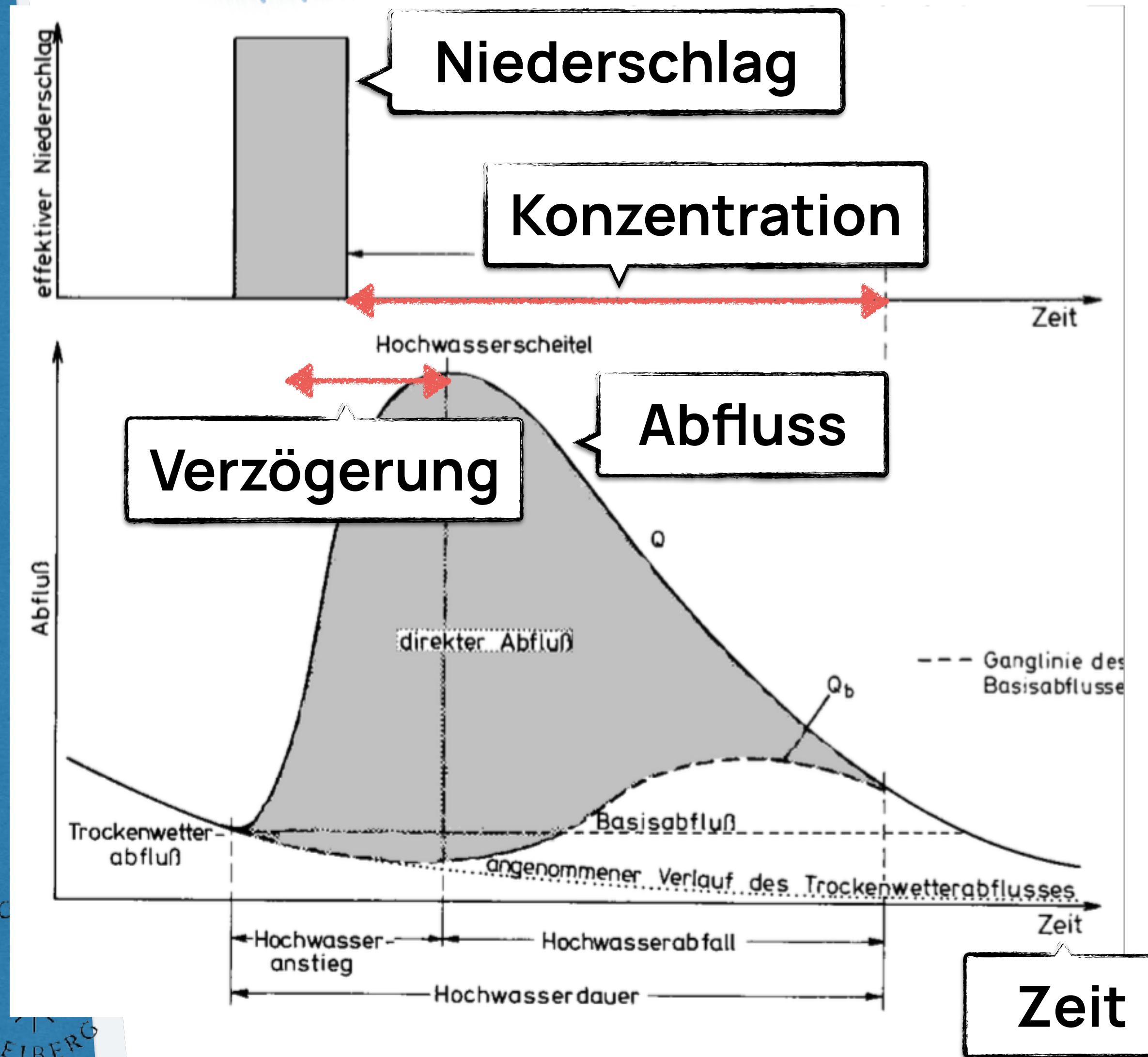
- langsames Abfließen (Hang/Grundwasser)





Abflusskonzentration

zeitliche Verteilung der Abflussbildung

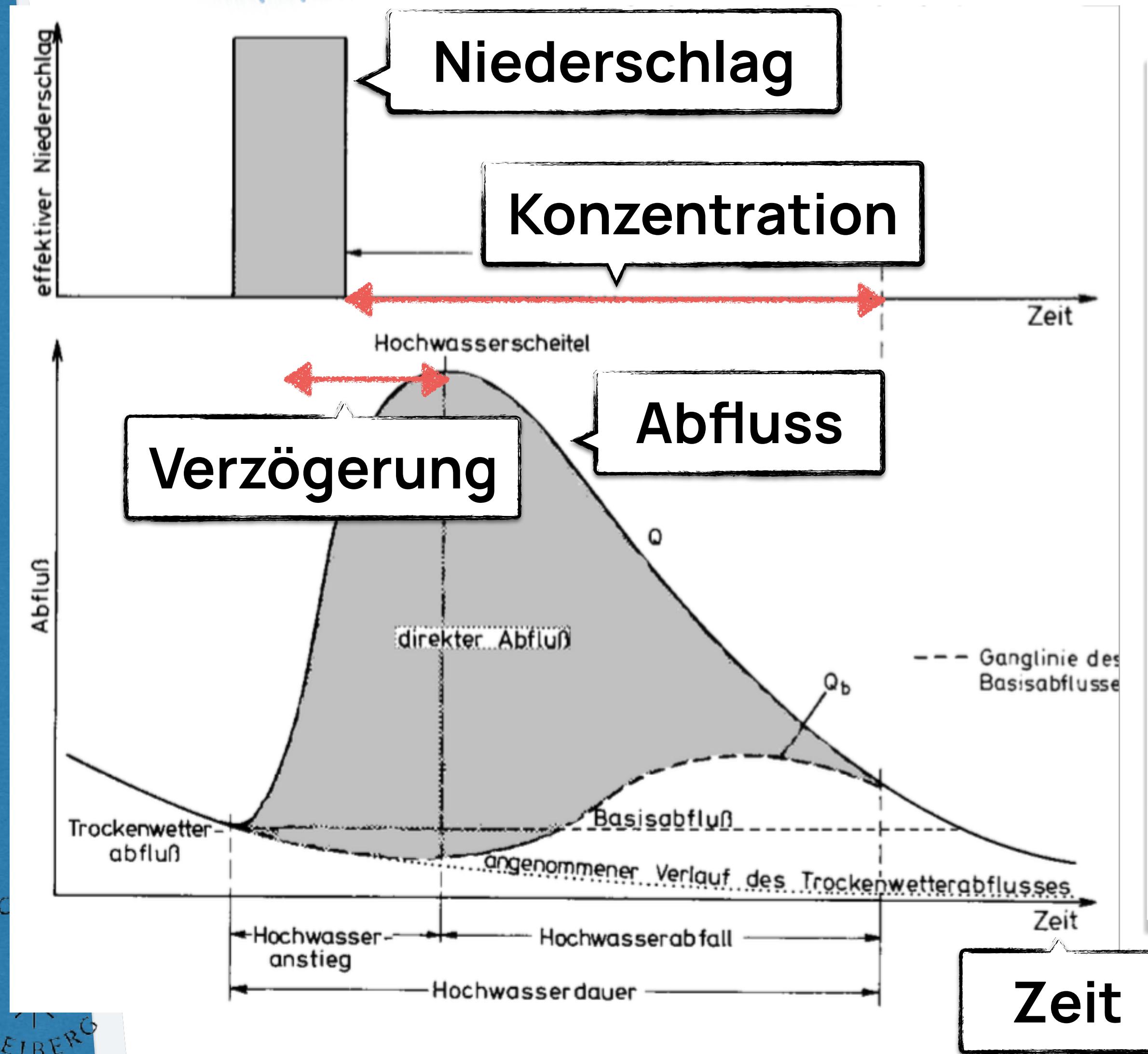


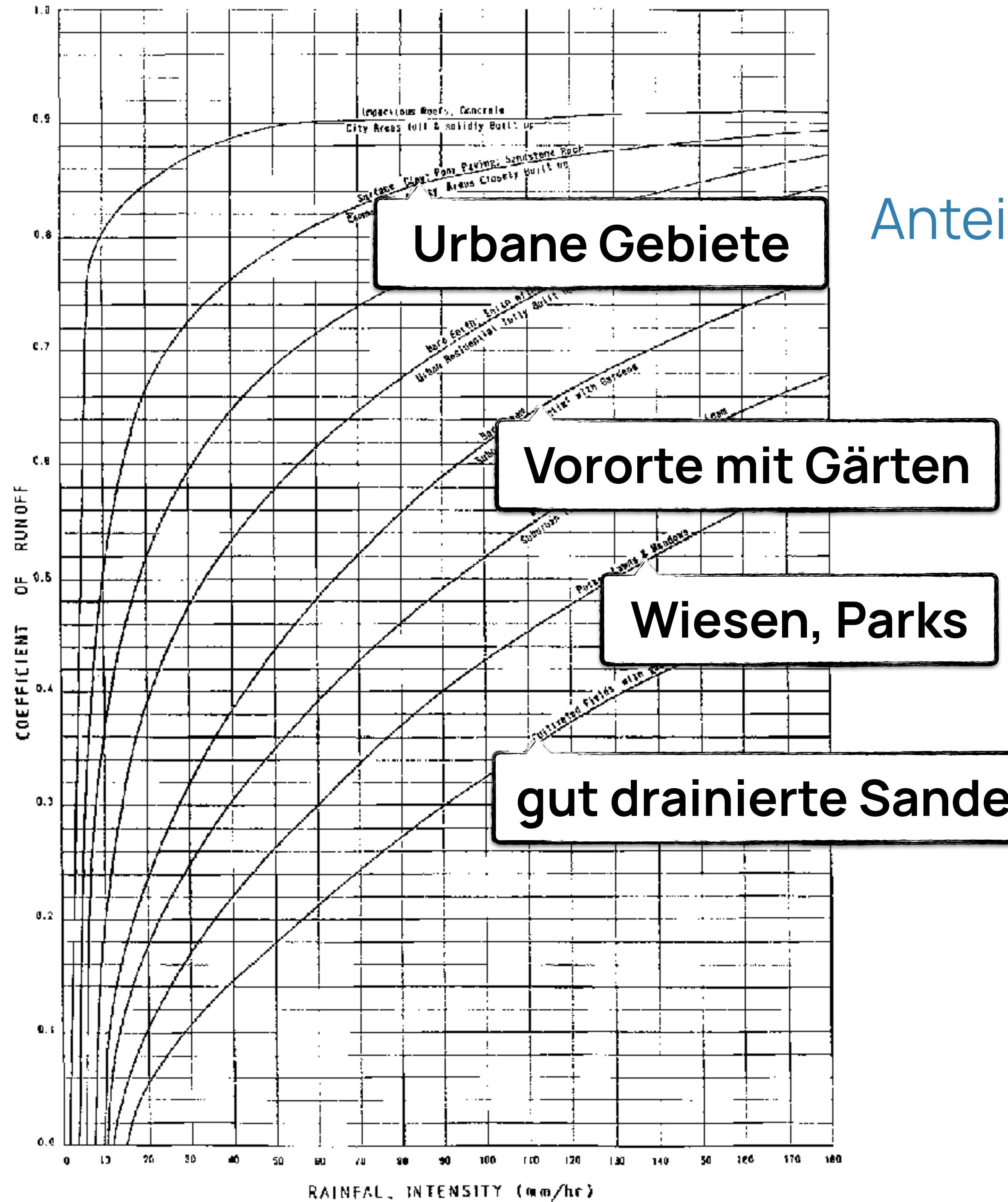
- mit welcher zeitlichen Verteilung erreicht direkter/schneller Abfluss das Gewässer
- Konzentration: Ende Niederschlag bis Ende "Hochwasser"
- Verzögerung: Max. Niederschlag bis Hochwasserscheitel



Abflusskonzentration

zeitliche Verteilung der Abflussbildung





Abflussbeiwert

Anteil (Direkt)abfluss vom Niederschlag

• Ereignisbezogen: $RC = Q_{\text{direkt}}/P$

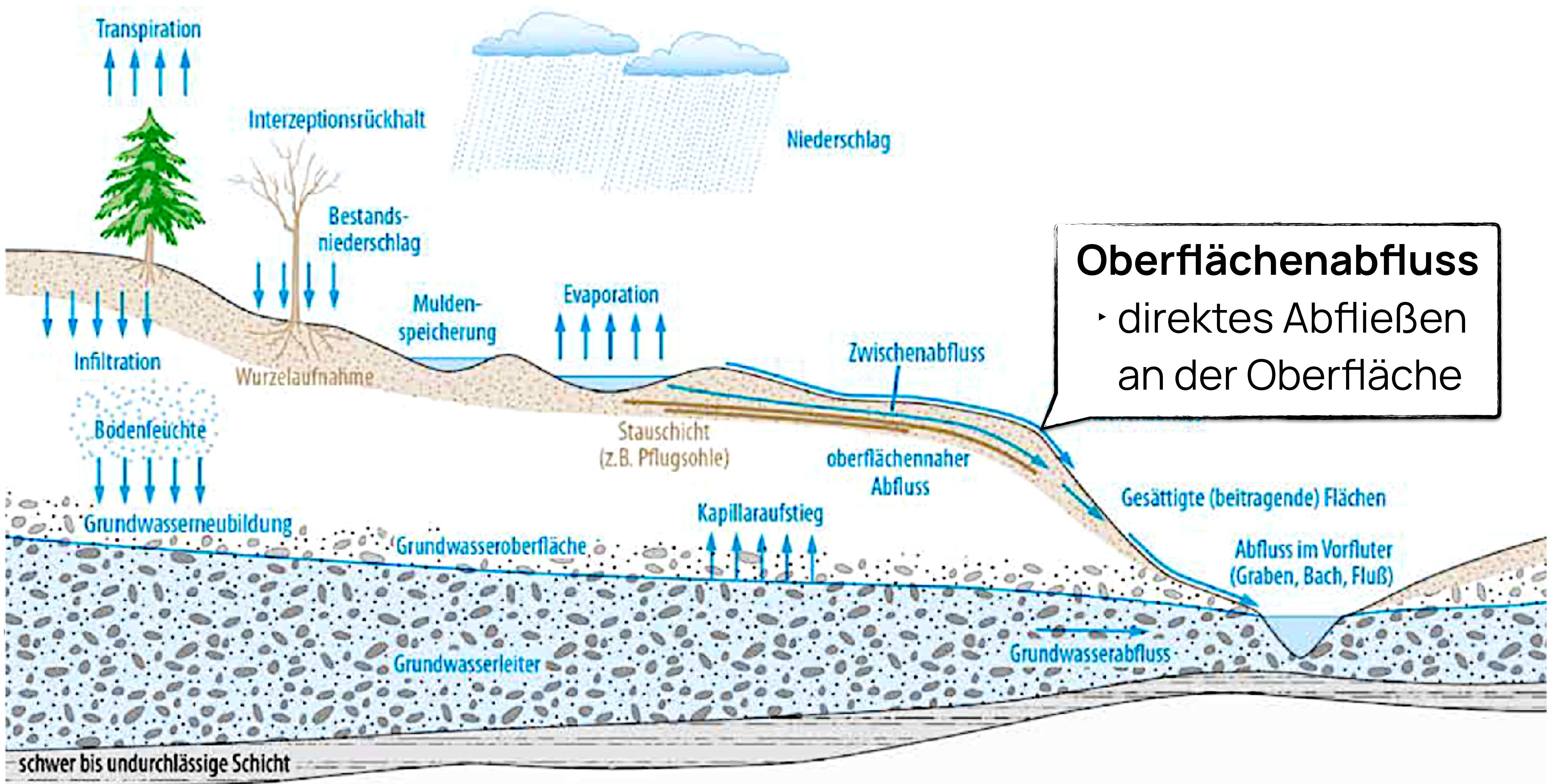
• langfristig: $RC = Q/P$

ist abhängig von:

- Intensität des Niederschlags
- Geländeoberfläche und Boden
- Vorfeuchte und Infiltration

Abflussbildung

allgemeine Übersicht über Prozesse

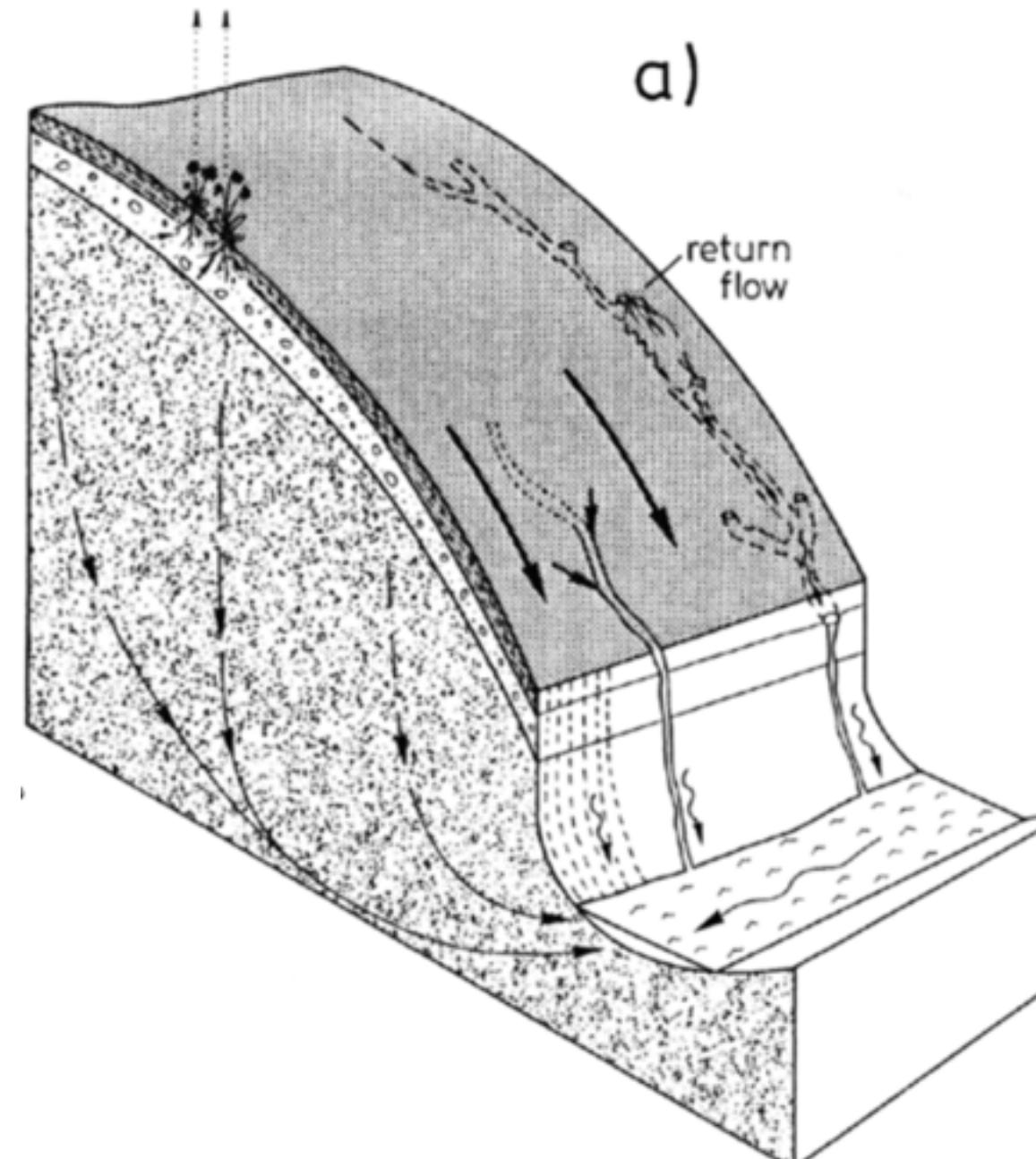


Oberflächenabfluss

Wie kann es dazu kommen, dass Wasser oberflächlich abfließt?

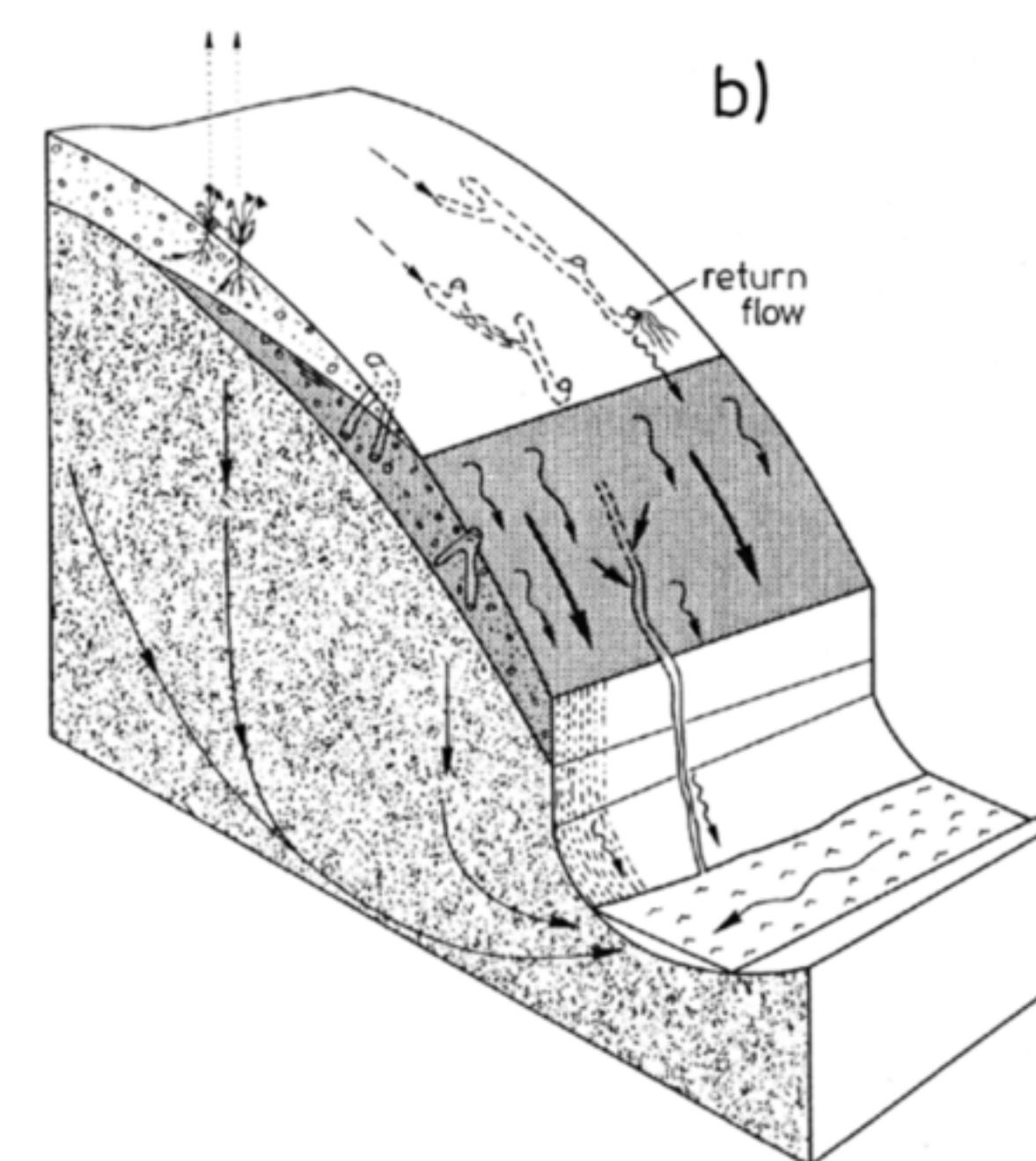
a) Regenintensität übersteigt Infiltration

- Infiltrationsüberschuss
- Horton'scher Abfluss



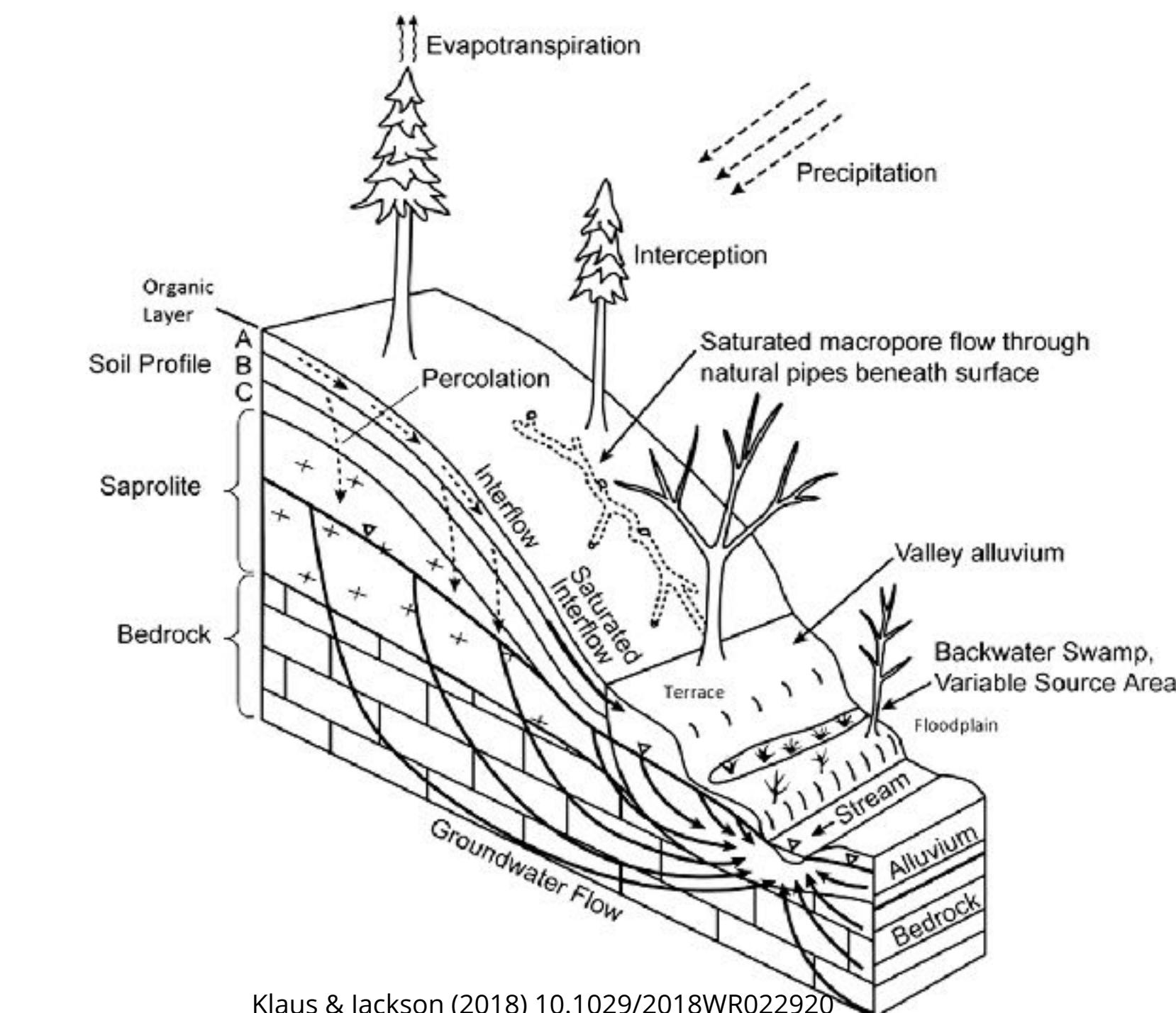
b) Wassersättigung verhindert Infiltration

- Sättigungsüberschuss
- Dunn'scher Abfluss



c) Return Flow

- kurzzeitig infiltriertes Wasser tritt wieder aus

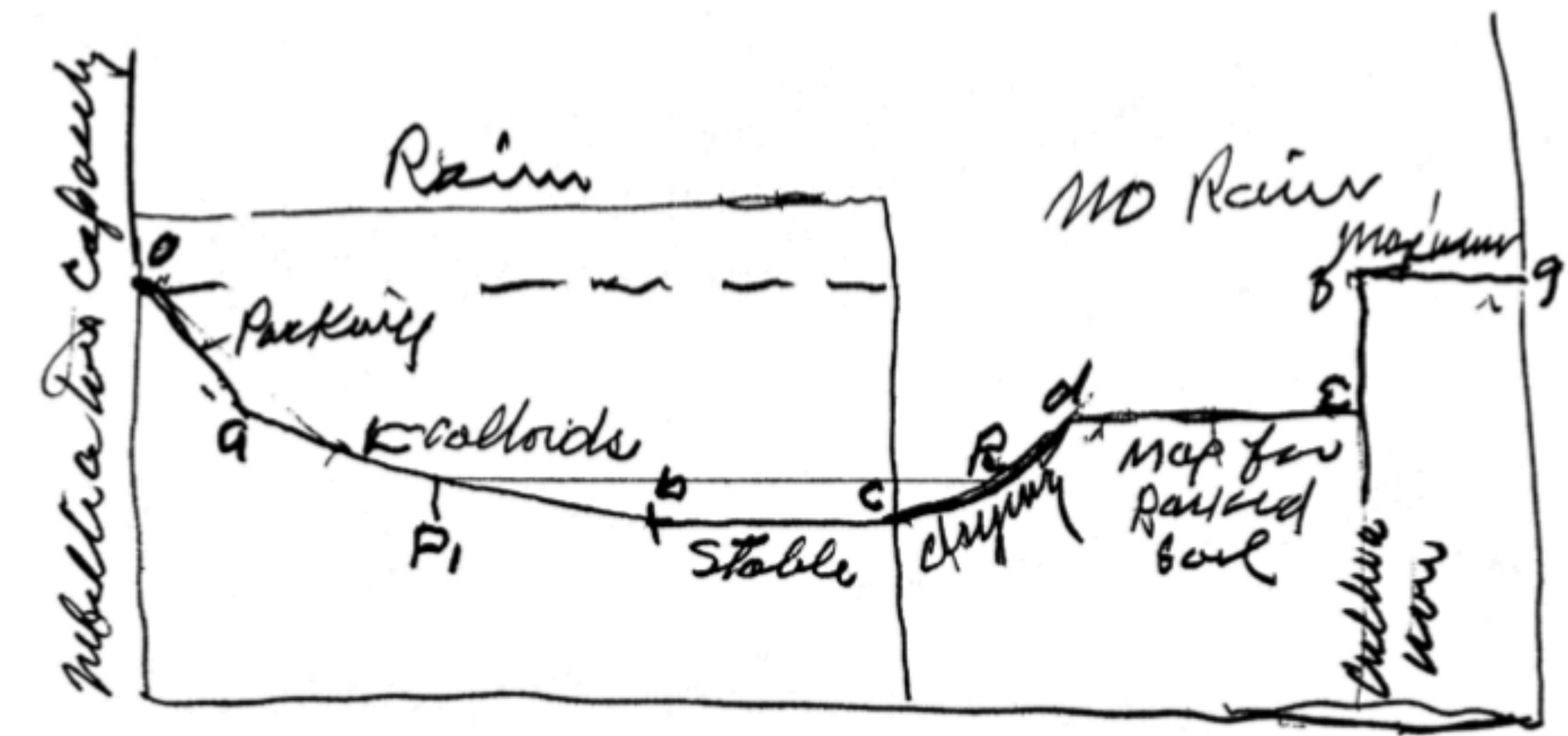


Infiltrationsüberschuss

Horton'scher Abfluss

In den 1930ern untersuchte Robert Horton Infiltrationsprozesse:

