

Grundvorlesung Hydrologie

Einzugsgebietshydrologie und Prozesse der Abflussbildung



Hochwasser Juli 2021 an der Ahr bei Kreuzberg

Dr. Jan Bliefernicht
Lehrstuhl für Regionales Klima und Hydrologie
Institut für Geographie
Universität Augsburg

Überblick zur Vorlesung

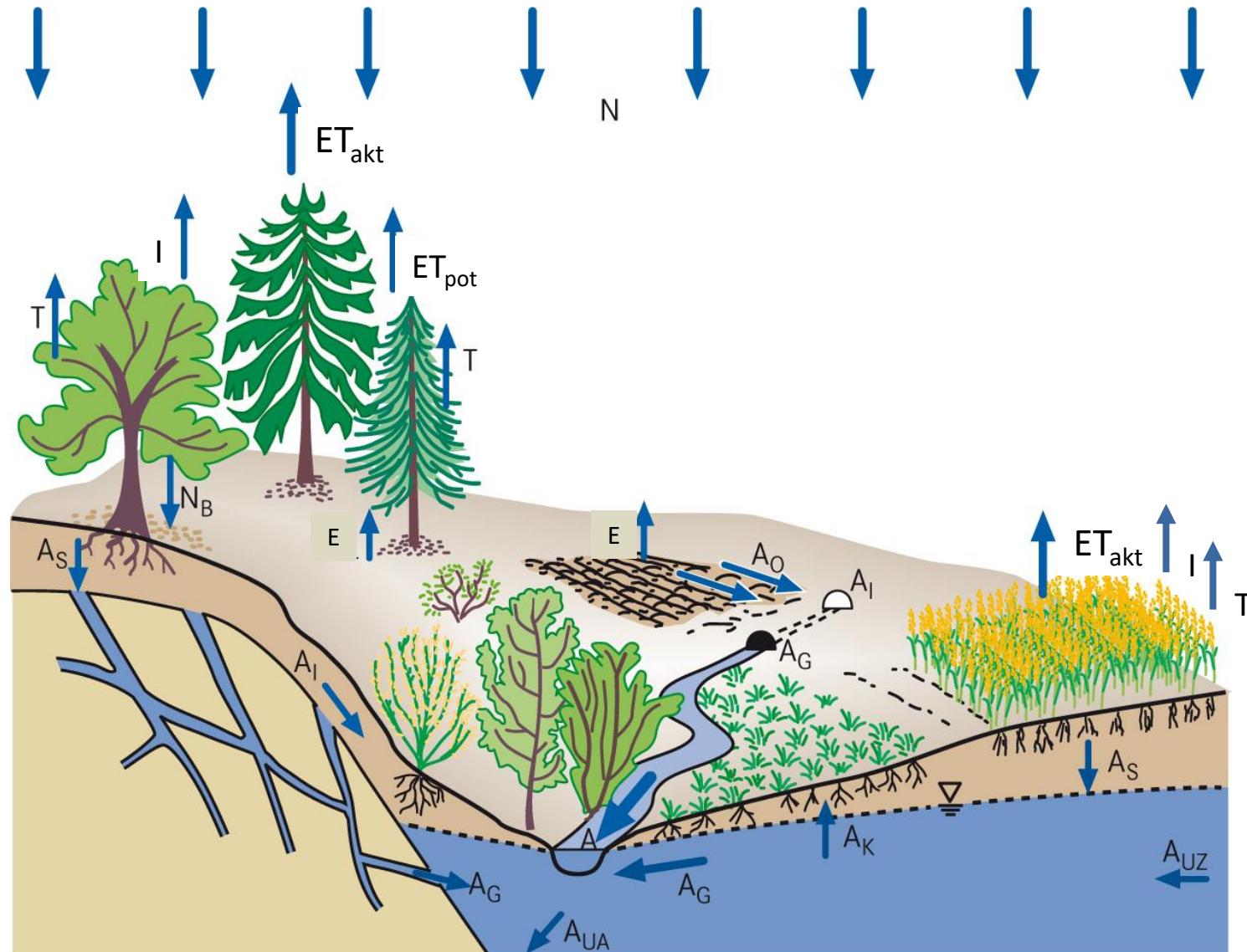
1. Einführung in die Wasserforschung
2. Wasser als Stoff
3. Das Wasser auf der Erde und seine Verteilung
4. Die Ozeane
5. Die Kryosphäre und ihre Bedeutung im globalen Wasserhaushalt
6. Das Wasser im Untergrund
7. Das Wasser der Atmosphäre
8. Fließgewässer und Seen im Wasserkreislauf
- 9. Einzugsgebietshydrologie**
- 10. Prozesse der Abflussbildung**

Gliederung der heutigen Veranstaltung

1. Unterteilung des Abflussprozesses
2. Prozesse der Abflussbildung: Infiltration, ...
3. Prozesse der Abflusskonzentration:
 - Bildungsmechanismen des Oberflächenabflusses
 - Bildung von Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss
4. Fließvorgang im offenen Gerinne (siehe Kap. 8 „Fließgewässer ...“)
5. Einzugsgebiete von Gewässern und ihre Abgrenzungen
6. Einflussgrößen des Abflussgeschehens: Allgemein und am Beispiel des Ahrhochwassers 2021
7. Anmerkungen zur Klausur

1. Unterteilung des Abflussprozesses

Wasserflüsse an der Landoberfläche



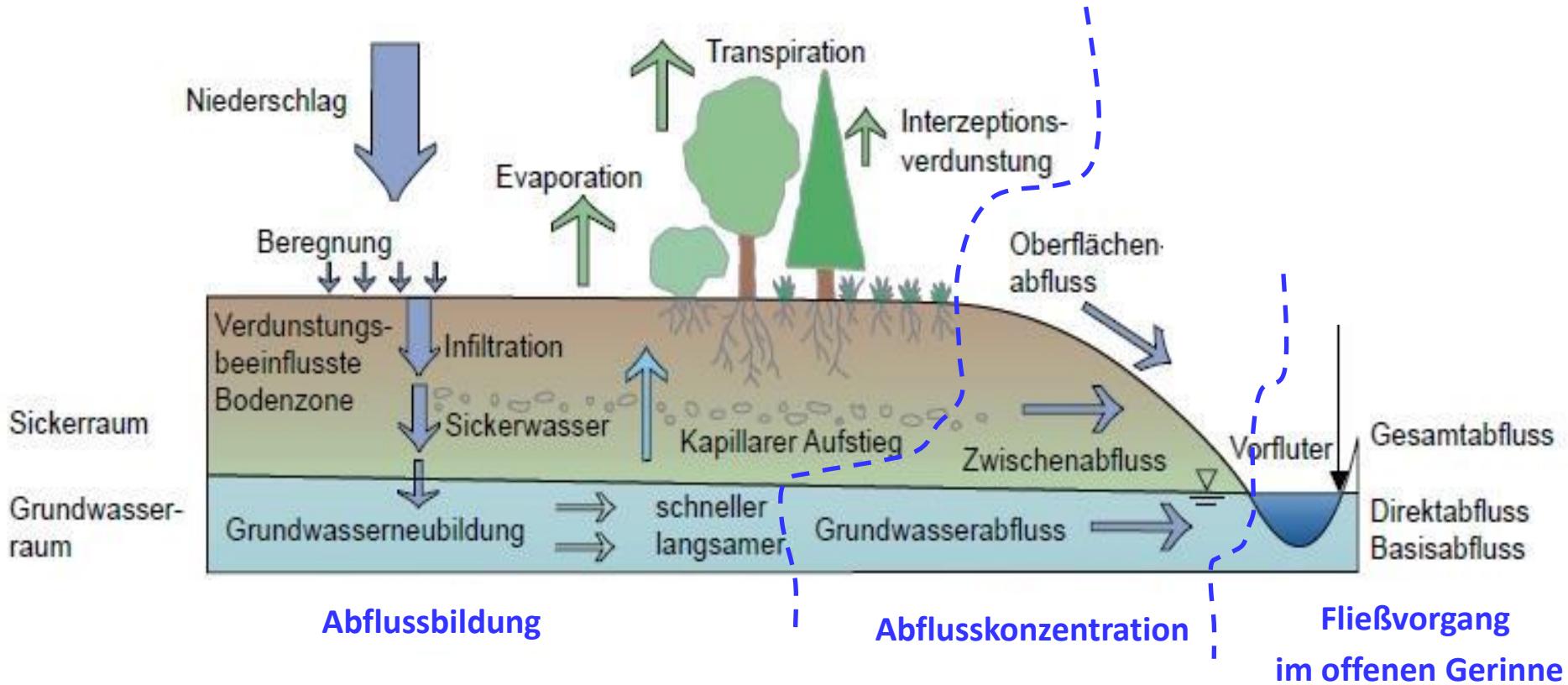
leicht angepasst aus Gebhart et al. (2007)

Unterteilung des Abflussprozesses

Unterteilung in drei Vorgänge nach Liebscher (1996):

1. Prozesse der **Abflussbildung**
2. Prozesse der **Abflusskonzentration**
3. **Fließvorgang im offenen Gerinne** (Fließgewässer)
 - Vielzahl von hydrologischen Prozessen (Niederschlag, Verdunstung, Infiltration, ...) sind daran beteiligt (siehe nächste Folie)
 - zeitlicher Ablauf von 1 zu 3
 - gerichtete Prozesse

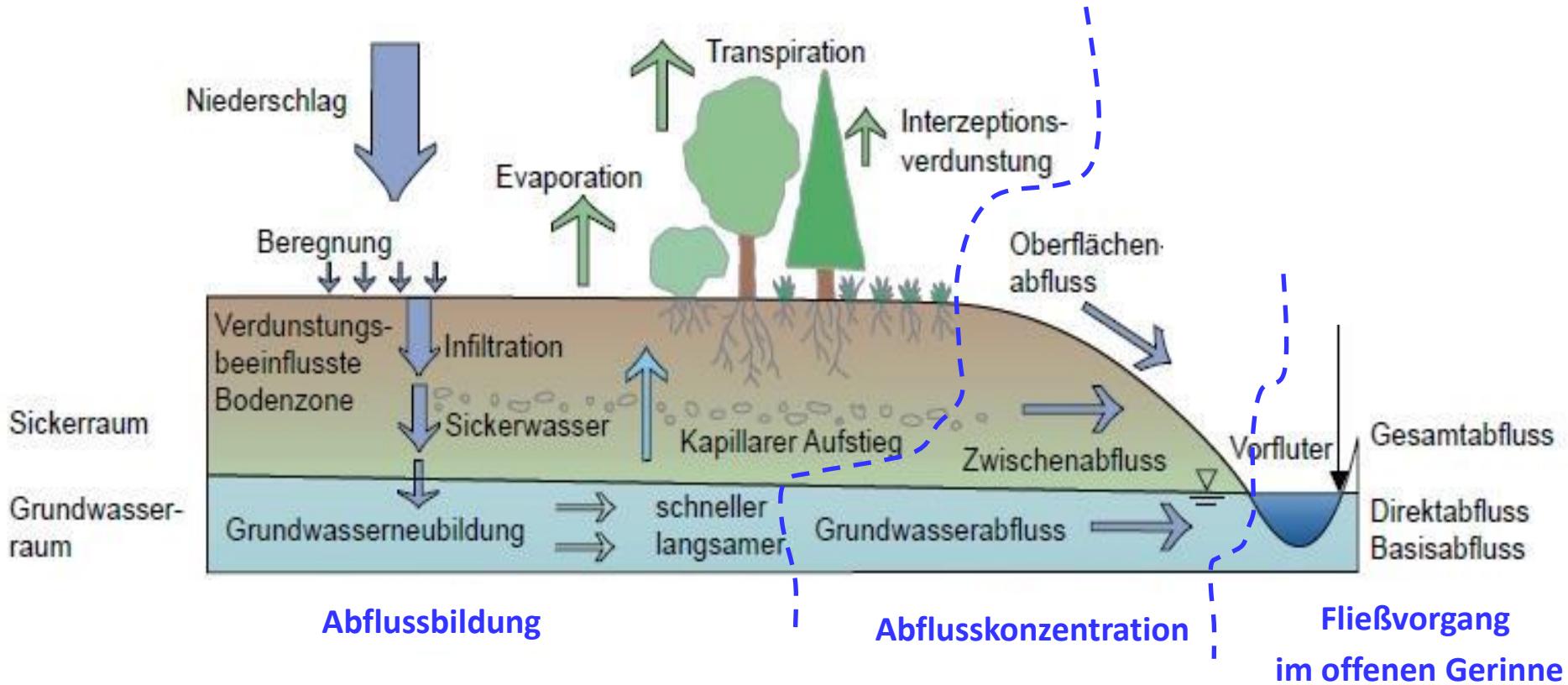
Prozesse der Abflussbildung und -konzentration



leicht modifiziert nach LFU Bayern (2021), <https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>

2. Prozesse der Abflussbildung: Infiltration, ...

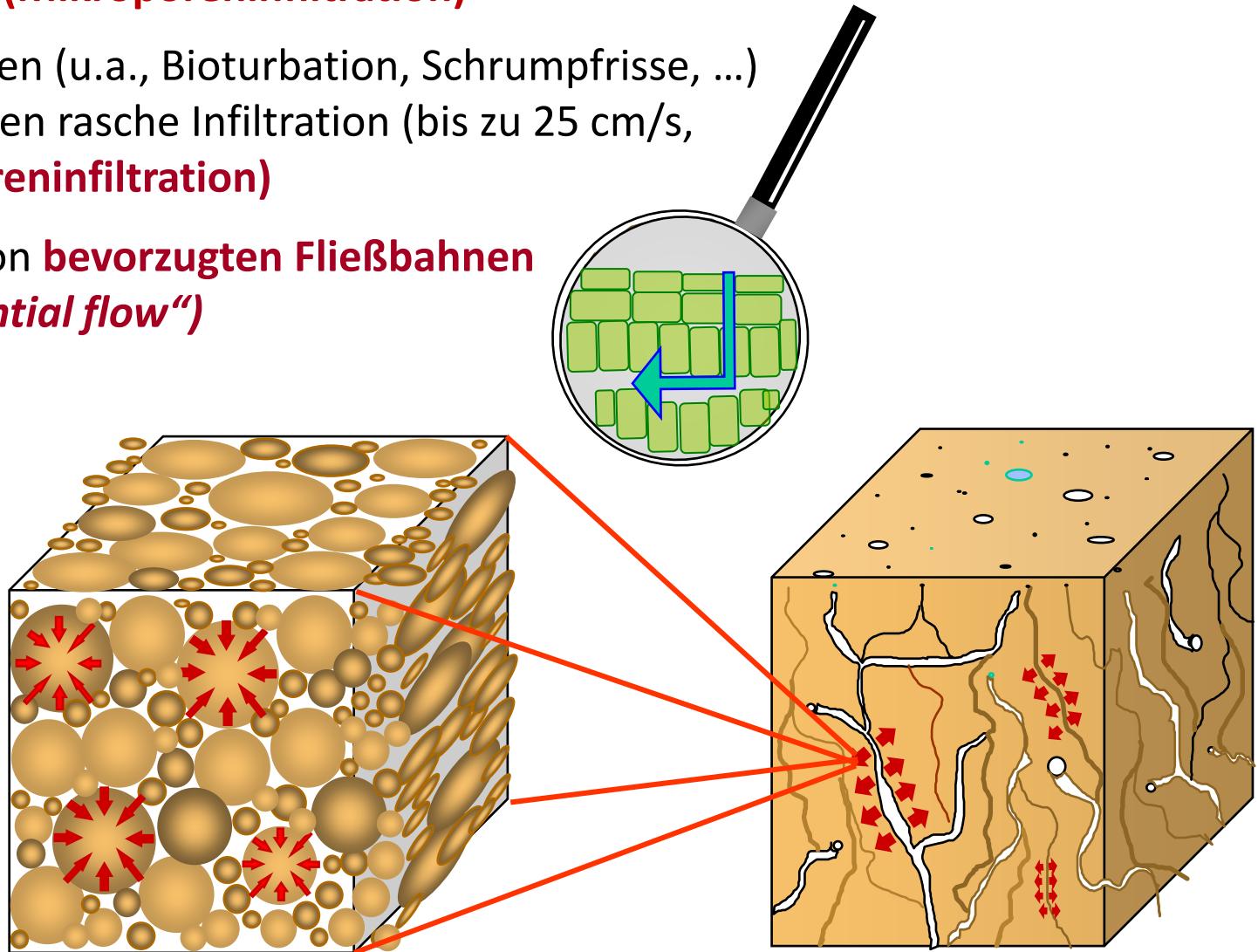
Prozesse der Abflussbildung und -konzentration



