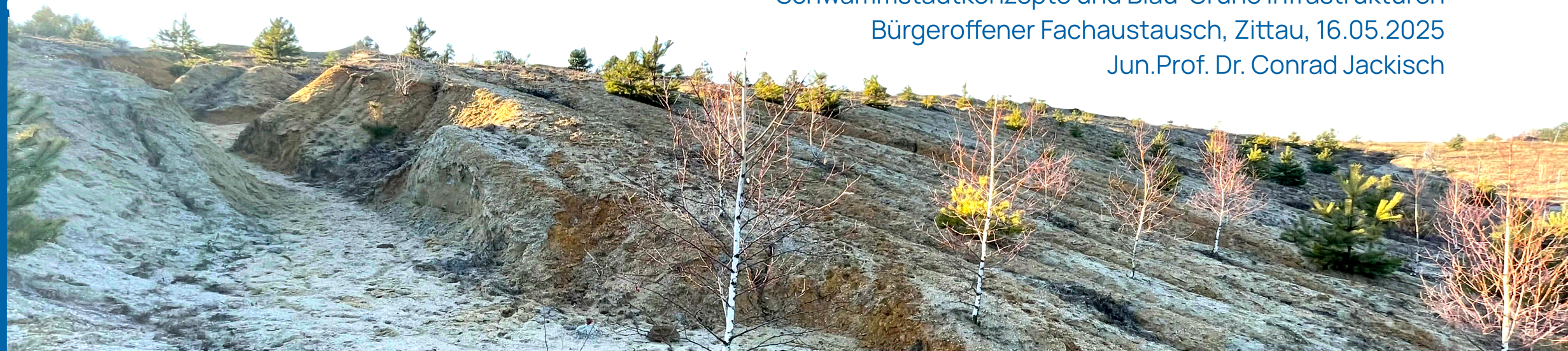
TUBAF
The University of Resources.
Since 1765.

Trockene Schwämme sind auch keine Lösung

Eigenschaften des Klimawandels und ihre Wirkung auf ökohydrologische Prozesse

Schwammstadtkonzepte und Blau-Grüne Infrastrukturen
Bürgeroffener Fachaustausch, Zittau, 16.05.2025

Jun.Prof. Dr. Conrad Jackisch



conrad.jackisch@tbt.tu-freiberg.de

Zentrales Paradoxon:

Mehr Wassernutzung zur Bewältigung von Wasserknappheit und Hochwasser in einer Region mit zunehmend negativer Wasserbilanz

Die klimagerechte Schwammstadt

Warum aus stark versiegelten Großstädten Schwammstädte werden sollten

Steigende Temperaturen
Zwischen 1881 und 2022 Anstieg der Jahresmitteltemperatur um 1.7°C.

Gründächer
2020 existierten 0,8 m² Gründachfläche pro Bewohner*in einer Großstadt.

Wasserverlust
Seit 2002 verliert Deutschland 2,5 Kubikkilometer Wasser pro Jahr. Es gehört zu den Regionen mit dem höchsten Wasserverlust weltweit.

Erholungsflächen
2021 existierten 40 m² Erholungsfläche pro Großstädter*in in städtischen Grünanlagen.

Flächenverbrauch
Seit 2017 wächst die Siedlungs- und Verkehrsfläche um 55 Hektar pro Tag.

Starkregen
Hitze befördert Starkregen: 2021 betrafen Starkregen-Warnungen 30% der Siedlungen.

Sachschäden
Starkregenereignisse führten 2021 zu versicherten Schäden in Höhe von 8,1 Mrd. Euro.

Trockenheit
Zunehmende und längere Trockenperioden gefährden die Vitalität des Stadtgrüns und lassen Grundwasserspiegel sinken.

Hitzebelastung
Im Rekordjahr 2018 wurden im Bundesdurchschnitt rund 20 heiße Tage ermittelt, in Frankfurt am Main sogar 42.

Kühlungseffekt durch lokale Verdunstung

Ausweitung der Dach- und Fassadenbegrünung

Renaturierung urbaner Gewässer

Ausweitung von Grün- und Erholungsflächen

Steigerung der Versickerungsflächen zur Speicherung von Wasser

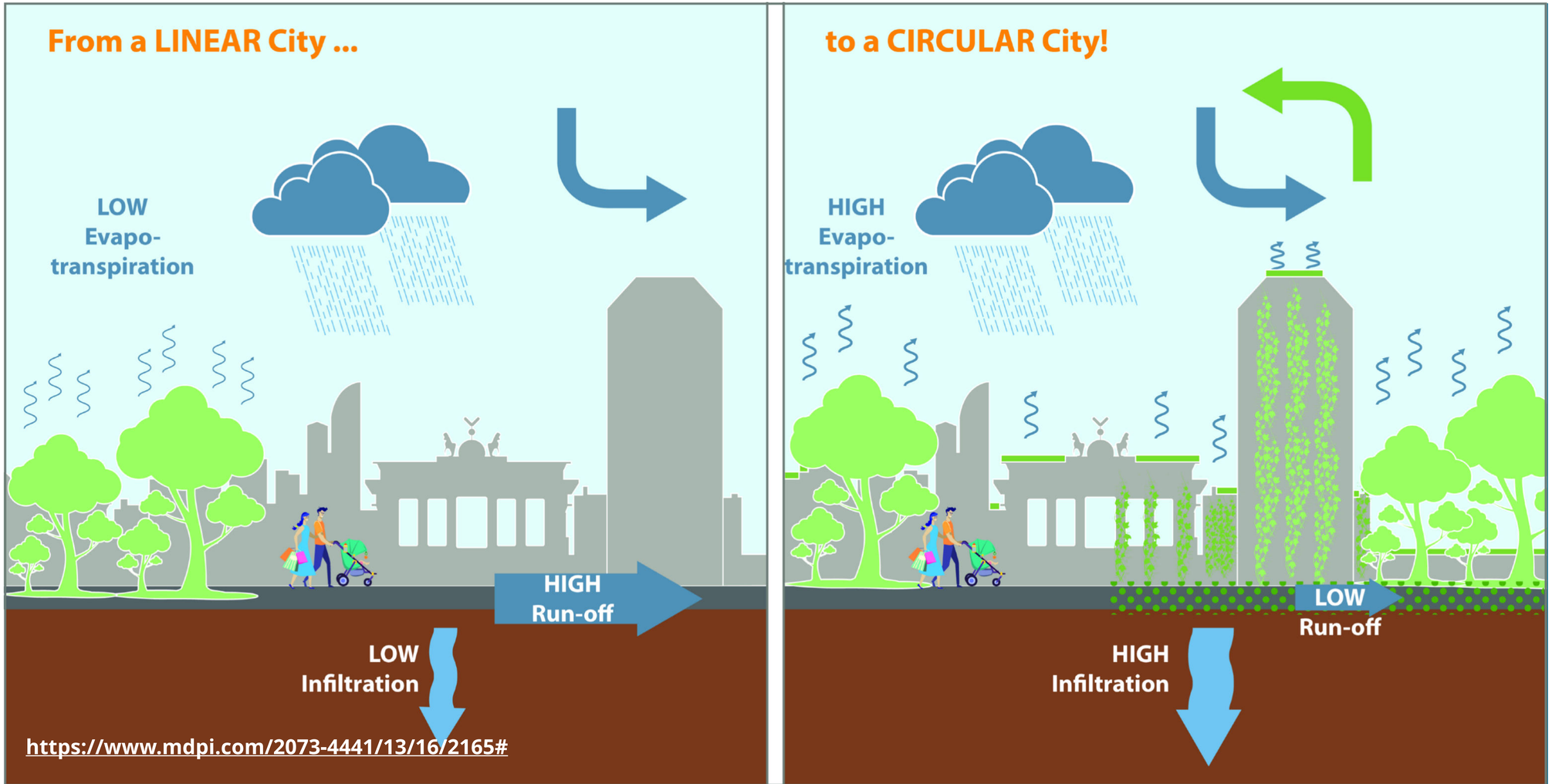
Abmilderung von Starkregeneffekten

https://www.umweltbundesamt.de/schwammstadt

Umwelt Bundesamt

Zentrales Paradoxon:

Mehr Wassernutzung zur Bewältigung von Wasserknappheit und Hochwasser in einer Region mit zunehmend negativer Wasserbilanz



TU BERGAKADEMIE FREIBERG

Anpassung und Transformation

Klimawandel, Biodiversitätskrise, moderne Stadtplanung

In aller Munde:

- 2-3 °C höhere Durchschnitts-Temperaturen
- Veränderte Niederschlagsmuster
- 81% der europäischen Lebensräume in keinem guten Zustand

Anpassung und Transformation

Klimawandel, Biodiversitätskrise, moderne Stadtplanung

In aller Munde:		Konkreter:
2-3 °C höhere Durchschnitts-Temperaturen	→	Hitzetote in Europa und trotzdem weiter Frostphasen
Veränderte Niederschlagsmuster	→	längere Trockenheiten, mehr Starkregen
81% der europäischen Lebensräume in keinem guten Zustand	→	vernetzte Habitate, vielfältige Nischen, weniger Versiegelung

Anpassung und Transformation

Klimawandel, Biodiversitätskrise, moderne Stadtplanung

In aller Munde:	Konkreter:	Thema hier:
2-3 °C höhere Durchschnitts-Temperaturen	→ Hitzetote in Europa und trotzdem weiter Frostphasen	→ eigentlich eher eine Verschiebung der Verteilung
Veränderte Niederschlagsmuster	→ längere Trockenheiten, mehr Starkregen	→ zwei Seiten der gleichen Medaille
81% der europäischen Lebensräume in keinem guten Zustand	→ vernetzte Habitate, vielfältige Nischen, weniger Versiegelung	→ Umdenken bei der Stadtplanung und im eigenen Garten

Bereiche der Schwammstadt

Warum ist das überhaupt ein kontroverses Konzept?

Aktionsbereiche:

- Abkühlung bei Hitze
- Rückhalt von Wasser
- Renaturierung von Gewässern
- Dachbegrünung
- Erholungsflächen
- Resilienz ggü. Extremwetter

Bereiche der Schwammstadt

Warum ist das überhaupt ein kontroverses Konzept?

Aktionsbereiche:		Maßnahmenrichtung:
Abkühlung bei Hitze	⟶	durch Verdunstungskühle
Rückhalt von Wasser	⟶	in der urbanen Landschaft
Renaturierung von Gewässern	⟶	mehr Biodiversität und ökologische Dynamik
Dachbegrünung	⟶	mehr Grün in der Stadt
Erholungsflächen	⟶	Lärm, Staub, Abgase, ...
Resilienz ggü. Extremwetter	⟶	mehr Pufferkapazität

Bereiche der Schwammstadt

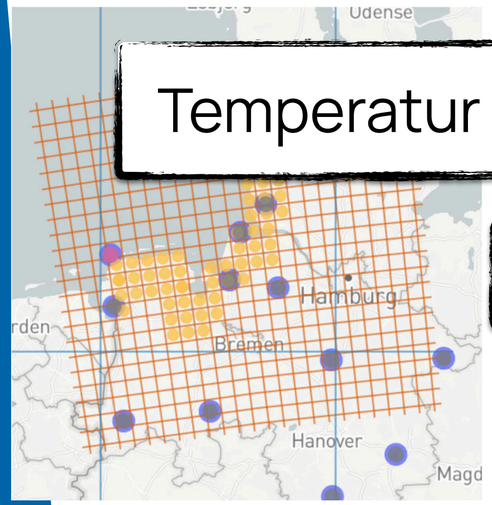
Warum ist das überhaupt ein kontroverses Konzept?