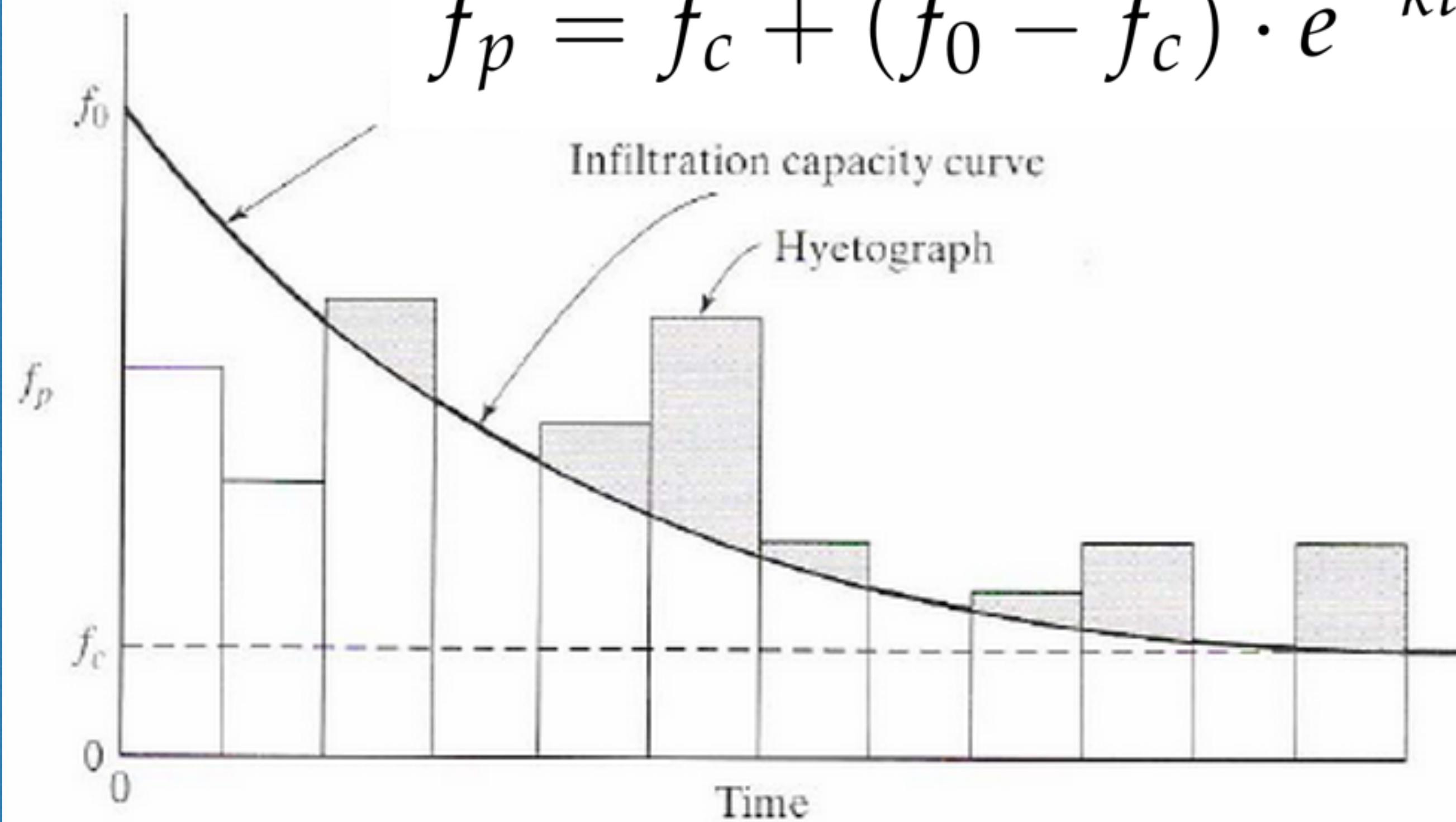
- Infiltrationsrate nicht konstant ist
- Infiltration selten bis nie mit der maximalen gravitativen Leitfähigkeit geschieht
- Infiltrationsrate deutlich über der Leitfähigkeit liegt, wenn es Risse oder Regenwurmgänge gibt
- Infiltration maßgeblich von Oberflächeneigenschaften bestimmt wird



Infiltrationsüberschuss

Horton'scher Abfluss

$$f_p = f_c + (f_0 - f_c) \cdot e^{-kt}$$



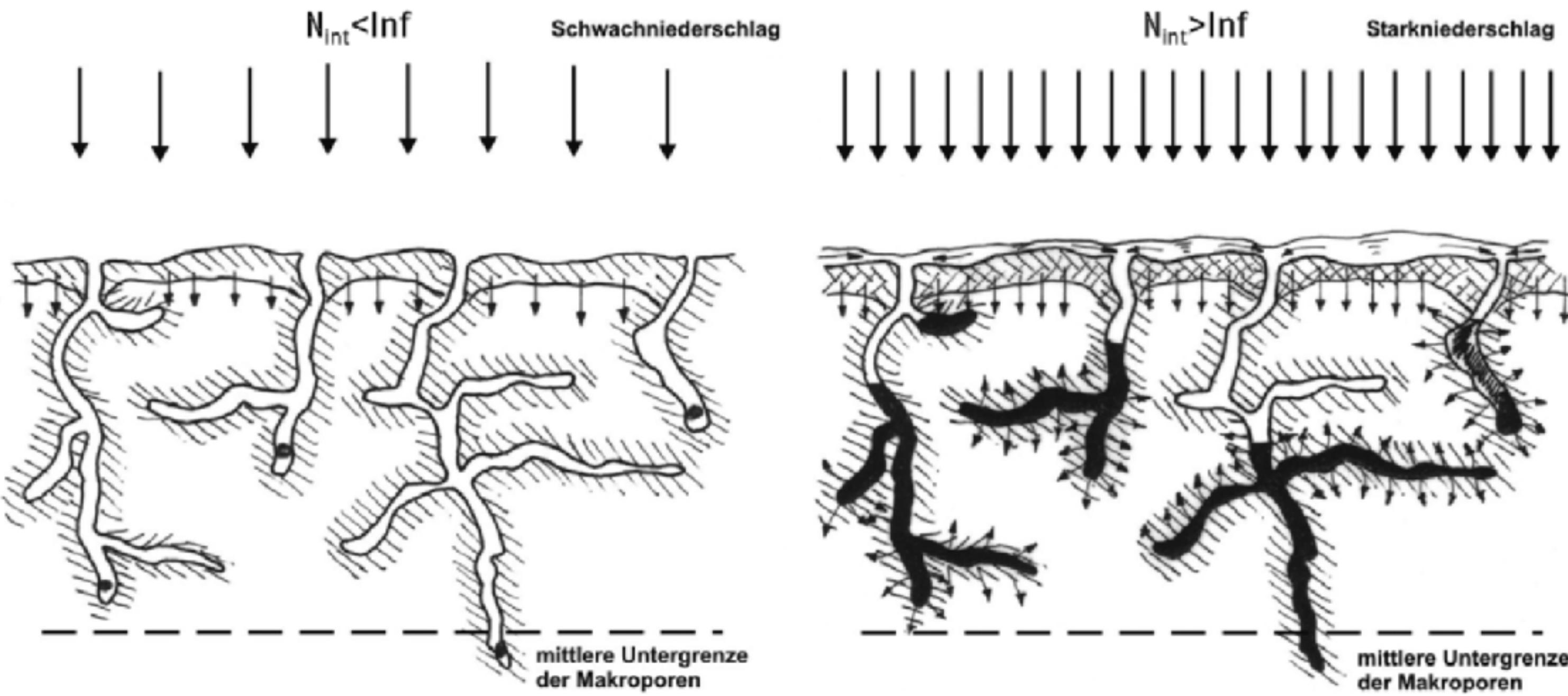
1940 formulierte Horton sein bekanntes Infiltrationsmodell:

- exponentielle Abnahme der Infiltrationskapazität
- initiale, maximale Rate f_0
- finale, konstante Rate f_c
- mit Rezessionskonstante k

- I ist nur von den konstanten Parametern und der Zeit abhängig
- Fokus liegt auf der Niederschlagsmenge und -verteilung

Infiltrationsüberschuss

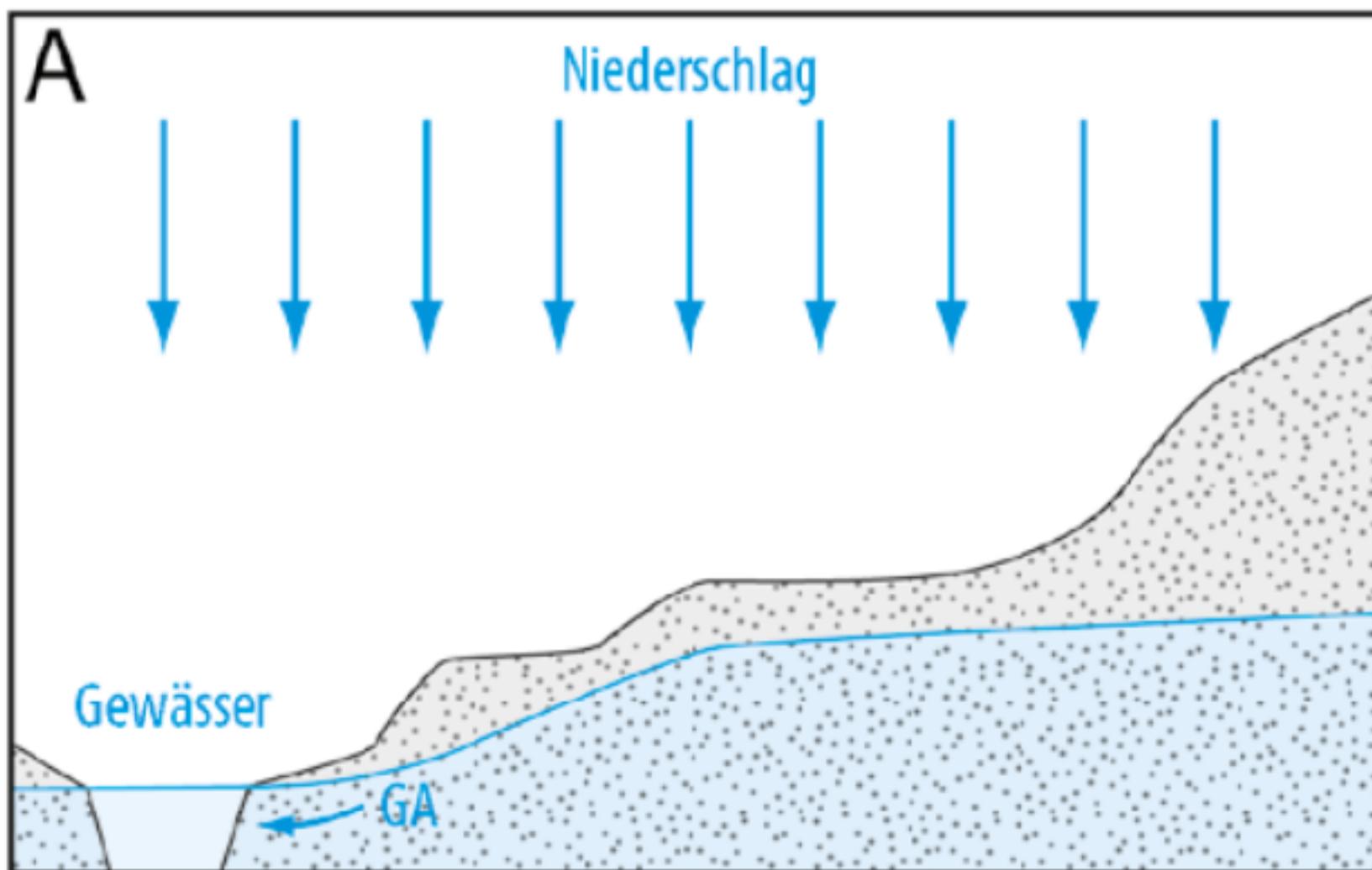
Rolle von Makroporen



- Makroporen erhöhen die Infiltrationskapazität enorm
- I_{matrix} : Darcy...
- I_{makro} : ca. 10^{-2} ms^{-1}
- mit Makroporen größere Infiltrationsoberfläche

Sättigungsüberschuss

insb. räumliche Verteilung und Sättigungsflächen

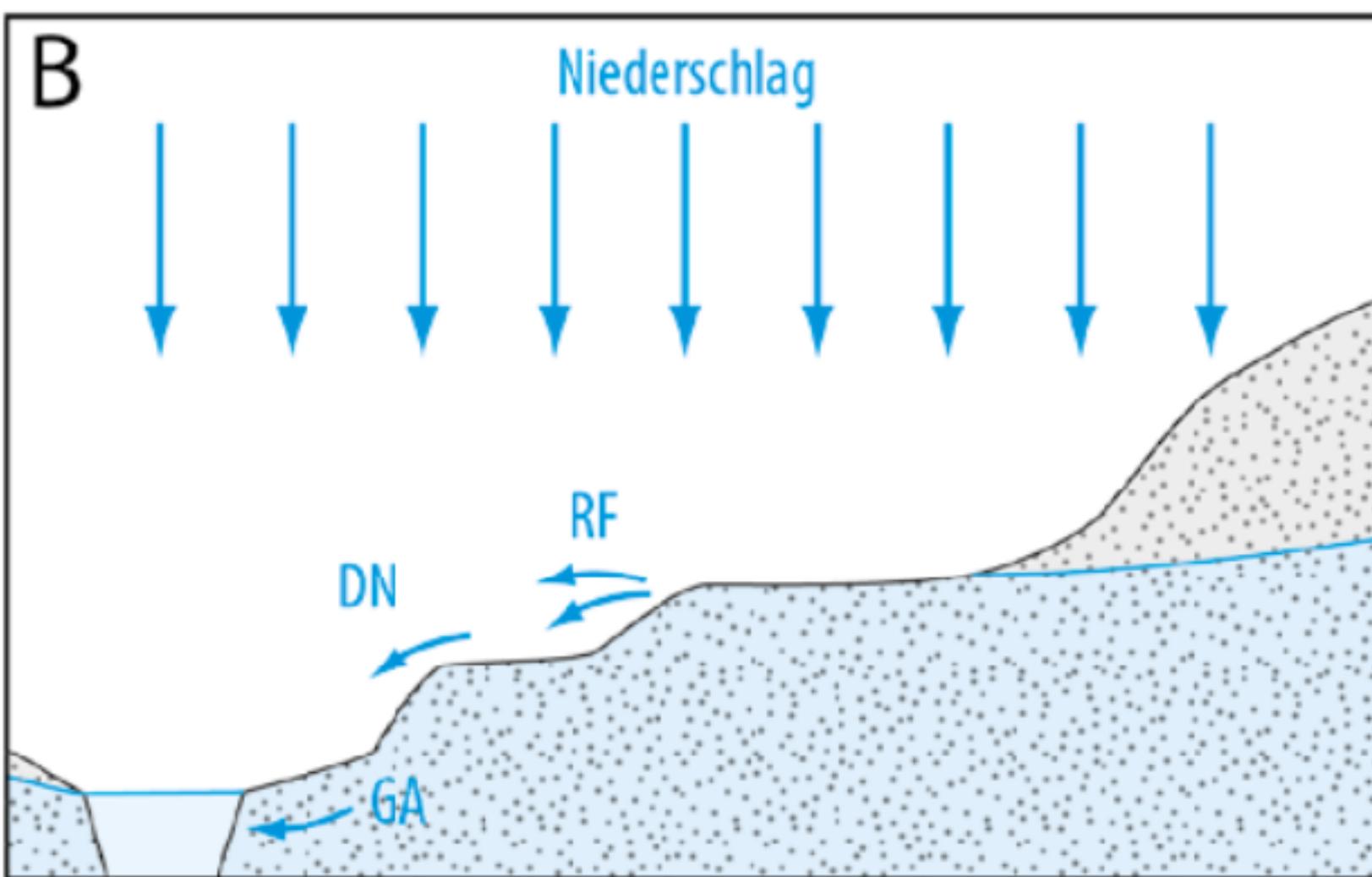


Mit fortschreitendem Niederschlag:

- Aufsättigung von Teilen des Einzugsgebietes
- besonders in Gewässernähe, flachen Bereichen und Bereichen großen Wasserdurchflusses

Sättigungsüberschuss

insb. räumliche Verteilung und Sättigungsflächen

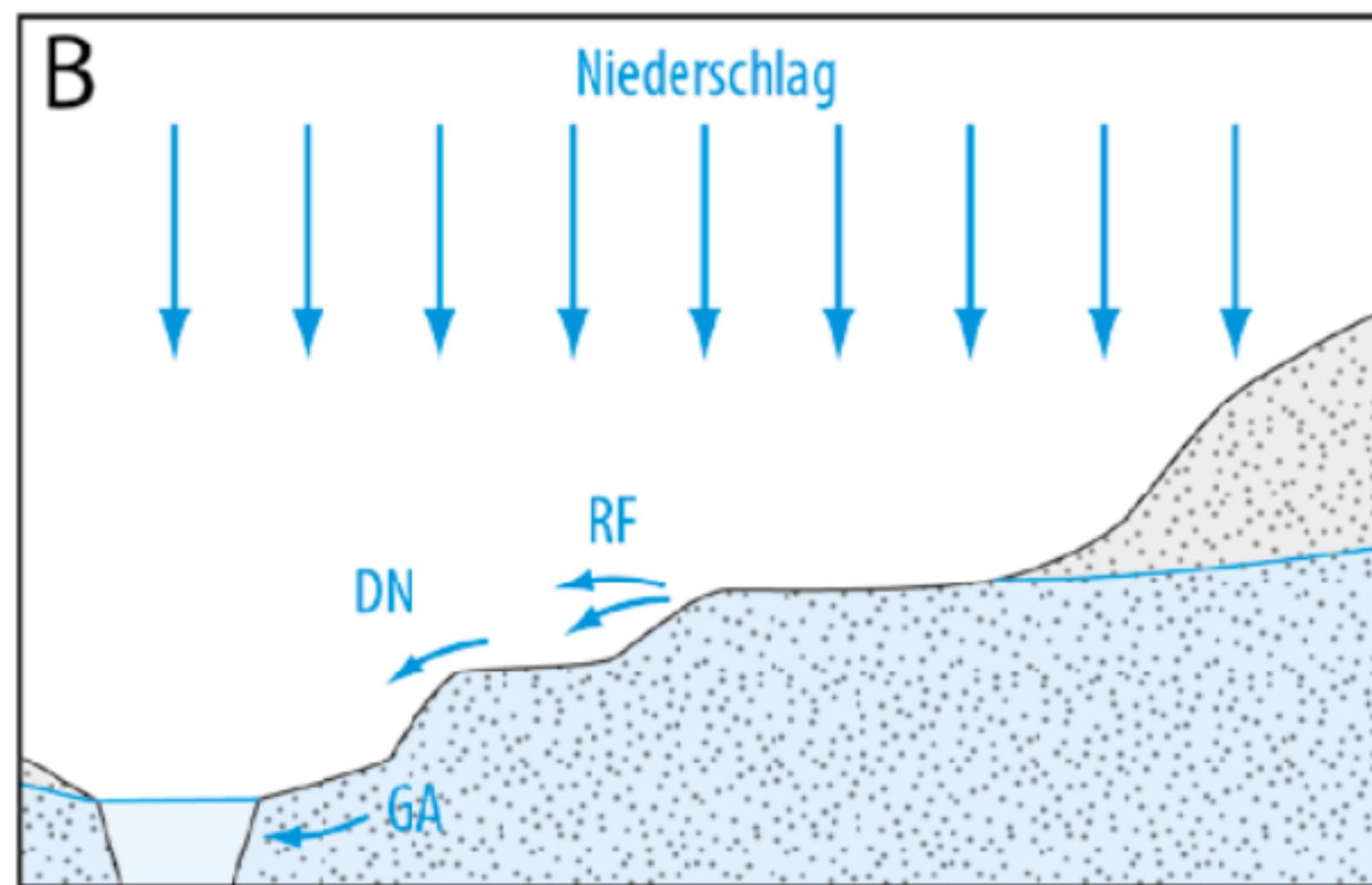


Mit fortschreitendem Niederschlag:

- Aufsättigung von Teilen des Einzugsgebietes
- besonders in Gewässernähe, flachen Bereichen und Bereichen großen Wasserdurchflusses

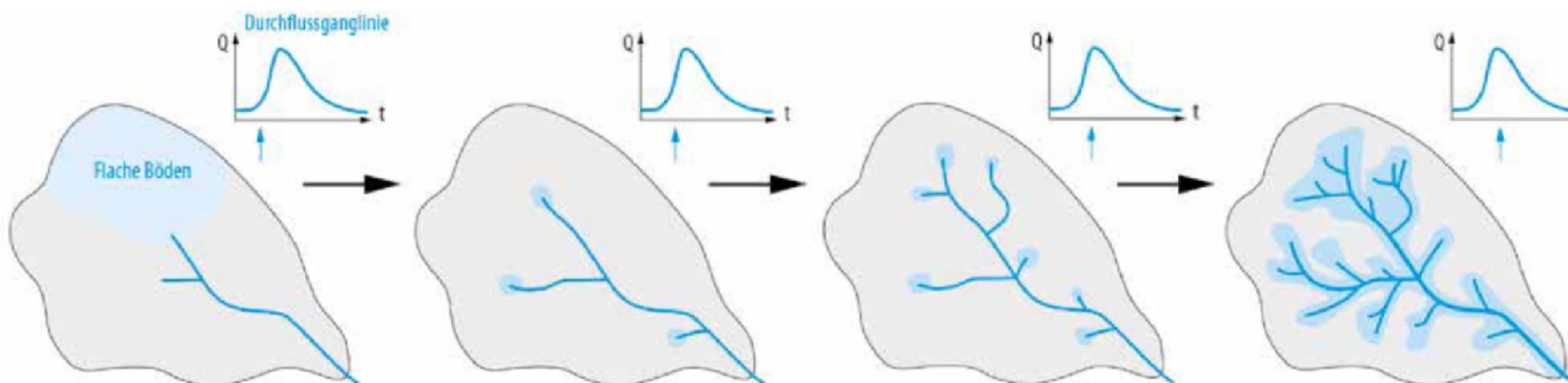
Sättigungsüberschuss

insb. räumliche Verteilung und Sättigungsflächen



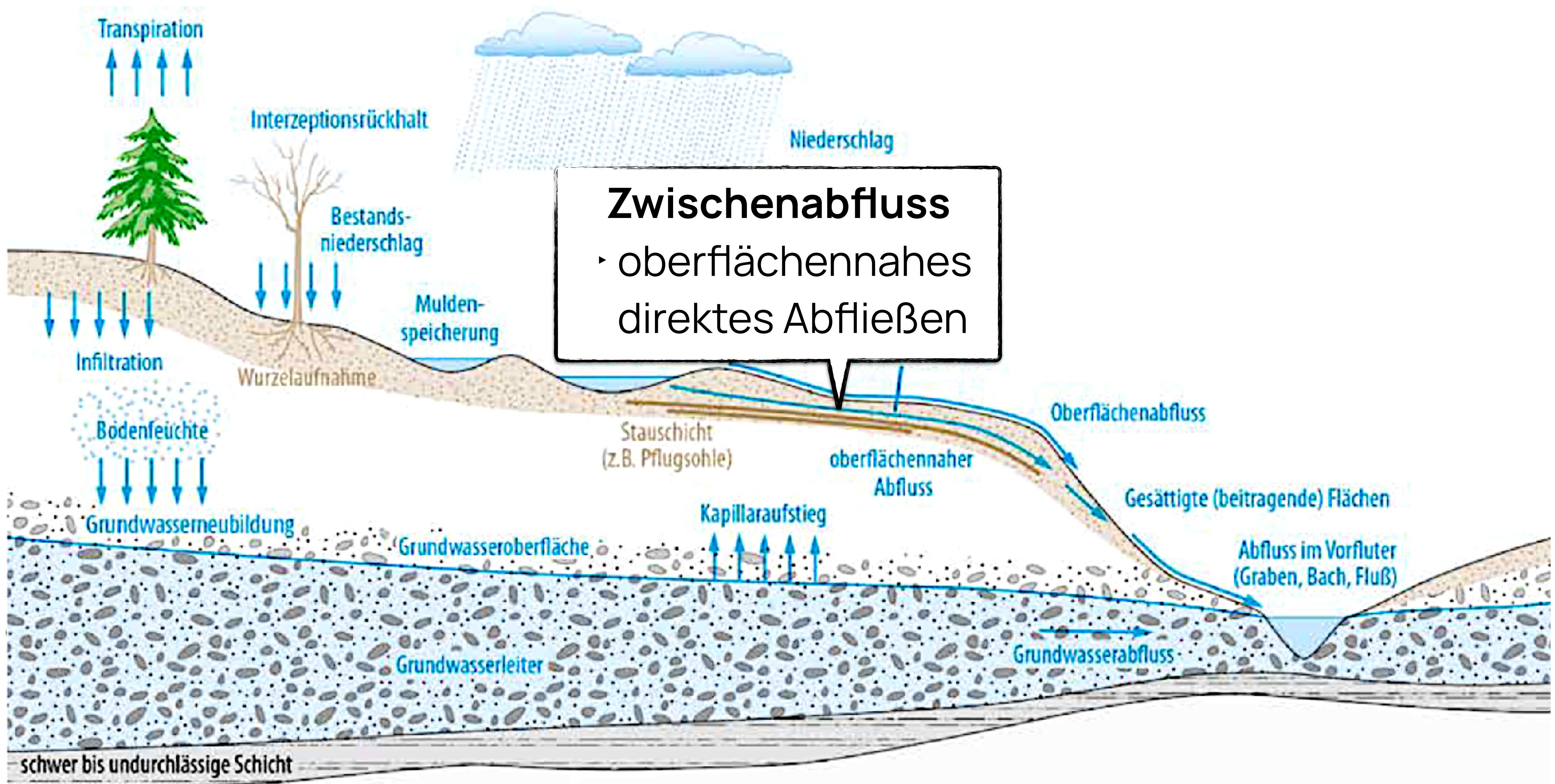
Mit fortschreitendem Niederschlag:

- Aufsättigung von Teilen des Einzugsgebietes
- besonders in Gewässernähe, flachen Bereichen und Bereichen großen Wasserdurchflusses