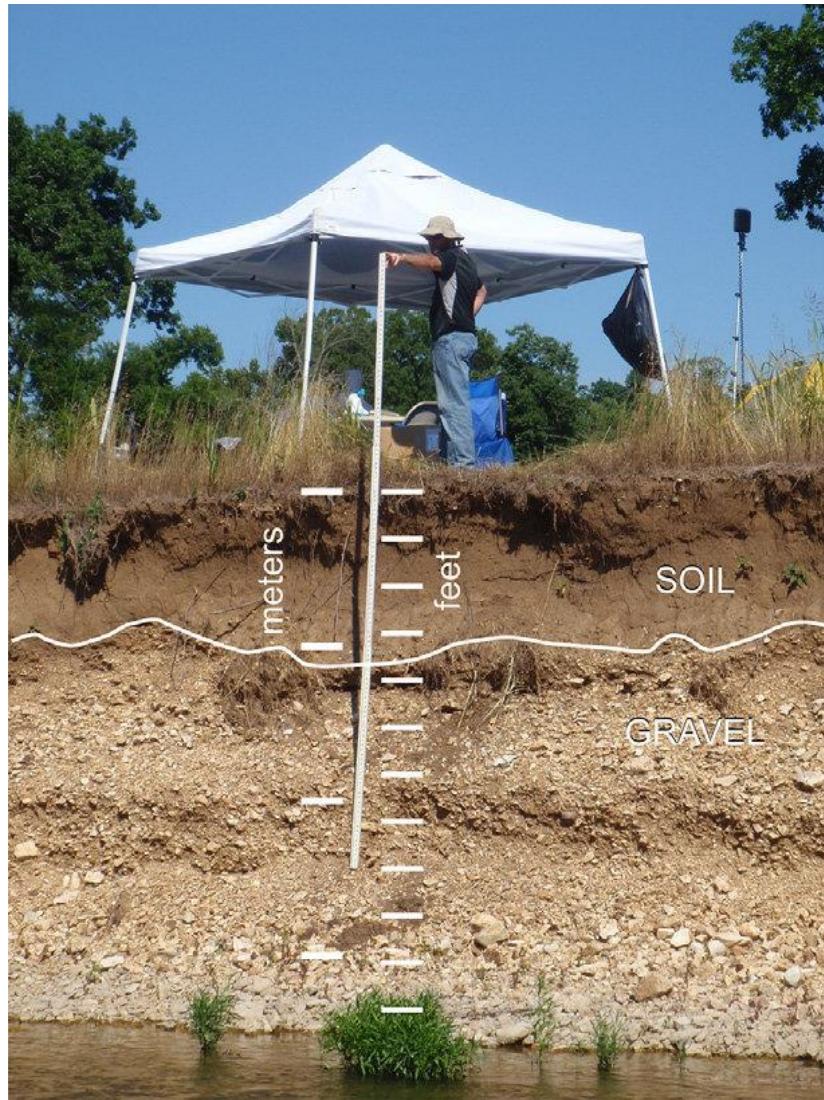
leicht modifiziert nach LFU Bayern (2021), <https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>

Mikro- und Makroporeninfiltration

- Infiltrationsrate wird nicht nur von Körnung (Bodenart) bestimmt (**Mikroporeninfiltration**)
- Weite Poren (u.a., Bioturbation, Schrumpfrisse, ...) ermöglichen rasche Infiltration (bis zu 25 cm/s, **Makroporeninfiltration**)
- Bildung von **bevorzugten Fließbahnen** (*„preferential flow“*)



Beregnungsversuche mit künstlichen Tracern



Halihan et al. (2019)

Tracerexperimente: bevorzugte Fließbahnen

Haplic Luvisol



Haplic Cambisol

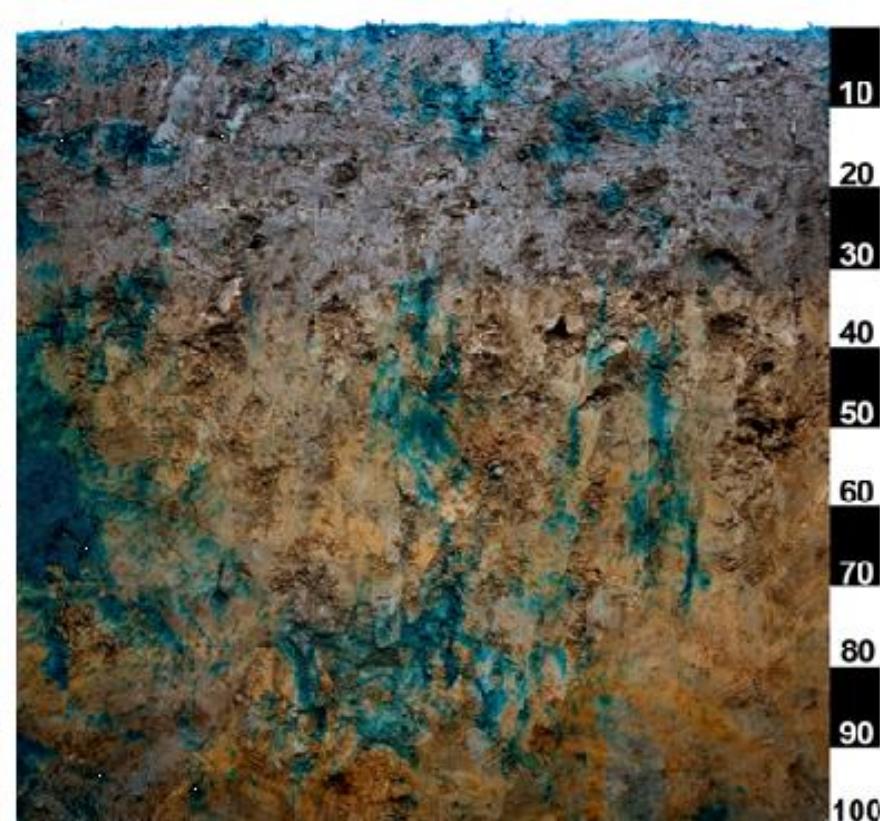
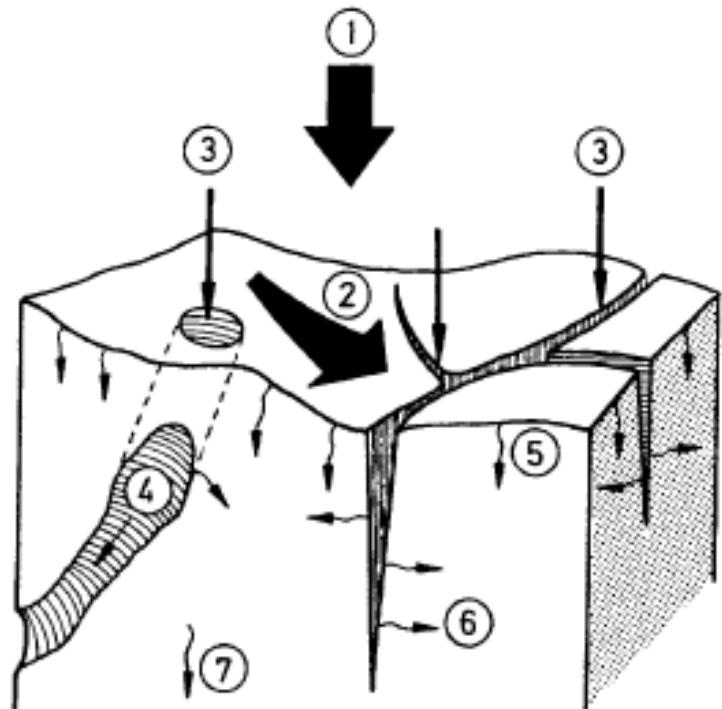


Figure 1. Examples of staining patterns within the vertical sections in Haplic Luvisol in Hněvčevs (left) and Haplic Cambisol in Humpolec (right). Diagnostic horizons of Haplic Luvisol: Ap₁ (0 – 25 cm), Ap₂ (25 - 35 cm), Bt₁ (35 - 75 cm) and Bt₂ (75 - 100 cm). Diagnostic horizons of Haplic Cambisol: Ap (0 – 33 cm), Bw (33 - 65 cm) and C (65 – 100 cm).

Kodešová et al. (2010, S. 118)

Prozesse der Infiltration

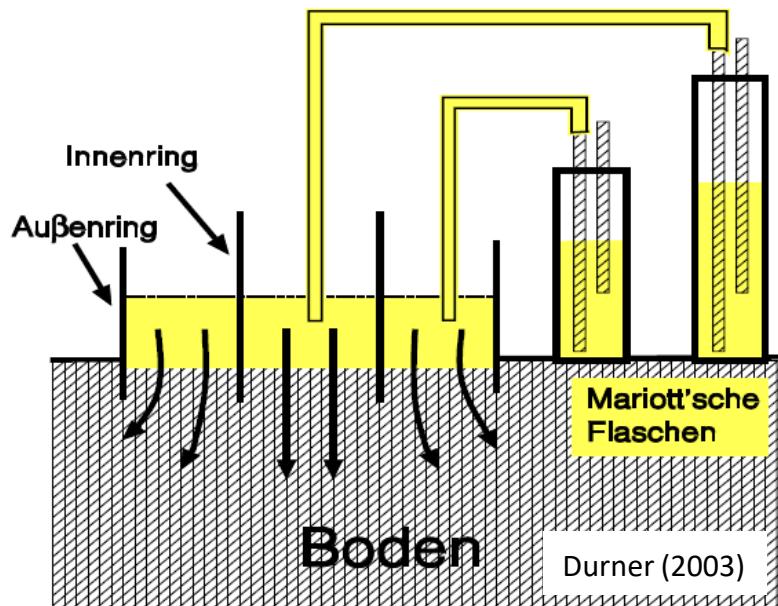


aus Baumgartner & Liebscher (1996, S.396) nach
Germann (1981) verändert durch Bronstert (1994)

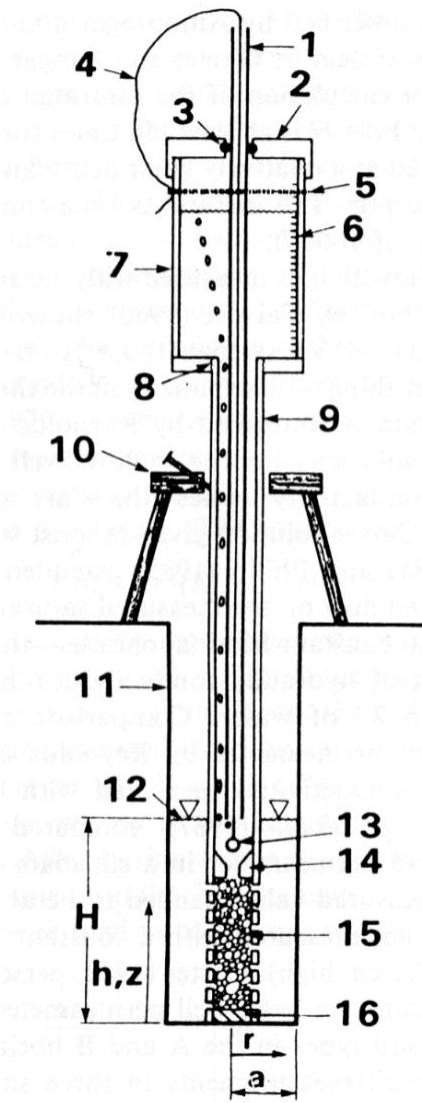
- 1: Niederschlag
- 2: Oberflächenabfluss
- 3: Versickerung in die Makroporen von der Bodenoberfläche
- 4: Versickerung innerhalb der Makroporen
- 5: Versickerung in die Mikroporen von der Bodenoberfläche
- 6: Versickerung von den Makroporen in die Mikroporen
- 7: Versickerung in den Mikroporen

Messtechnische Erfassung der Infiltration

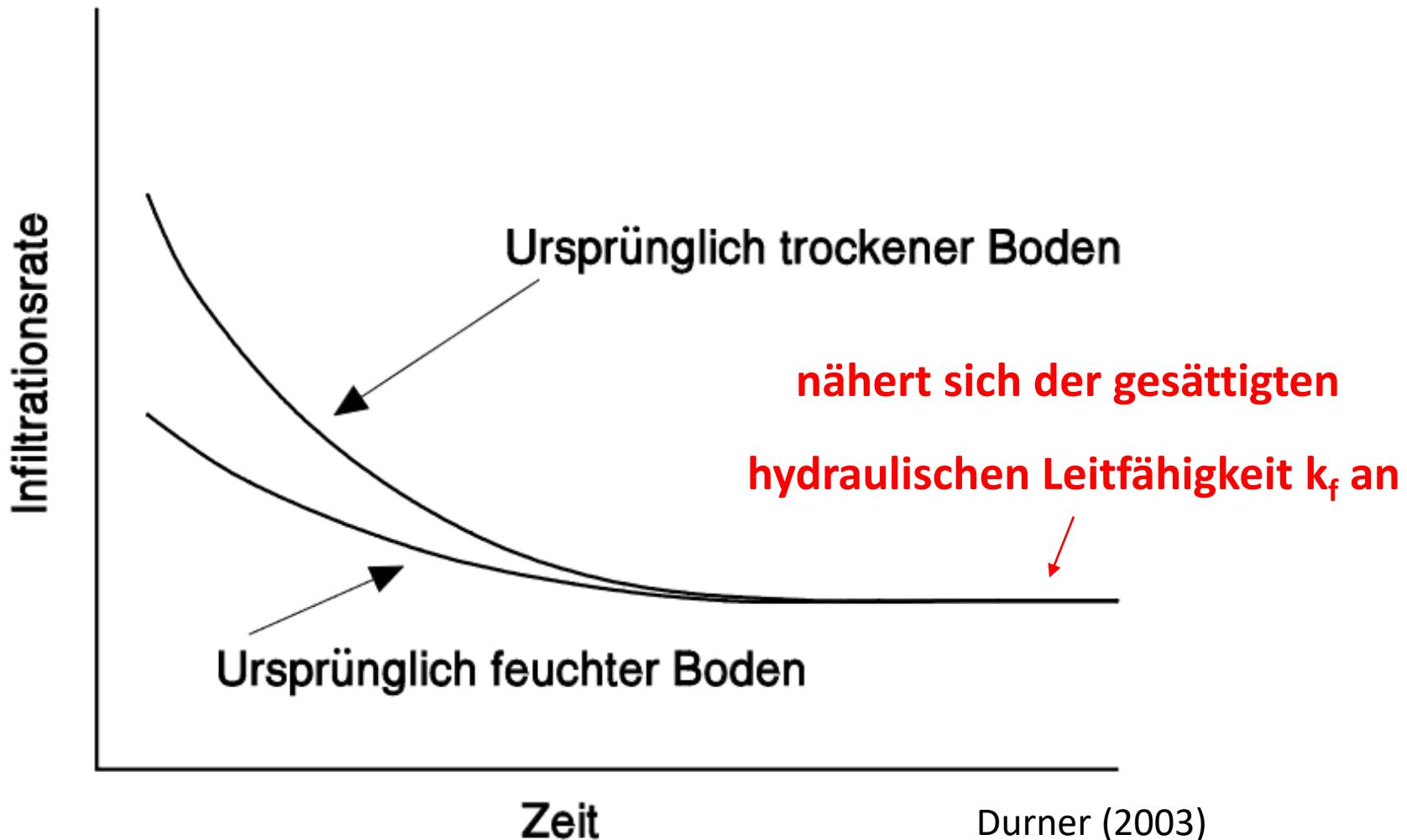
Doppelringinfiltrometer



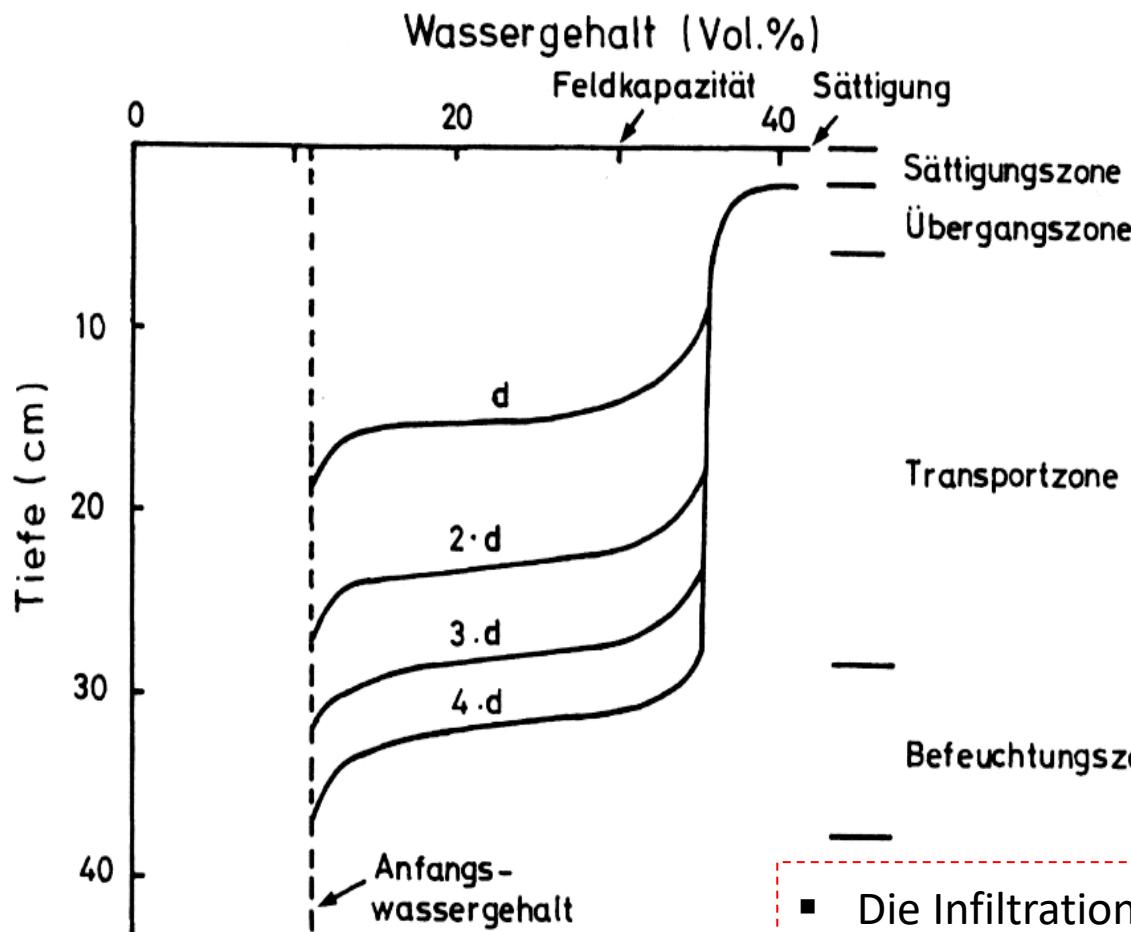
Röhreninfiltrometer



Zeitliches Schema des Infiltrationsprozesses



Räumliches Schema des Infiltrationsprozess



aus Mattheß & Ubell (2003, S.220) nach Bodman & Colman (1944)

