



Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

TU BERGAKADEMIE
FREIBERG



Zusammenfassung 14

Grundlagen der Hydrologie

Primer in Hydrology

Klausur

10.03.2023 13:00 Audimax



alle Unterlagen sind im GitHub: <https://github.com/cojacoo/hydroX>
3 A4 Blätter beliebig beschrieben/bedruckt sind erlaubt.

Struktur der Vorlesung

hydrolog.
Konzepte

Niederschlag

Boden- und
Grundwasser

Verdunstung

Abfluss-
bildung

hydrolog.
Extreme

Öko-
hydrologie

Wassermanagement
& Bewässerung

Niederschlag-
Abfluss-Modelle

Landschafts-
indizes

Risiko-
bemessung

Isotopen-
hydrologie

Gradienten →
Prozesse

Skalen &
Skalentransfer

Limnologie

Komplexe hydrologische Interaktionen
unter nicht-stationären Randbedingungen

Themen der Übung

Subtitle

**Wasserbilanz
Einzugsgebiete**

**Flow duration curve
Direktabfluss**

**Bodenfeuchte
Retention**

**Speicherbewirtschaftung
Hydrologische Modellierung**

**Infiltration
Abflussbildung**

**Extrema
Hochwasserschutz**

**Niederschlag
Verdunstung**

**Überblick über
Einzugsgebietseigenschaften**

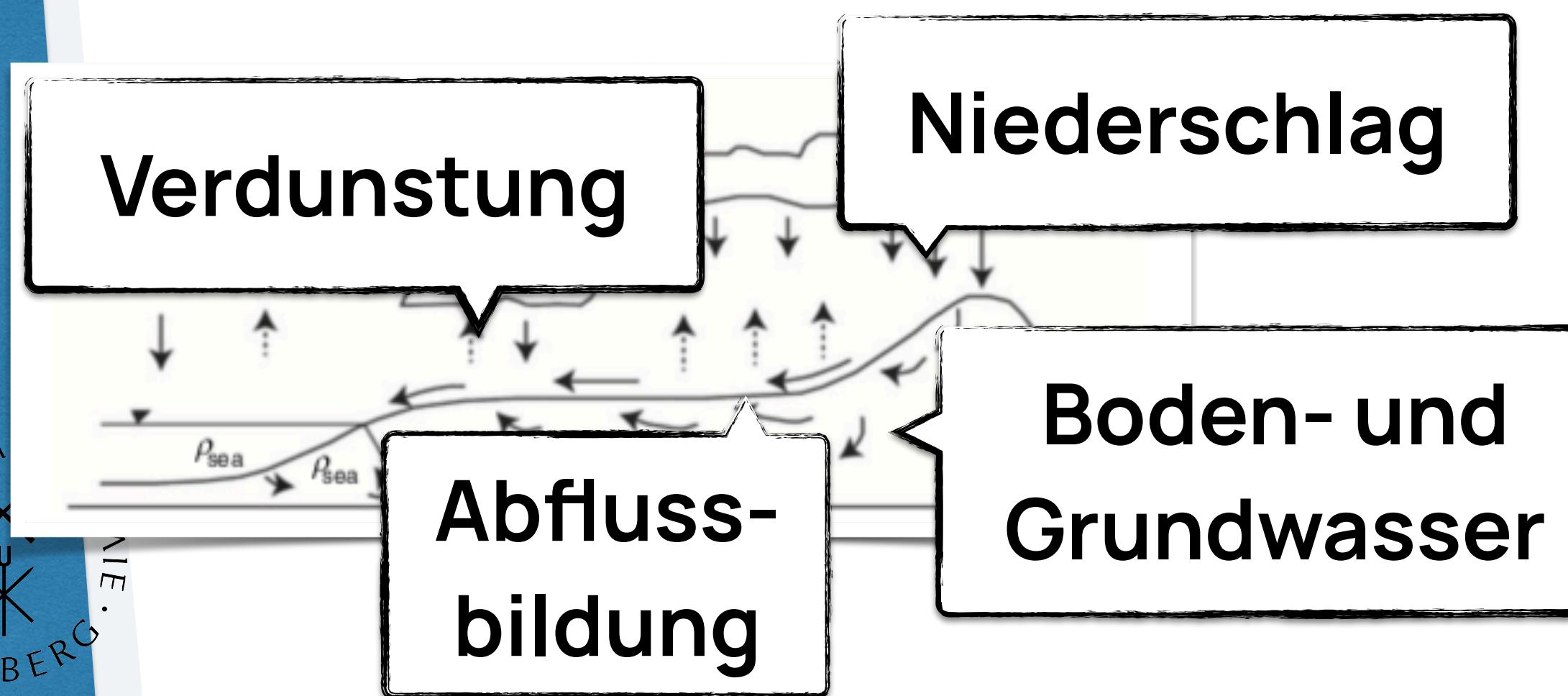
Body Level One
· Body Level Two
· Body Level Three

Wasserkreislauf, -bilanz & Einzugsgebiet

Zentrales Konzept der Hydrologie zur Bilanz und Normierung

Wasserkreislauf

- Massenbilanz
- verschiedene Speicher
- verschiedene Pfade
- verschiedene Verweilzeiten

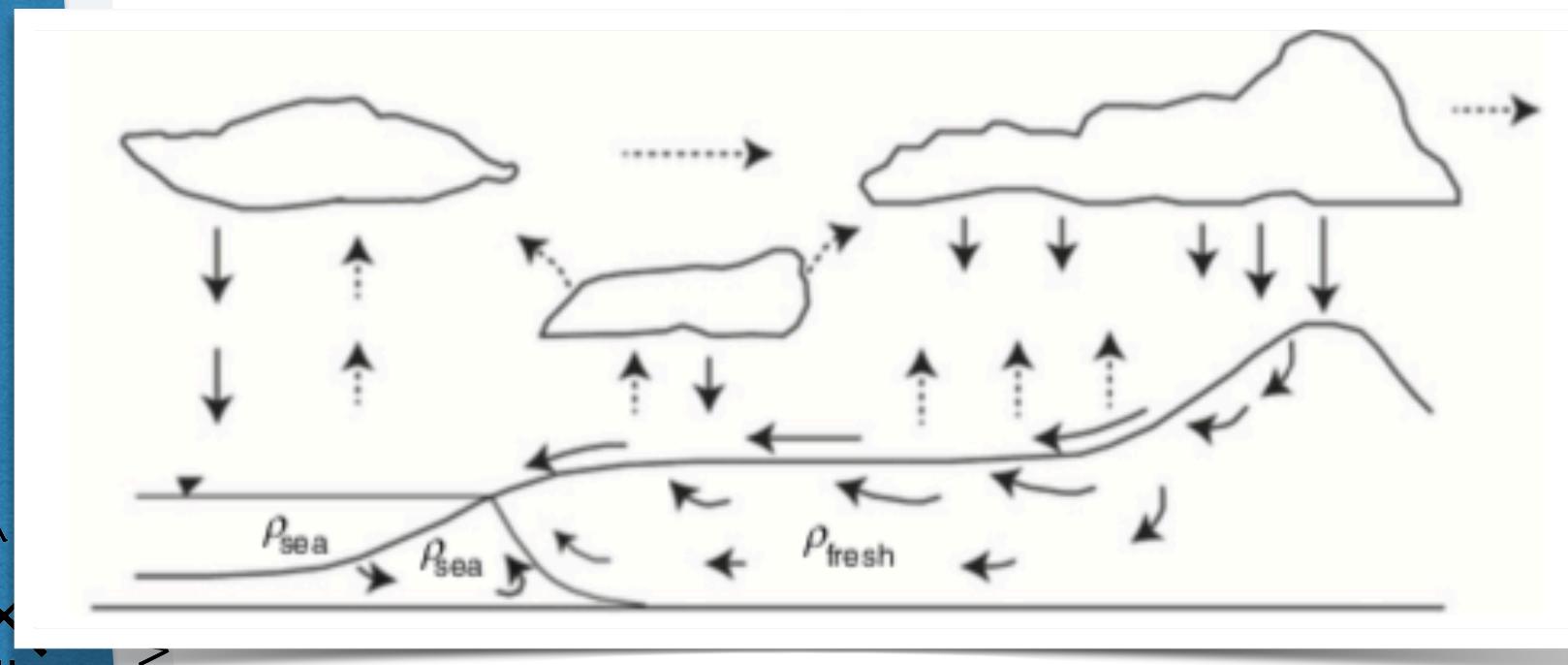


Wasserkreislauf, -bilanz & Einzugsgebiet

Zentrales Konzept der Hydrologie zur Bilanz und Normierung

Wasserkreislauf

- Massenbilanz
- verschiedene Speicher
- verschiedene Pfade
- verschiedene Verweilzeiten



Wasserbilanz

- Massenbilanz

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

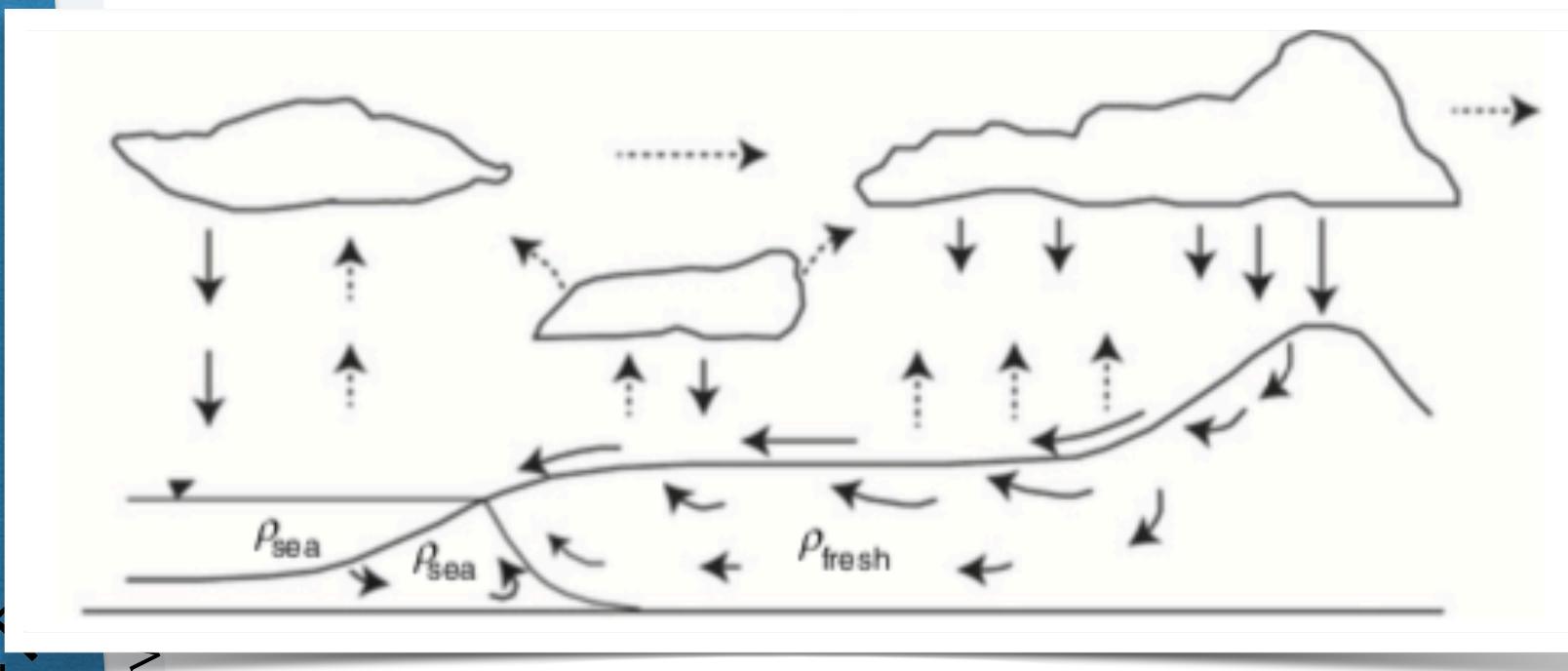
- ΔS :: Speicheränderung
- P :: Niederschlag
- Q :: Abfluss
- ET :: Verdunstung

Wasserkreislauf, -bilanz & Einzugsgebiet

Zentrales Konzept der Hydrologie zur Bilanz und Normierung

Wasserkreislauf

- Massenbilanz
- verschiedene Speicher
- verschiedene Pfade
- verschiedene Verweilzeiten



Wasserbilanz

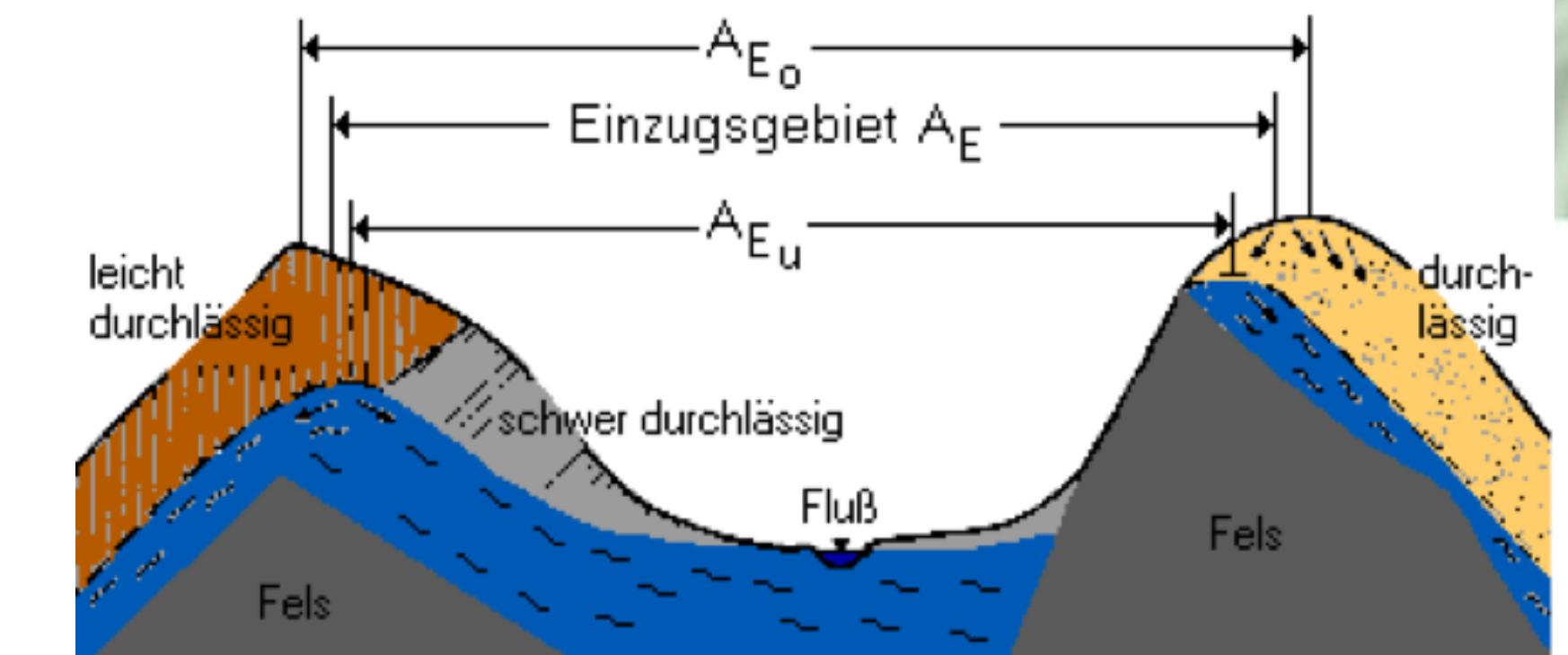
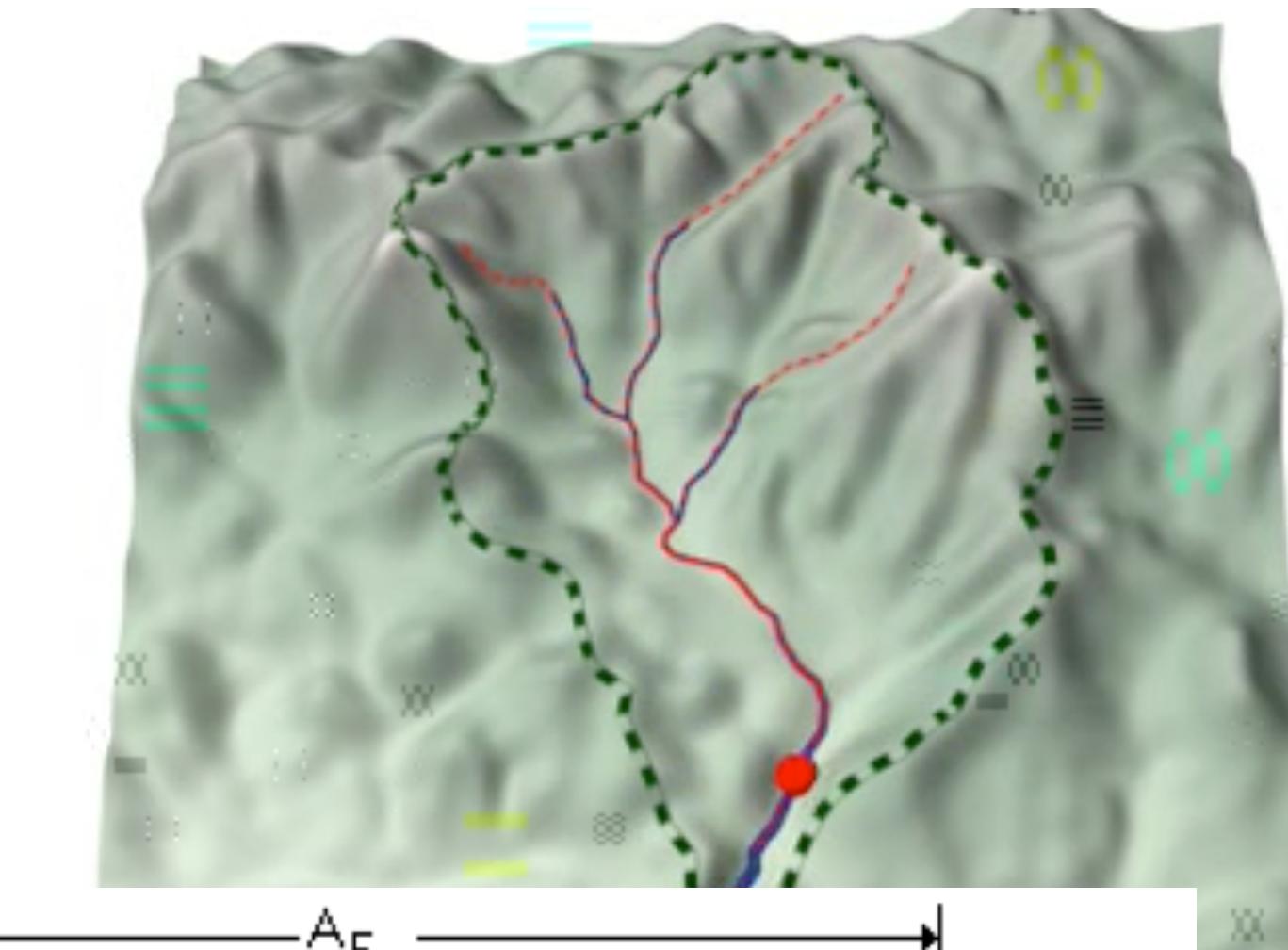
- Massenbilanz

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

- ΔS :: Speicheränderung
- P :: Niederschlag
- Q :: Abfluss
- ET :: Verdunstung

Einzugsgebiet

- Referenzfläche



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

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

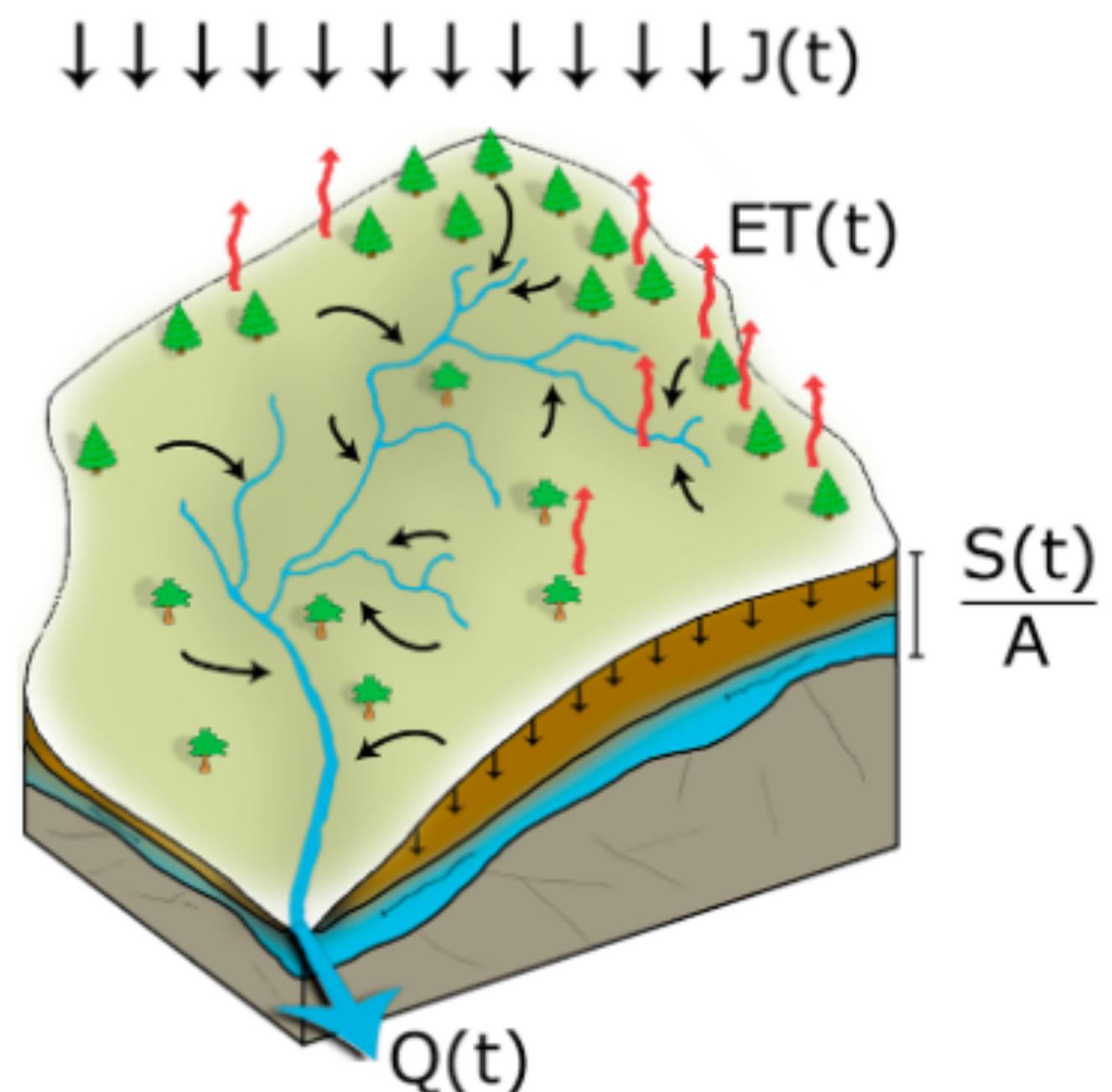
Bilanzen

Wasser, Energie, Stoff-Masse, etc.

Massenbilanz

- $C_K = m_K / V_{sw}$

Bsp. Kontamination



Energiebilanz

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

Beispiel Strahlung

Wasserbilanz

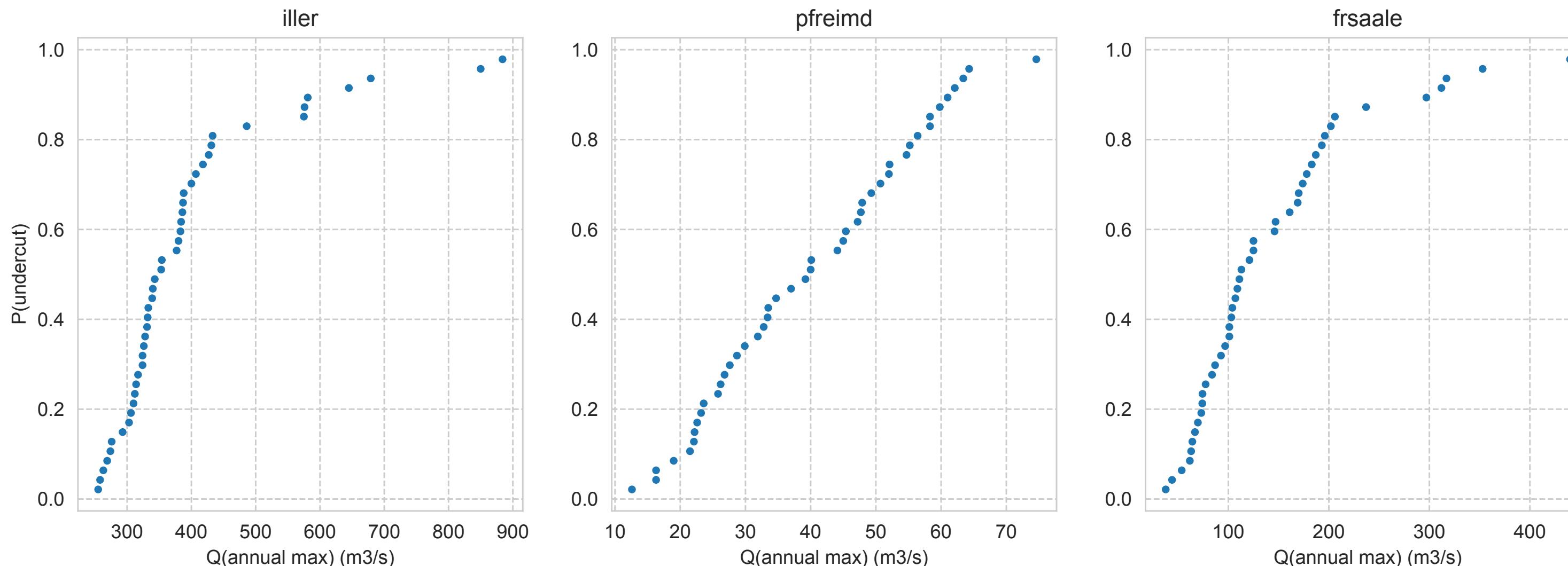
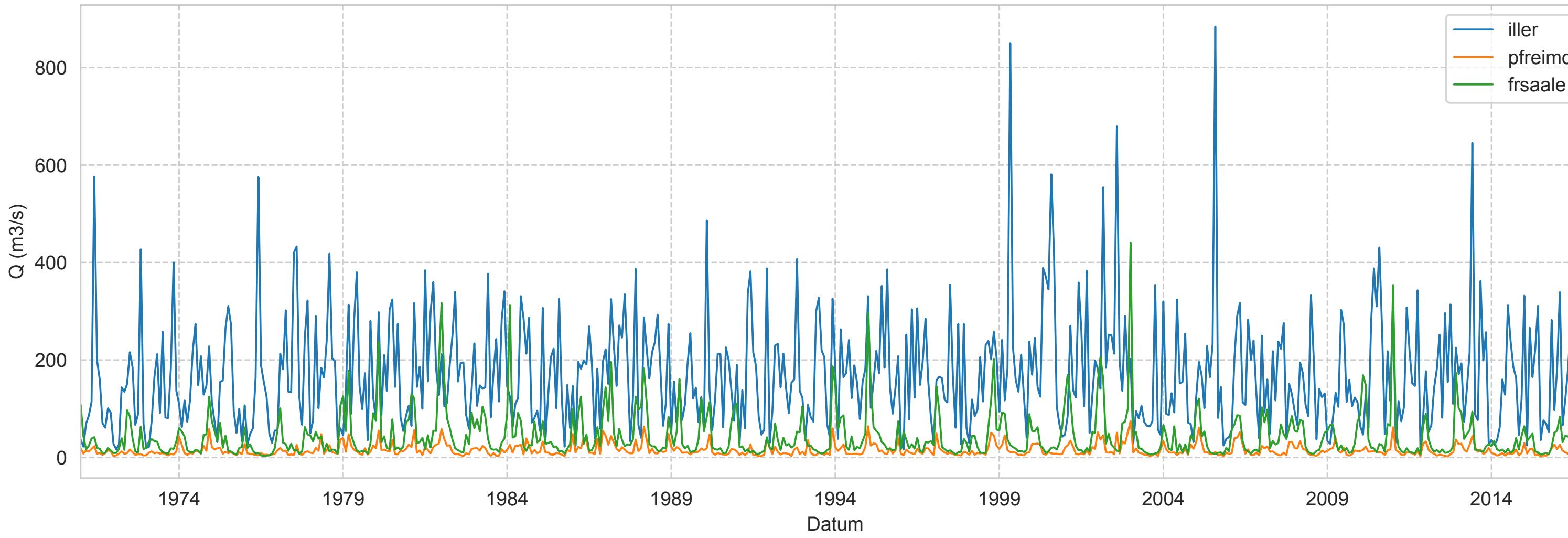
- $P - Q - ET = \Delta S_W$