Abflussbildung

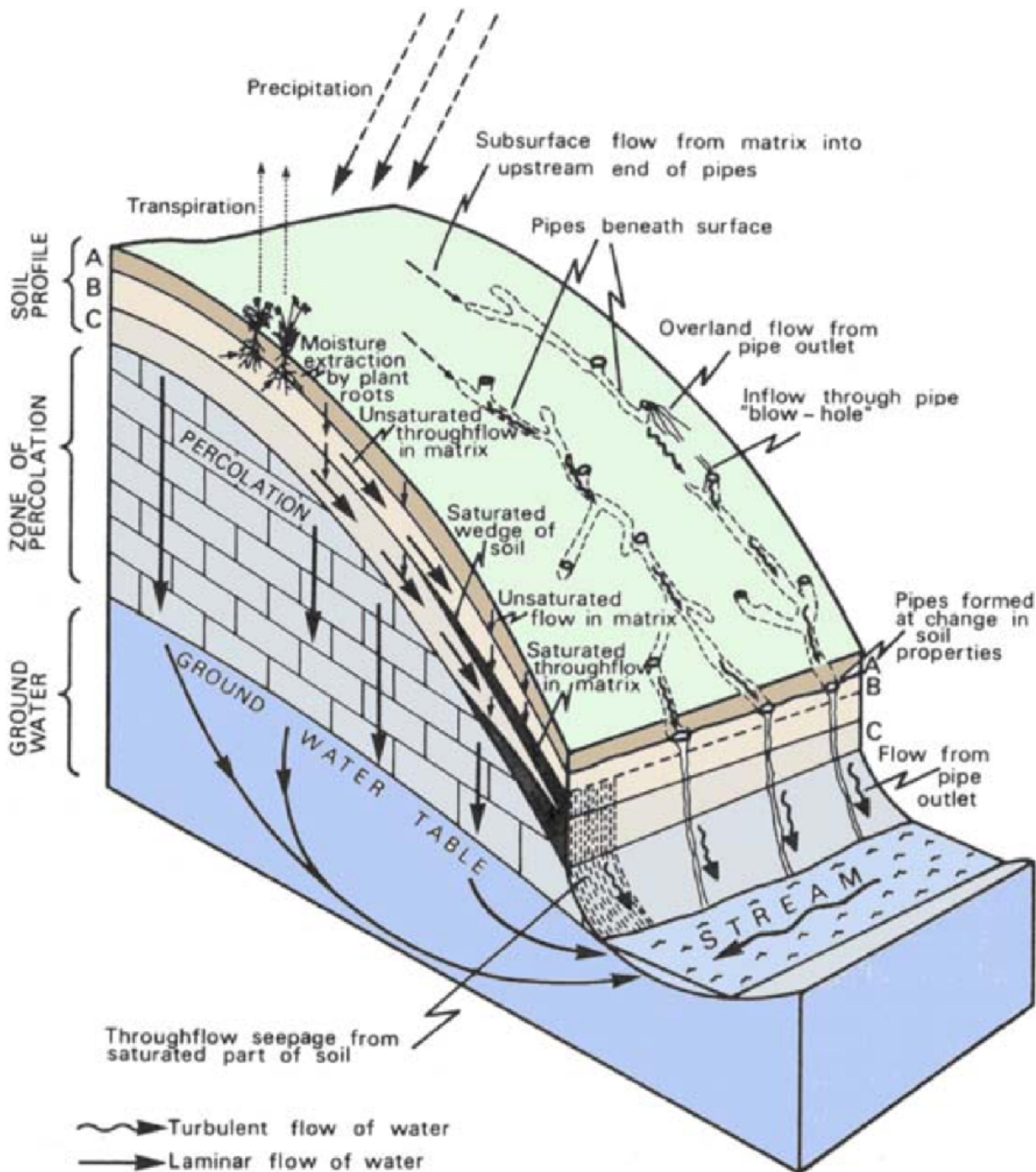
allgemeine Übersicht über Prozesse



Zwischenabfluss

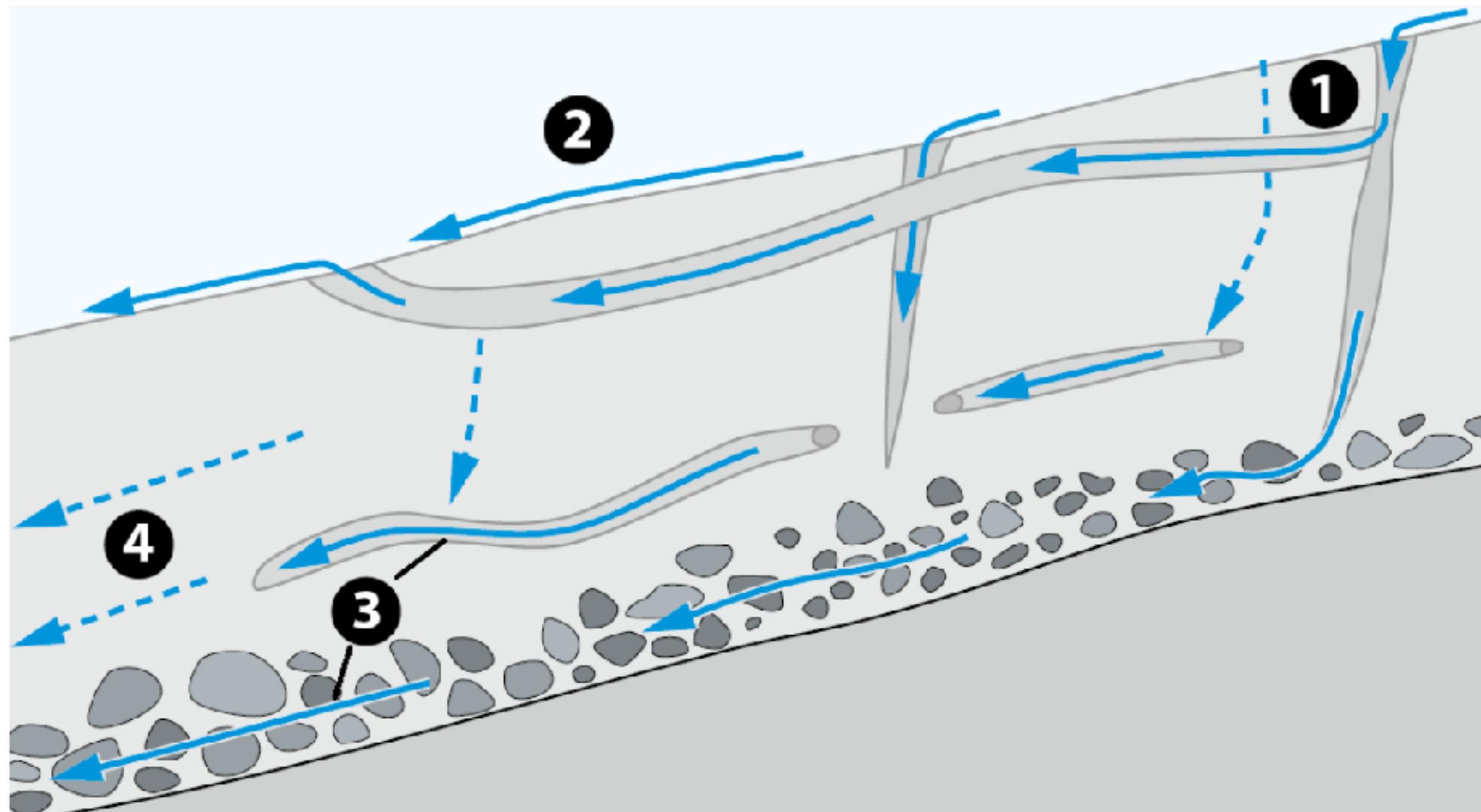
Grenzflächen im Boden

- Böden sind sehr häufig geschichtet → Unterschiede der Eigenschaften & Zustände als Grenzflächen
- daran kann sich Wasser stauen und rel. schnell lateral abfließen



Zwischenabfluss

Rolle von Makroporen

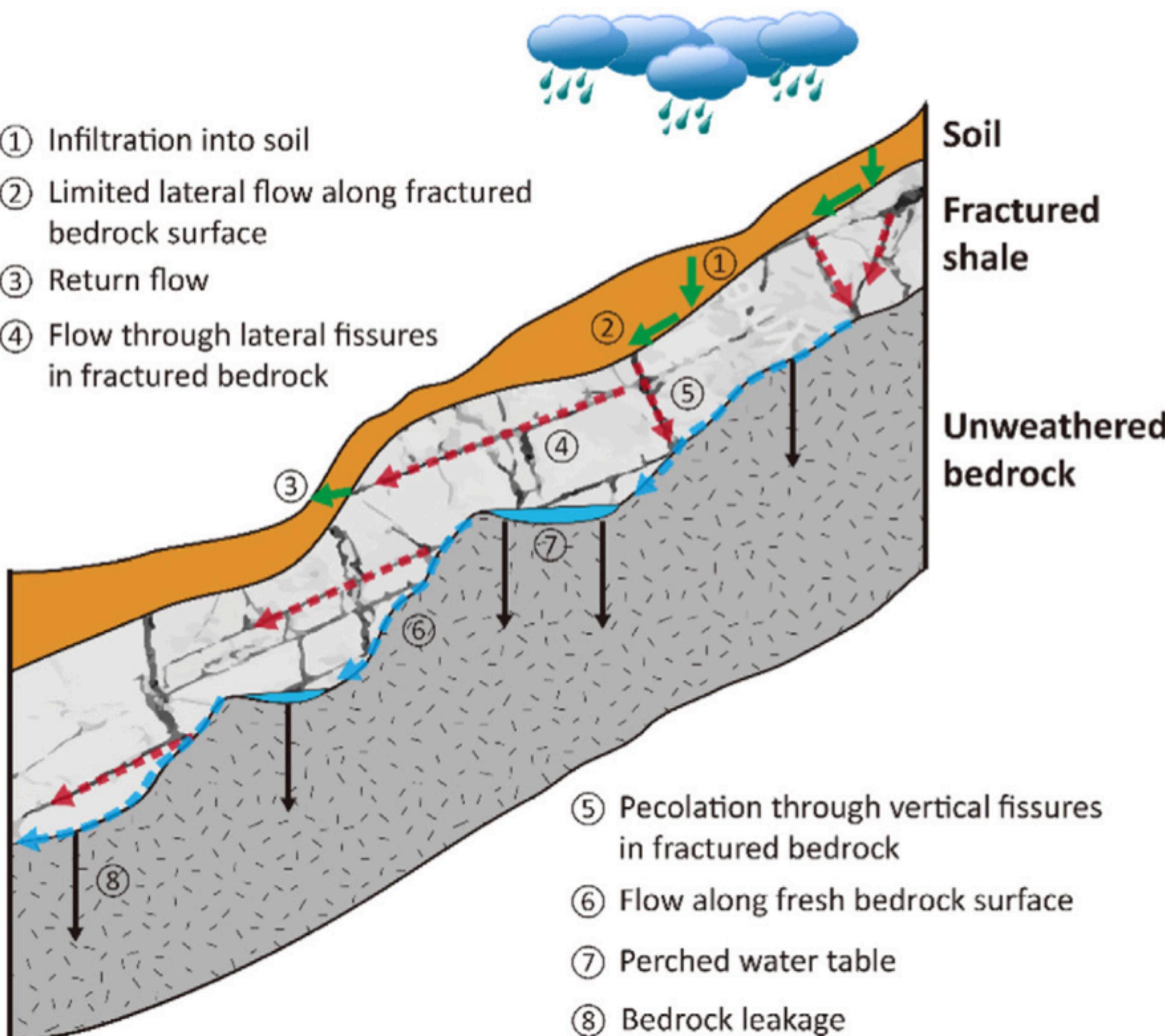


- Makroporen erhöhen die Infiltrationskapazität enorm
- Makroporen sind jedoch häufig weitläufig verbunden: Präferenzielle Fließwege, Return Flow...
- schnelles Abfließen im Untergrund

Fill-and-spill

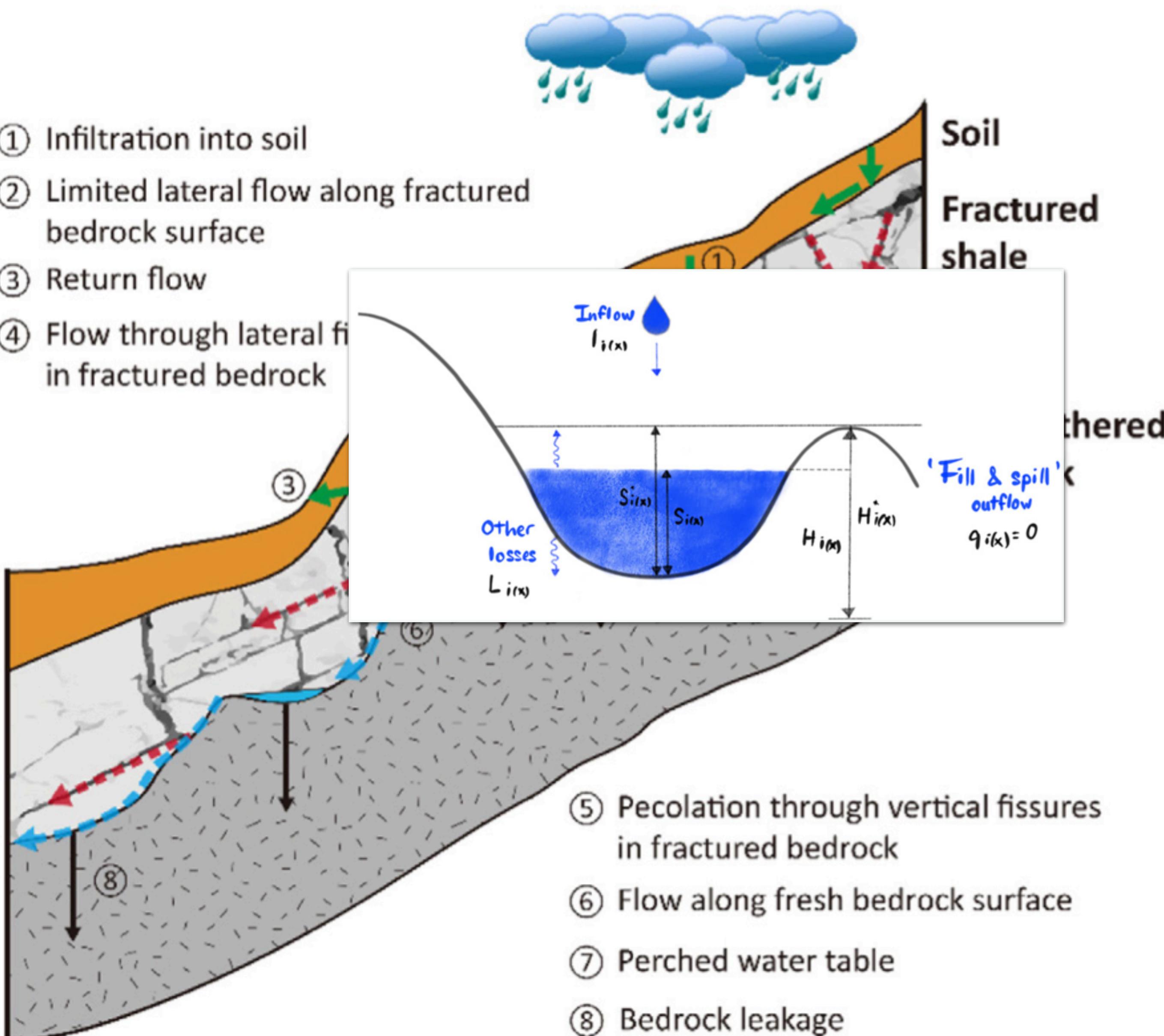
Konzept für Zwischenabfluss

- wir beobachten in vielen Situationen und Skalen:
Es bedarf eines gewissen Überschreitungsniveaus bevor schnelle Prozesse aktiv werden.
- Speicher-Überlauf Konzept (Kaskaden, nicht nur binär)
- Heterogenität und Struktur von Boden und Landschaft als Schlüssel zum Prozessverständnis



Fill-and-spill

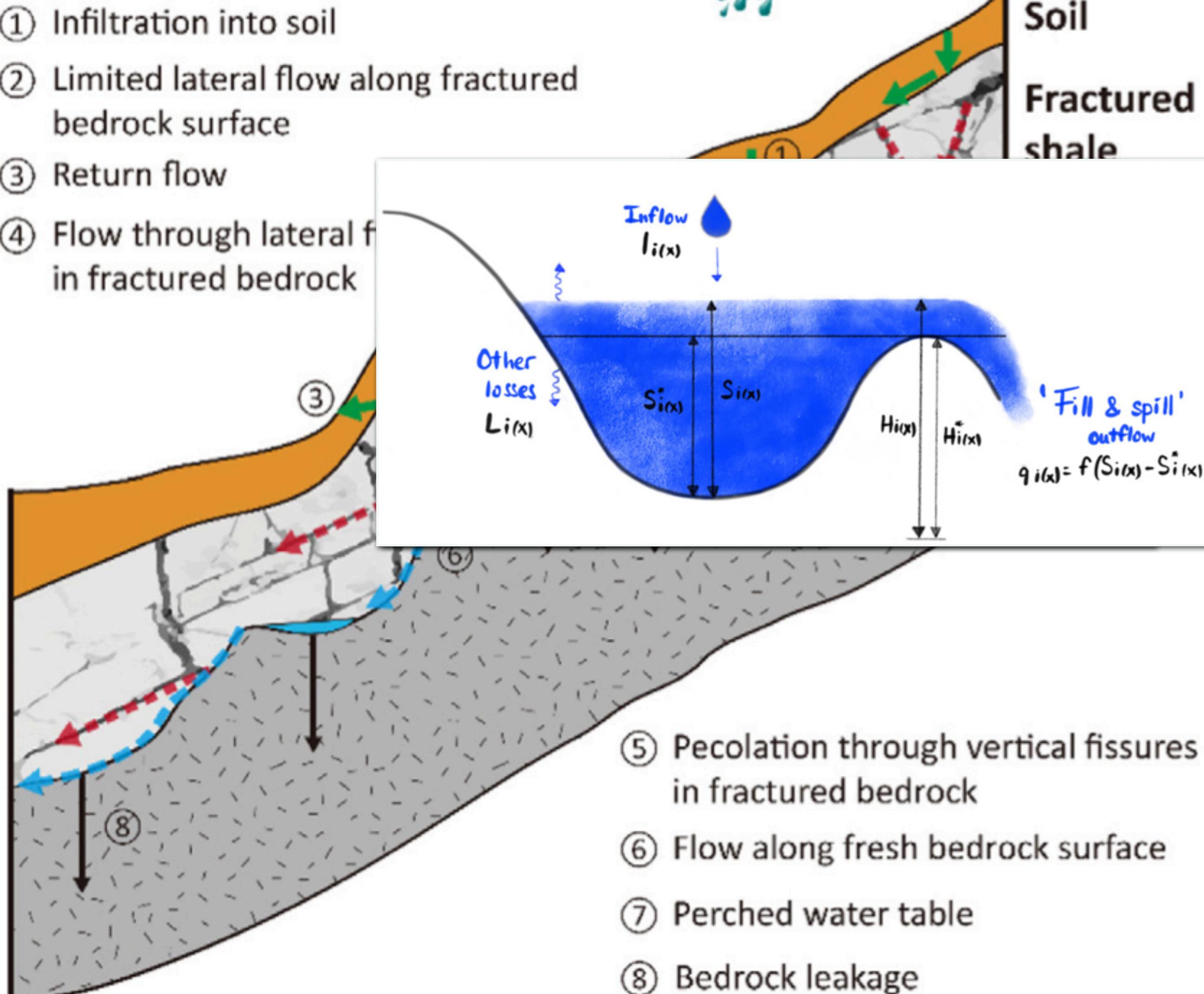
Konzept für Zwischenabfluss



- wir beobachten in vielen Situationen und Skalen:
Es bedarf eines gewissen Überschreitungsniveaus bevor schnelle Prozesse aktiv werden.
- Speicher-Überlauf Konzept (Kaskaden, nicht nur binär)
- Heterogenität und Struktur von Boden und Landschaft als Schlüssel zum Prozessverständnis

Fill-and-spill

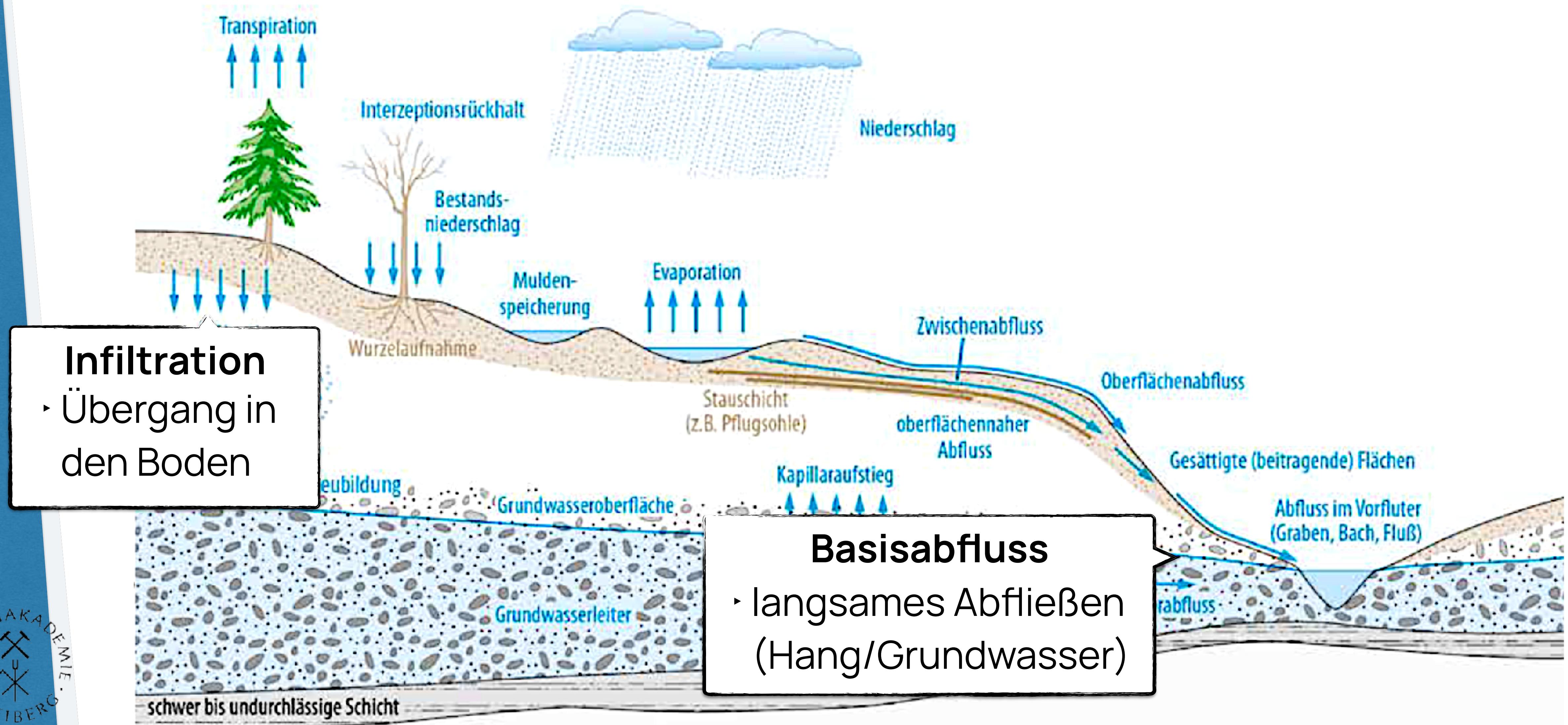
Konzept für Zwischenabfluss



- wir beobachten in vielen Situationen und Skalen:
Es bedarf eines gewissen Überschreitungsniveaus bevor schnelle Prozesse aktiv werden.
- Speicher-Überlauf Konzept (Kaskaden, nicht nur binär)
- Heterogenität und Struktur von Boden und Landschaft als Schlüssel zum Prozessverständnis

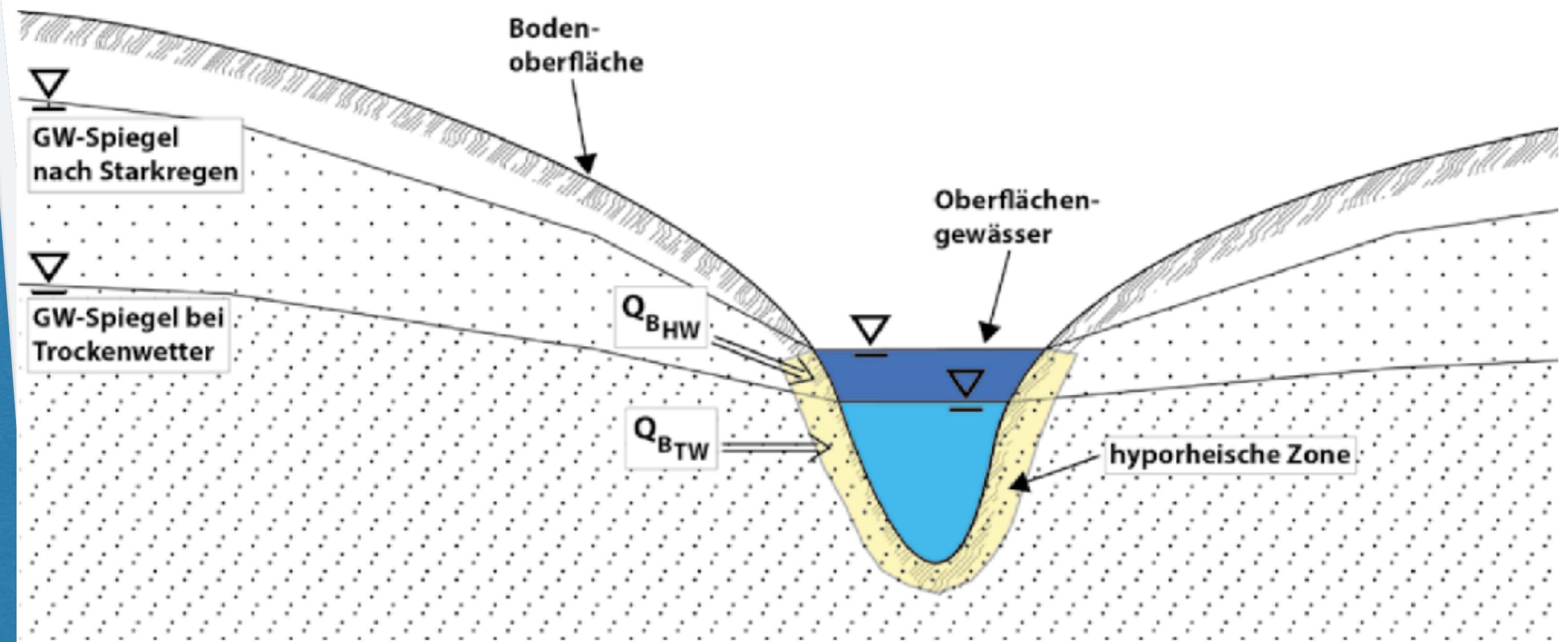
Abflussbildung

allgemeine Übersicht über Prozesse



Grundwasserabfluss

der klassische Fall von Filterströmung



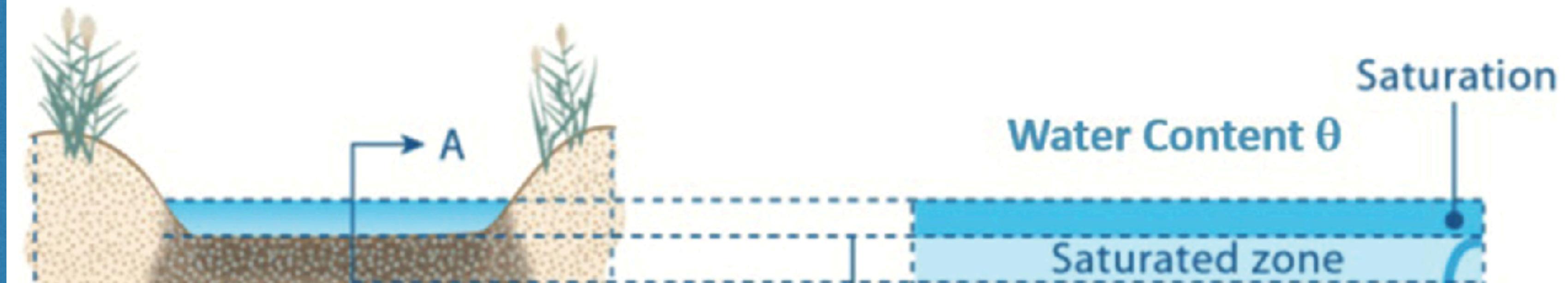
Darcy!