- Die Infiltration ist in den seltensten Fällen so gleichmäßig wegen den Makroporen
- Nur bei homogenen Böden der Fall

Lockergesteine und ihre Durchlässigkeit

Lockergestein	Gesamtporenanteil n_p [%]	eff. Porenanteil n_{eff} [%]	Durchlässigkeit	
			k_f [m/s]	T [°C]
sandiger Kies	25 – 35	20 – 25	$3 \cdot 10^{-3} – 5 \cdot 10^{-4}$	10 – 100
kiesiger Sand	28 – 35	15 – 20	$1 \cdot 10^{-3} – 2 \cdot 10^{-4}$	10 – 100
mittlerer Sand	30 – 38	10 – 15	$4 \cdot 10^{-4} – 1 \cdot 10^{-4}$	10 – 100
schluffiger Sand	33 – 40	8 – 12	$2 \cdot 10^{-4} – 1 \cdot 10^{-5}$	10 – 100
sandiger Schluff	35 – 45	5 – 10	$5 \cdot 10^{-5} – 1 \cdot 10^{-6}$	10 – 100
toniger Schluff	40 – 55	3 – 8	$5 \cdot 10^{-6} – 1 \cdot 10^{-8}$	10 – 100
schluffiger Ton	45 – 65	2 – 5	$10^{-8} – 10^{-10}$	10 – 100

k_f -Wert für unterschiedliche Dauern

	m/s	m/min	m/h	m/d
Sand	0.0001	0.006	0.36	8.64
Schluff	0.000001	0.00006	0.0036	0.0864
Ton	0.0000001	0.000006	0.00036	0.00864

2. Prozesse der Abflusskonzentration

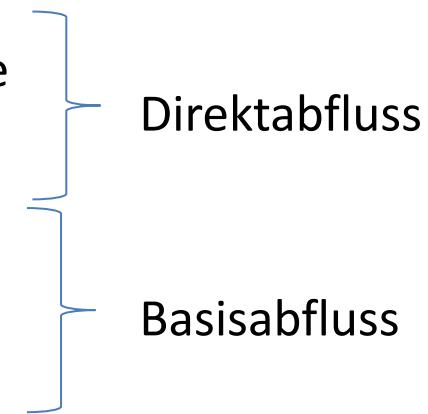
-

Bildungsmechanismen des
Oberflächenabflusses

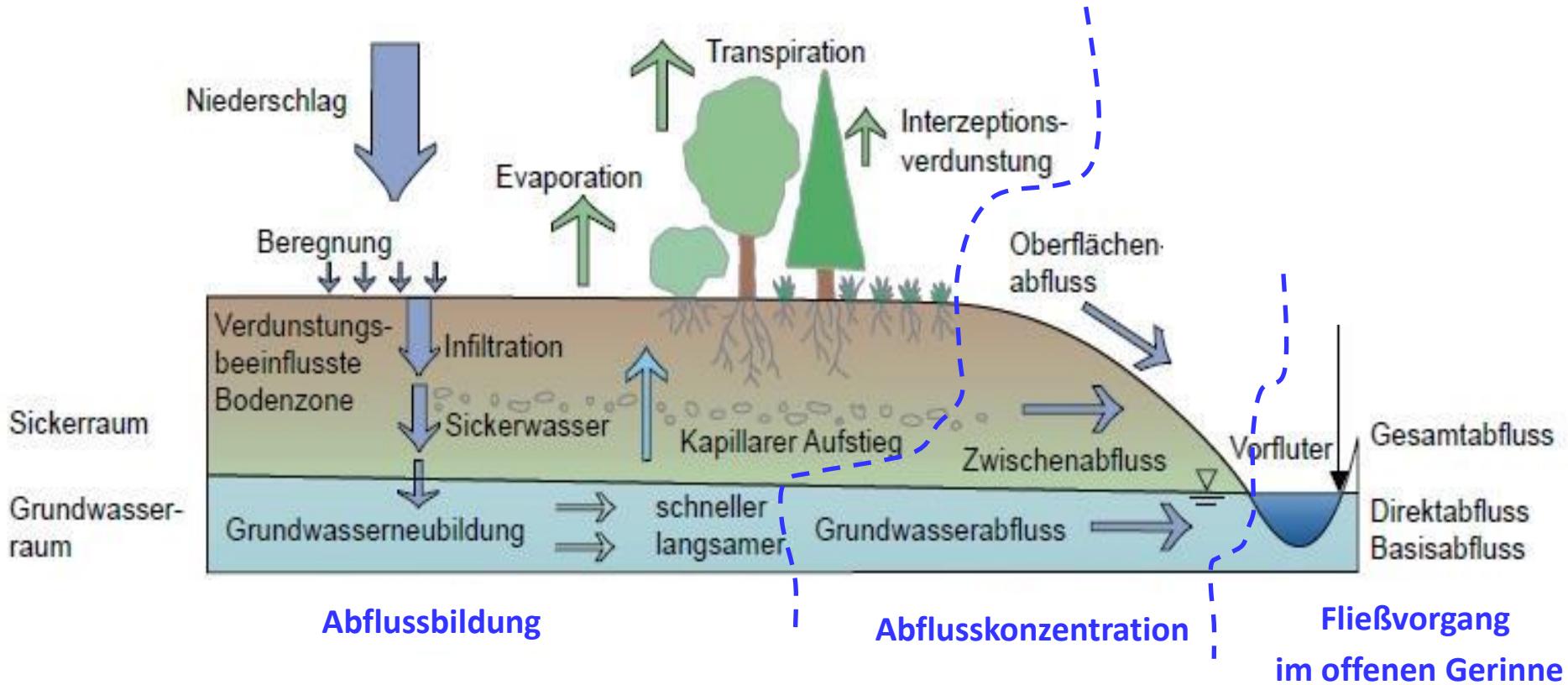
Prozesse der Abflusskonzentration

Es lassen sich drei Typen unterscheiden (Fohrer et al., 2016)

- **Oberflächenabfluss:** Abfluss an der Landoberfläche
- **Zwischenabfluss:** Abfluss in der ungesättigten Zone nahe der Landoberfläche (Sickerraum)
- **Grundwasserzufluss:** Abfluss in der gesättigten Zone (Grundwasserkörper)

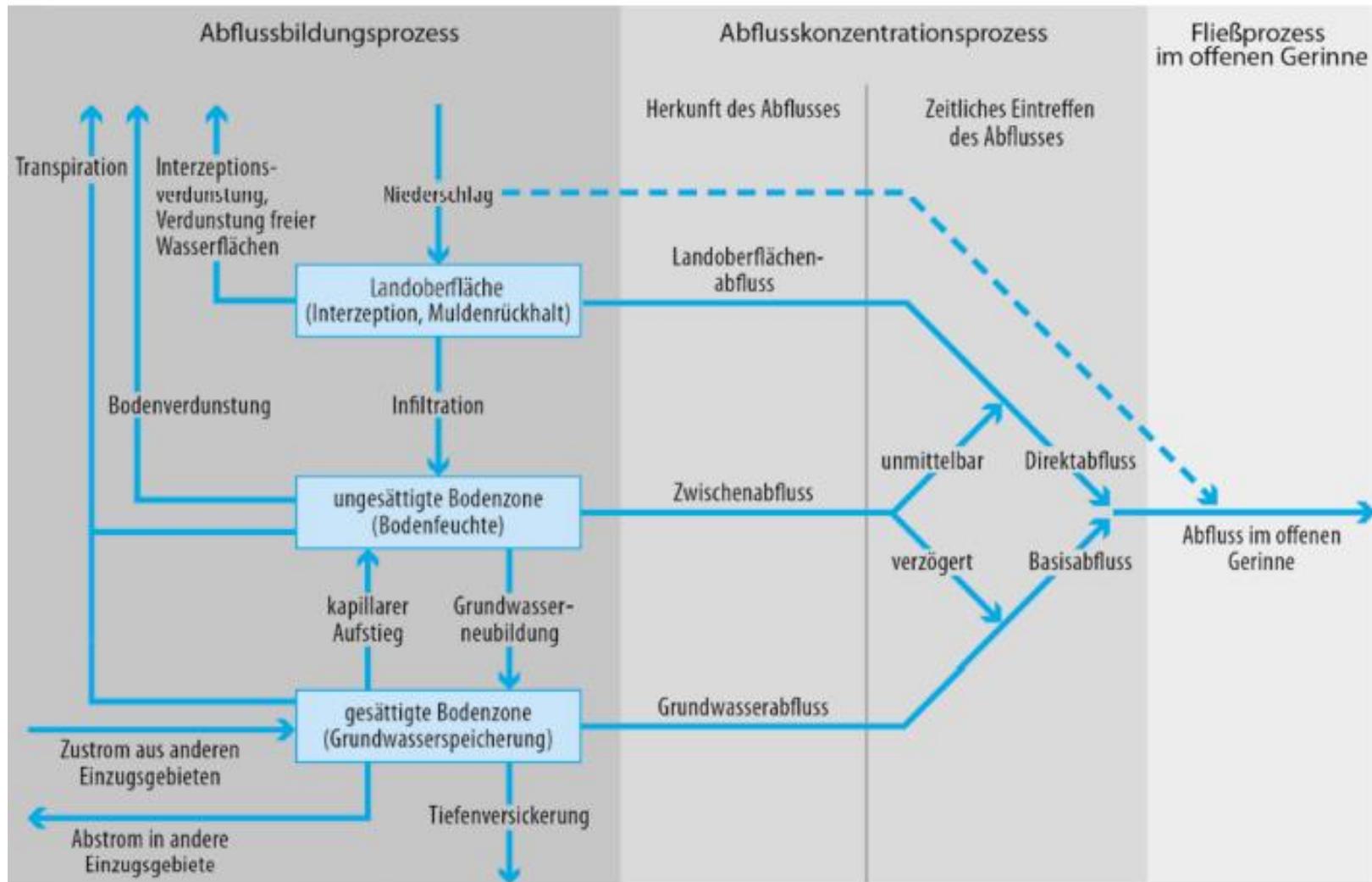


Prozesse der Abflussbildung und -konzentration

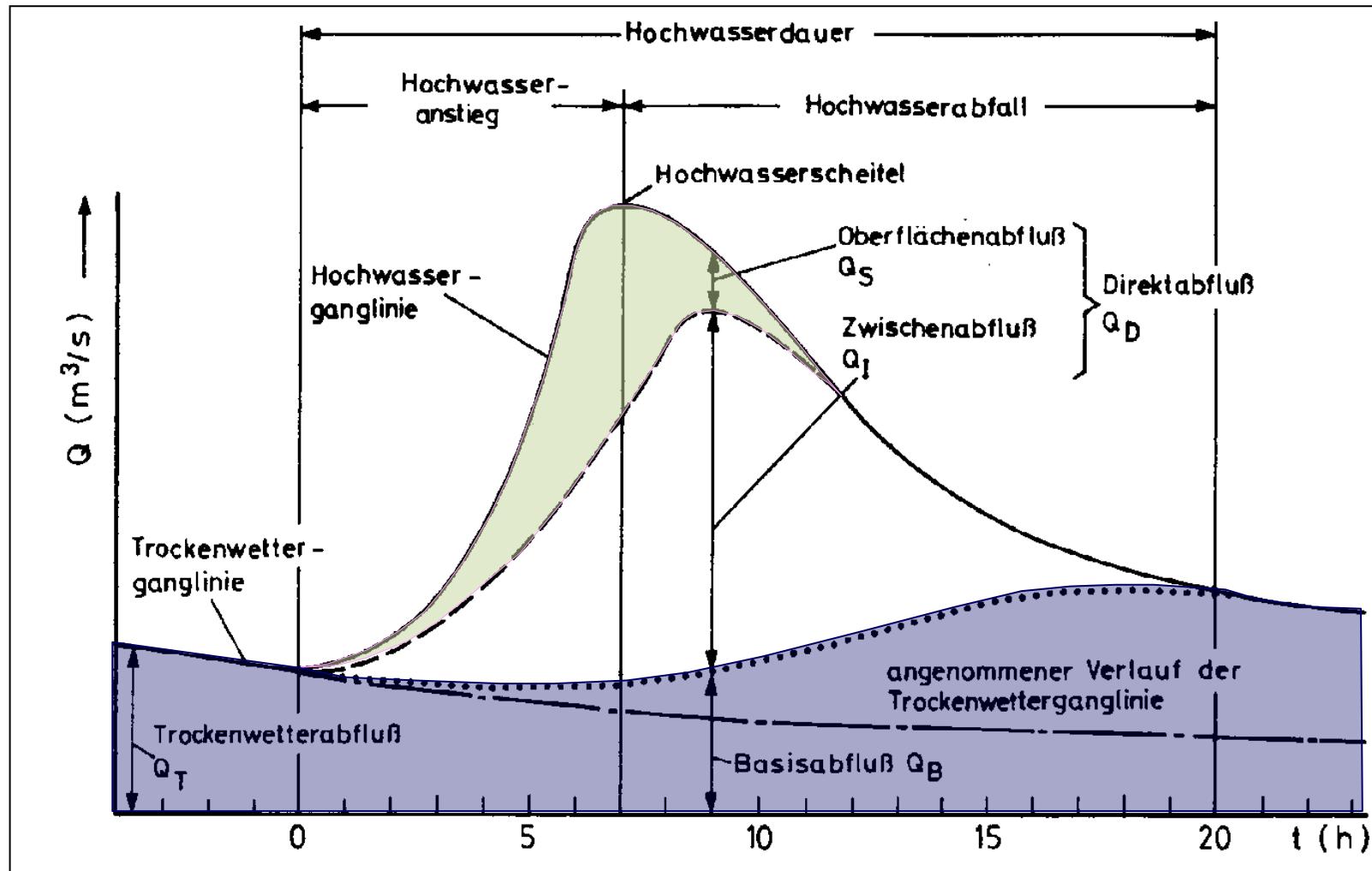


leicht modifiziert nach LFU Bayern (2021), <https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>

