



Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

**TU** BERGAKADEMIE  
FREIBERG

# Zentrale Konzepte in der Hydrologie

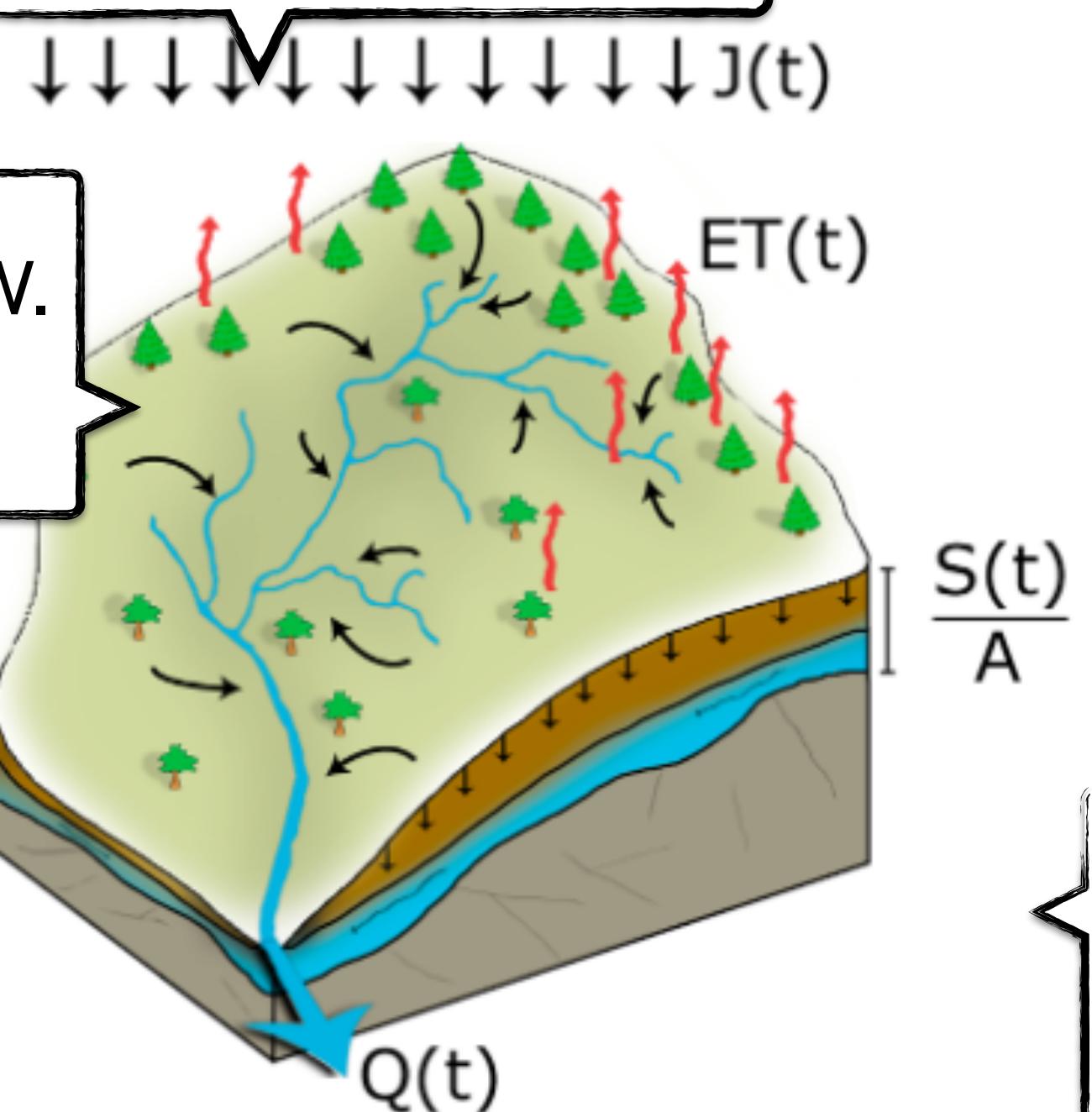
## Grundlagen der Hydrologie Primer in Hydrology

6

# Verbinden der Prozesse

Niederschlag-Abfluss-Dynamik

Einzugsgebiet mit  
Niederschlag ( $J$ ),  
Speicher ( $S$ ), Abfluss ( $Q$ )  
und Verdunstung ( $ET$ )



Topographie bzw.  
Höhenmodell

Bilanzen

Normierung

Verweilzeiten &  
Transit Times

raum-/zeitliche  
Korrelation

Indizes

Mit einer Variation  
einiger zentraler  
Konzepte lassen sich  
ganz verschiedene  
Sichtweisen auf  
hydrologische Systeme  
nehmen.

# 6

# Ziel der heutigen Vorlesung

Zentrale Konzepte in der Hydrologie

Ziele:

- Vielfalt der Hydrologie überblicken und darin wiederkehrende Konzepte einordnen und verstehen
- Kenngrößen und Indizes für hydrologische Charakterisierungen kennen und (bald) nutzen können

# Bilanzen

Wasser, Energie, Stoff-Masse, etc.

## Massenbilanz

- $C_K = m_K/V_{sw}$   
Bsp. Kontamination
- kann für beliebige Zeitintervalle und Raumausschnitte bewertet werden
- zusätzliche Bedingung
- zusätzlicher Blick auf das Wasser

## Energiebilanz

- $Rn - H - \lambda ET = \Delta S_E$   
Beispiel Strahlung
- kann für beliebige Zeitintervalle und Raumausschnitte bewertet werden
- zusätzliche Bedingung
- schwerer Abzugrenzen

## Wasserbilanz

- $P - Q - ET = \Delta S_W$   
Beispiel Wassernutzung
- kann für beliebige Zeitintervalle und Raumausschnitte bewertet werden
- harte Bedingung

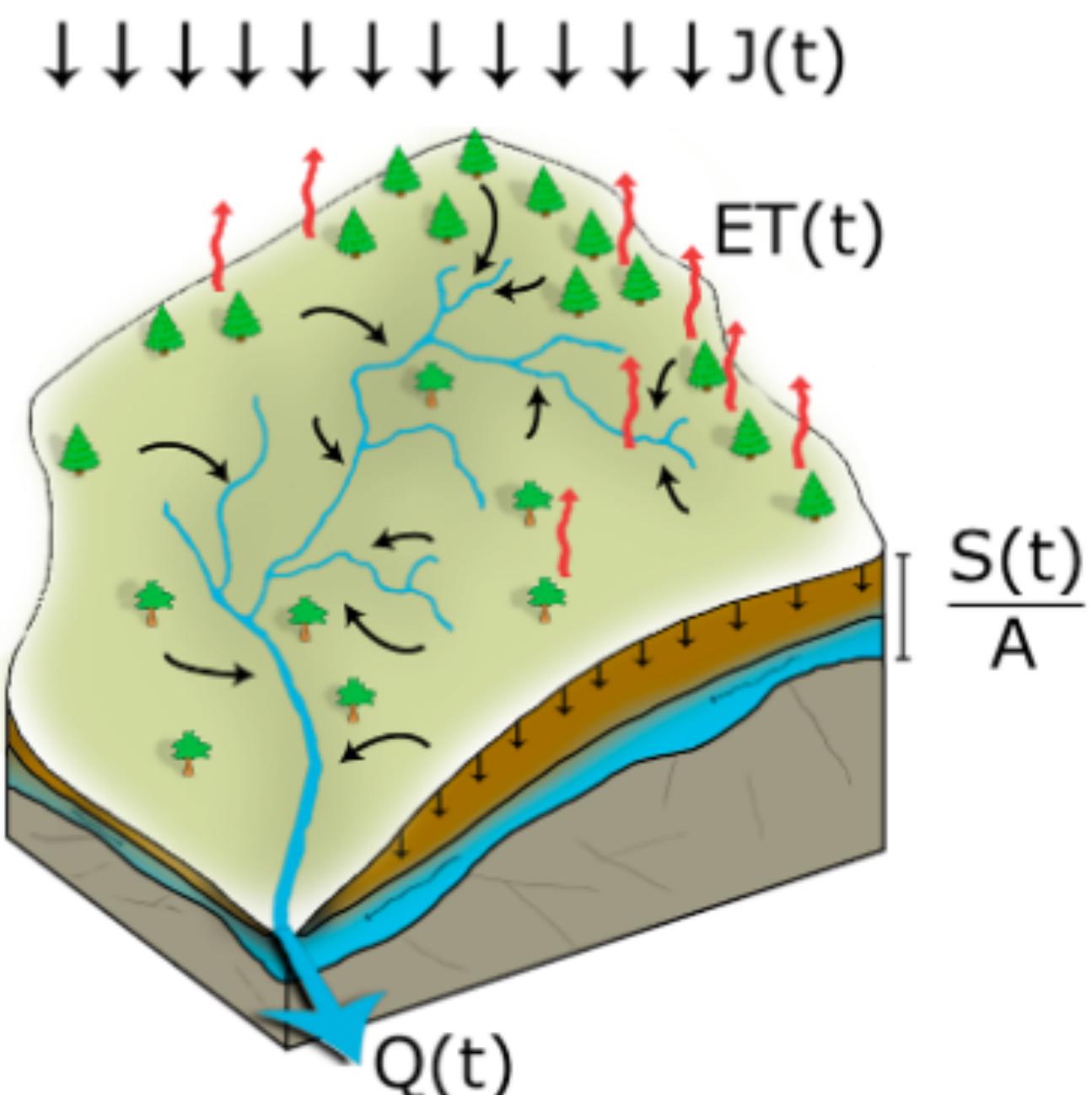
# Bilanzen

Wasser, Energie, Stoff-Masse, etc.

## Massenbilanz

- $C_K = m_K / V_{SW}$

Bsp. Kontamination



## Energiebilanz

- $R_n - H - \lambda ET = \Delta S_E$

Beispiel Strahlung

## Wasserbilanz

- $P - Q - ET = \Delta S_W$

Beispiel Wassernutzung

- Schwierigkeit bleibt die Abgrenzung des Kontrollvolumens und der Systemgrenzen
- Das System bleibt eine Black Box
- Physikalische Plausibilität aber keine Prozesse

# Abflussbeiwert

## und andere Normierungen von Flüssen

räumliche  
Normierung:  
Fläche

- $P = p/A$  (mm)
- Reduzieren des Problems auf 1D
- leichte Übertragbarkeit
- einfache Bilanzierung

# Abflussbeiwert

## und andere Normierungen von Flüssen

zeitliche

Normierung:

Inkrement

$$\cdot P(t) = \int P(t_0..t_1)$$

• nutzen gleicher  
Zeitabschnitte

• Flüsse →

Volumenpakete

• einfache

Bilanzierung

räumliche

Normierung:

Fläche

$$\cdot P = p/A \text{ (mm)}$$

• Reduzieren des  
Problems auf 1D

• leichte

Übertragbarkeit

• einfache

Bilanzierung

# Abflussbeiwert

## und andere Normierungen von Flüssen

Normierung zu  
Referenz:  
**Abflussbeiwert**

- $R_C = Q_{\Delta t} / P_{\Delta t}$

**Budyko**

- $E_T/P$  vs.  $E_{Tact}/P$

**Double Mass**

- $\int P / \sum P$  vs.  $\int Q / \sum P$

- implizite Bilanzierung
- nicht nur Zeit als Referenz

zeitliche  
Normierung:  
**Inkrement**

- $P(t) = \int P(t_0..t_1)$
- nutzen gleicher Zeitabschnitte
- Flüsse → Volumenpakete
- einfache Bilanzierung

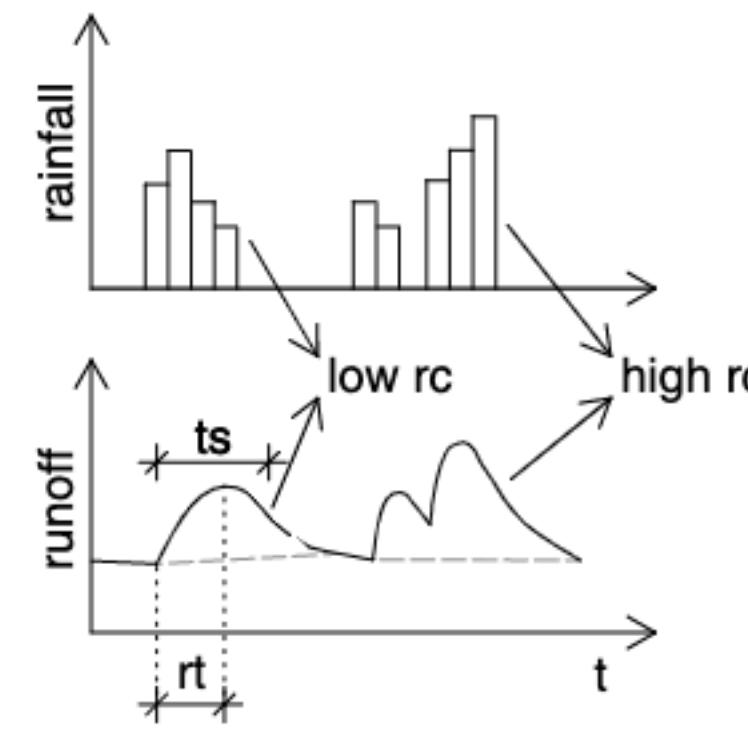
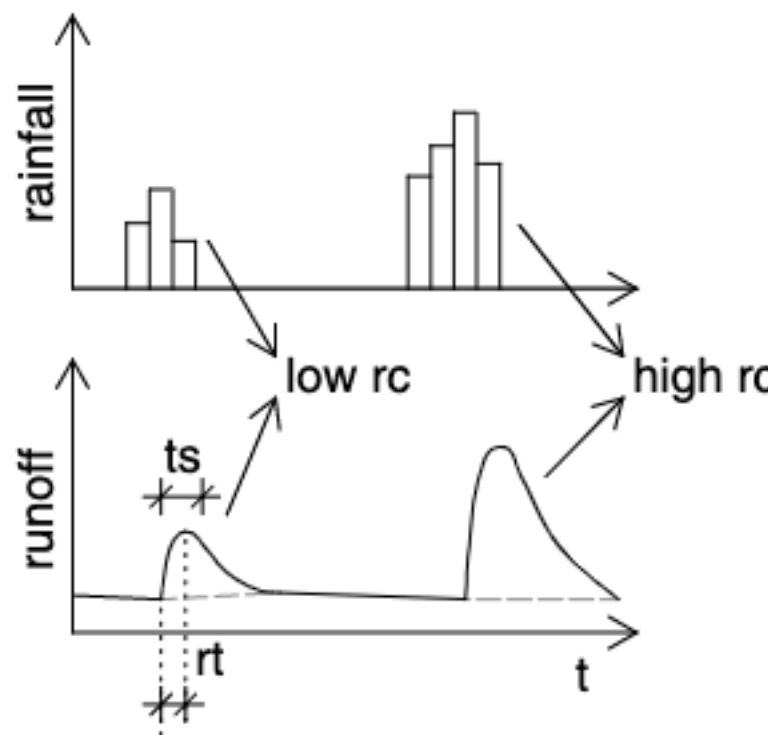
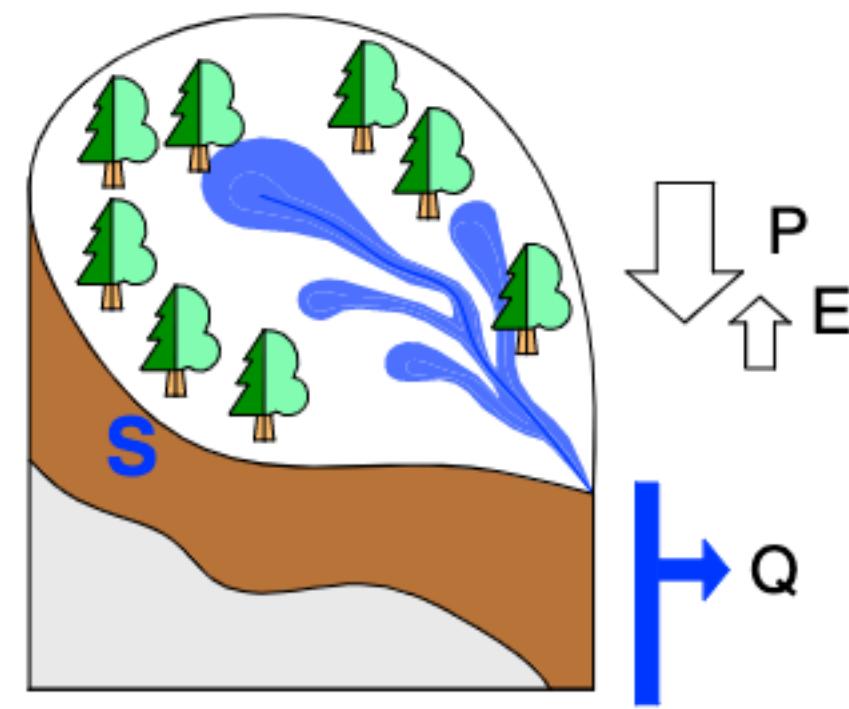
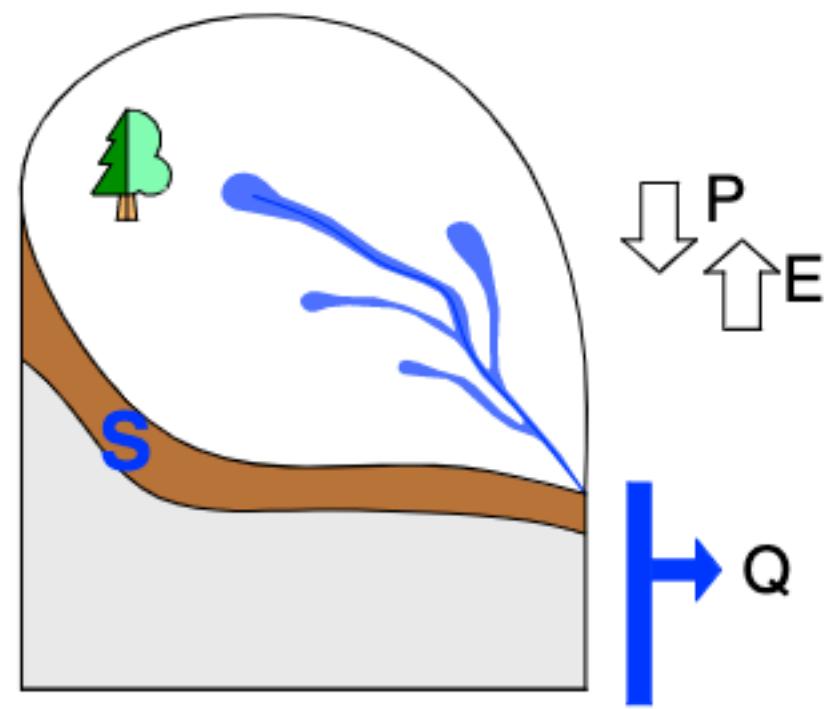
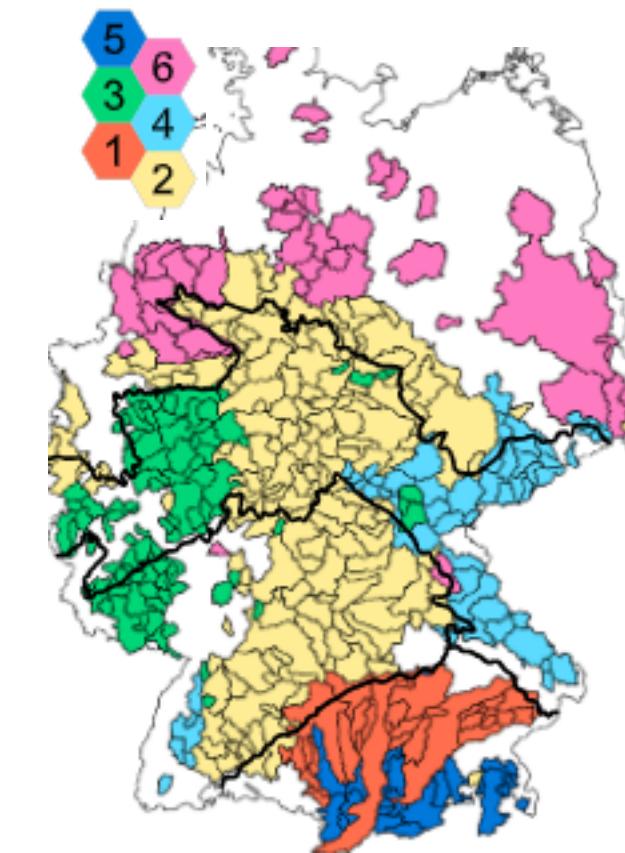
räumliche  
Normierung:  
**Fläche**