- $Q = K(\theta) \cdot \nabla H$
- der hydrostatische Druck im gesättigten Wasserkörper ist die Wassersäule
- bei Niederschlag erhöhter Gradient → sofort erhöhtes Fließen zum Gewässer

Infiltration

“Infiltration ist die Flussdichte von

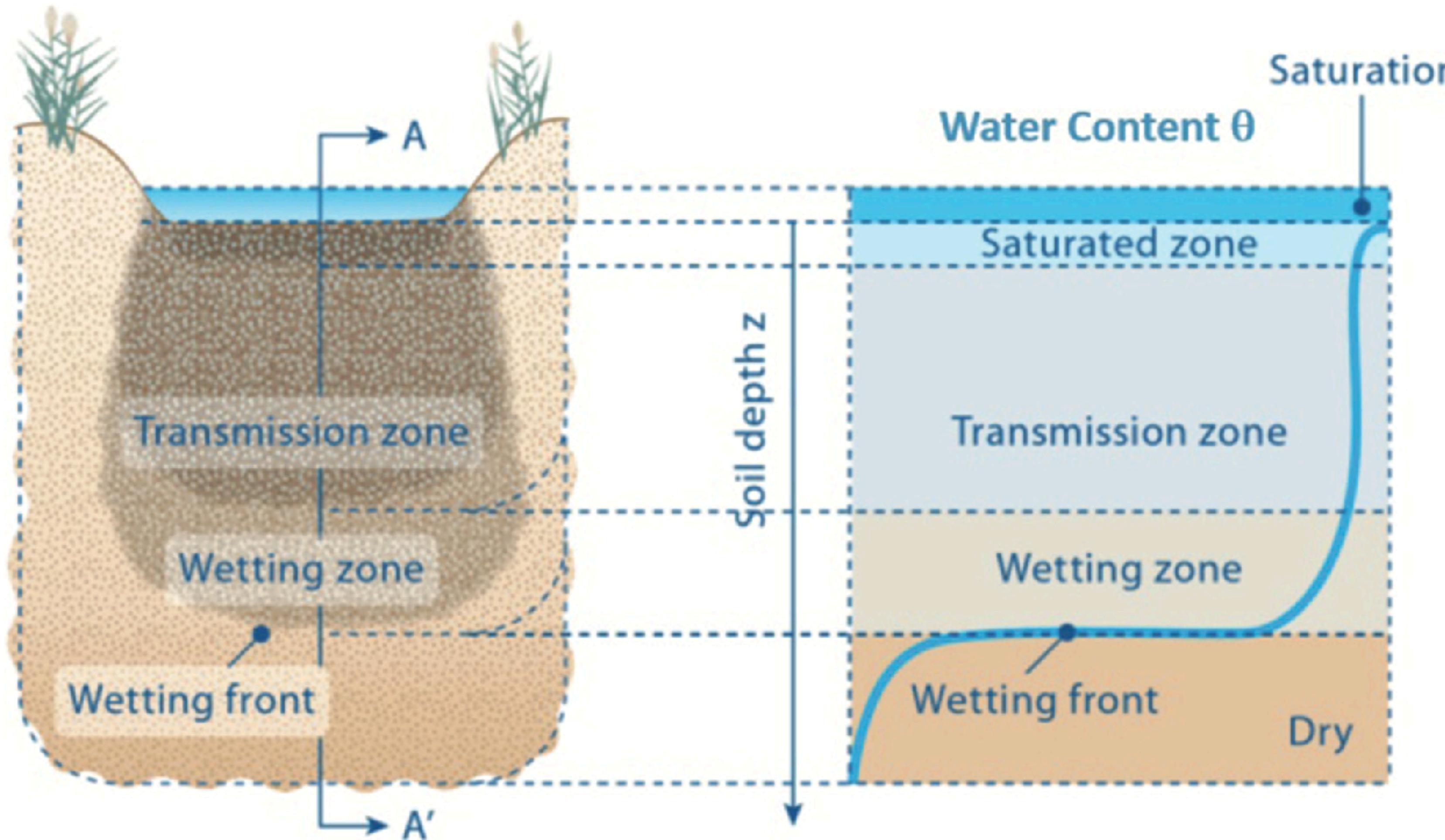
Green and Ampt (1911)



Infiltration

“Infiltration ist die Flussdichte von

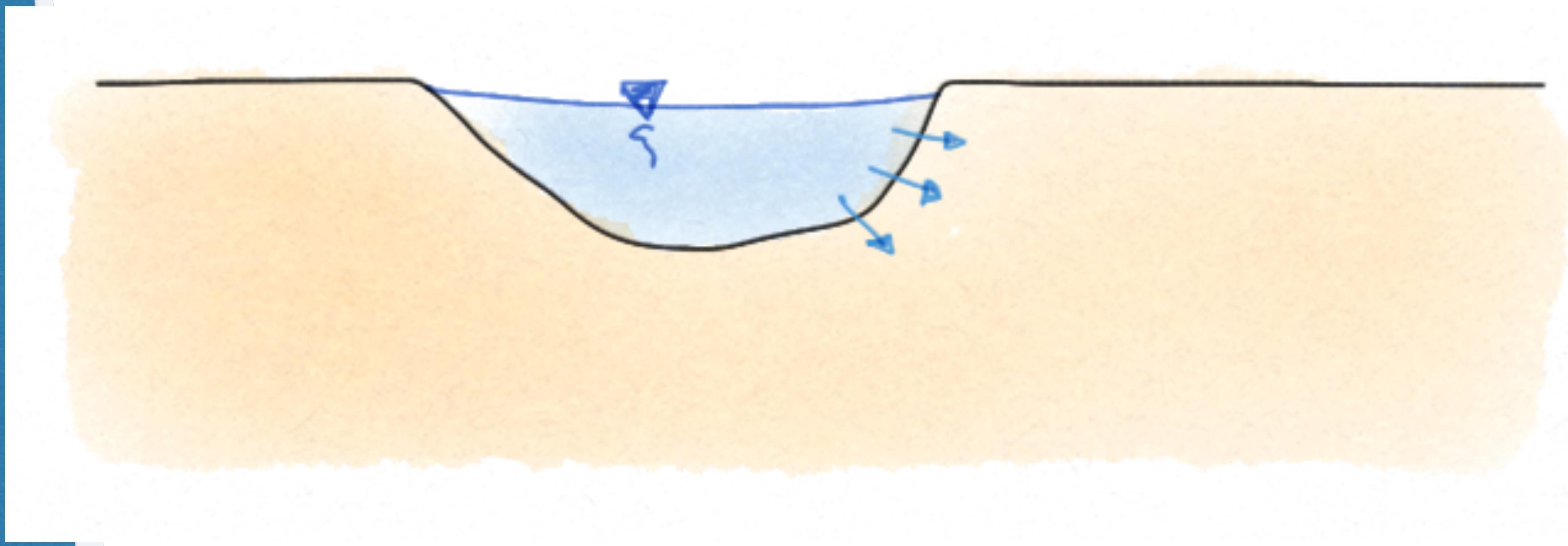
Green and Ampt (1911)



- Infiltration mit scharfer Vernässungsfront
(homogene, trockene, grobsandige Böden)
- Abschätzung der Infiltrationsrate
- und Gesamtinfiltration als Tiefe der Feuchtefront

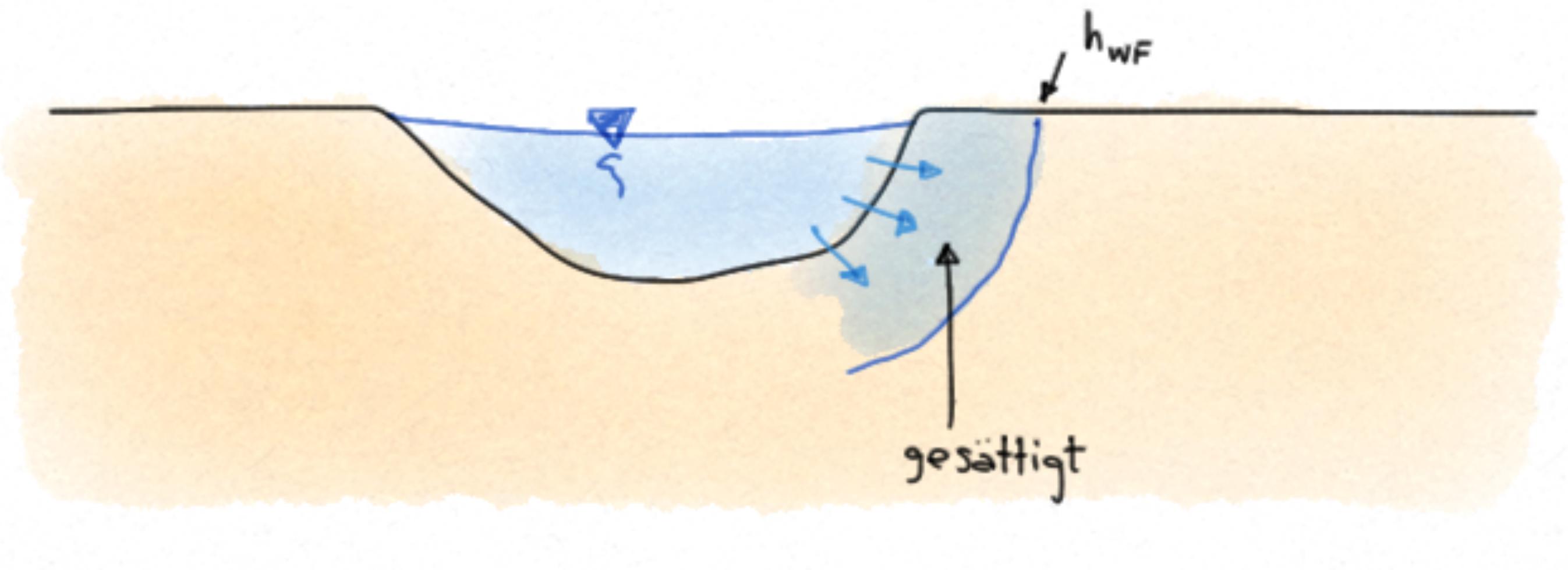
Infiltration

Green and Ampt (1911)



Infiltration

Green and Ampt (1911)

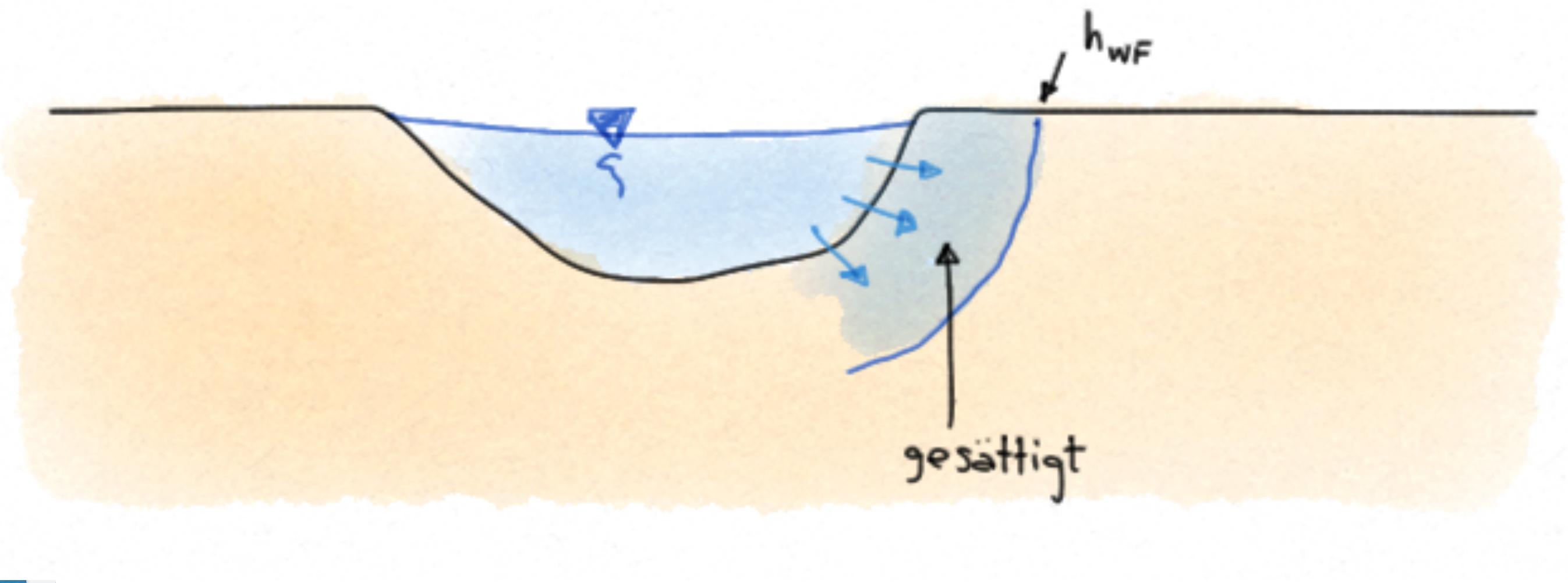


Annahmen:

- Kapillarkräfte wirken an der Vernässungsfront (wetting front)
- hinter der Wetting front gesättigte Bedingungen

Infiltration

Green and Ampt (1911)



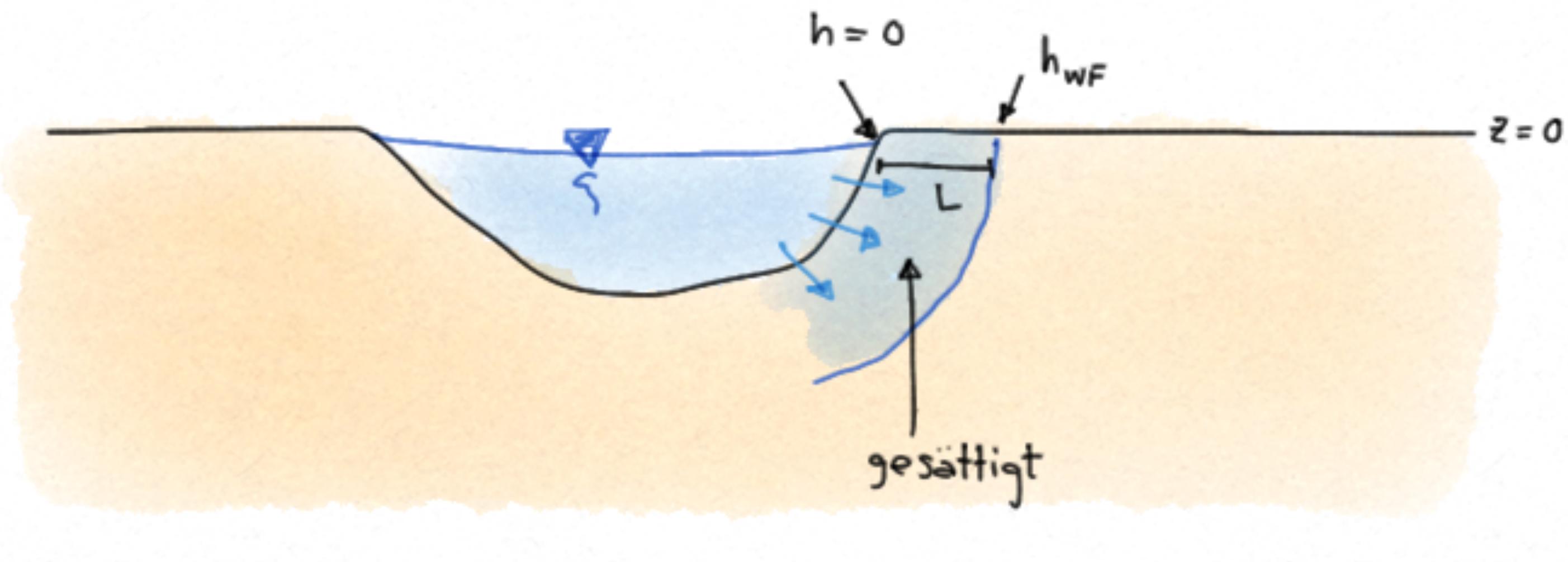
Annahmen:

- Kapillarkräfte wirken an der Vernässungsfront (wetting front)
- hinter der Wetting front gesättigte Bedingungen

Darcy: $q = -K_{\text{sat}} \nabla H$

Infiltration

Green and Ampt (1911)



Annahmen:

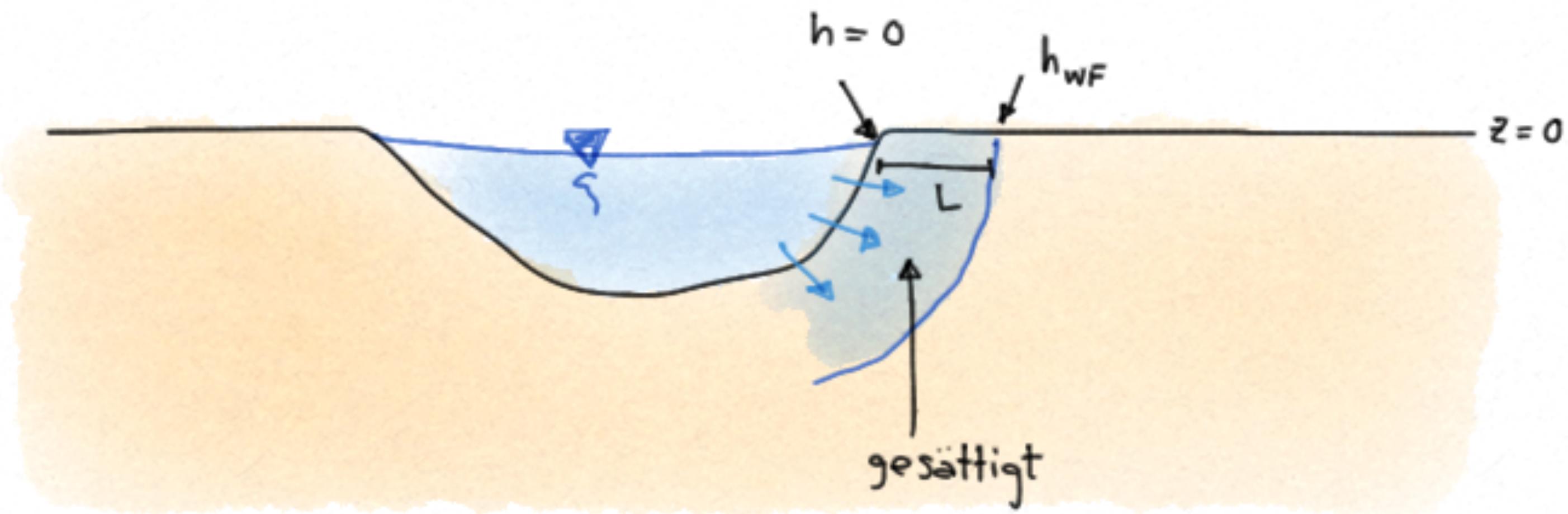
- Kapillarkräfte wirken an der Vernässungsfront (wetting front)
- hinter der Wetting front gesättigte Bedingungen

Darcy: $q = -K_{\text{sat}} \nabla H$

$$q = -K_{\text{sat}} \frac{0 - h_{\text{wf}}}{L}$$

Infiltration

Green and Ampt (1911)



Annahmen:

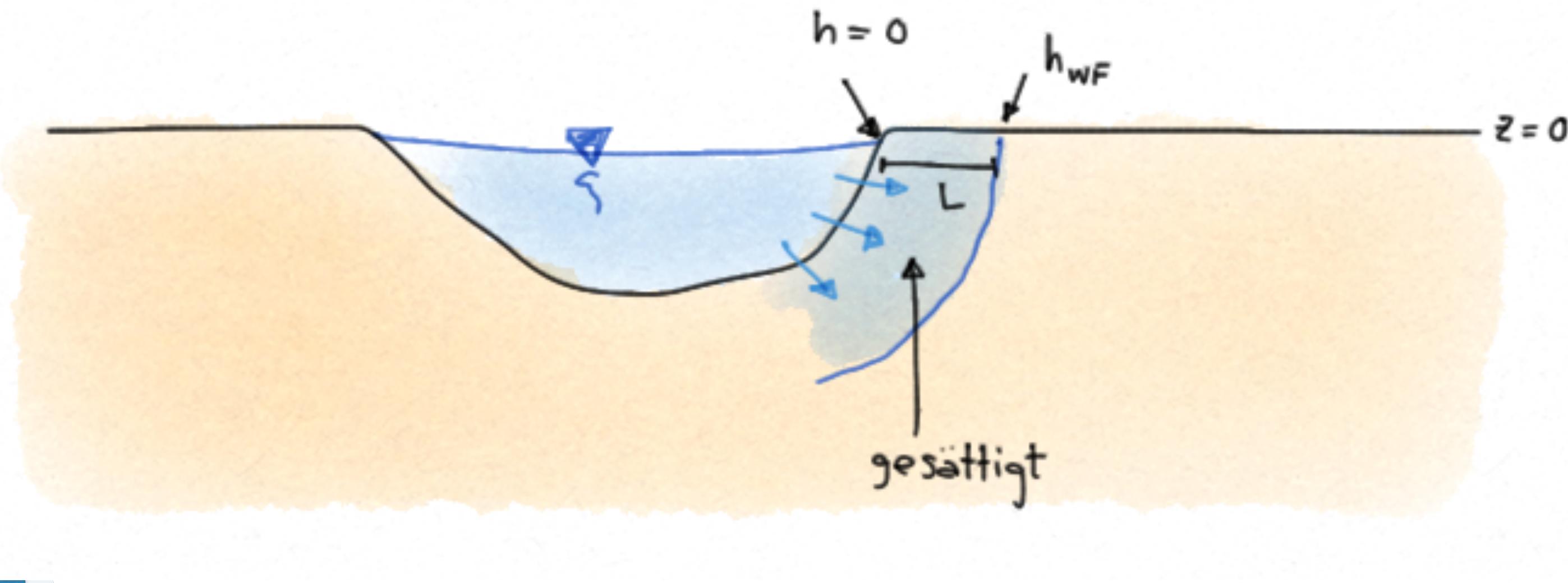
- Kapillarkräfte wirken an der Vernässungsfront (wetting front)
- hinter der Wetting front gesättigte Bedingungen

Darcy: $q = -K_{\text{sat}} \nabla H$

$$q = -K_{\text{sat}} \frac{0 - h_{\text{wf}}}{L} = K_{\text{sat}} \frac{h_{\text{wf}}}{L}$$

Infiltration

Green and Ampt (1911)



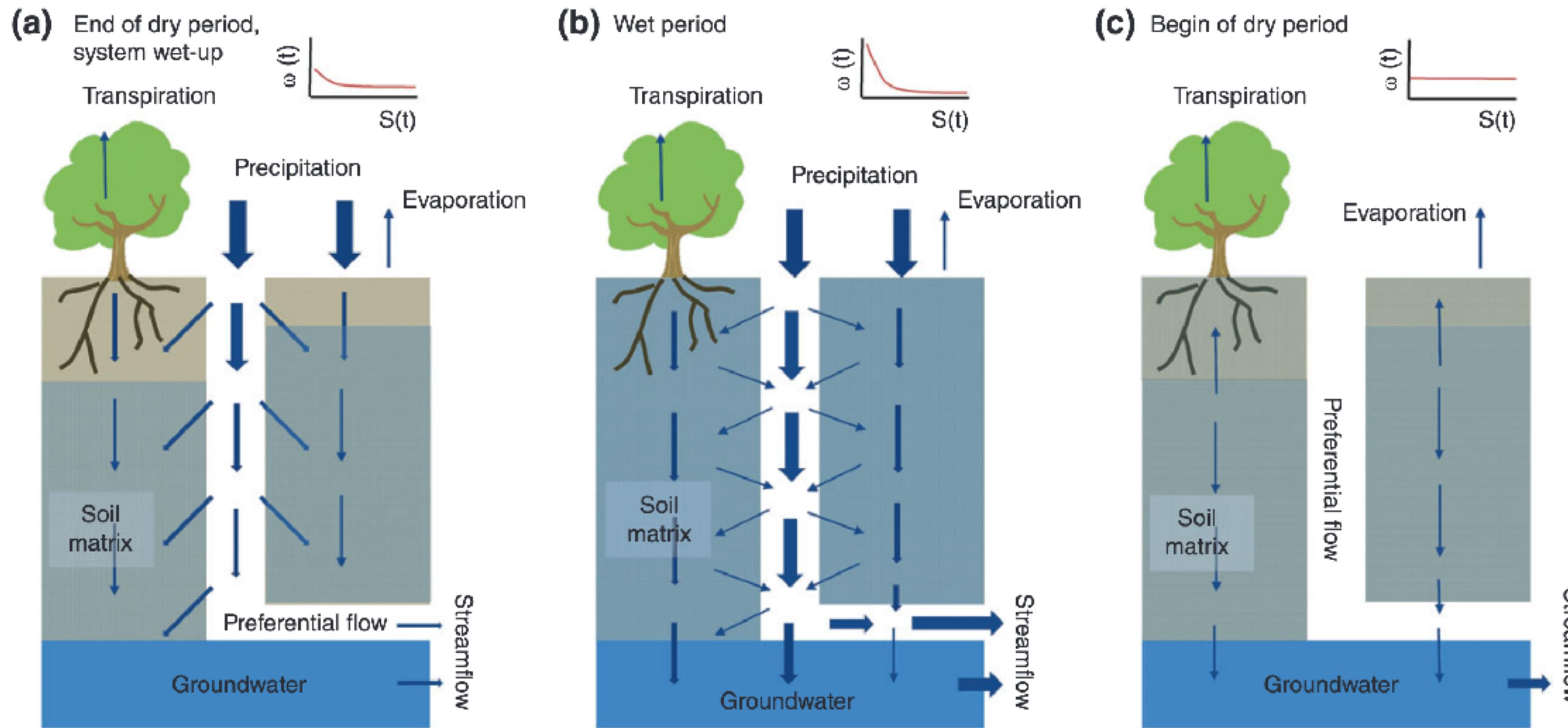
Annahmen:

- Kapillarkräfte wirken an der Vernässungsfront (wetting front)
- hinter der Wetting front gesättigte Bedingungen

- I ist von K_{sat} und h_{WF} abhängig
- Fokus liegt auf der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens

Abflussbildung

Ein dynamisches Zusammenspiel von viele Prozessen



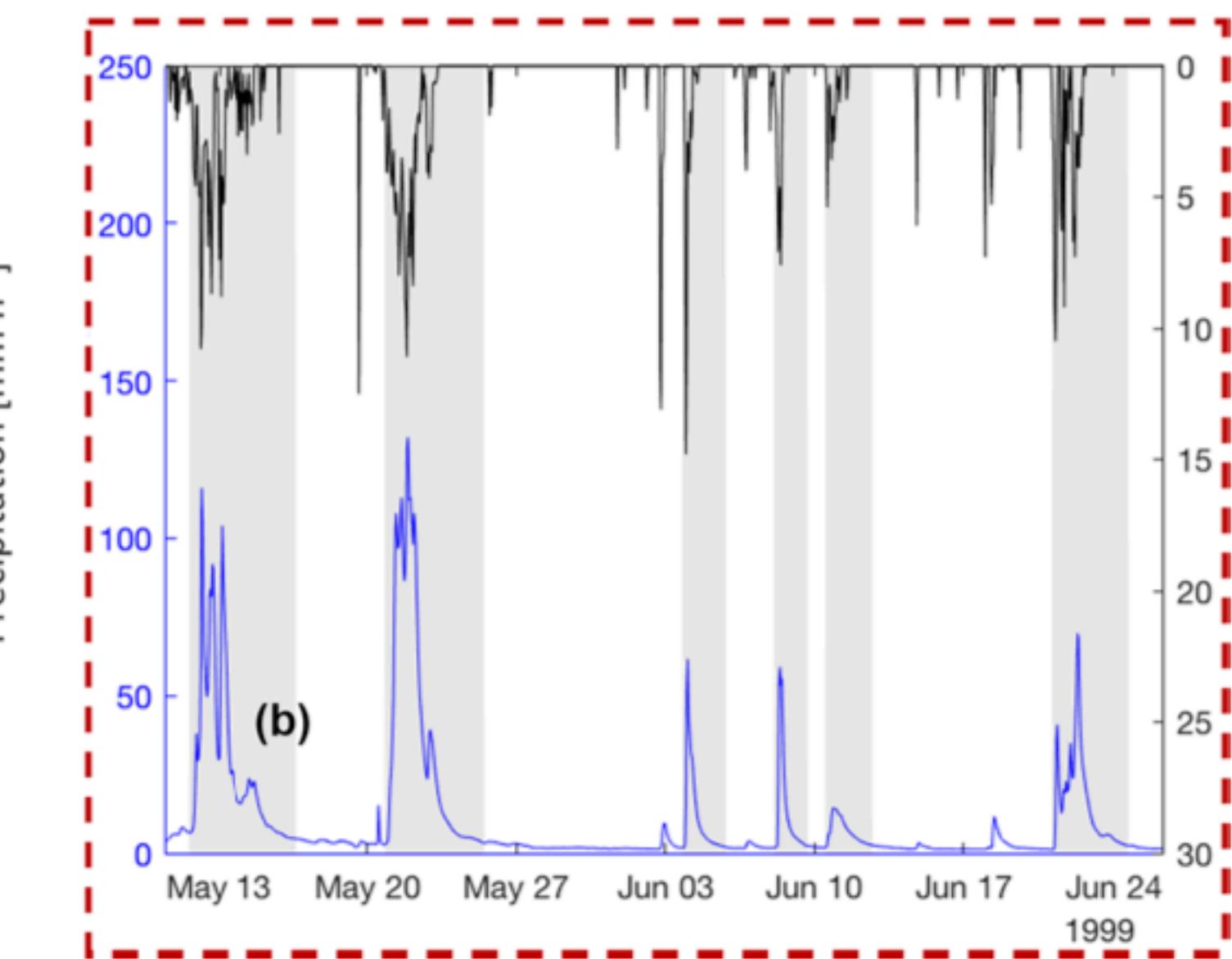
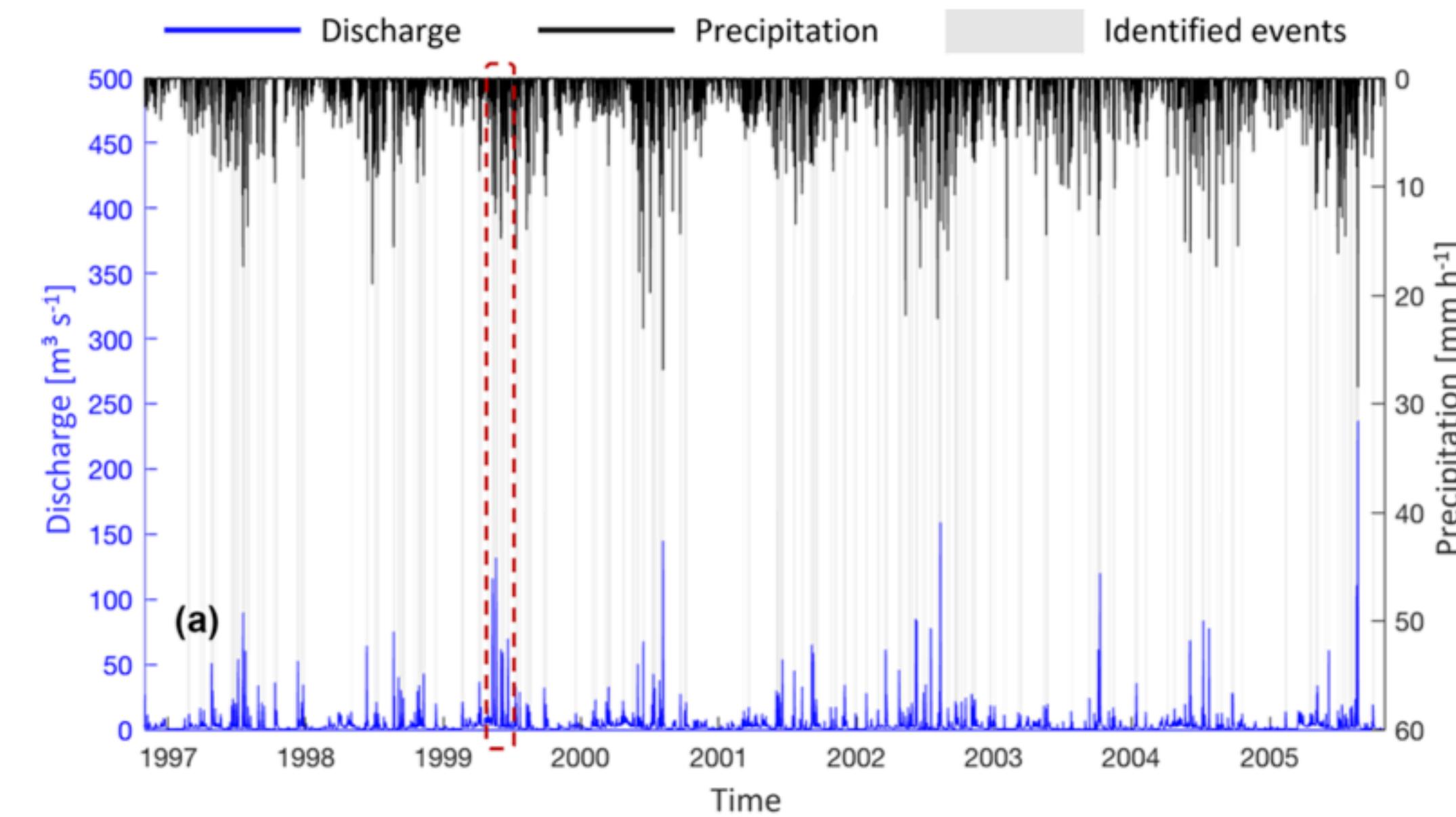
Je nach Situation:

- Unterschiedliche Anteile der Abflusskomponenten
- Infiltration immer ein zentrales Element
- Raum-zeitlich hoch variable Prozesse und Zustände

Abfluss

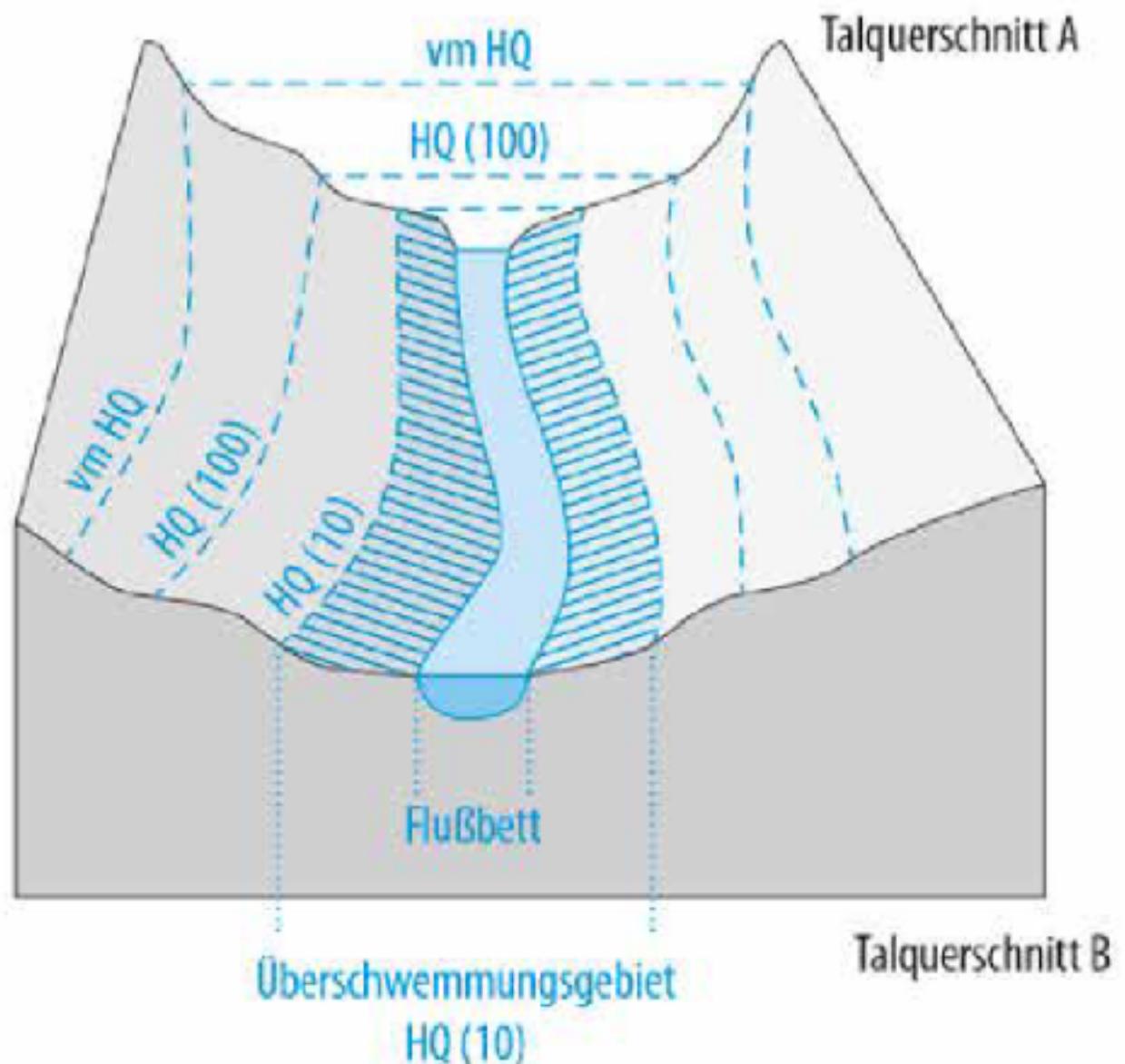
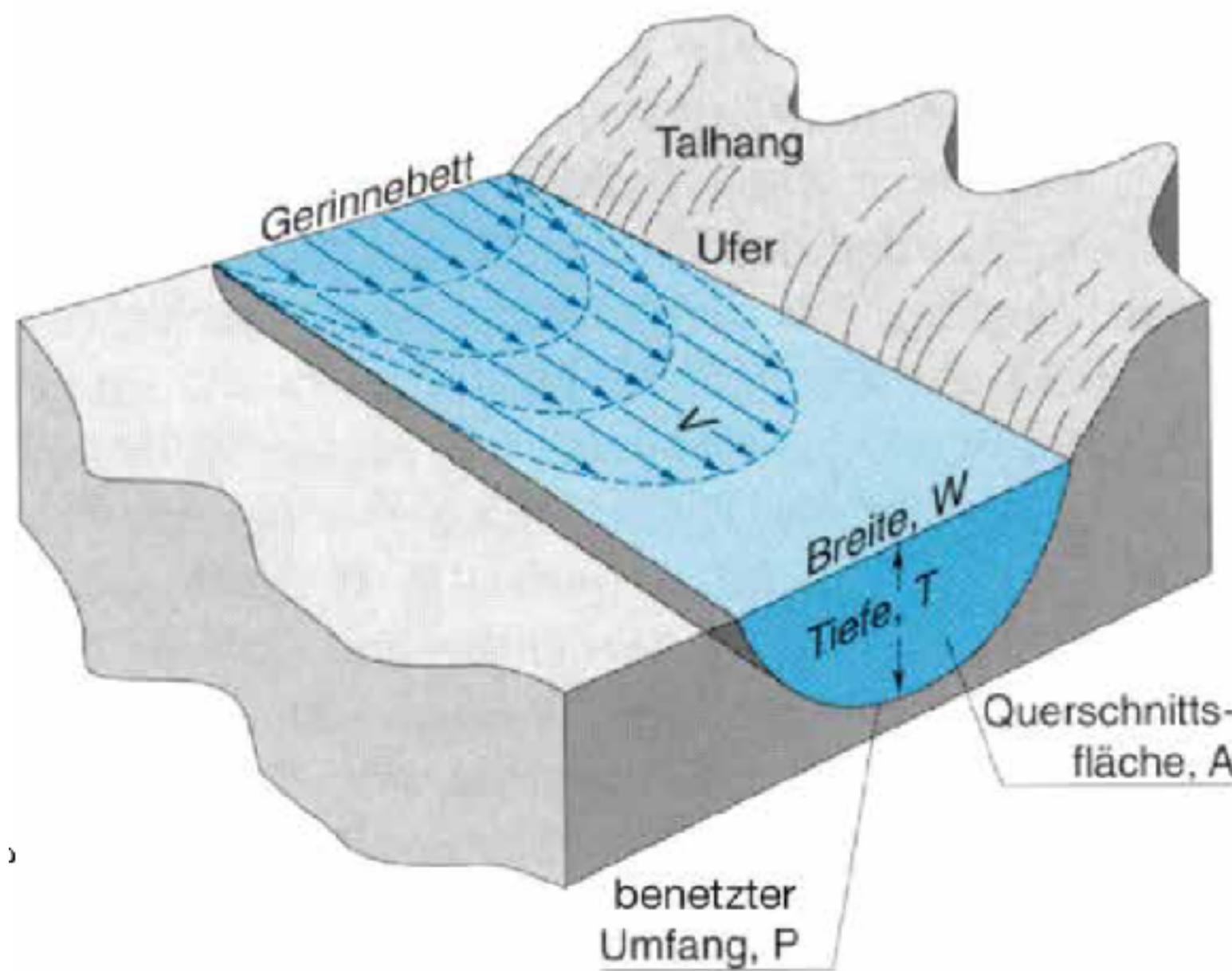
Wasser im Fließgewässer

Zeitreihen Abfluss:
Abflussganglinie



Abfluss

Gerinne



Geschwindigkeitsfeld

- Hagen-Poiseuille...

Hydraulischer Radius

$$r_h = A/P$$

A & P sind variabel

- HQ Hochwasser-scheitelabfluss
- (Jahr) Wiederkehrzeit

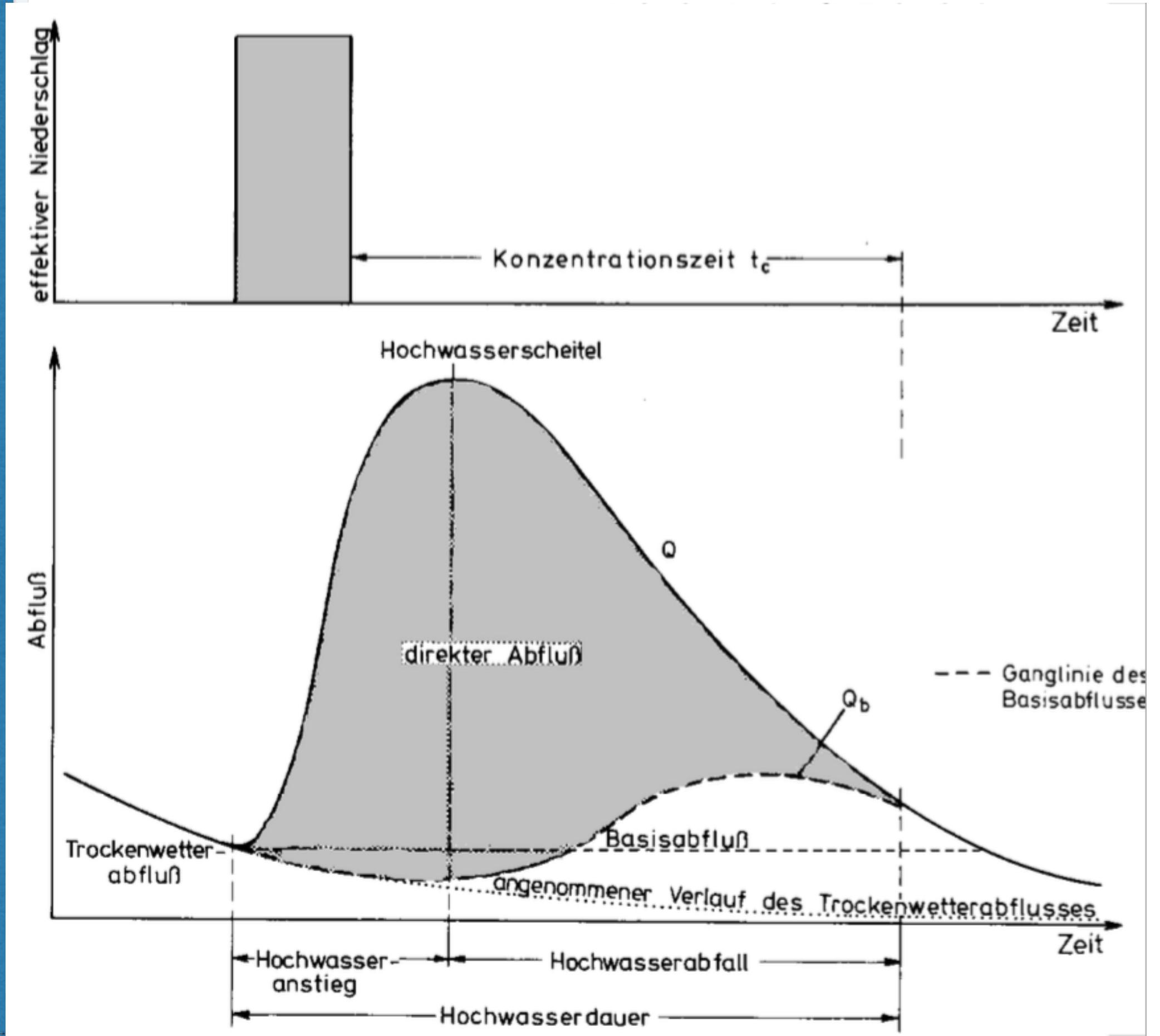
Gauckler-Manning-Strickler Abschätzung:

- $q = k_{st} \cdot r_h^{2/3} \cdot I_{so}^{1/2}$
- k_{st} : Stickler Beiwert
- I_{so} : Solgefälle (m/m)

	$k_{st} [m^{1/3}/s]$
gerader Fluss mit glatter Sohle	30-40
mäandrierend, verkrautet	20-30
mit vielen Büschchen und Becken	7-14
grasiges Vorland	20-40
Vorland mit Büschchen	6-30
bewaldetes Vorland mit Unterholz	5-12

Gangline

Reaktion des Abfluss auf Niederschlag

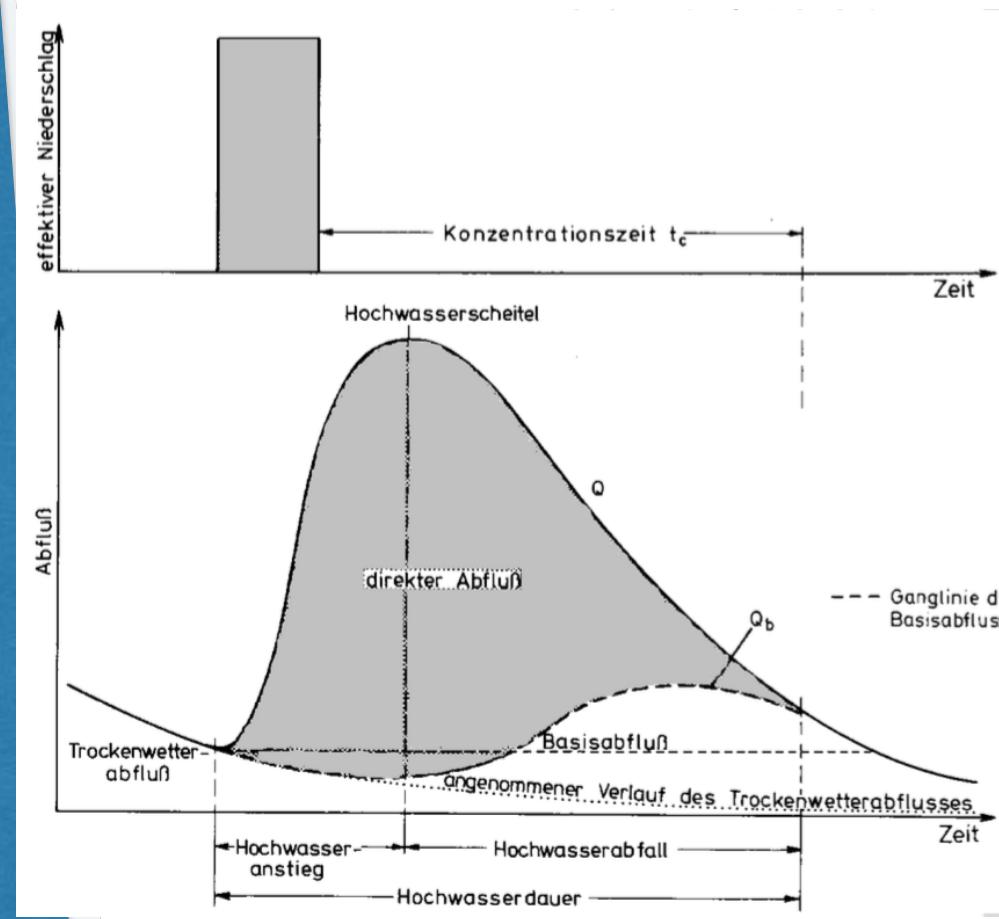


Mit zunehmender Fließstrecke:

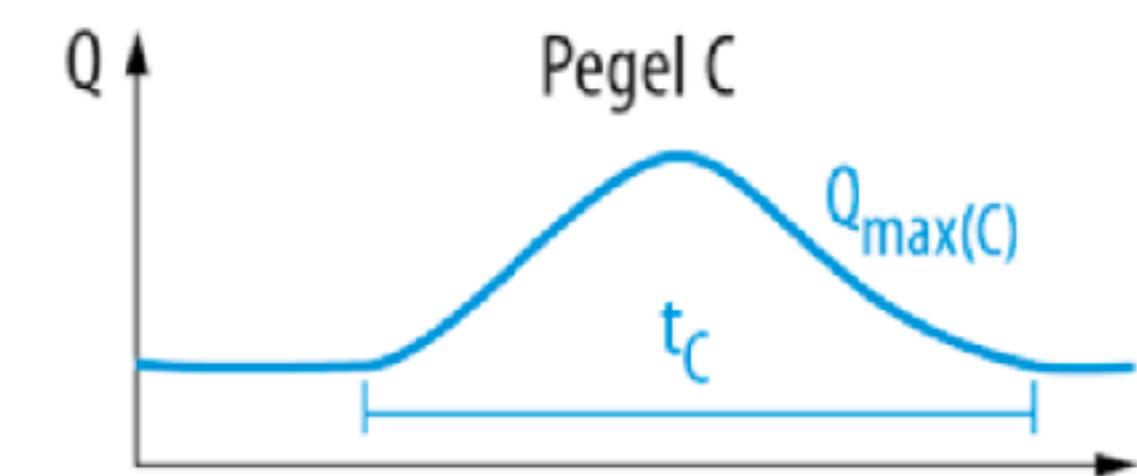
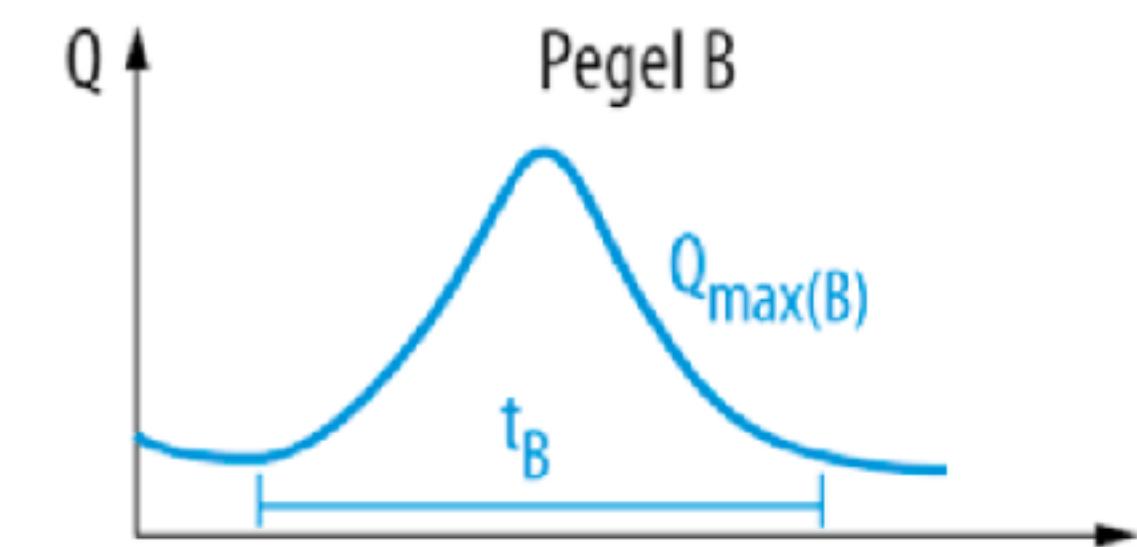
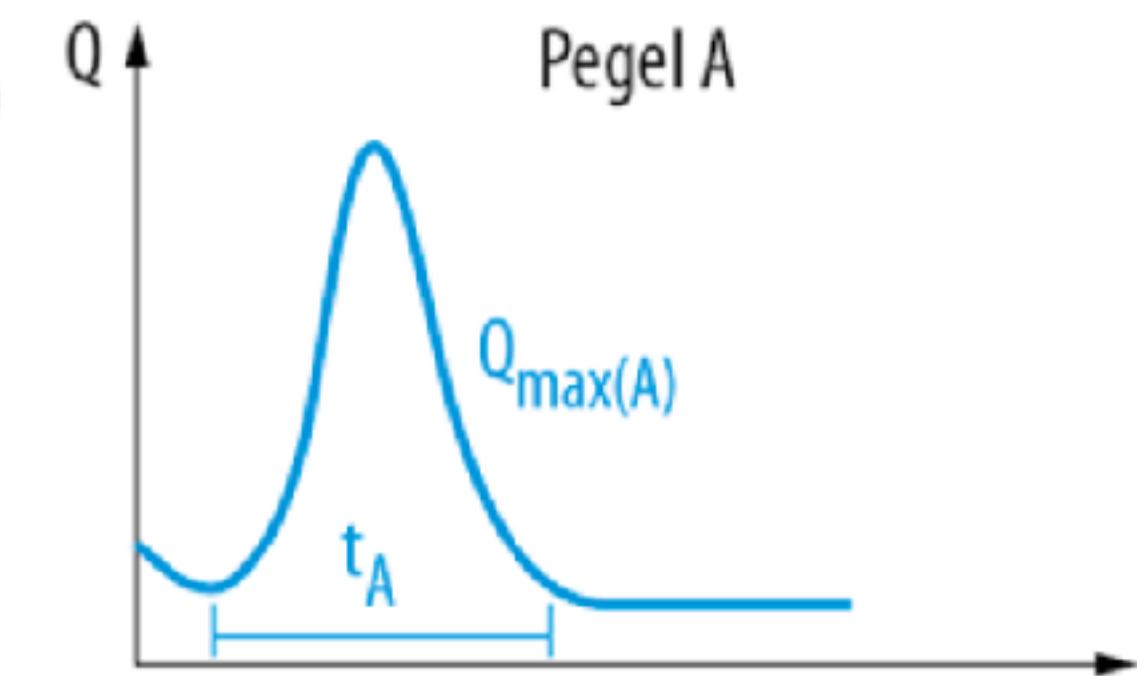
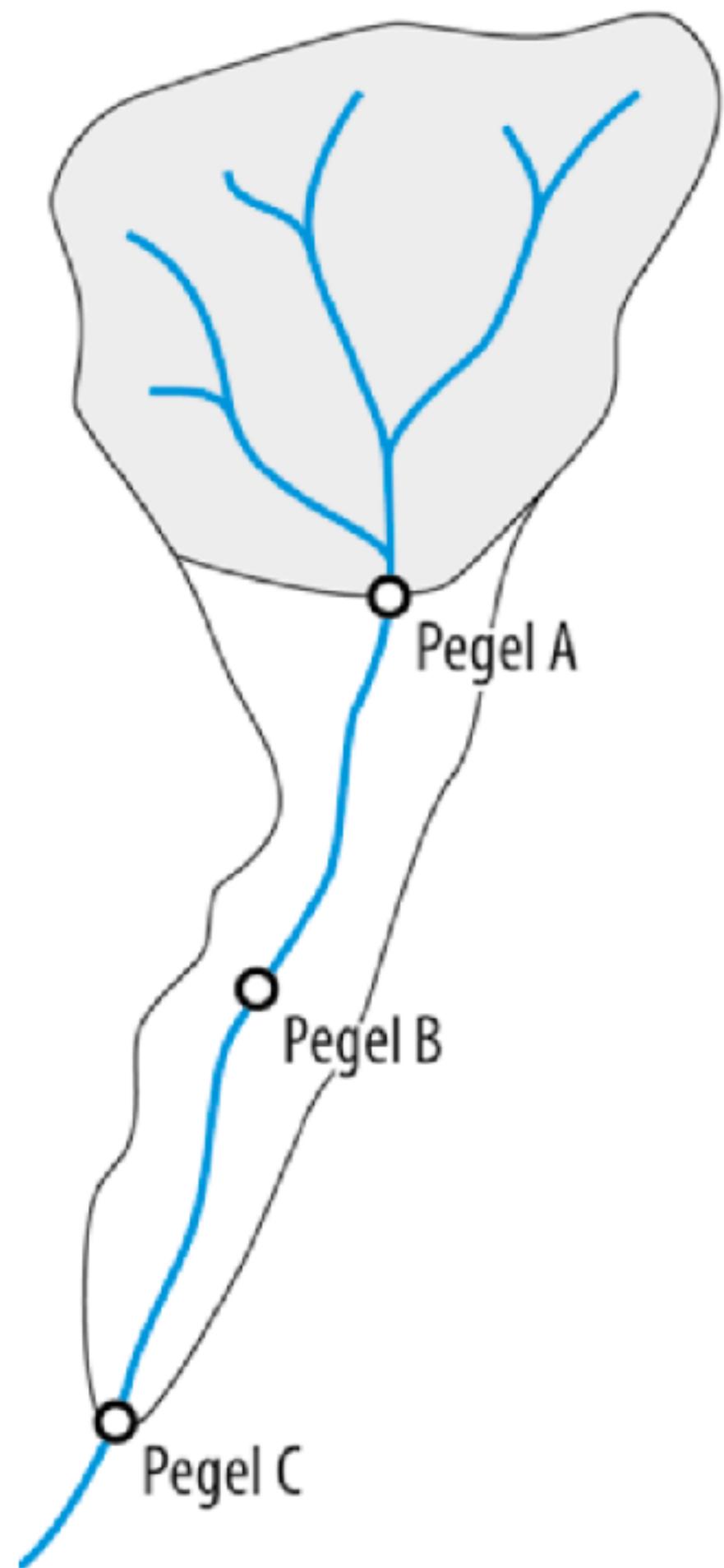
- Hochwasserdauer t_{hw} nimmt zu
- Scheitelabflüsse q_{max} nehmen ab (was aber noch immer größere Q_{max} bedeutet)