Schema der Abflussbildung und –konzentration



Schematische Darstellung einer Hochwasserwelle



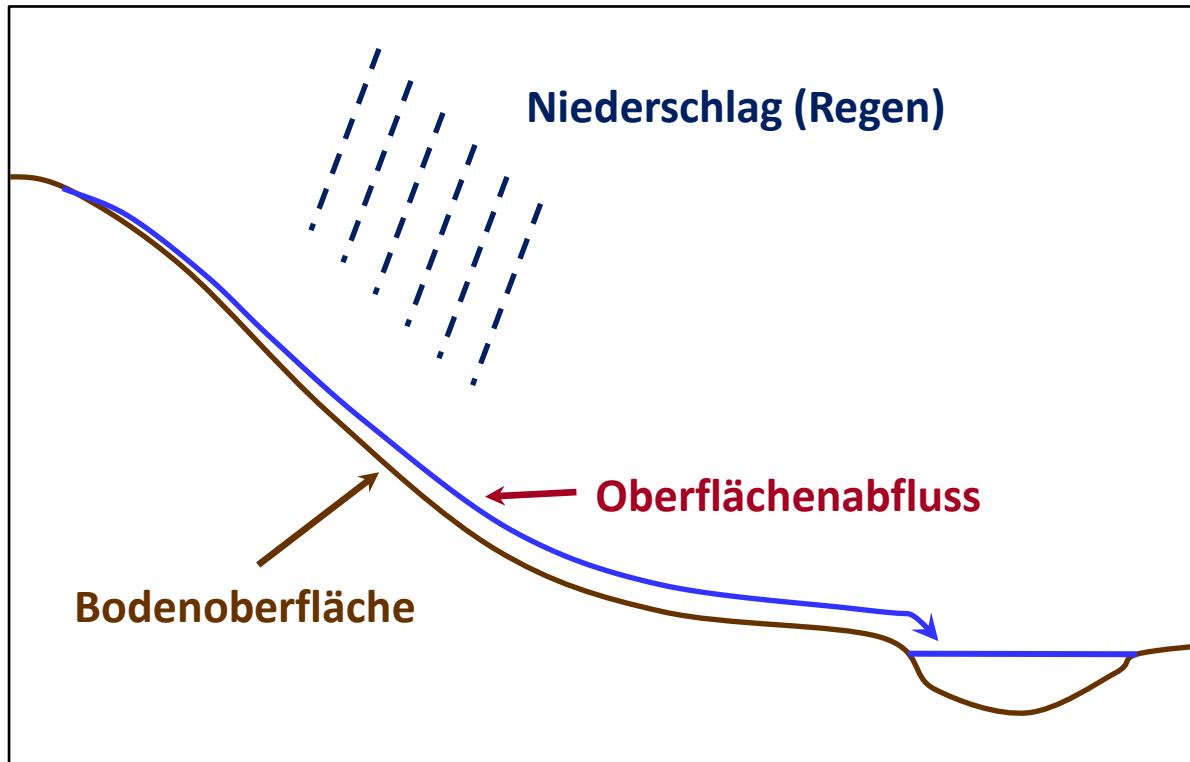
Bildung von Oberflächenabfluss

Es werden drei Mechanismen unterschieden:

1. **Infiltrationsüberschuss:** Hortonscher Oberflächenabfluss
2. **Sättigungsüberschuss:** Dunnescher Oberflächenabfluss
3. Zwischenabfluss tritt an der Oberfläche aus:
Wiederaustretendes Wasser (engl., „*Return Flow*“)

Infiltrationsüberschuss

Oberflächenabfluss entsteht, wenn **Regenintensität > Infiltrationsrate**



Einflussfaktoren:

- Intensität des Niederschlagsereignisses
- Bodenart: hydraulische Leitfähigkeit, Bodengefüge (Makroporen),
Bodenfeuchte

Infiltrationsüberschuss im steilen Gelände



Hortonscher Landoberflächenabfluss als Hauptursache für Sturzfluten

relevant: im steilen Gelände / versiegelte Bereich (Städte)

https://www.youtube.com/watch?v=3_HN5I4FvQ8

Infiltrationsüberschuss in aride Gebiete?



Hortonscher Landoberflächenabfluss auch in ariden und semi-ariden Gebieten sehr relevant!

Mehrere Ursachen: intensive Niederschläge, Vegetationsarmut, Bodenverkrustung

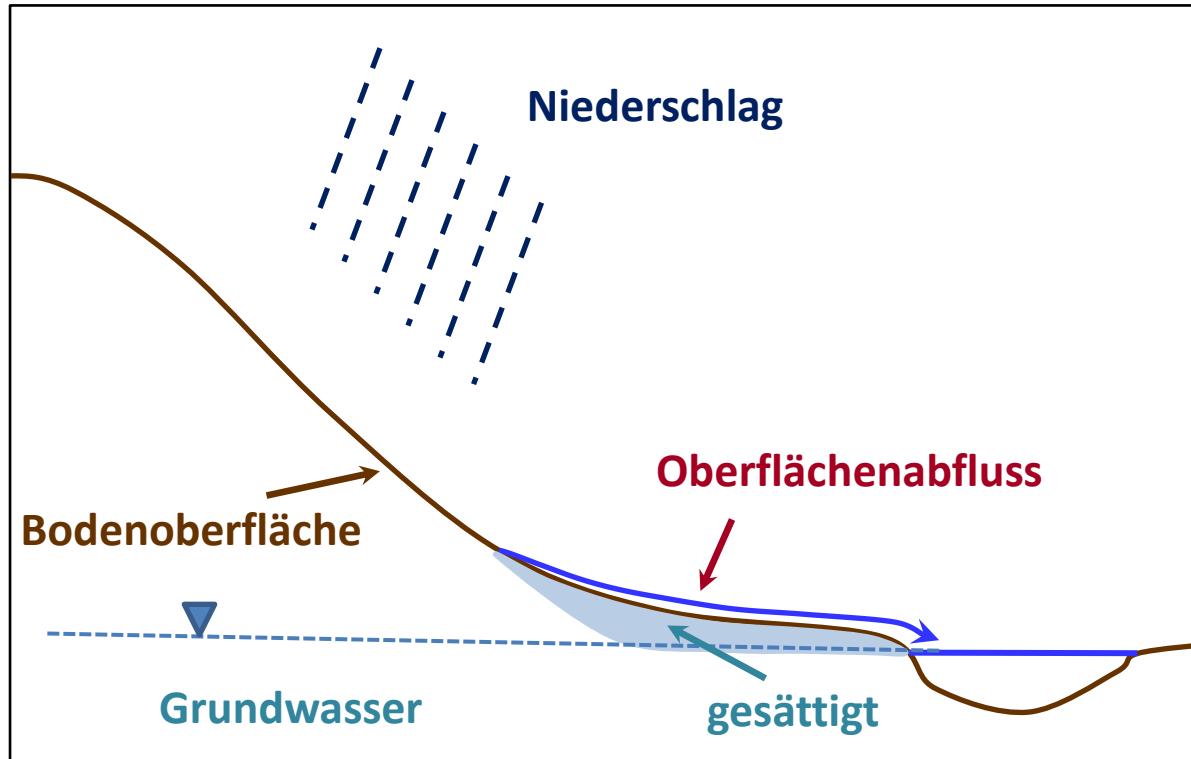


<https://www.bbc.com/news/science-environment-30277514>

<https://drybeanagronomy.ca/>

Sättigungsüberschuss

Oberflächenabfluss entsteht bei **gesättigten Verhältnisse**



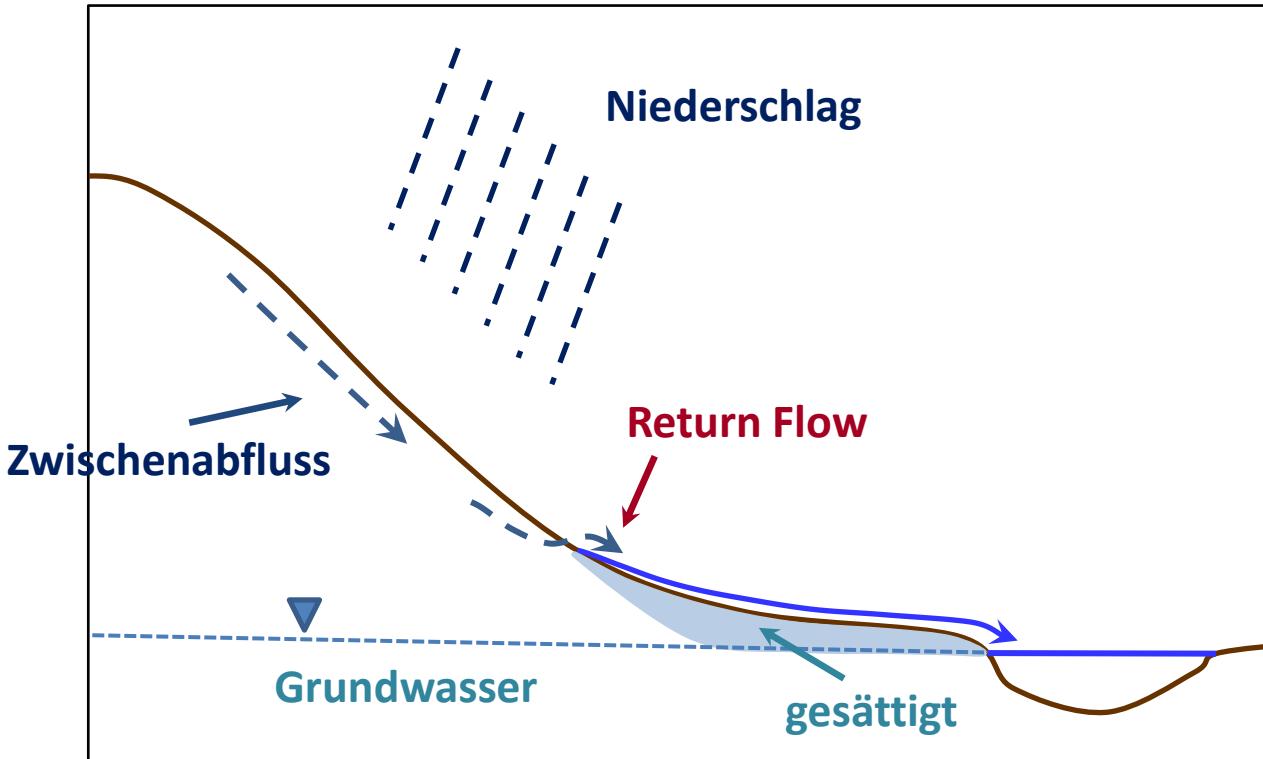
- Infiltrationsrate wird durch **Bodenfeuchte** bestimmt
- vor allem bei nassen Böden z. B. bei grundwassernahen Standorten

Sättigungsüberschuss



Return Flow

Oberflächenabfluss entstehen, wenn Zwischenabfluss wieder austritt



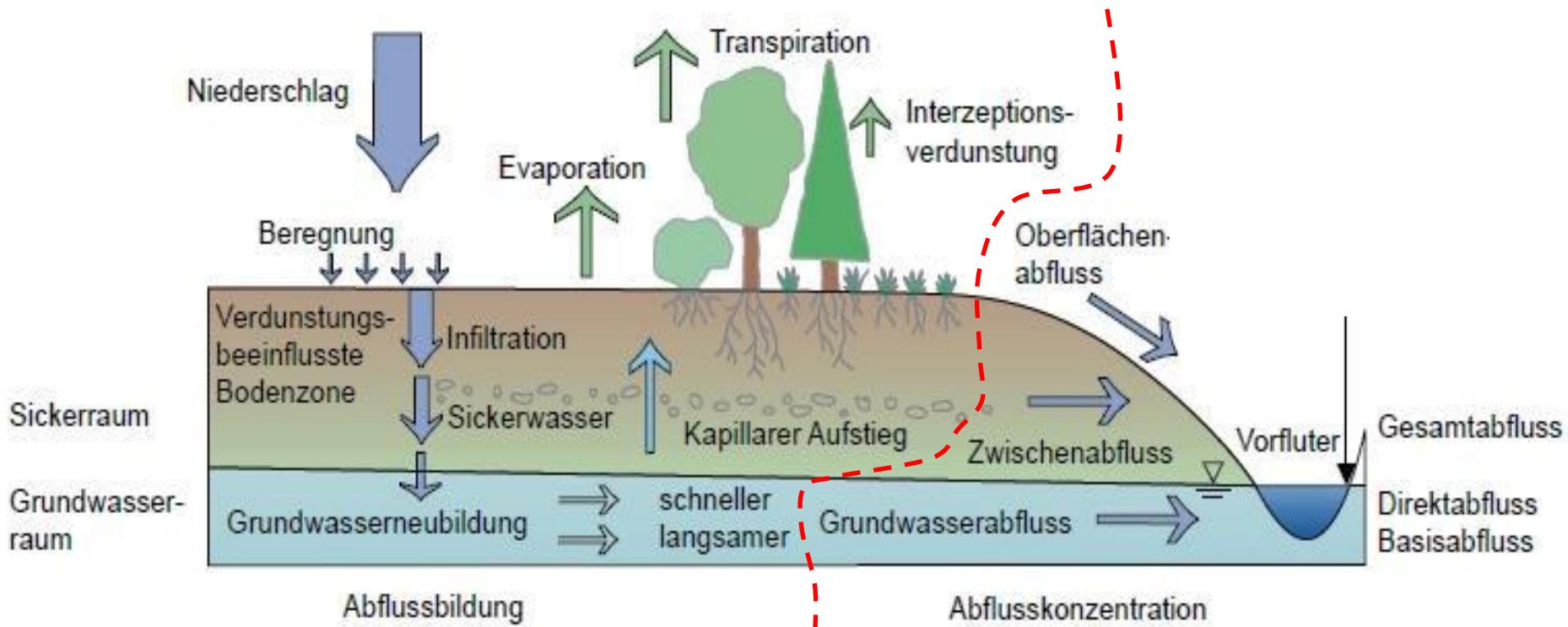
- Infiltriertes Wasser wird durch **Bodenfeuchte** zum Austritt gezwungen
- am Übergang zu gesättigten Bereichen

Return Flow



2. Prozesse der Abflusskonzentration: Bildung von Zwischenabfluss und Grundwasserzufluss

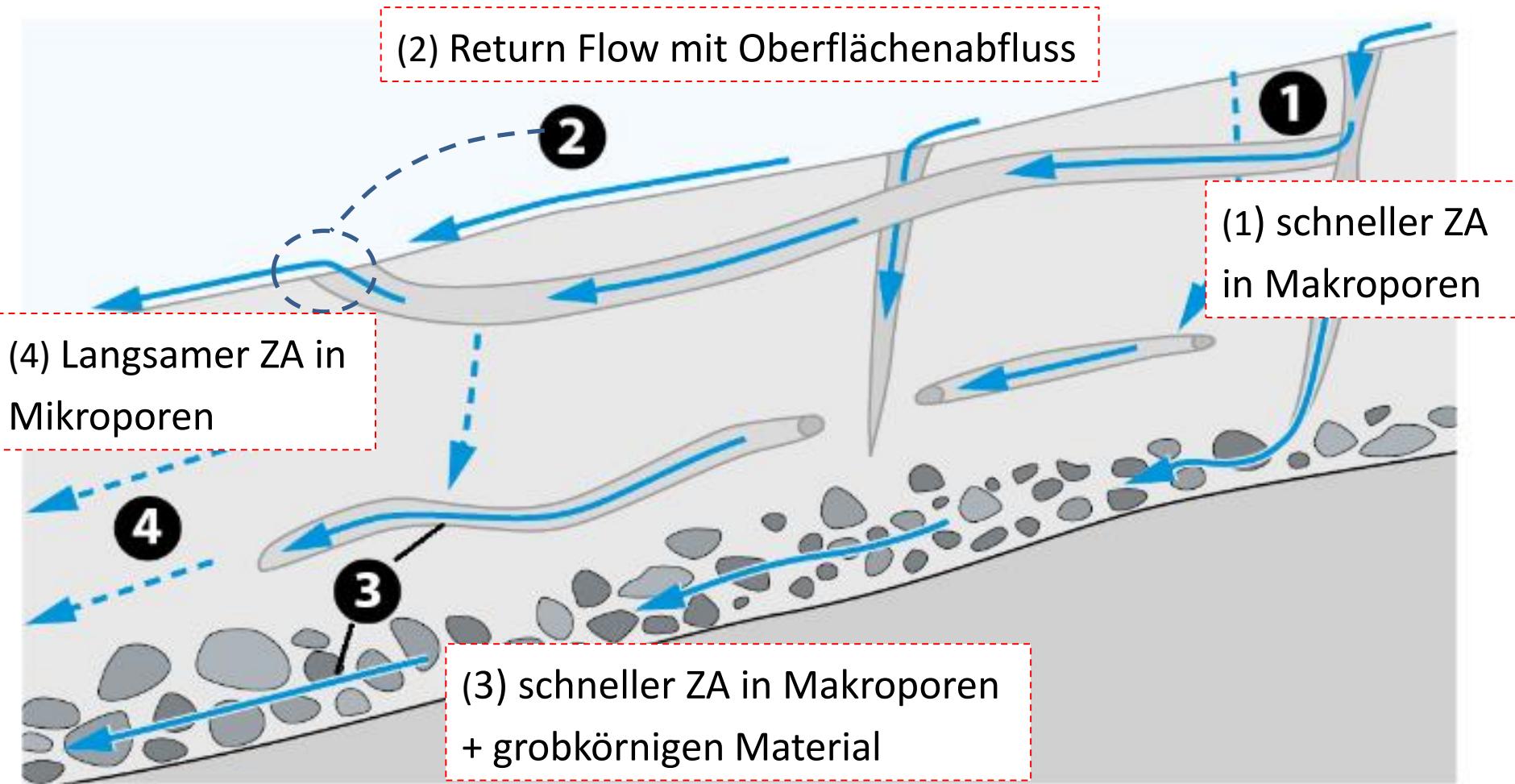
Prozesse der Abflussbildung und -konzentration