Aktionsbereiche:	Maßnahmenrichtung:	Paradoxon?
Abkühlung bei Hitze	durch Verdunstungskühle	braucht mehr Wasser
Rückhalt von Wasser	in der urbanen Landschaft	braucht mehr Raum
Renaturierung von Gewässern	mehr Biodiversität und ökologische Dynamik	unpraktisch, dreckiger, schlechter planbar
Dachbegrünung	mehr Grün in der Stadt	noch mehr Wasser
Erholungsflächen	Lärm, Staub, Abgase, ...	noch mehr Raum
Resilienz ggü. Extremwetter	mehr Pufferkapazität	mehr Dynamik, Raum und Pflege

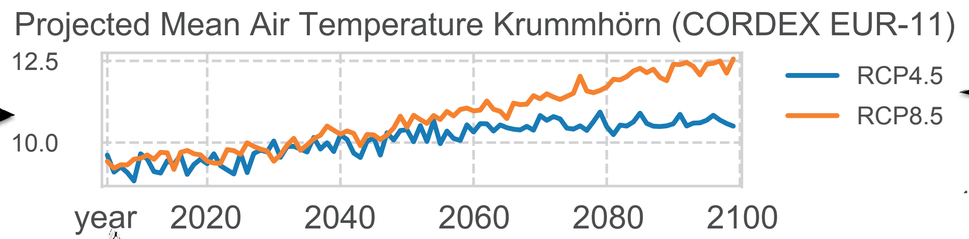
"2°C mehr ist doch nicht viel..."

"...und außerdem wissen wir es doch gar nicht so genau"

- Nordseeküste



Temperatur



Zeit

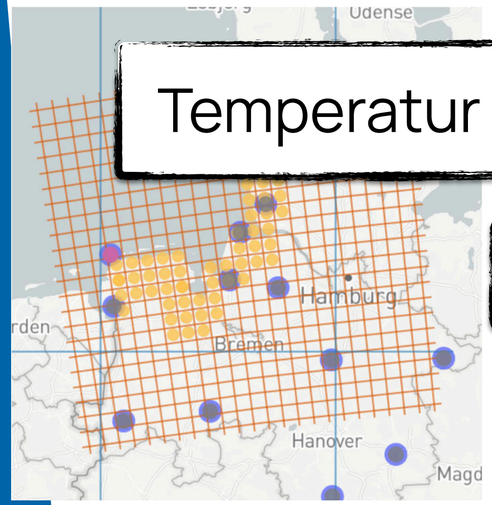
Moderates Szenario

No-Action Szenario

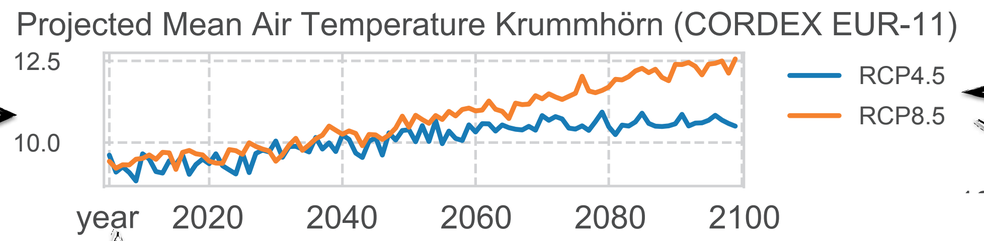
"2°C mehr ist doch nicht viel..."

"...und außerdem wissen wir es doch gar nicht so genau"

- Nordseeküste



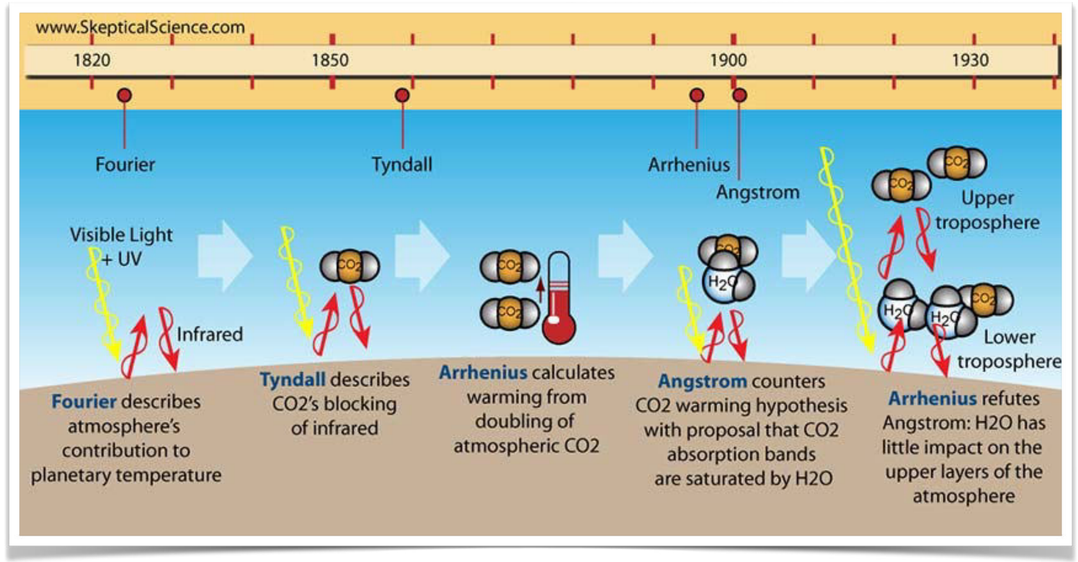
Temperatur



Zeit

Moderates Szenario

No-Action Szenario



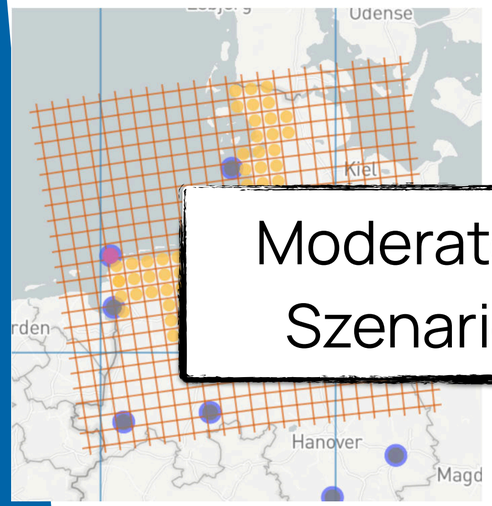
- direkter Zusammenhang von CO2-Konzentration in der Atmosphäre und Treibhauswirkung
- bekannt seit 1856 (Eunice Newton Foote & John Tyndall)

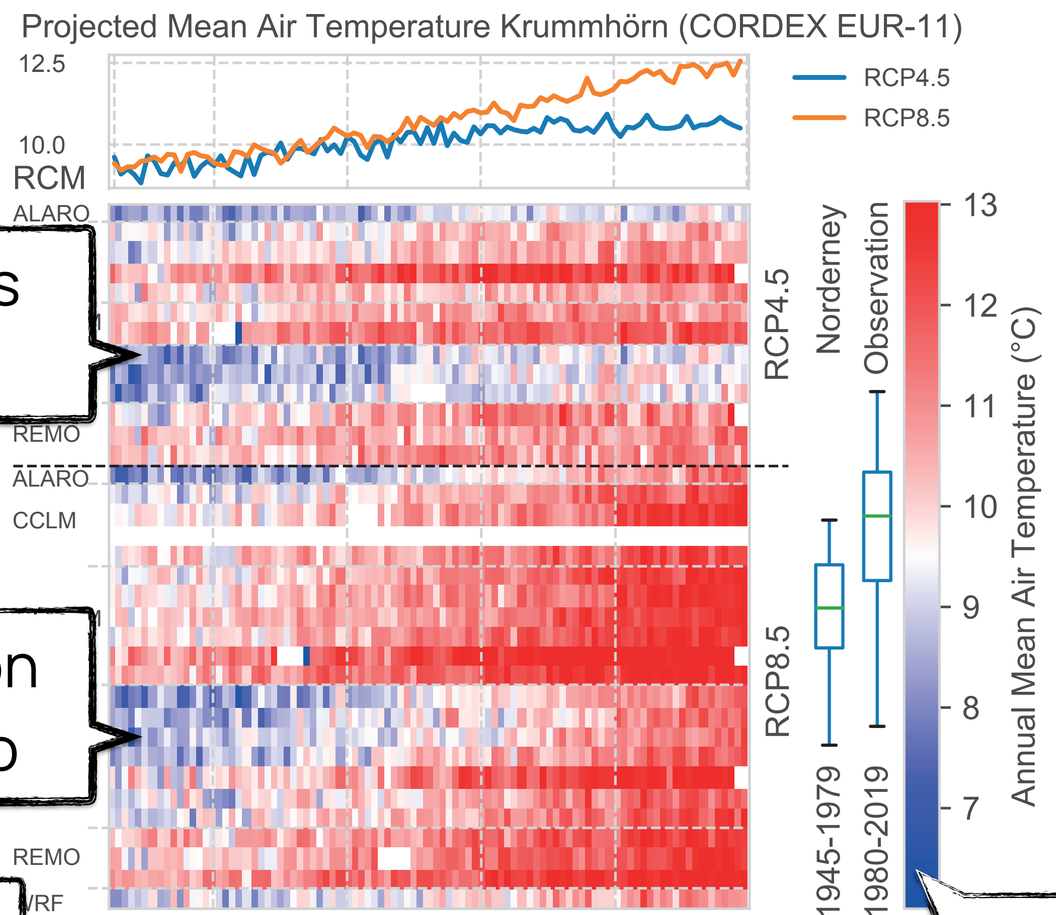
TU BERGAKADEMIE FREIBERG

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

"...und außerdem wissen wir es doch gar nicht so genau"

- Nordseeküste





Moderates Szenario

No-Action Szenario

Zeit

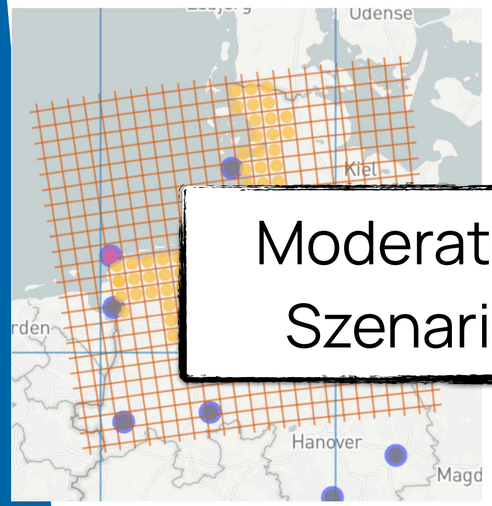
Temperatur

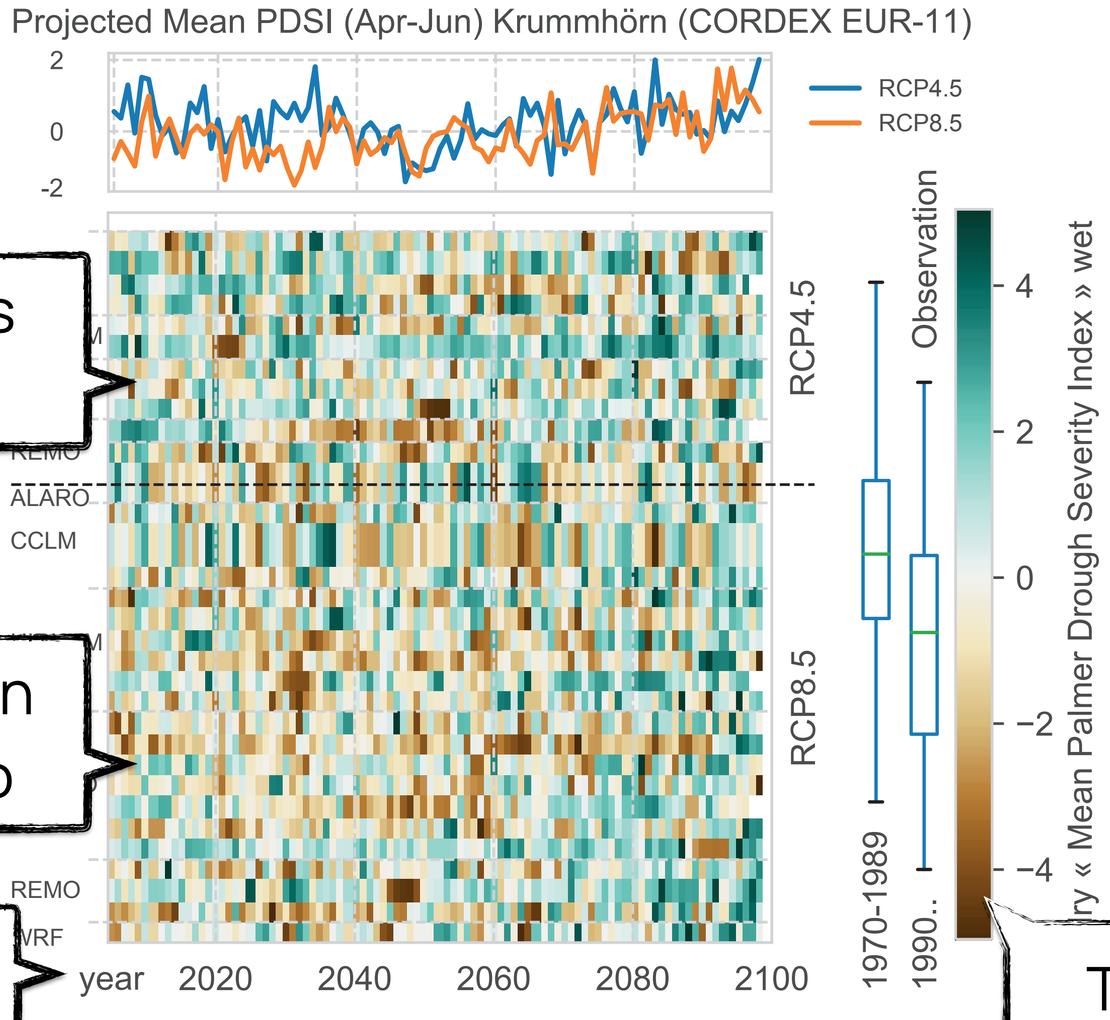
- Klimaprojektionen für die Temperatur einhellig
- lokale Ausprägung hängt aber von einer Reihe weiterer Faktoren ab
- Unsicherheit vor allem darin, wann möglich Kipp-punkte überschritten werden