Gangline

Reaktion des Abfluss auf Niederschlag

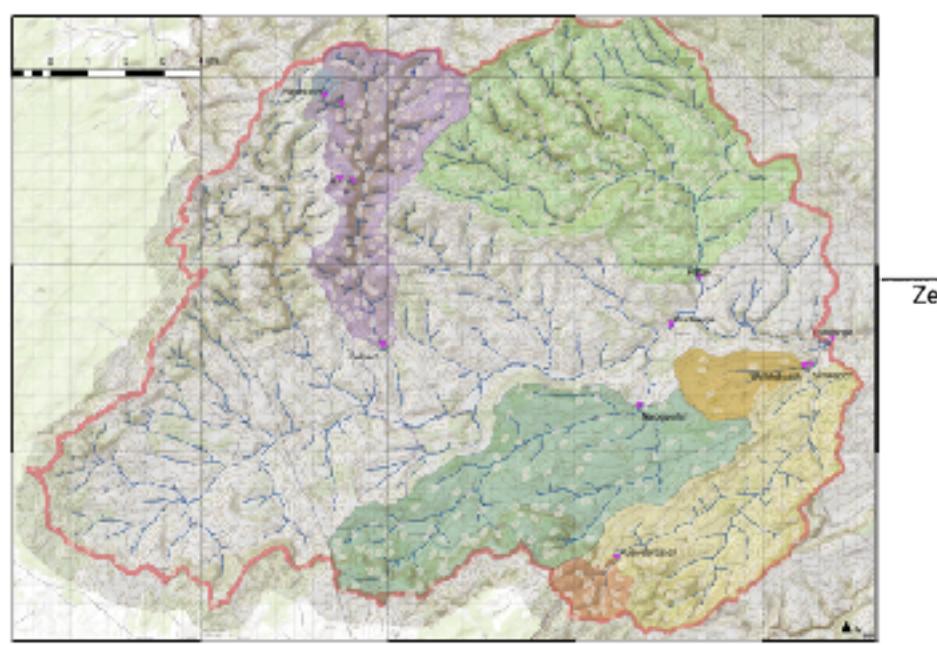


Einzugsgebiet Pegel A



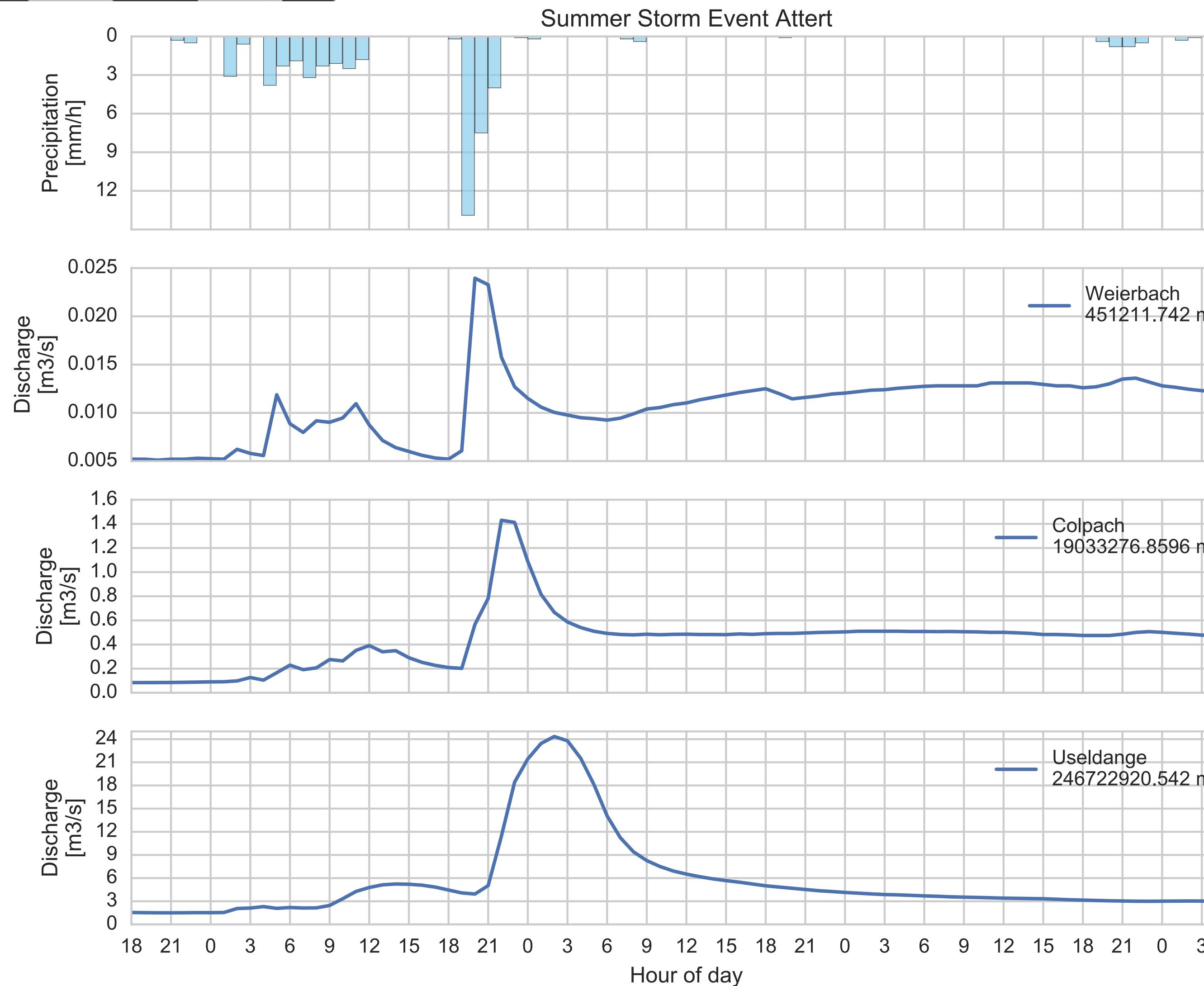
Mit zunehmender Fließstrecke:

- Hochwasserdauer t_{hw} nimmt zu
- Scheitelabflüsse q_{max} nehmen ab (was aber noch immer größere Q_{max} bedeutet)



Gangline

Reaktion des Abfluss auf Niederschlag



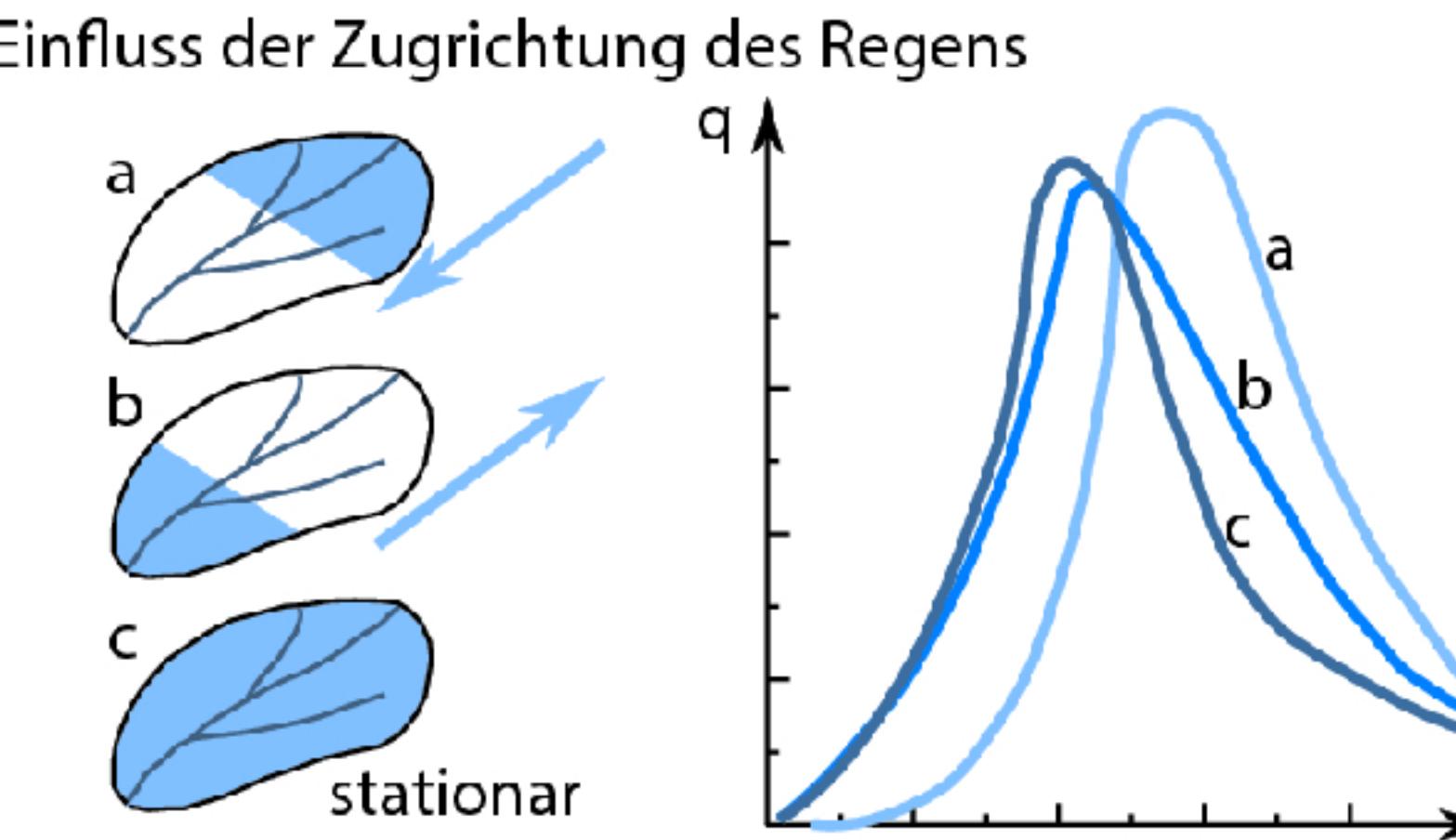
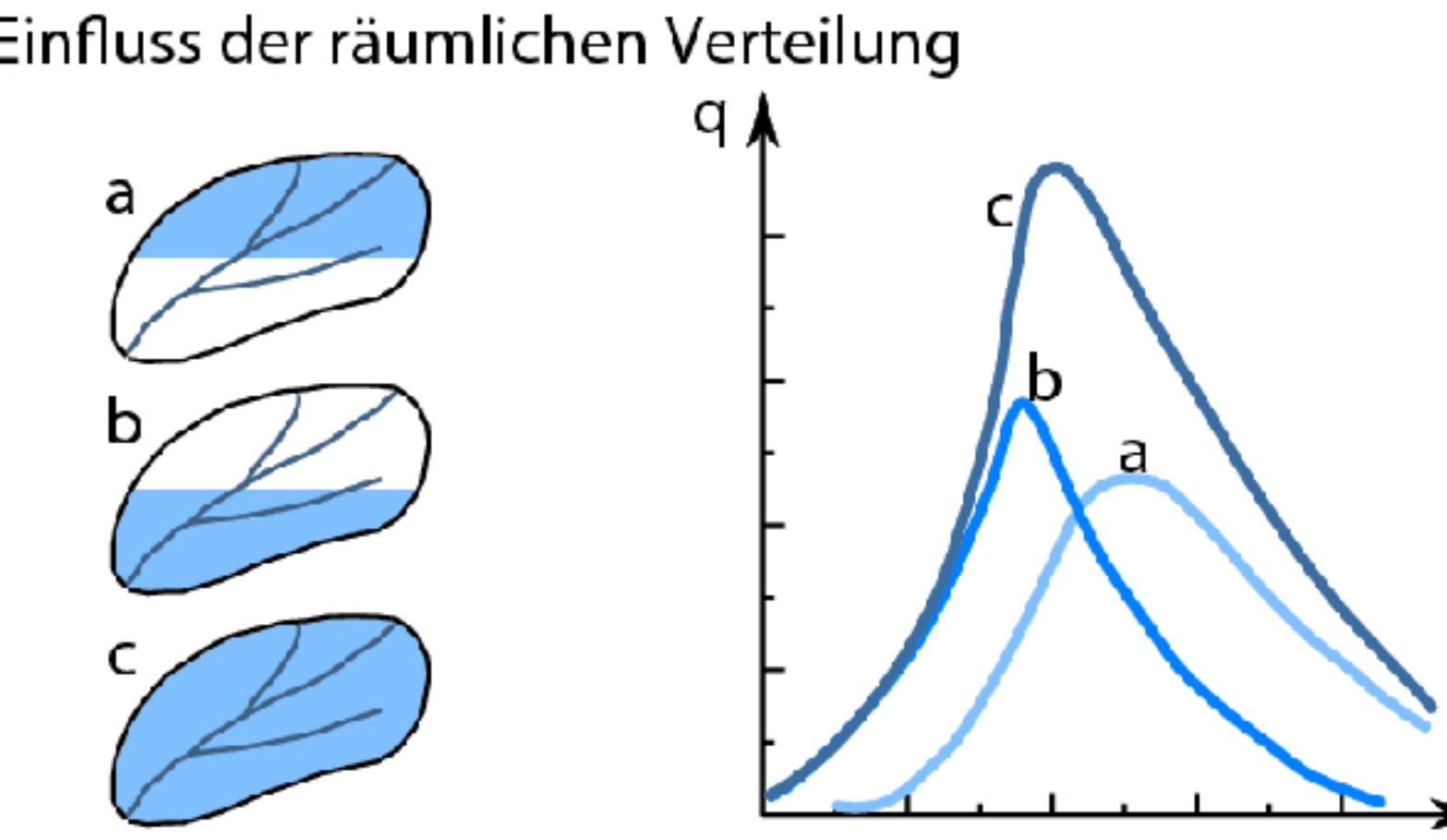
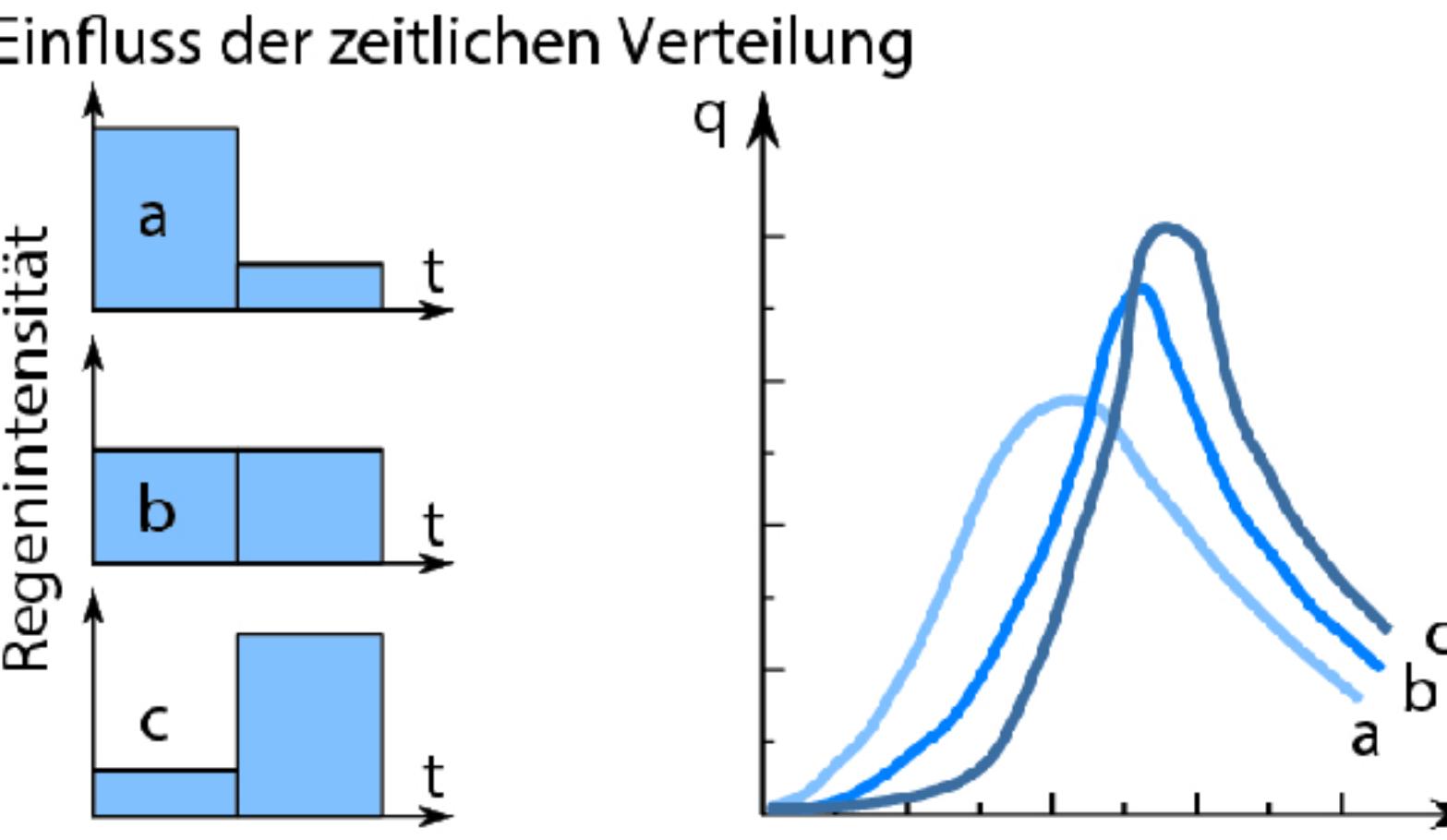
Mit zunehmender Fließstrecke:

- Hochwasserdauer t_{hw} nimmt zu
- Scheitelabflüsse q_{max} nehmen ab (was aber noch immer größere Q_{max} bedeutet)

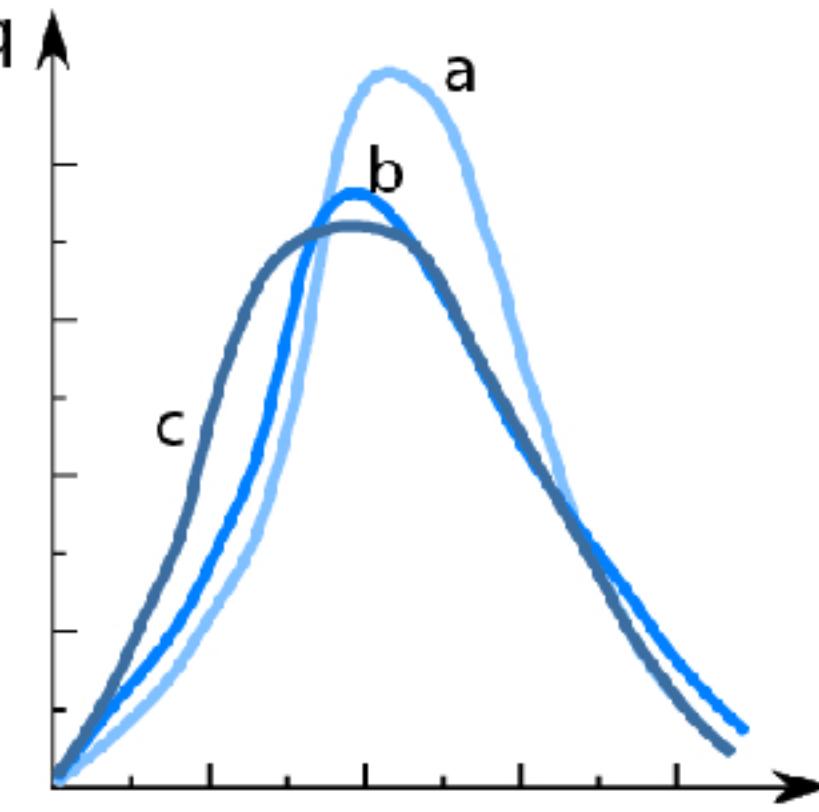
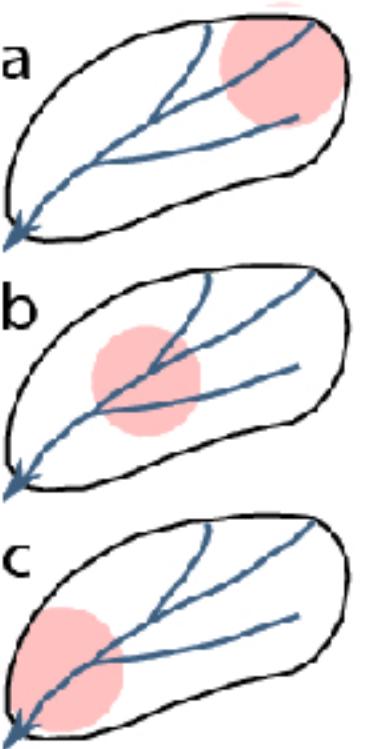
Gangline

Reaktion des Abfluss auf Niederschlag

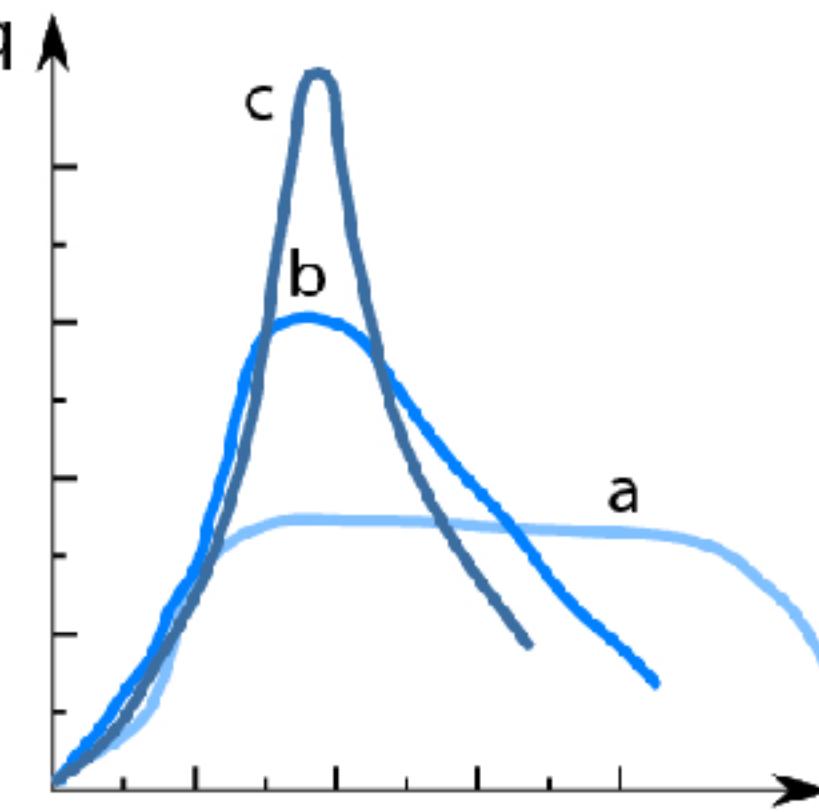
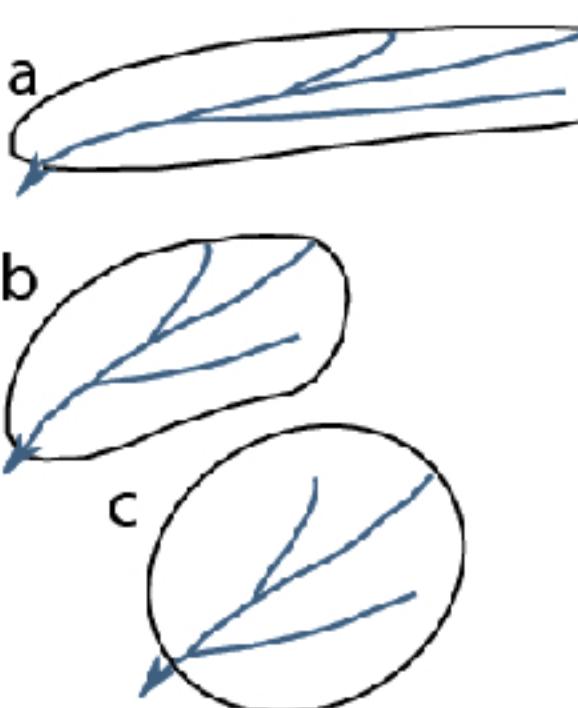
- Entstehung und Ablauf einer Hochwasserwelle ist ein komplexer (instationärer) Prozess
- Abflussrate und Fließgeschwindigkeit ändern sich in Abhängigkeit von Zeit und Ort



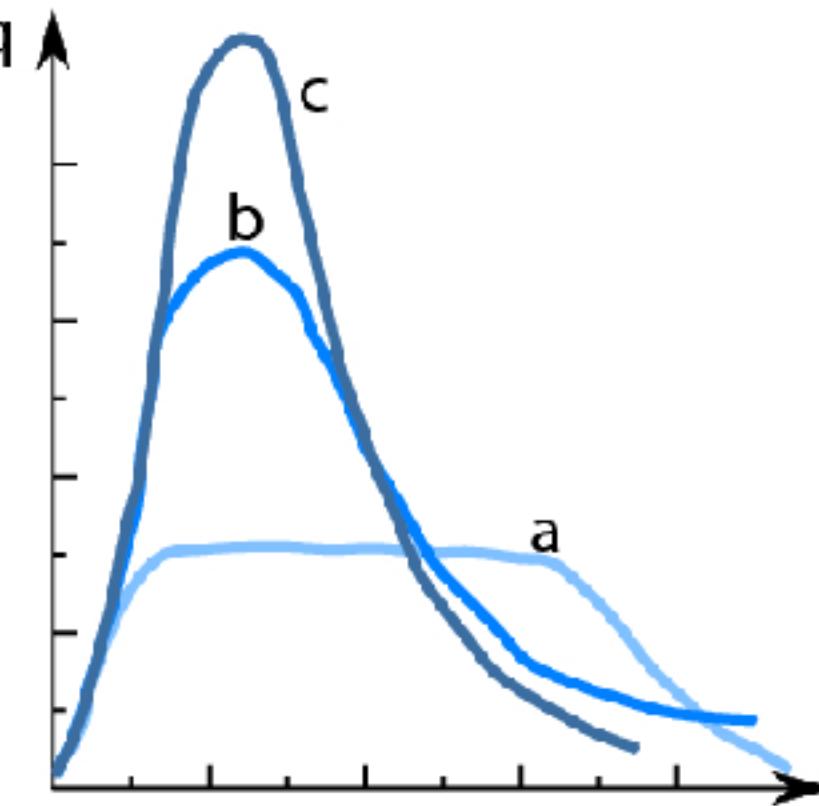
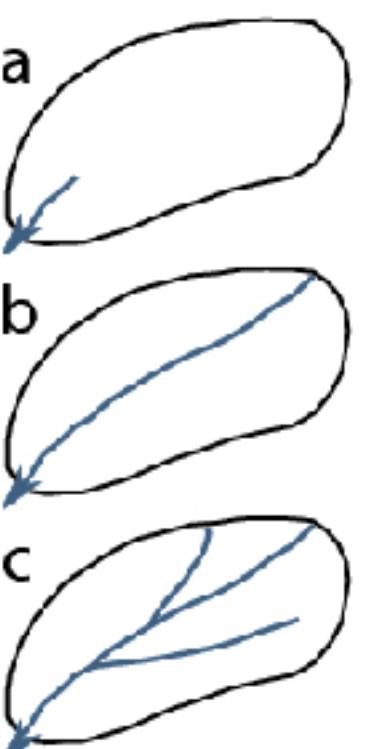
Einfluss einer Bebauung



Einfluss der Einzugsgebietsform



Einfluss der Gewässernetzdichte



Reaktion des Abfluss auf Niederschlag

- Entstehung und Ablauf einer Hochwasserwelle ist ein komplexer (instationärer) Prozess
- Abflussrate und Fließgeschwindigkeit ändern sich in Abhängigkeit von Zeit und Ort
- Ebenso zeigen sich Gebietseigenschaften in verschiedenen Ganglinien