• kann für beliebige

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

Extremwasserstatistik

experimentelle Unter/Überschreitungs-Wahrscheinlichkeiten

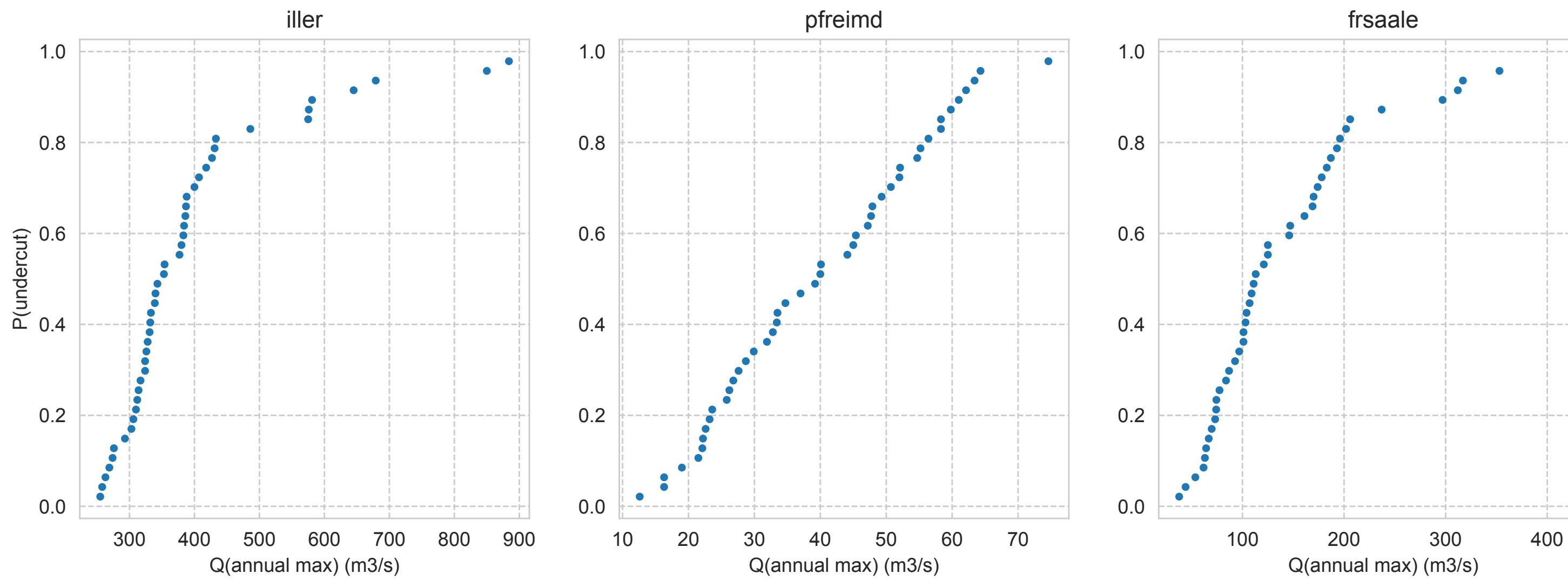


Bsp. monatliche Maxima
Bayrischer Pegel

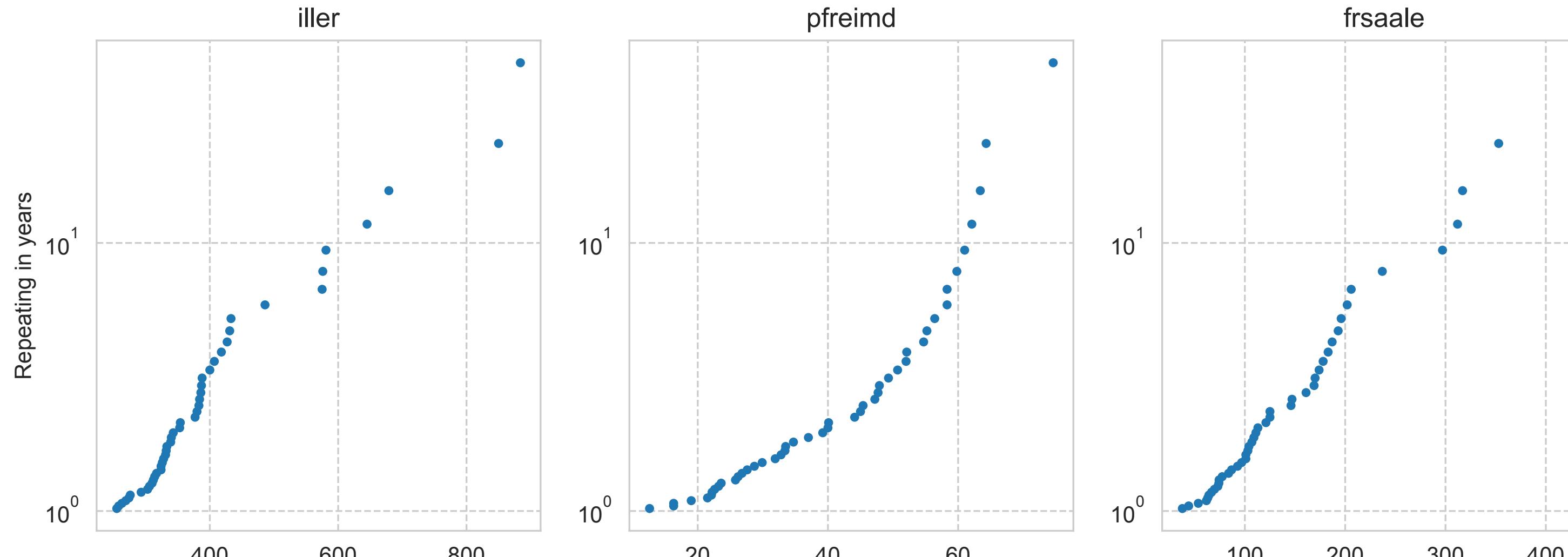
- Zeitreihe wird aggregiert (zB. Jahre, Maximum)
- wieder: Rangstatistik aller Werte → Achsen der FDC vertauscht, $P_{\text{Unterschreitung}}$
- $P_{\text{un}} = 1 - P_{\text{ex}} = (N-n)/(N+1)$
- auch Jährliche Serie oder “plotting positions”

Extremwasserstatistik

experimentelle Unter/Überschreitungs-Wahrscheinlichkeiten



- wieder: Rangstatistik aller Werte → Achsen der FDC vertauscht, $P_{\text{Unterschreitung}}$
- $P_{\text{un}} = 1 - P_{\text{ex}} = (N-n)/(N+1)$
- auch Jährliche Serie oder “plotting positions”



- Jährlichkeit wenn Daten als Jahresmaxima:
 $T_n = 1/(1-P_{\text{un}})$

Die Syntheseblätter

Überblick für jedes der EZG

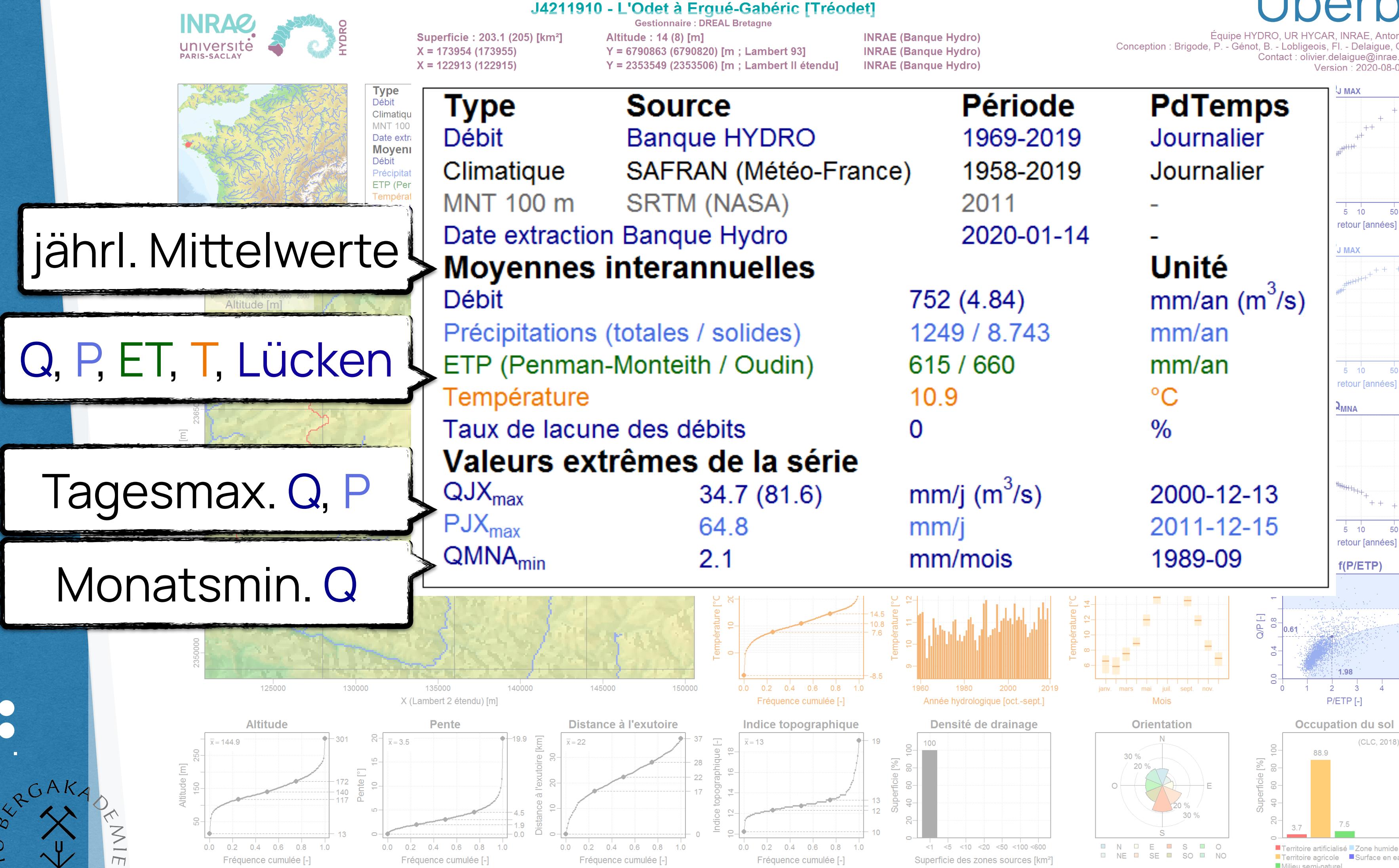


Superficie : 203.1 (205) [km ²]	Gestionnaire : DREAL Bretagne
X = 173954 (173955)	
X = 122913 (122915)	
Altitude : 14 (8) [m]	
Y = 6790863 (6790820) [m ; Lambert 93]	
Y = 2353549 (2353506) [m ; Lambert II étendu]	
Type	Source
Débit	Banque HYDRO
Climatique	SAFRAN (Météo-France)
MNT 100 m	SRTM (NASA)
Date extraction Banque Hydro	
Moyennes interannuelles	
Débit	Période
Précipitations (totales / solides)	1969-2019
ETP (Penman-Monteith / Oudin)	1958-2019
Température	2011
Taux de lacune des débits	2020-01-14
Valeurs extrêmes de la série	
QJX _{max}	752 (4.84)
PJX _{max}	1249 / 8.743
QMNA _{min}	615 / 660
	10.9
	0
	mm/j (m ³ /s)
	mm/j
	mm/mois
	2000-12-13
	2011-12-15
	1989-09

Gestionnaire : DREAL Bretagne

Die Syntheseblätter

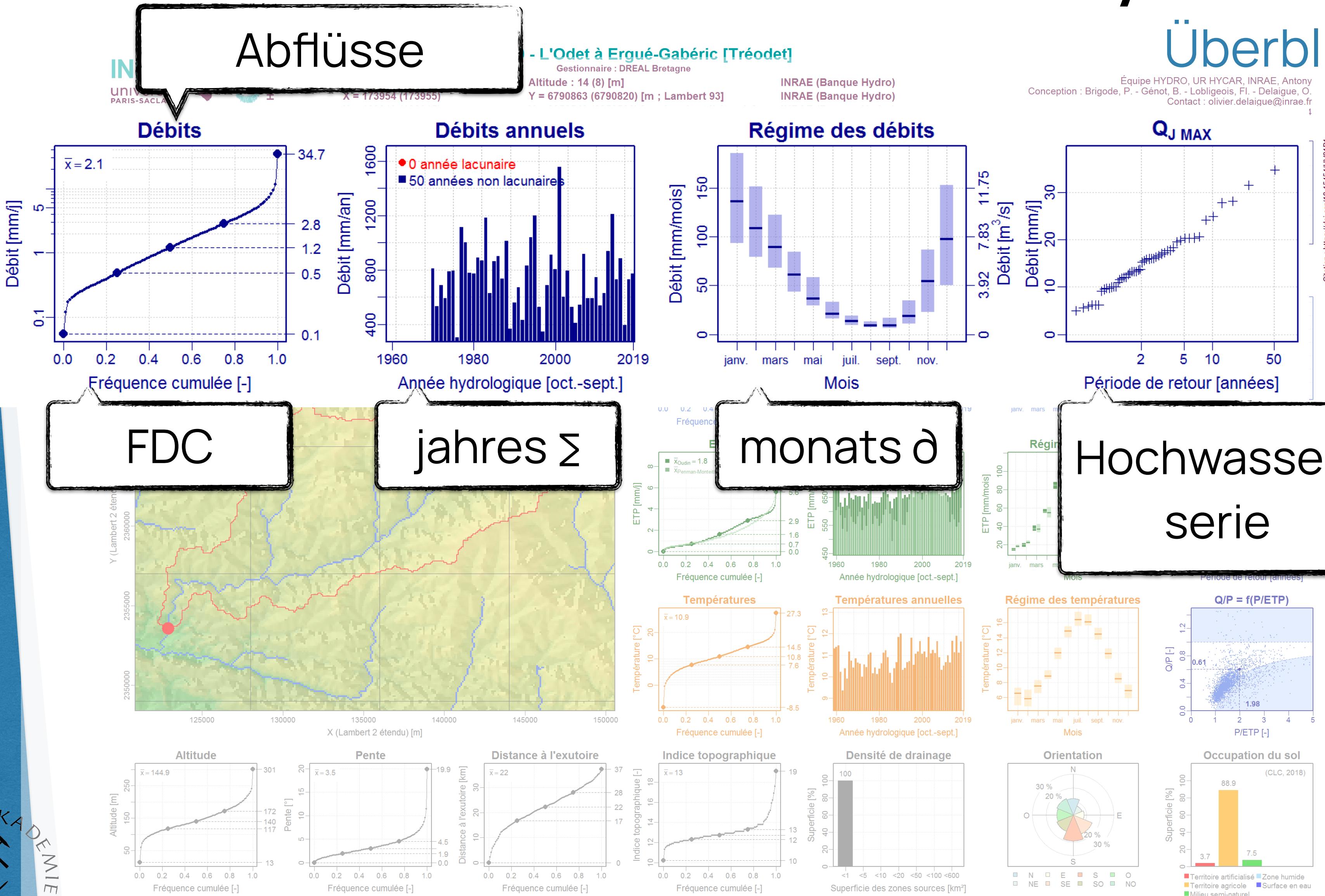
Überblick für jedes der EZG



- Lage/Karte
 - Zusammenfassung
 - Abfluss
 - Niederschlag
 - Verdunstung
 - Temperatur
 - Topographie

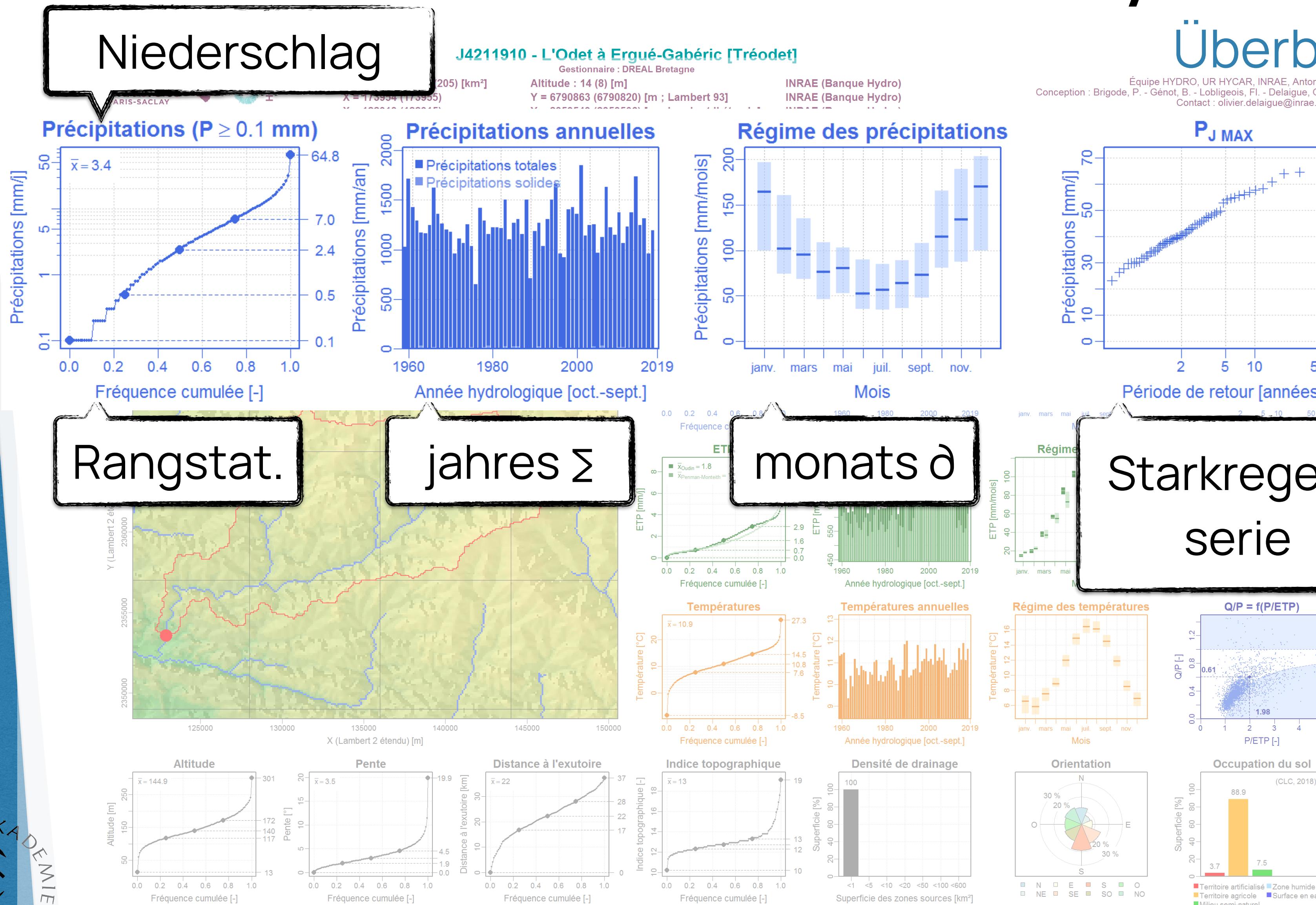
Die Syntheseblätter

Überblick für jedes der EZG



Die Syntheseblätter

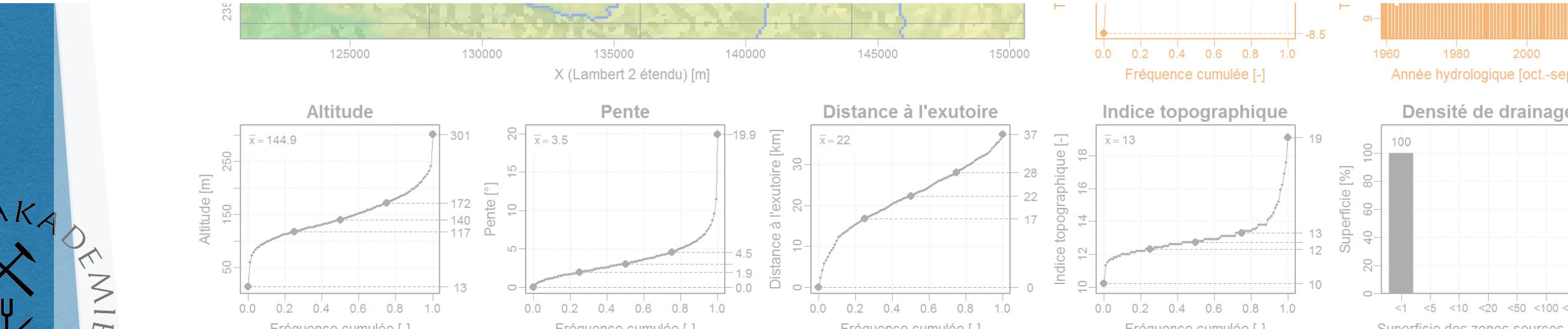
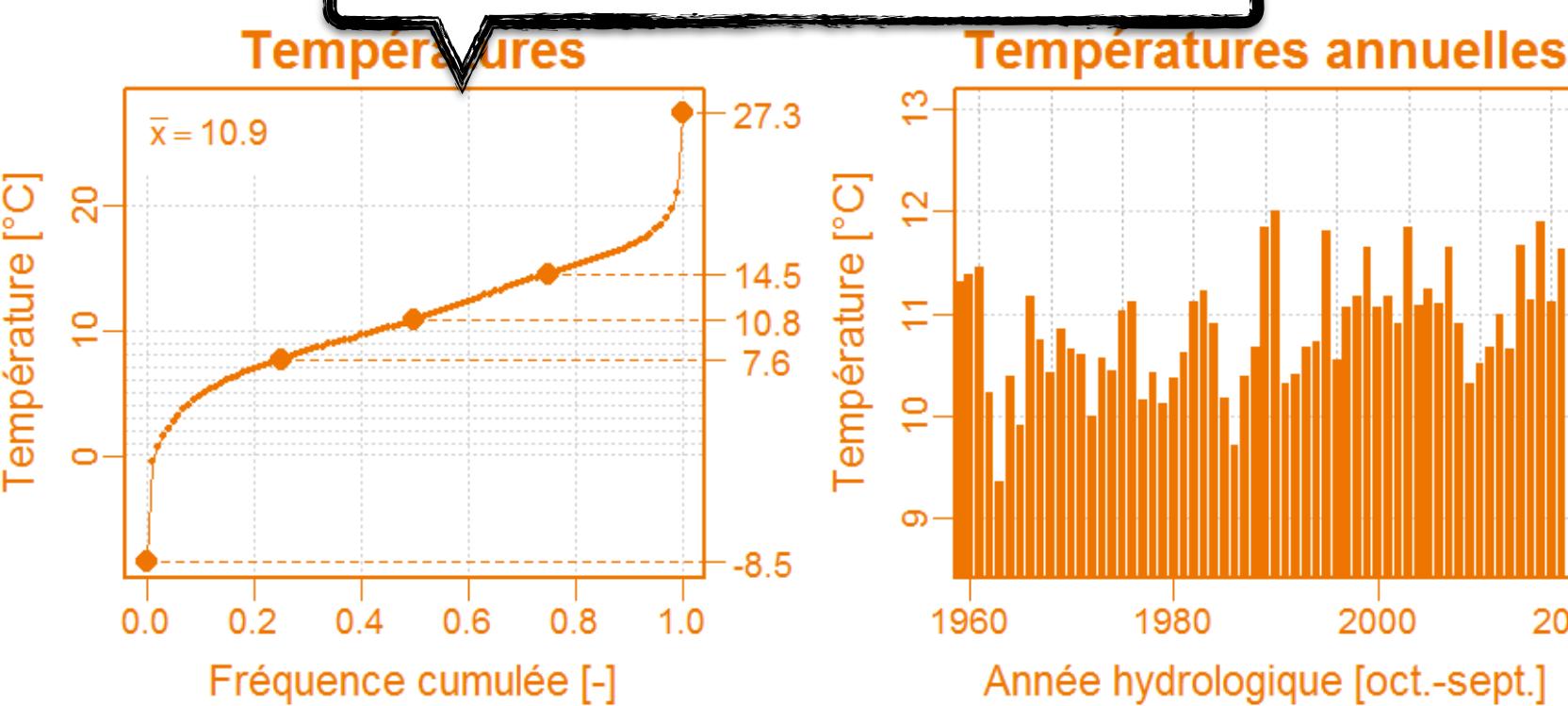
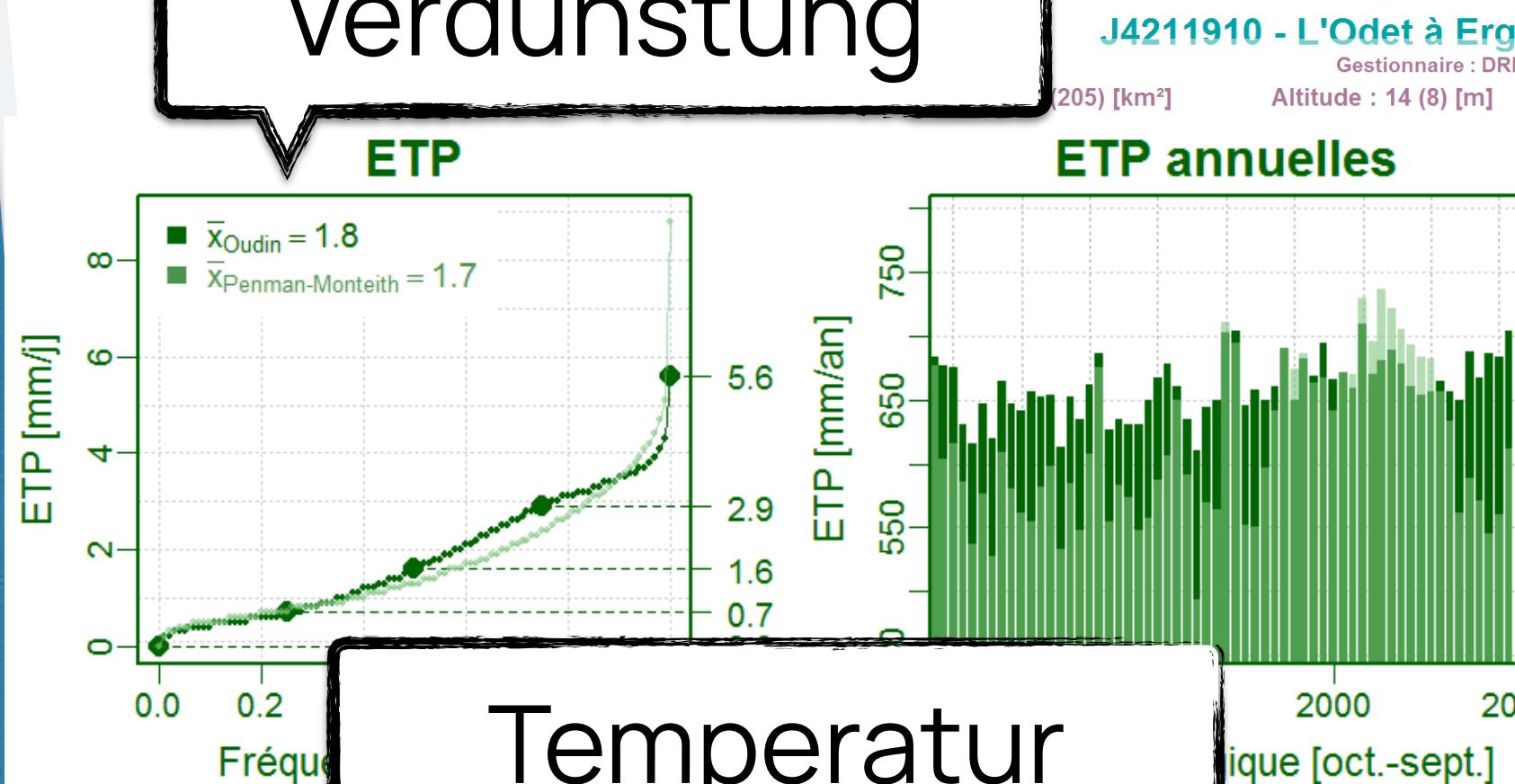
Überblick für jedes der EZG



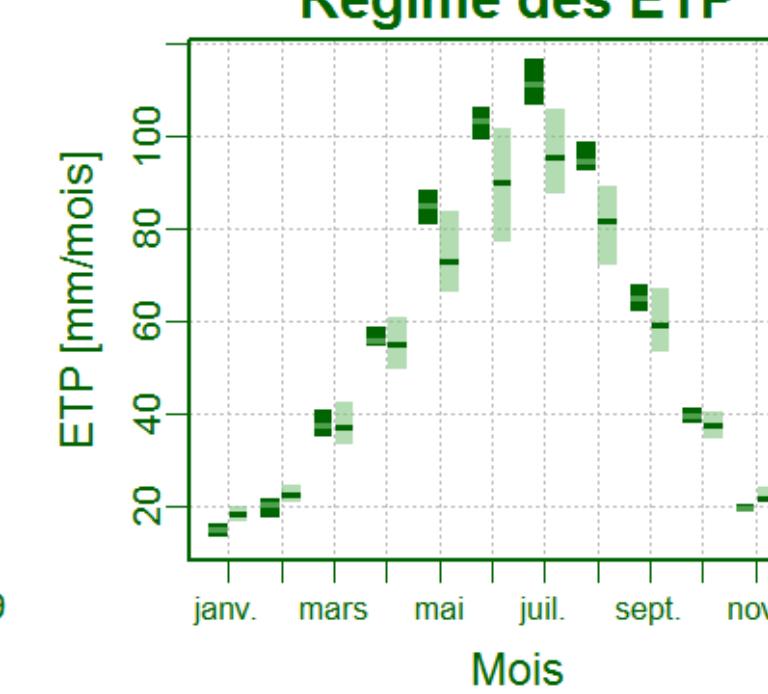
Die Syntheseblätter

Überblick für jedes der EZG

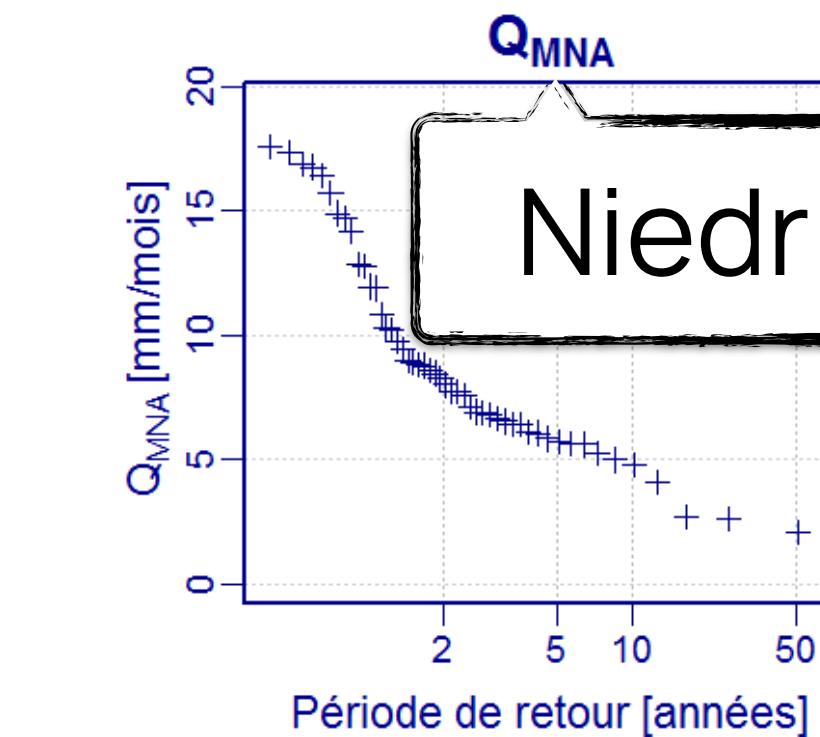
Verdunstung



Régime des ETP



Équipe HYDRO, UR HYCAR, INRAE, Antony
Coordonnées : Delaïda D, Cédric D, Fabrice D, Delphine G