<https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>

Zwischenabfluss (ZA): Fließwege in einem Hang

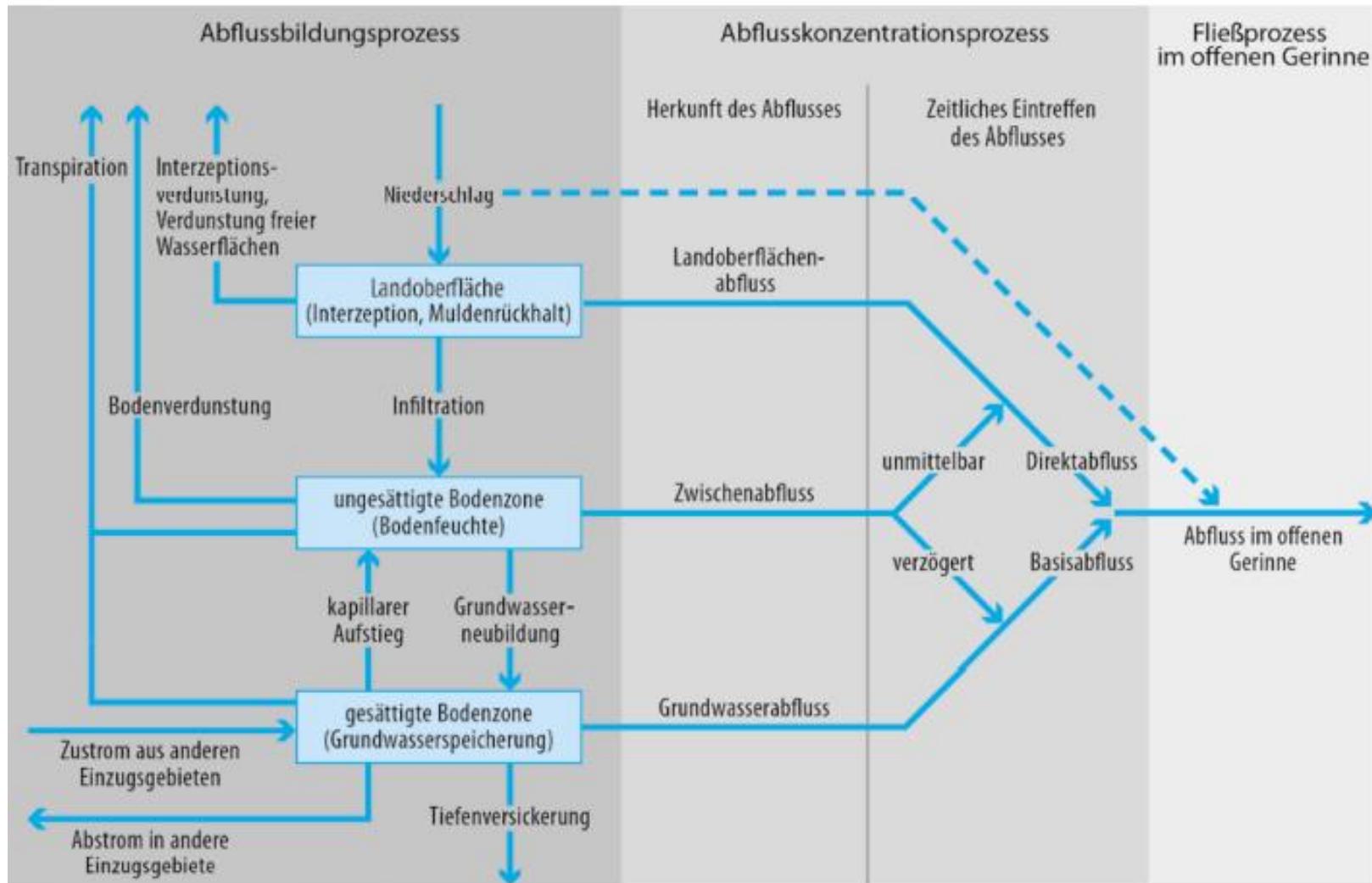
Voraussetzung: Niederschlag, Infiltration von Wasser in den Boden



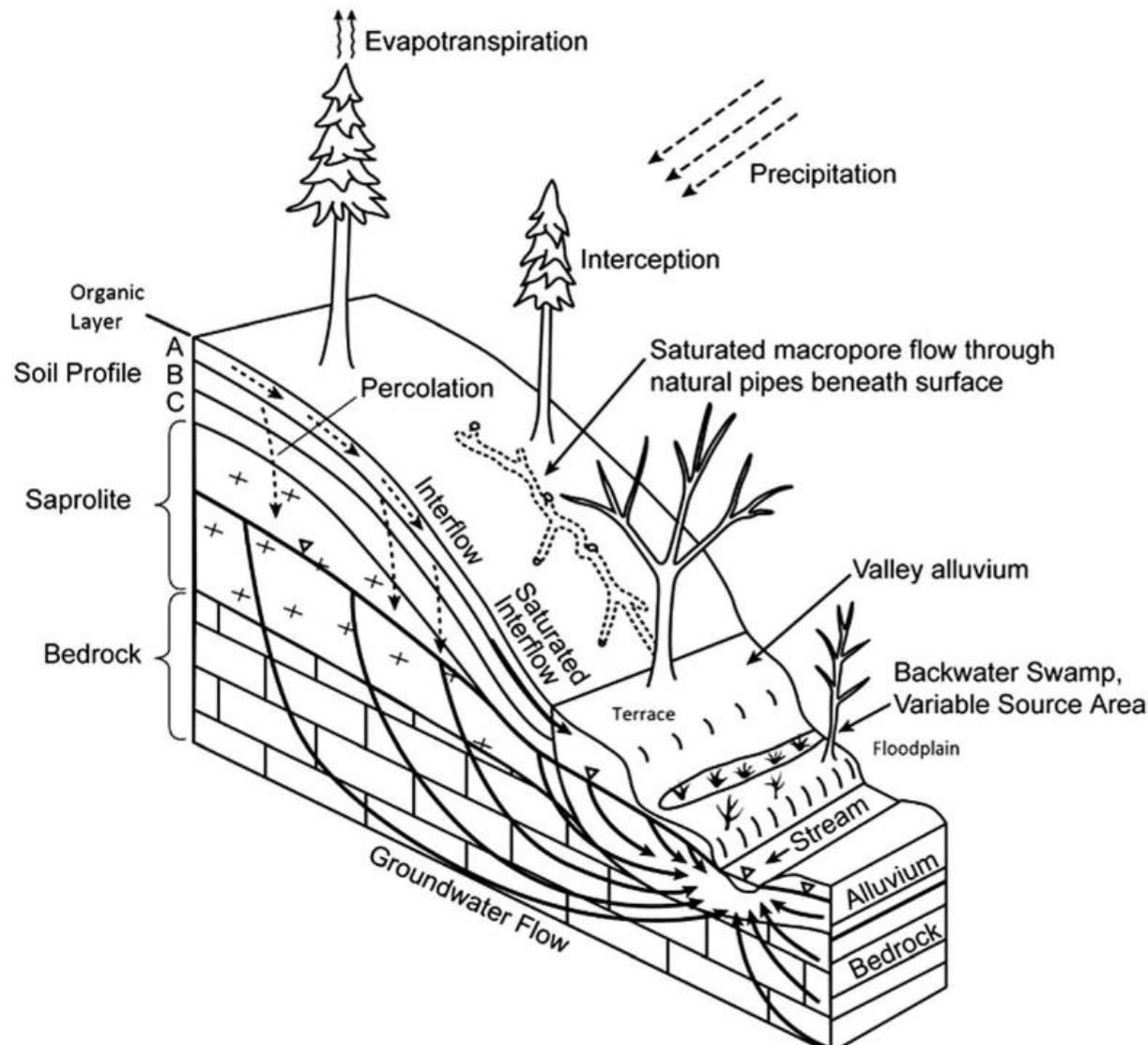
Fohrer et al. (2016)

→ Zwischenabfluss mit schneller und langsamer Komponente

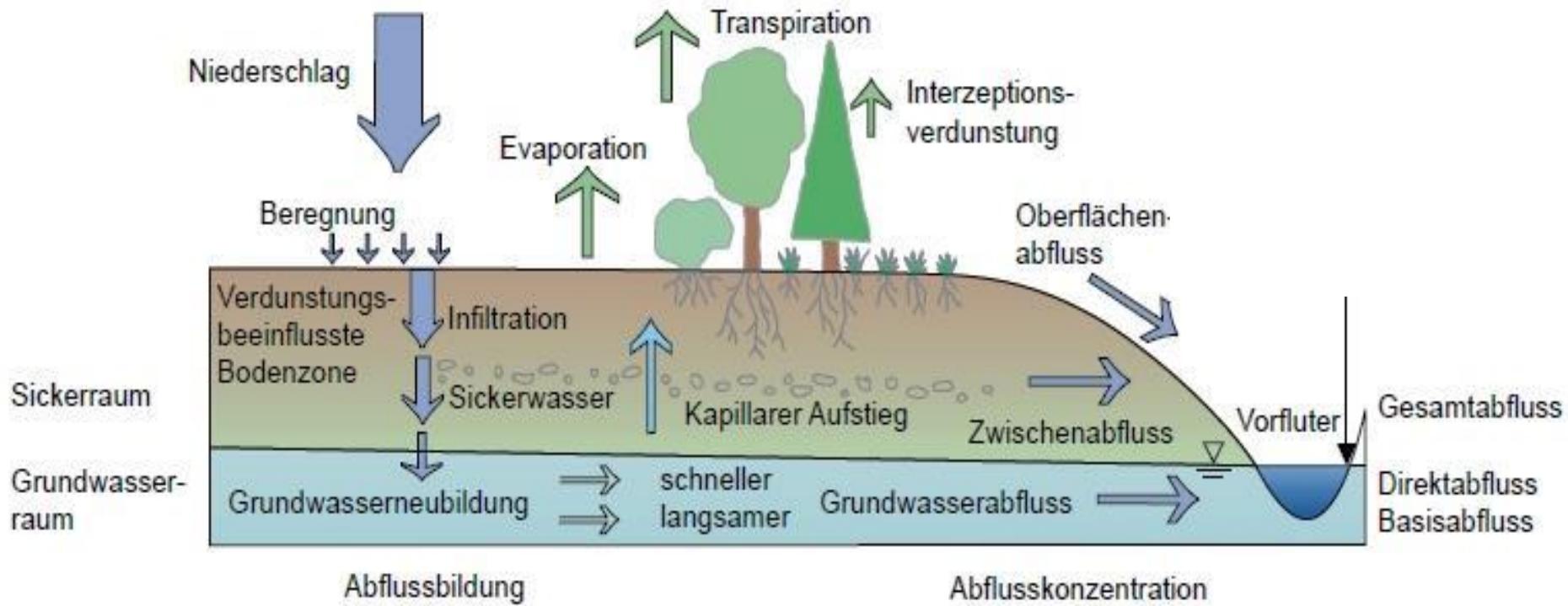
Schema der Abflussbildung und –konzentration



Wasserflüsse entlang eines Hanges – humider Wald



Prozesse der Abflussbildung und -konzentration

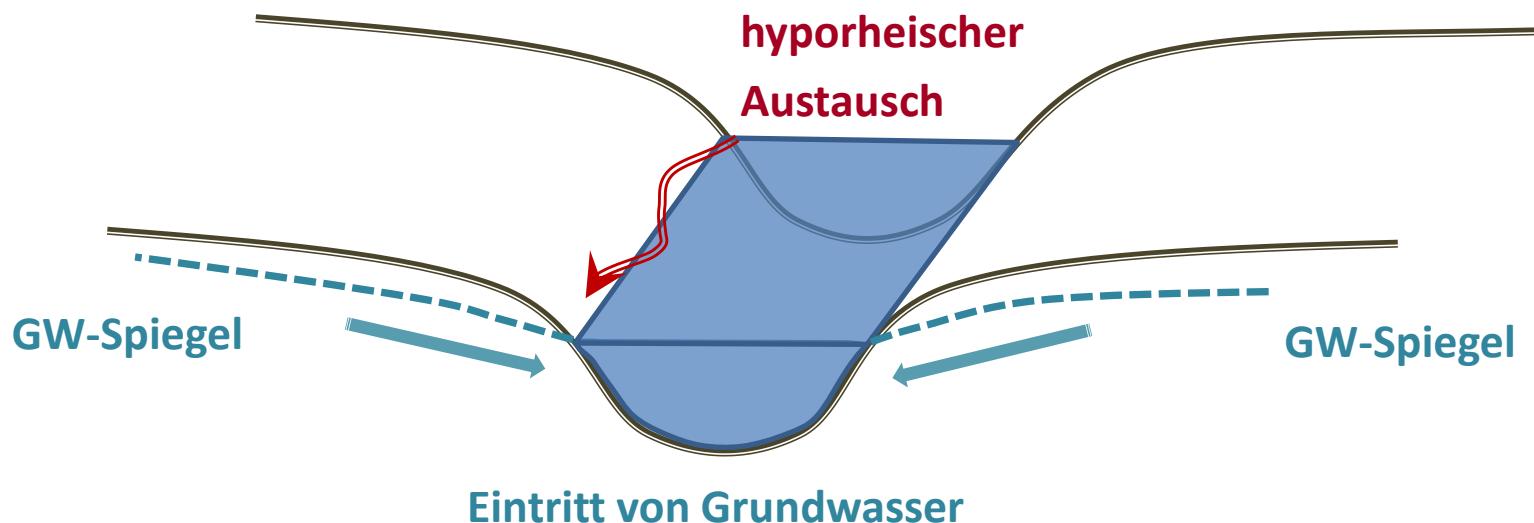


<https://www.lfu.bayern.de/wasser/grundwasserneubildung/index.htm>

Grundwasserzufluss entlang eines Fließgewässers

Austausch von Grundwasser mit dem Fließgewässer:

- im Ufer- und Sohlenbereich des Fließgewässers → **hyporheischer Austausch / Zone**
- Wenn Grundwasserstand > Wasserstand im Fließgewässer → **influente Verhältnisse = Uferexfiltration**



Grundwasserzufluss durch Quellen

- Quellen als Ursprung eines Fließgewässers
- Seitengewässer liefern nochmal zusätzliches Quellwasser



<https://de.wikipedia.org>

Quelle des River Dee im Schottischen Hochland



© Karl Wetzel

Springquelle Strokkur in Island

5. Einzugsgebiete von Gewässern und ihre Abgrenzungen

Flussgebiete und Wasserscheiden in Europa



Flussgebiete und Wasserscheiden in Europa



Wie können Flussgebiete abgegrenzt werden?