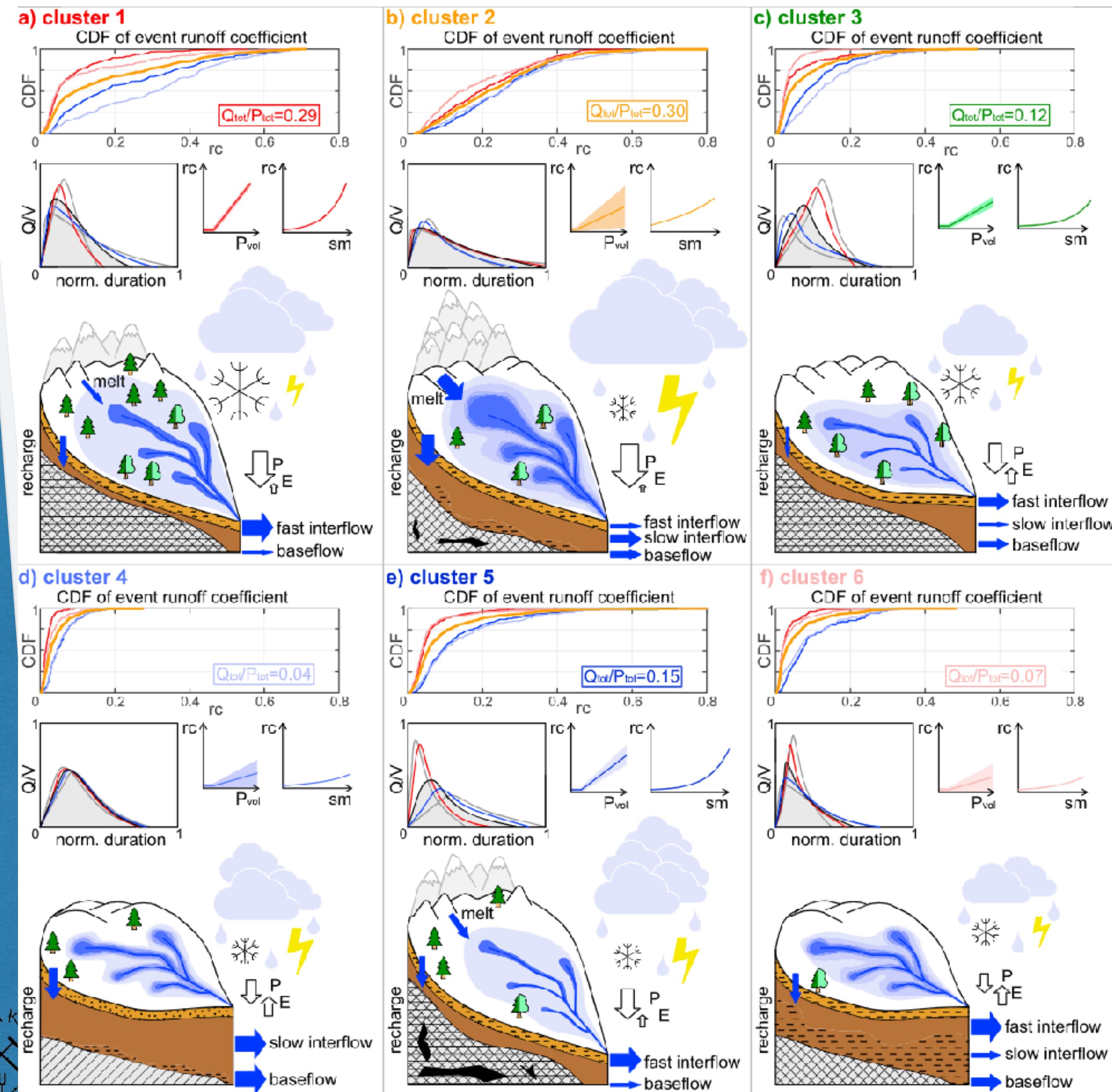
- $P = p/A$  (mm)
- Reduzieren des Problems auf 1D
- leichte Übertragbarkeit
- einfache Bilanzierung

# Abflussbeiwert

## Regionale Muster

- Einfache Methode
- Komplexe Wirkung

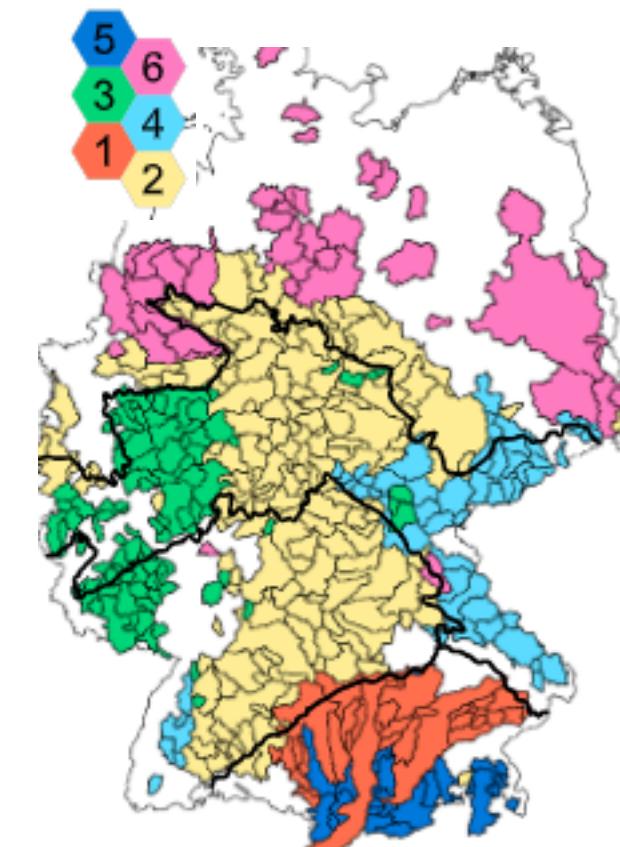




# Abflussbeiwert

## Regionale Muster

- Einfache Methode
- Komplexe Wirkung



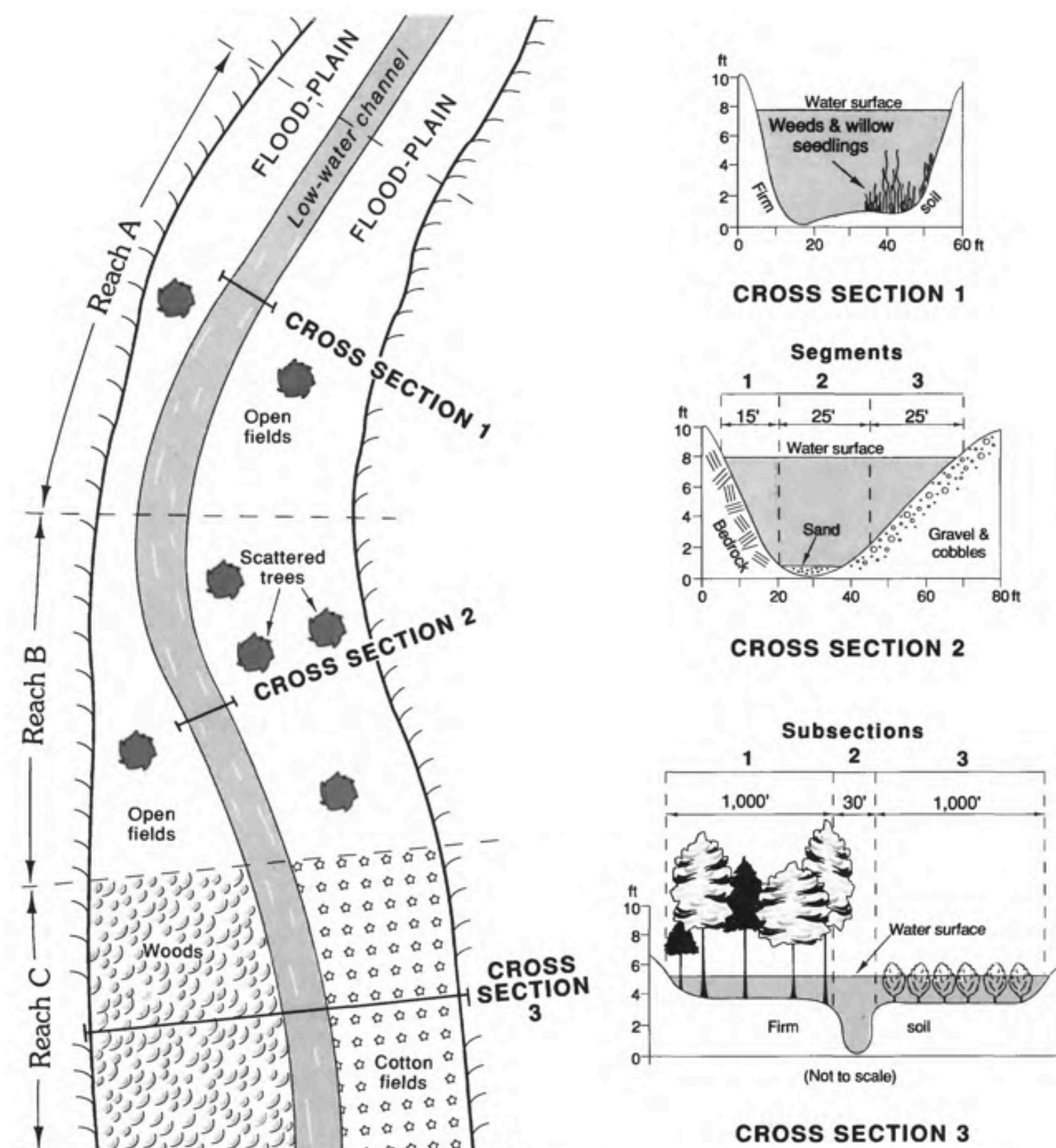
Legend	CDF of event runoff coefficient	$Q_{tot}/P_{tot}$	characteristic shape of hydrograph (time scale and rise time)	relative importance of flux
catchment behavior	<ul style="list-style-type: none"> <li>single-peak (red)</li> <li>summer (blue)</li> <li>winter (orange)</li> <li>all events (yellow)</li> </ul>	$Q_{tot}/P_{tot}$	<ul style="list-style-type: none"> <li>ratio of long-term sum of total runoff and precipitation</li> <li>median (black)</li> <li>summer med (red)</li> <li>quartiles (blue)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>time scale and rise time</li> <li>median (black)</li> <li>winter med (blue)</li> <li>quartiles (red)</li> </ul>
saturated region	never (light blue)	pre-event conditions	average size of variably saturated region	increase of saturated area
Legend	never (light blue)	from low rc to high rc	from high rc to low rc	from instant to gradual
catchment descriptors	topsoil (clay, lsilt)	texture of topsoil (clay, lsilt)	karstification (geo.Limestone)	
soil depth (soil.depth)	subsoil	sand	low	extreme of area covered by coniferous forest (CF.forest)
upper aquifer	upper aquifer	silt and clay	high	from very low to very high
presence of clay-enriched layers in subsoil (soil.ClayEnrich)	from high to low	clay		extreme of area covered by mixed forest (MX.forest)
total amount of precipitation (MAP)				from very low to high
evaporation (PET.P)				frequency of precipitation events (medDS)
seasonality of precipitation event volume (WS.sum2win)				from very low to very high
volume of precipitation events (WS)				

# Travel Time

Subtitle

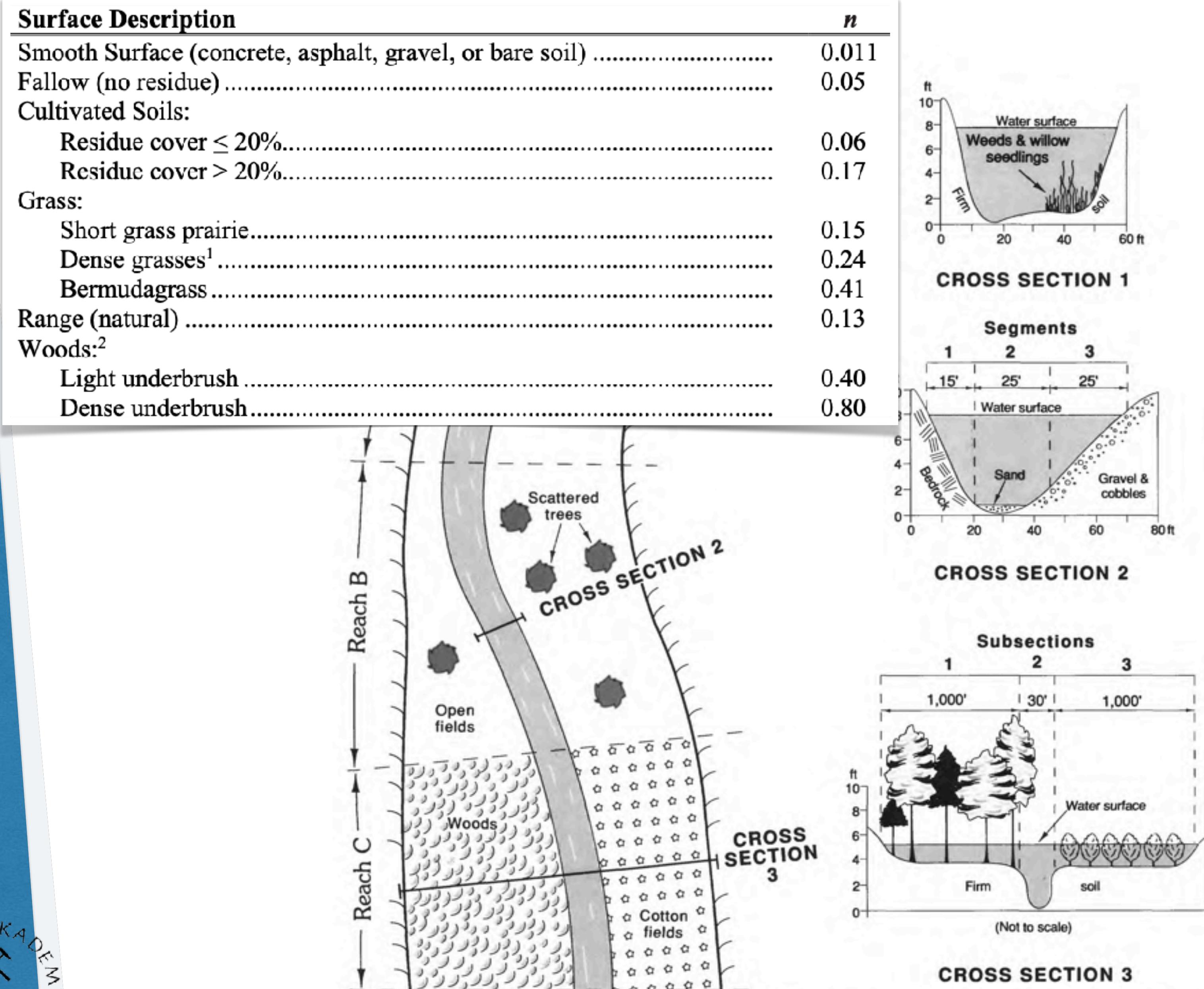
Geschwindigkeiten  
Methode

- $T_t = L/v$
- $v=1.49/n \cdot R^{2/3} \cdot S_e^{1/2}$   
(Manning Flachwasser-  
gleichung)
- R :: hydraulischer  
Radius
- $S_e$  :: Anstieg



# Travel Time

## Subtitle



## Geschwindigkeiten Methode

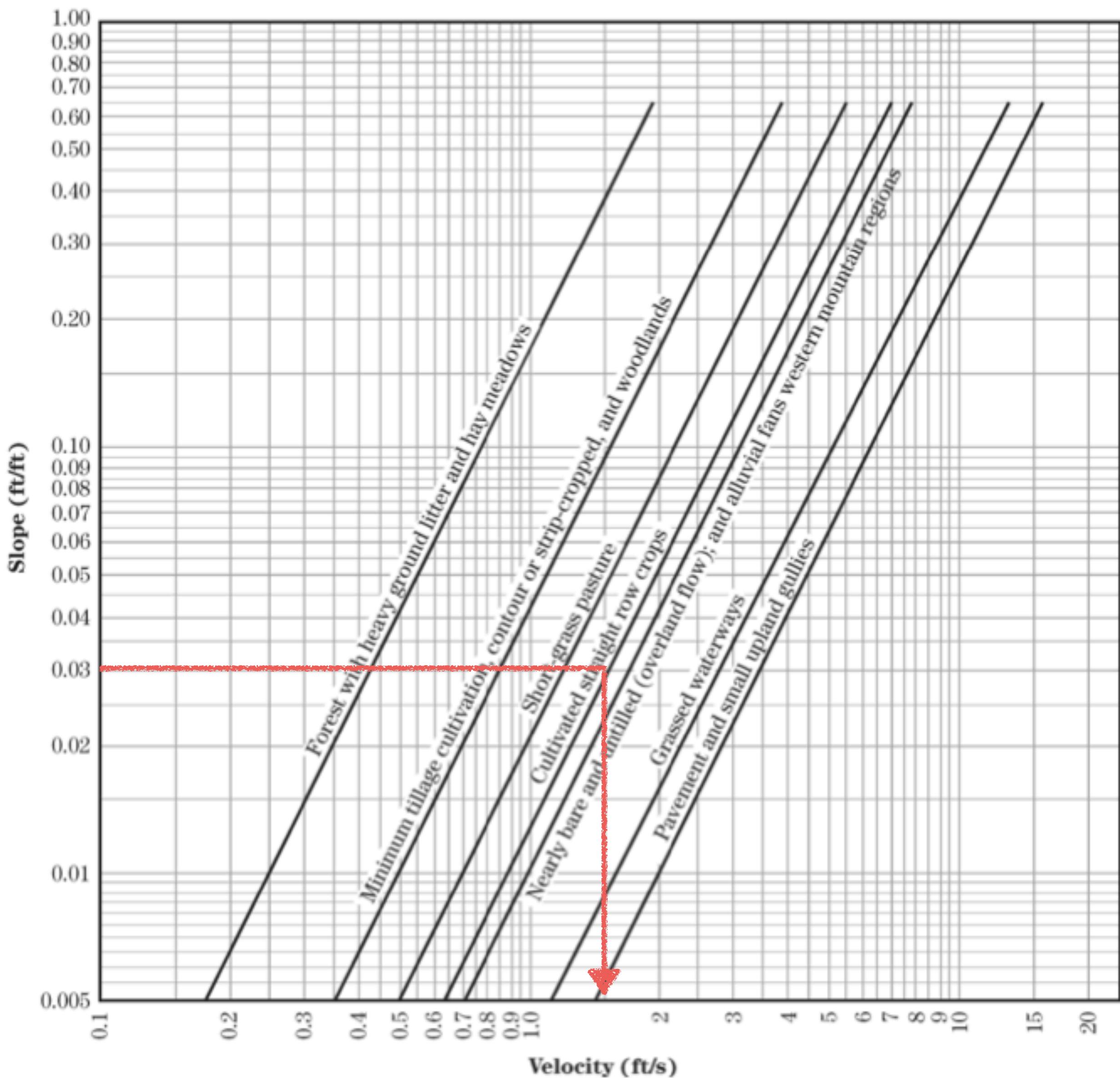
- $T_t = L/v$
- $v = 1.49/n \cdot R^{2/3} \cdot S_e^{1/2}$   
(Manning Flachwasser-  
gleichung)
- R :: hydraulischer  
Radius
- $S_e$  :: Anstieg

# Travel Time

Subtitle

Geschwindigkeiten  
Methode

- $T_t = L/v$
- oder graphisch  
Abschätzen
- seht euch gern das Video an:  
[https://www.youtube.com/  
watch?v=NYF3Cm8x9R8](https://www.youtube.com/watch?v=NYF3Cm8x9R8)



# Verweilzeit und Transit Time

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

## Verweilzeit

- Verteilung von Wasser-paketen, die in der Vergangenheit in das System gekommen sind und noch zu t vorhanden sind
- Analog Altersstruktur aller Individuen einer Population, die zu leben

# Verweilzeit und Transit Time

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

## Verweilzeit

- Verteilung von Wasser-paketen, die in der Vergangenheit in das System gekommen sind und noch zu t vorhanden sind
- Analog Altersstruktur aller Individuen einer Population, die zu t leben

## rückwärts Transit Time

- Verteilung von Wasser-paketen, die in der Vergangenheit in das System gekommen und zu t das System verlassen
- Analog Altersstruktur aller Individuen einer Population, die zu t sterben

# Verweilzeit und Transit Time

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

## Verweilzeit

- Verteilung von Wasser- paketen, die in der Vergangenheit in das System gekommen sind und noch zu t vorhanden sind
- Analog Altersstruktur aller Individuen einer Population, die zu t leben

## rückwärts Transit Time

- Verteilung von Wasser- paketen, die in der Vergangenheit in das System gekommen und zu t das System verlassen
- Analog Altersstruktur aller Individuen einer Population, die zu t sterben

## vorwärts Transit Time

- Verteilung wie lange Wasserpakete, die zu t im System sind, im System bleiben werden
- Analog zur Lebens- erwartung zur Geburt aller Individuen einer Population, die zu t im System sind

# Transit Times

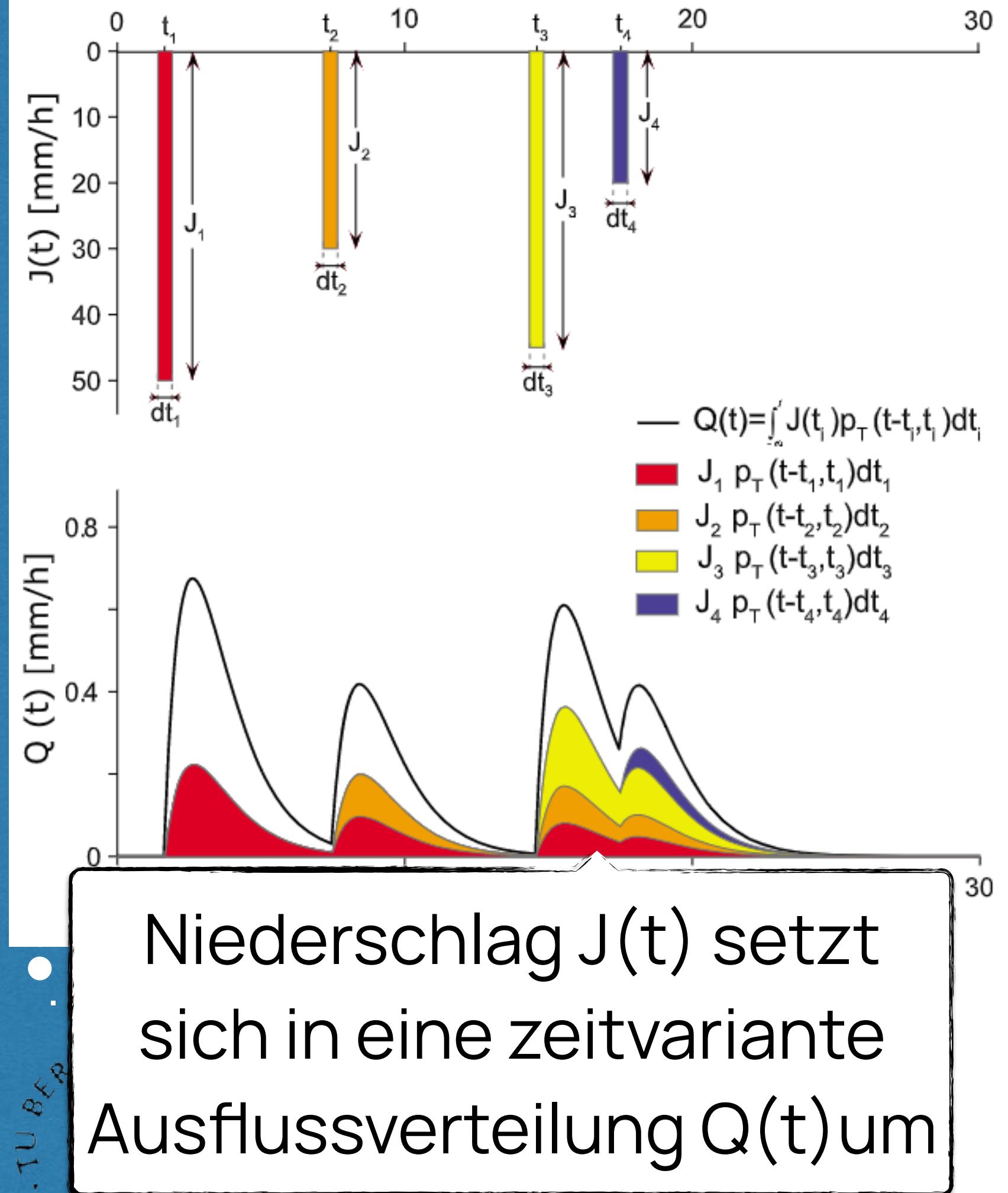
vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