Niedrigwasser

Warte

- Zusammenfassung

- Abfluss

- Niederschlag

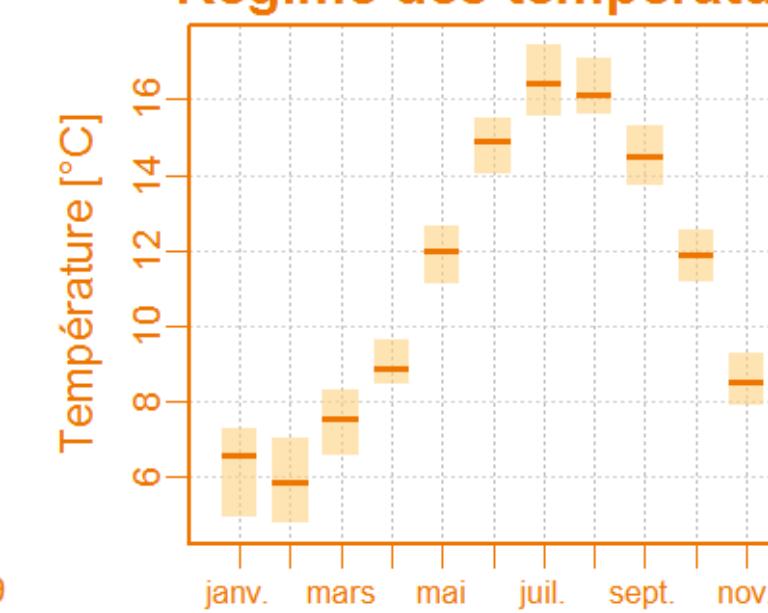
- Verdunstung

- Temperatur

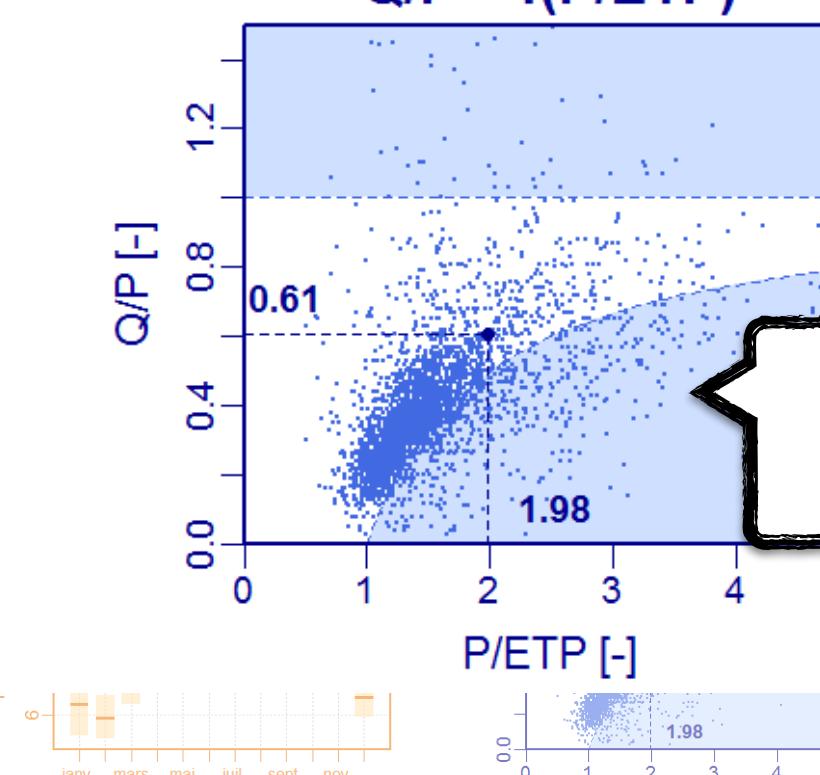
Budyko

graphie

Régime des températures



$Q/P = f(P/ETP)$



Die Syntheseblätter

Überblick für jedes der EZG



J4211910 - L'Odet à Ergué-Gabéric [Tréodet]

Gestionnaire : DREAL Bretagne

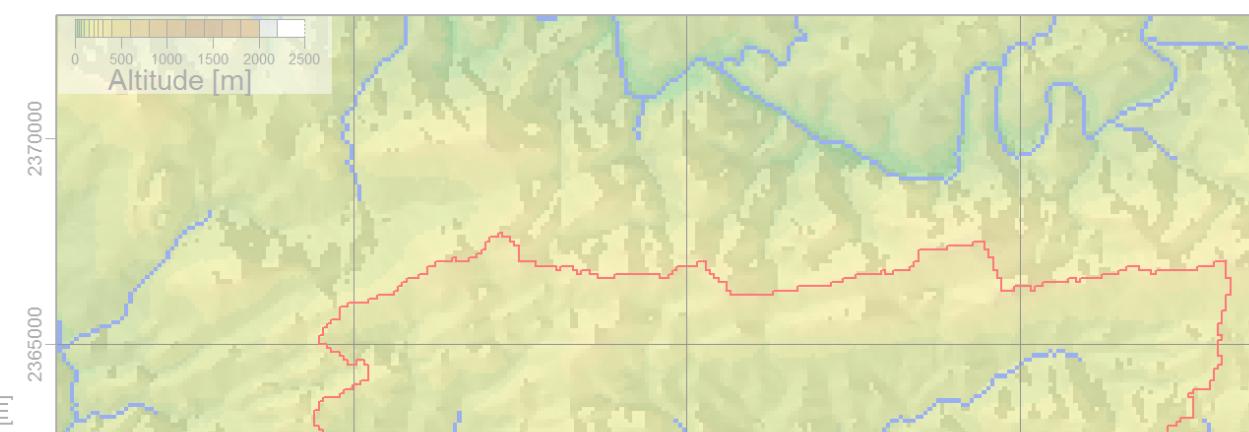
Superficie : 203.1 (205) [km²]
X = 173954 (173955)
Y = 122913 (122915)

Altitude : 14 (8) [m]
Y = 6790863 (6790820) [m ; Lambert 93]
Y = 2353549 (2353506) [m ; Lambert II étendu]

INRAE (Banque Hydro)
INRAE (Banque Hydro)
INRAE (Banque Hydro)



Type	Source	Période	PdTemps	Débit
Débit	Banque HYDRO	1969-2019	Journalier	
Climatique	SAFRAN (Météo-France)	1958-2019		
MNT 100 m	SRTM (NASA)	2011		
Date extraction Banque Hydro		2020-01-14	-	
Moyennes interannuelles				
Débit				752 (4.84)
Précipitations (totales / solides)				1249 / 8.743
ETP (Penman-Monteith / Oudin)				615 / 660
Température				10.9
Taux de lacune des débits				0
Valeurs extrêmes de la série				
QJX _{max}		2000-12-13	mm/j (m ³ /s)	34.7 (81.6)
PJX _{max}		2011-12-15	mm/j	64.8
QMNA _{min}		1989-09	mm/mois	2.1



topogr.
Höhen

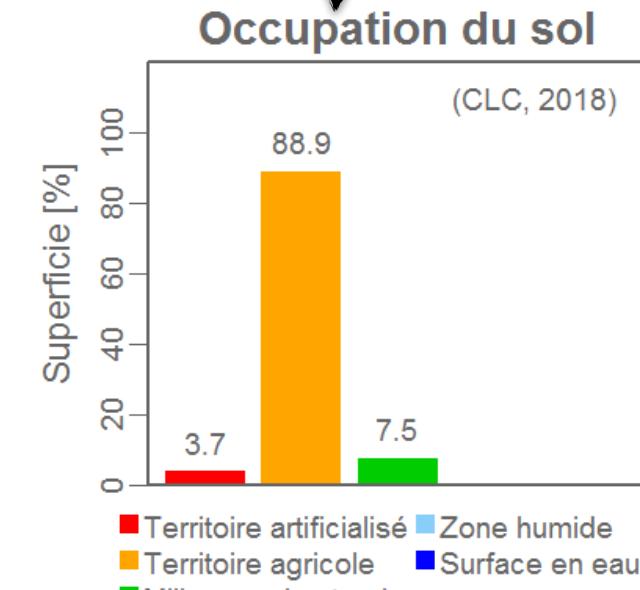
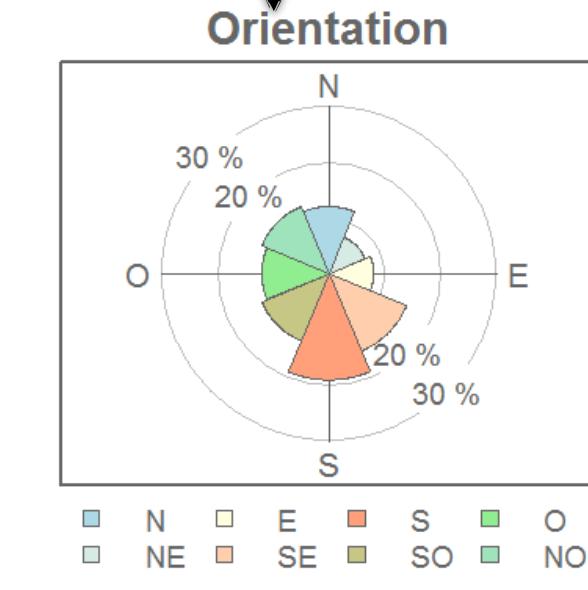
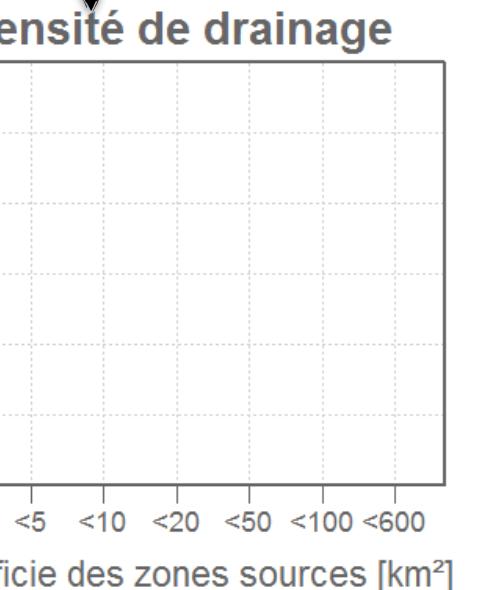
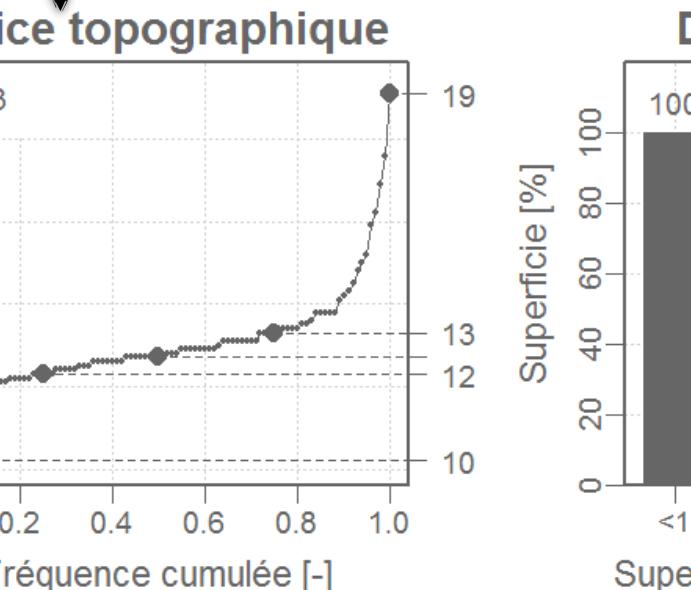
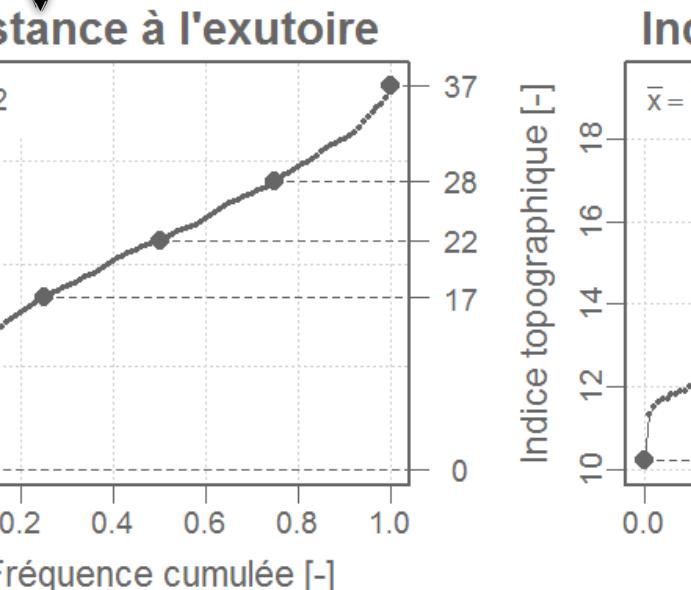
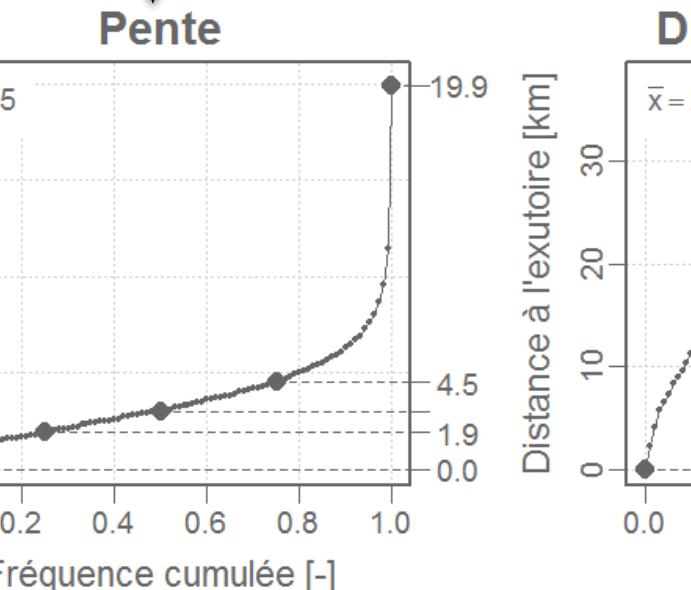
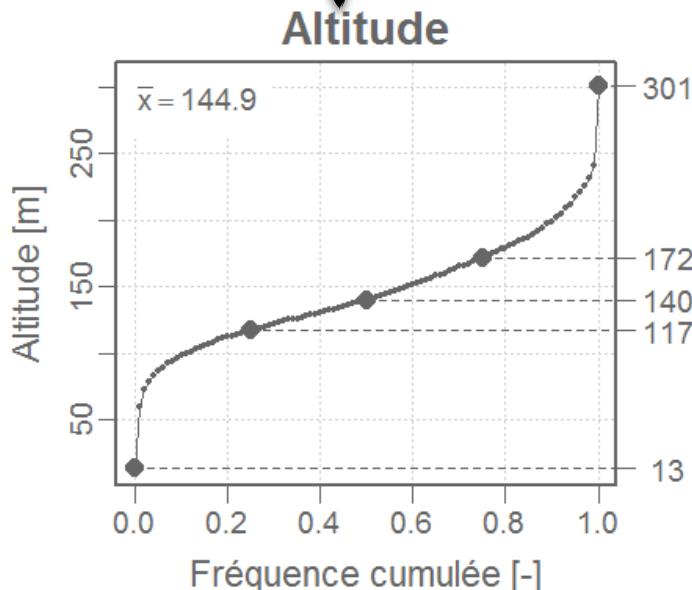
Hang-
neigung

Entfernung
zu Pegel

Topogr.
Wetness I

Dichte d.
Gericke

Land-
nutzung



Hintergrund (fr): https://webgr.inrae.fr/wp-content/uploads/2020/05/BDD_HydroClim_Manuel.pdf

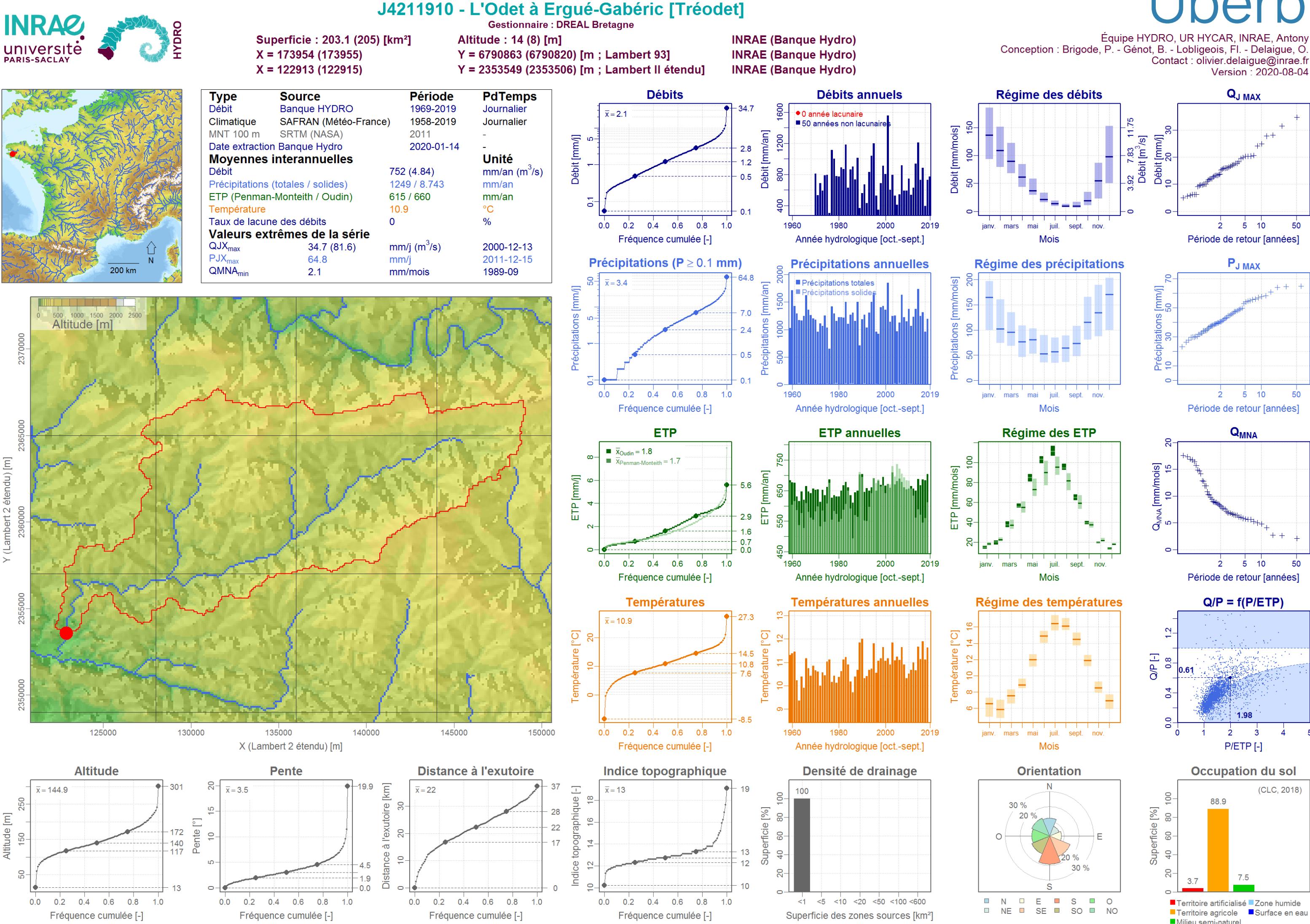
- Lage/Karte
- Zusammenfassung
- Abfluss
- Niederschlag
- Verdunstung

- Exposition

- Landnutzung

Die Syntheseseblätter

Überblick für jedes der EZG

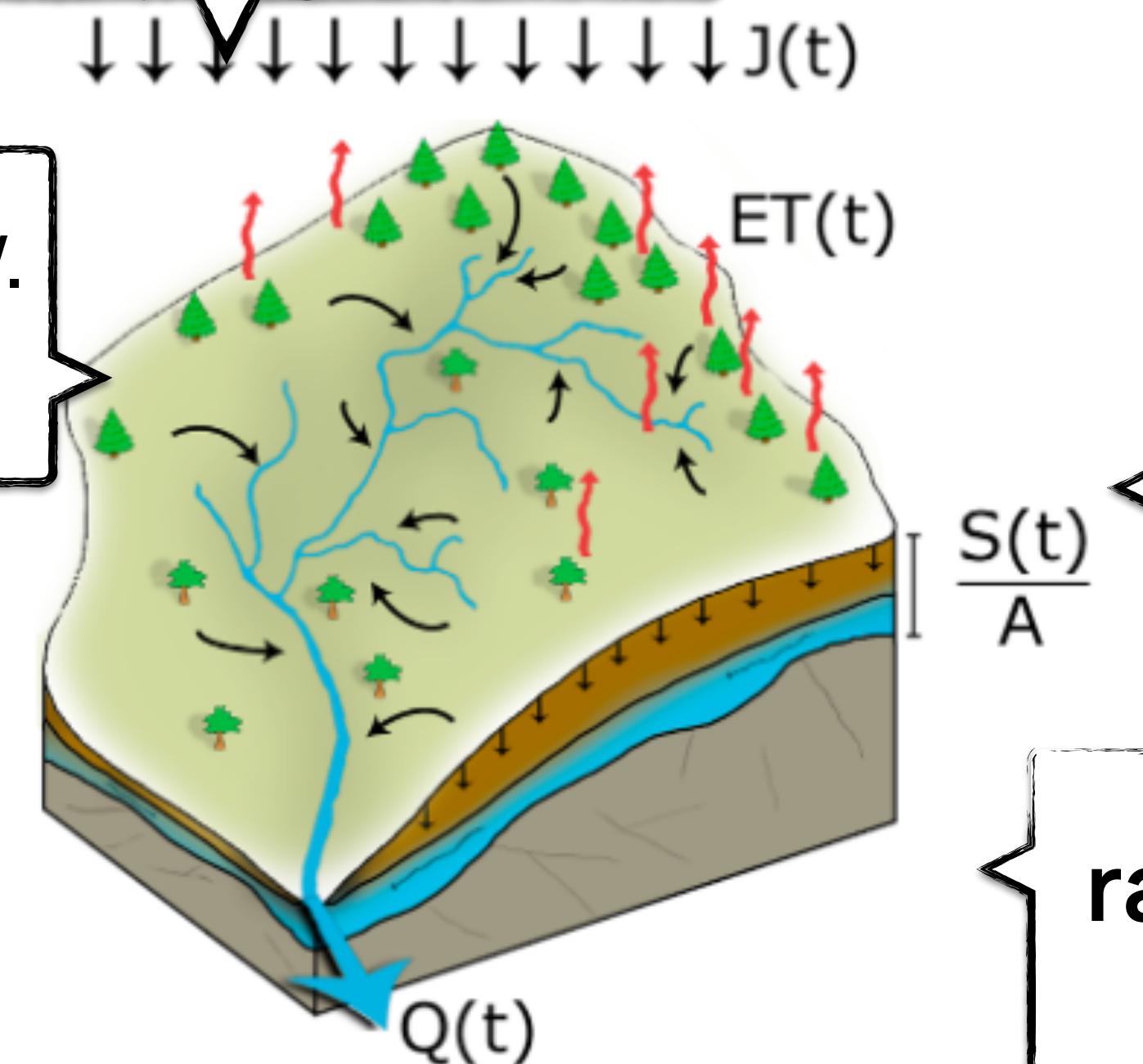


- Lage/Karte
 - Zusammenfassung
 - Abfluss
 - Niederschlag
 - Verdunstung
 - Temperatur
 - Topographie

Verbinden der Prozesse

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

Topographie bzw. Höhenmodell



Niederschlag-Abfluss-Dynamik

Bilanzen

Normierung

Verweilzeiten & Transit Times

raum-/zeitliche Korrelation

Indizes

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

Abbau von Gradienten treibt die Dynamik an:

Fluss

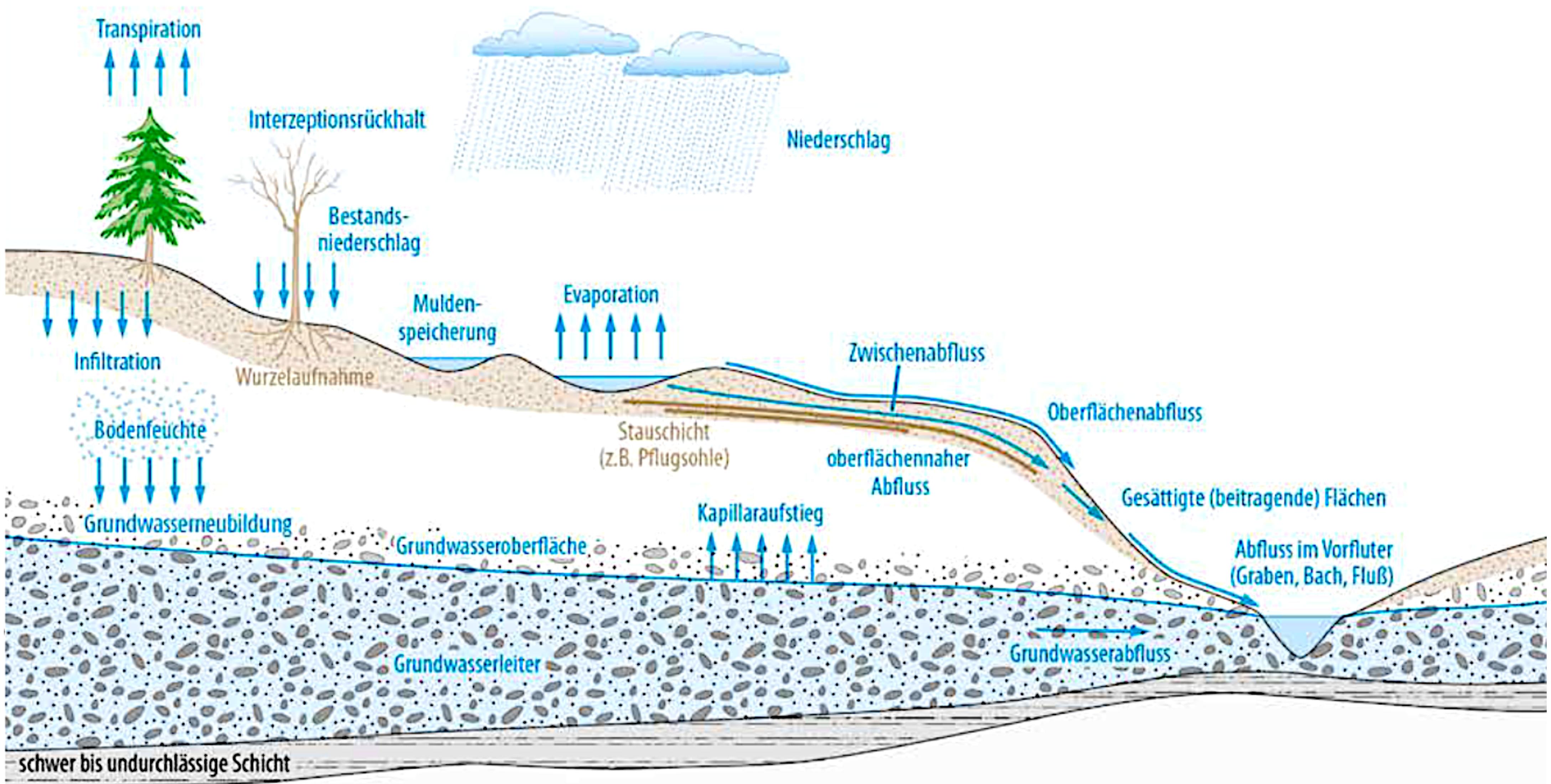
$$Q = K \cdot \nabla H$$

Leitfähigkeit

Gradient

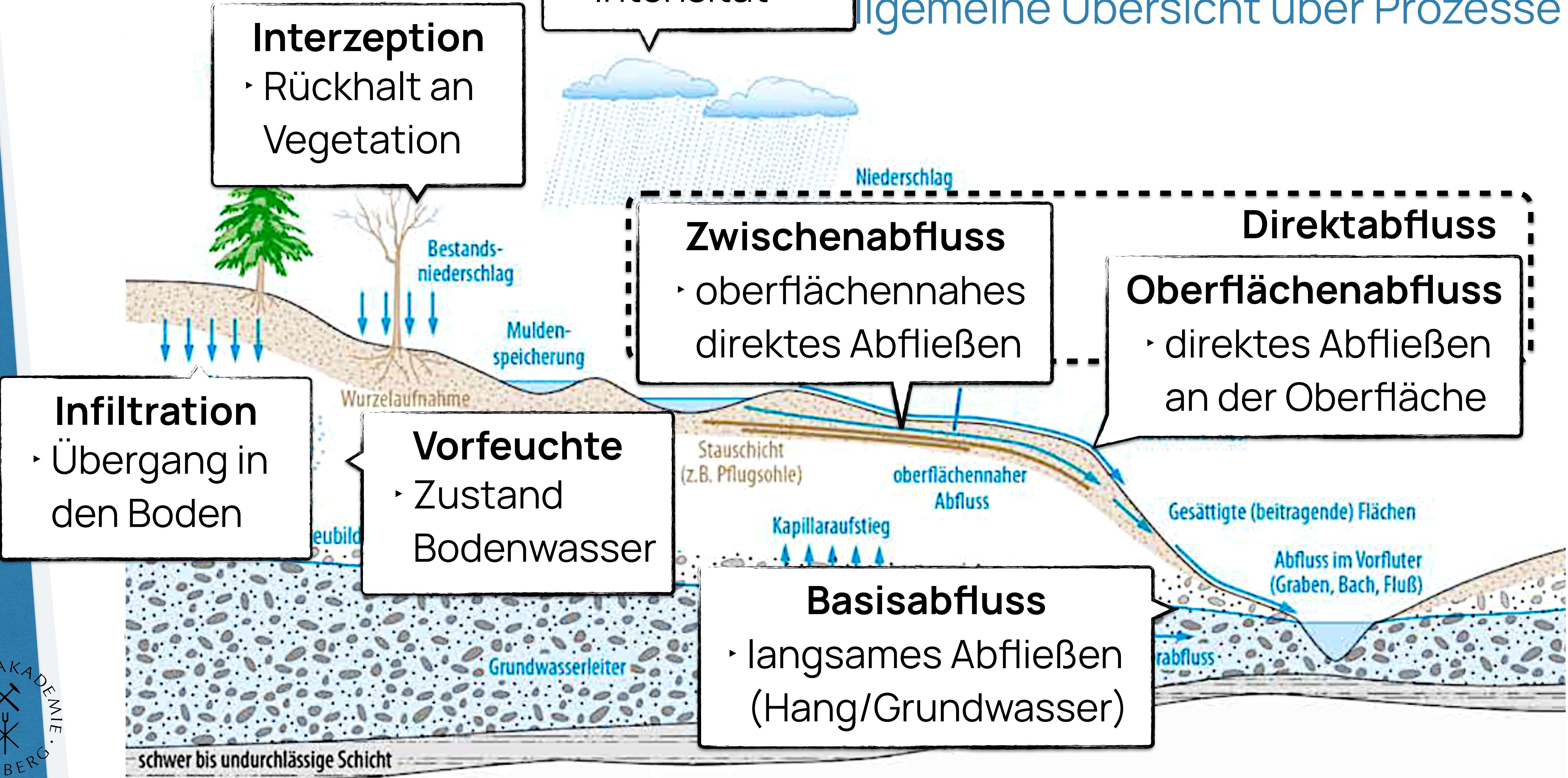
Abflussbildung

allgemeine Übersicht über Prozesse



Abflussbildung

Allgemeine Übersicht über Prozesse

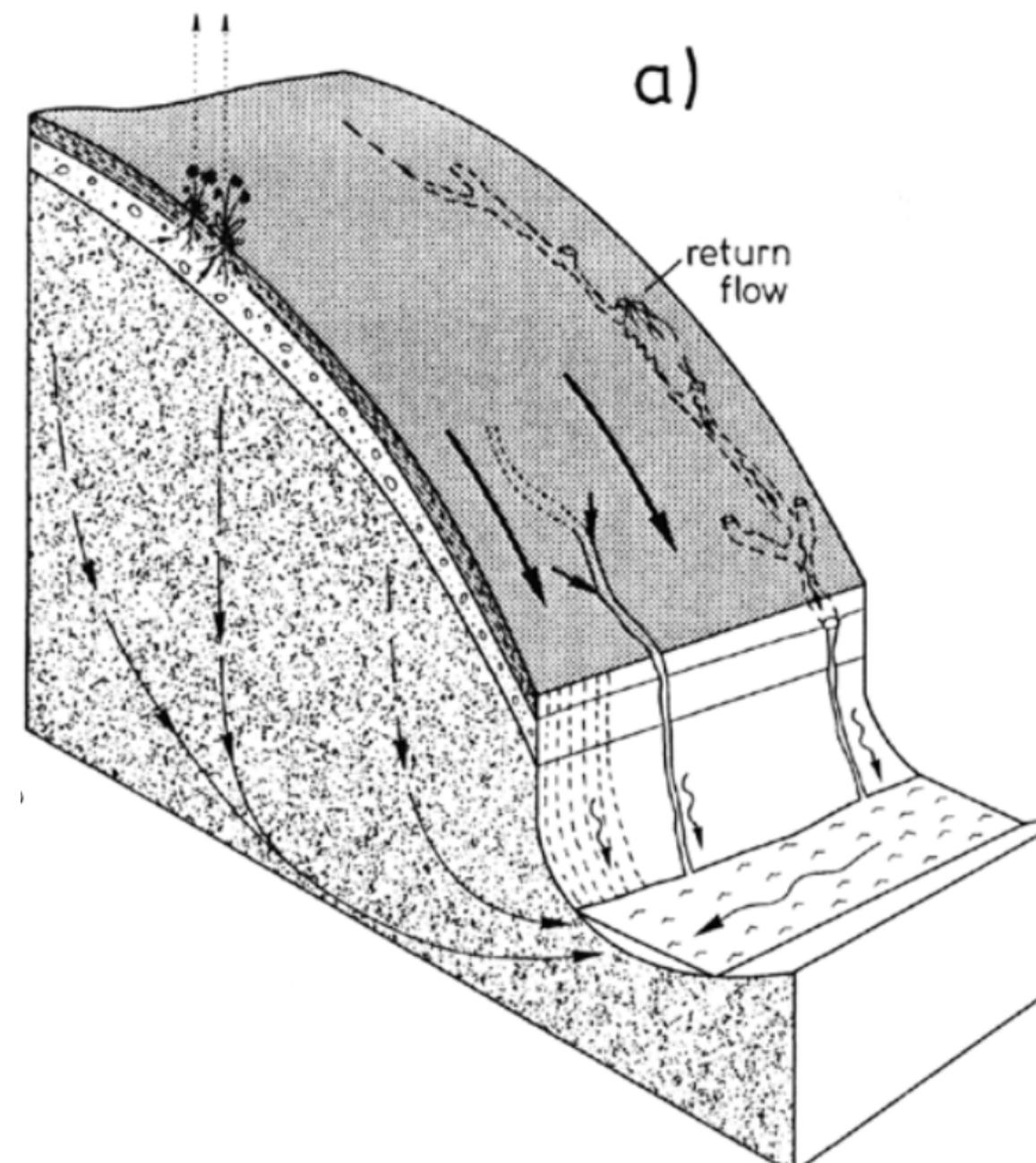


Oberflächenabfluss

Wie kann es dazu kommen, dass Wasser oberflächlich abfließt?

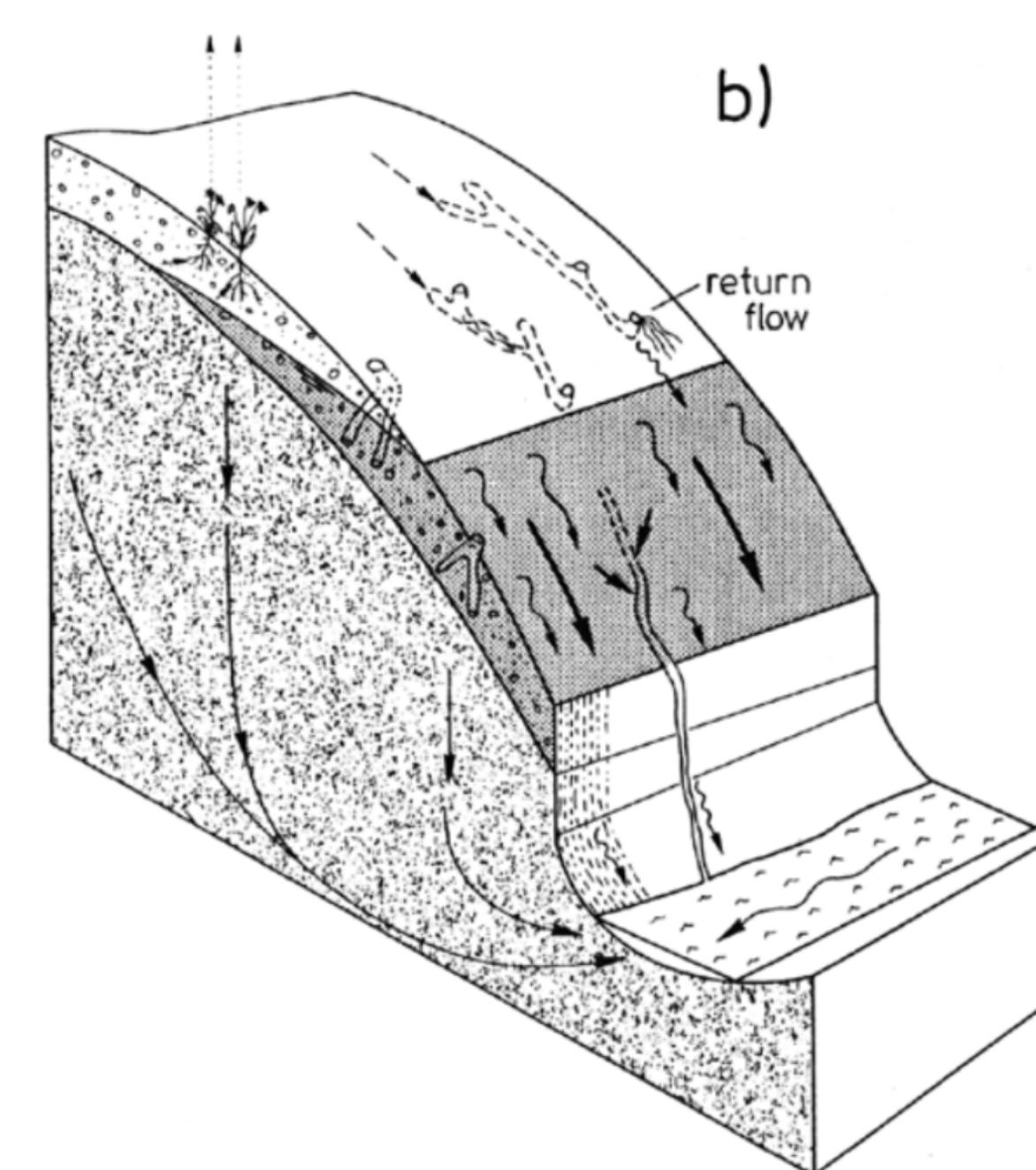
a) Regenintensität übersteigt Infiltration

- Infiltrationsüberschuss
- Horton'scher Abfluss



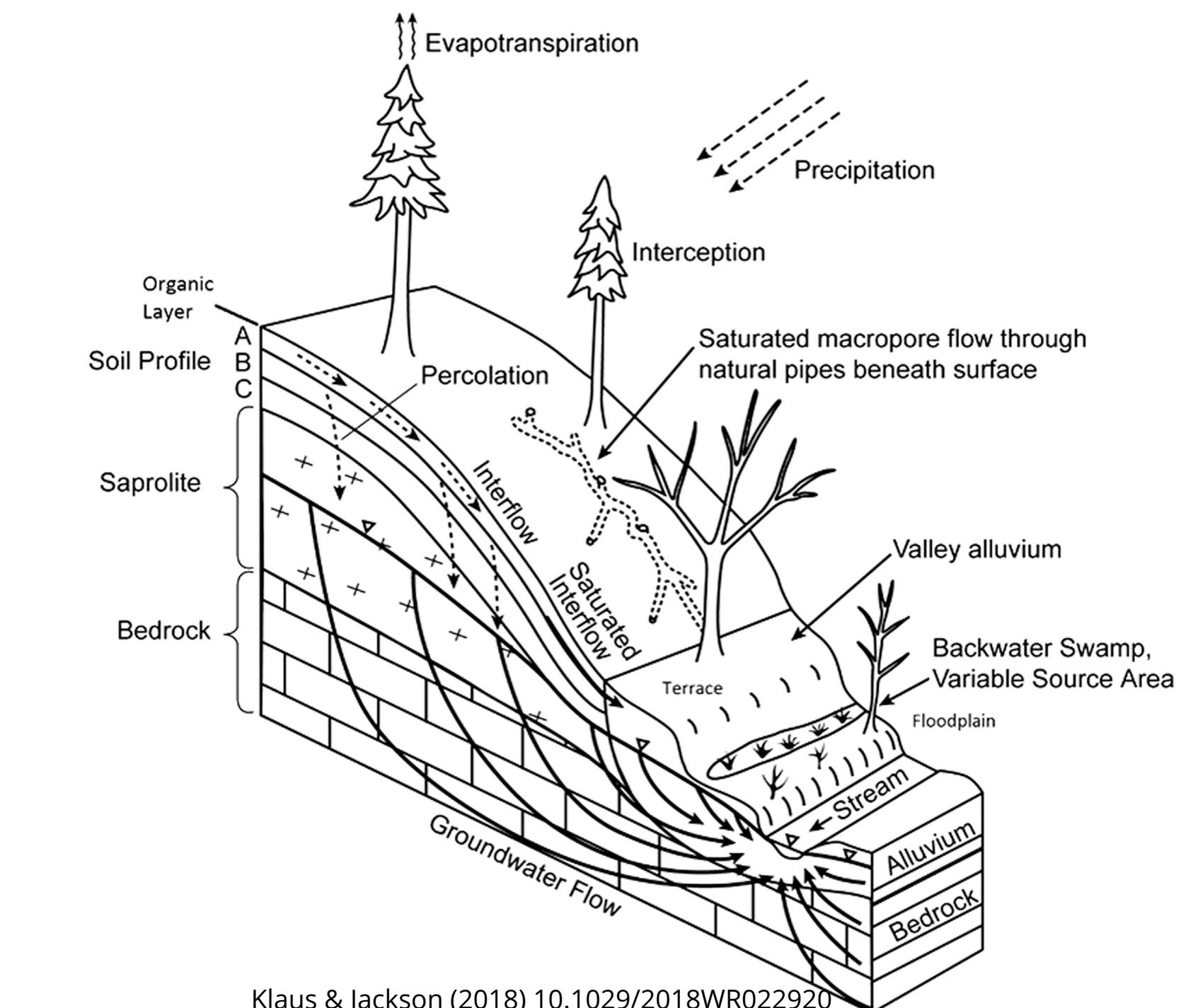
b) Wassersättigung verhindert Infiltration

- Sättigungsüberschuss
- Dunn'scher Abfluss



c) Return Flow

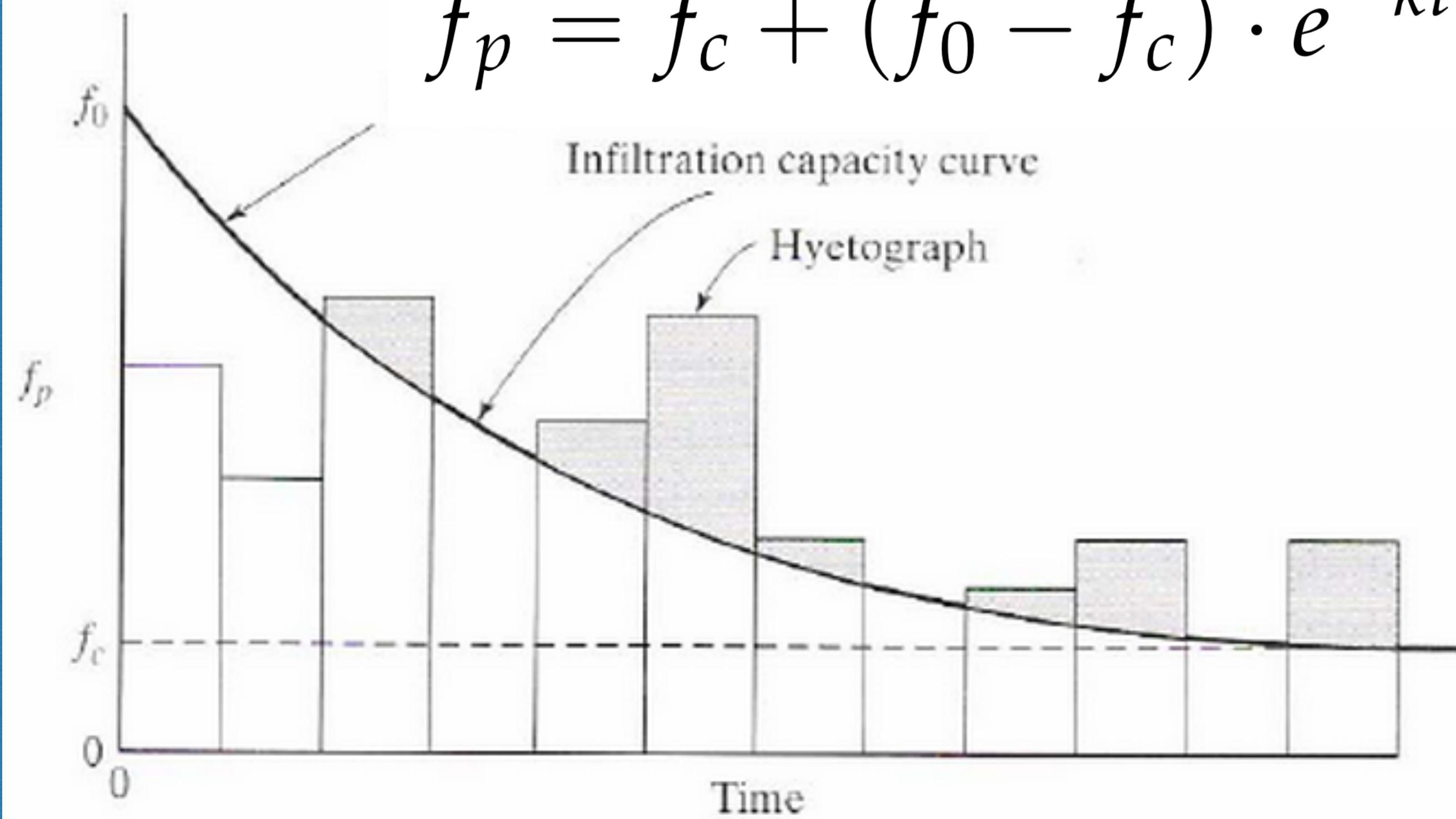
- kurzzeitig infiltriertes Wasser tritt wieder aus



Infiltrationsüberschuss

Horton'scher Abfluss

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



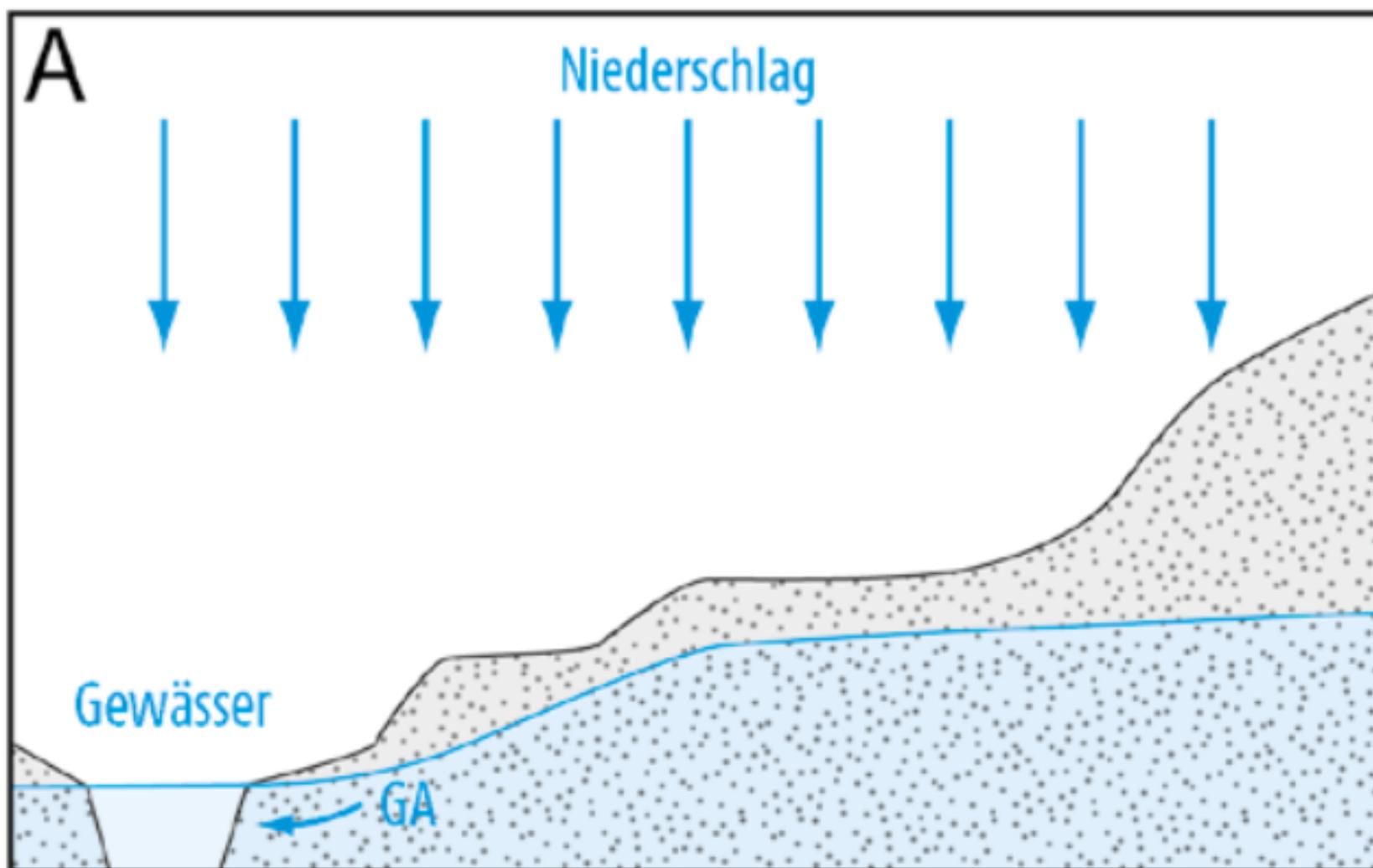
1940 formulierte Horton sein bekanntes Infiltrationsmodell:

- 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

Sättigungsüberschuss

insb. räumliche Verteilung und Sättigungsflächen

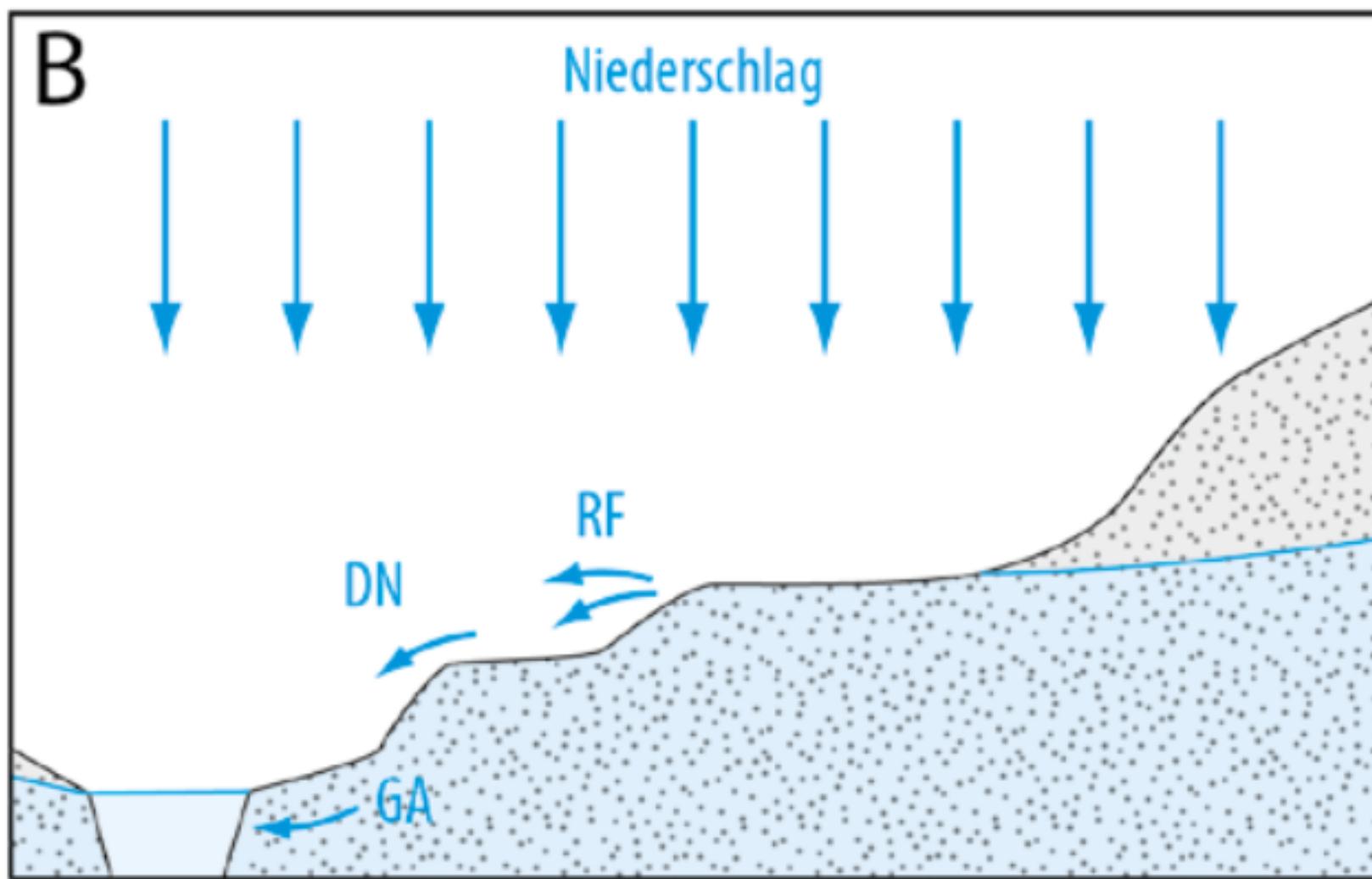


Mit fortschreitendem Niederschlag:

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

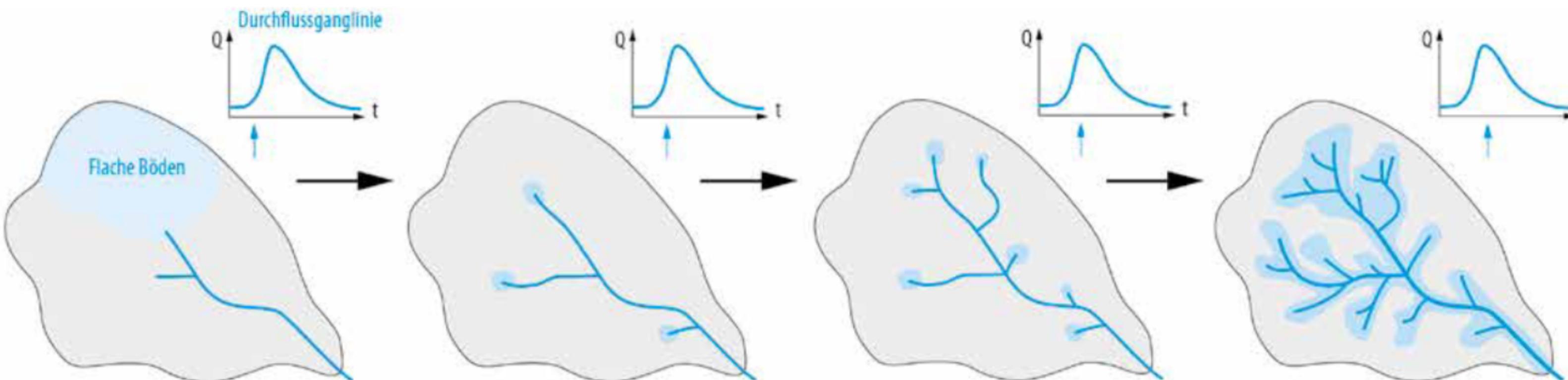
Sättigungsüberschuss

insb. räumliche Verteilung und Sättigungsflächen



Mit fortschreitendem Niederschlag:

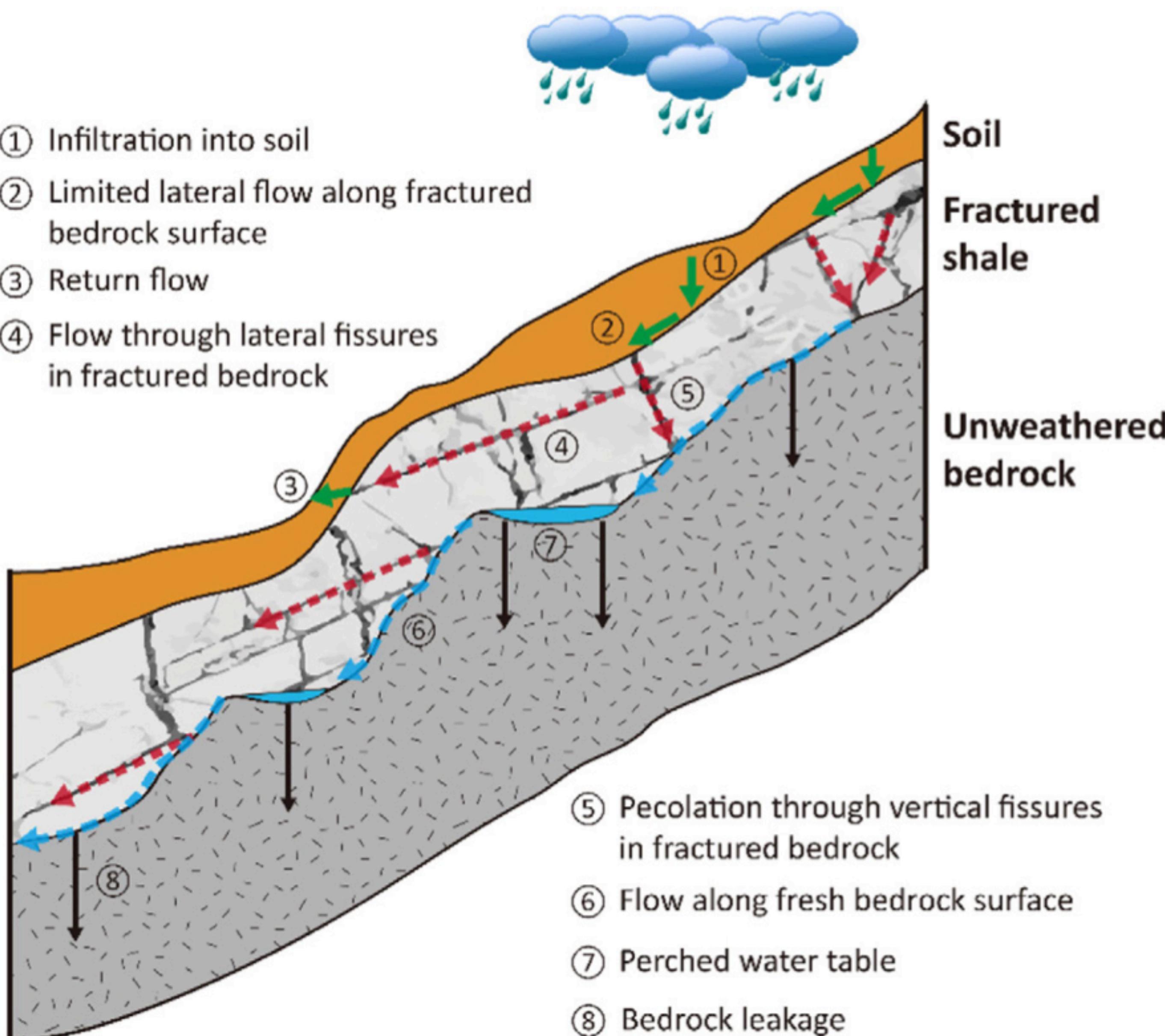
- Aufsättigung von Teilen des Einzugsgebietes
- besonders in Gewässernähe, flachen Bereichen und Bereichen großen Wasserdurchflusses



Fill-and-spill

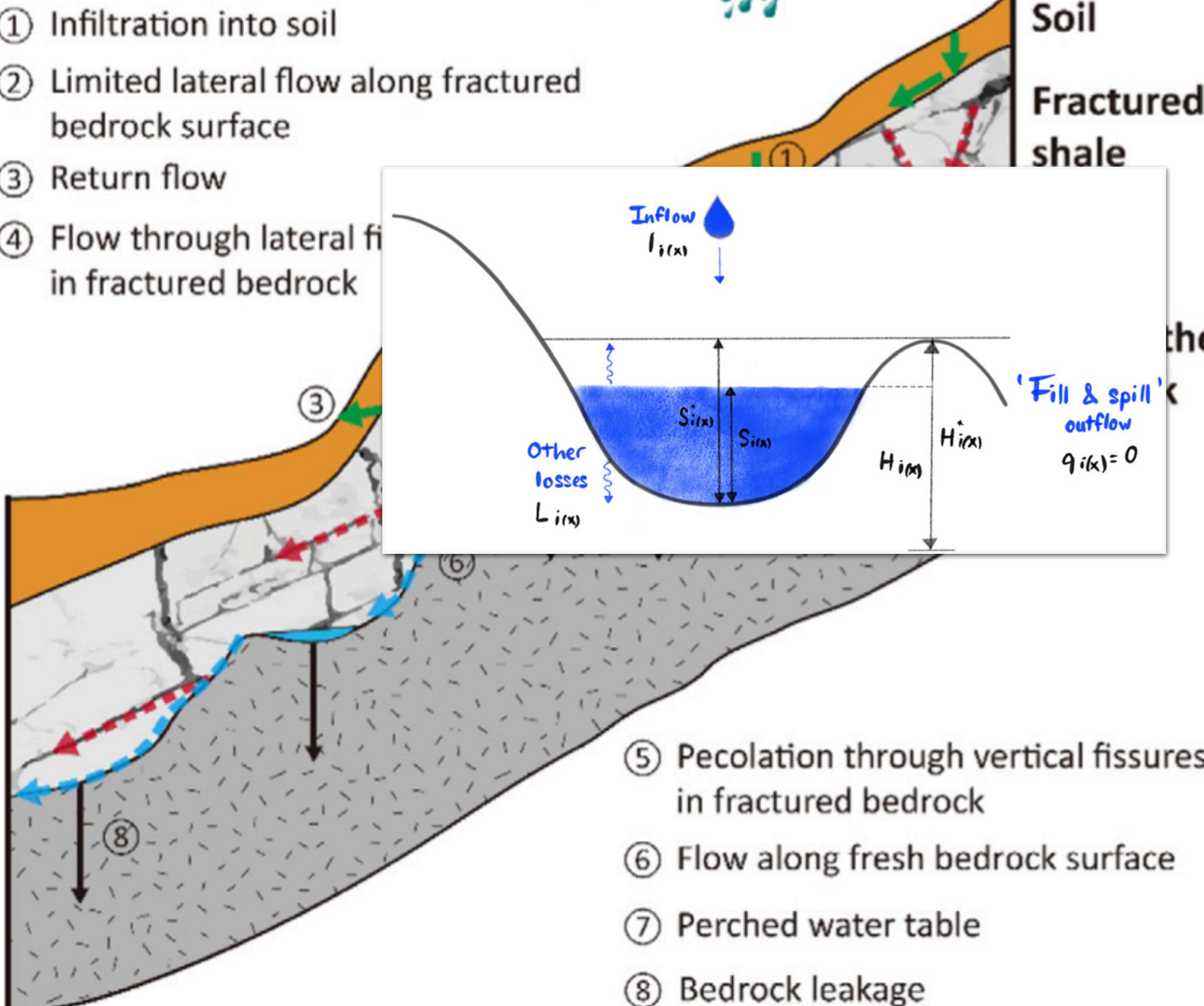
Konzept für Zwischenabfluss

- 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

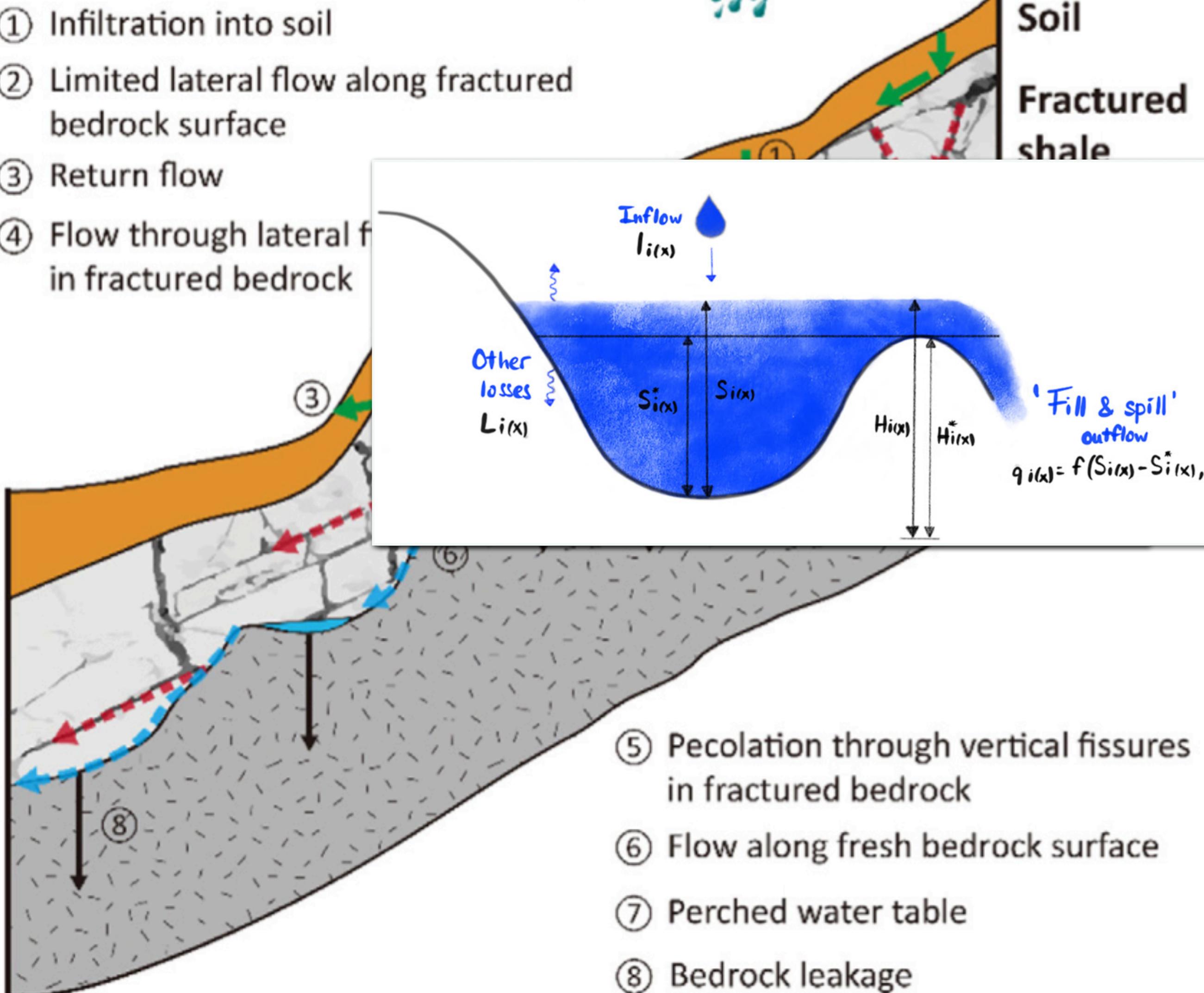
Konzept für Zwischenabfluss



- 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

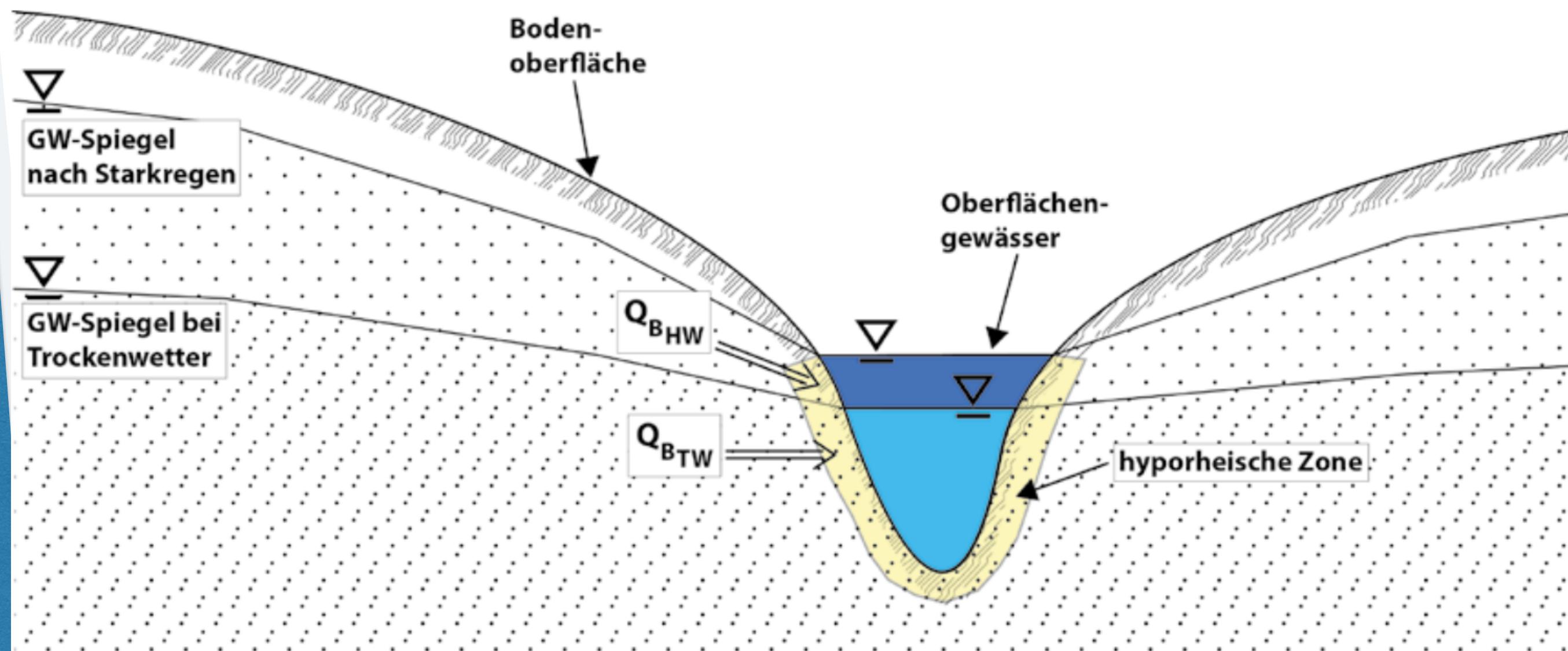
Konzept für Zwischenabfluss



- 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

Grundwasserabfluss

der klassische Fall von Filterströmung

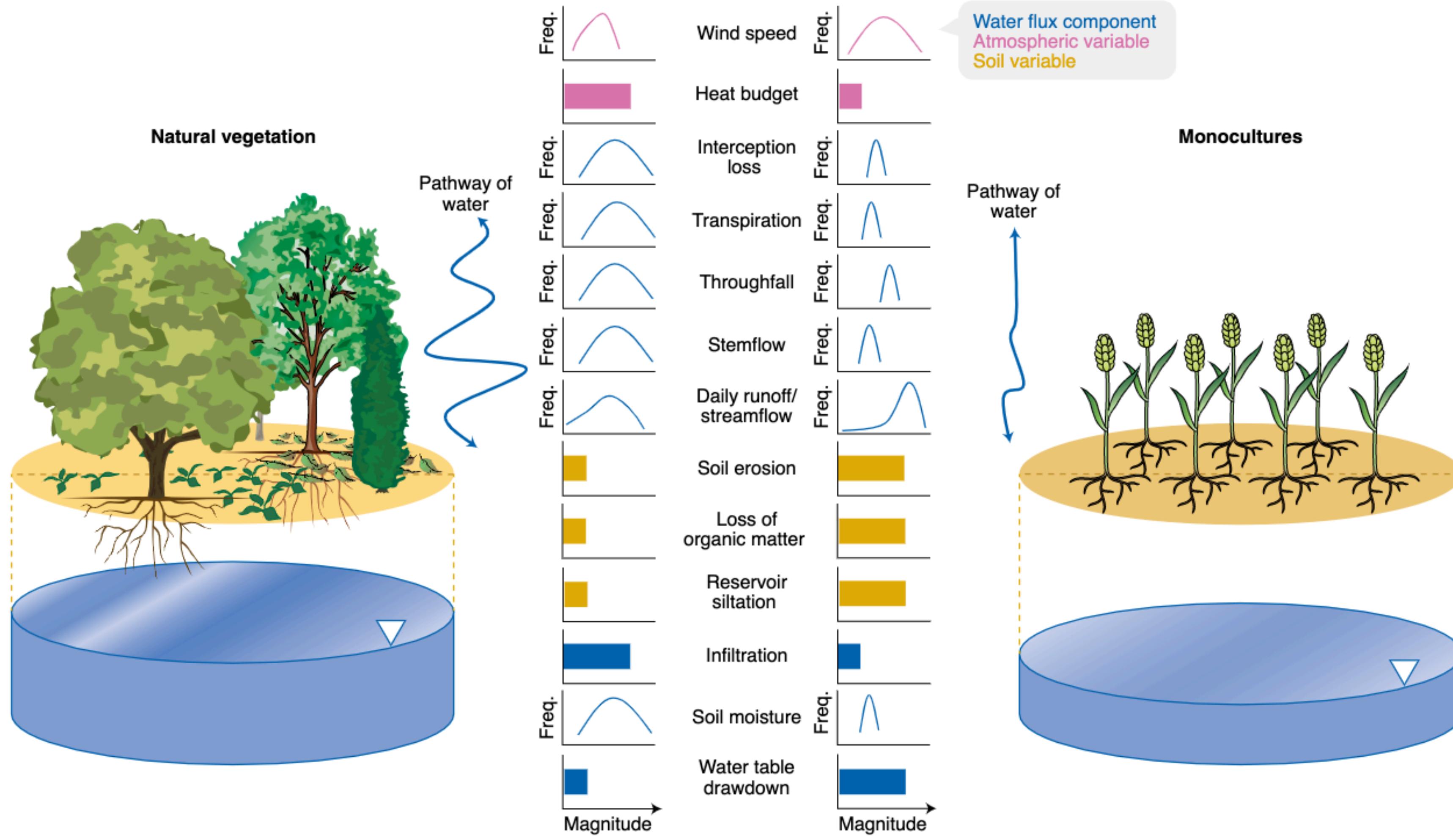


Darcy!

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

Vegetation im Wasserkreislauf

Standörtliche Prozessmodifikation

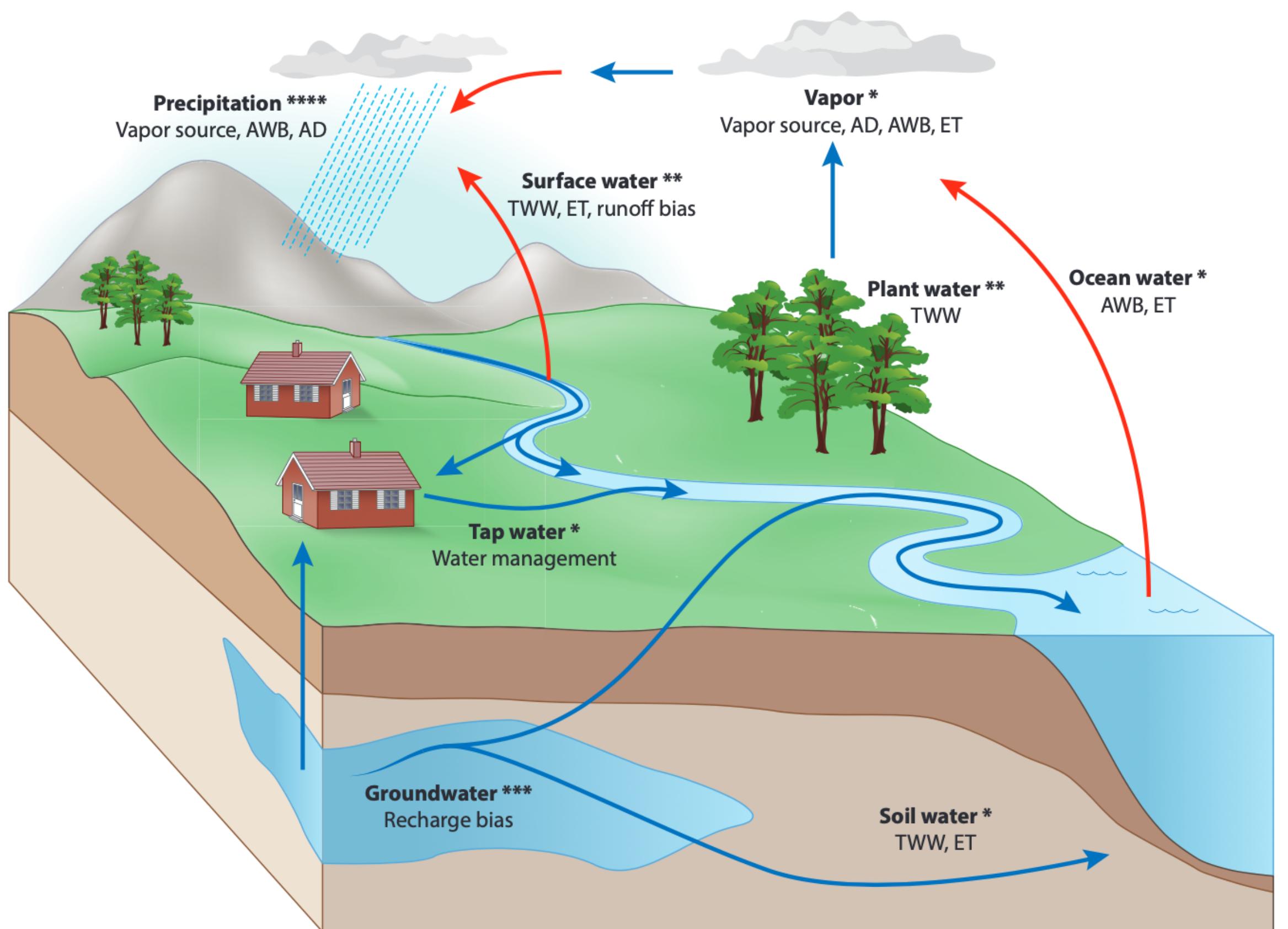


Landnutzung

- Wirkung auf verschiedene Teile des Wasserkreislaufs
- Homogenisierung unterminiert planetare Resilienz

Fraktionierung

Wie sich die Isotopenkonzentrationen ändern



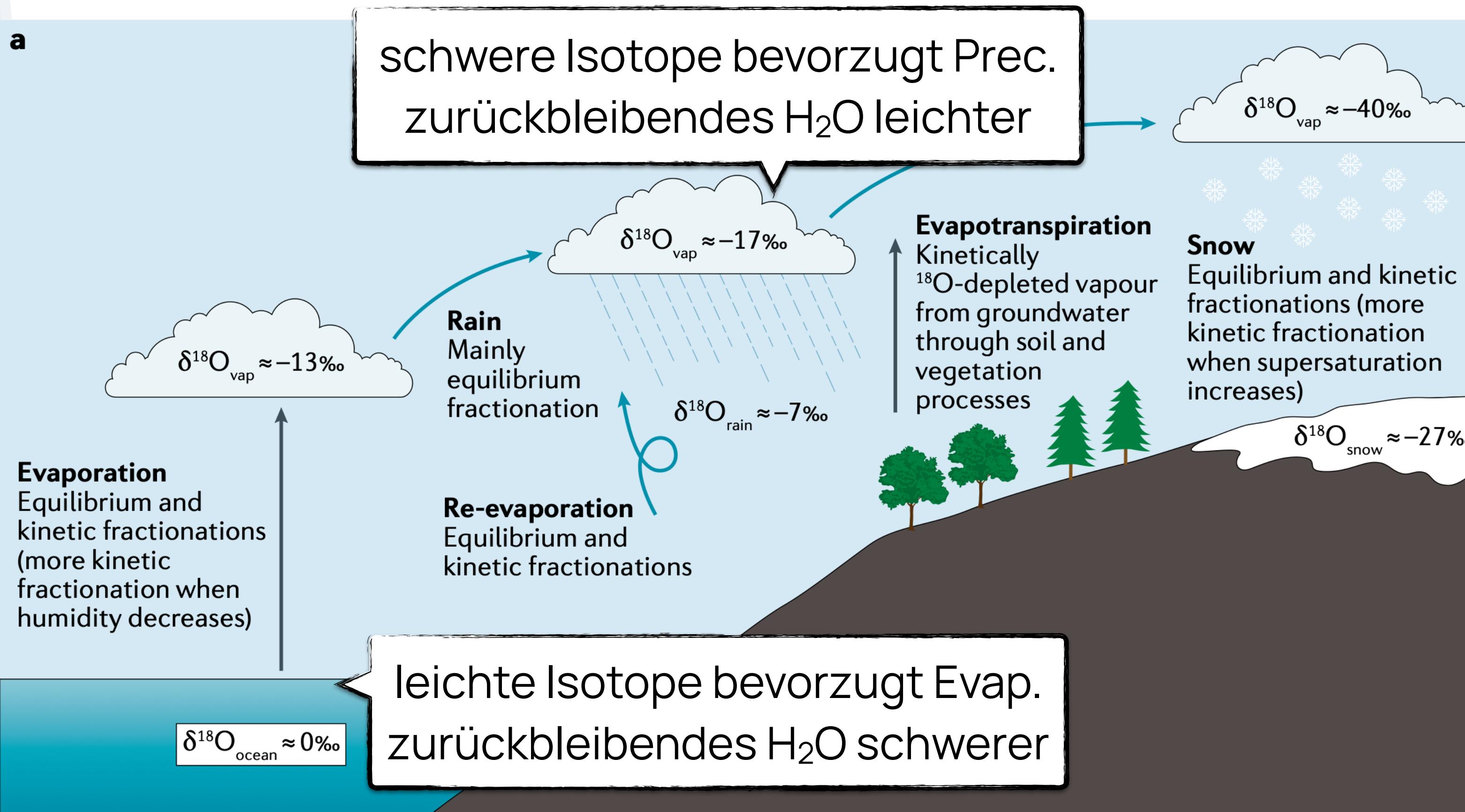
- Insb. physikalische Phasenänderung und bio-chemische Reaktionen ändern Isotopenverhältnis → **Fraktionierung**
- Phasenübergang (stärker bei niedrigen T) → **Kinetische Frakt.**
- Änderung auch durch Austausch mit Gasphase → **Equilibrium Frakt.**

Bowen, G. J., Cai, Z., Fiorella, R. P., and Putman, A. L.: Isotopes in the Water Cycle: Regional- to Global-Scale Patterns and Applications, Annu Rev Earth Pl Sc, 47, 1–27, <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-053018-060220>, 2019.

Hillaire-Marcel, C., Kim, S.-T., Landais, A., Ghosh, P., Assonov, S., Lécuyer, C., Blanchard, M., Meijer, H. A. J., and Steen-Larsen, H. C.: A stable isotope toolbox for water and inorganic carbon cycle studies, Nat Rev Earth Environ, 2, 699–719, <https://doi.org/10.1038/s43017-021-00209-0>, 2021.