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

hinsichtlich Wasserverfügbarkeit gar nicht so eindeutige Prognosen

- Nordseeküste





Moderates Szenario

No-Action Szenario

Zeit

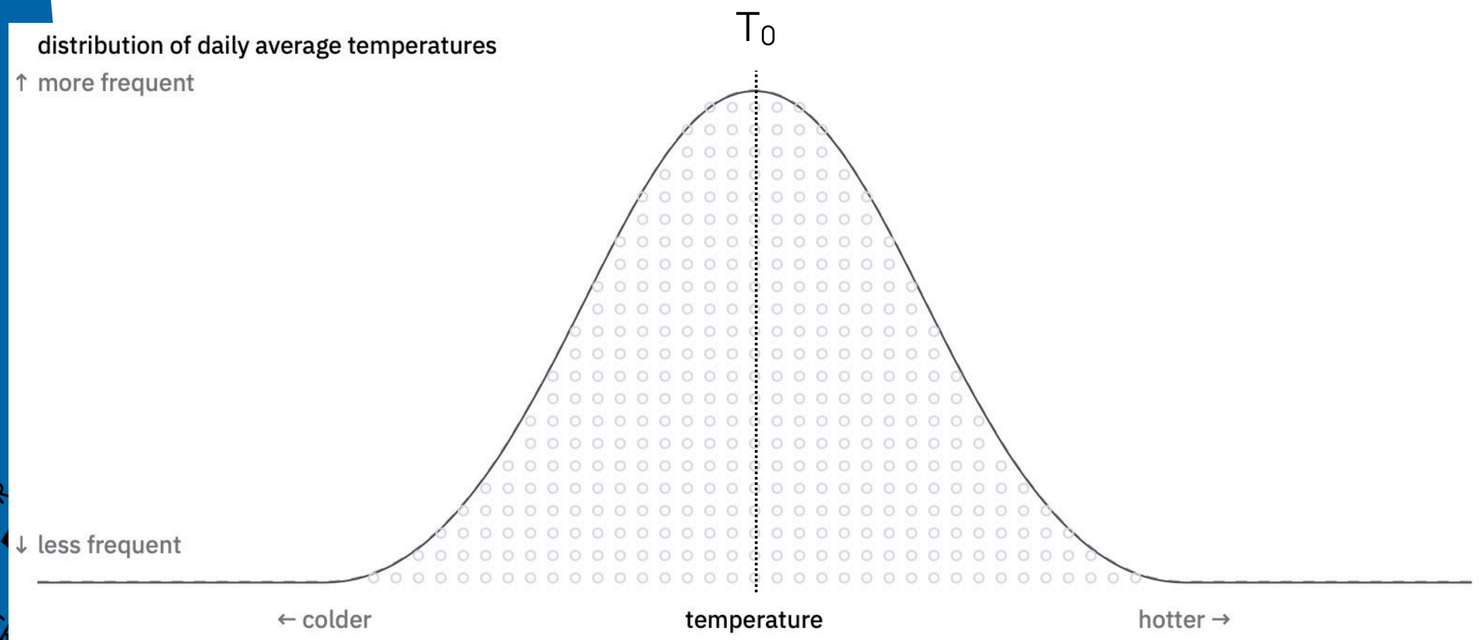
Trockenstress Index

- Klimaprojektionen für die Temperatur einhellig
- lokale Ausprägung hängt aber von einer Reihe weiterer Faktoren ab
- Unsicherheit vor allem darin, wann möglich Kipp-punkte überschritten werden