## Transit Times

- Altersstruktur und chemische Zusammensetzung von Wasserpaketen in einem Einzugsgebiet
- Konzept ursprünglich von chemischen Reaktoren

# Transit Times

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

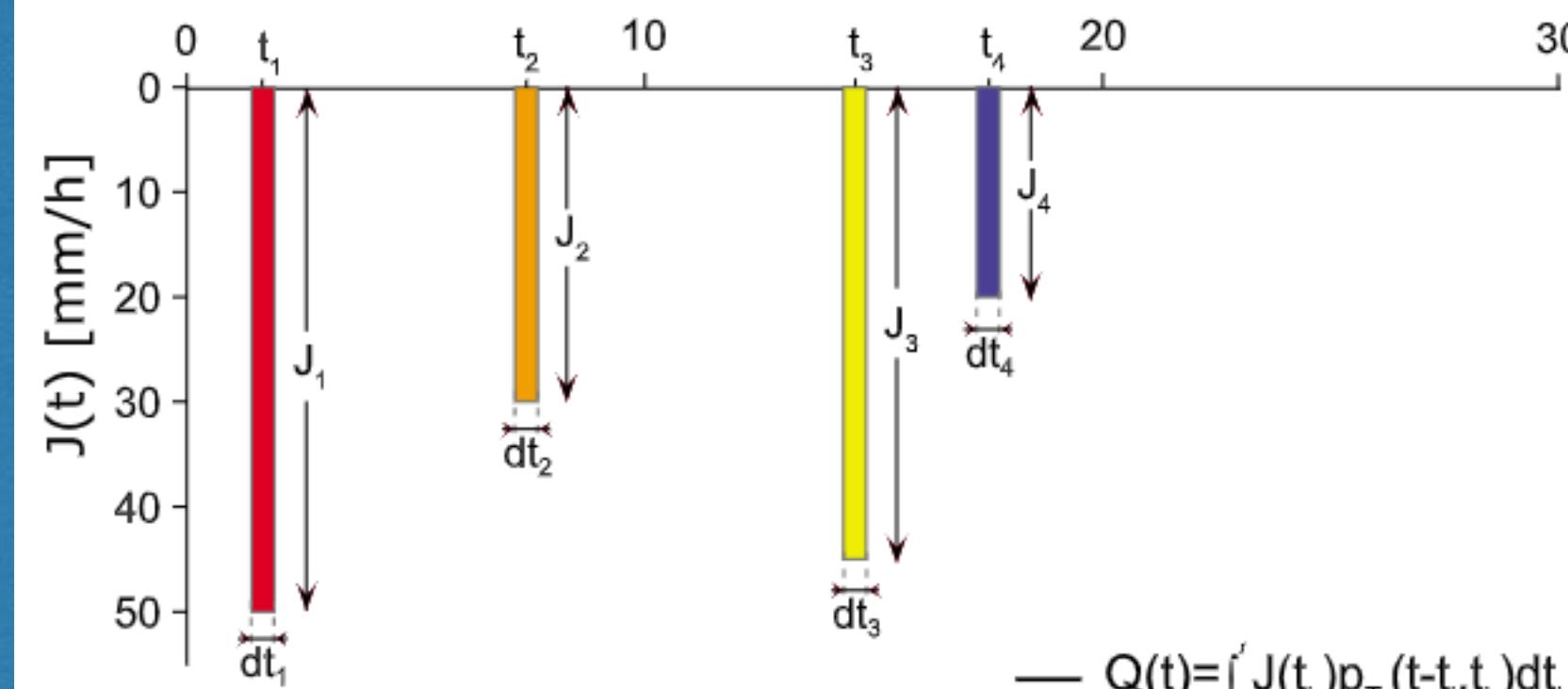


## Transit Times

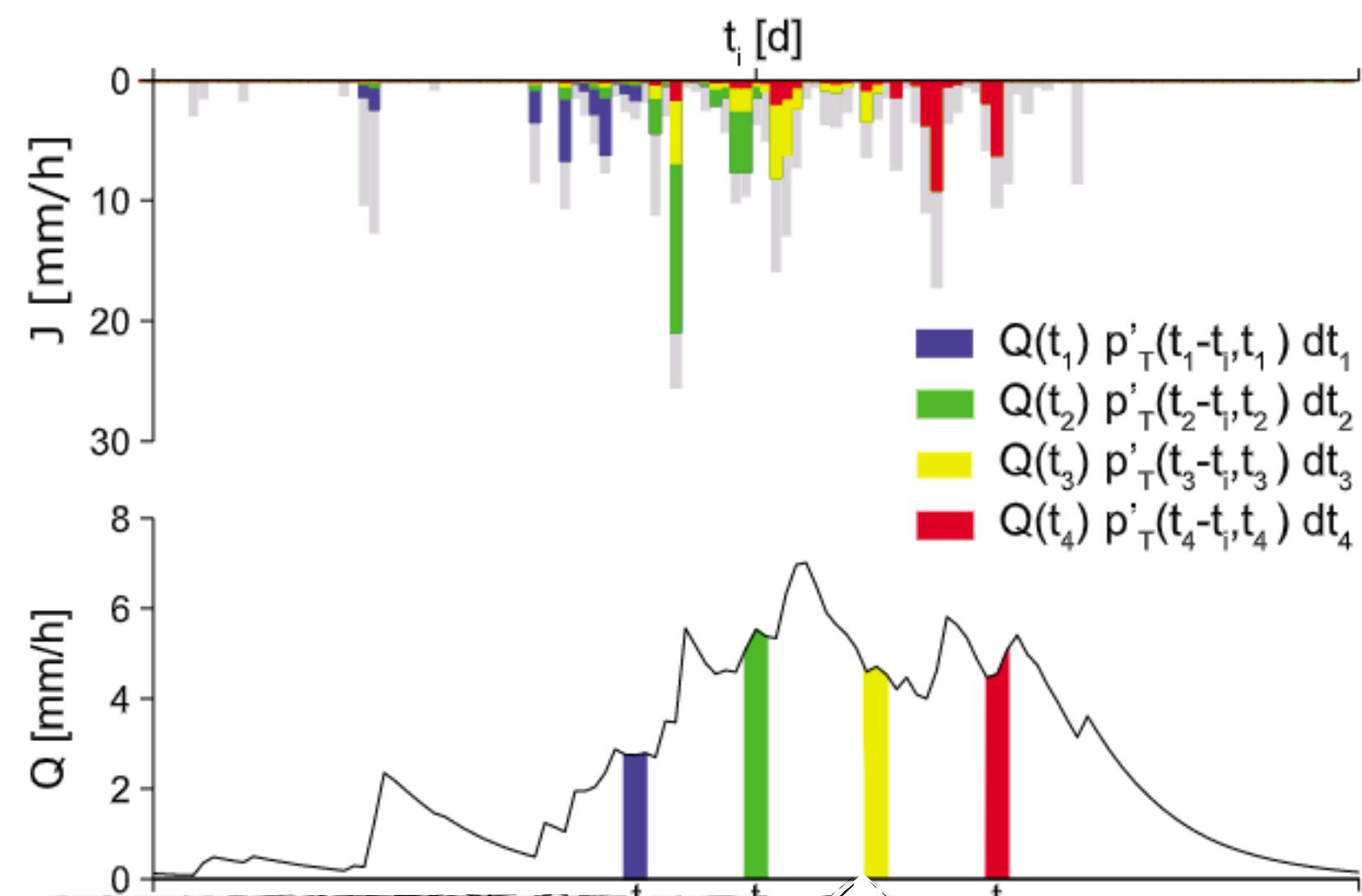
- Altersstruktur und chemische Zusammensetzung von Wasserpaketen in einem Einzugsgebiet
- Konzept ursprünglich von chemischen Reaktoren

# Transit Times

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen



Niederschlag  $J(t)$  setzt sich in eine zeitvariante Ausflussverteilung  $Q(t)$  um



Abfluss  $Q(t)$  besteht aus Wasser, das zu verschiedenen Zeiten in das System kamen

## Transit Times

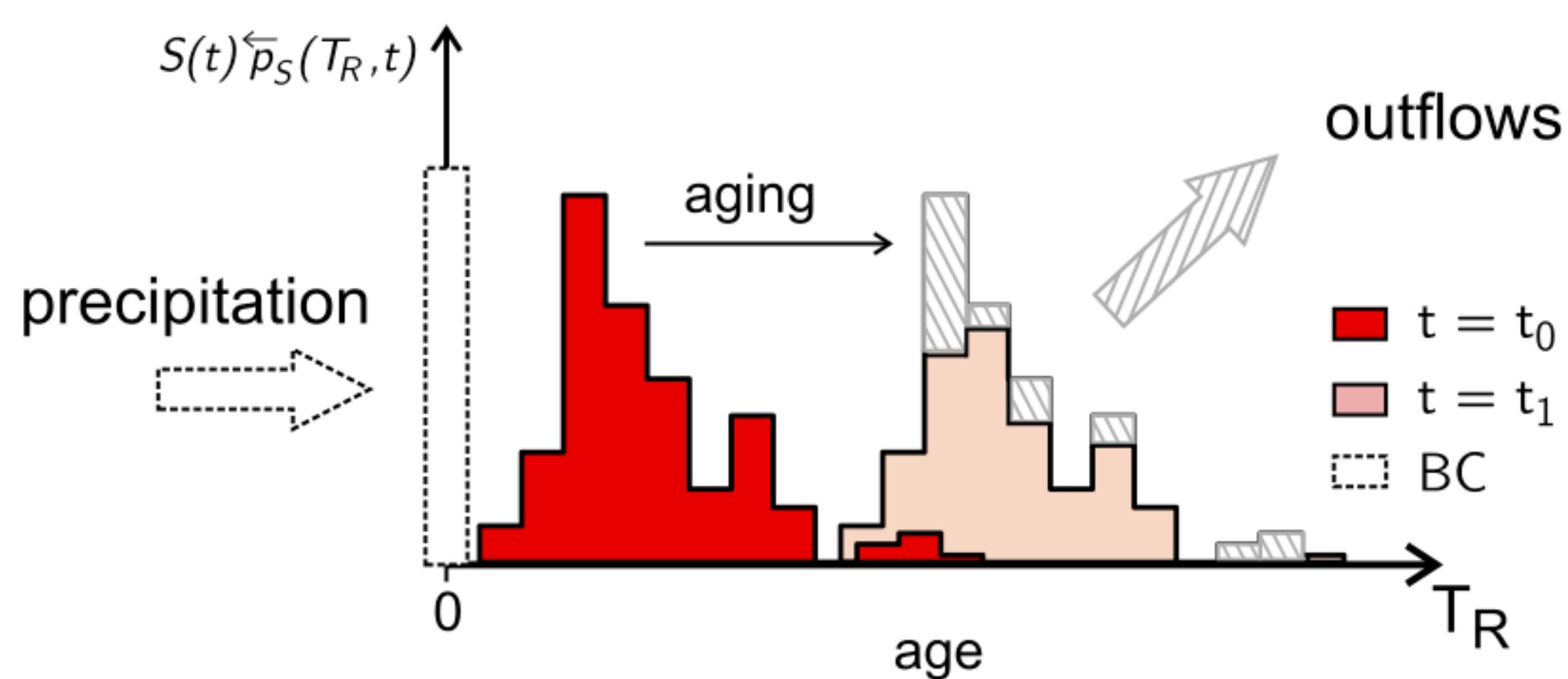
- Altersstruktur und chemische Zusammensetzung von Wasserpaketen in einem Einzugsgebiet
- Konzept ursprünglich von chemischen Reaktoren

# Transit Times

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

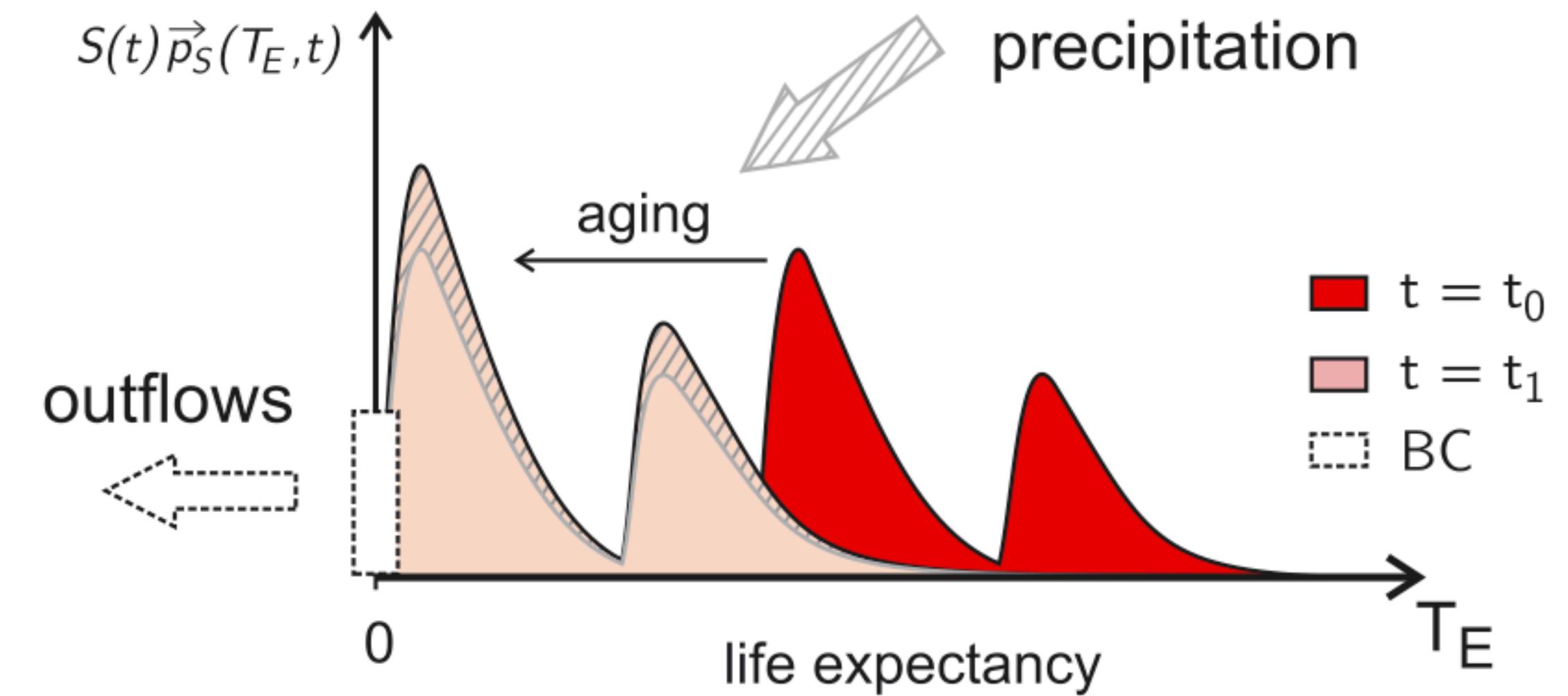
## Rückwärts TTDs

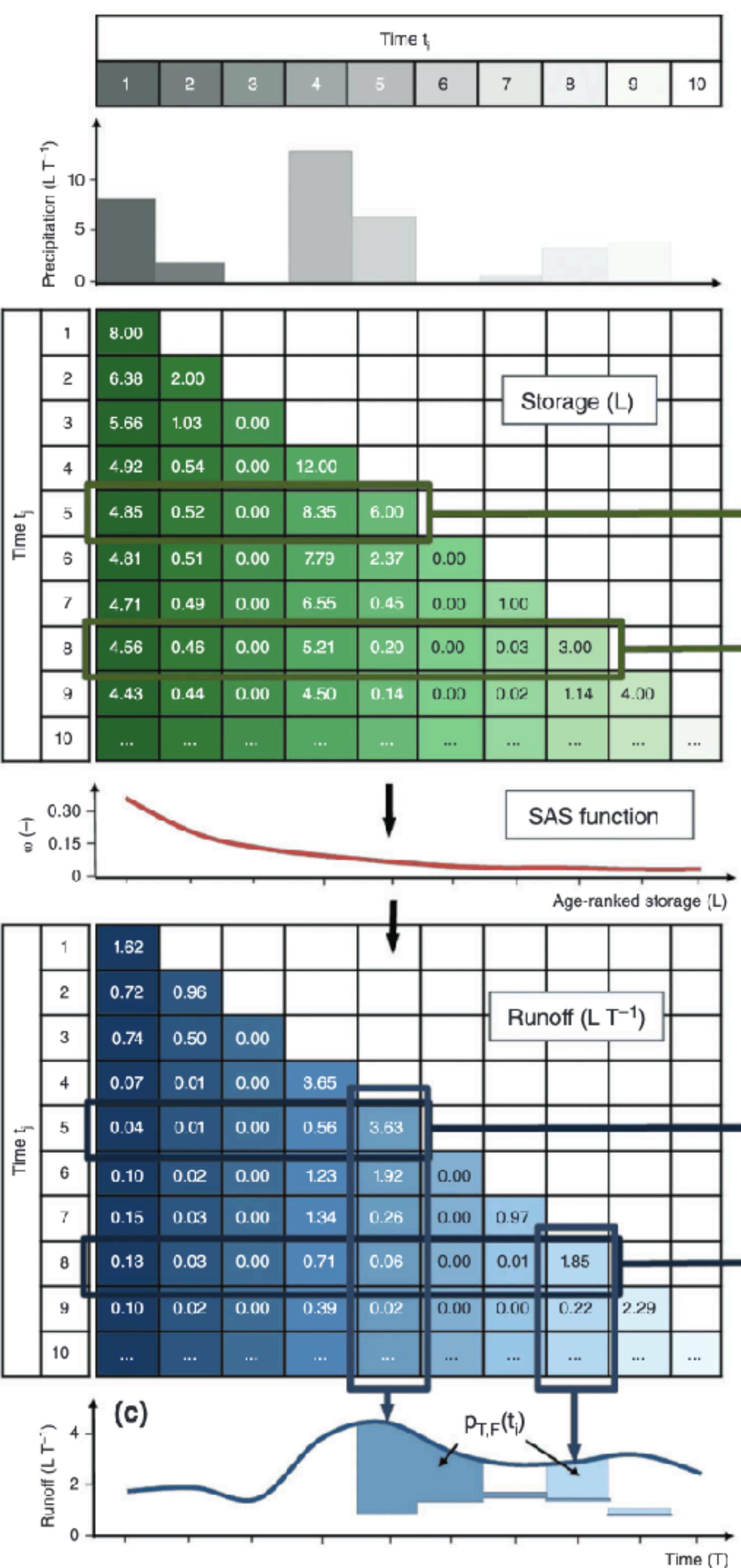
- Wasserpakete verschiedenen Alters bilden den Speicher
- Beim Altern verlassen manche Pakete das System



## Vorwärts TTDs

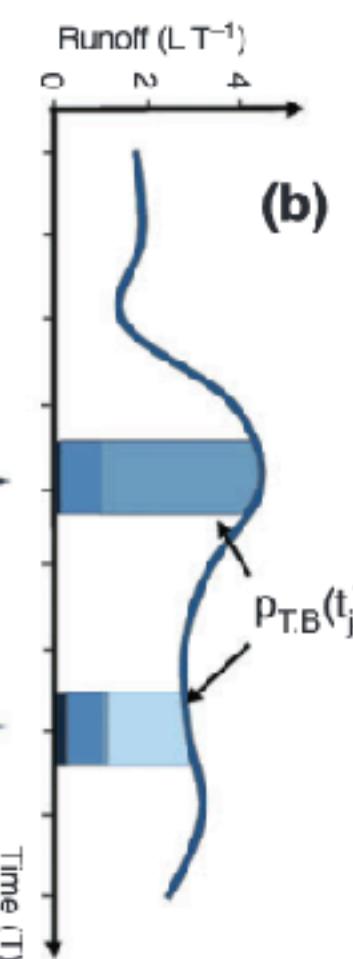
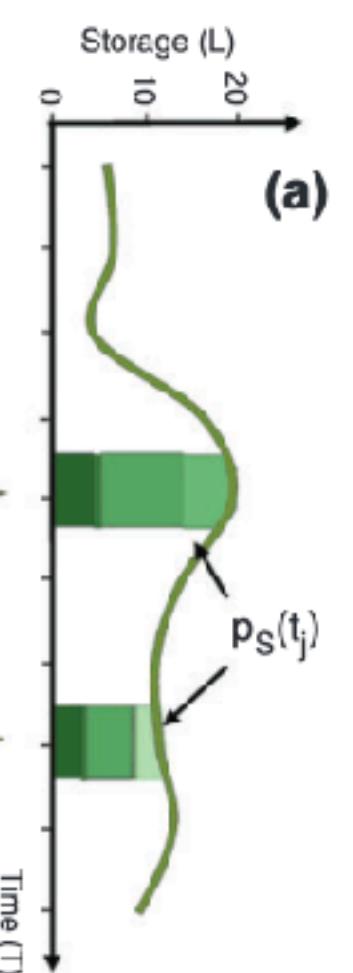
- Wasserpakete mit verschiedener Lebenserwartung sind im Speicher zu  $t_0$
- P bringt neue Pakete in das System
- Altern verschiebt alle Pakete links  $\rightarrow$  Q