Fraktionierung

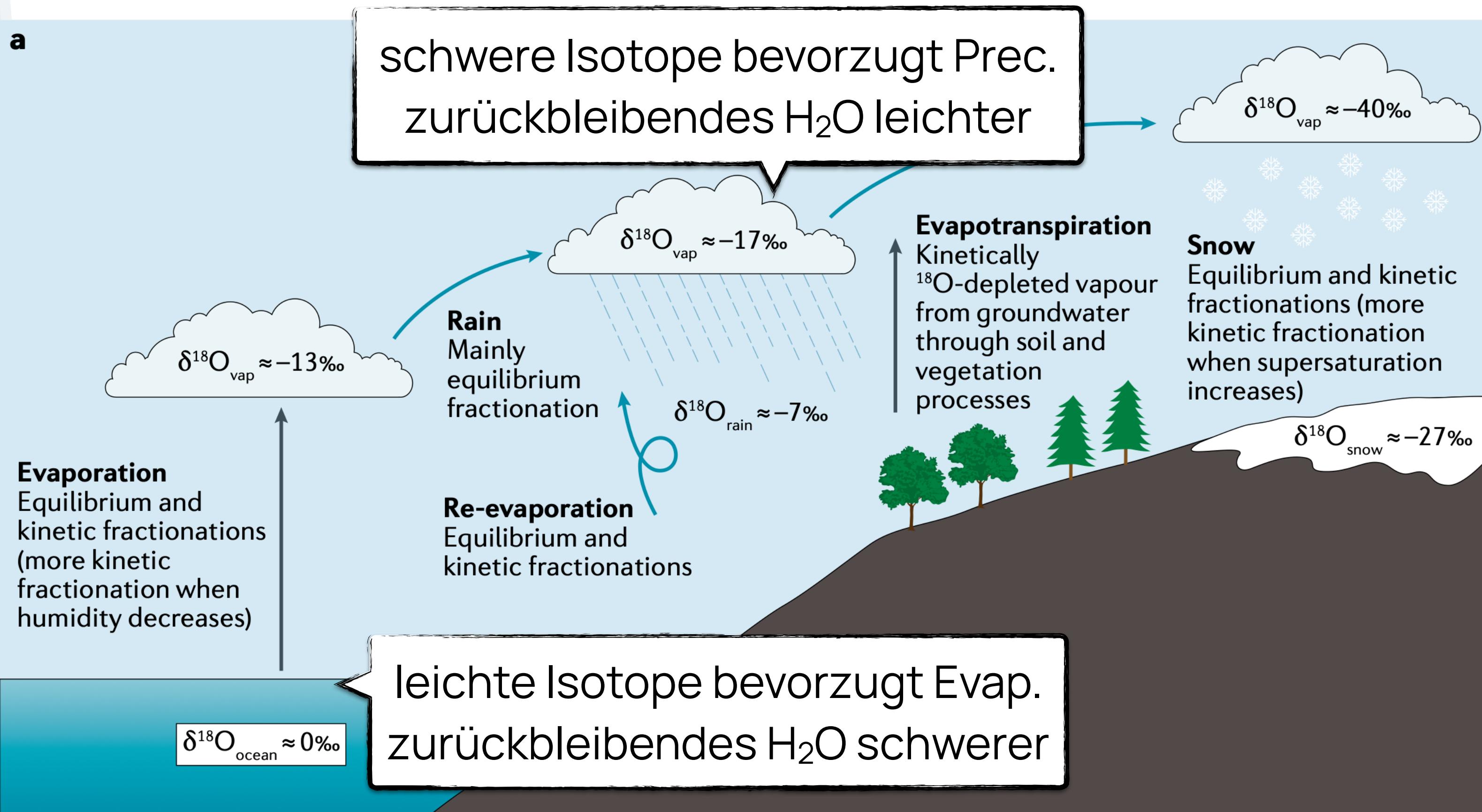
Wie sich die Isotopenkonzentrationen ändern



- Insb. physikalische Phasenänderung und bio-chemische Reaktionen ändern Isotopenverhältnis → **Fraktionierung**
- Phasenübergang (stärker bei niedrigen T) → **Kinetische Frakt.**
- Änderung auch durch Austausch mit Gasphase → **Equilibrium Frakt.**

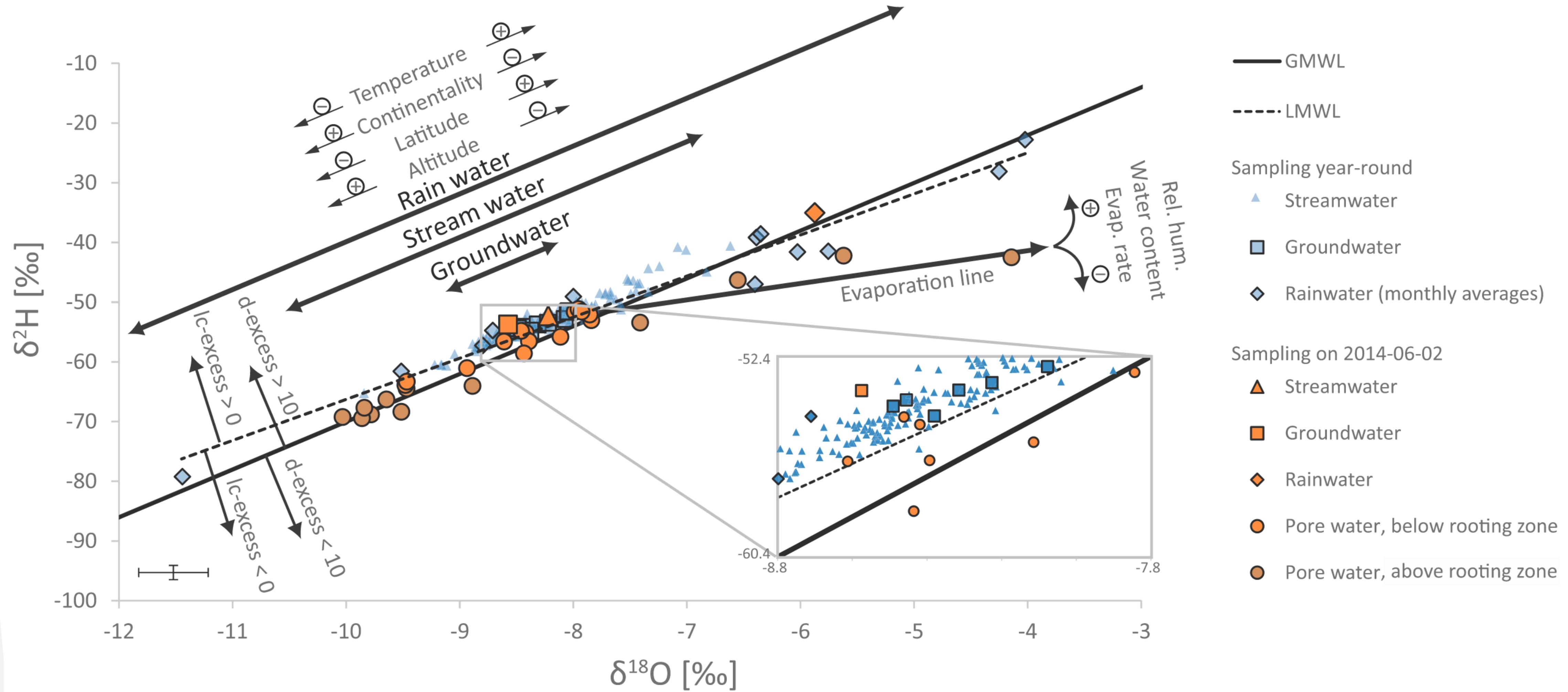
Fraktionierung

Wie sich die Isotopenkonzentrationen ändern

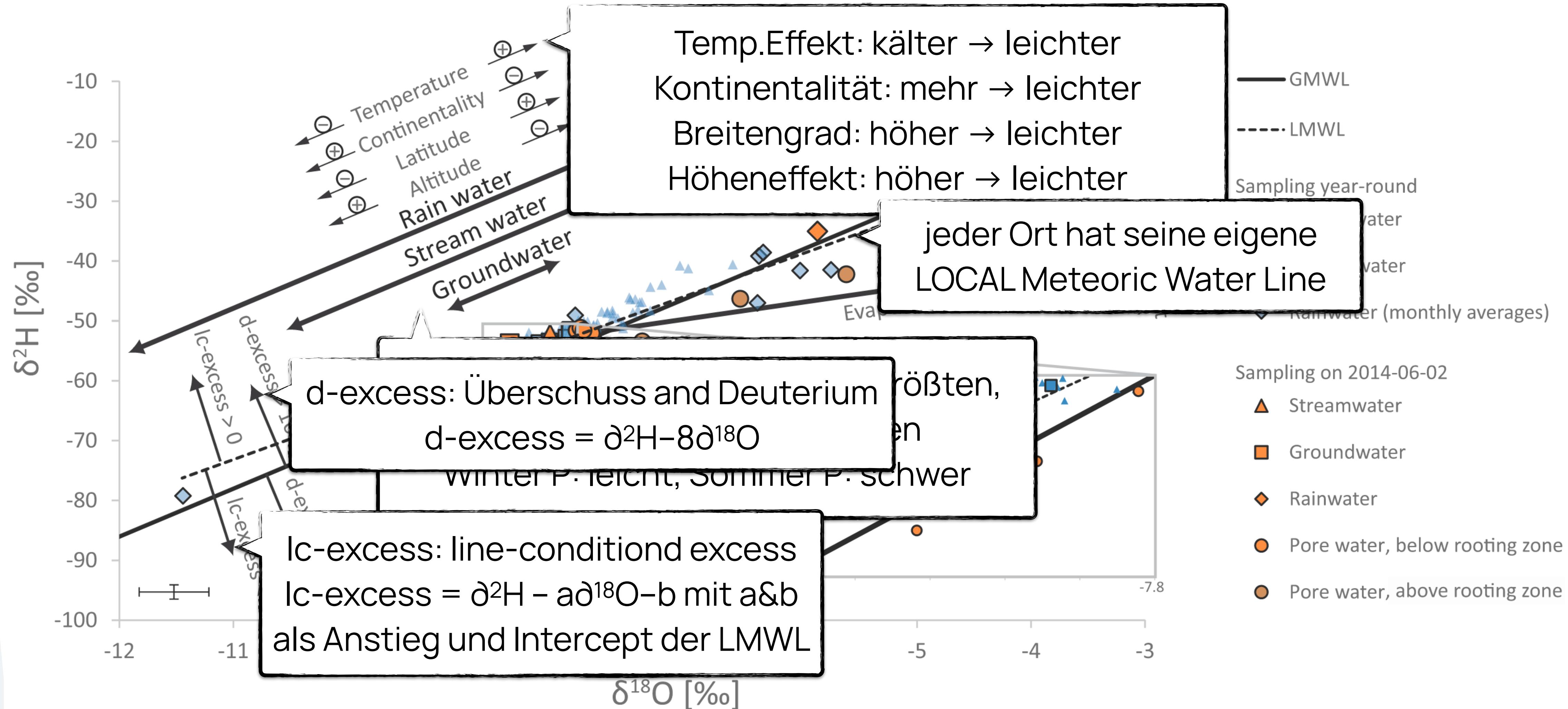


- Kondensat ist schwerer als Dampf
- Kontinentaleffekt: Prec. wird inlands zunehmend leichter
- Frakt. bei Evap. stark von Luftfeuchte beeinflusst: feuchter → weniger
- Netto-Effekt erzeugt Meteoric Water Line

Orientierung im Dual-Isotope Plot



Orientierung im Dual-Isotope Plot

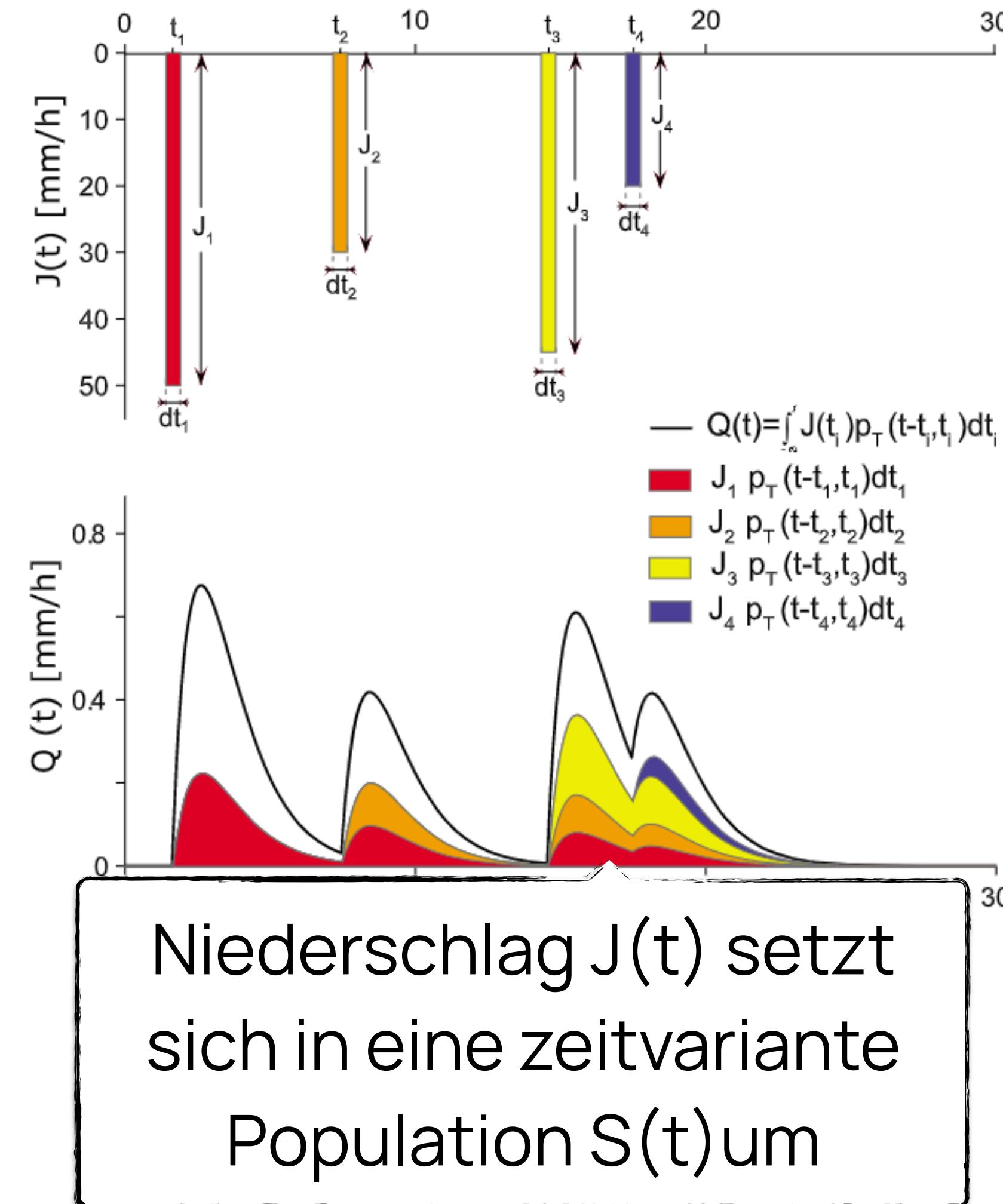


Verweilzeit und Transit Time

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

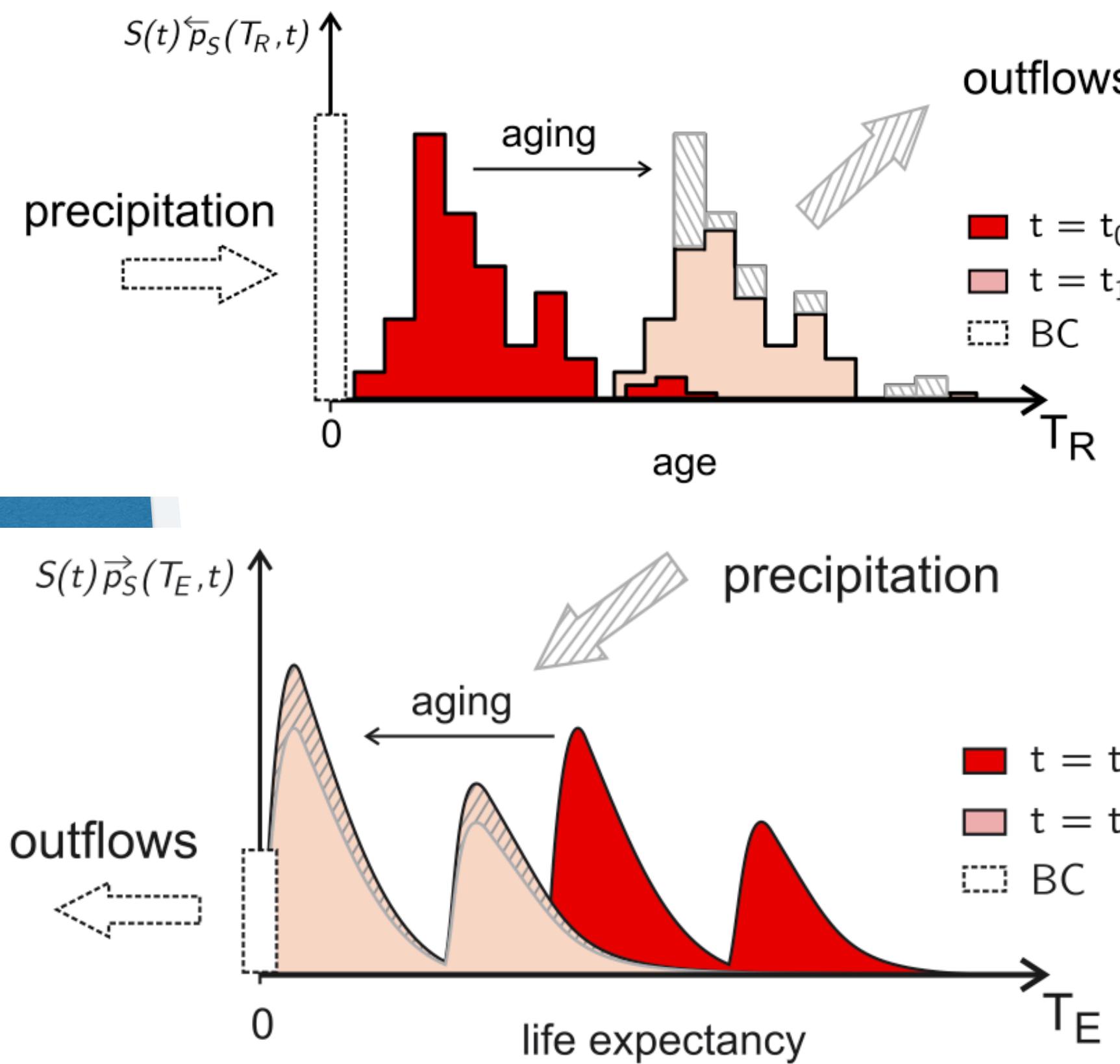
Verweilzeit

- 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



Verweilzeit und Transit Time

vom Mittelwert zu selektiven Verteilungen

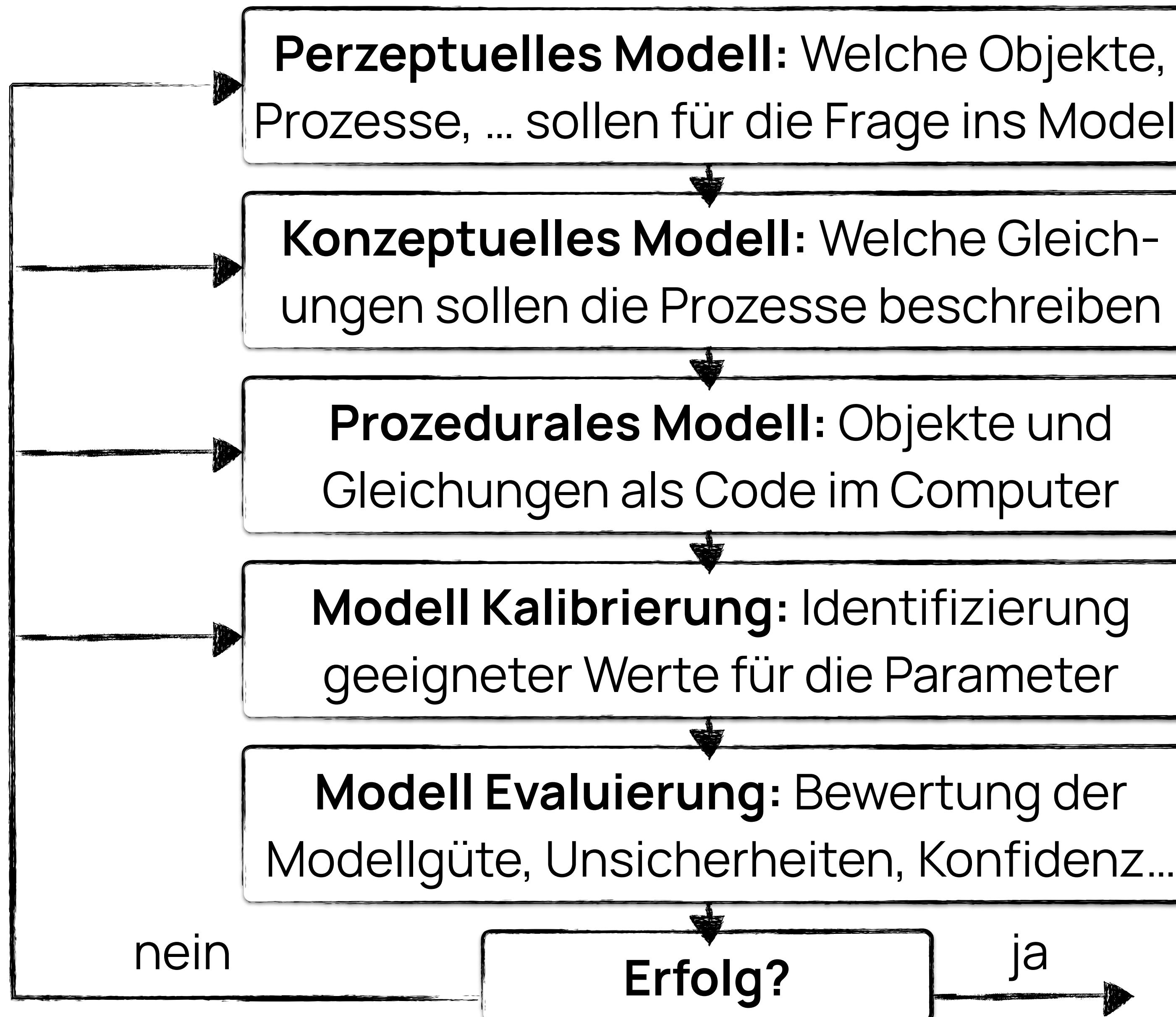


- rückwärts Transit Time
- Verteilung von Wasserpaketen, die in der Vergangenheit in das System gekommen und zu t das System verlassen
 - Analog Altersstruktur aller Individuen einer Population, die zu t sterben

- vorwärts Transit Time
- Verteilung wie lange Wasserpakete, die zu t im System sind, im System bleiben werden
 - Analog zur Lebenserwartung zur Geburt aller Individuen einer Population, die zu t im System sind

Was verstehen wir unter "Modellierung"?

Revision

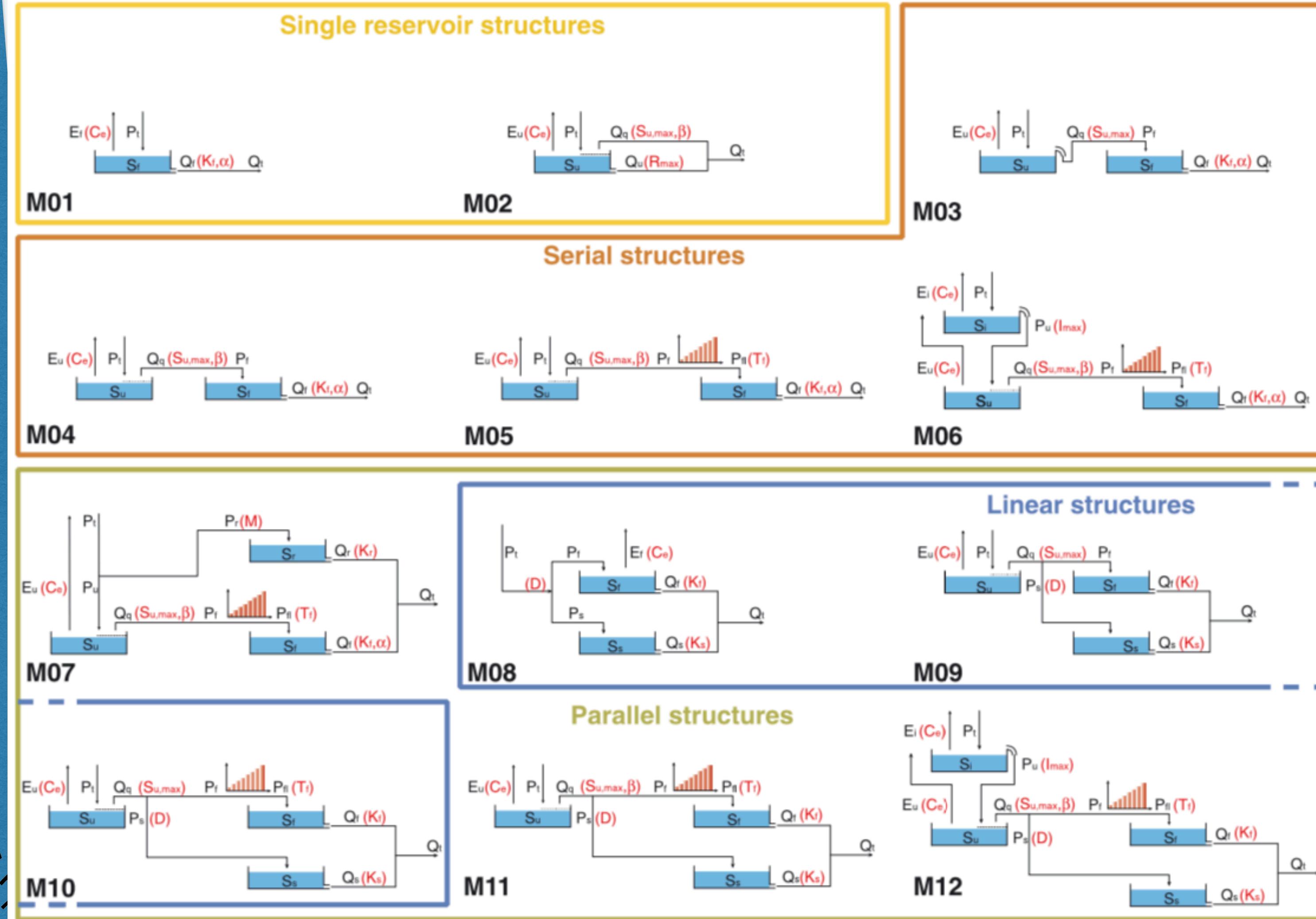


Entwerfen, Benutzen von Modellen

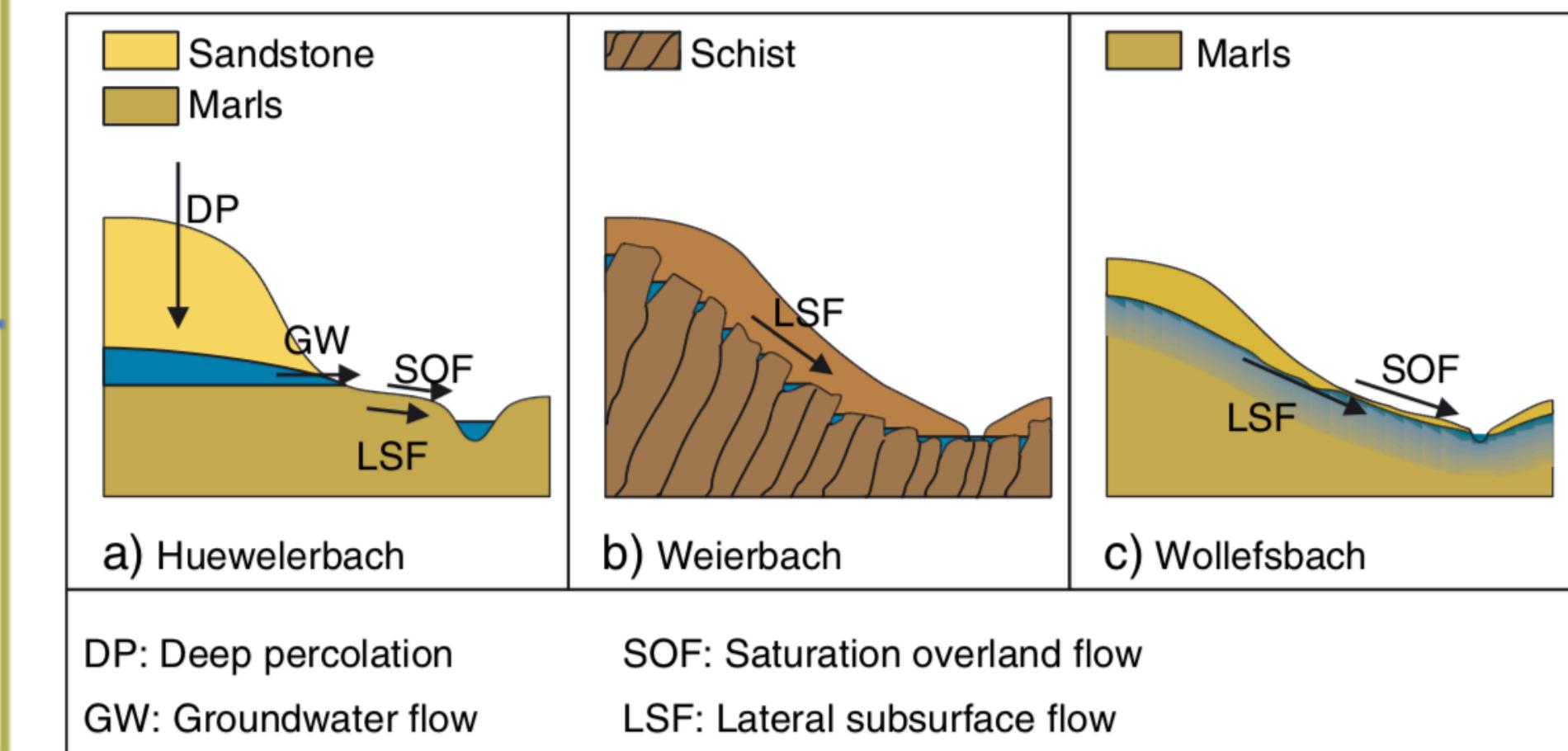
Der Modellierungs-
Prozess beginnt weit
vor der Verfahrens-
anleitung von Berech-
nungen im Computer:

Eimer, Verknüpfungen und Konverter

Landschaftsmodelle mit Kaskaden von Speichern und Filtern



- zB. Superflex als Bibliothek von Speicherkombinationen um verschiedene Landschaftseigenschaften abzubilden



<https://github.com/dalmo1991/superflexPy>

“Physikalische” Modelle

Beispiel HydroGeoSphere (oder MikeSHE, FEFLOW, Cathy, Hydrus...)