TU BERGAKADEMIE FREIBERG

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

Warum der Mittelwert die Veränderung nicht gut beschreibt

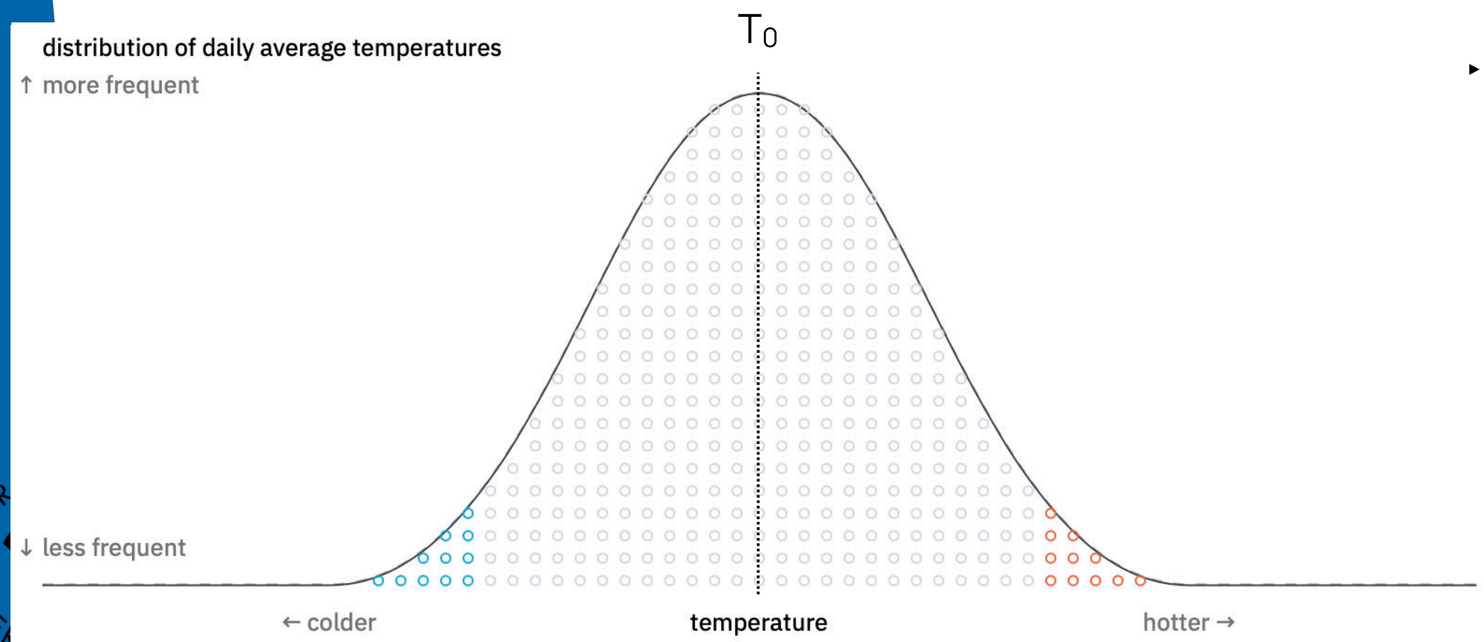


Der Klimawandel ist eng mit der Temperatur verknüpft

- Bisherige Temperaturverteilung

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

Warum der Mittelwert die Veränderung nicht gut beschreibt

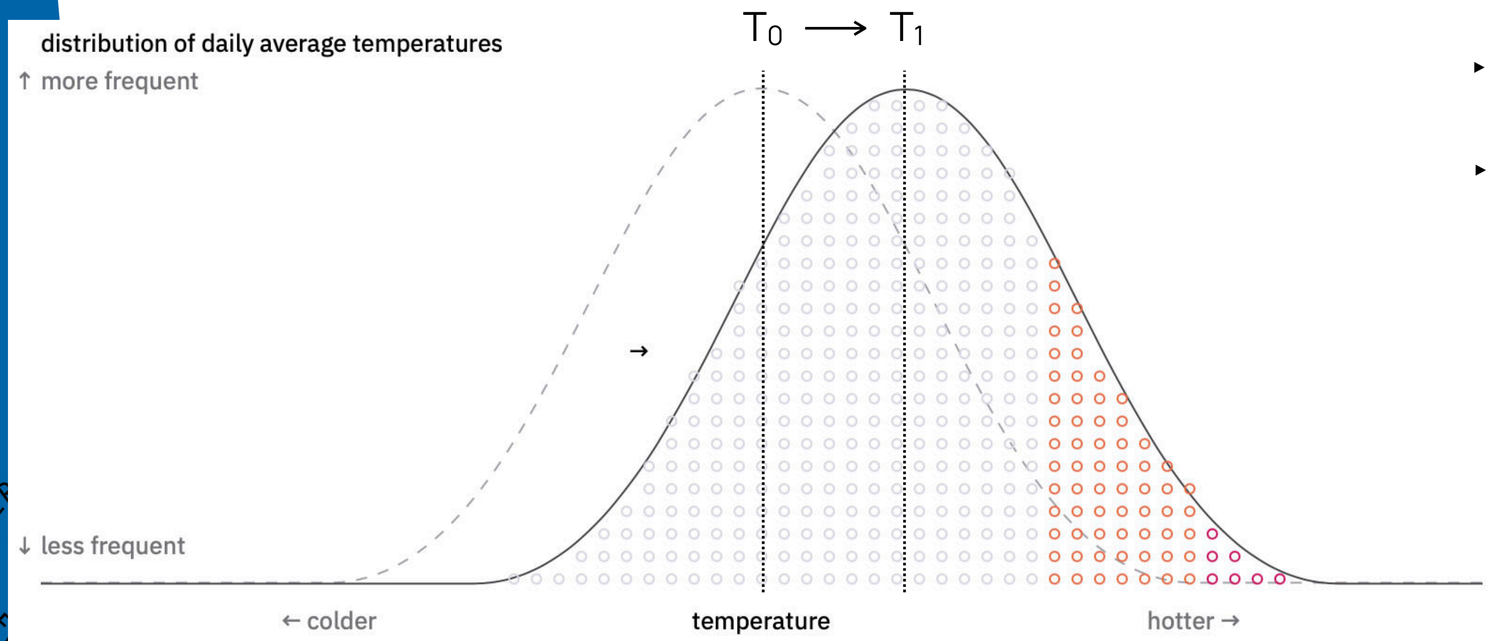


Der Klimawandel ist eng mit der Temperatur verknüpft

- Bisherige Temperaturverteilung
- und Extremsituationen

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

Warum der Mittelwert die Veränderung nicht gut beschreibt

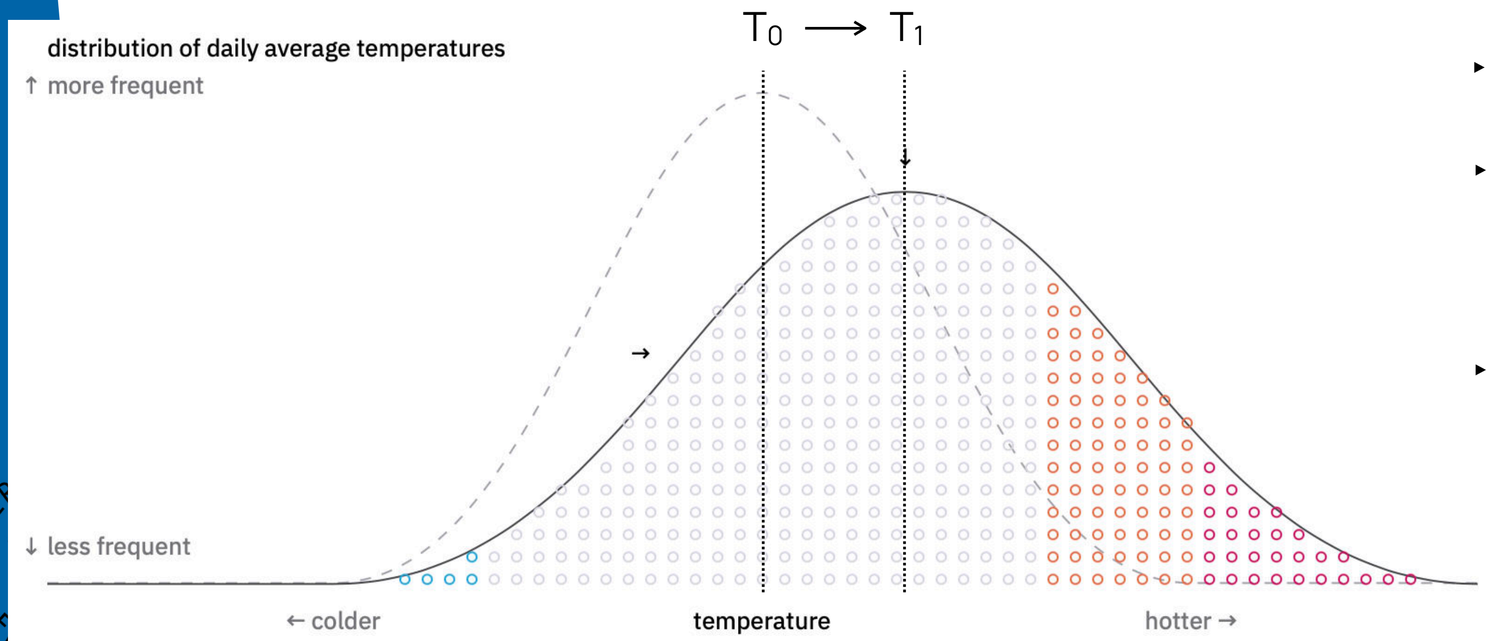


Der Klimawandel ist eng mit der Temperatur verknüpft

- Bisherige Temperaturverteilung
- und Extremsituationen
- Temperaturanstieg mit Zunahme von warmen Extrema

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

Warum der Mittelwert die Veränderung nicht gut beschreibt

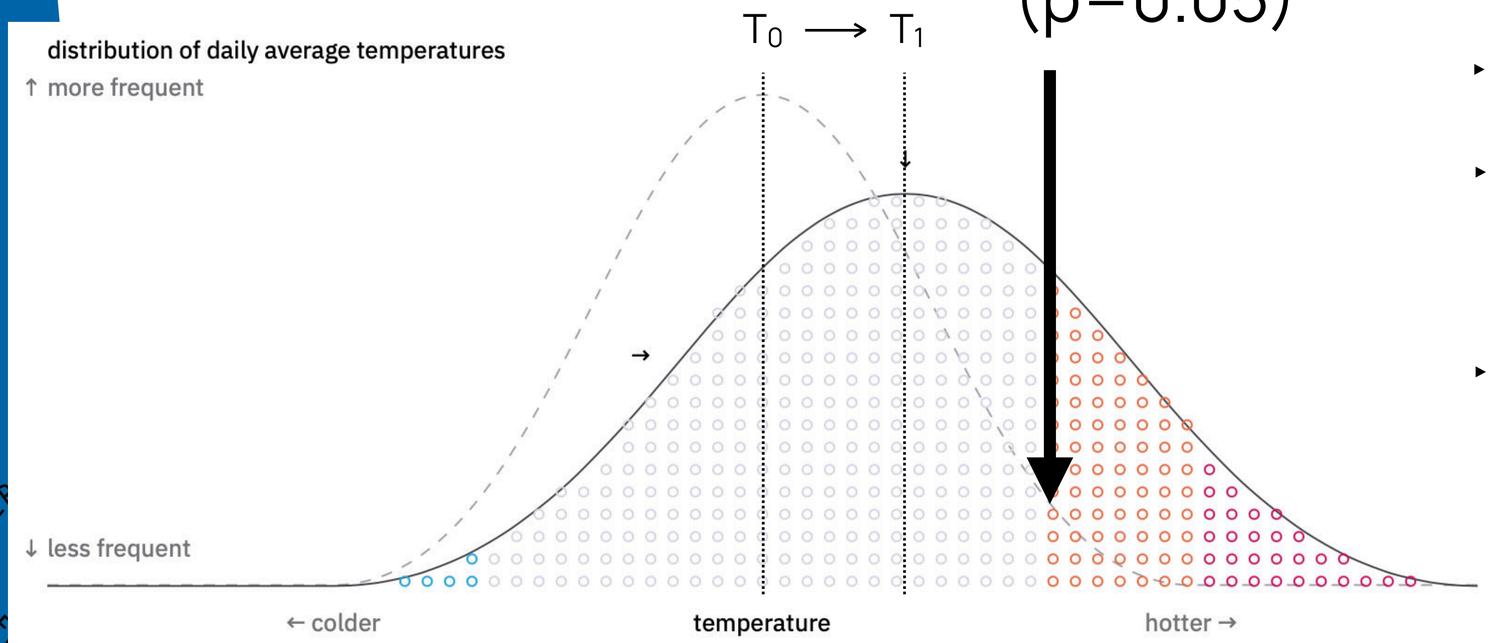


Der Klimawandel ist eng mit der Temperatur verknüpft

- Bisherige Temperaturverteilung
- und Extremsituationen
- Temperaturanstieg mit Zunahme von warmen Extrema
- trotz gleichen Mittelwerts ändert sich auch die Verteilung →dadurch noch mehr Extrema

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

Warum der Mittelwert die Veränderung nicht gut beschreibt



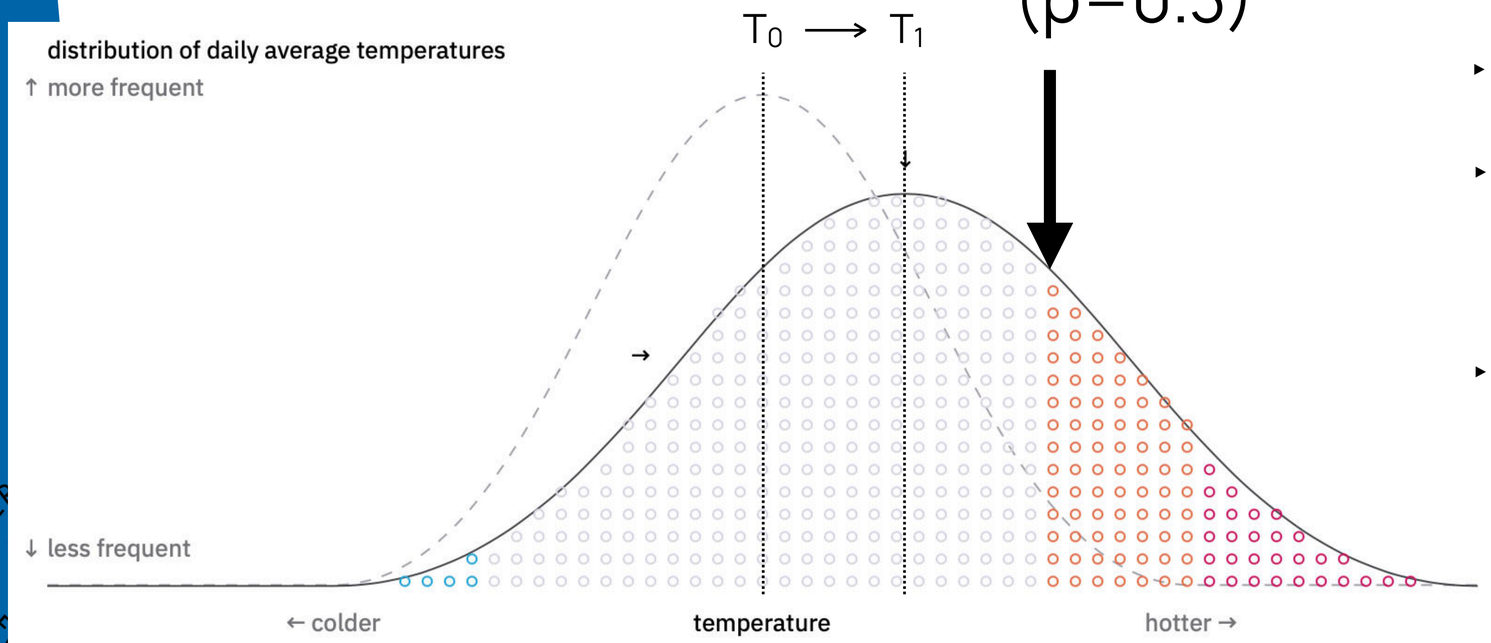
ein seltenes Ereignis 2025 (p=0.05)

Der Klimawandel ist eng mit der Temperatur verknüpft

- Bisherige Temperaturverteilung
- und Extremsituationen
- Temperaturanstieg mit Zunahme von warmen Extrema
- trotz gleichen Mittelwerts ändert sich auch die Verteilung →dadurch noch mehr Extrema

"2°C mehr ist doch nicht viel..."

Warum der Mittelwert die Veränderung nicht gut beschreibt



das gleiche Ereignis 2060 (p=0.3)

Der Klimawandel ist eng mit der Temperatur verknüpft

- Bisherige Temperaturverteilung
- und Extremsituationen
- Temperaturanstieg mit Zunahme von warmen Extrema
- trotz gleichen Mittelwerts ändert sich auch die Verteilung →dadurch noch mehr Extrema

Mit Unsicherheit gewappnet

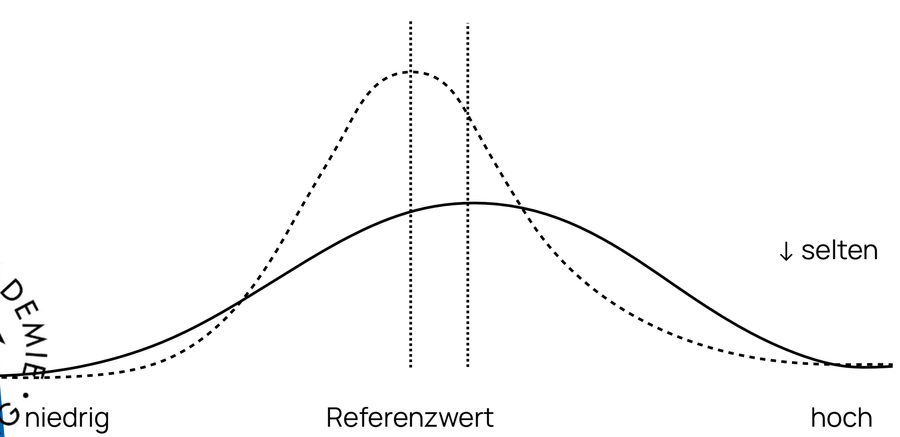
Spricht nun Unsicherheit gegen Entscheidungsfähigkeit?