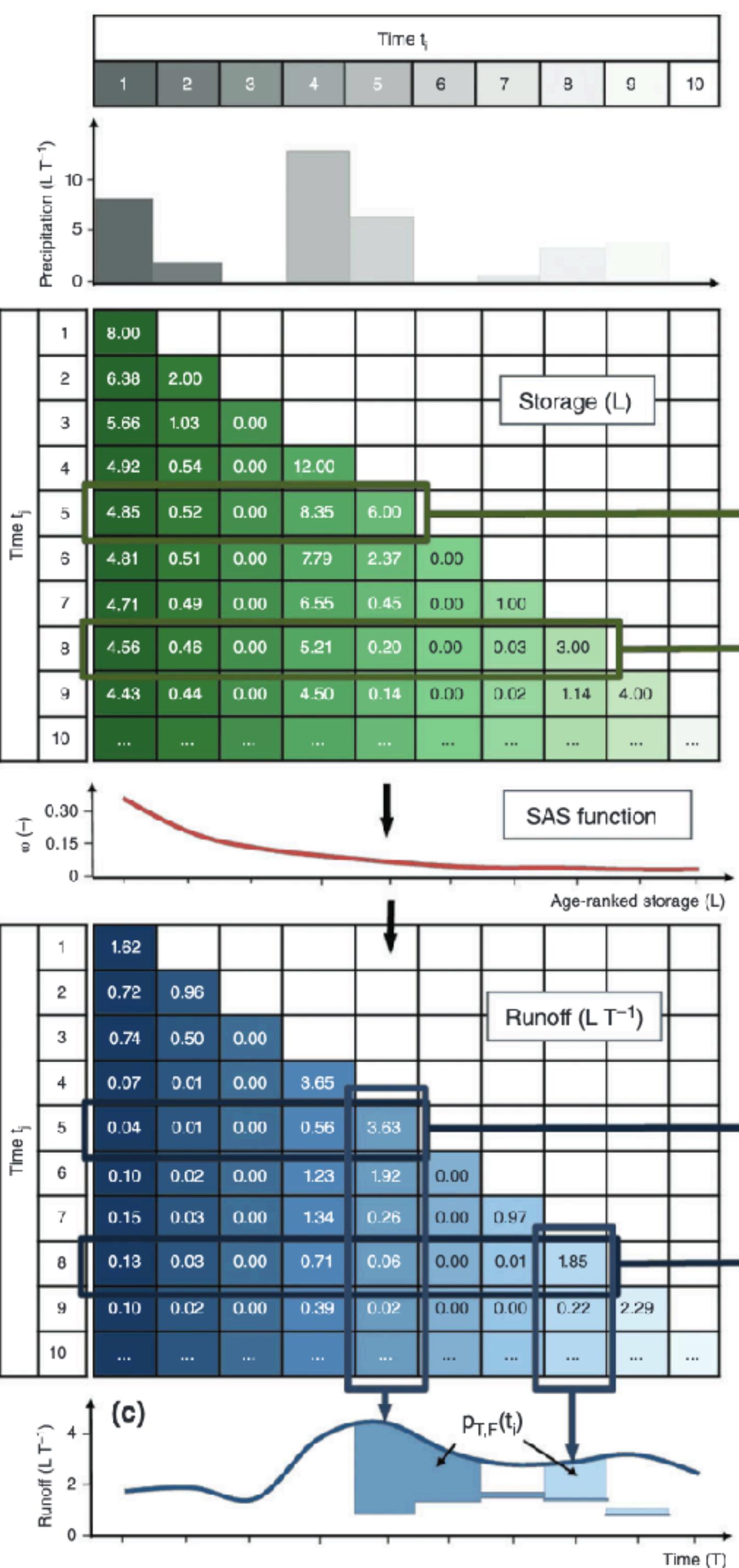




# Storage Age Selection

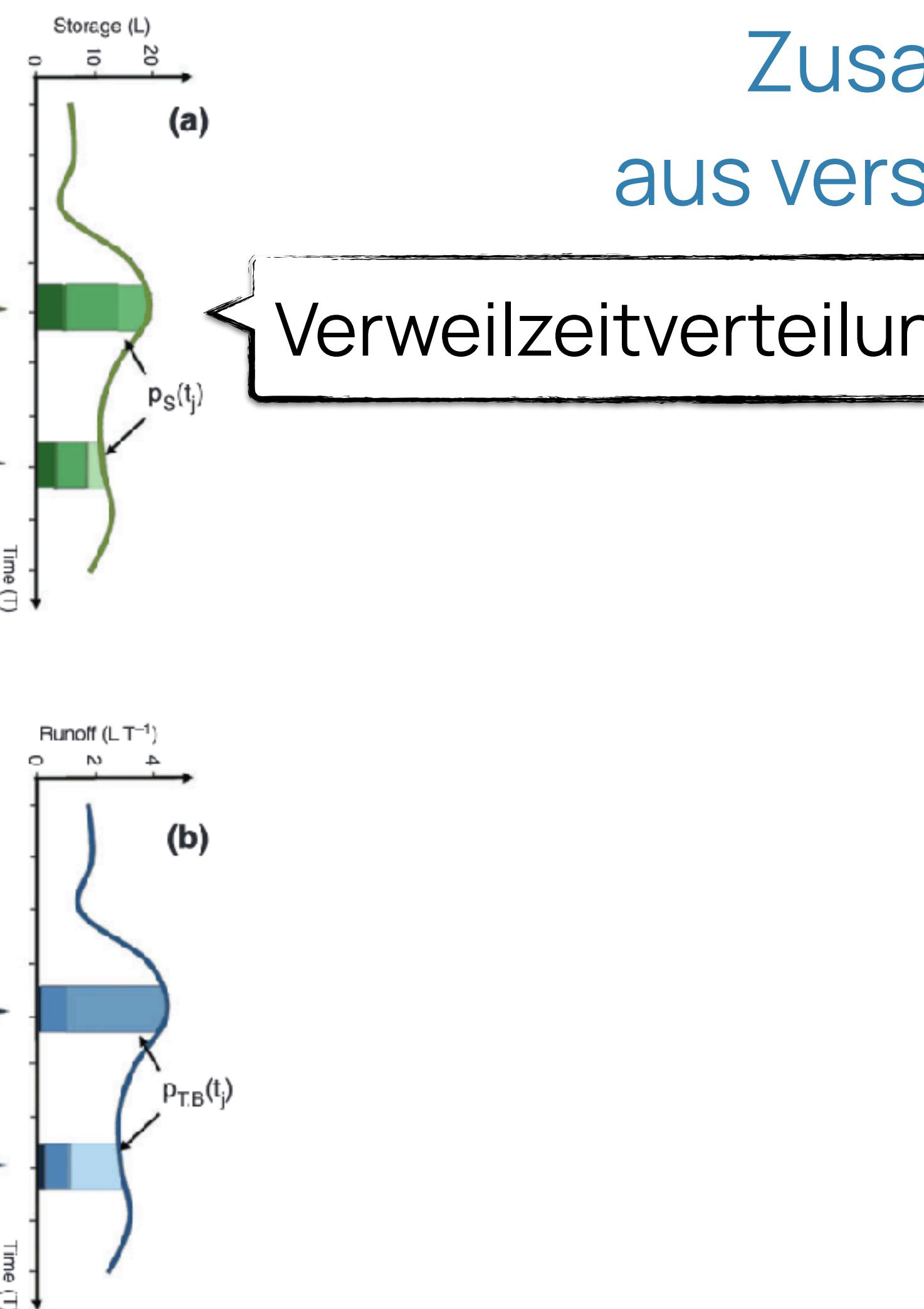
Zusammensetzung von Abfluss  
aus verschiedenen Wasserpaketen