Methoden:

1. Reliefanalyse mittels **digitalen Geländemodell**
2. Analyse **geologischer Strukturen** (Schichtung, Klüftung, Tektonik)
3. Kartierung von **Quelleigenschaften**
4. Markierungsversuche mit **Tracern**

Annahme: oberirdisches Einzugsgebiet eines Fließgewässers **ist identisch** mit dem **unterirdischen Einzugsgebiet** des Grundwassers

Digitales Geländemodell

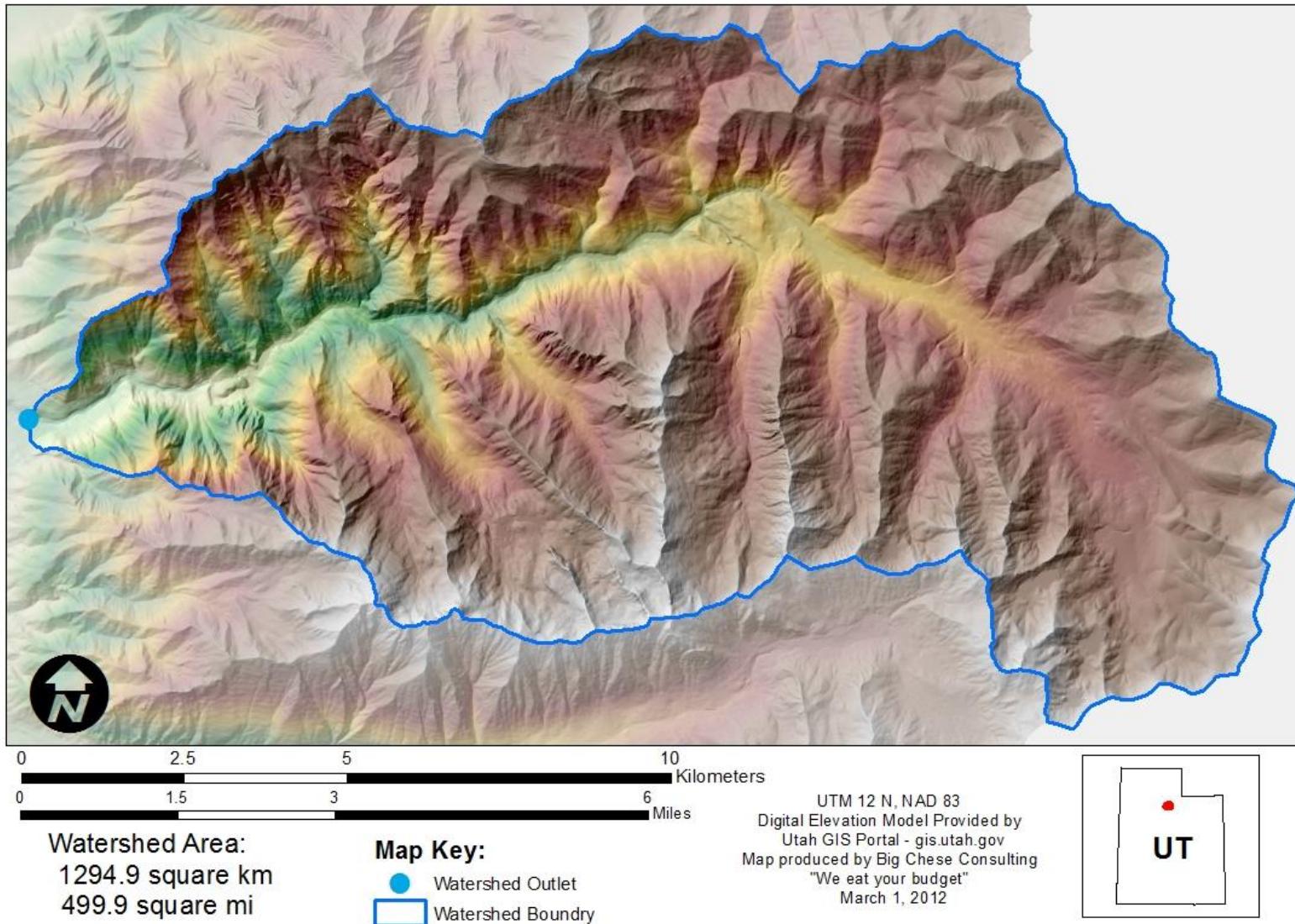


- DGM = beschreibt die Geländeformen (Topographie) der Erdoberfläche
- regelmäßiges Gitter, georeferenziert
- räumliche Auflösung bis zu 1 m für Deutschland verfügbar

<https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten.html>

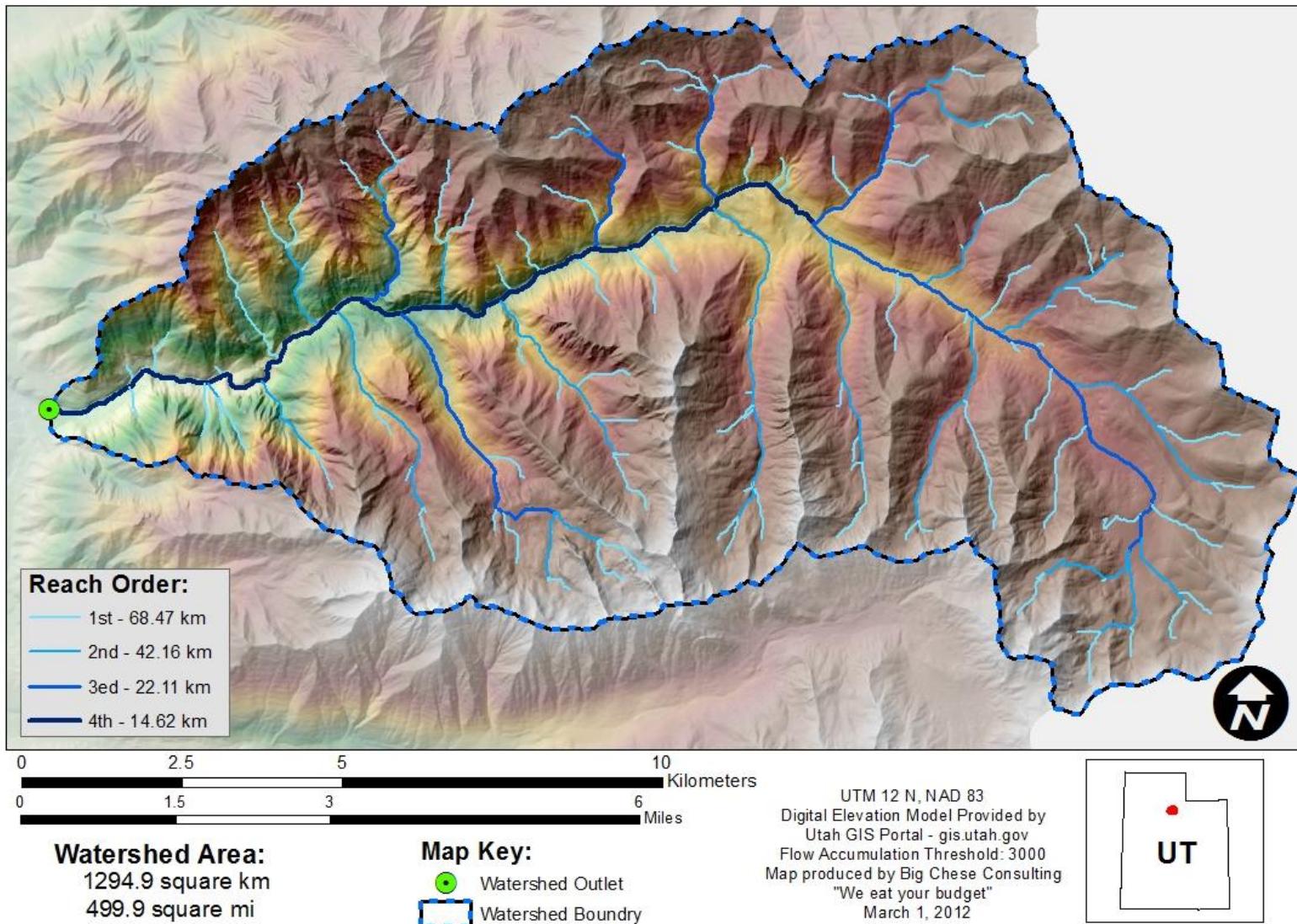
Reliefanalyse mit einem digitalen Geländemodell

Cottonwood Canyon Watershed Delineation

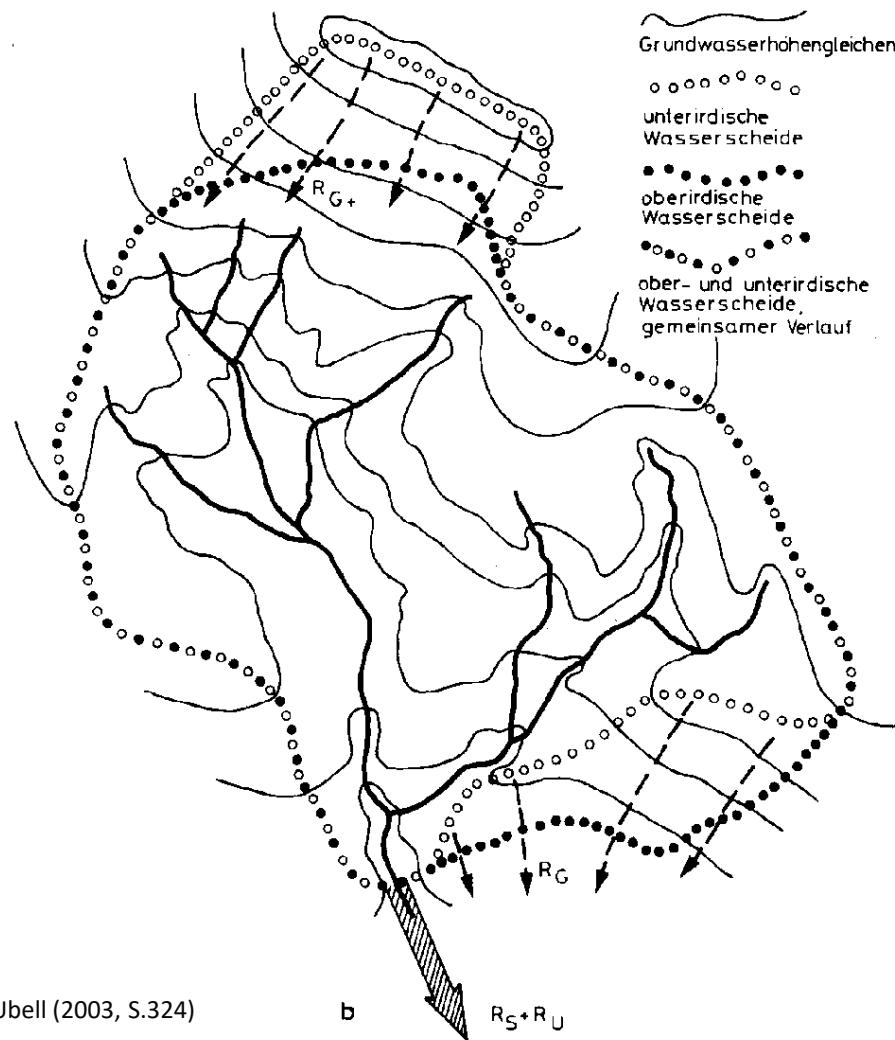


Reliefanalyse mit einem digitalen Geländemodell

Cottonwood Canyon Rivers and Streams

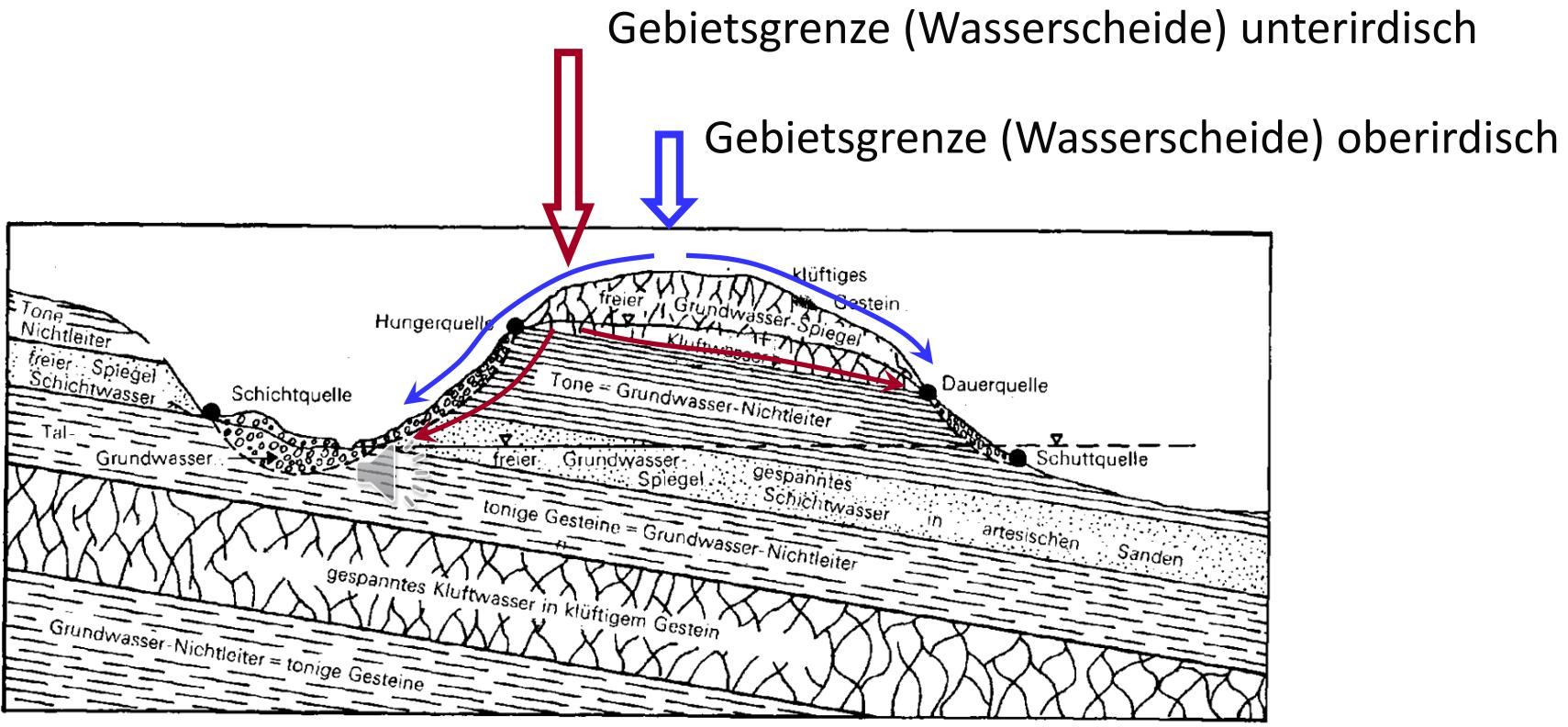


Ober- versus unterirdisches Einzugsgebiet



Ober- und unterirdisches Einzugsgebiet können sich unterscheiden

Ober- und unterirdisches Einzugsgebiet



Oberirdisches und unterirdisches Einzugsgebiet im Profil

Bestimmung des unterirdischen Einzugsgebietes

- Geologisches Profil wird benötigt (3-dimensional)
- genaue Informationen über den Grundwasserspiegel (2-dimensional)

Markierungsversuche mit künstlichen Tracern



Markierungsversuche mit künstlichen Tracern



Donauversickerung bei Immendingen / Aachtopf



Donauversickerung bei Immendingen

<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=5620026>



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/9/9f/Donauversinkung_Schild.jpg



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/03/D-Immendingen_-_Donauversickerung_001.JPG