Unsicherheit von Vorhersagen

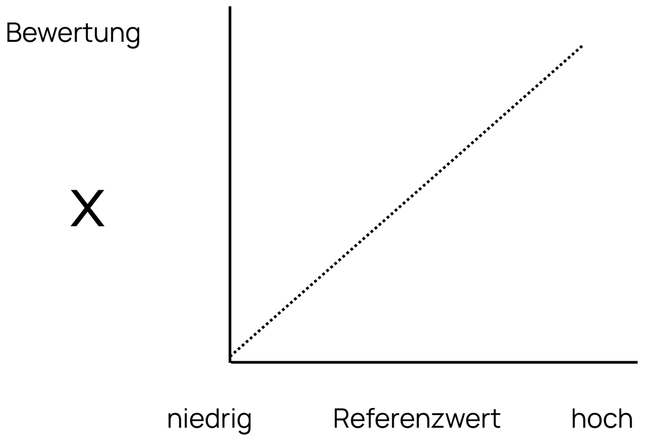
- bester Stand des Wissens
- zusätzliche Informationen über das Spektrum der Optionen

Subjektive Bewertung von Unsicherheit

- Wieviel Unsicherheit kann ich tolerieren?
- Wieviel würde mehr Sicherheit kosten?
- Welche subjektiven Elemente verändern die Bewertung?



X



Mit Unsicherheit gewappnet

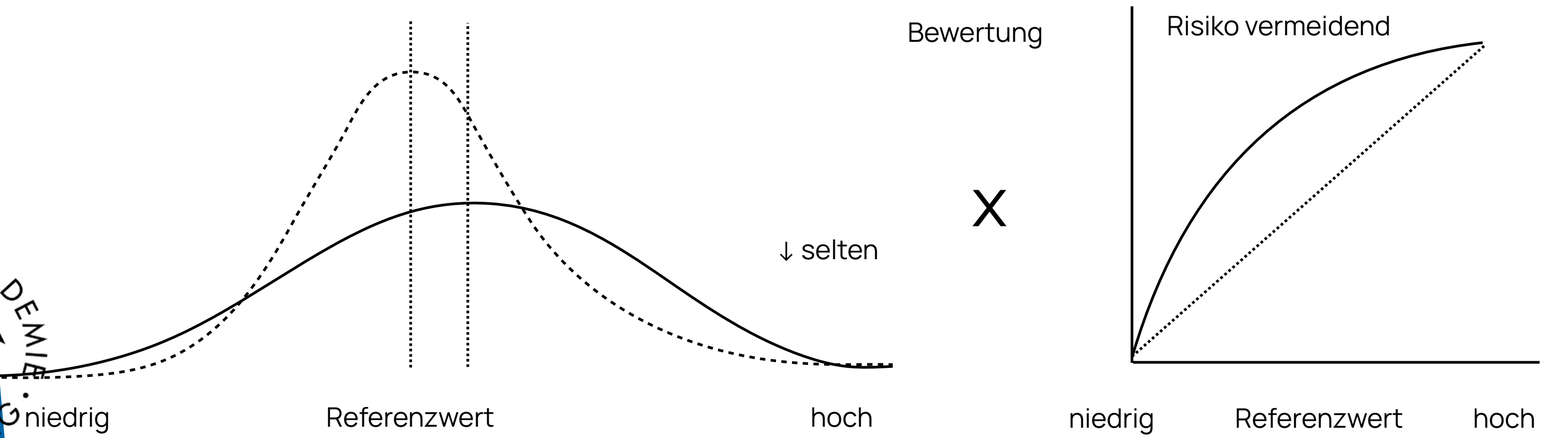
Spricht nun Unsicherheit gegen Entscheidungsfähigkeit?

Unsicherheit von Vorhersagen

- bester Stand des Wissens
- zusätzliche Informationen über das Spektrum der Optionen

Subjektive Bewertung von Unsicherheit

- Wieviel Unsicherheit kann ich tolerieren?
- Wieviel würde mehr Sicherheit kosten?
- Welche subjektiven Elemente verändern die Bewertung?



X

Mit Unsicherheit gewappnet

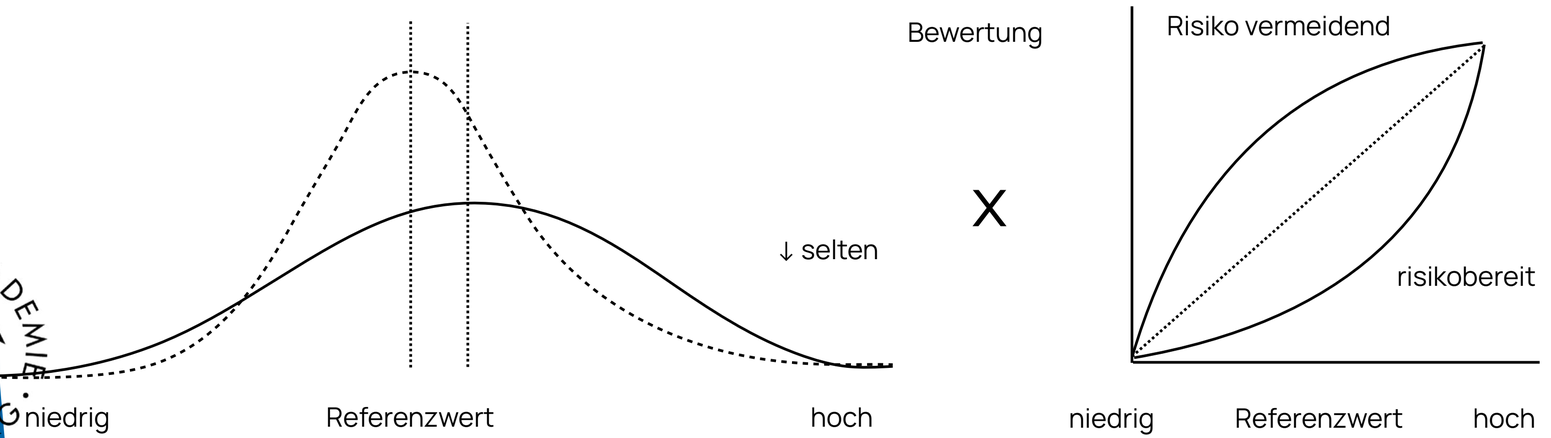
Spricht nun Unsicherheit gegen Entscheidungsfähigkeit?

Unsicherheit von Vorhersagen

- bester Stand des Wissens
- zusätzliche Informationen über das Spektrum der Optionen

Subjektive Bewertung von Unsicherheit

- Wieviel Unsicherheit kann ich tolerieren?
- Wieviel würde mehr Sicherheit kosten?
- Welche subjektiven Elemente verändern die Bewertung?



Bewertung

X

Mit Unsicherheit gewappnet

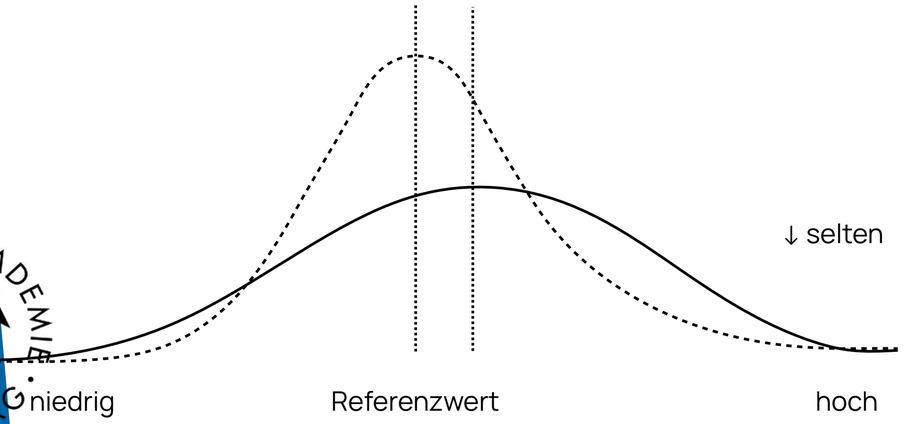
Spricht nun Unsicherheit gegen Entscheidungsfähigkeit?

Unsicherheit von Vorhersagen

- bester Stand des Wissens
- zusätzliche Informationen über das Spektrum der Optionen

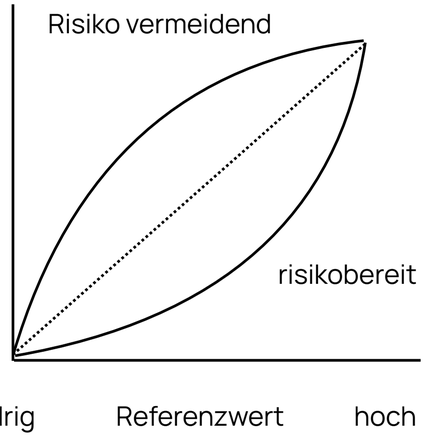
Subjektive Bewertung von Unsicherheit

- Wieviel Unsicherheit kann ich tolerieren?
- Wieviel würde mehr Sicherheit kosten?
- Welche subjektiven Elemente verändern die Bewertung?



Bewertung

x



Keine “rein rationale” Unsicherheit im Entscheidungsprozess…

- immer mit Bewertung
- immer auch subjektiv

Mit Unsicherheit gewappnet

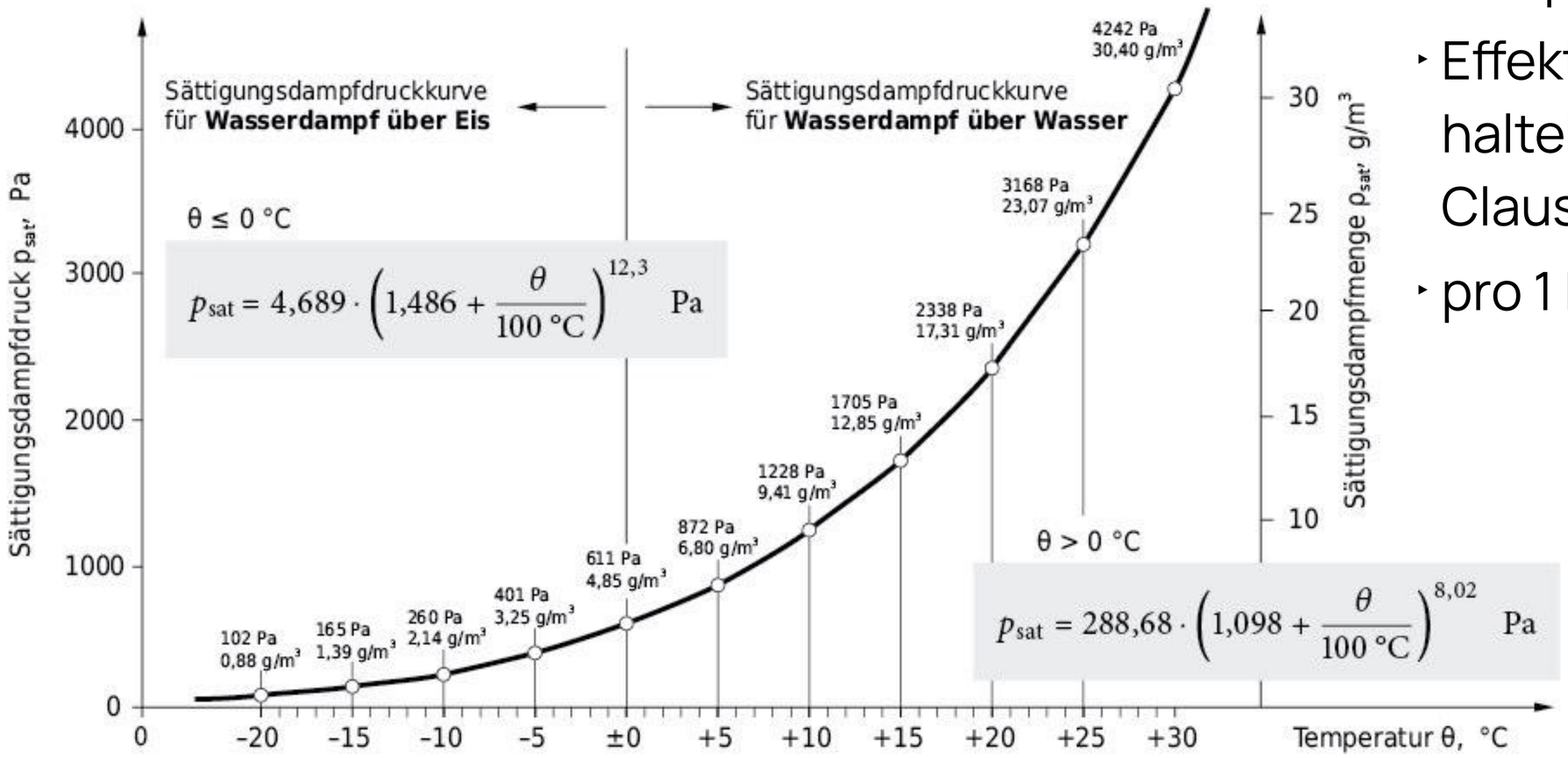
Spricht nun Unsicherheit gegen Entscheidungsfähigkeit?