Diffusionswellen-
gleichungen

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial s} + g \cdot \frac{\partial h}{\partial s} + g \cdot (J_S + J_V) = 0$$

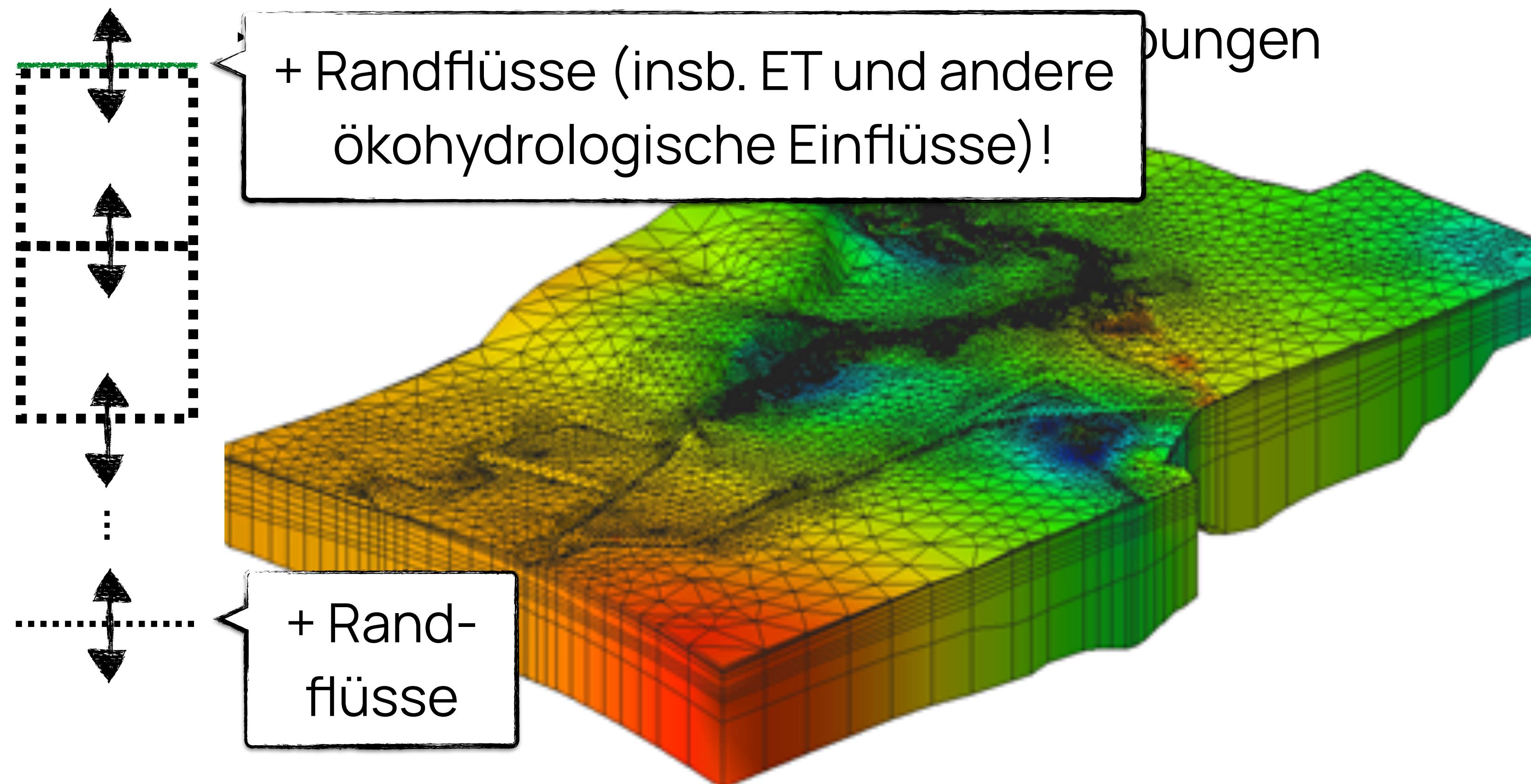
Richards-Gleichung

$$\frac{d\theta}{dt} = - \frac{d}{dx} (\kappa(\theta) \cdot \nabla H)$$

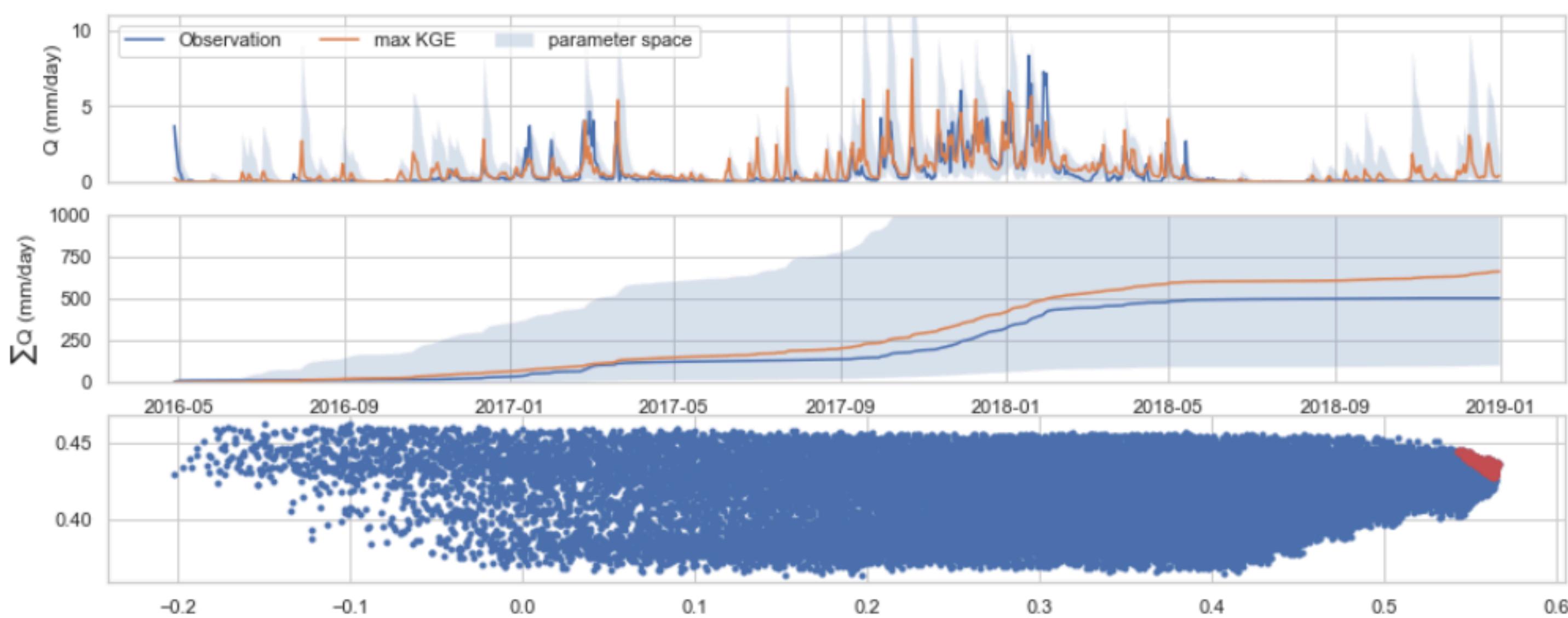
Advektions-
Dispersionsgleichung

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial x} \left(D \frac{\partial c}{\partial x} \right) = q_{in}(c_{in} - c)$$

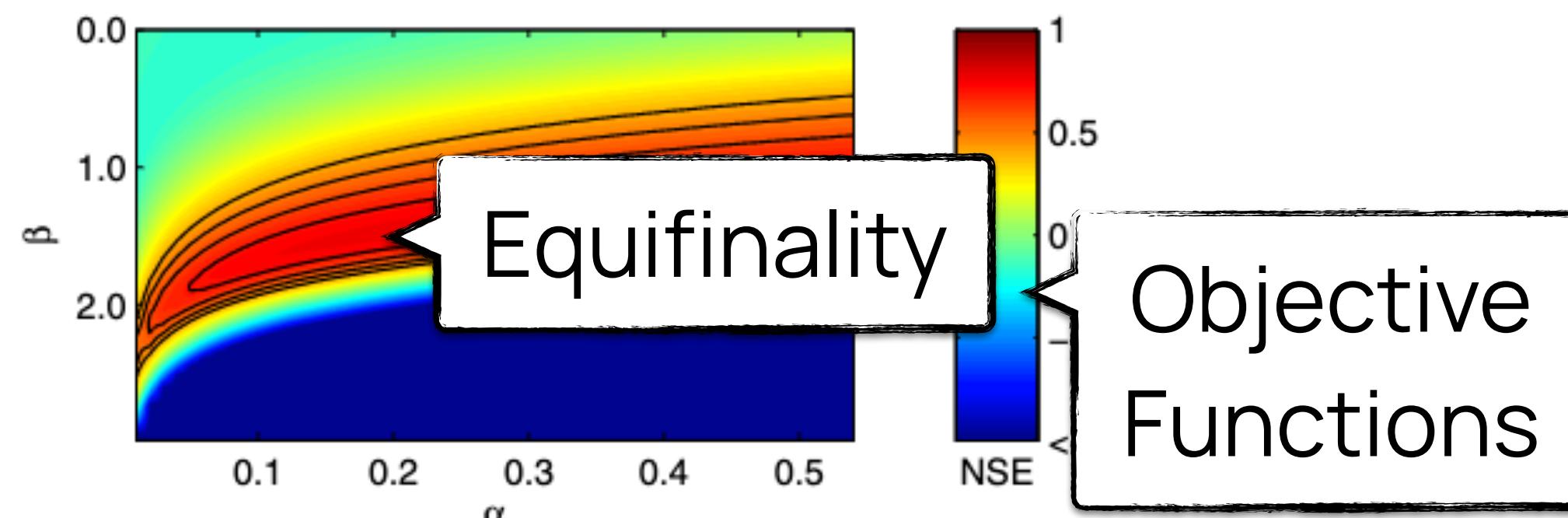
3D Modell von Oberfläche und Untergrund



Sensitivität und Unsicherheit



- α & β als Bsp. Parameter



Parameter-Räume

Parameter Sensitivität

- wie stark steuert ein Parameter das Modell?
- erneut: nicht-linear und zustandsabhängig
- Parameter-Interaktion

Pareto-Optimum

- ähnlich optimale Modellanpassungen

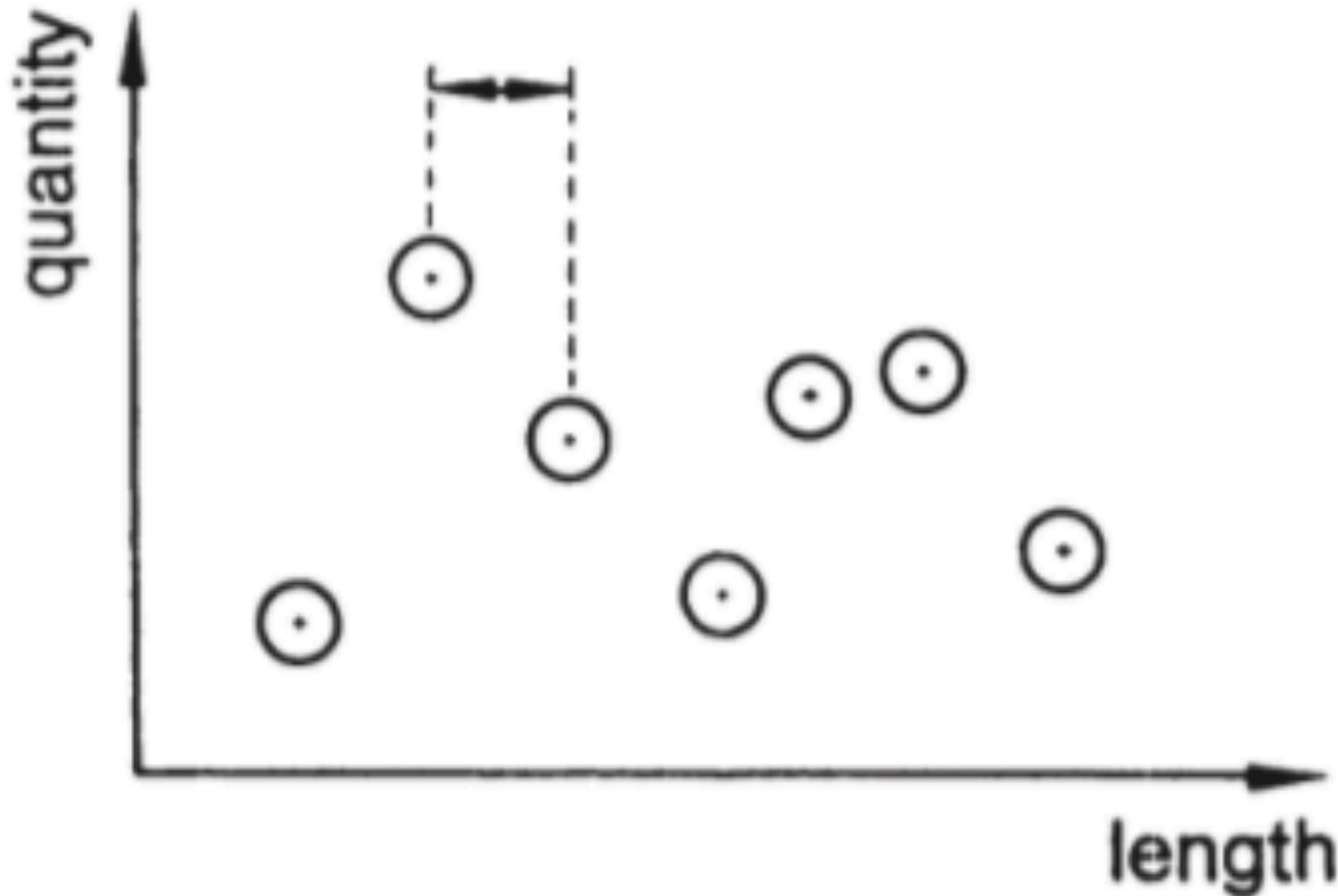
Alle drei Komponenten des Skalen-Triplets werden benötigt, um die räumlichen und zeitlichen Dimensionen einer Variablen eindeutig zu spezifizieren.

Das Skalen-Triplet

Subtitle

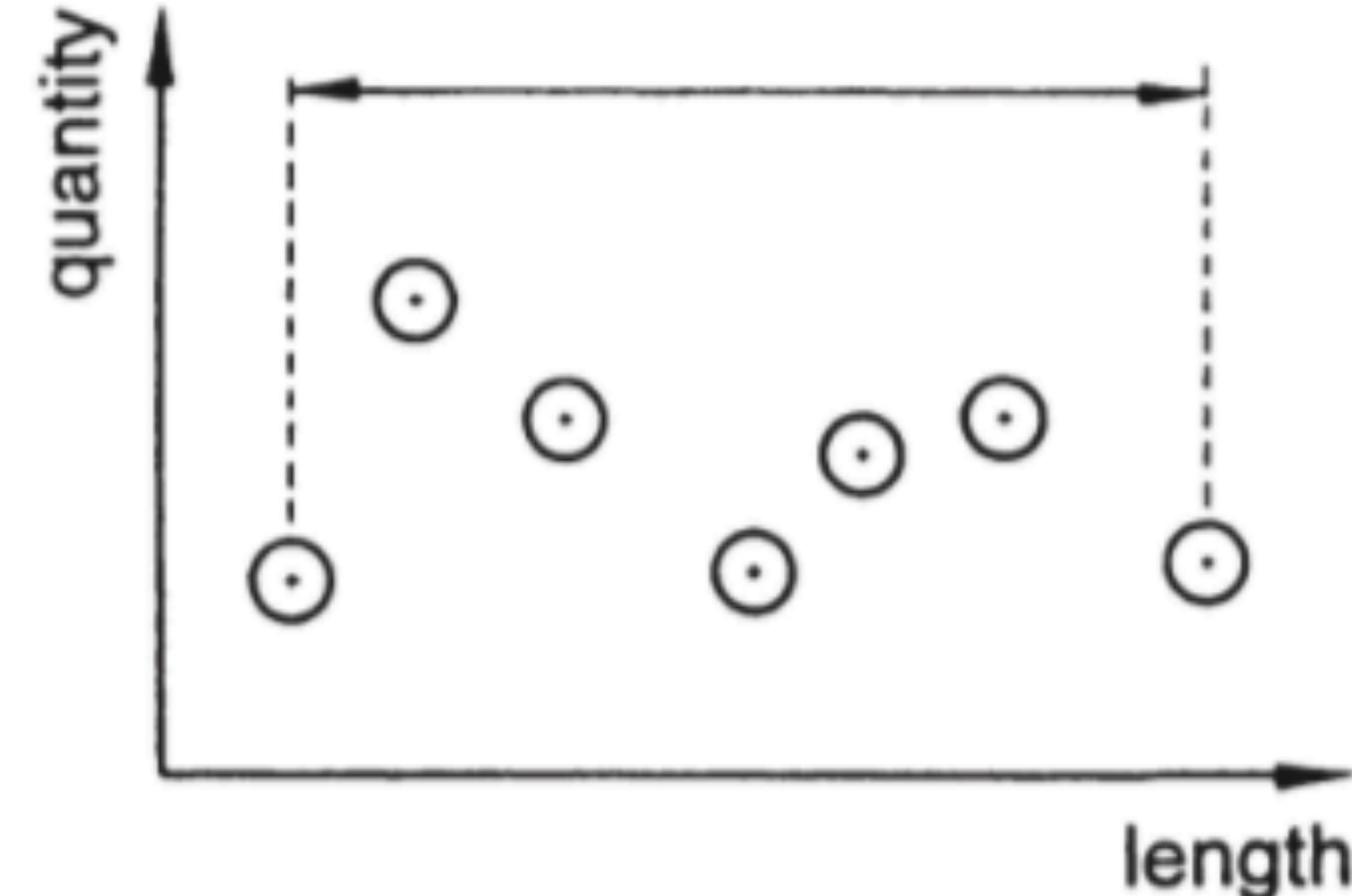
- Abstand zwischen Referenzpunkten

spacing



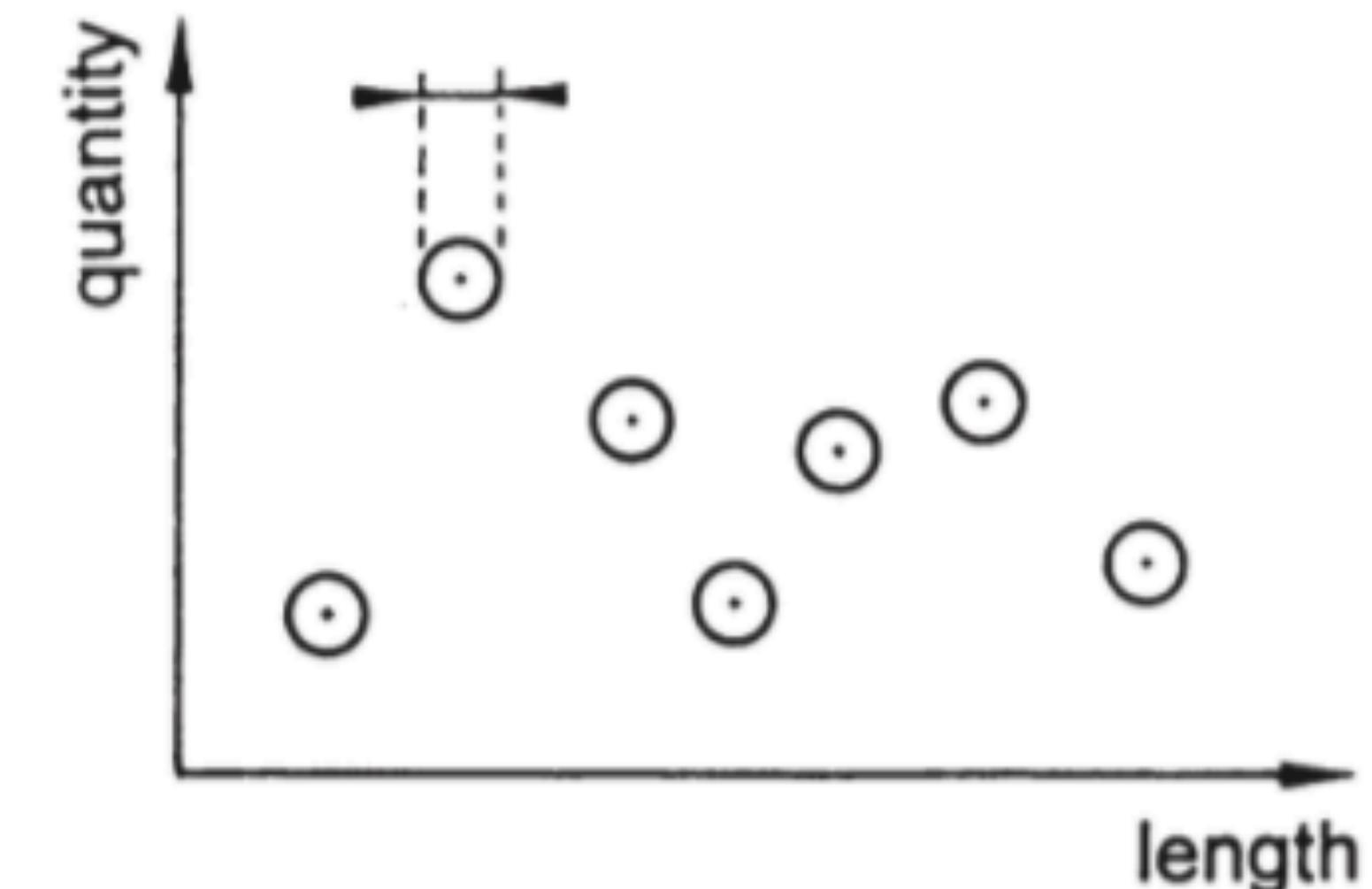
- Abdeckung im System

extent



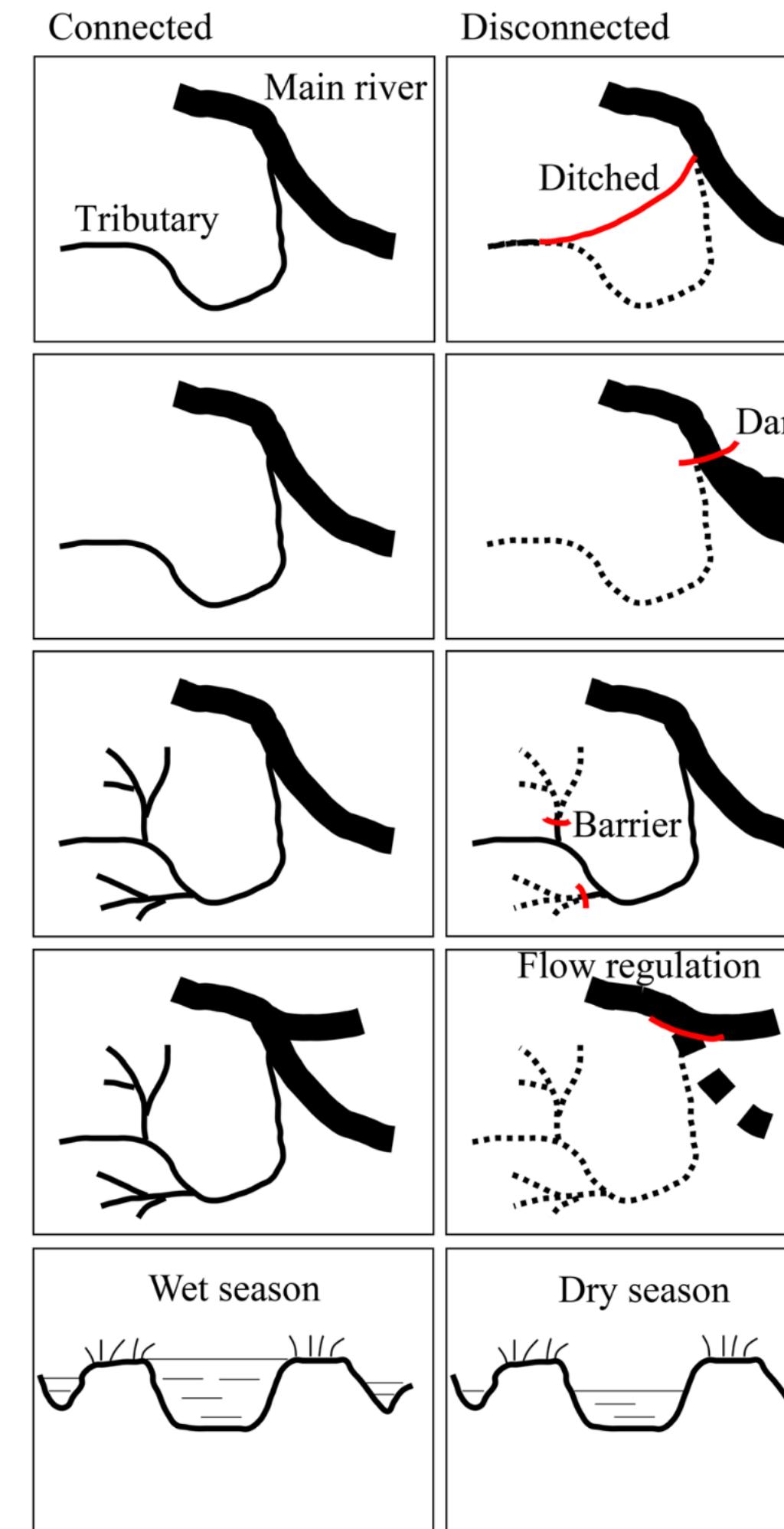
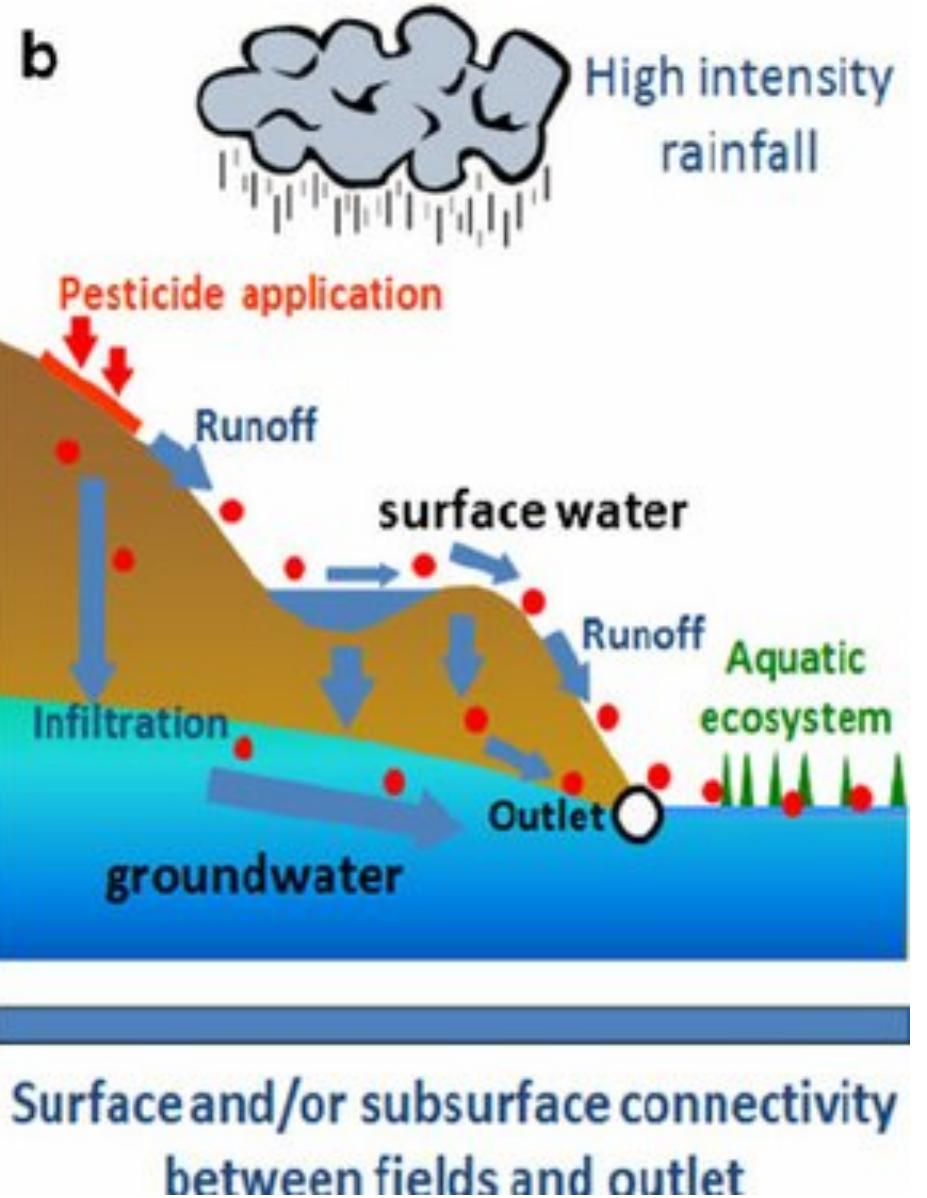
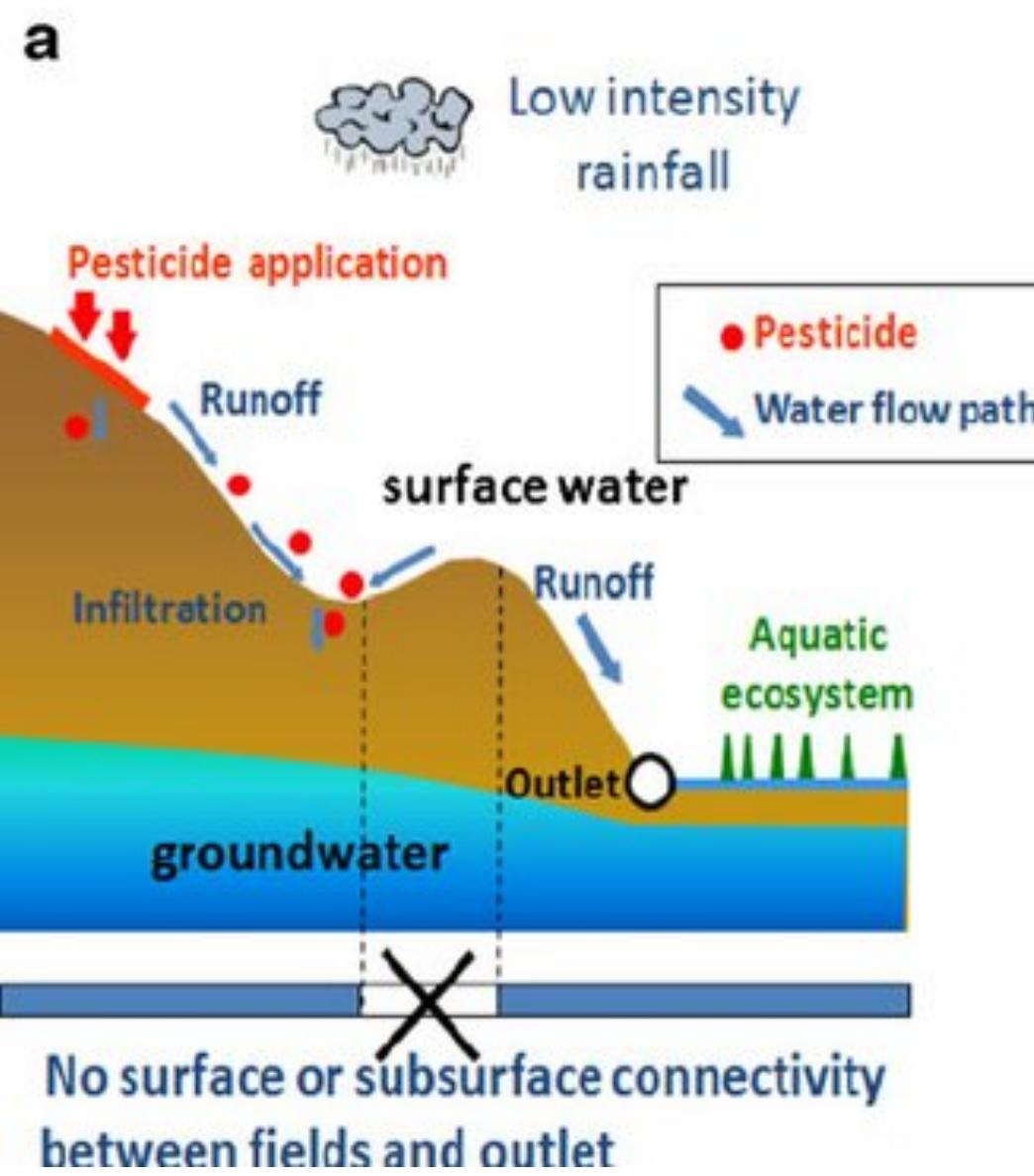
- Integrationsgröße eines Referenzpunktes