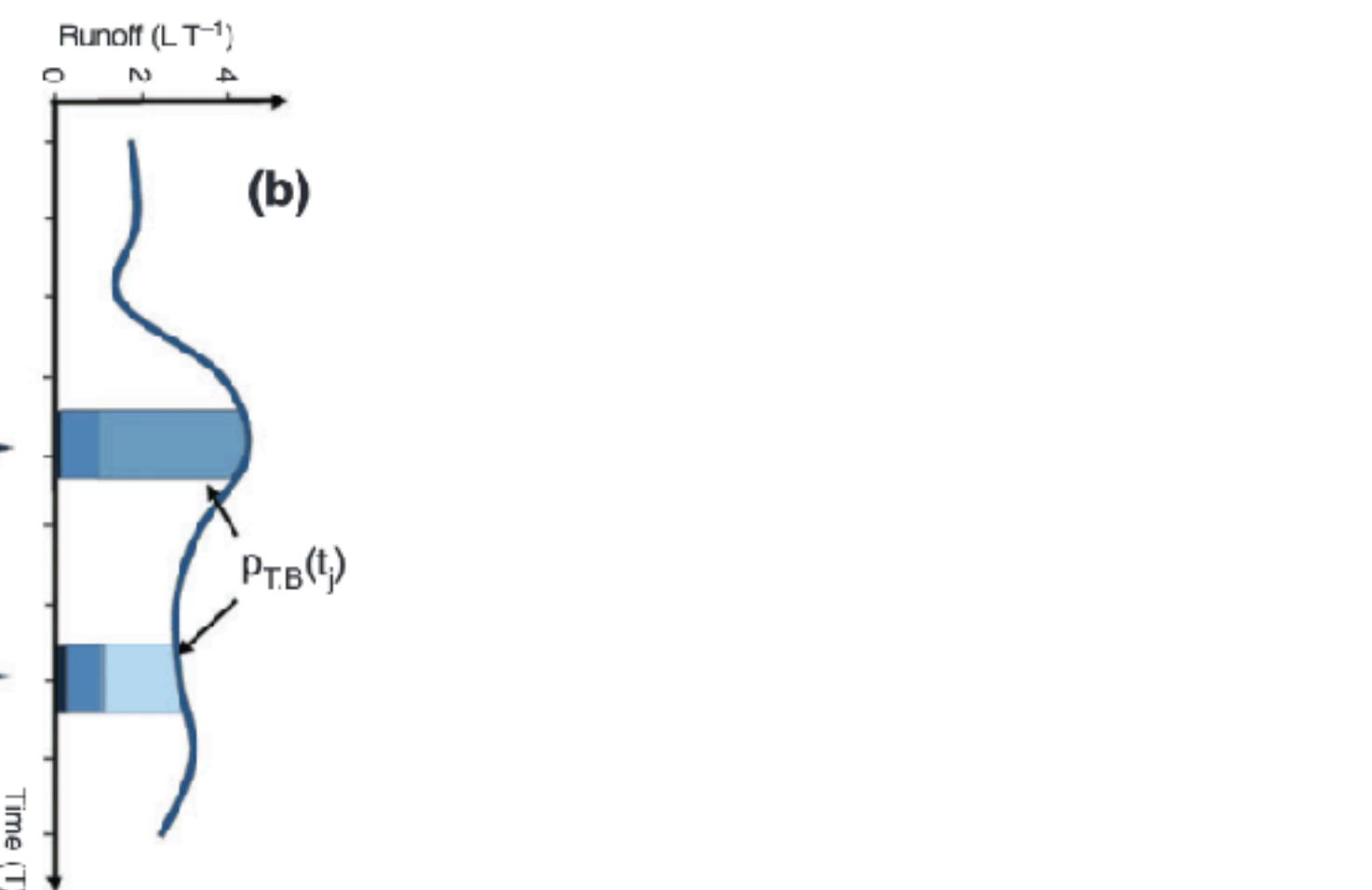


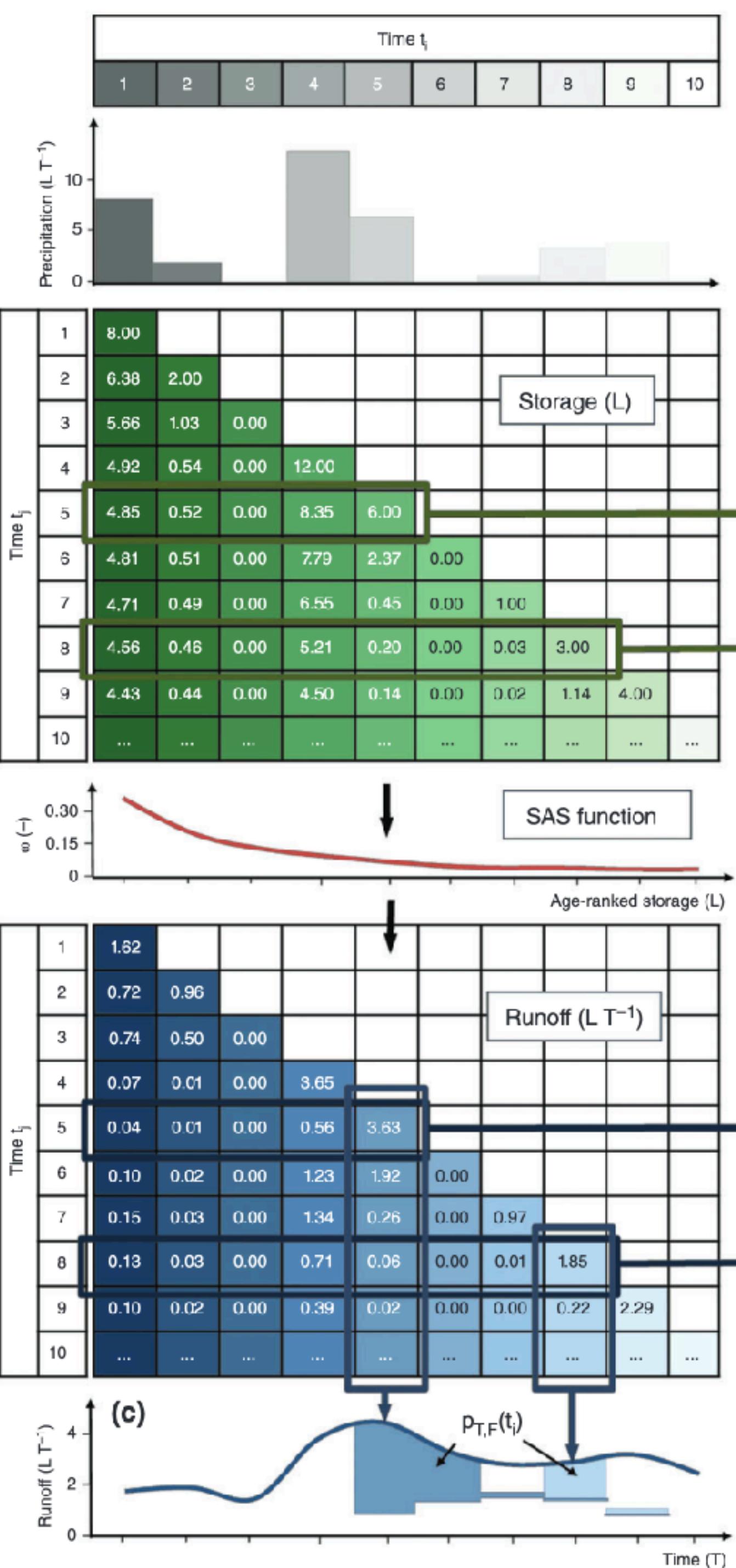
# Storage Age Selection

Zusammensetzung von Abfluss  
aus verschiedenen Wasserpaketen



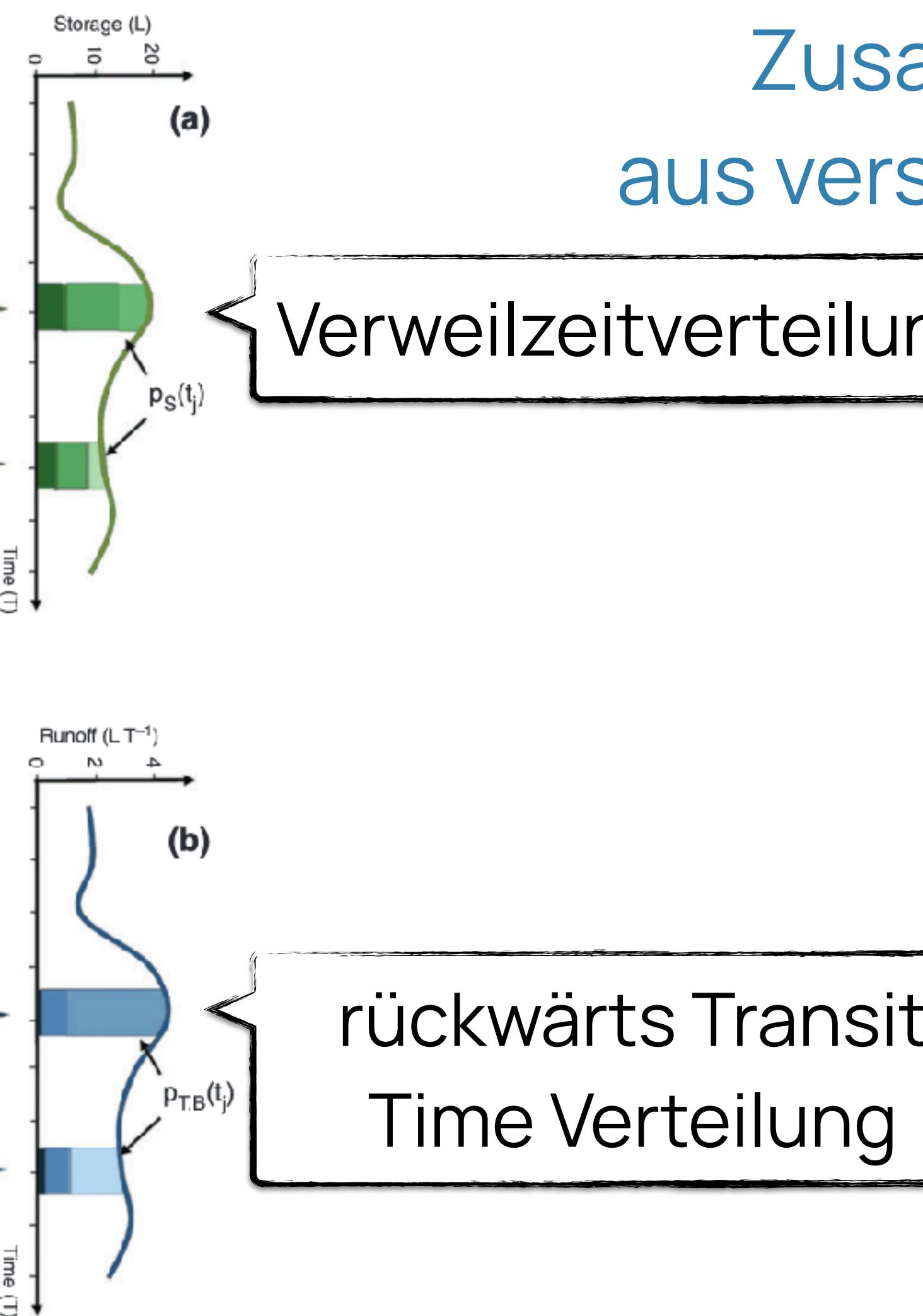
Verweilzeitverteilung





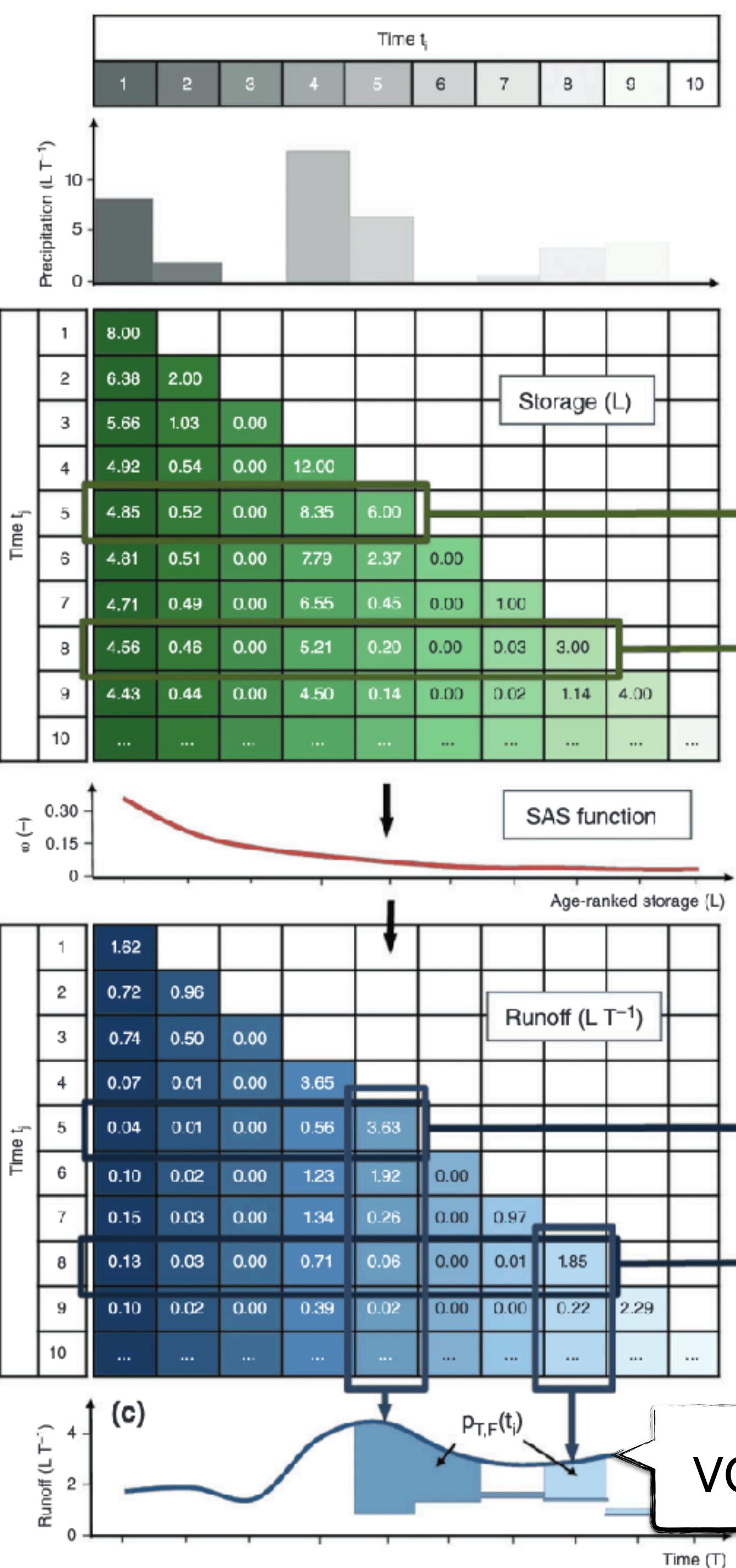
# Storage Age Selection

Zusammensetzung von Abfluss  
aus verschiedenen Wasserpaketen



Verweilzeitverteilung

rückwärts Transit  
Time Verteilung



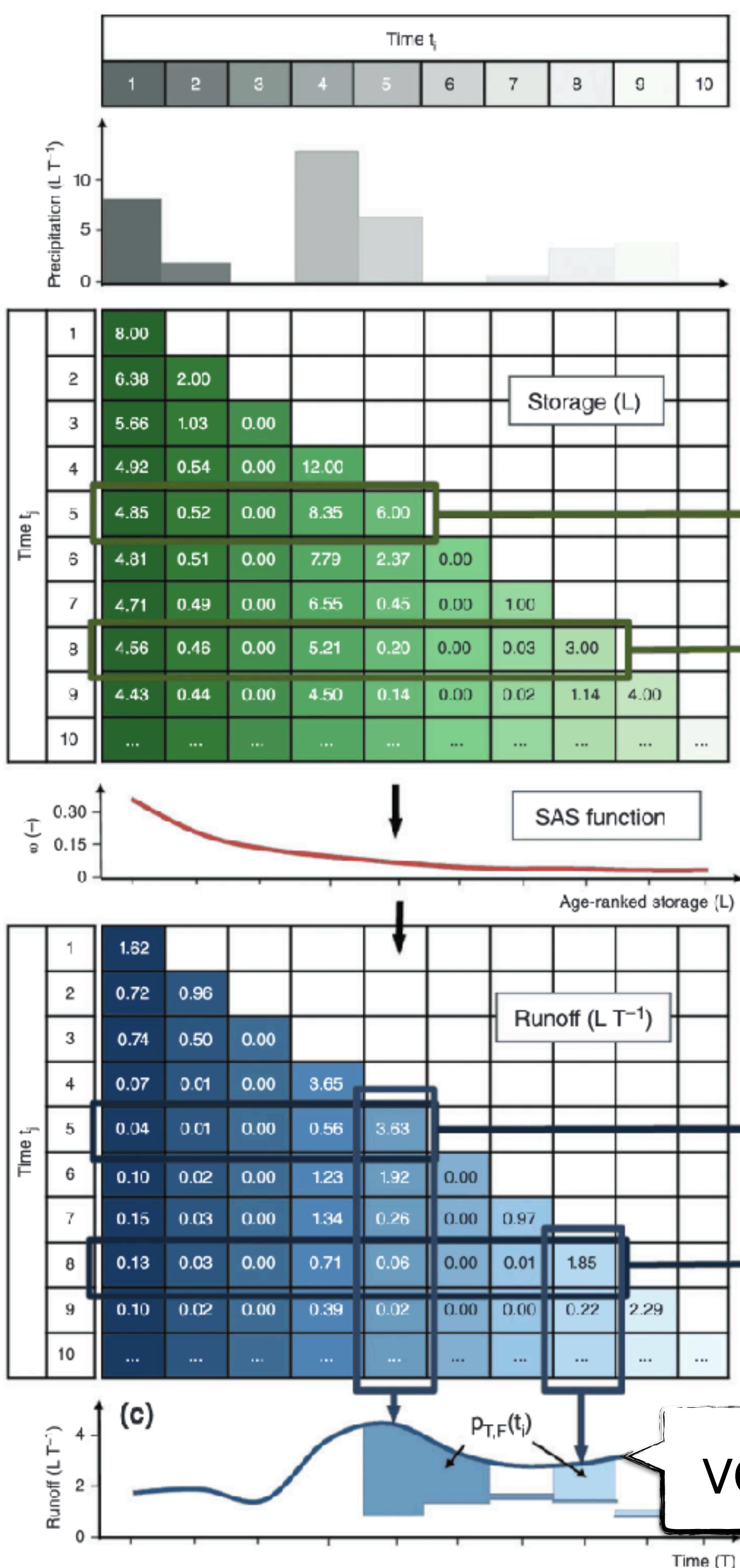
# Storage Age Selection

Zusammensetzung von Abfluss aus verschiedenen Wasserpaketen

Verweilzeitverteilung

rückwärts Transit Time Verteilung

vorwärts Transit Time Verteilung



# Storage Age Selection

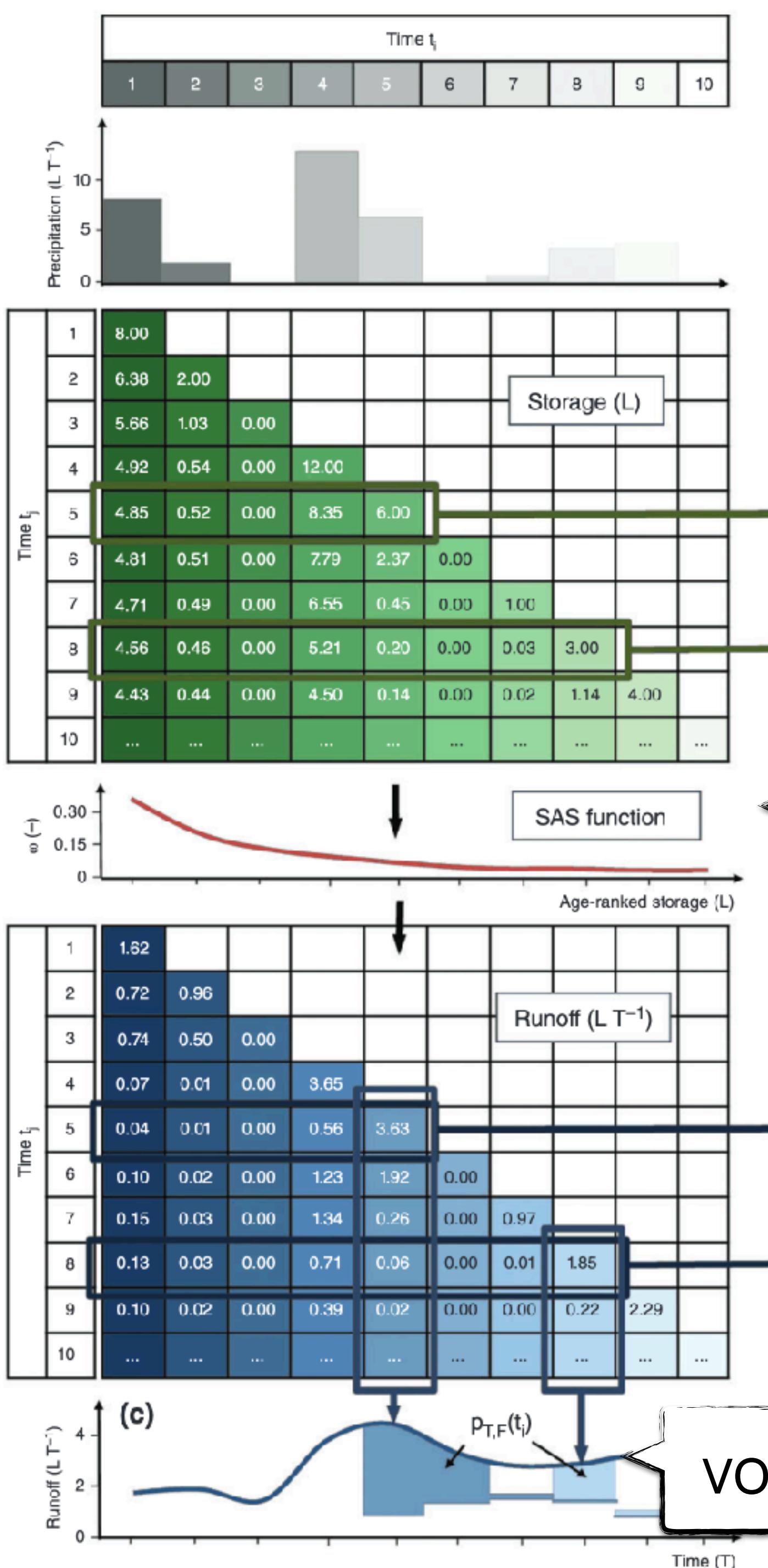
Zusammensetzung von Abfluss  
aus verschiedenen Wasserpaketen

Verweilzeitverteilung

je nach "Auswahl Prozedur"  
(SAS) der Pakete für Abfluss  
ändern sich die Verteilungen

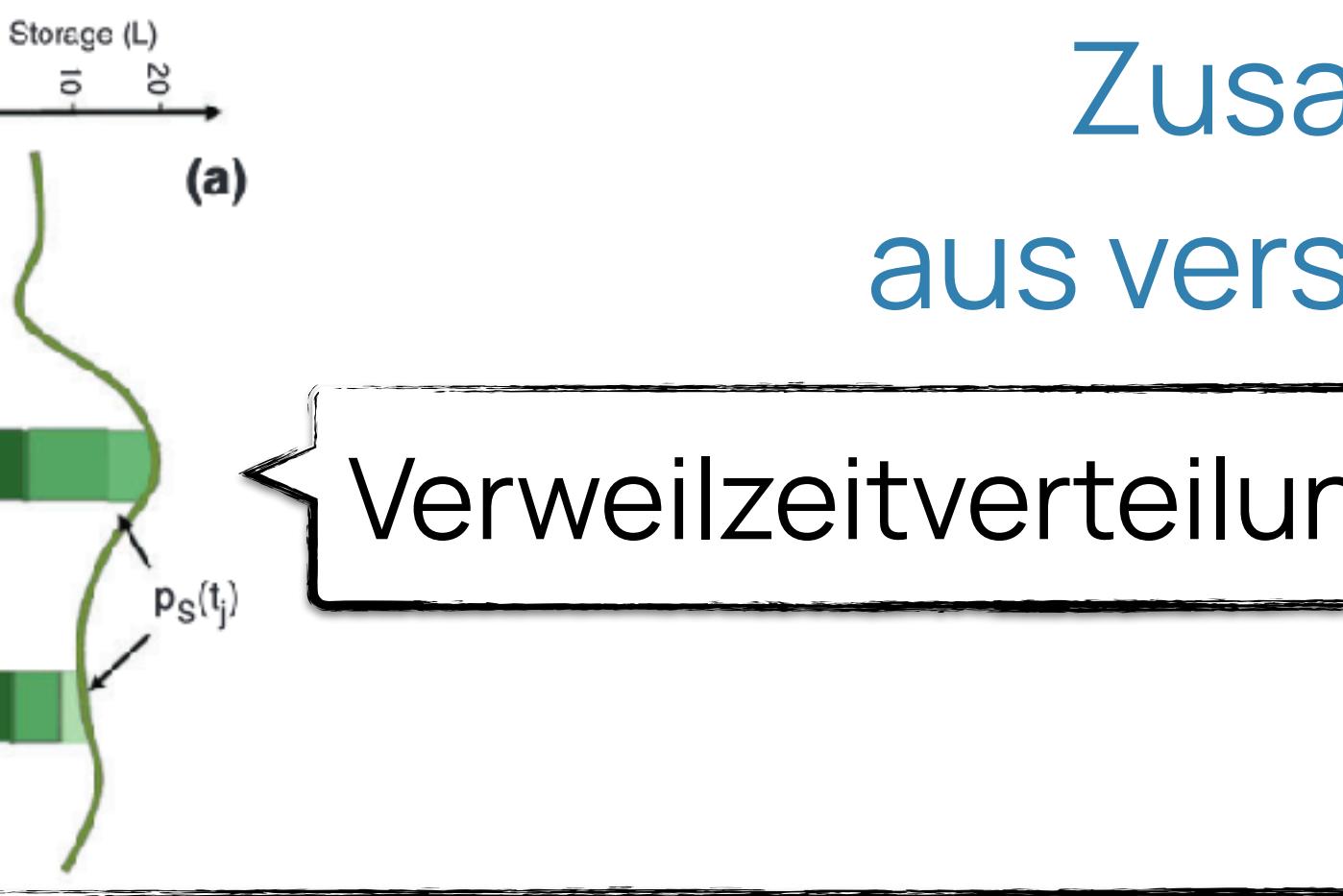
rückwärts Transit  
Time Verteilung

vorwärts Transit Time Verteilung



# Storage Age Selection

Zusammensetzung von Abfluss aus verschiedenen Wasserpaketen

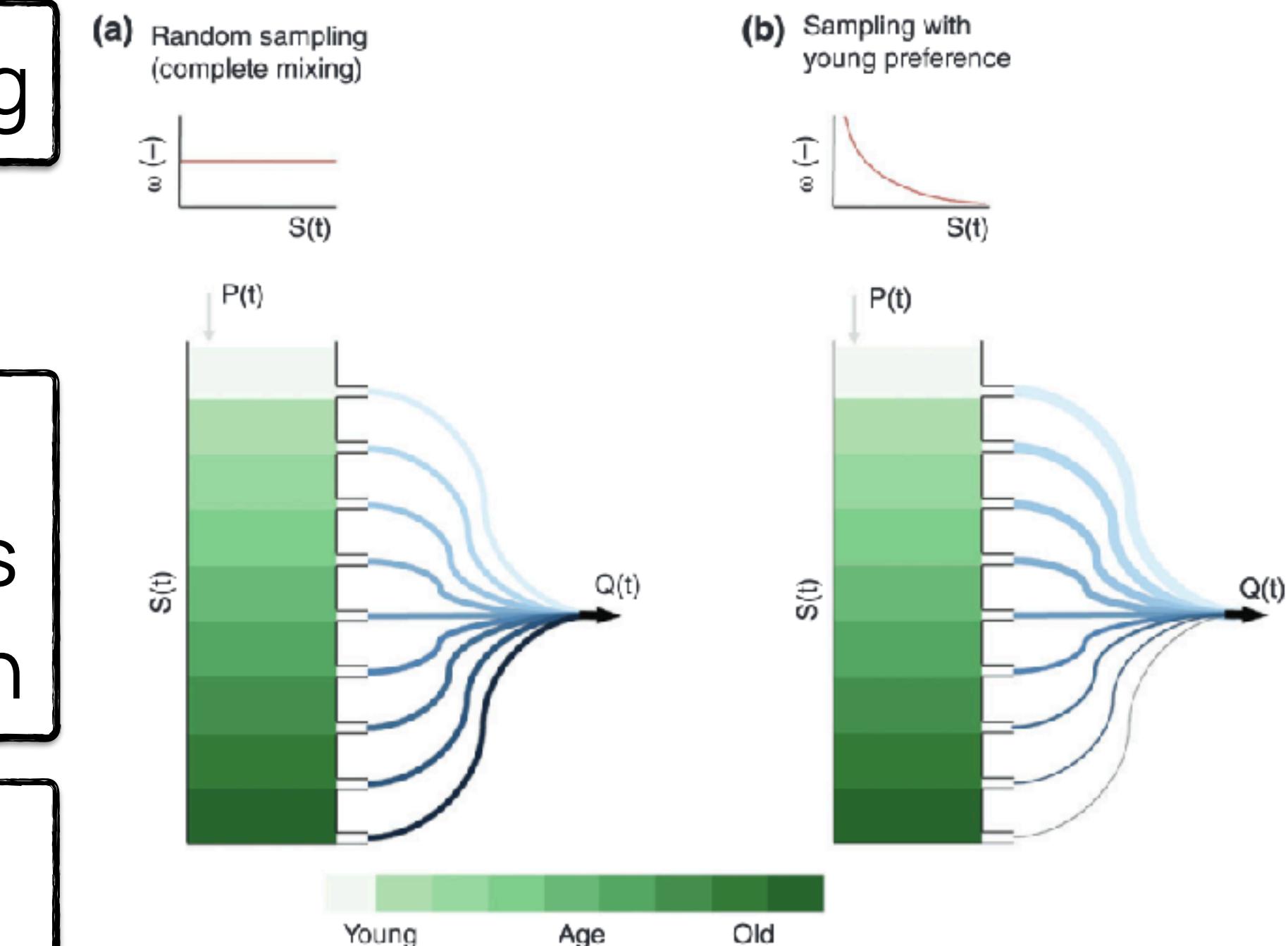


Verweilzeitverteilung

je nach “Auswahl Prozedur”  
(SAS) der Pakete für Abfluss  
ändern sich die Verteilungen

rückwärts Transit  
Time Verteilung

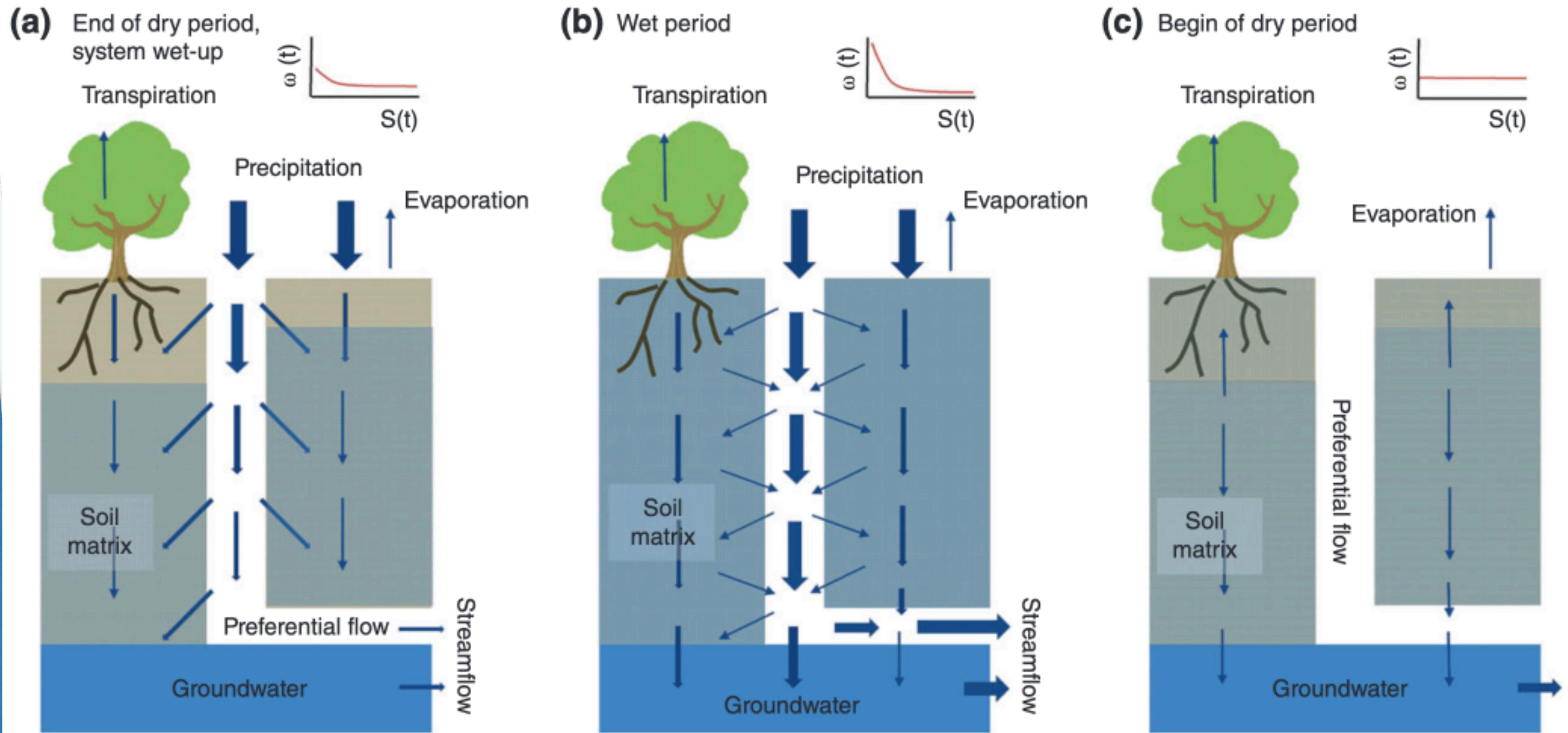
vorwärts Transit Time Verteilung



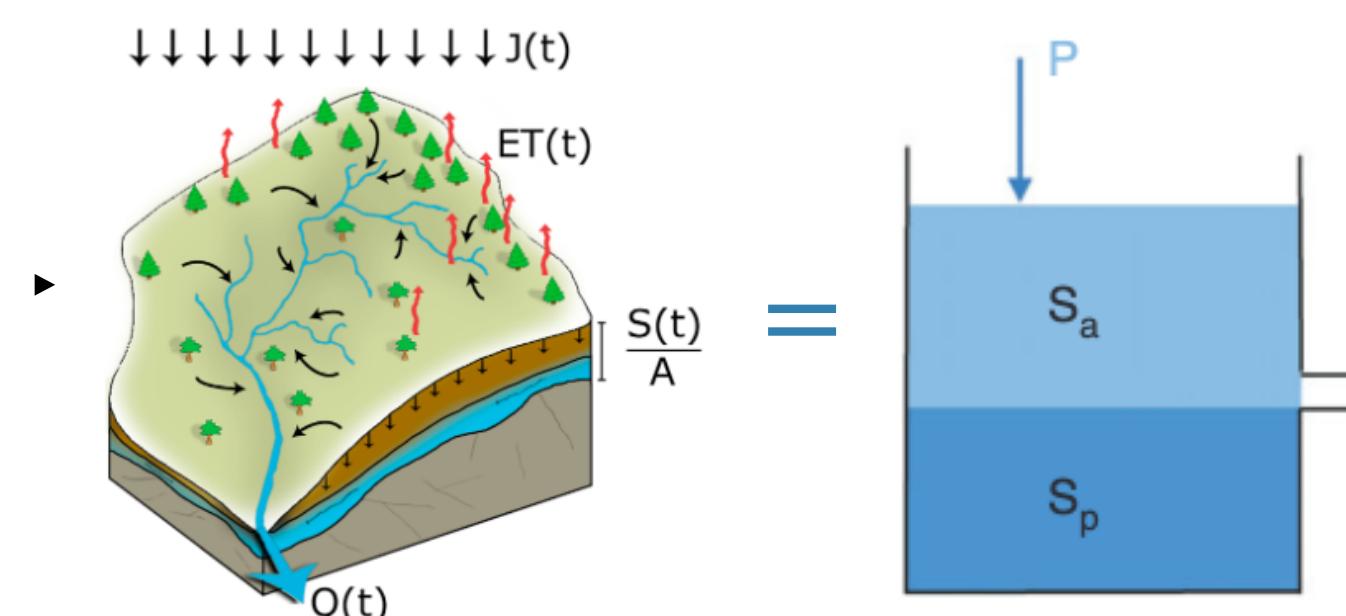
- SAS kann verschiedene Abflussprozesse abbilden