Was bedeutet das nun für Anpassungsprojekte?

- Unsicherheit der Bewertung und sozialer Fragen ist deutlich größer als die Unsicherheit über die Prozesse und Klimaentwicklung
- Bewertung bezieht viele Elemente ein - vielfältige positive Wirkungen höher gegen vermeintliche Befürchtungen wichten
- Einordnende Transparenz über Unsicherheit öffnet vielfältigere Optionen

die wärmere Atmosphäre

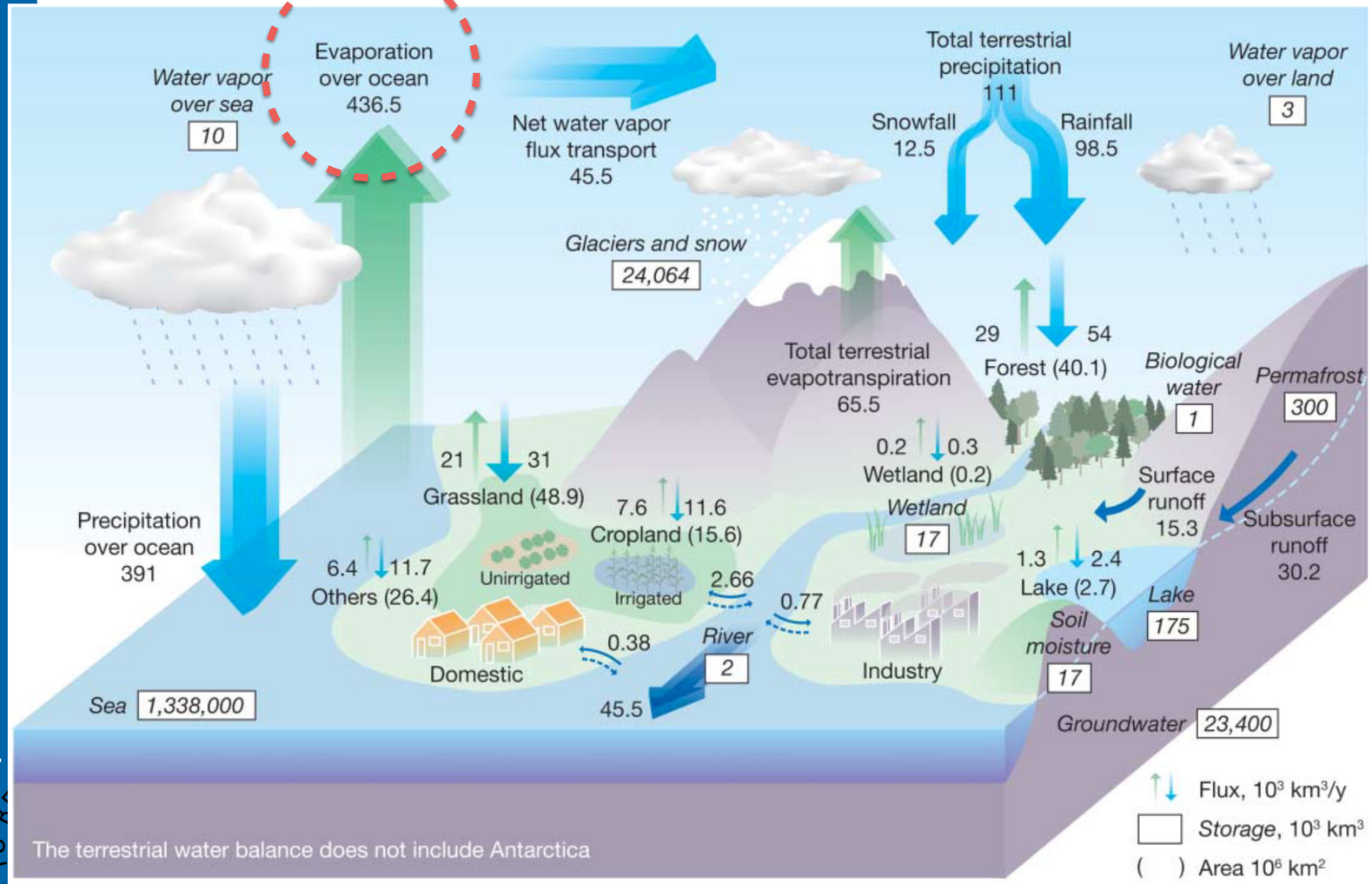
kann mehr Wasser halten und regnet seltener mit mehr Wasser



- Klimaprojektionen für die Temperatur einhellig
- Effekt auf die Wasser-haltekapazität in der Luft: Clausius-Clapeyron
- pro 1 K ca. 7% mehr Wasser

der globale Wasserkreislauf

die Verdunstung ist der Motor des Wasserkreislaufs

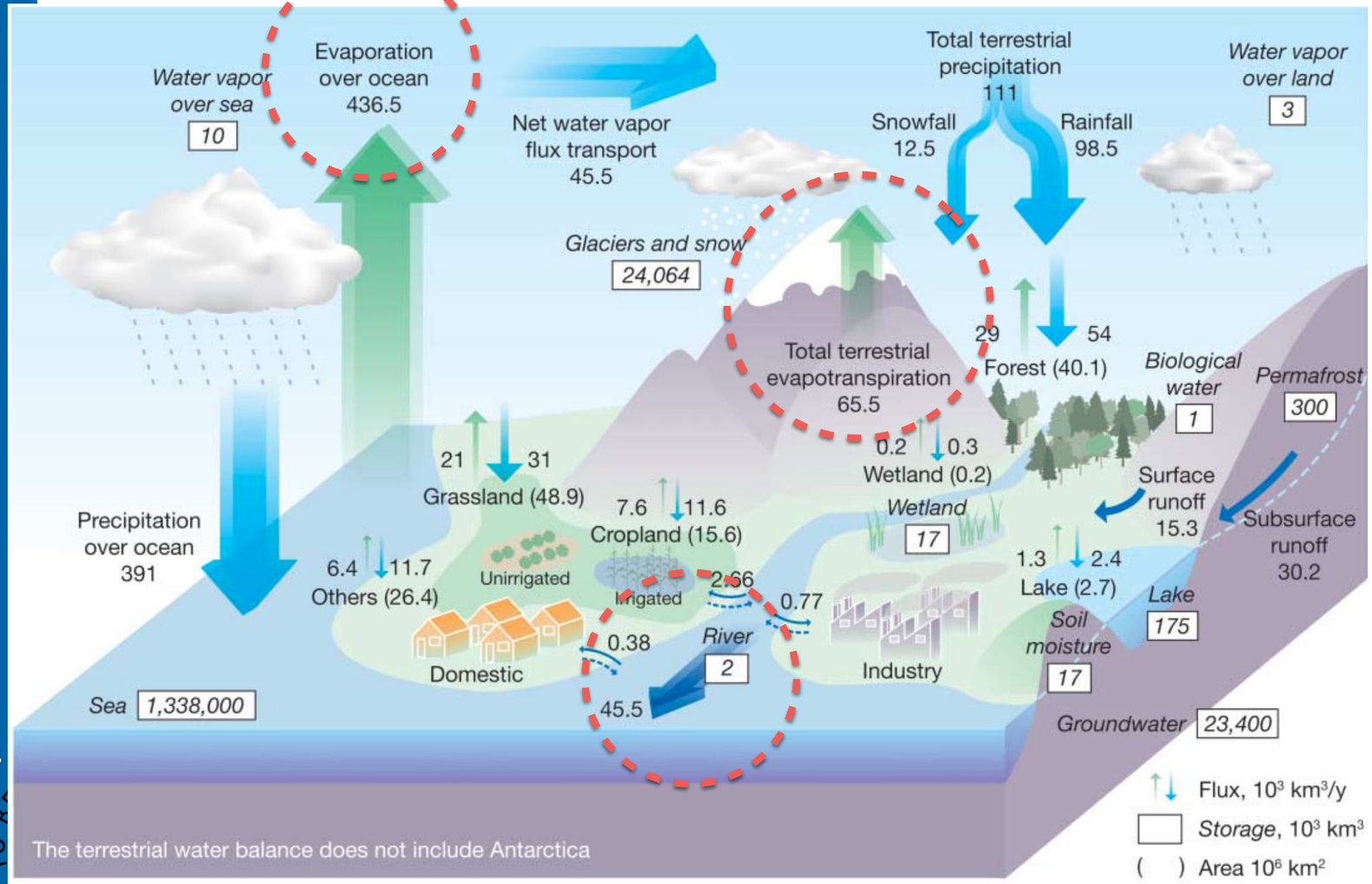


- ca. 60% der terrestrischen Wasserflüsse!

Oki, T. and Kanae, S.: Global Hydrological Cycles and World Water Resources, Science, 313, 1068–1072, https://doi.org/10.1126/science.1128845, 2006.

der globale Wasserkreislauf

die Verdunstung ist der Motor des Wasserkreislaufs

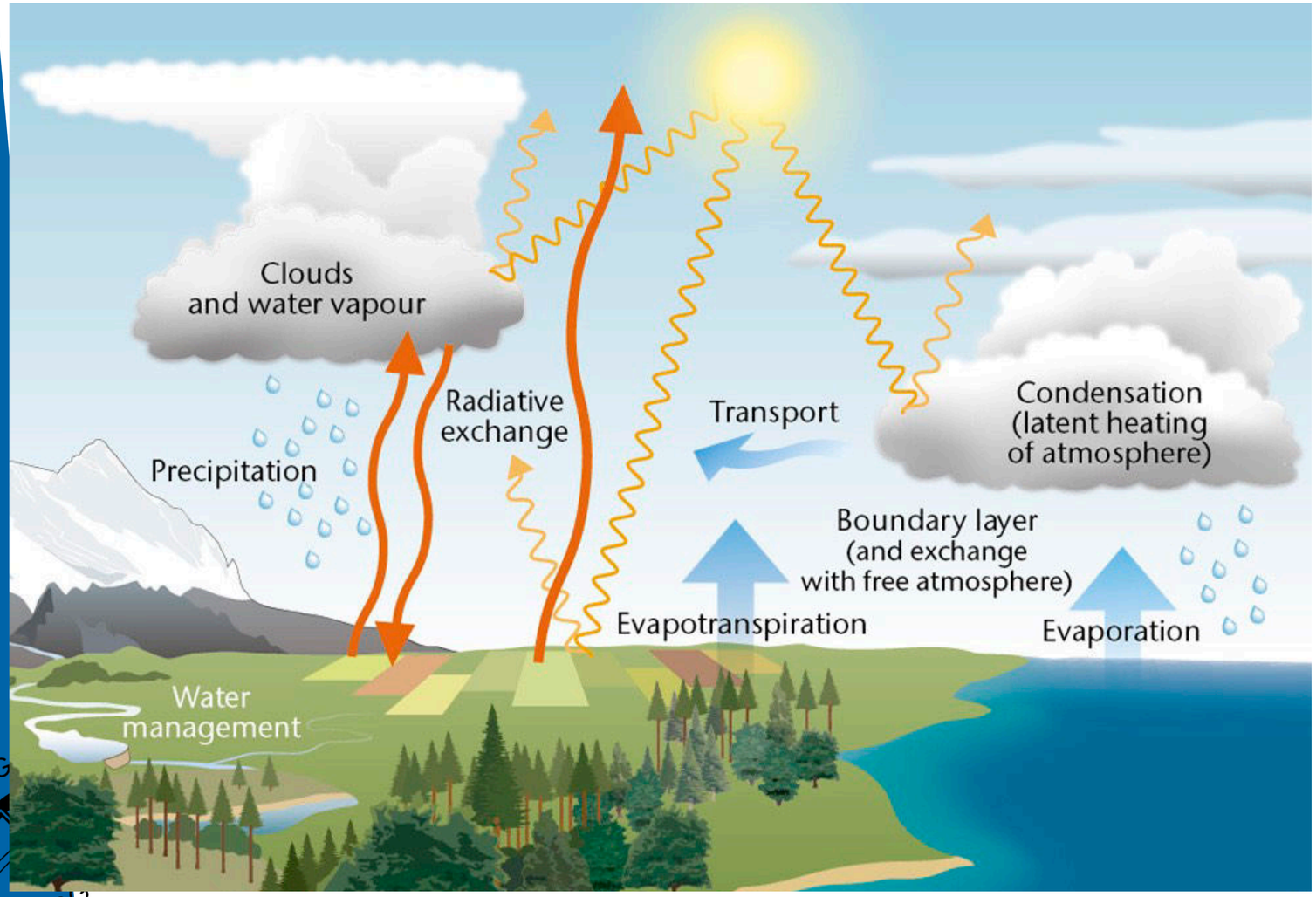


- ca. 60% der terrestrischen Wasserflüsse!