support



Konnektivität

Prozesse in dynamisch verbundenen Teilsystemen



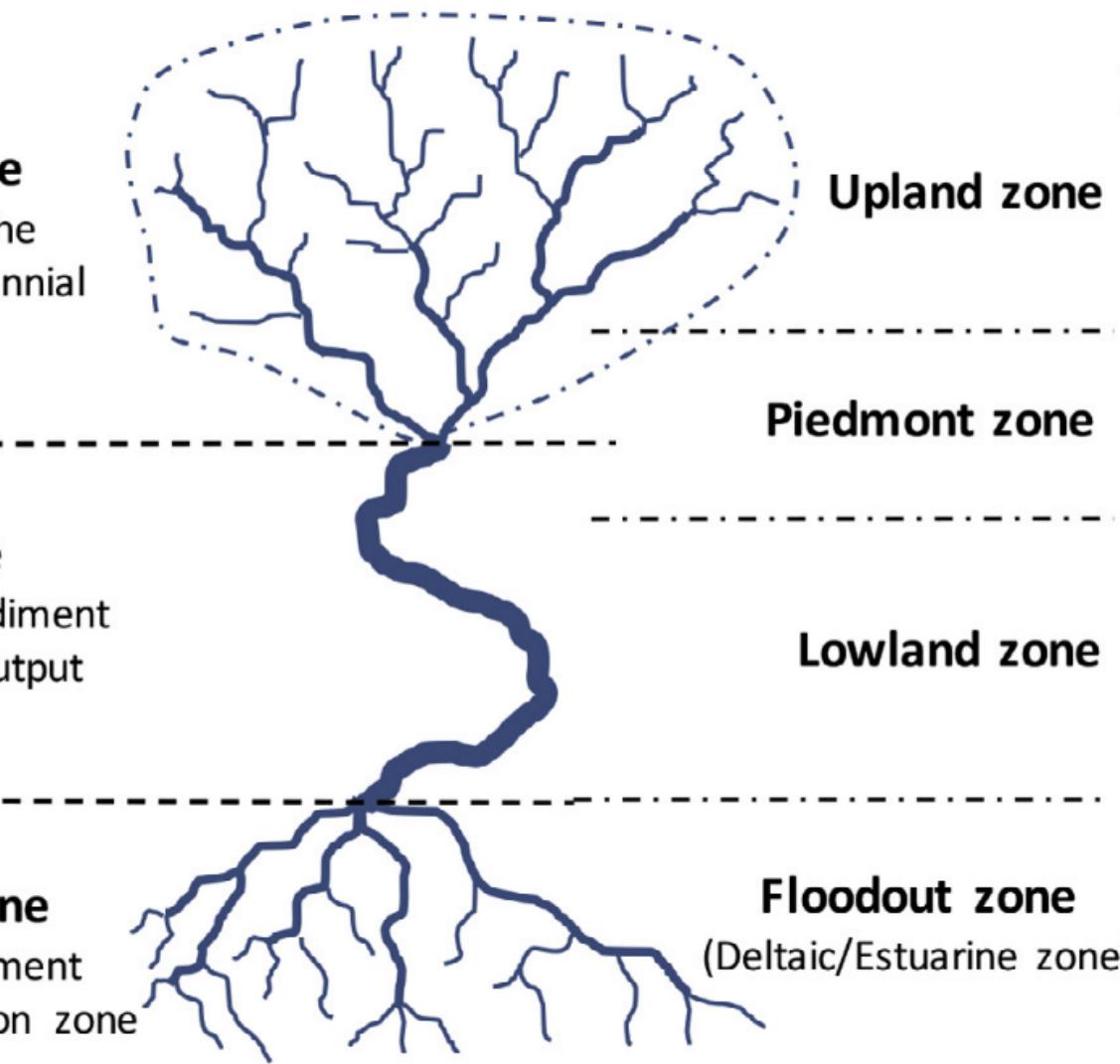
Production zone
Source of most of the sediment (and in perennial streams, water)

Transfer zone
In stable channels, sediment supply = sediment output

Deposition zone
Sink for most sediment eroded from production zone

(A)

Longitudinal and vertical hydrological connectivity



(B)

Upland zone

Piedmont zone

Lowland zone

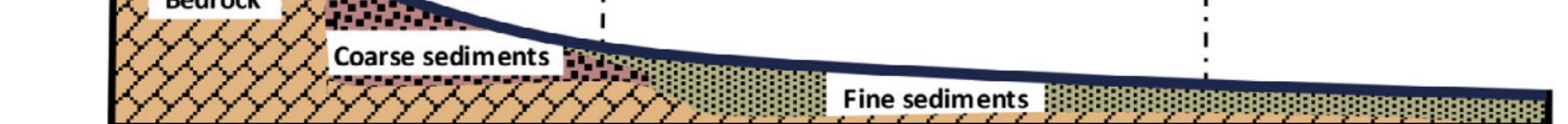
Longitudinal and vertical hydrological connectivity

or

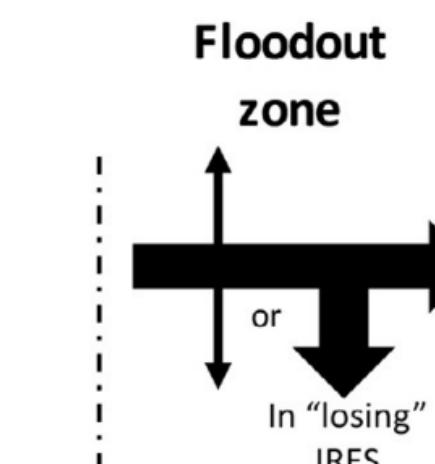
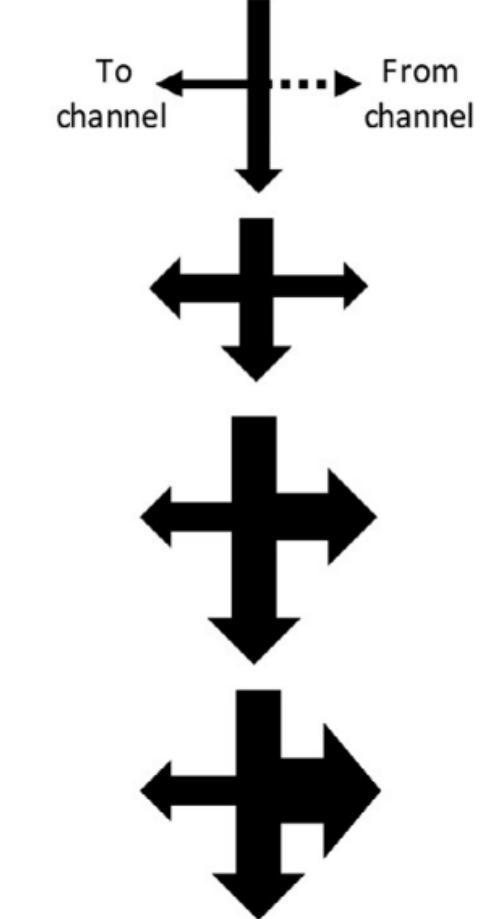
or

In "losing" IRES

In "losing" IRES



Longitudinal and lateral hydrological connectivity



Skalen, Konnektivität & Skalenübergang

Praktischer Umgang

1. Skalen* klären:

- Beobachtungen
- Konzepte
- Hypothesen
- Fragestellung
- (beabsichtigte) Ergebnisse

2. Skalenübergänge vermeiden!

3. Dominate Prozesse:

- analysiere welche Prozesse/Eigenschaften das System kontrollieren
- behandle diese Analyse als Hypothesen
- es ist unmöglich und wenig zielführend jedes Detail mitzunehmen

4. Skalenübergänge:

- überprüfe ob die (Dis)Aggregation insb. von Prozessen physik. begründet ist

5. Konnektivität:

- gibt es verbundene Fließpfade, die das System modifizieren?

* im Sinne des Skalentriplets

Gradienten und Freiheitsgrade

der universelle Antrieb von Prozessen

Gradient:

- Änderung einer Größe auf einer bestimmten Strecke
- Bestimmen das Potenzial
- in Hydrologie: Topographie ($E_{\text{pot}, \text{H}_2\text{O}}$), Kapillarität im Boden, Dampfdruck, etc.

Freiheitsgrade:

- frei wählbare Bewegungsmöglichkeiten
- innere und äußere Parameter eines Systems
- in Hydrologie: welche Prozesse sind möglich ohne das System zu zerstören

Lineares Flussmodell

(zB. Ohm, Darcy, ...)

Strom

$$I = U/R$$

Spannung

Widerstand

Fluss

$$Q = K \cdot \nabla H$$

1/Widerstand

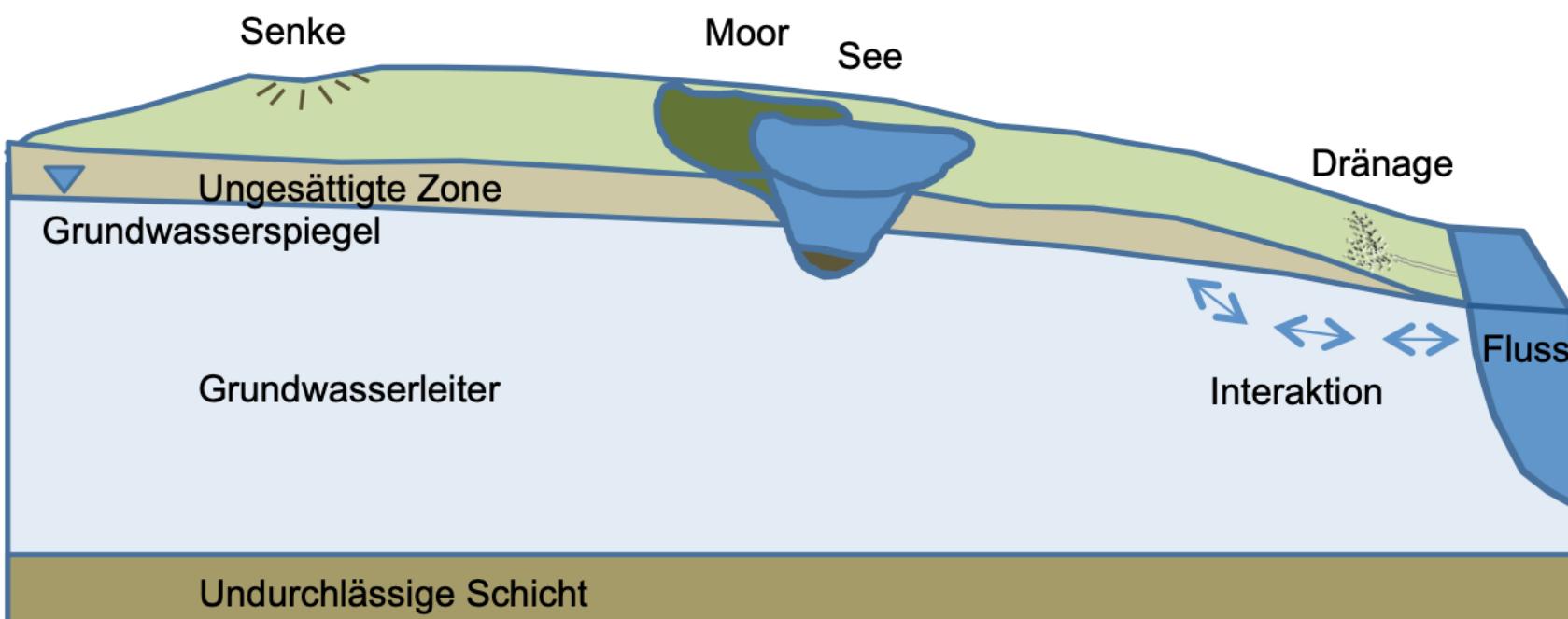
Druckgradient

Gradienten und Freiheitsgrade

der universelle Antrieb von Prozessen

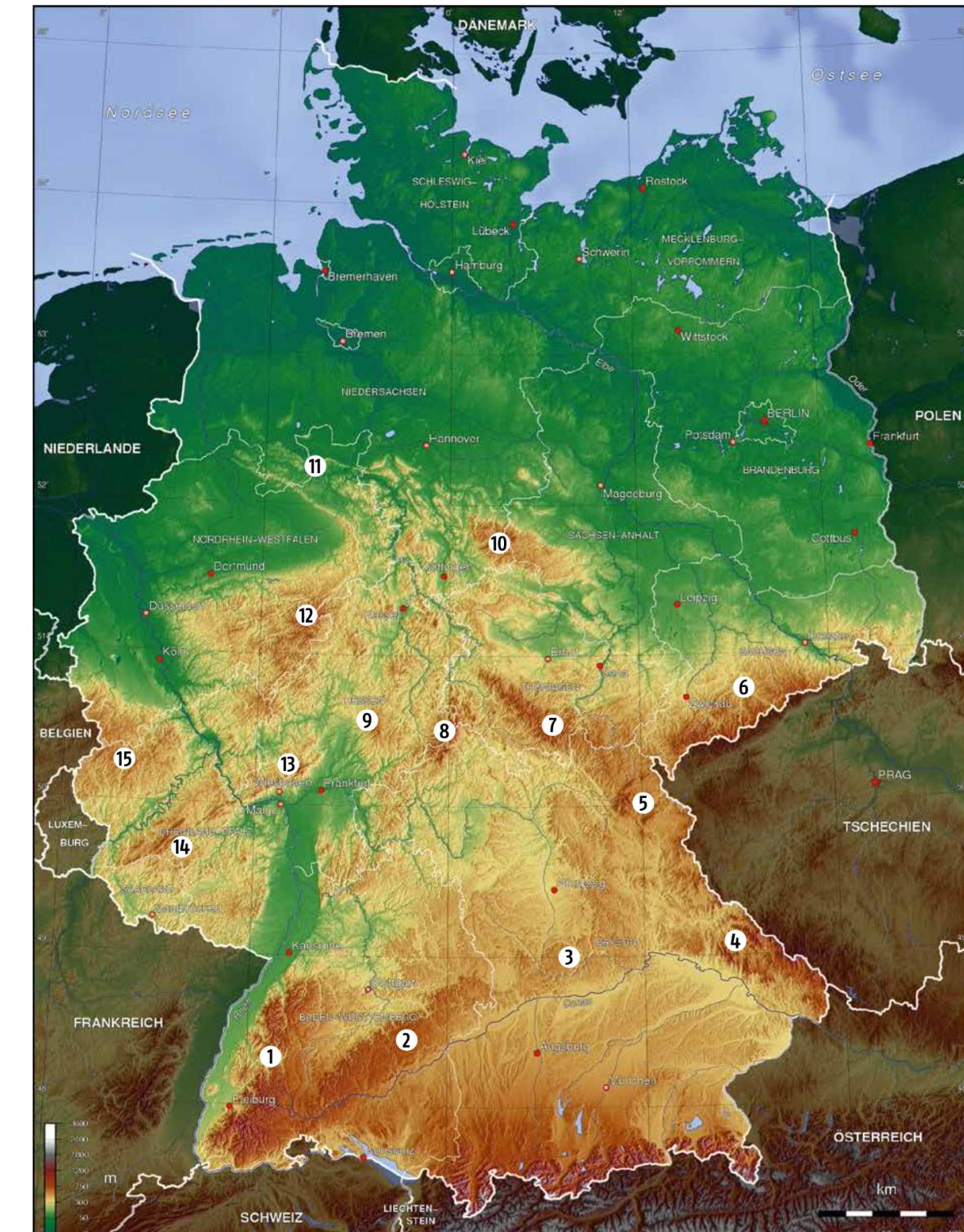
Tieflandhydrologie:

- geringe Höhenunterschiede
- lokale Senken
- Grundwasser & Stauer



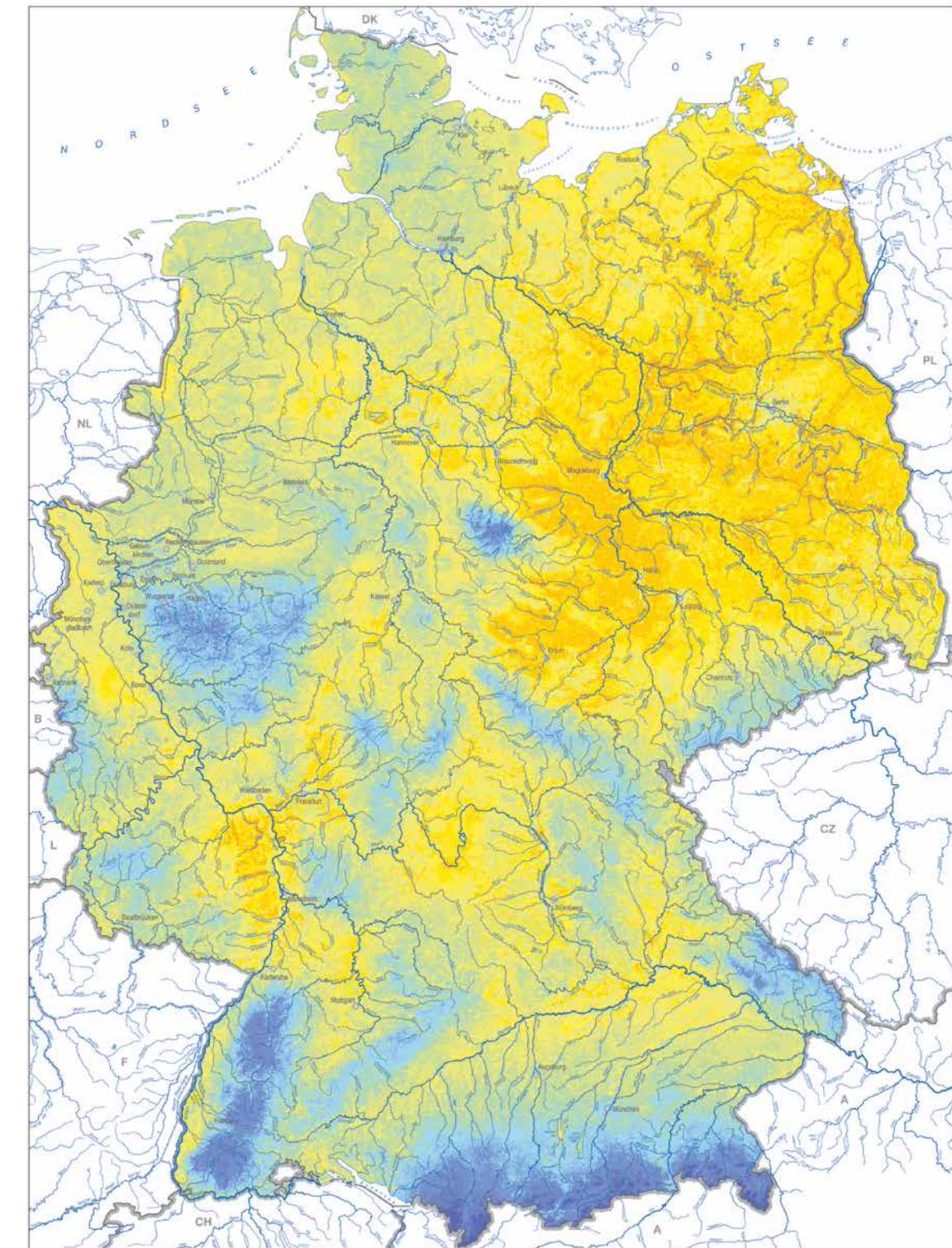
Mittelgebirge:

- viel Wasser
- Zwischenabfluss



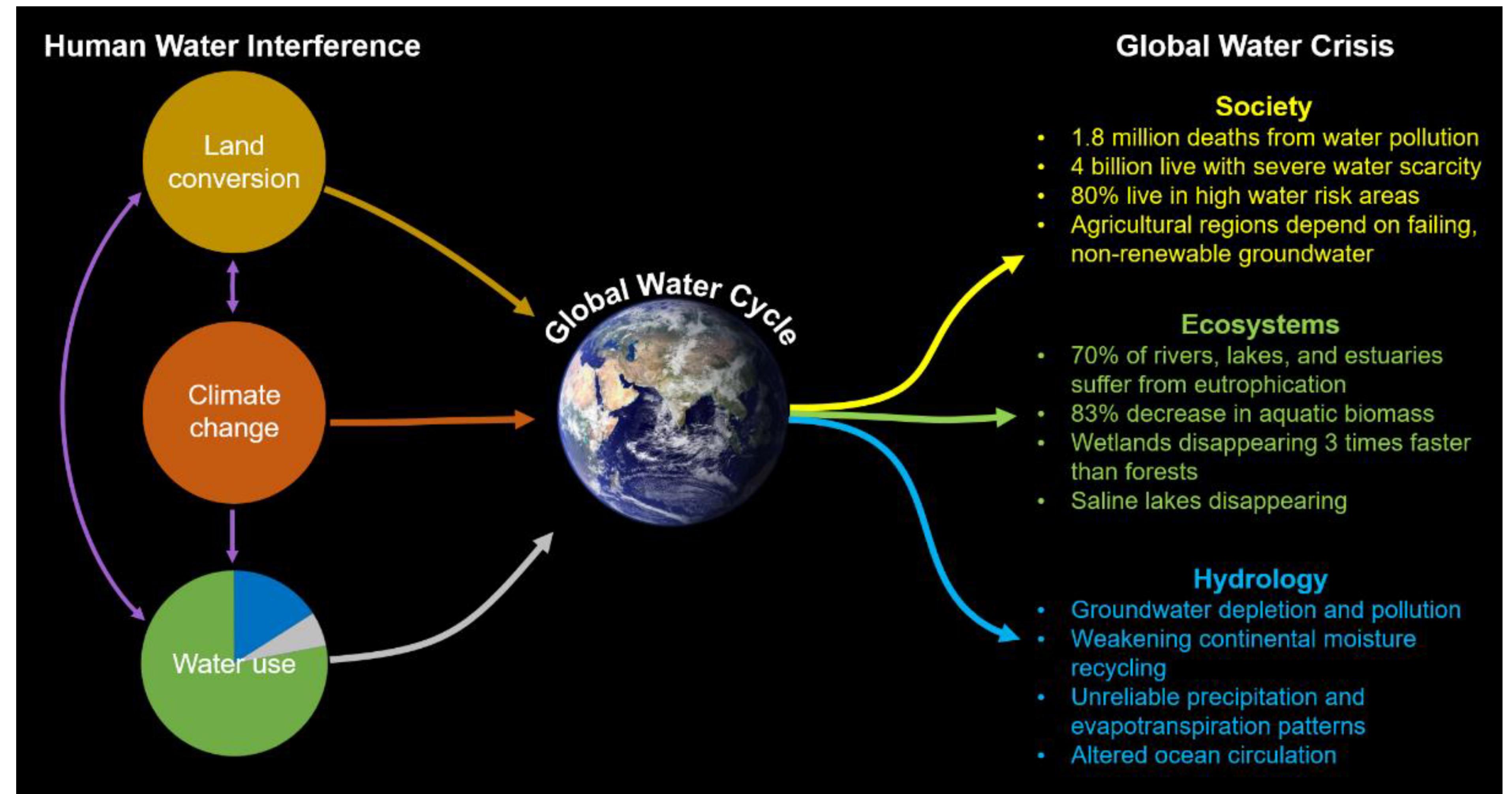
Body Level One

- Body Level Two
- Body Level Three

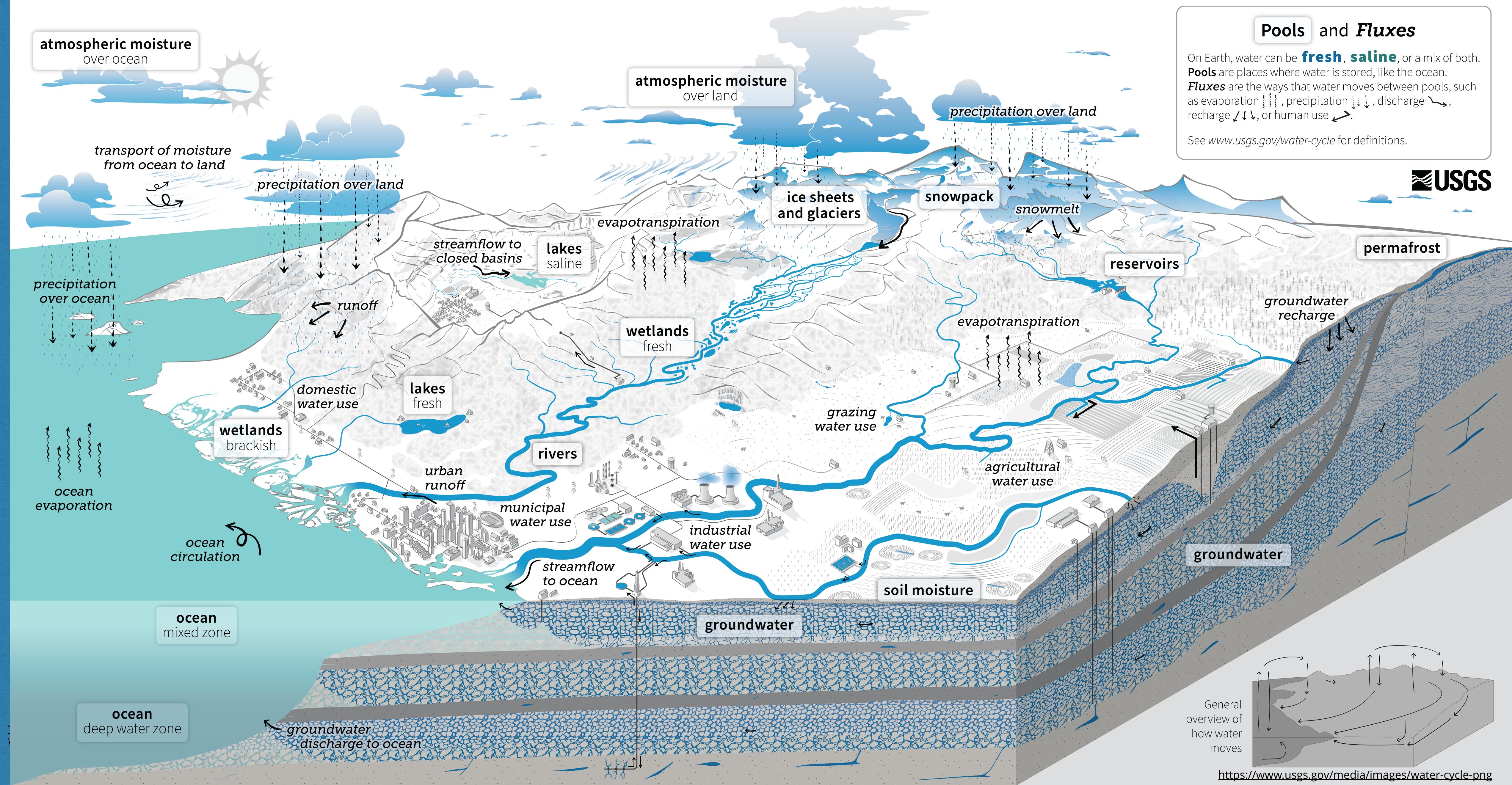


Hydrologie im Anthropozän

Versuch der Abschätzung des Einflusses der Menschen auf den Wasserkreislauf



updated water cycle from USGS



Danke für euer Interesse.

Im SoSe geht es weiter mit den Anwendungen...