Aachtopf bei Radolfzell

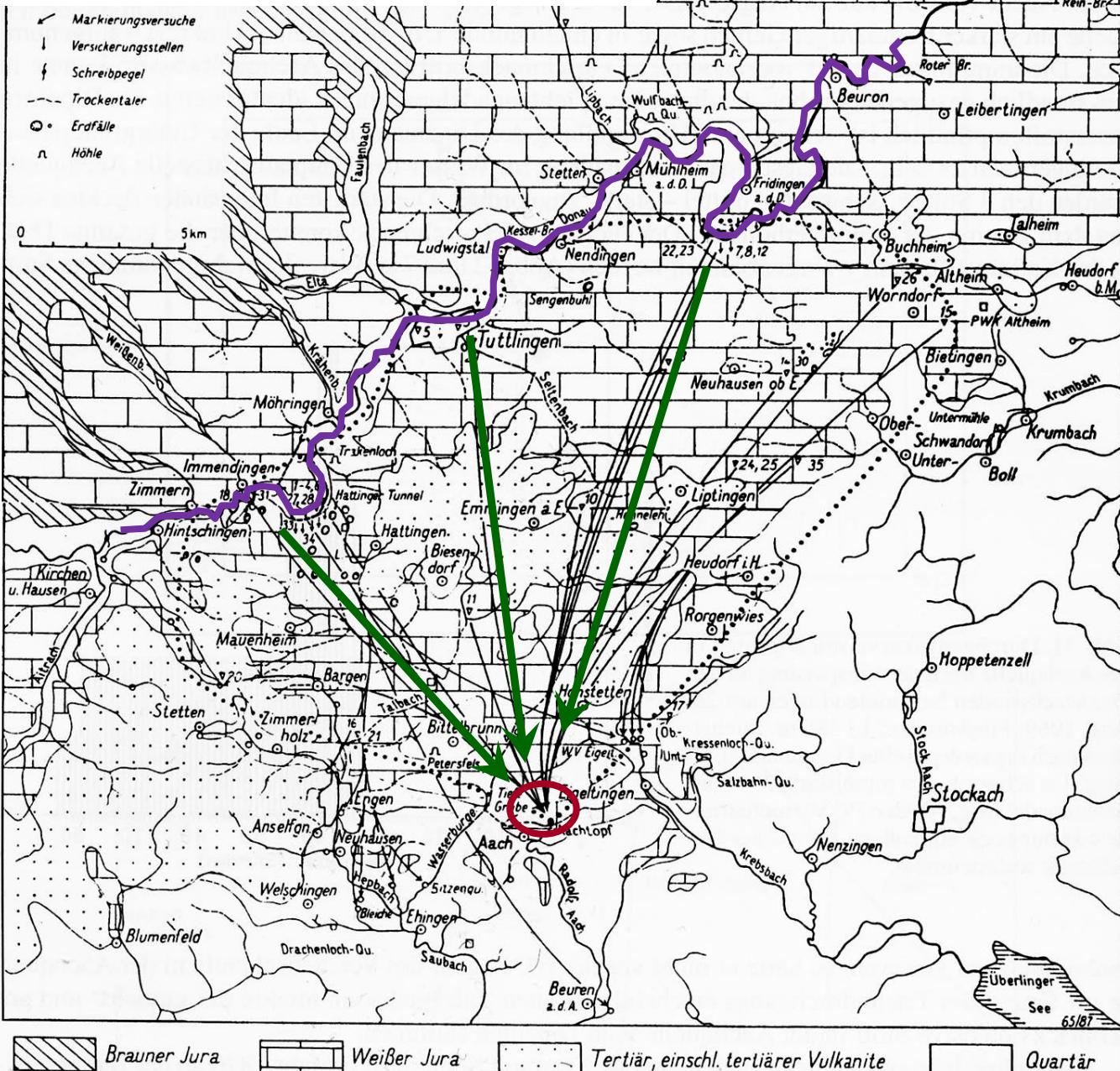
<http://www.donauversickerung.info/>

Abgrenzung der Donauversickerung

Donauversickerung
und Aachtopf

Markierungsversuche
aus dem 19.
Jahrhundert

Einsatz von Salz, Öl
und Farbstoffen



6. Einflussgrößen des Abflussgeschehens:

Allgemein und am Beispiel des Ahrhochwassers 2021

Einflussgrößen des Abflusses

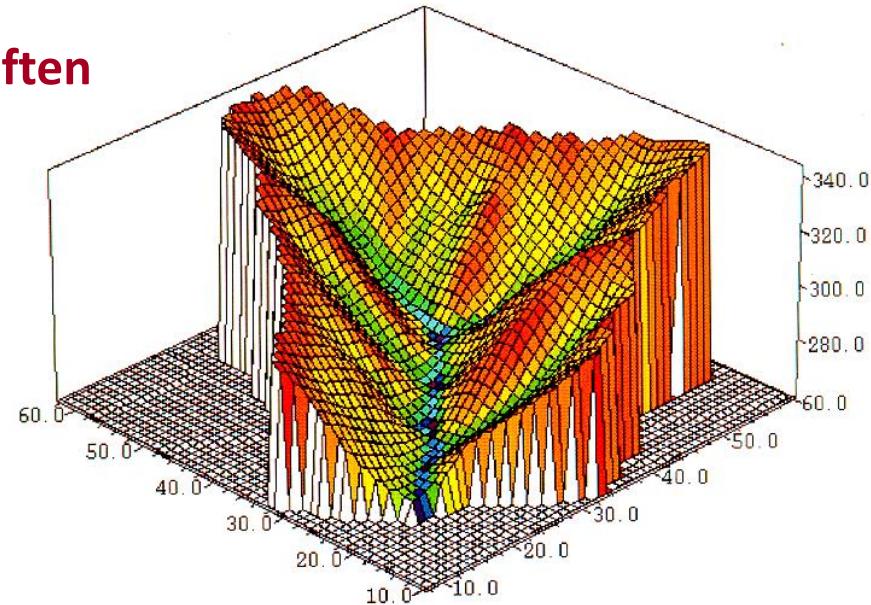
zeitliche Verlauf des Abflusses ist abhängig:

- Im wesentlichen von den meteorologischen Größen: Niederschlag, Temperatur (Schnee), Verdunstung
- aber auch zahlreiche Gebietseigenschaften spielen eine besondere Rolle:
 steuern die Abflussbildung und –konzentration

Gebietseigenschaften

zeitlich konstante Gebietseigenschaften

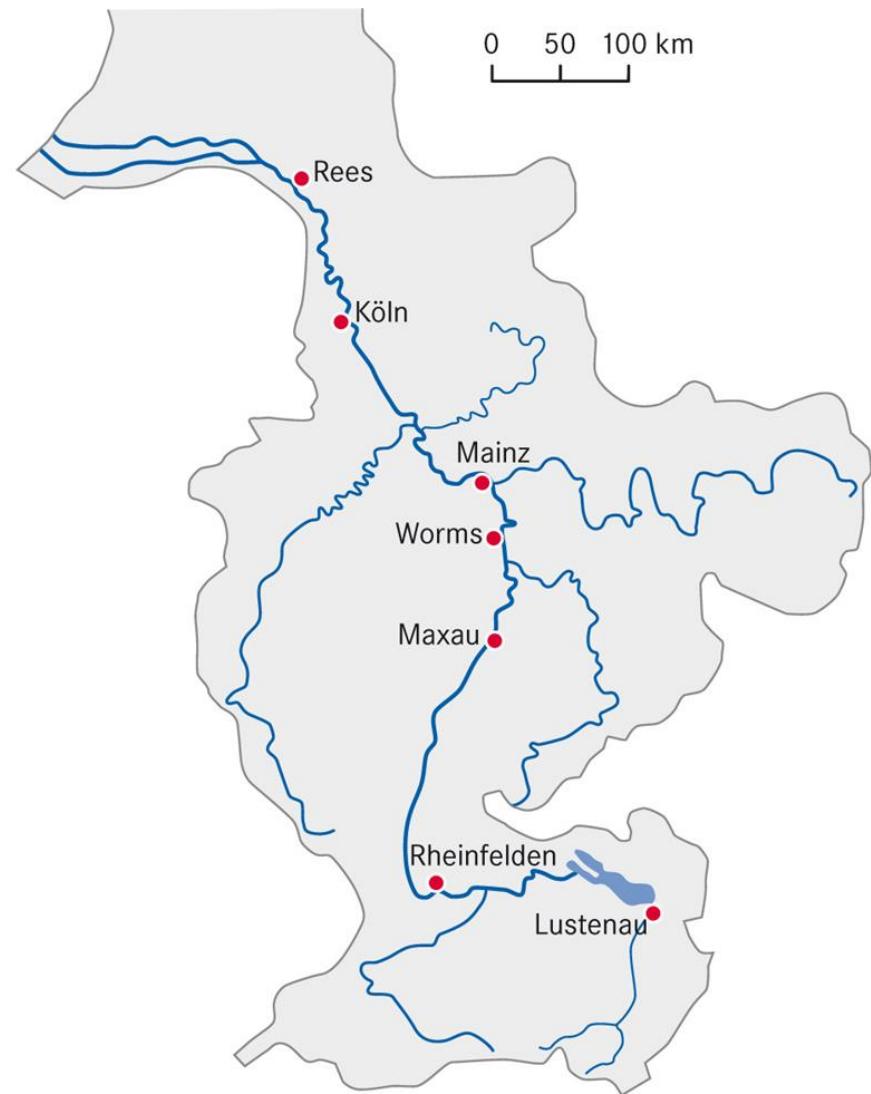
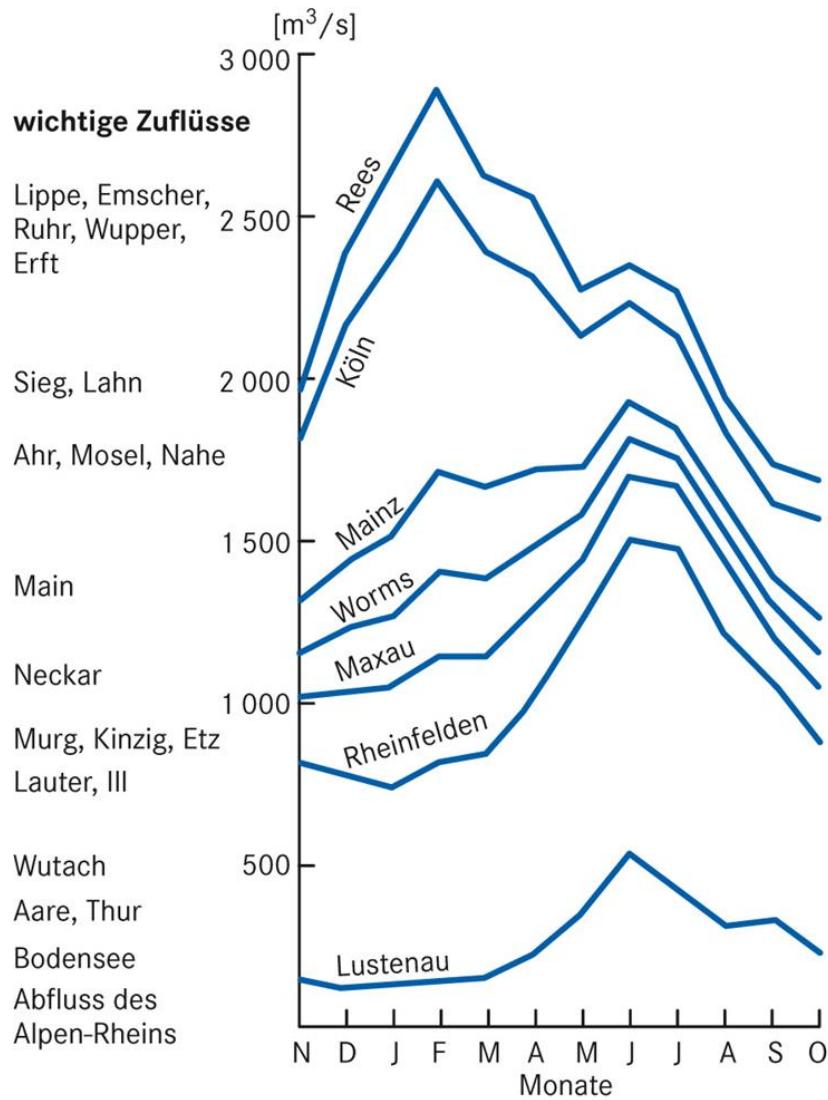
- Gebietsfläche
- Reliefverhältnisse
- Höhenlage
- Geologie
- Böden
- Exposition des Gebietes
- Gewässernetz und seine Struktur
- Form des Gebietes



zeitlich variable Gebietseigenschaften

- Landnutzung
- Vegetationsart & -bedeckung
- Bodenwassergehalt
- Grundwasserverhältnisse
- Schneedeckenspeicher
- Bodenorganismen

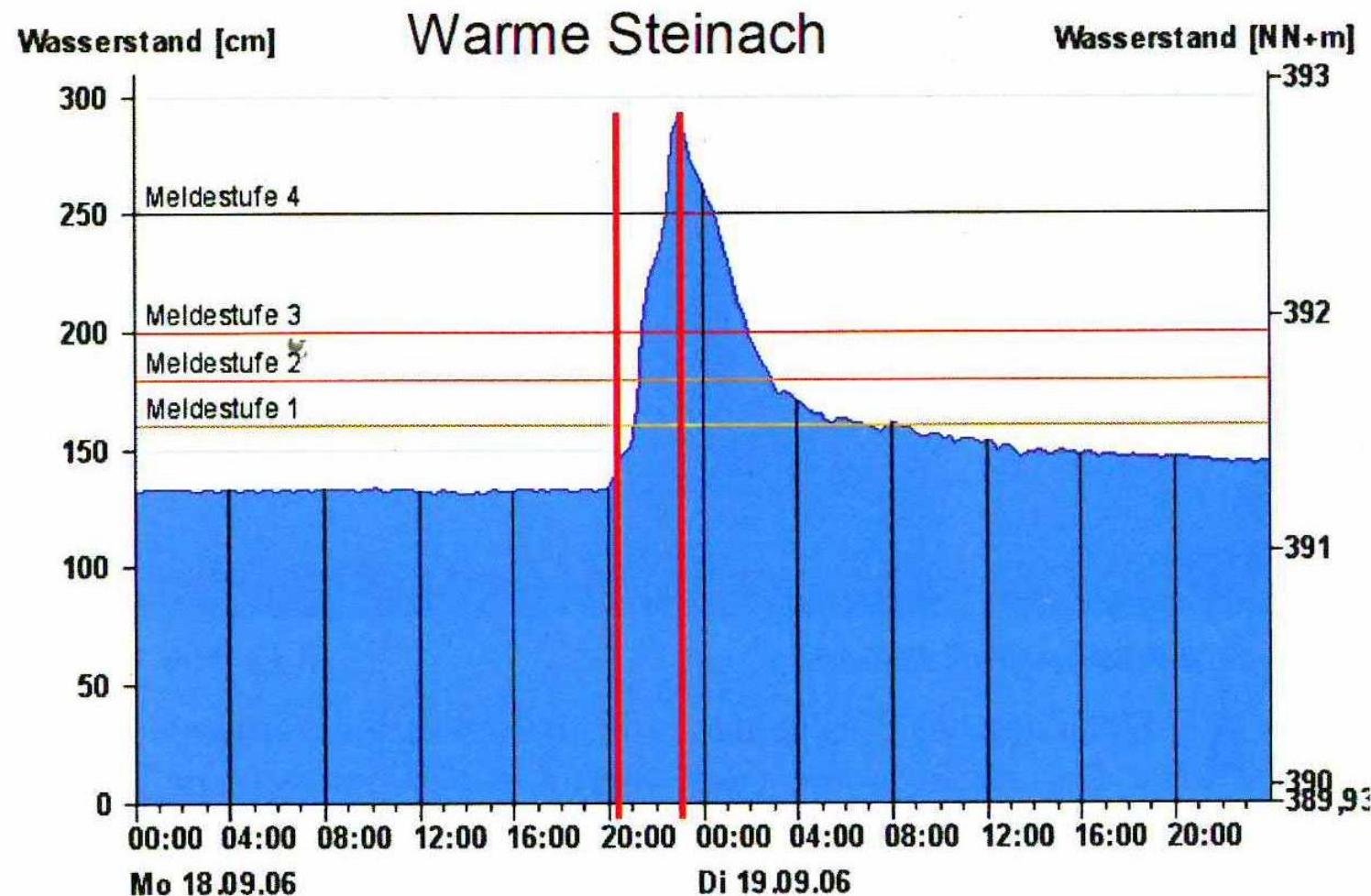
Einfluss der Gebietsgröße auf die Abflusshöhe



Aus Gebhardt/Glaser/Radtke/Reuber: Geographie. 1. Aufl., © 2007 Elsevier GmbH

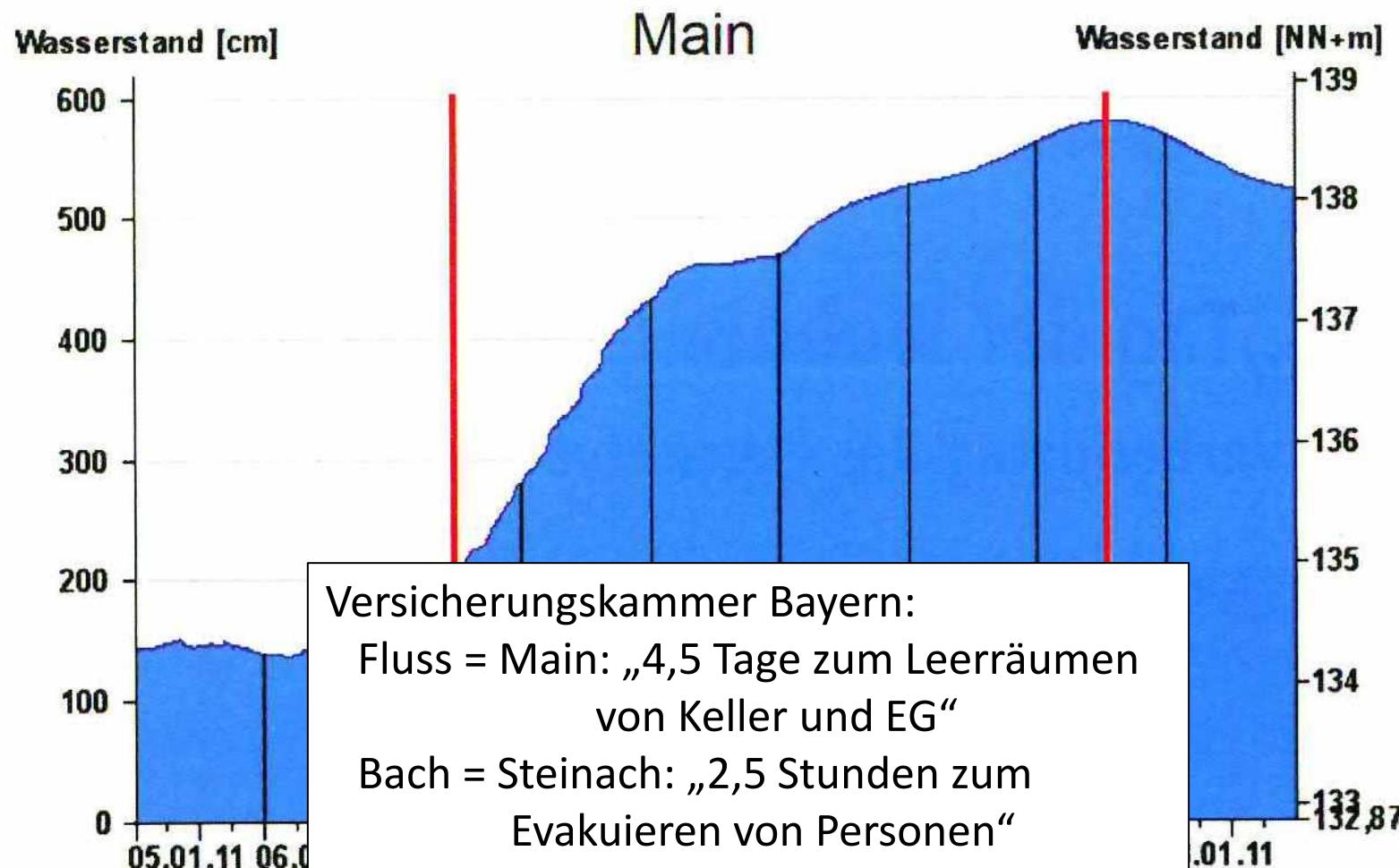
Form der Abflusswelle – kleines Einzugsgebiet