# Storage Age Selection

SAS für verschiedene Zustände und dominierende Prozesse

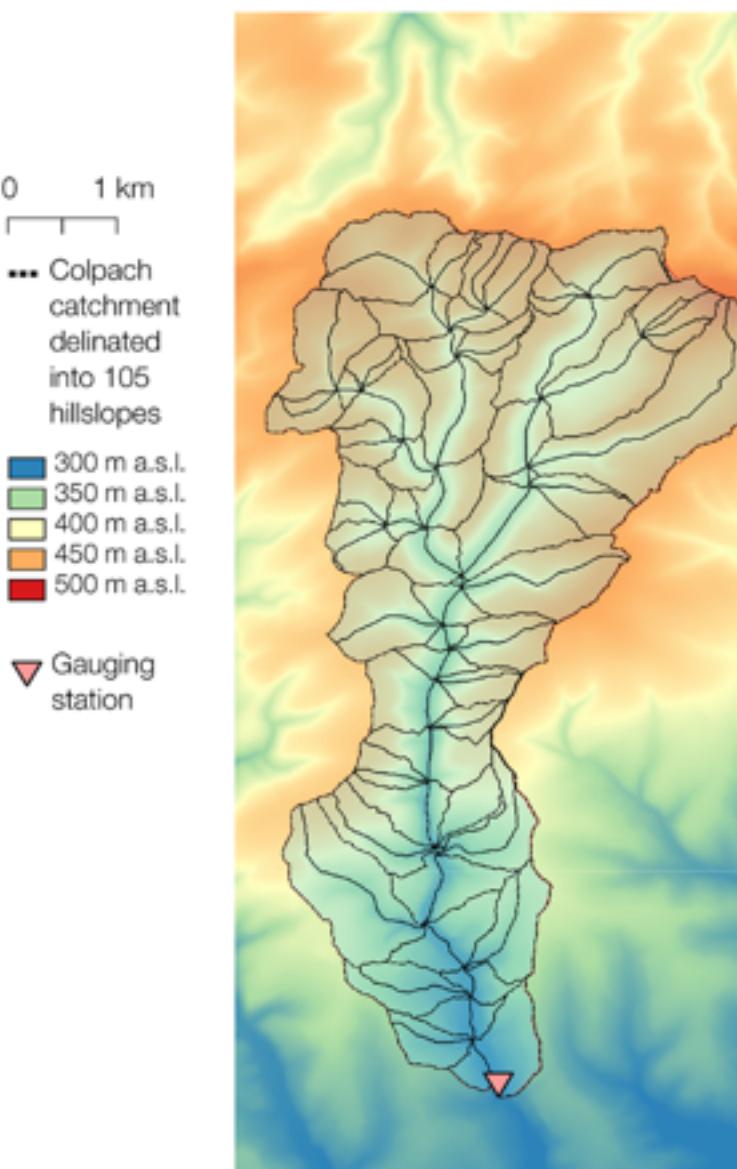
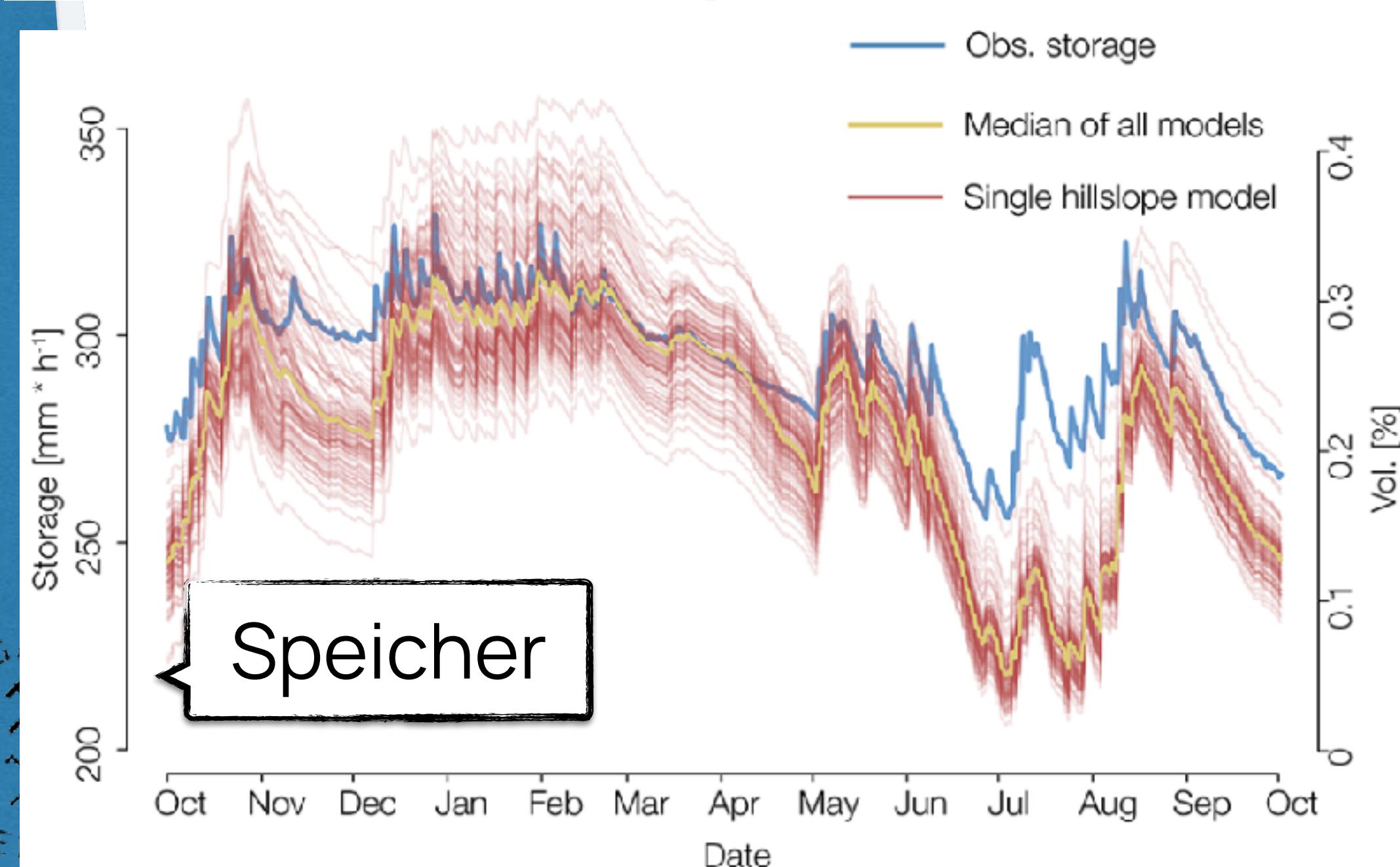
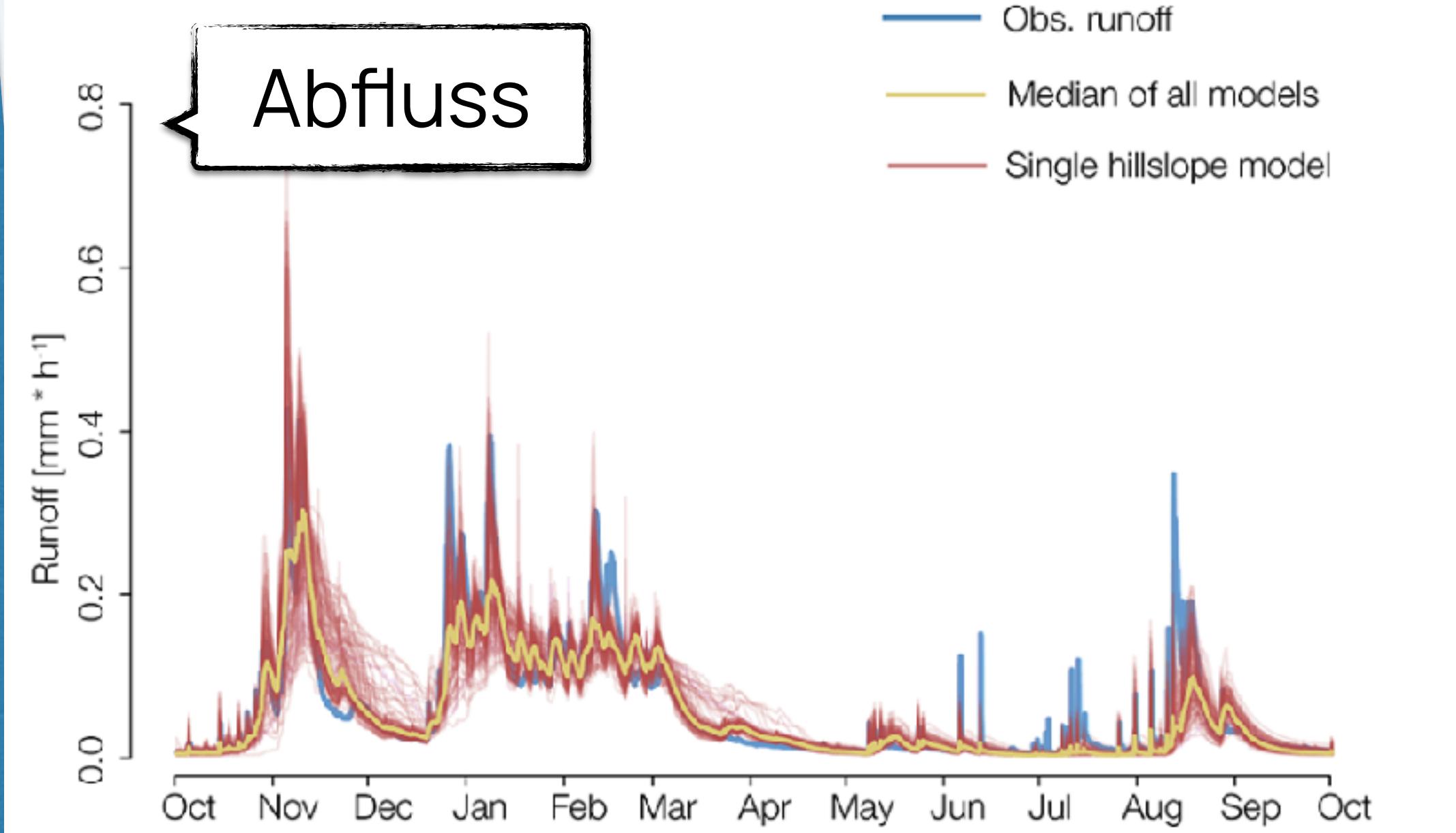


- SAS kann verschiedene Transportprozesse abbilden
- eine Art Filterfunktion für die Speicherzusammensetzung



# Zeitliche Korrelation

## Zustandsdynamik

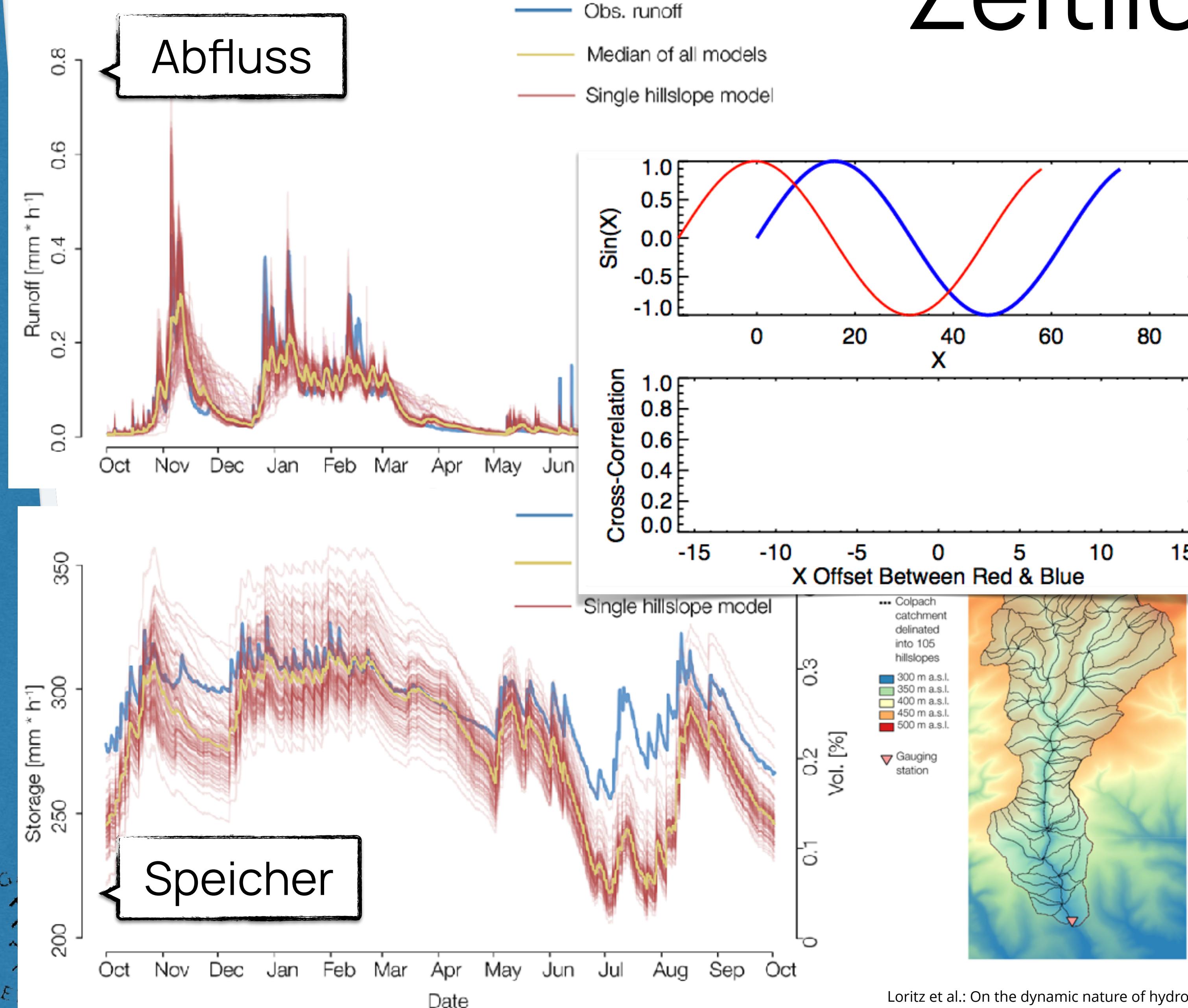


Ähnlichkeit von Signalen

- Einzugsgebiete untereinander
- Beobachtung  $\leftarrow \rightarrow$  Modell
- Phasenversatz
- Amplituden
- ...
- auch mehrere Signale parallel

# Zeitliche Korrelation

## Zustandsdynamik

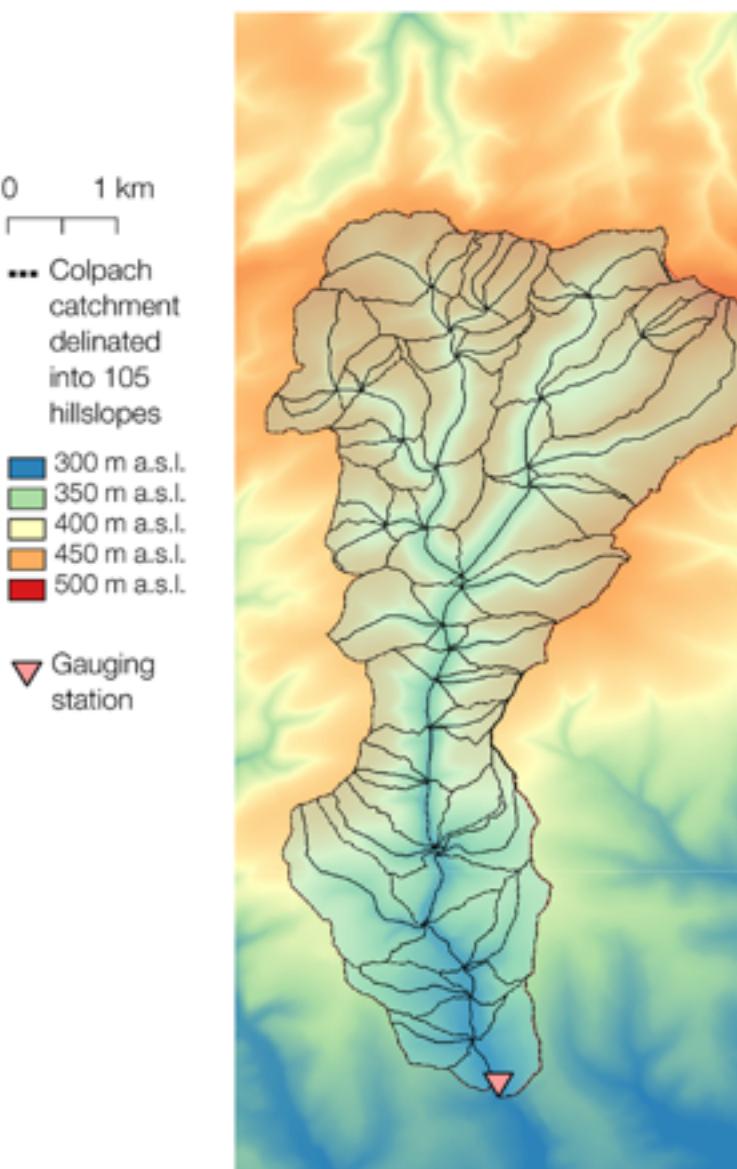
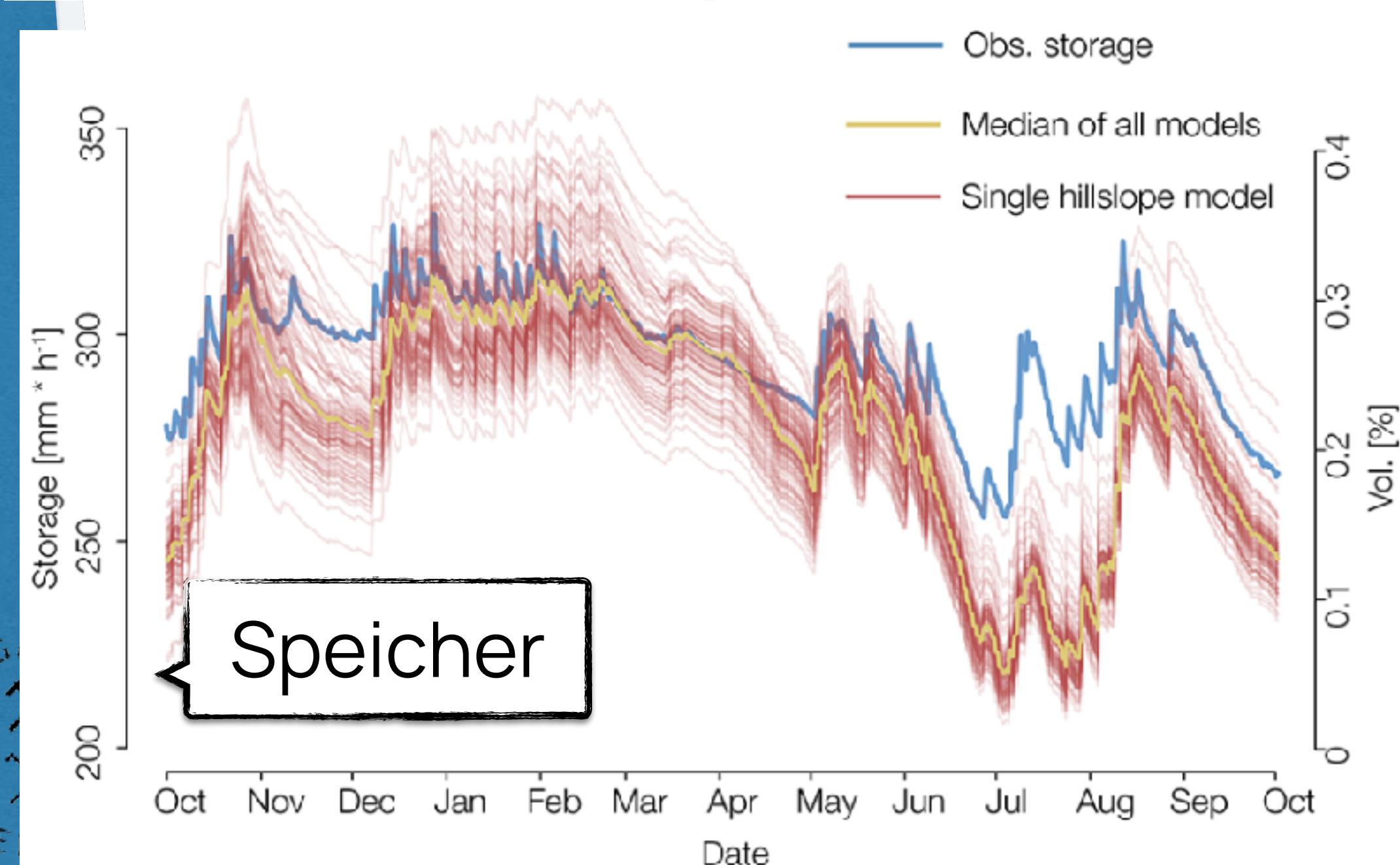
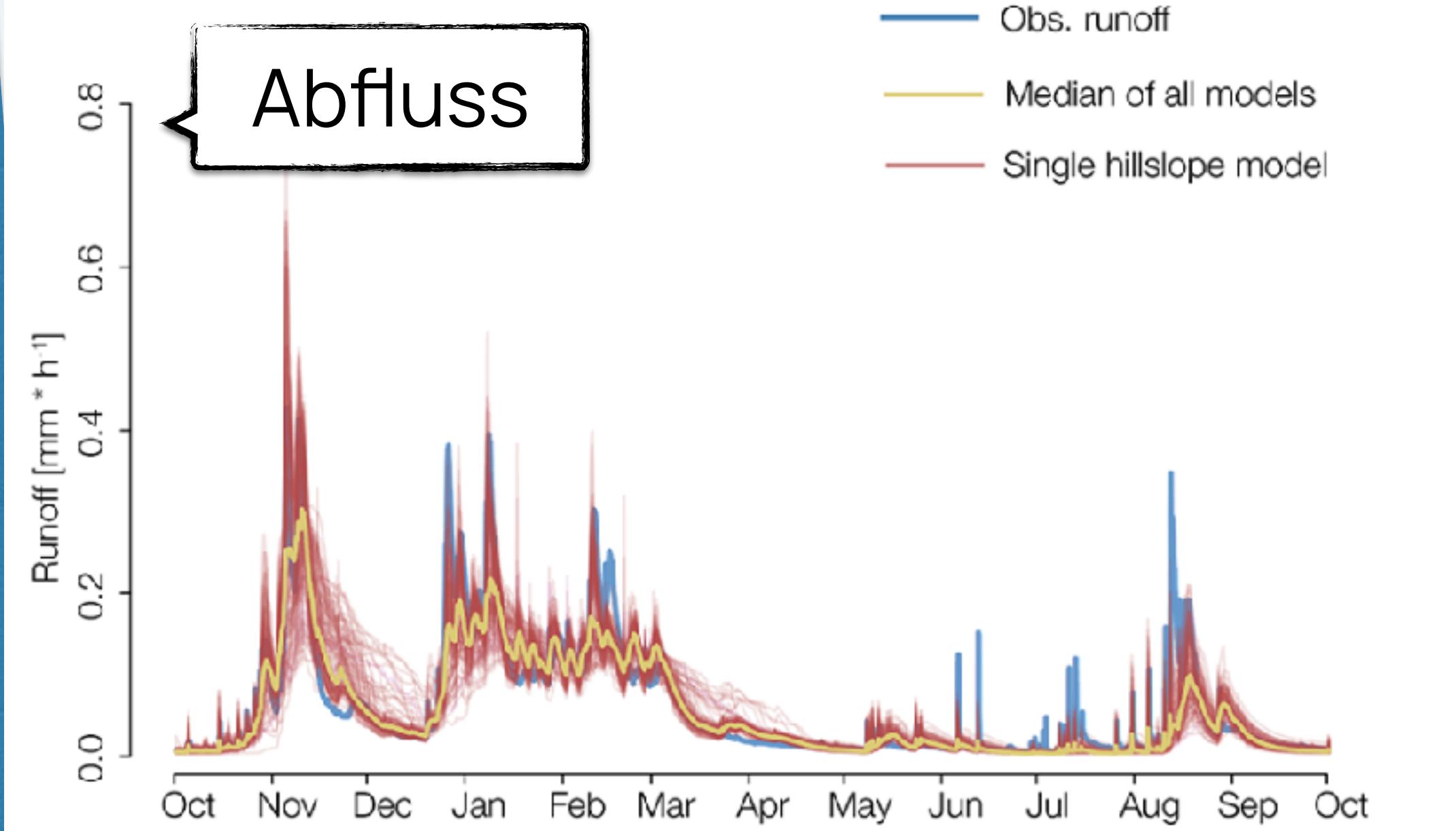