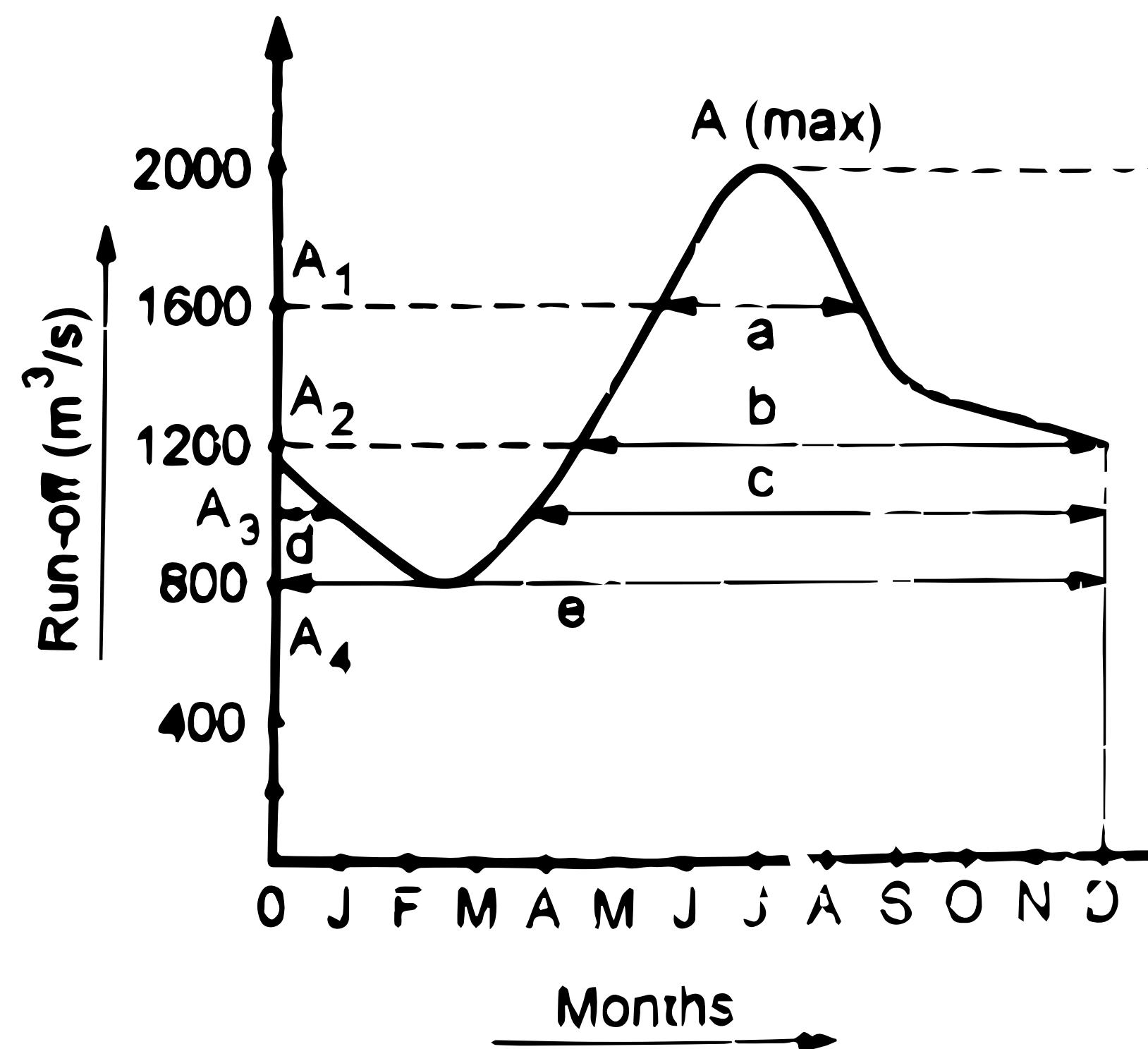
Gangline

Flow Duration Curve

Gebietseigenschaften aus Abflussverteilungen

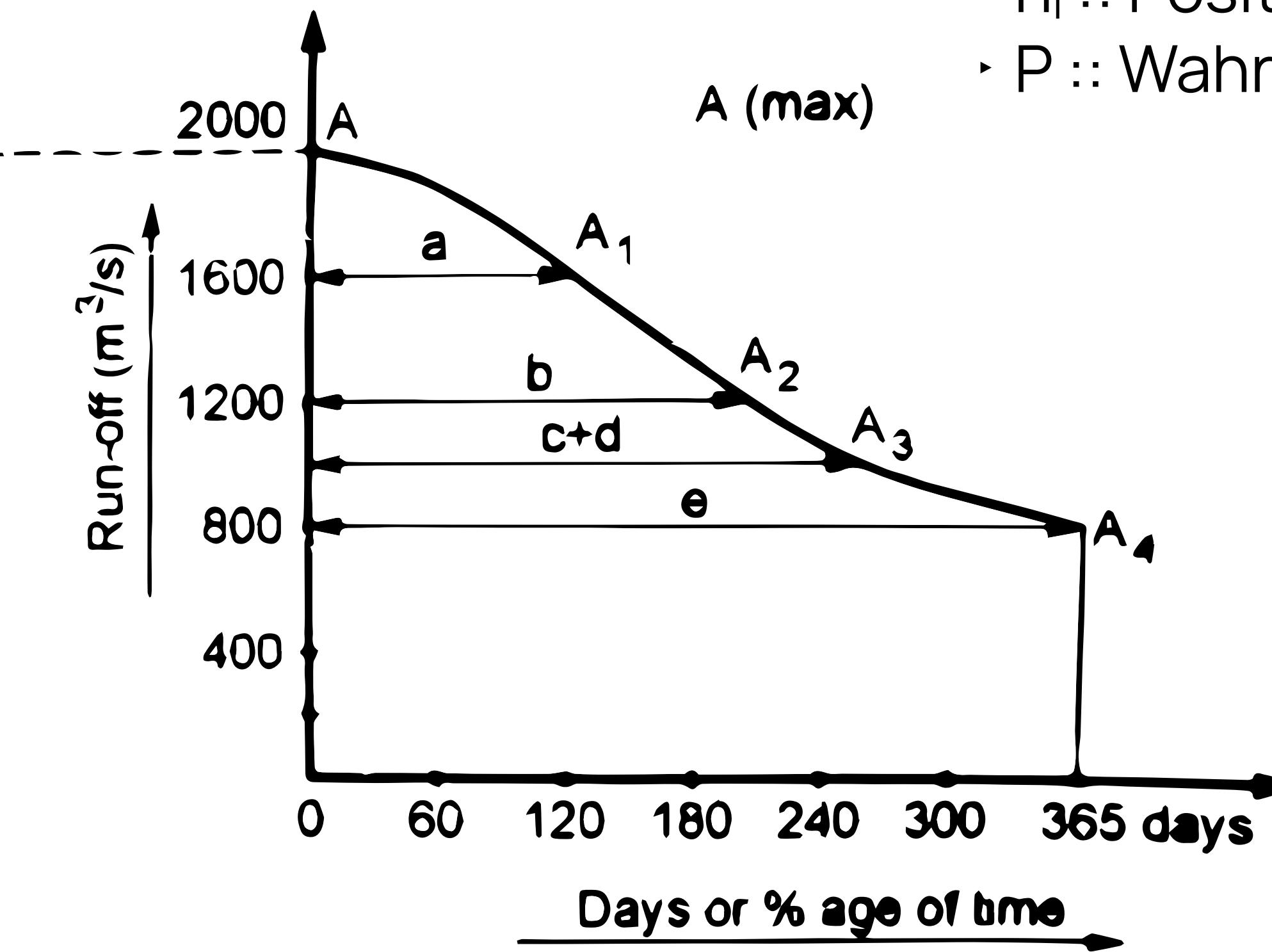
Zeitreihe von Abflüssen

- zB. hier Tagesmittel ein Jahr, meistens längere Zeitreihen



Rangstatistik

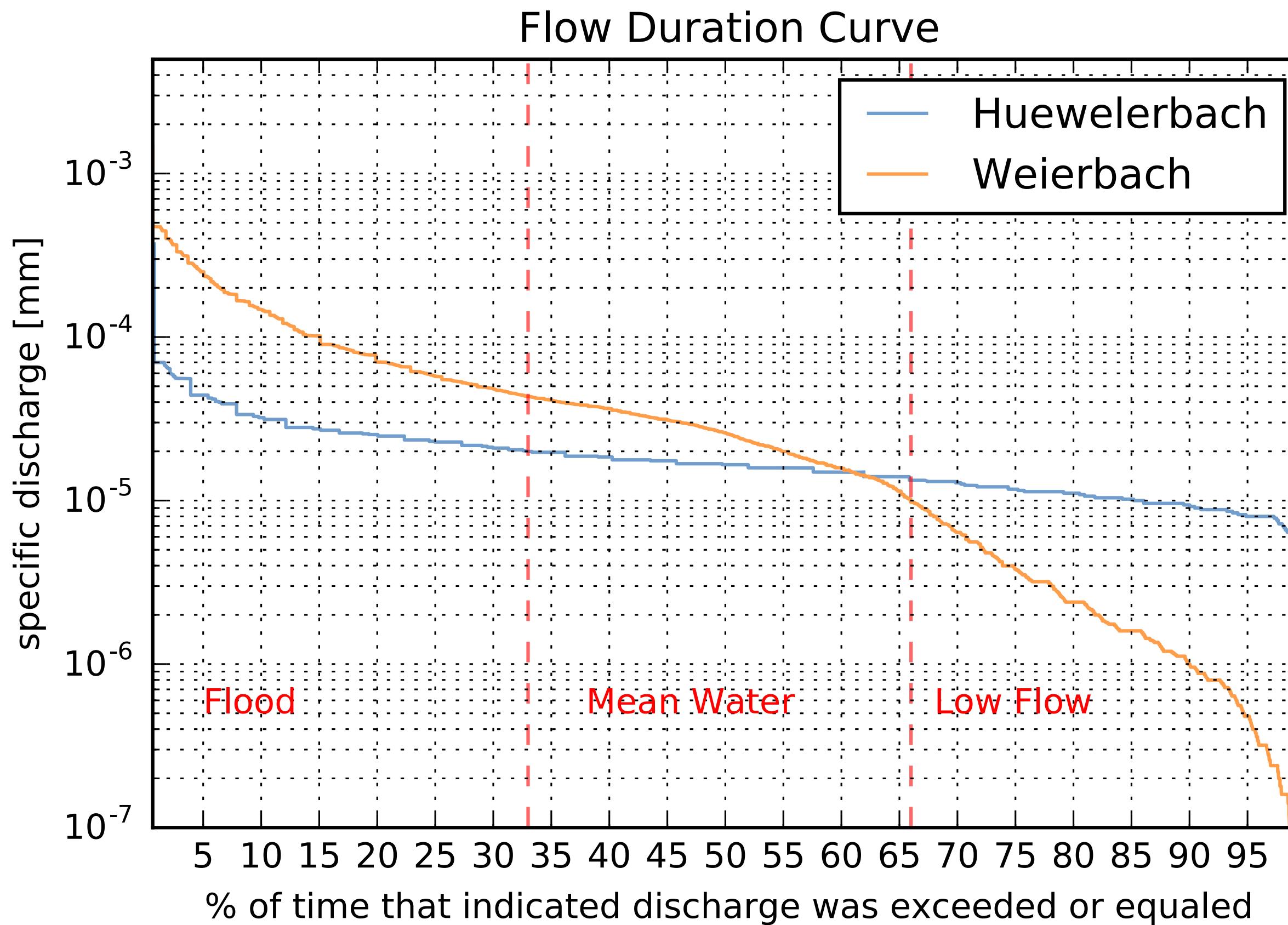
- Messungen absteigend sortieren
- $P_{\text{exceed}} = n_i / (n+1)$
- n :: Anzahl
- n_i :: Positionsnummer
- P :: Wahrscheinlichkeit



- Vergleichbarkeit von Einzugsgebieten!

Flow Duration Curve

Gebietseigenschaften aus Abflussverteilungen



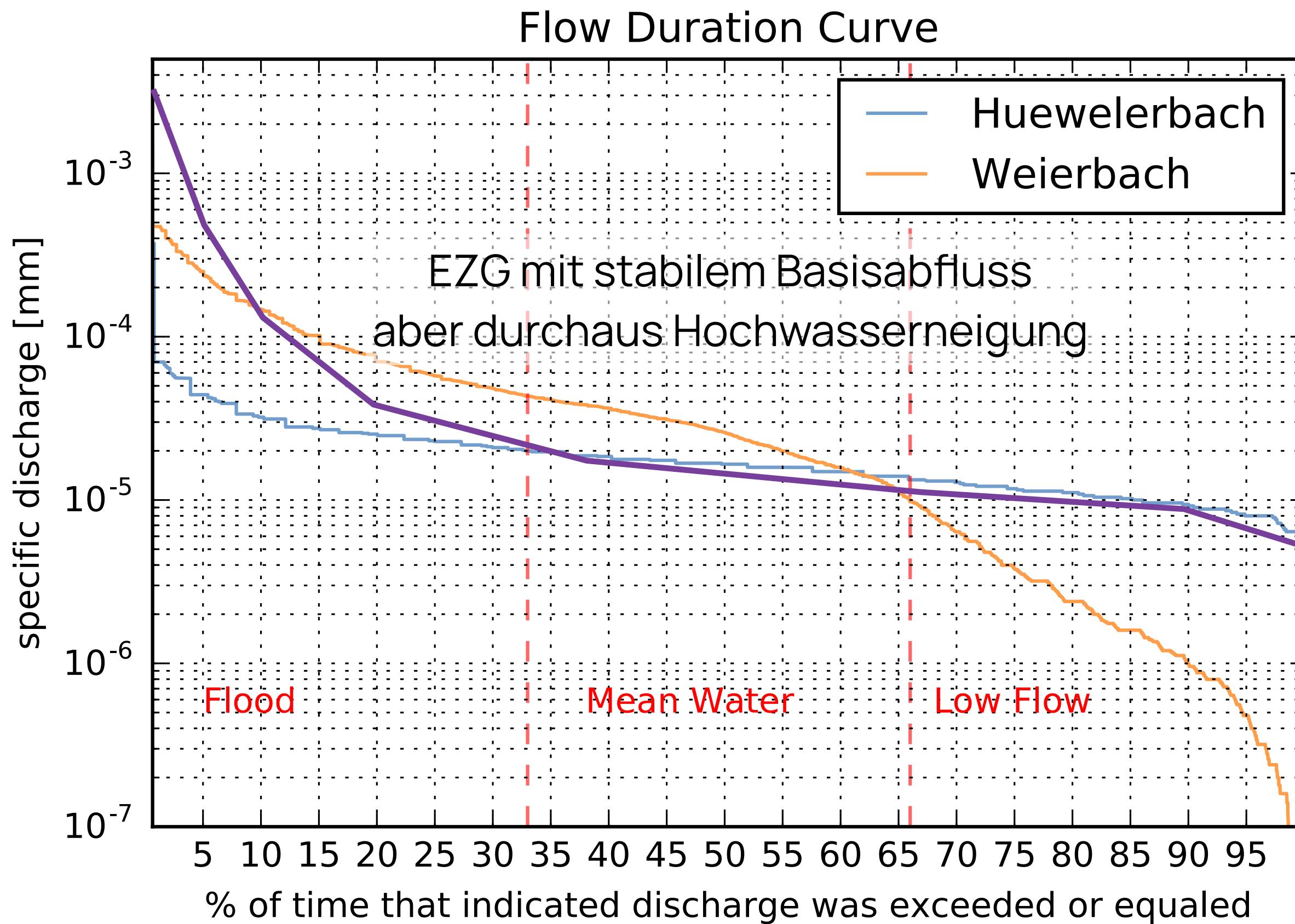
Kumulative Verteilungsfunktion der Überschreitungs-wahrscheinlichkeiten eines bestimmten Abflusswertes

- alle Messungen werden absteigend sortiert
- $P_{ex} = n/(n+1)$
- Weierbach Tendenz zu Extremen
 - > schnelles Abflussverhalten
- Huewelerbach sehr ausgeglichen
 - > Baseflow dominiert

- Vergleichbarkeit von Einzugsgebieten!

Flow Duration Curve

Gebietseigenschaften aus Abflussverteilungen



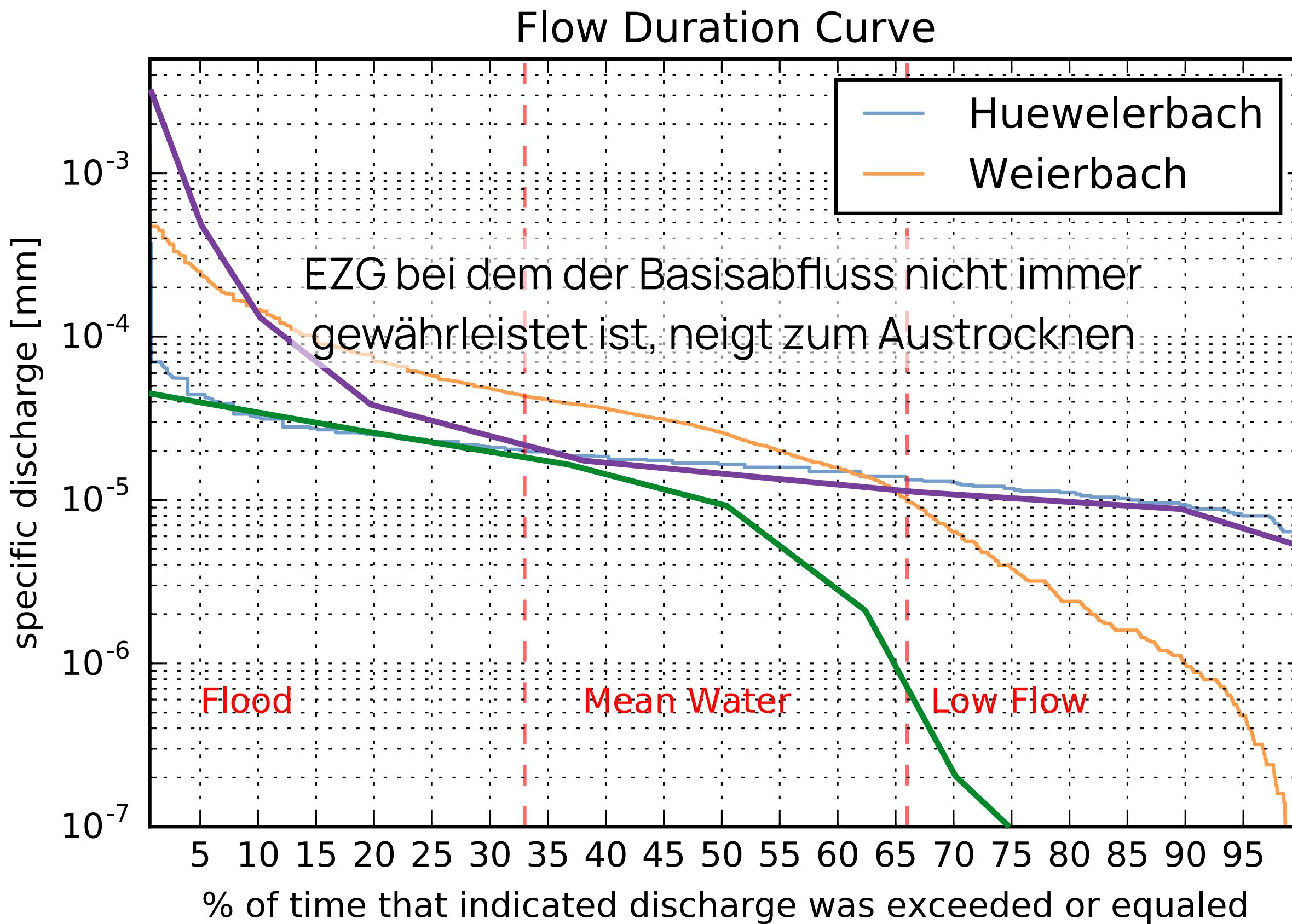
Kumulative Verteilungsfunktion der Überschreitungs- wahrrscheinlichkeiten eines bestimmten Abflusswertes

- alle Messungen werden absteigend sortiert
- $P_{ex} = n/(n+1)$
- Weierbach Tendenz zu Extremen
 - > schnelles Abflussverhalten
- Huewelerbach sehr ausgeglichen
 - > Baseflow dominiert

- Vergleichbarkeit von Einzugsgebieten!

Flow Duration Curve

Gebietseigenschaften aus Abflussverteilungen

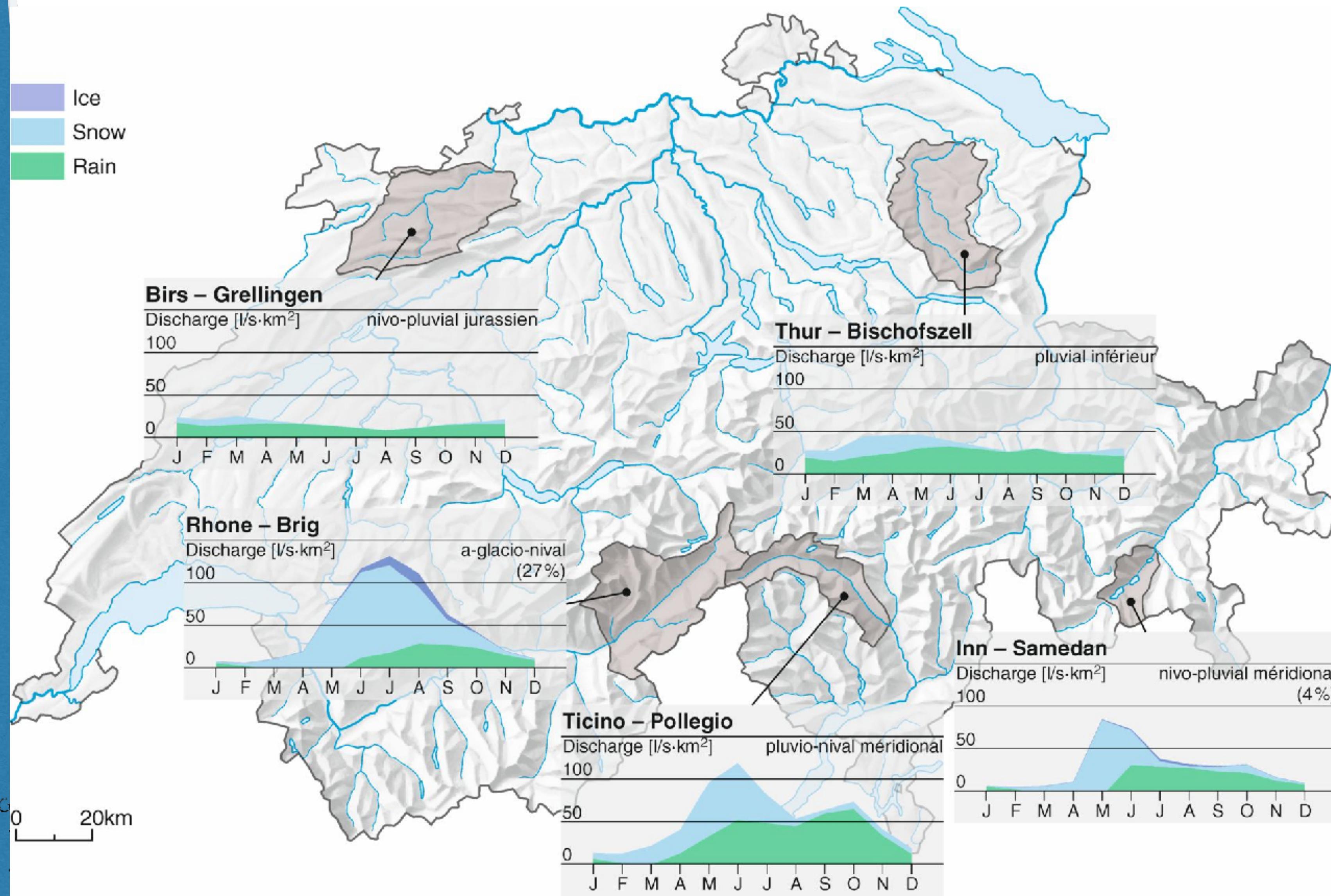


Kumulative Verteilungsfunktion der Überschreitungs- wahrrscheinlichkeiten eines bestimmten Abflusswertes

- alle Messungen werden absteigend sortiert
- $P_{ex} = n/(n+1)$
- Weierbach Tendenz zu Extremen
 - > schnelles Abflussverhalten
- Huewelerbach sehr ausgeglichen
 - > Baseflow dominiert

Abflussregime

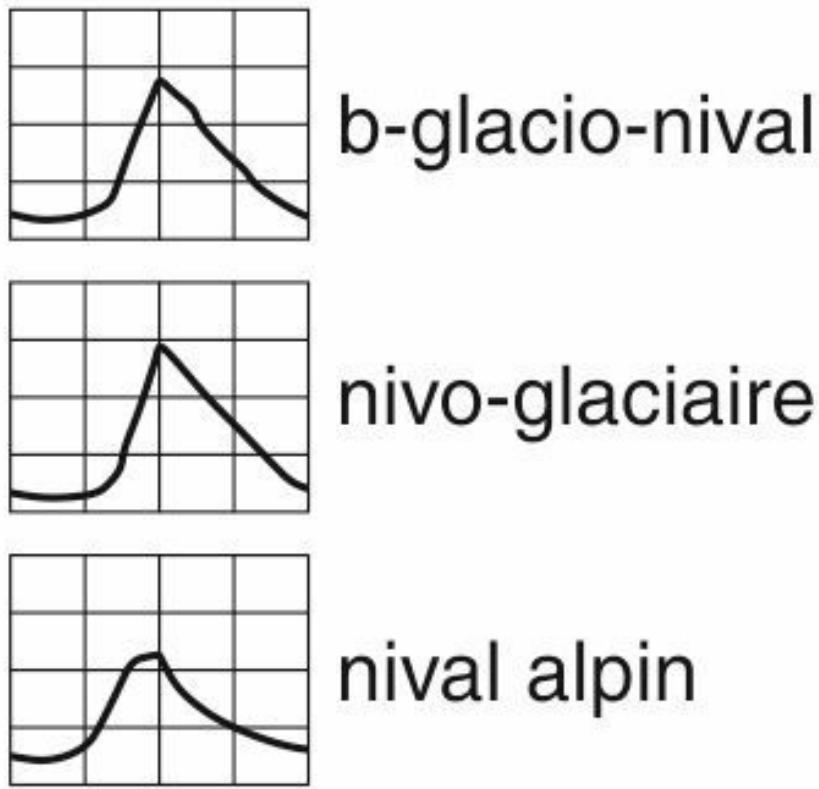
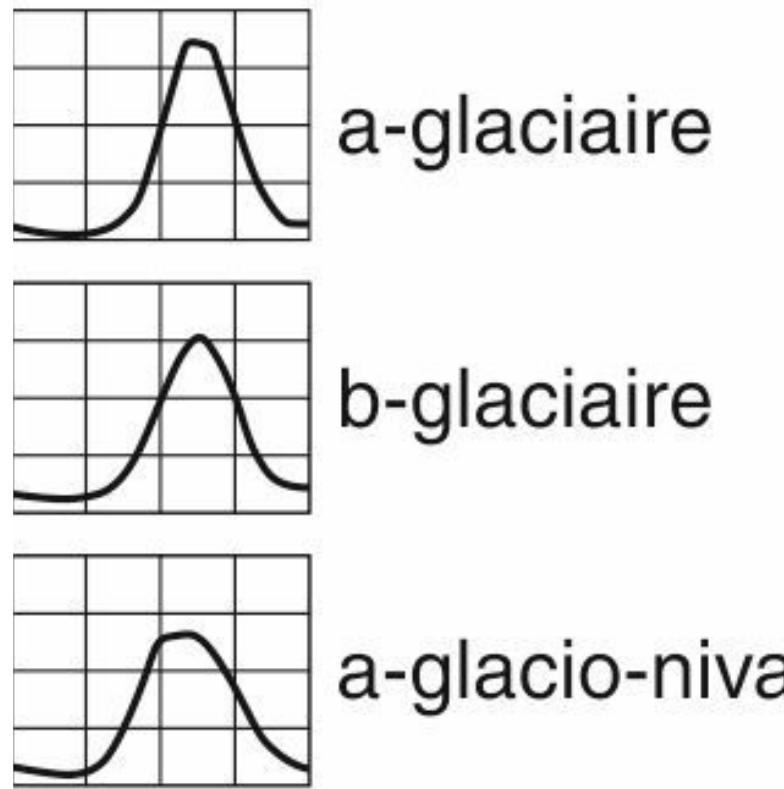
Pardé Koeffizient



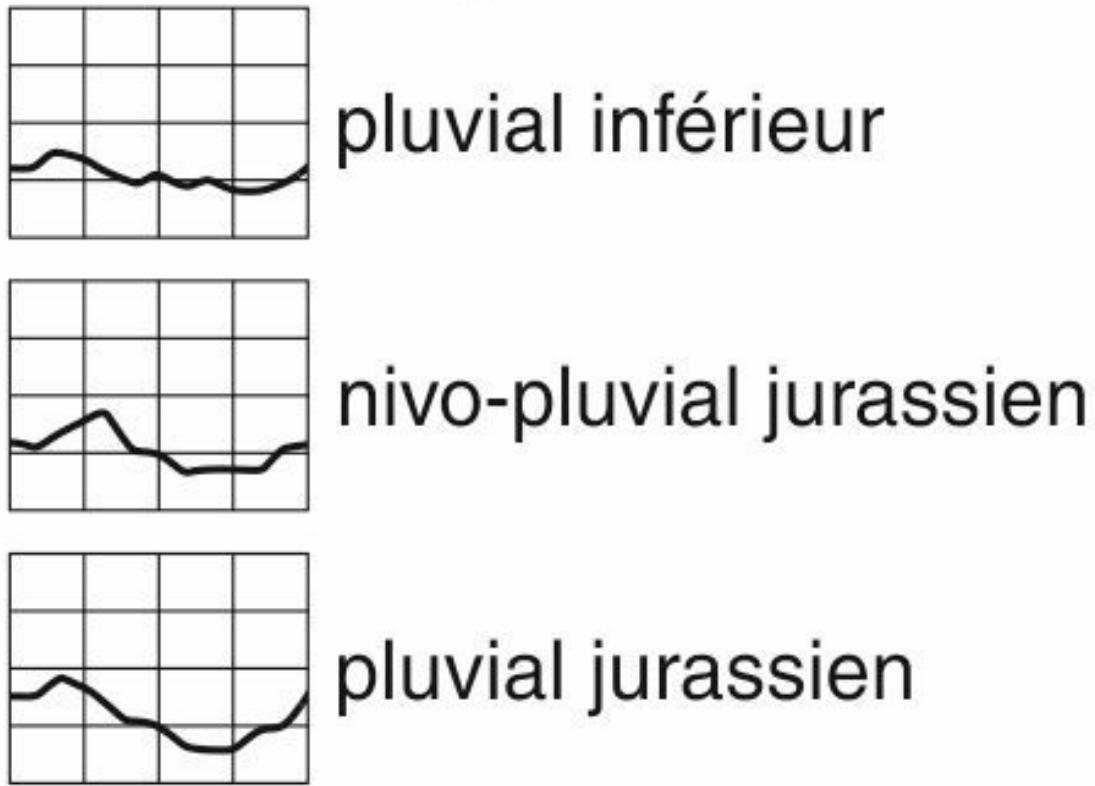
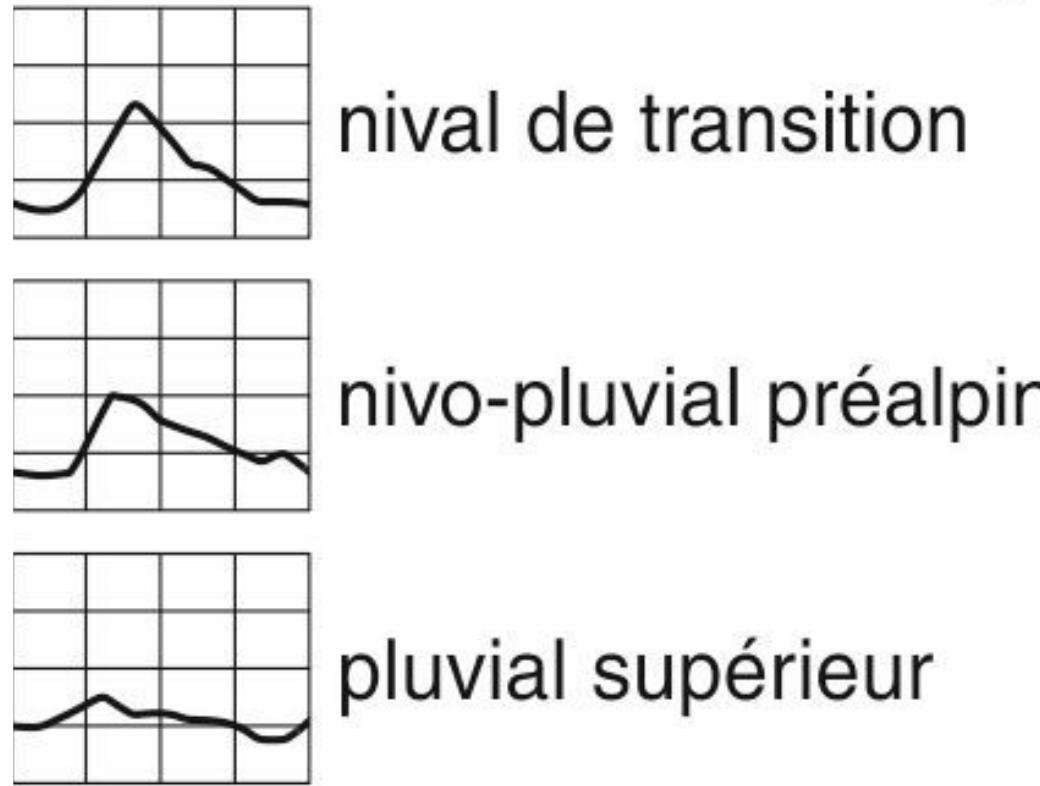
in der Schweiz:

- $\text{PK}_i = \text{MQ}_i / \text{MQ}_{\text{Jahr}}$
- MQ: mittlerer Abfluss
- i: Monat

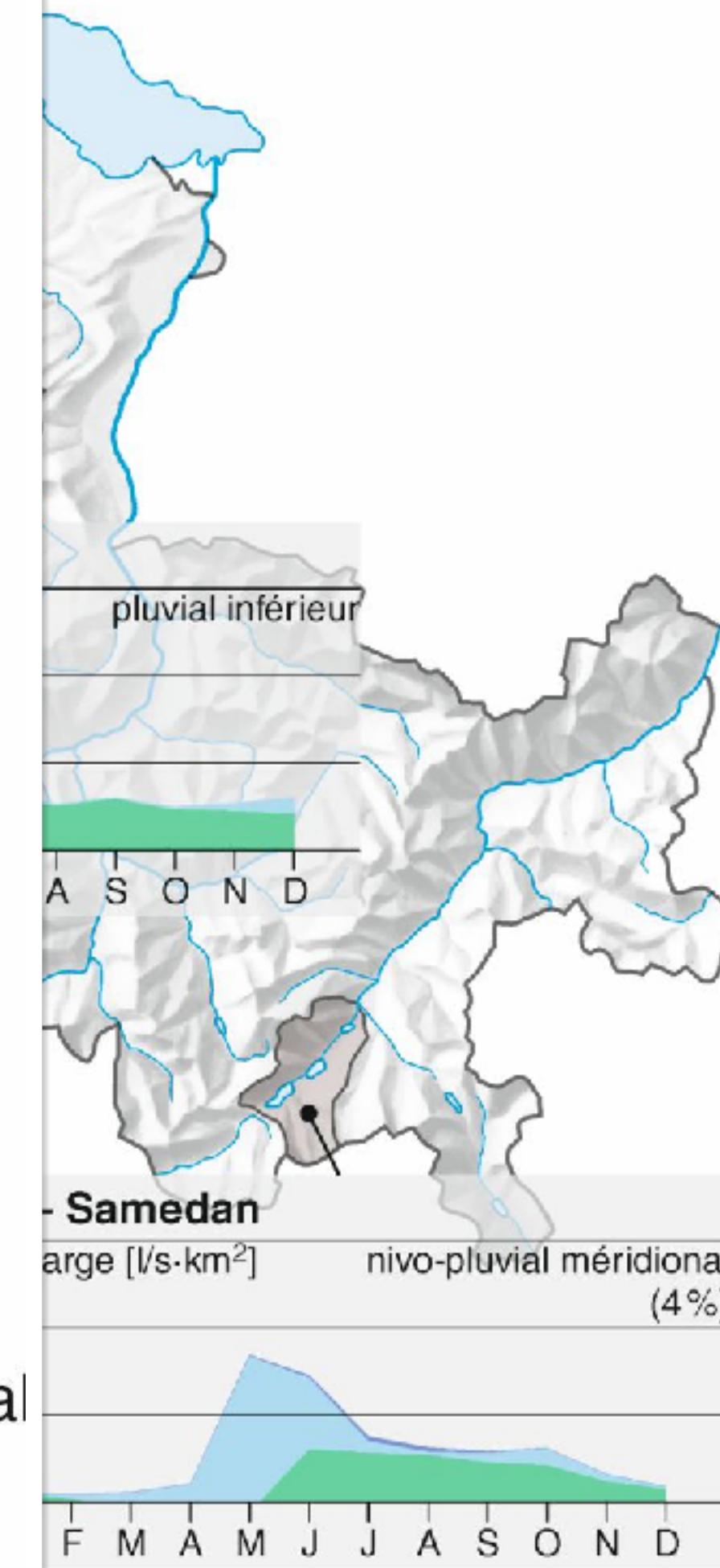
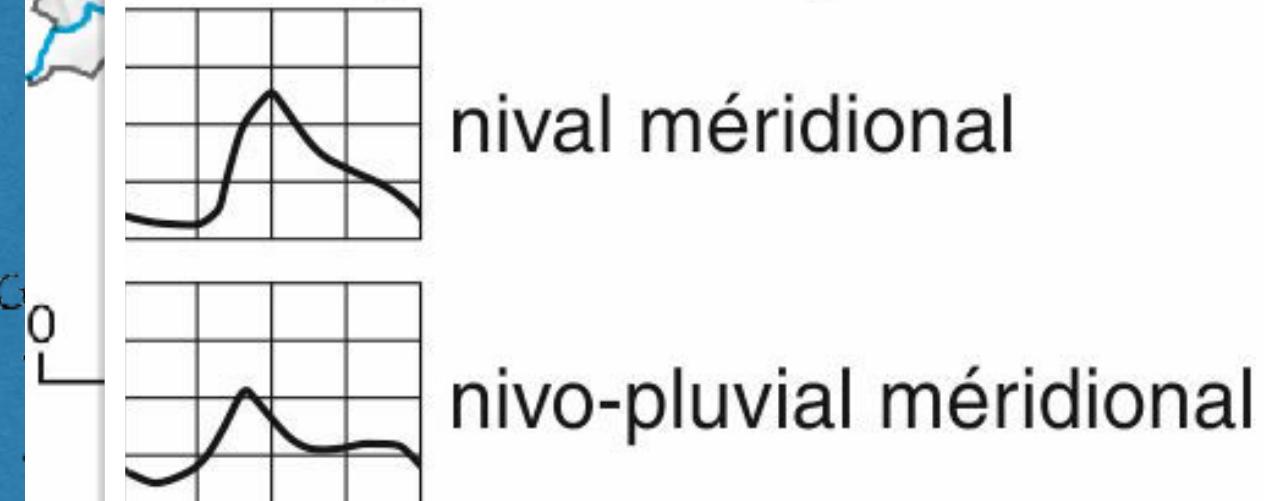
Alpines Regime



Mittelländisches und jurassisches Regime



Südalpines Regime



Abflussregime

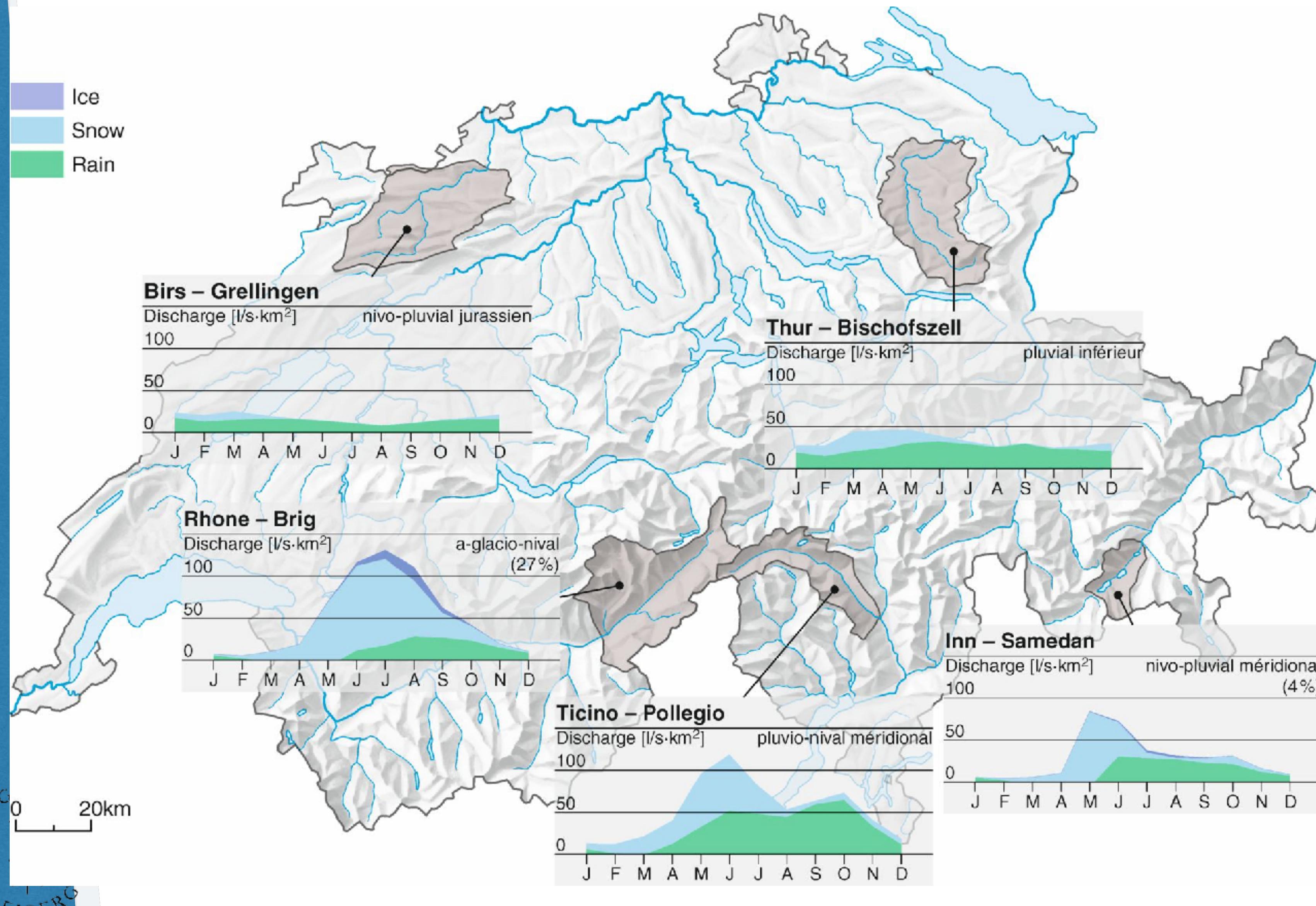
Pardé Koeffizient

in der Schweiz:

- $PK_i = MQ_i / MQ_{Jahr}$
- MQ: mittlerer Abfluss
- i: Monat

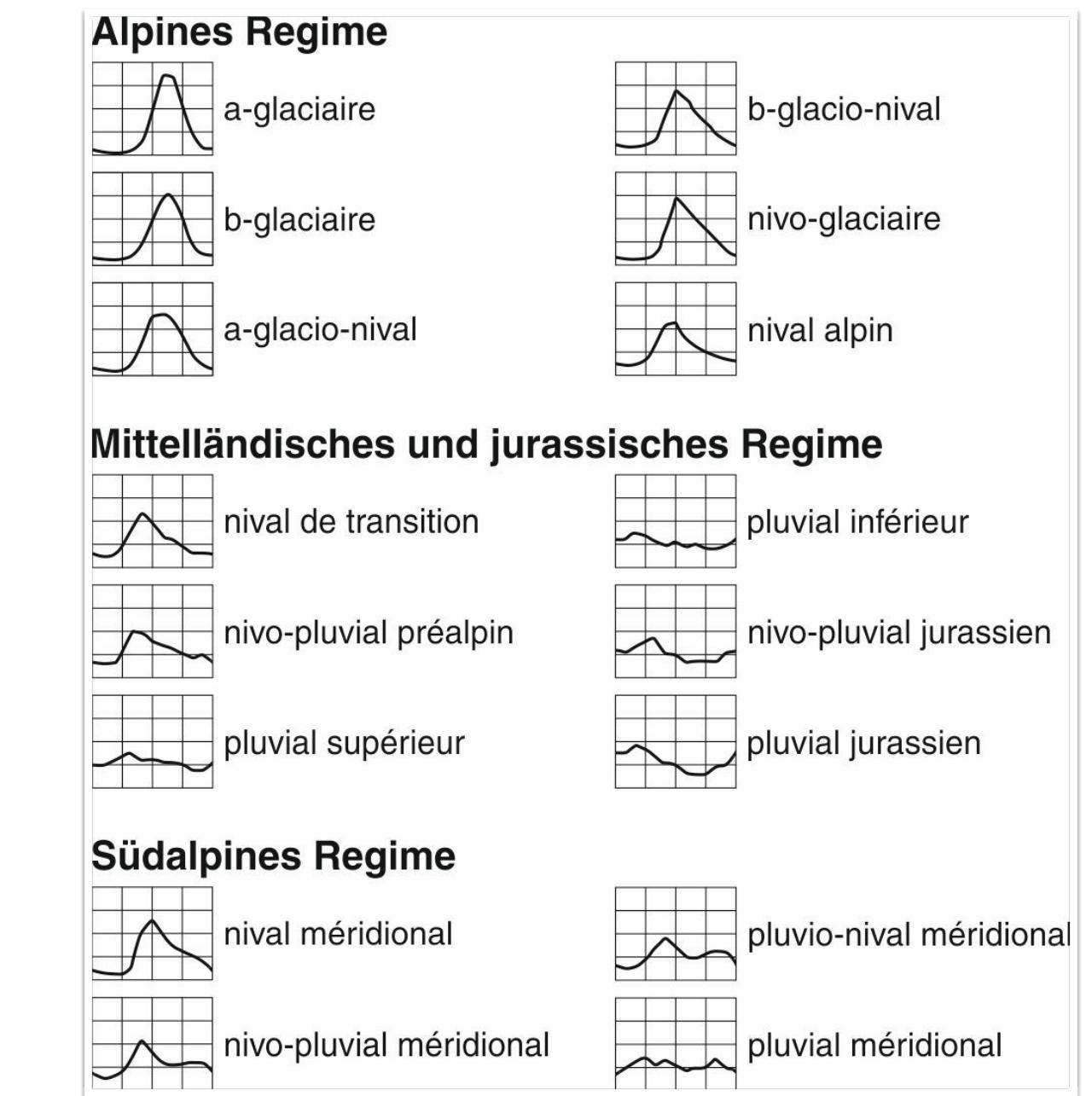
Abflussregime

Pardé Koeffizient



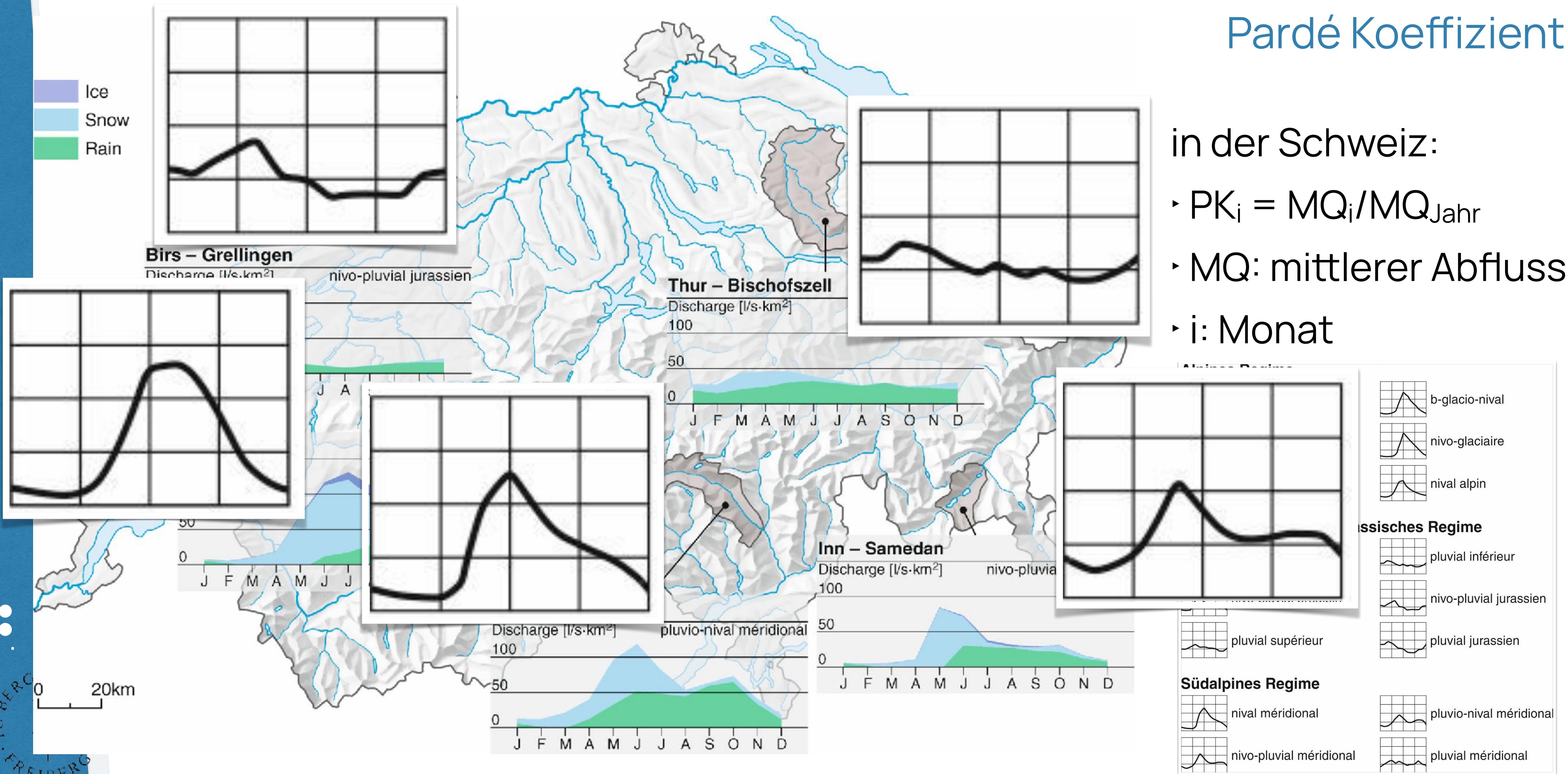
in der Schweiz:

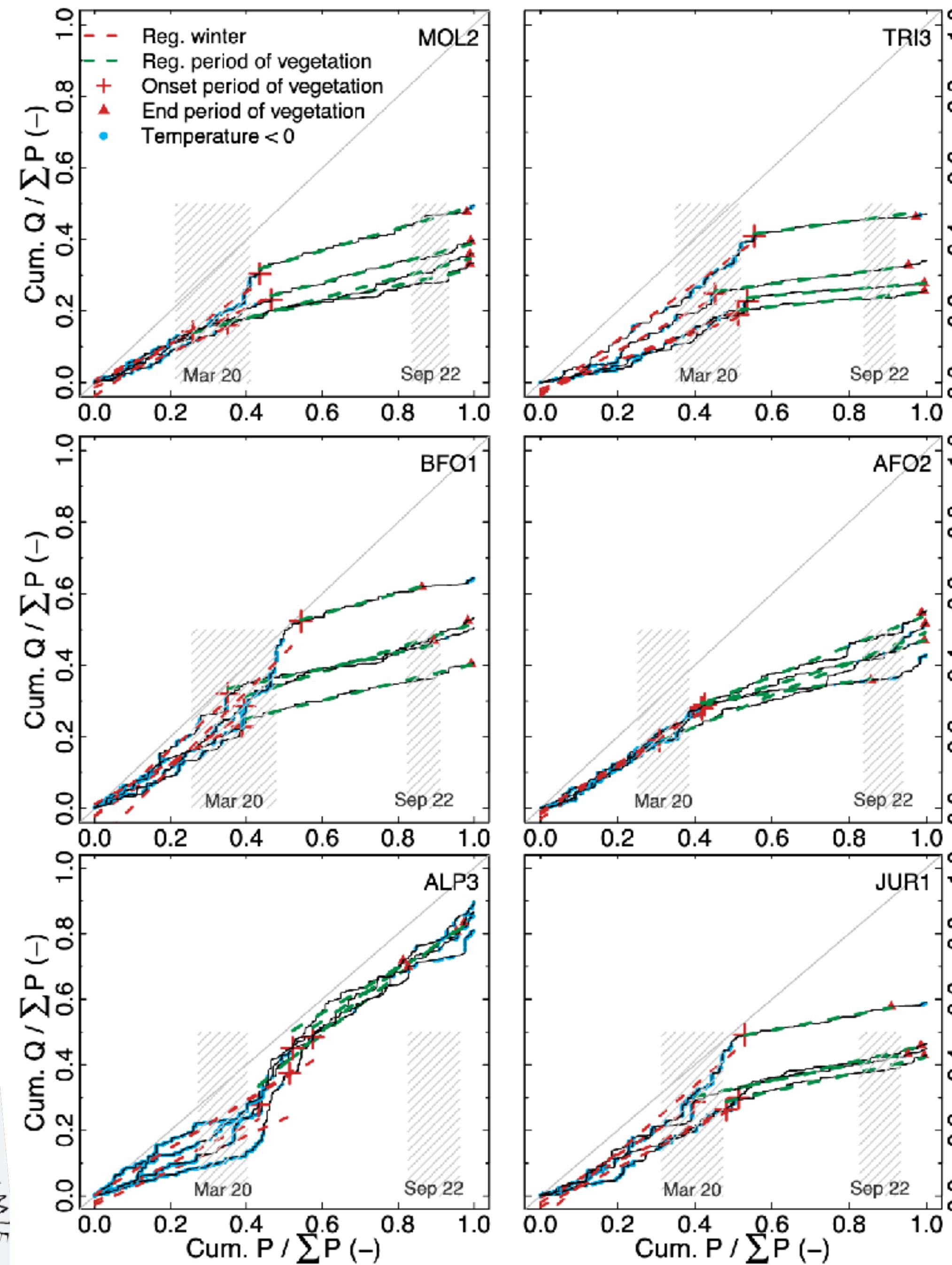
- $PK_i = MQ_i / MQ_{\text{Jahr}}$
- MQ: mittlerer Abfluss
- i: Monat



Abflussregime

Pardé Koeffizient



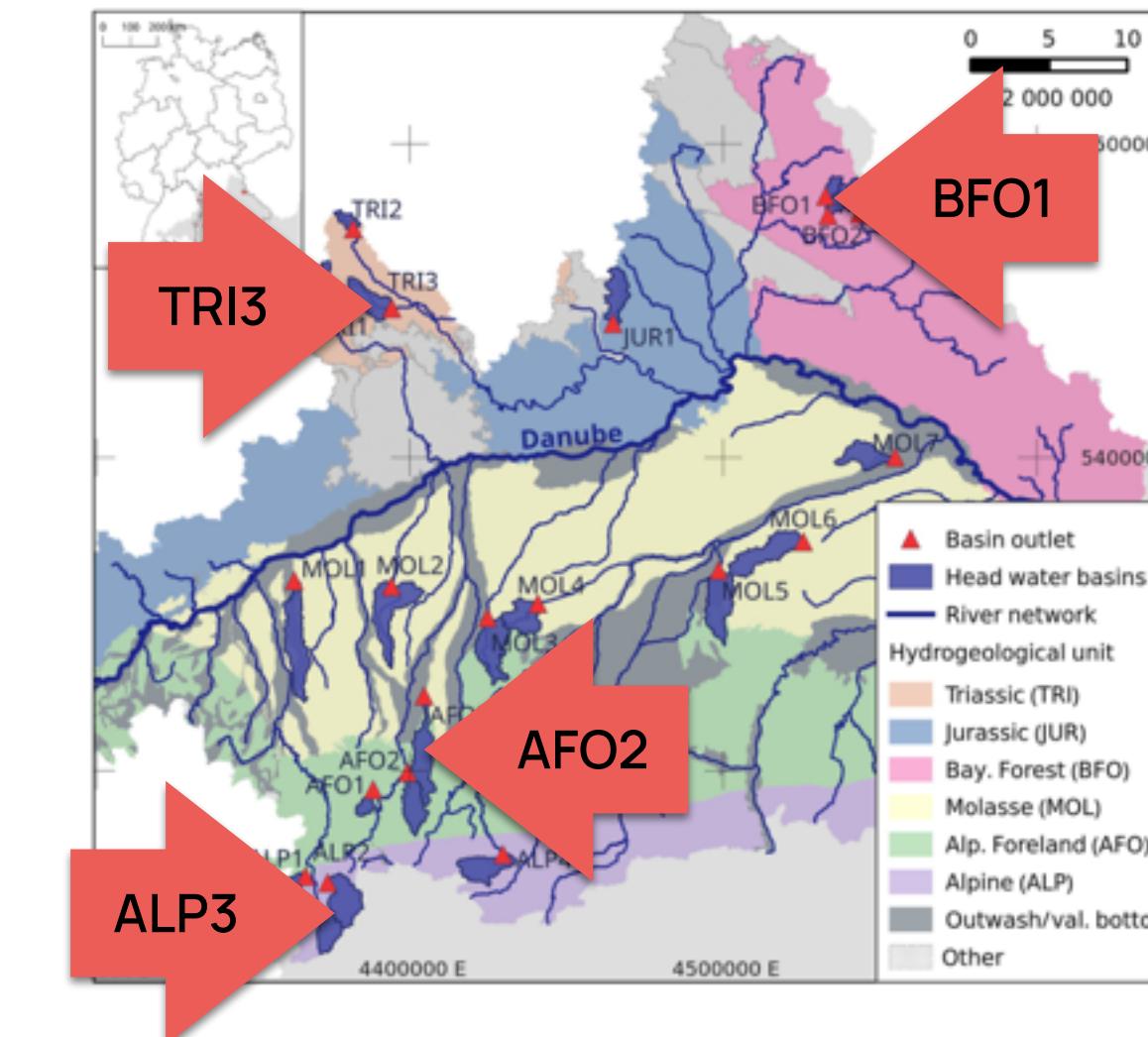


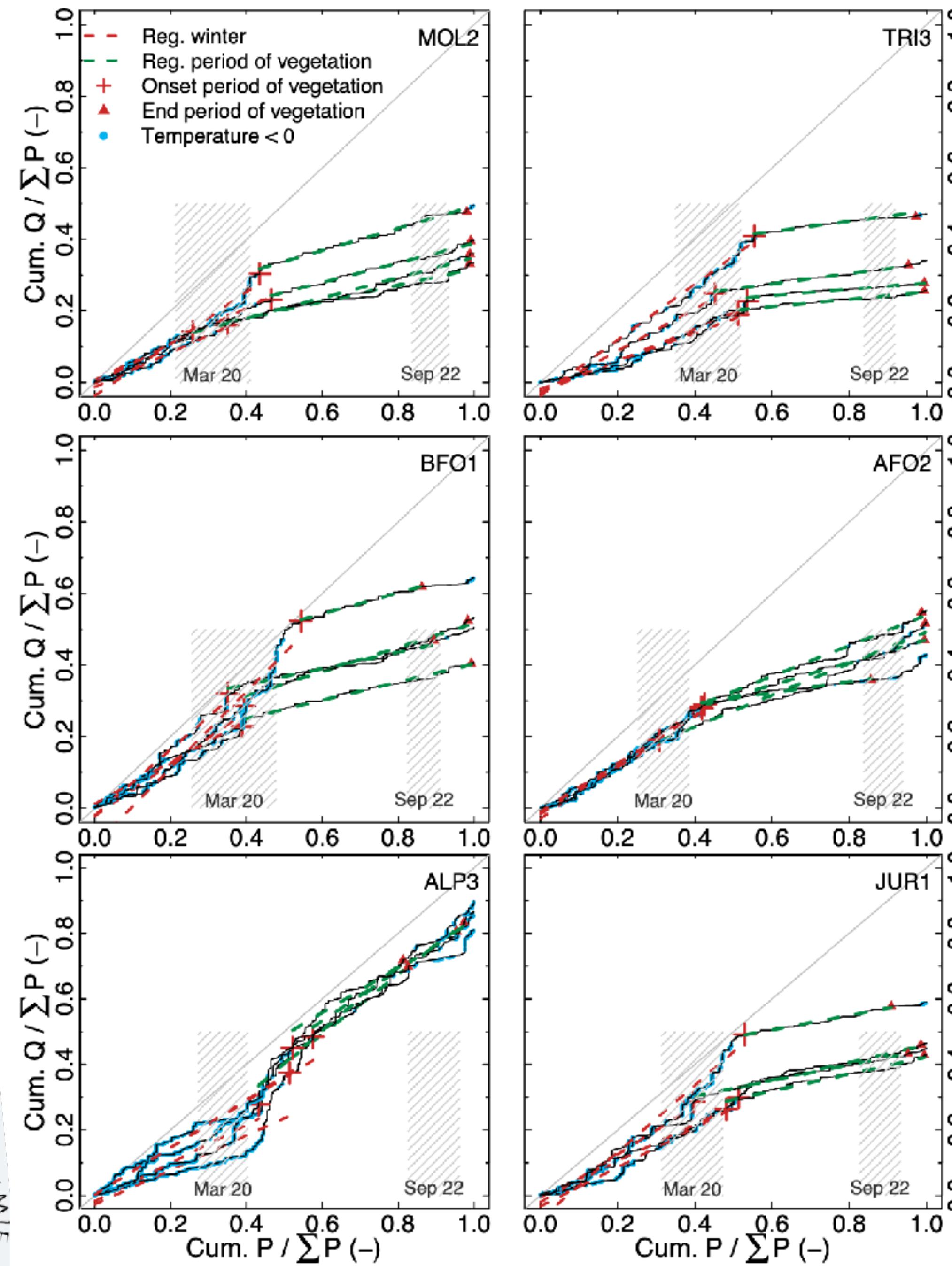
Abflussregime

Dimensionslose Doppelmassenkurven

gleitende Wasserbilanz

- x-Achse: Anteil des Jahresniederschlags
- y-Achse: Quotient von Abfluss und Jahresniederschlag





Abflussregime

Dimensionslose Doppelmassenkurven

- 1:1 → Niederschlagsgetriebener schneller Abfluss dominiert
- Flach → Vegetation und Verdunstung dominieren