Steinach: ca. 75 km²

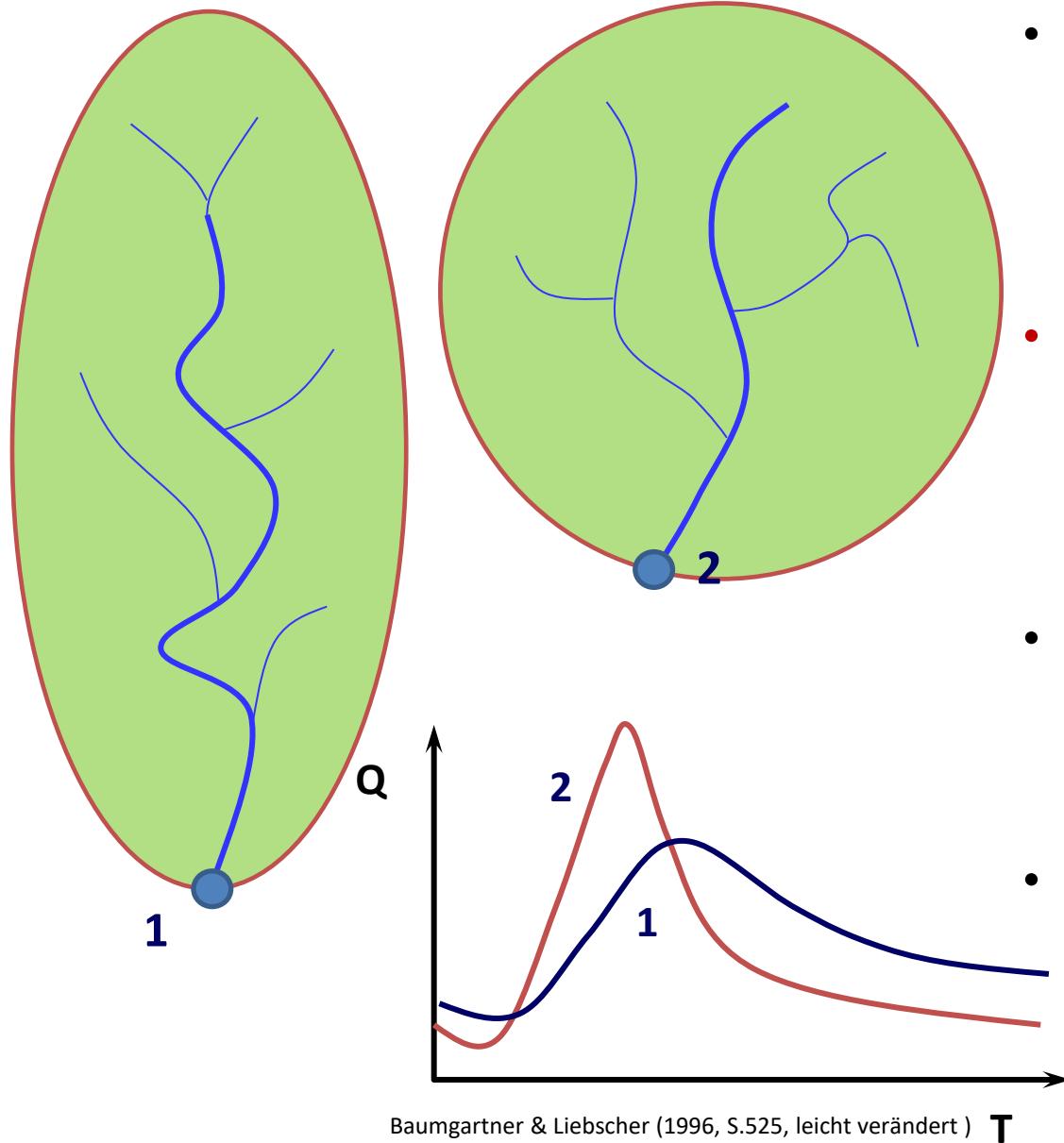


Form der Abflusswelle – großes Einzugsgebiet

Main: ca. 25.000 km²



Gebietseigenschaften: Form des Einzugsgebietes

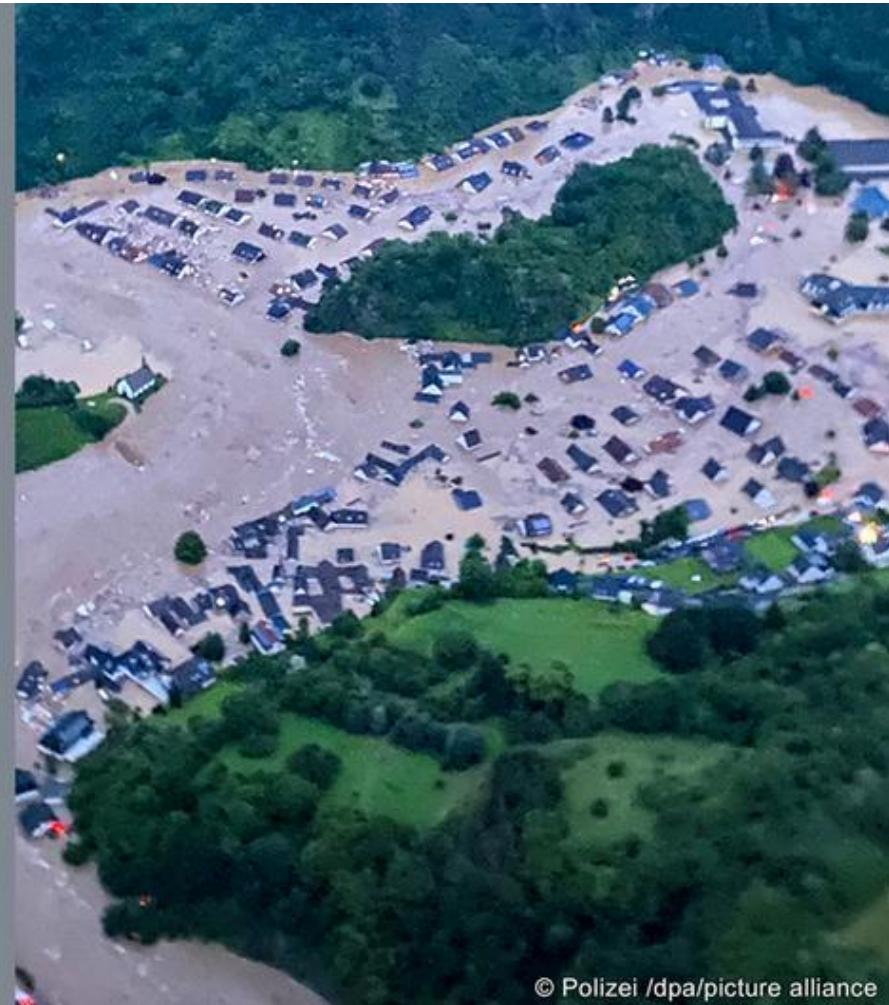


- Annahme: Niederschlag (Menge, Verteilung) sind identisch und alle anderen Gebietseigenschaften ebenfalls
- **Kreisförmige Gebiete zeigen deutlich steileren Abflussverlauf als gestreckte Einzugsgebiete**
- Grund: Fließwege des Wasser im gestreckten Gebiet sind z. T. deutlich länger:
- Dämpfung des Niederschlagssignals, Retentionswirkung

Hochwasser an der Ahr

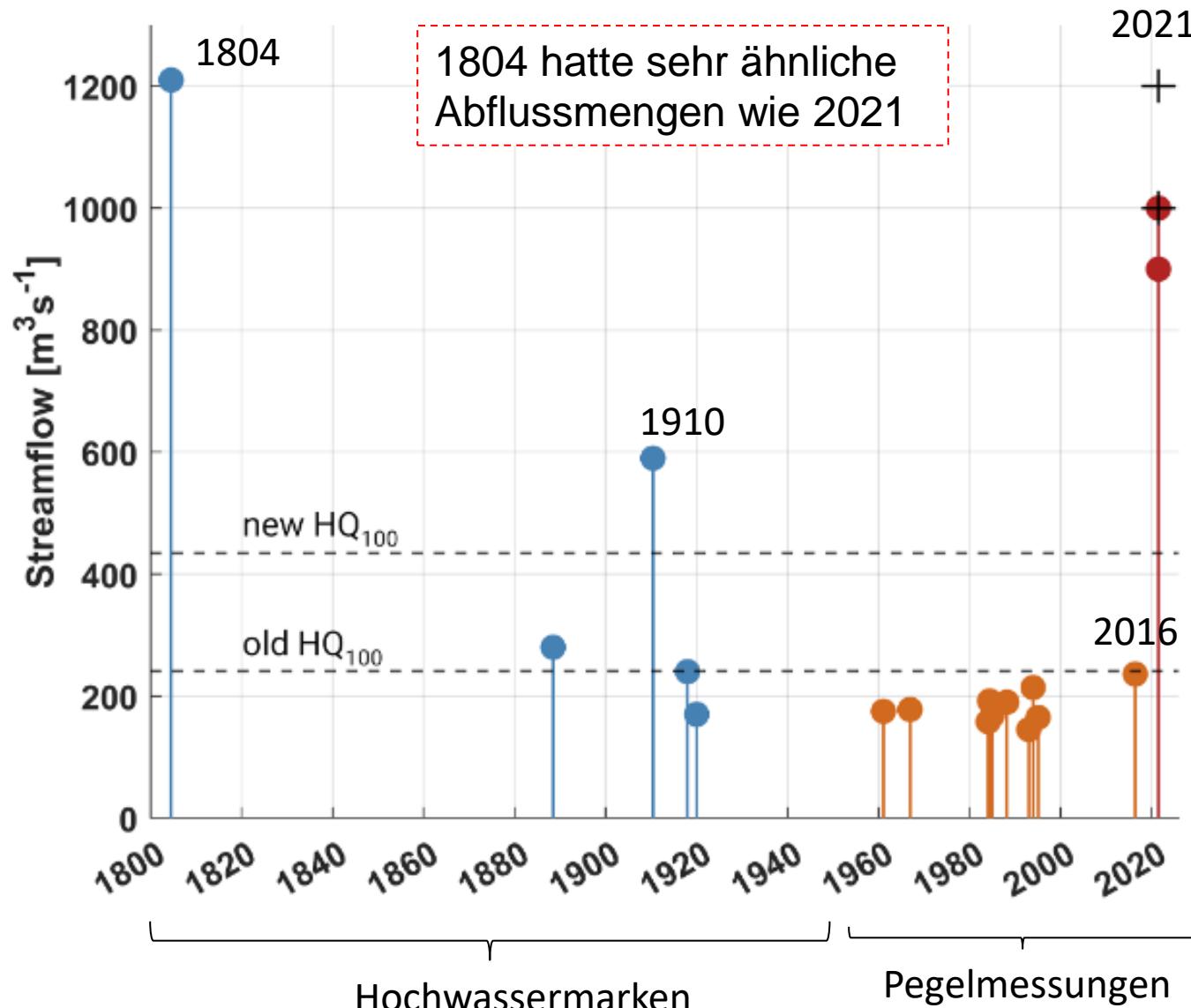


© Gerhard Launer/euroluftbild/ZB/picture alliance



© Polizei /dpa/picture alliance

Historische Hochwasser an der Ahr (Altenahr)



Ludwig et al.
(2023)

Flutkatastrophe 2021 versus 1804

Hochwassermarken, Dernau



Wasserstand 2021 war deutlich höher als 1804, obwohl Abflussmenge ähnlich war

Was sind die möglichen Ursachen für die deutlich erhöhten Wasserstände 2021?

Mohr et al. (2023)

Verklausungen - Brücke Altenahr



FAZ (2021)

- zahlreiches Schwemmgut sammelte sich an Brücken und führte lokal zu einem Rückstau der Wassermassen

Überflutungen - Kreuzberg an der Ahr



https://www.youtube.com/watch?v=I1MU2Kdnn_s

7. Anmerkungen zur Klausur (Hydrologie-Block)

Prüfung PG1 – Hydrologie

- Kapitel 2 „Wasser als Stoff“ bis Kapitel 10 „Prozesse der Abflussbildung“ sind relevant
- Fragen werden verteilt, gewöhnlich eine Frage pro Kapitel
- Prozessverständnis ist wichtig
- Formeln sind ebenfalls relevant
- Fragen für den BSc. Geographie sind gewöhnlich etwas schwerer und detaillierter als für Lehrämmler
- Es werden Multiple-Choice-Fragen gestellt

Grundvorlesung Hydrologie

Vielen Dank für den Besuch
&
Viel Erfolg für die kommenden
Prüfungen

Literaturverzeichnis

- **Baumgartner & Liebscher, 1996, Lehrbuch der Hydrologie, Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin**
- Gebhardt et al., 2011, Geographie, physische Geographie und Humangeographie, 2. Auflage, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg
- **Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., & Casper, M. (Eds.). (2016). Hydrologie (Vol. 4513). UTB.**
- Mattheß & Ubell, 2003, Allgemeine Hydrologie, Grundwasserhaushalt, 2. Auflage, Borntraeger, Berlin
- Durner W, 2003, Bodenhydrologische Versuche im Praktikum Hydrologie I, Institut für Geoökologie, Technische Universität Braunschweig
- Kodešová et al., 2010, Using the dye tracer experiment for characterisation of parameters of the dualpermeability model;
<https://www.iuss.org/19th%20WCSS/Symposium/pdf/0133.pdf>
- Richter, 1992, Allgemeine Geologie, 4. Auflage, de Gruyter, Berlin
- Käss, 2004, Geohydrologische Markierungstechnik, 2. Auflage, Borntraeger, Berlin
- Böhn & Schütt, 2002, Von der Beobachtung zur Modellbildung, Das Beispiel des Wasserhaushaltes, Geographie und ihre Didaktik

Literaturverzeichnis

- Kölla, 1987, Abschätzung von Spitzenabflüssen in kleinen natürlichen Einzugsgebieten der Schweiz, Verlag-AG der akademischen, technischen Vereine
- Germann, 1981, Untersuchung über den Bodenwasserhaushalt im hydrologischen Einzugsgesbiet Rietholzbach, Mitt. D. Inst. F. Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie, ETH Zürich
- Bronstert, 1994, Modellierung der Abflußbildung und der Bodenwasserdynamik von Hängen, Inst. für Hydrologie und Wasserwirtschaft, Univ. Karlsruhe
- Bodman & Colman, 1994, Moisture and energy conditions during downward entry of water into soils, Soils Sci. Soc. Amer. Proc., Morgantown
- Halihan, T., R.B. Miller, D. Correll, D.M. Heeren, and G.A. Fox. 2019. Field evidence of a natural capillary barrier in a gravelalluvial aquifer. Vadose Zone J, 18:180008.doi:10.2136/vzj2018.01.0008