Oki, T. and Kanae, S.: Global Hydrological Cycles and World Water Resources, Science, 313, 1068–1072, https://doi.org/10.1126/science.1128845, 2006.

der globale Wasserkreislauf

die Verdunstung ist auch zentral im Energiefluss

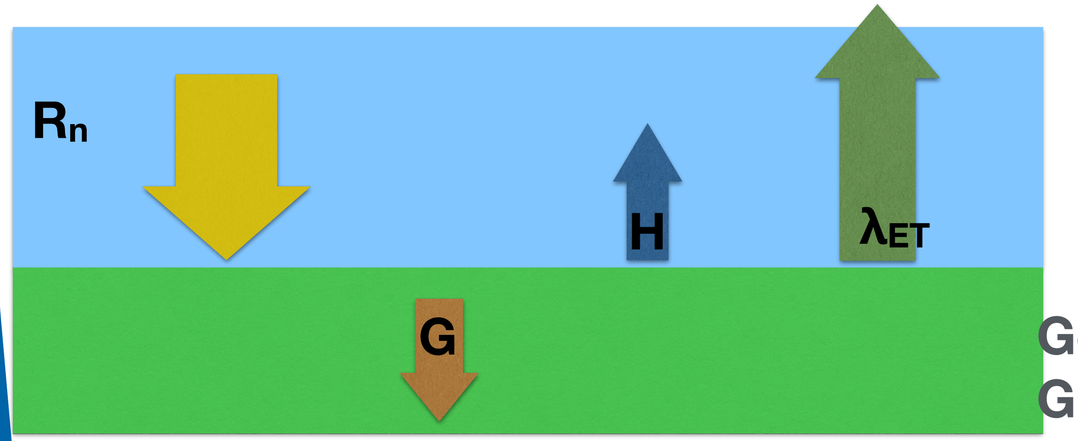


- ca. 60% der terrestrischen Wasserflüsse!
- Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche hängt an Verfügbarkeit von Wasser für die Verdunstung und Transpiration

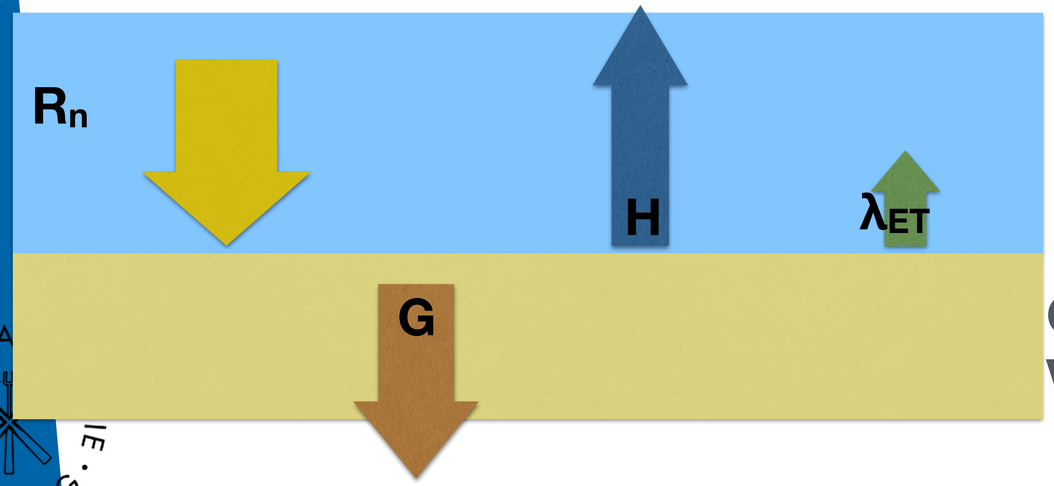
https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/water-cycle

der globale Wasserkreislauf

die Verdunstung ist auch zentral im Energiefluss



Gewässerflächen
Grün/Feuchtland



Gebäude
Versiegelte Flächen

- ca. 60% der terrestrischen Wasserflüsse!
- Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche hängt an Verfügbarkeit von Wasser für die Verdunstung und Transpiration

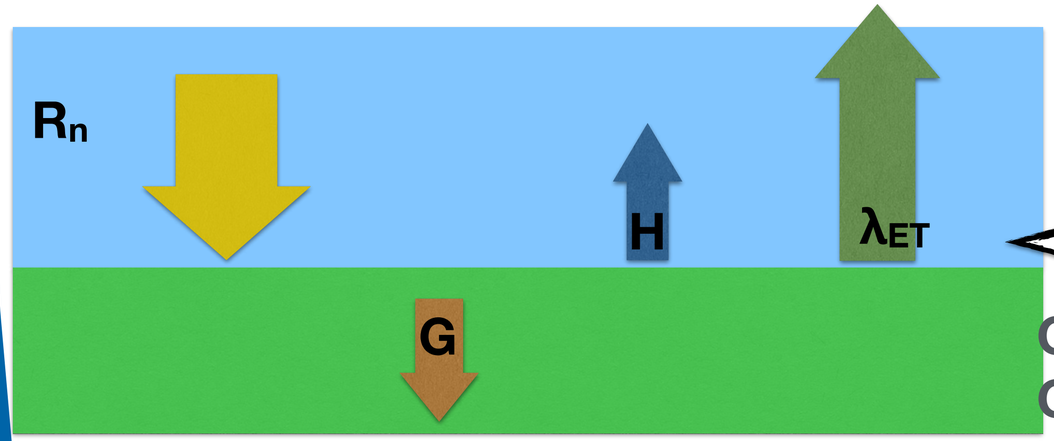
$$R_n - H - \lambda ET - G = 0$$

R_n = Nettostrahlung
H = Fühlbarer (sensibler) Wärmestrom
λET = Latenter Wärmestrom
G = Bodenwärmestrom

https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/water-cycle

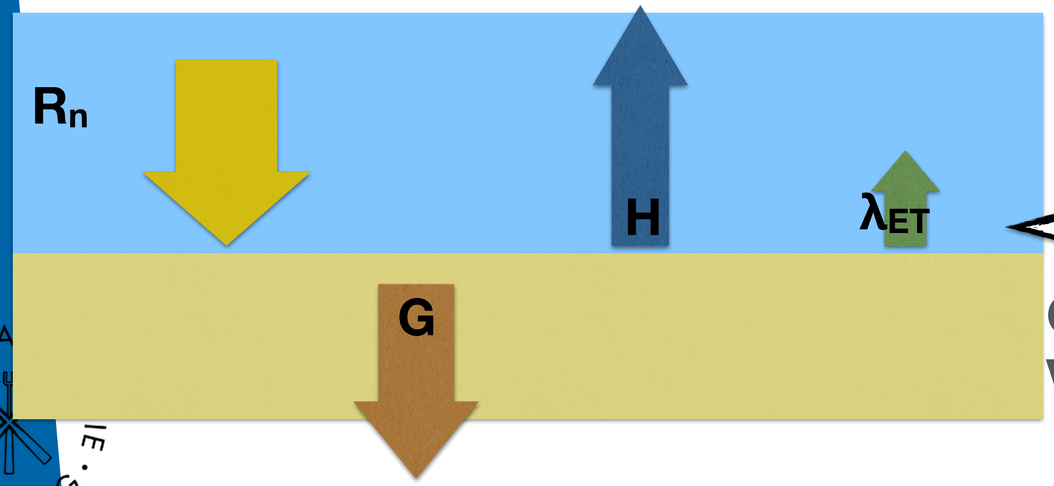
der globale Wasserkreislauf

die Verdunstung ist auch zentral im Energiefluss



geringe Erwärmung

Gewässerflächen
Grün/Feuchtland



hohe Erwärmung

Gebäude
Versiegelte Flächen

- ca. 60% der terrestrischen Wasserflüsse!
- Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche hängt an Verfügbarkeit von Wasser für die Verdunstung und Transpiration

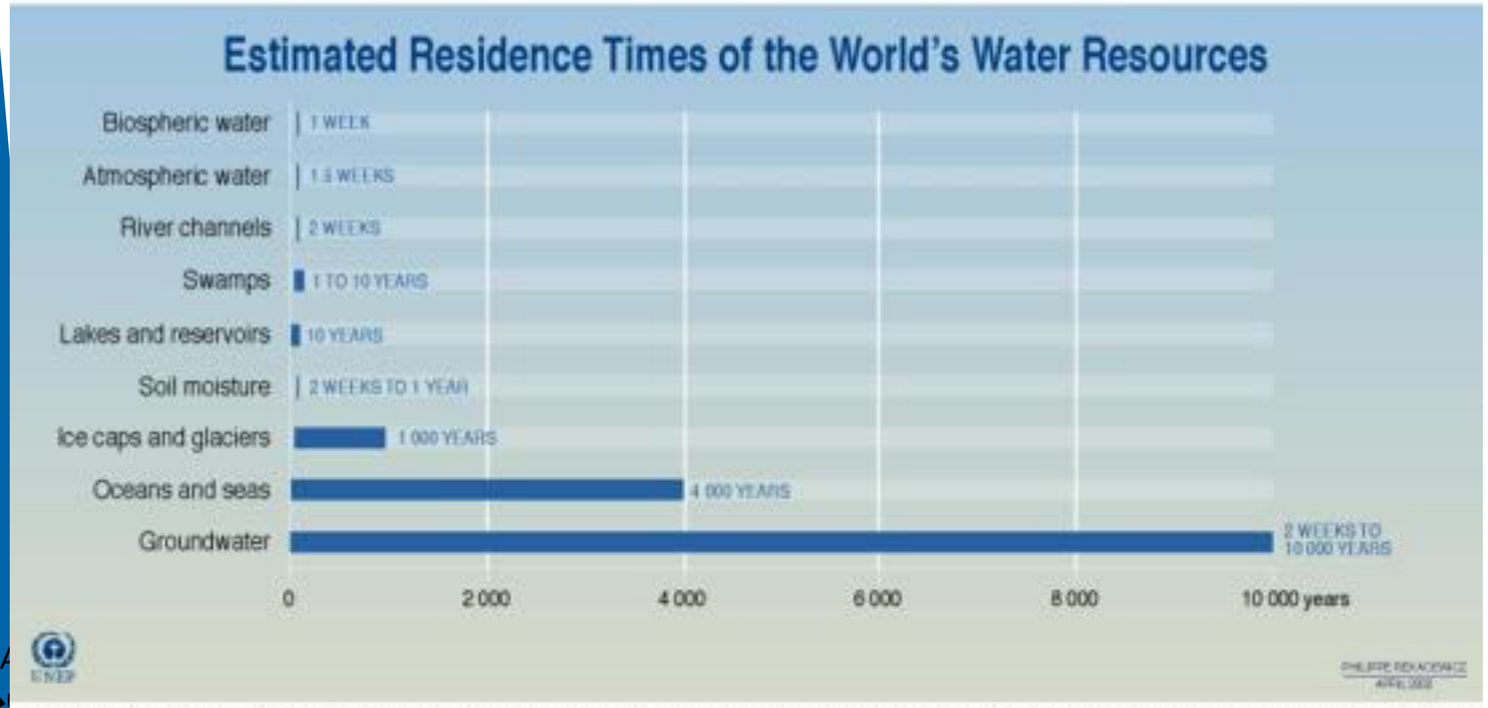
$$R_n - H - \lambda ET - G = 0$$

R_n = Nettostrahlung
H = Fühlbarer (sensibler) Wärmestrom
λET = Latenter Wärmestrom
G = Bodenwärmestrom

https://www.metoffice.gov.uk/weather/learn-about/weather/how-weather-works/water-cycle

der globale Wasserkreislauf

Verweilzeiten von Wasser als Schlüssel



Source: Igor A. Shiklomanov, State Hydrological Institute (SHI, St. Petersburg) and United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation (UNESCO, Paris), 1999; Max Planck Institute for Meteorology, Hamburg, 1994; Freeze, Allen, John, Cherry, *Groundwater*, Prentice-Hall: Engle wood Cliffs NJ, 1979.