Ähnlichkeit von Signalen

- Einzugsgebiete untereinander
- Beobachtung  $\leftrightarrow$  Modell
- Phasenversatz
- Amplituden
- ...
- auch mehrere Signale parallel

# Zeitliche Korrelation

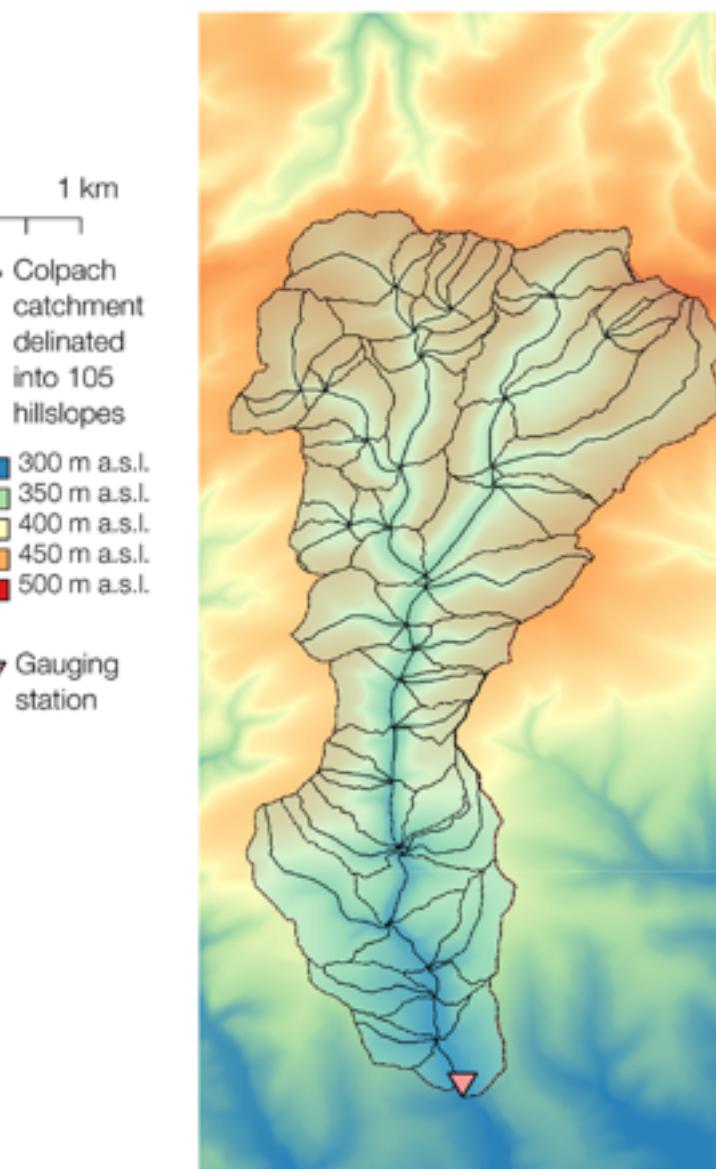
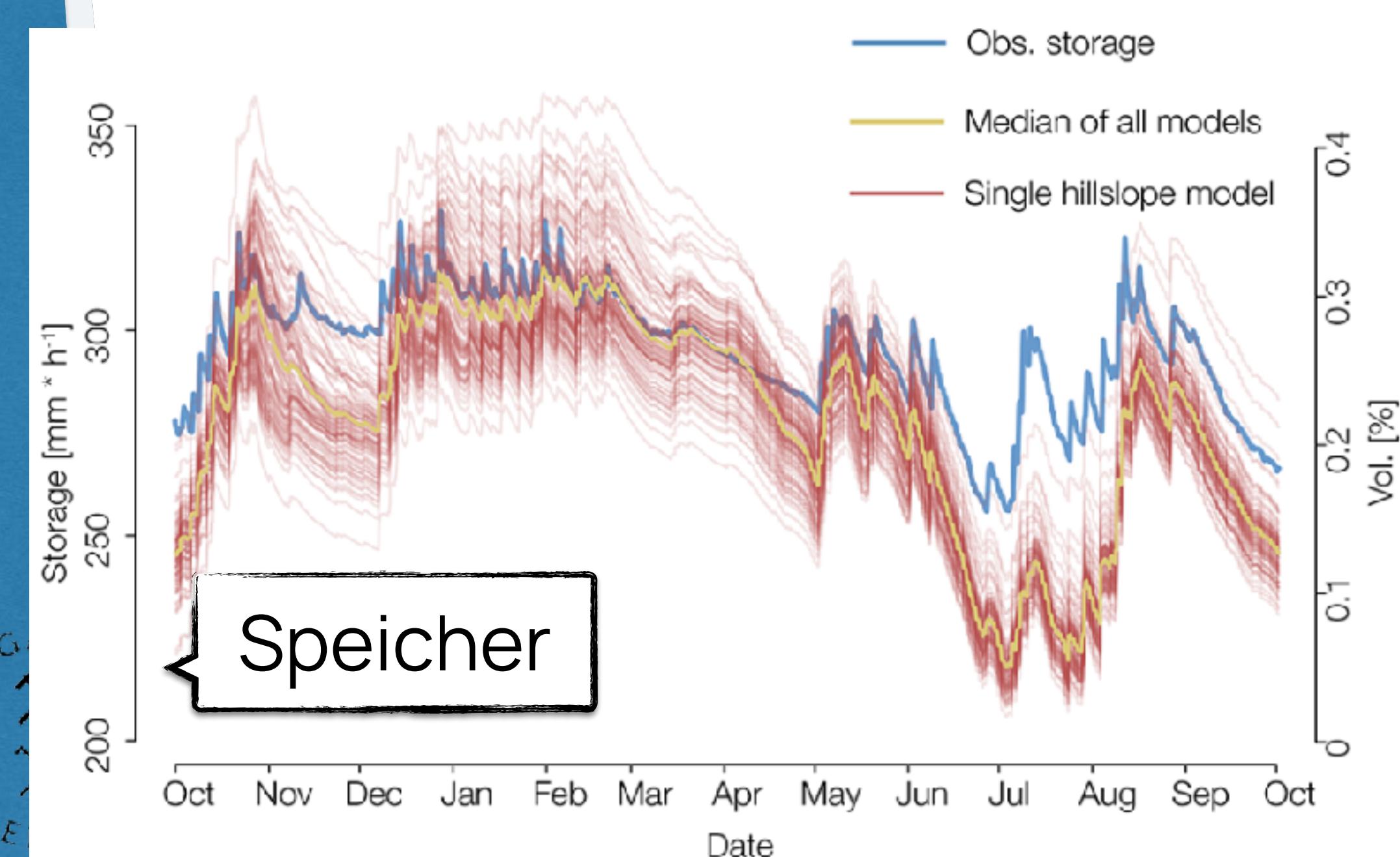
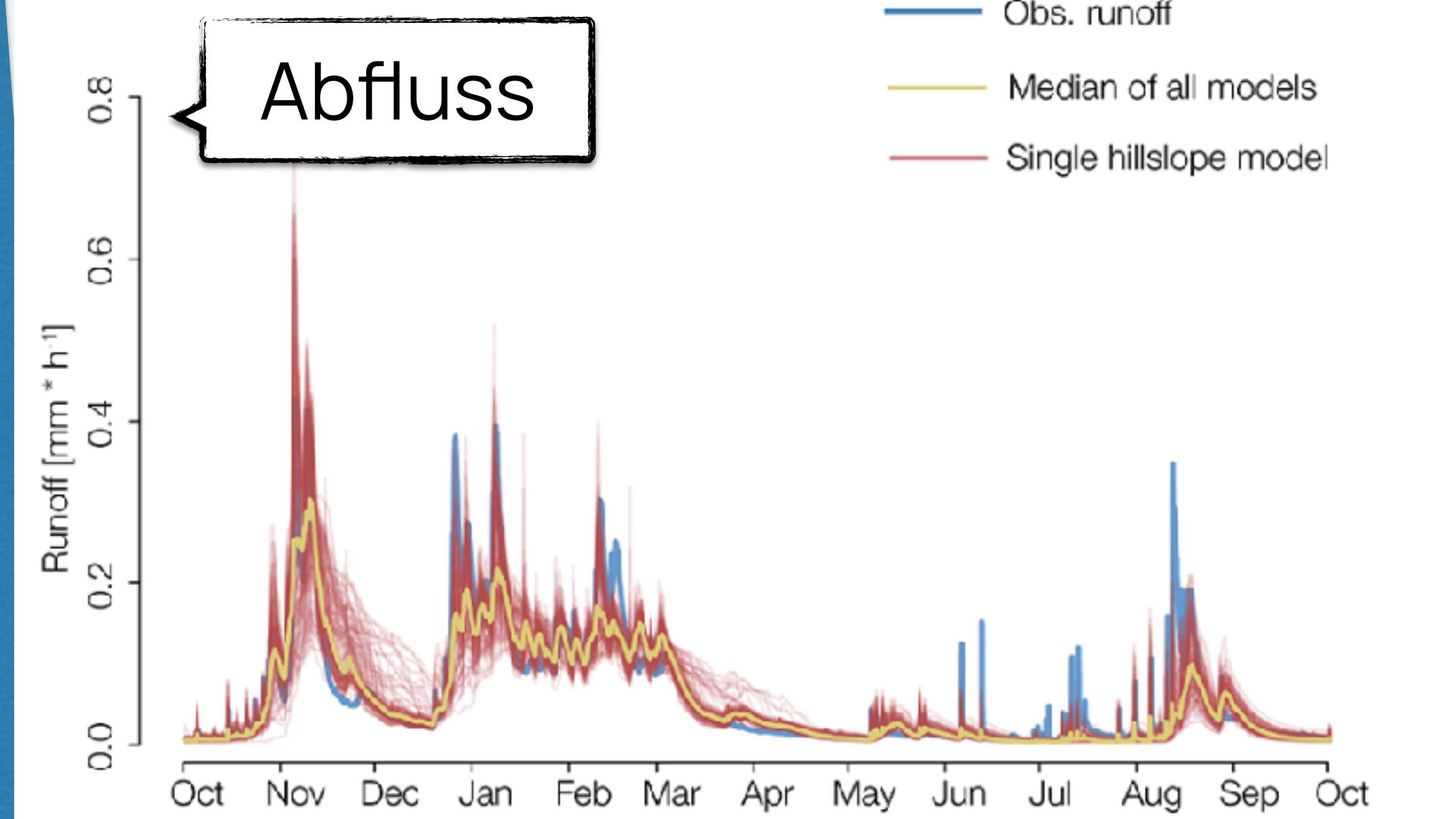
## Zustandsdynamik



Ähnlichkeit von Signalen

- Einzugsgebiete untereinander
- Beobachtung  $\leftarrow \rightarrow$  Modell
- Phasenversatz
- Amplituden
- ...
- auch mehrere Signale parallel

# Zeitliche Korrelation



Zustandsdynamik

kucken wir uns andermal genau an

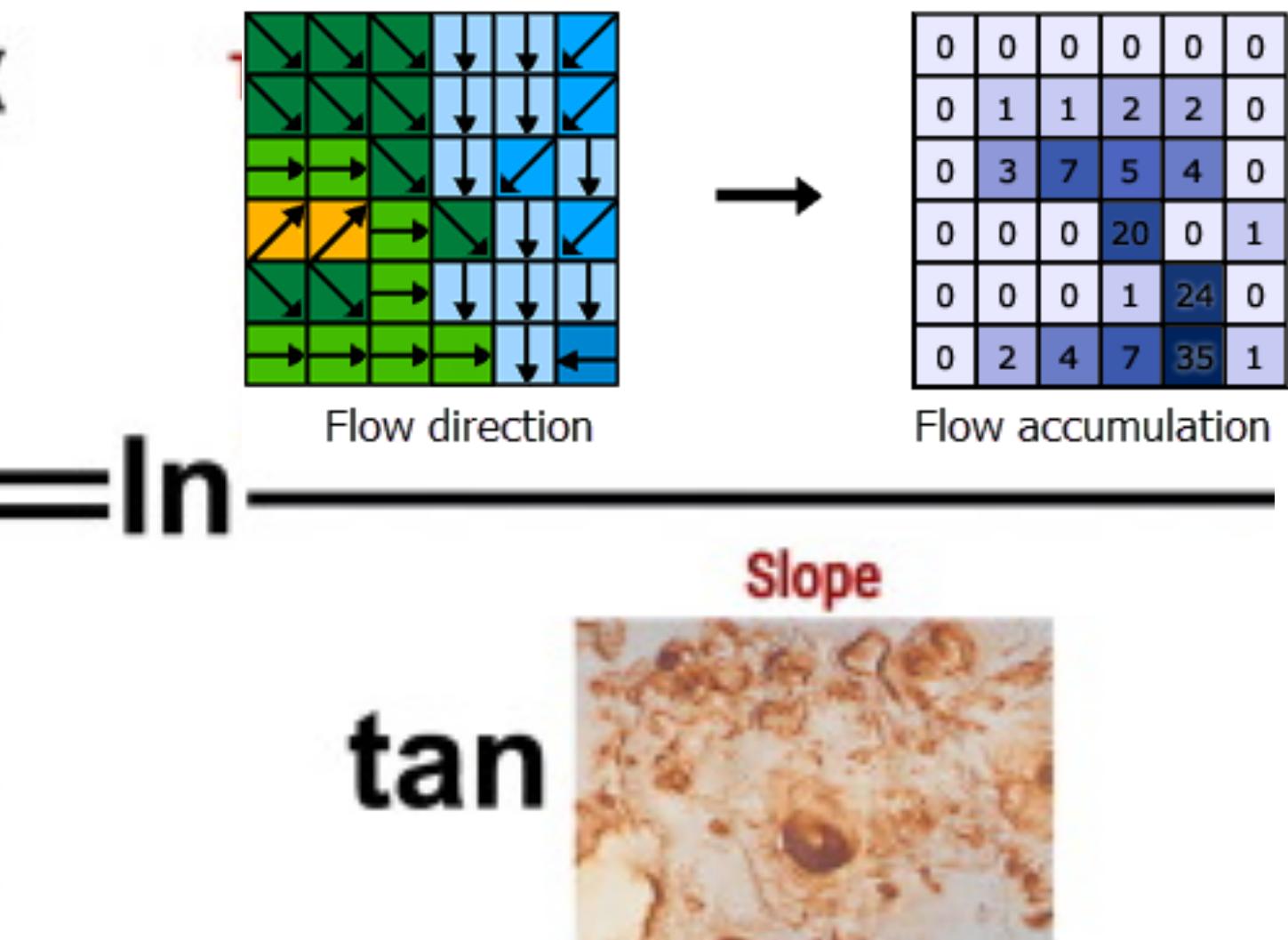
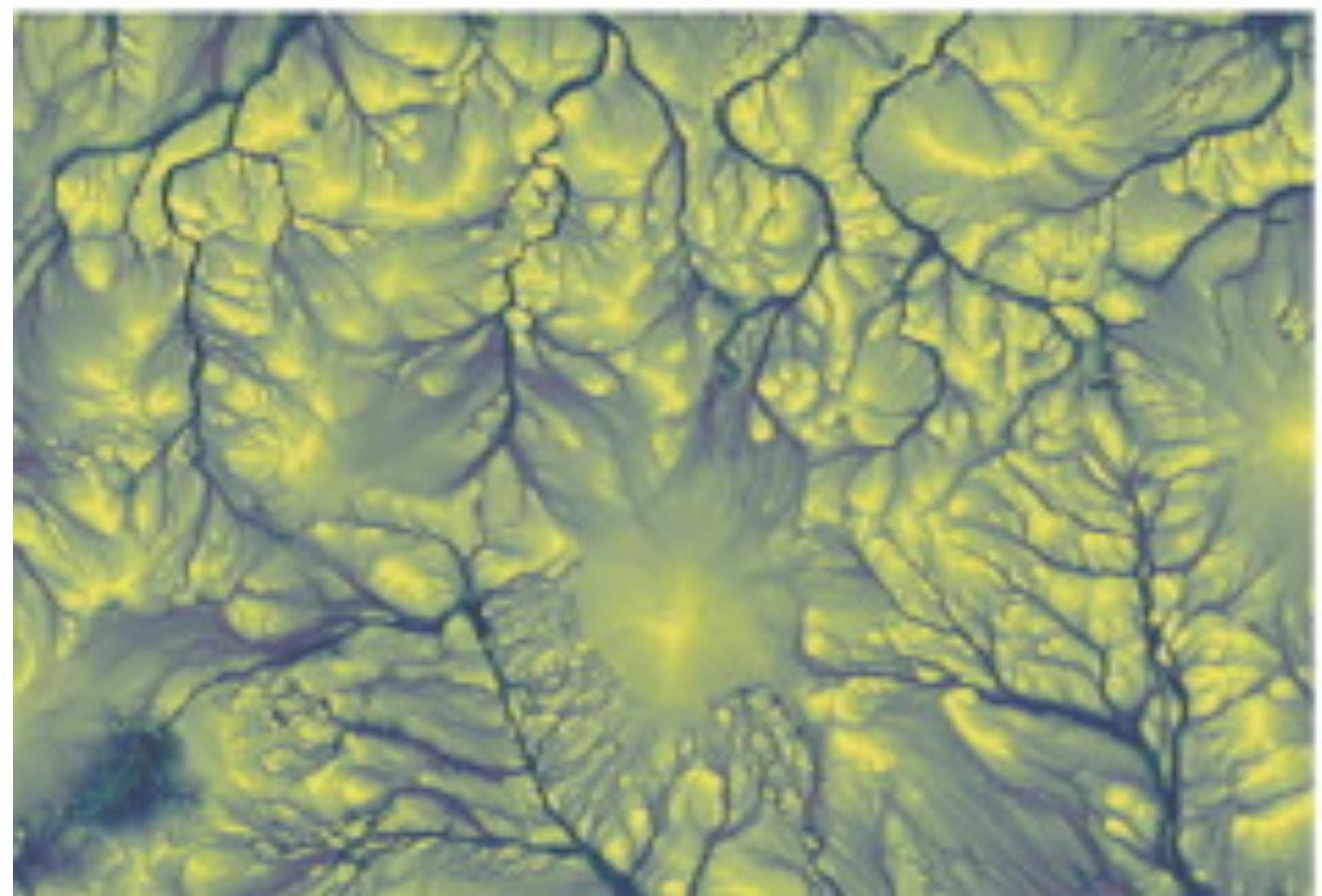
Ähnlichkeit von Signalen

- Einzugsgebiete untereinander
- Beobachtung  $\leftarrow \rightarrow$  Modell
- Phasenversatz
- Amplituden
- ...
- auch mehrere Signale parallel

# Räumliche Struktur

## (Soil) Topographic Wetness Index

### Topographic Wetness Index



zentrale Annahmen:

- statische Oberfläche
- keine dynamischen Zustände/Treiber

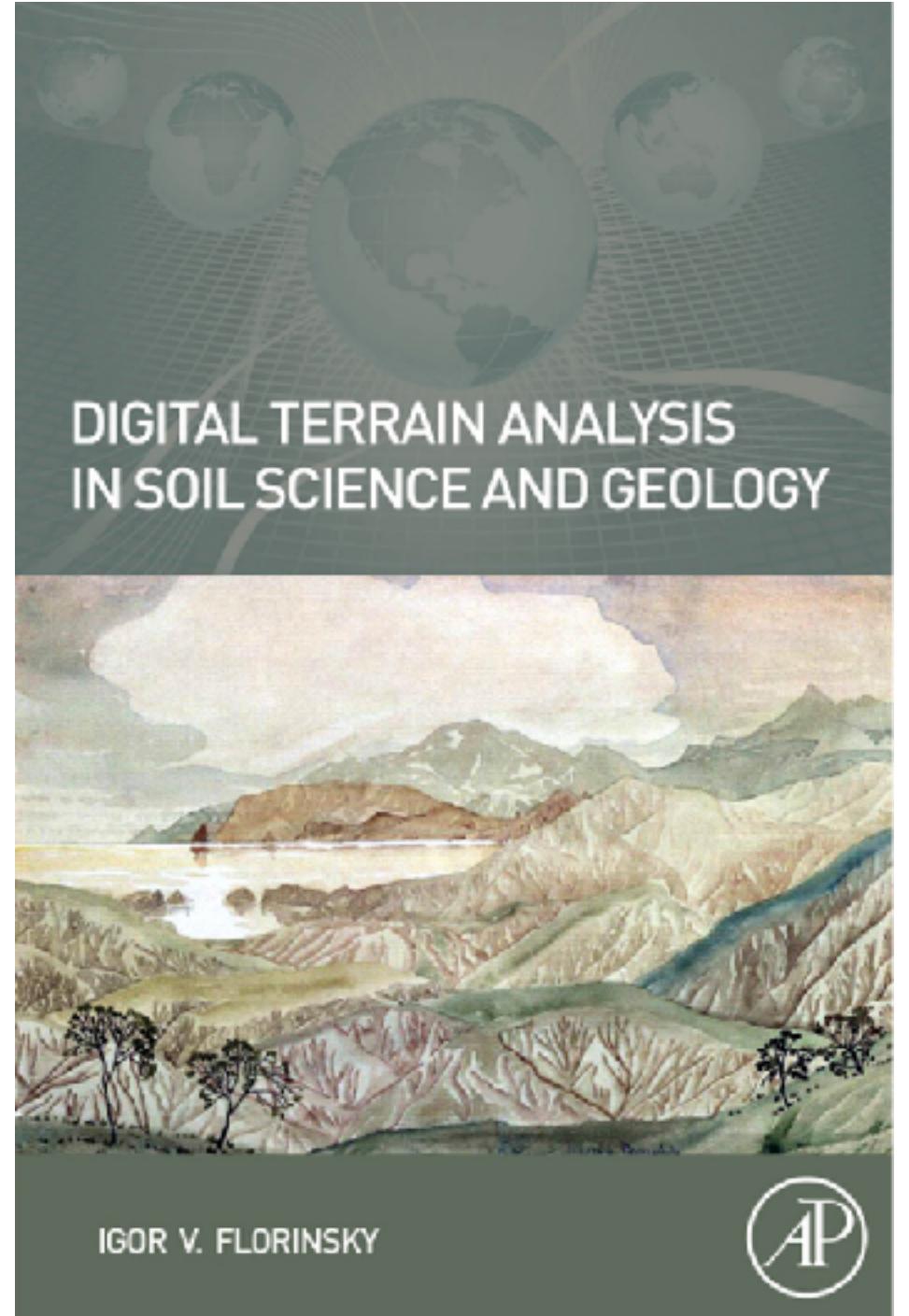
- sehr erfolgreich für gemäßigte und humide speicherkontrollierte EZG

$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan(\beta)}\right)$$

- Erweiterung um hydraulische Leitfähigkeit ( $k_s$ ) und Mächtigkeit ( $z_s$ ) des Bodens

$$STI = \ln\left(\frac{\alpha}{k_s z_s \tan(\beta)}\right)$$

Florinsky, I. V.: Digital Terrain Analysis in Soil Science and Geology, Academic Press, 2012.



zentrale Annahmen:

- statische Oberfläche
- keine dynamischen Zustände/Treiber

# Räumliche Struktur

## (Soil) Topographic Wetness Index

- sehr erfolgreich für gemäßigte und humide speicherkontrollierte EZG

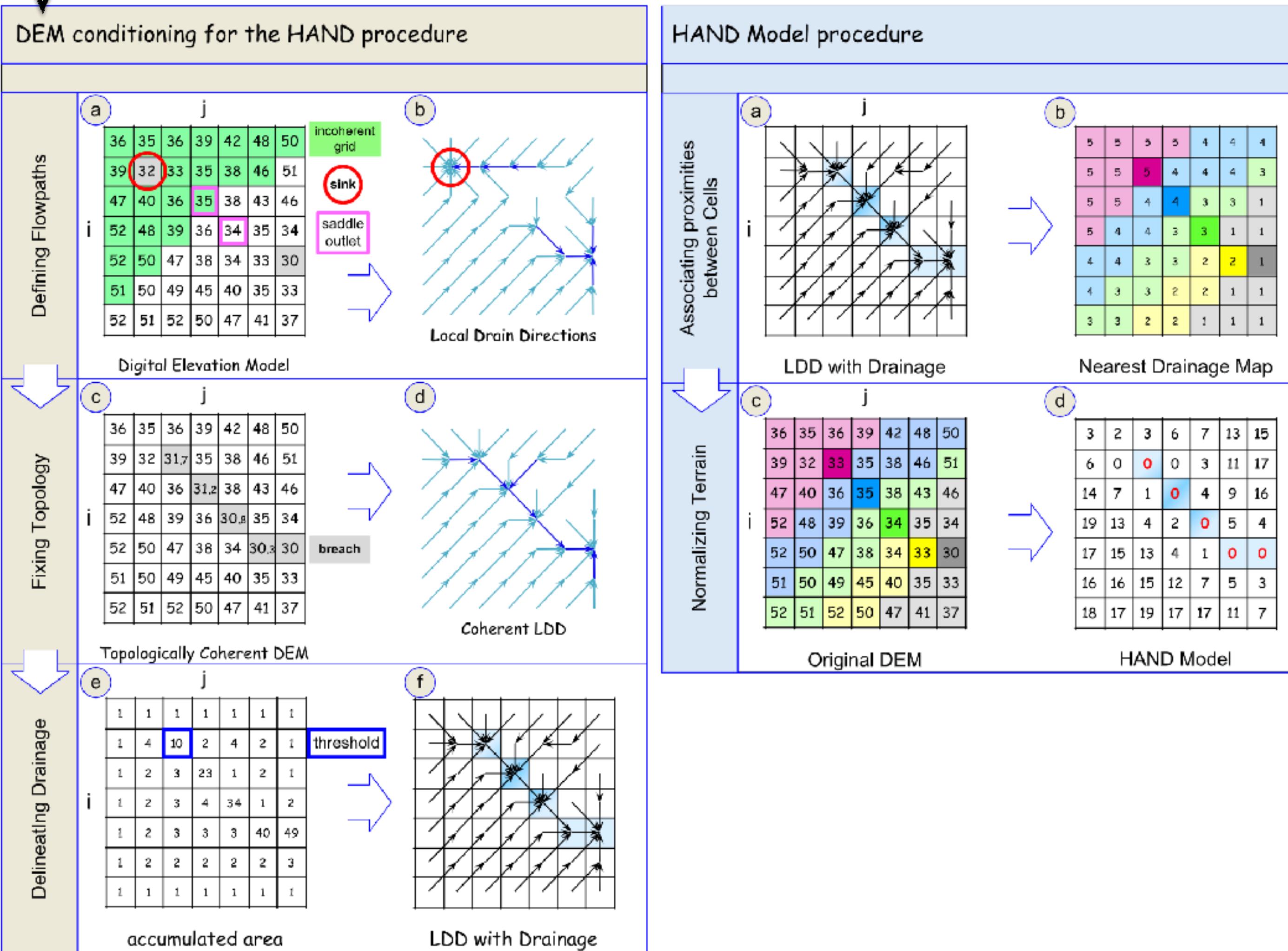
$$TWI = \ln\left(\frac{\alpha}{\tan(\beta)}\right)$$

- Erweiterung um hydraulische Leitfähigkeit ( $k_s$ ) und Mächtigkeit ( $z_s$ ) des Bodens

$$STI = \ln\left(\frac{\alpha}{k_s z_s \tan(\beta)}\right)$$

# Räumliche Struktur

## Digital Elevation Model

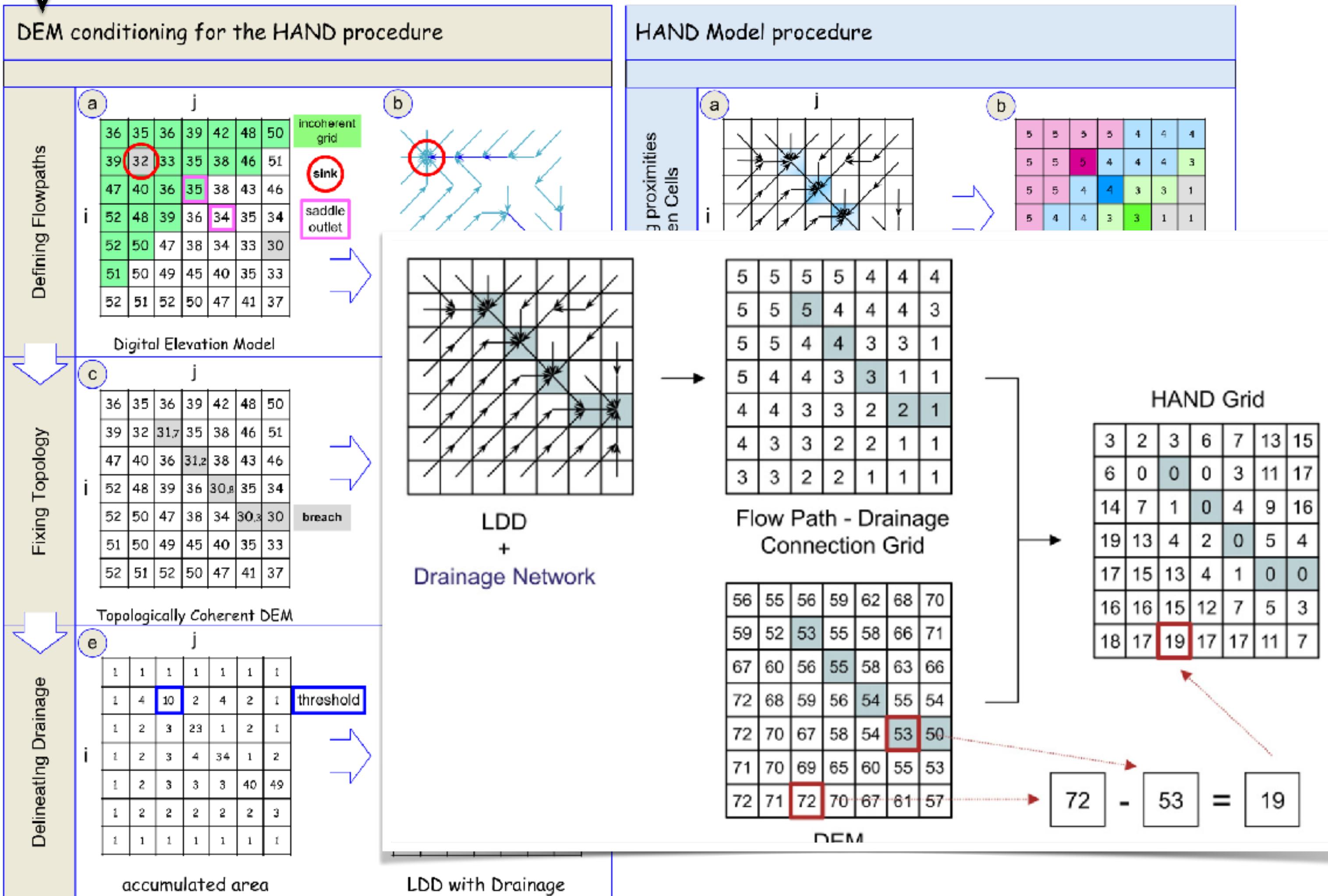


height above the nearest drainage index (HAND)

- Korrektur des DEM
- Finden der drainierenden Gewässerzelle
- Höhenunterschied berechnen

# Räumliche Struktur

## Digital Elevation Model

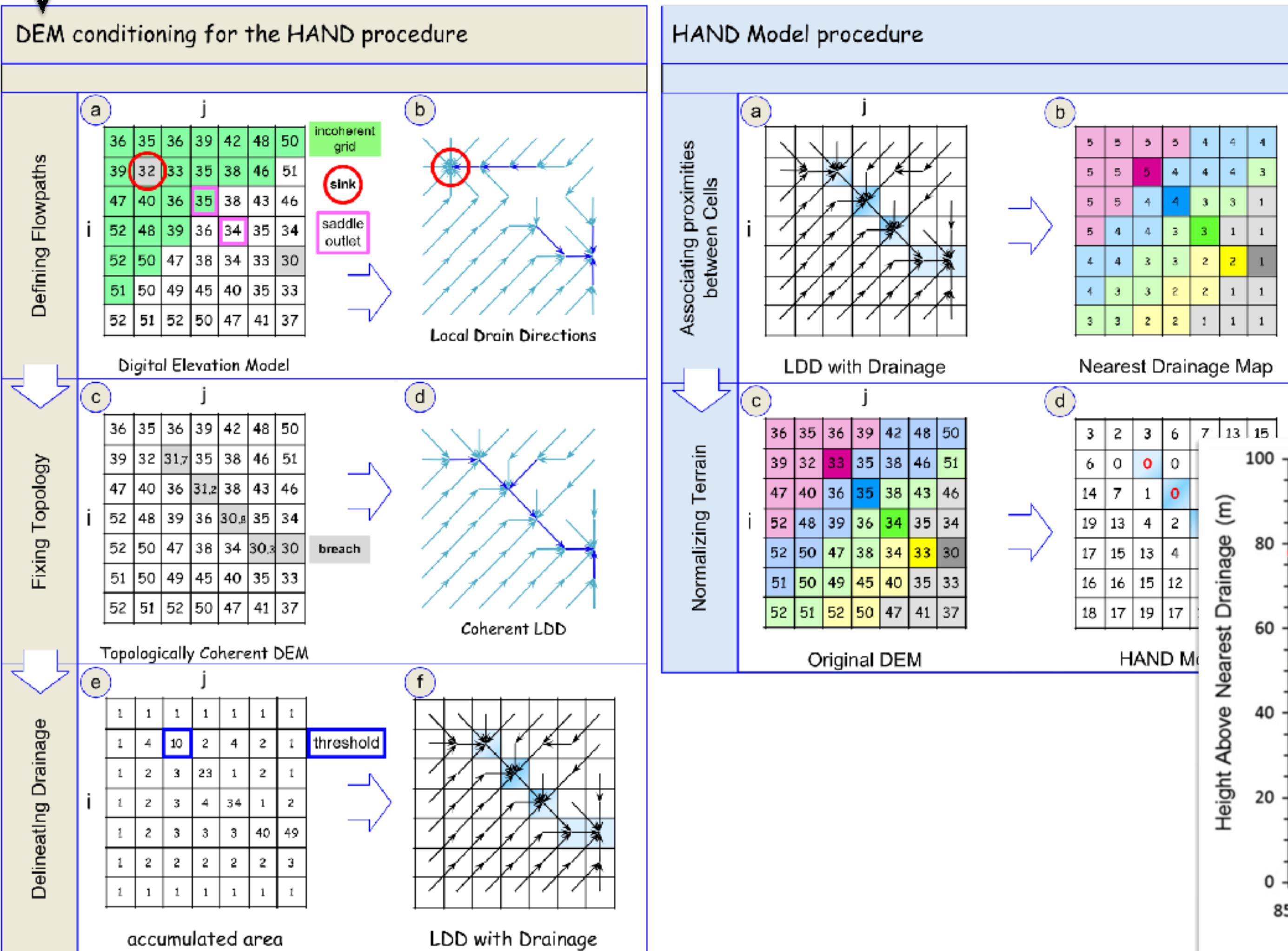


height above the nearest drainage index (HAND)

- Korrektur des DEM
- Finden der drainierenden Gewässerzelle
- Höhenunterschied berechnen

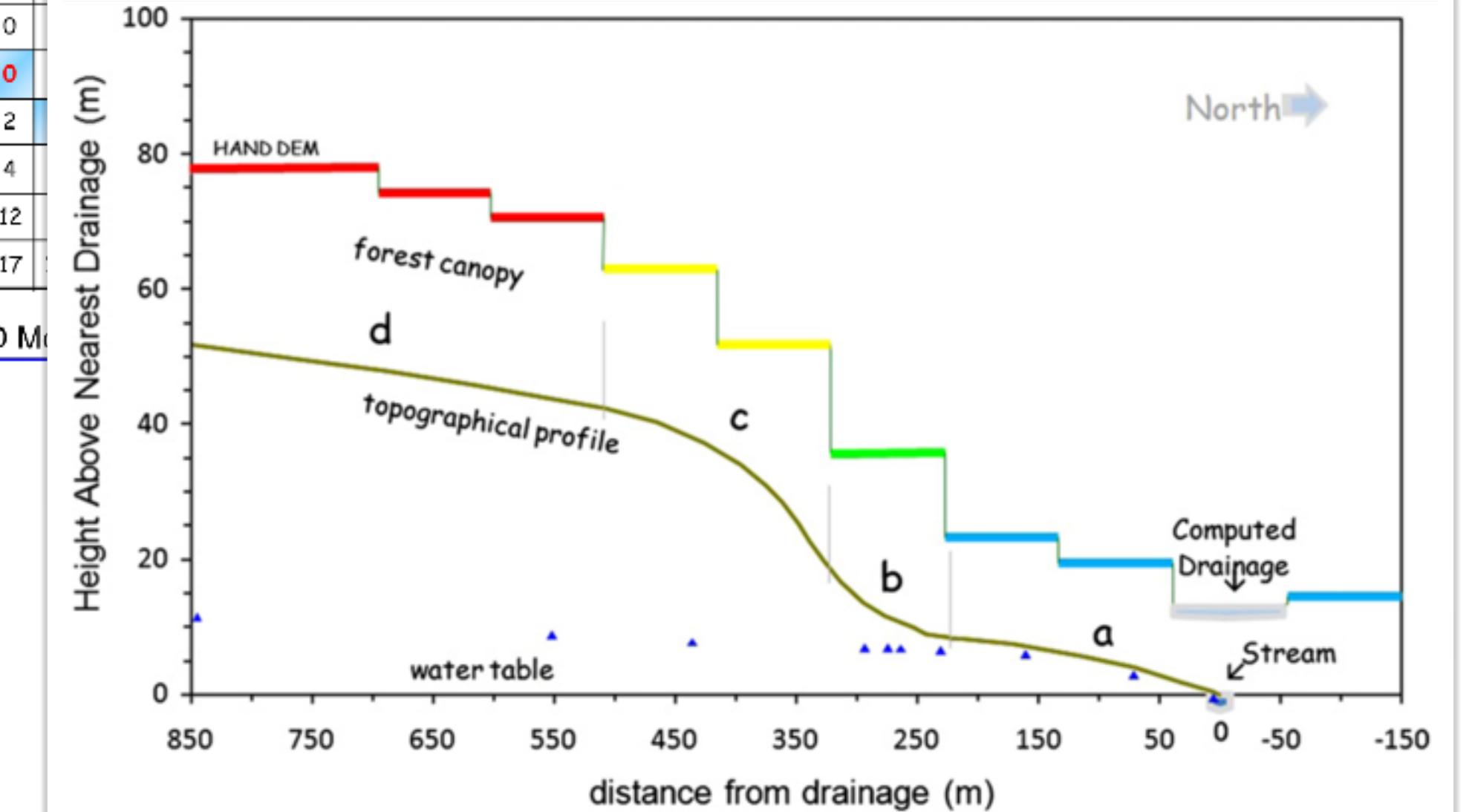
# Räumliche Struktur

## Digital Elevation Model



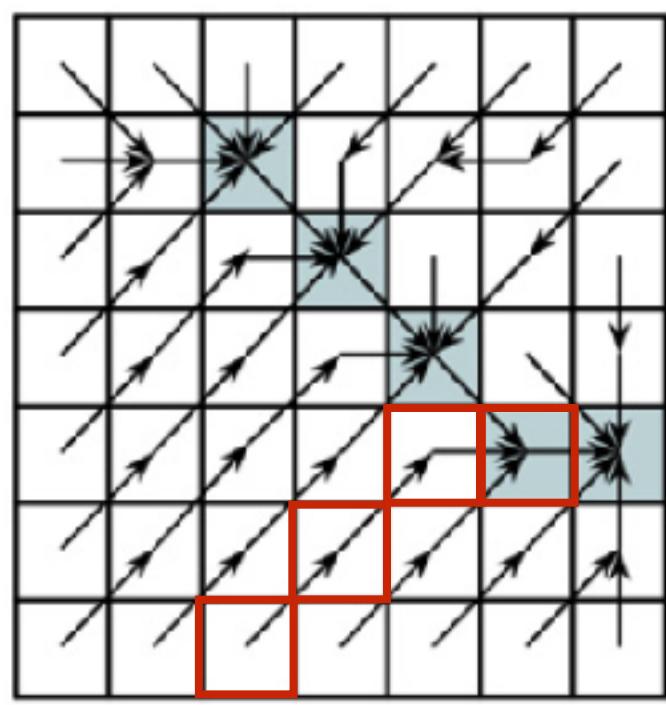
height above the nearest drainage index (HAND)

- Korrektur des DEM
- Finden der drainierenden Gewässerzelle
- Höhenunterschied



# Räumliche Struktur

reduced dissipation per unit length index (rDUNE)



$l_i$  = Abflusslänge

3	2	3	6	7	13	15
6	0	0	0	3	11	17
14	7	1	0	4	9	16
19	13	4	2	0	5	4
17	15	13	4	1	0	0
16	16	15	12	7	5	3
18	17	19	17	17	11	7

$h_i$  = HAND

$$\frac{D_i}{l_i} = P_i A_i \rho g \frac{h_i}{l_i}$$

- Grundlage ist die Energiebilanz:  $E_{\text{pot}}$  muss über die Strecke  $l_i$  umgewandelt werden
- Niederschlag als Fluss von  $E_{\text{pot}} \rightarrow J_{\text{pot}}$
- $J_{\text{pot},i} = P_i A_i \rho g h_i$
- Massefluss ist aber keine Information des DEM  $\rightarrow$  Normierungsquotient

$$\text{DUNE} = \frac{h_i}{l_i}$$

- Logarithmus um Fallunterscheidung steil/flach zu vereinfachen

$$r\text{DUNE} = -\ln\left(\frac{h_i}{l_i}\right)$$

# Räumliche Struktur

## Vergleich der topographischen Indizes

### Beispiel

- verschiedene EZG
- verschiedene Dynamik
- TWI, HAND, DUNE