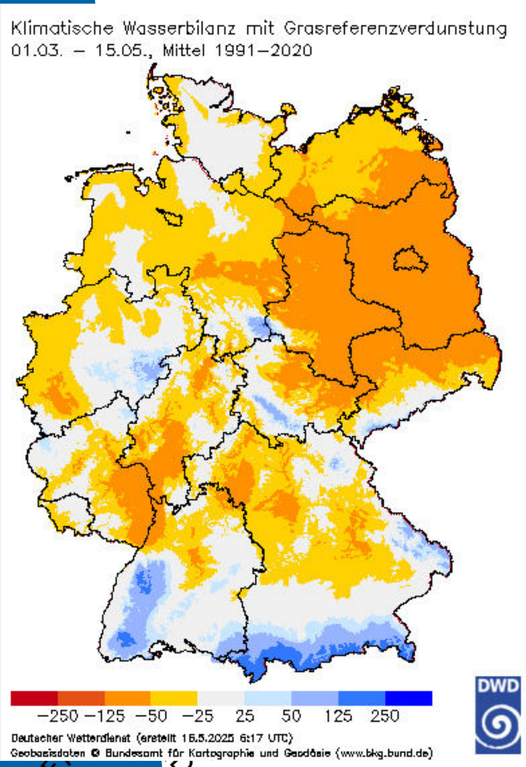
https://www.grida.no/resources/5794

- ca. 60% der terrestrischen Wasserflüsse!
- Strahlungsbilanz an der Erdoberfläche hängt an Verfügbarkeit von Wasser für die Verdunstung und Transpiration
- **Verweilzeiten**:
- Biosphäre: ±1 Woche
- Atmosphäre: ±1.5 Wochen
- Oberboden: wenige Wochen

Klimatische Wasserbilanz

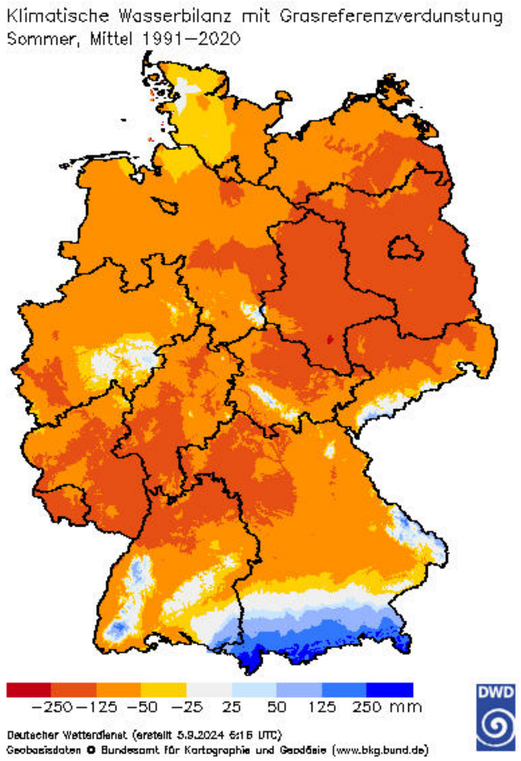
Der Osten war schon immer trocken – jetzt droht Versteppung

Frühjahr



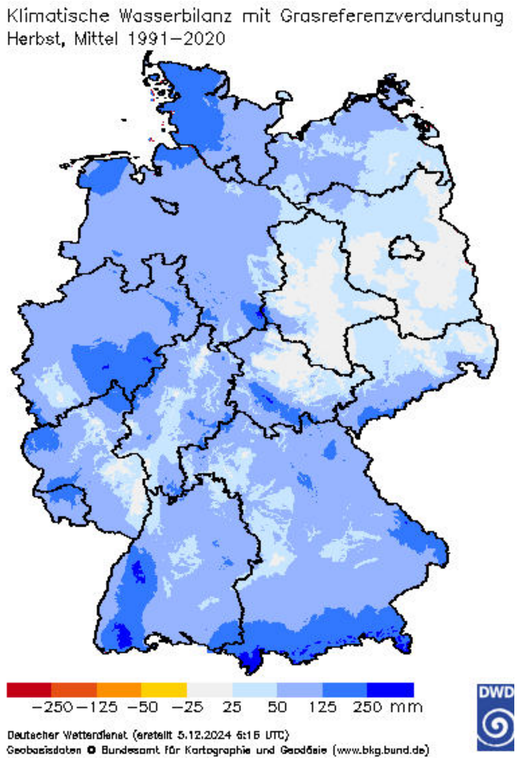
−45 mm

Sommer



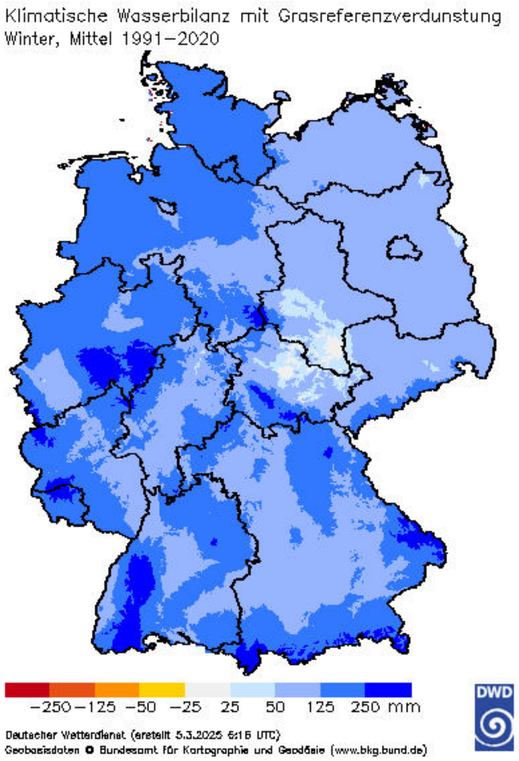
-100 mm

Herbst



+30 mm

Winter



+71 mm

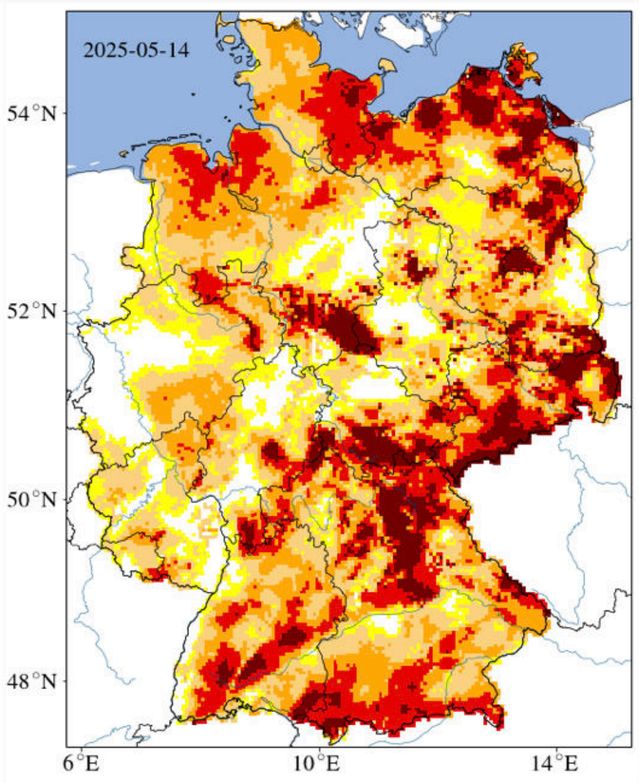
https://www.ufz.de/index.php?de=37937

https://www.dwd.de/DE/leistungen/wasserbilanzq/wasserbilanzq.html

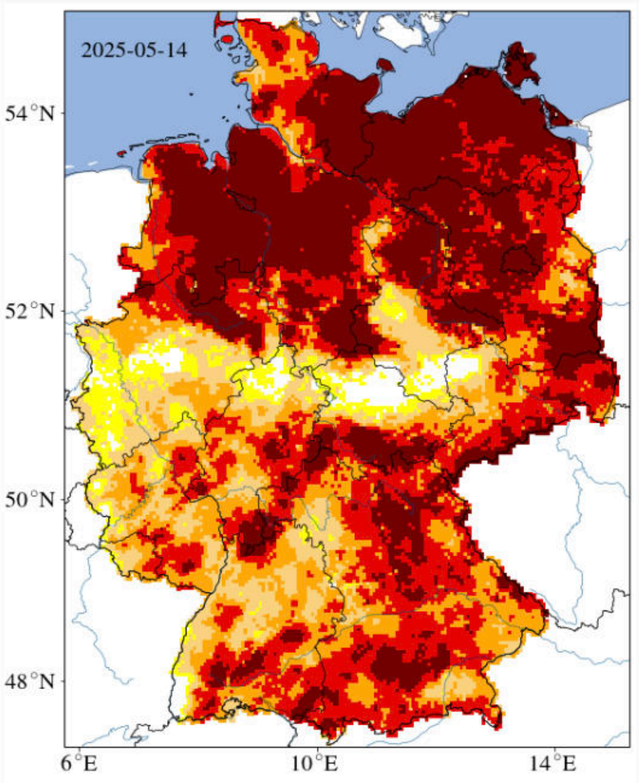
Klimatische Wasserbilanz

/ersteppung

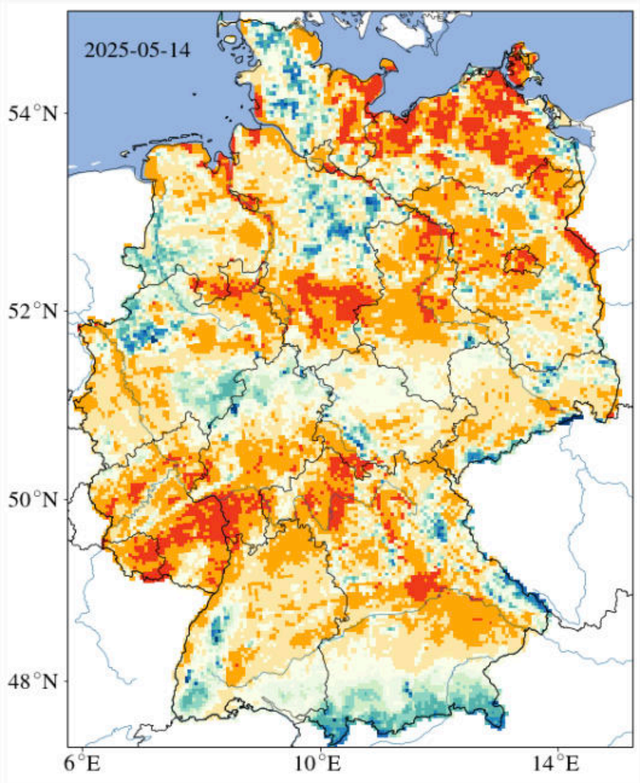
Dürre im Gesamtboden bis ca. 1.8m über die letzten 30 Tage



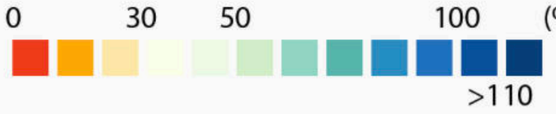
Dürre im Oberboden bis 25cm über die letzten 30 Tage



Pflanzenverfügbares Wasser bis 25cm, tagesaktuell



- ~3-Jährlichkeit (Trockenheit)
- 5-Jährlichkeit (Dürre)
- 10-Jährlichkeit (Dürre)
- 20-Jährlichkeit (Dürre)
- 50-Jährlichkeit (Dürre)



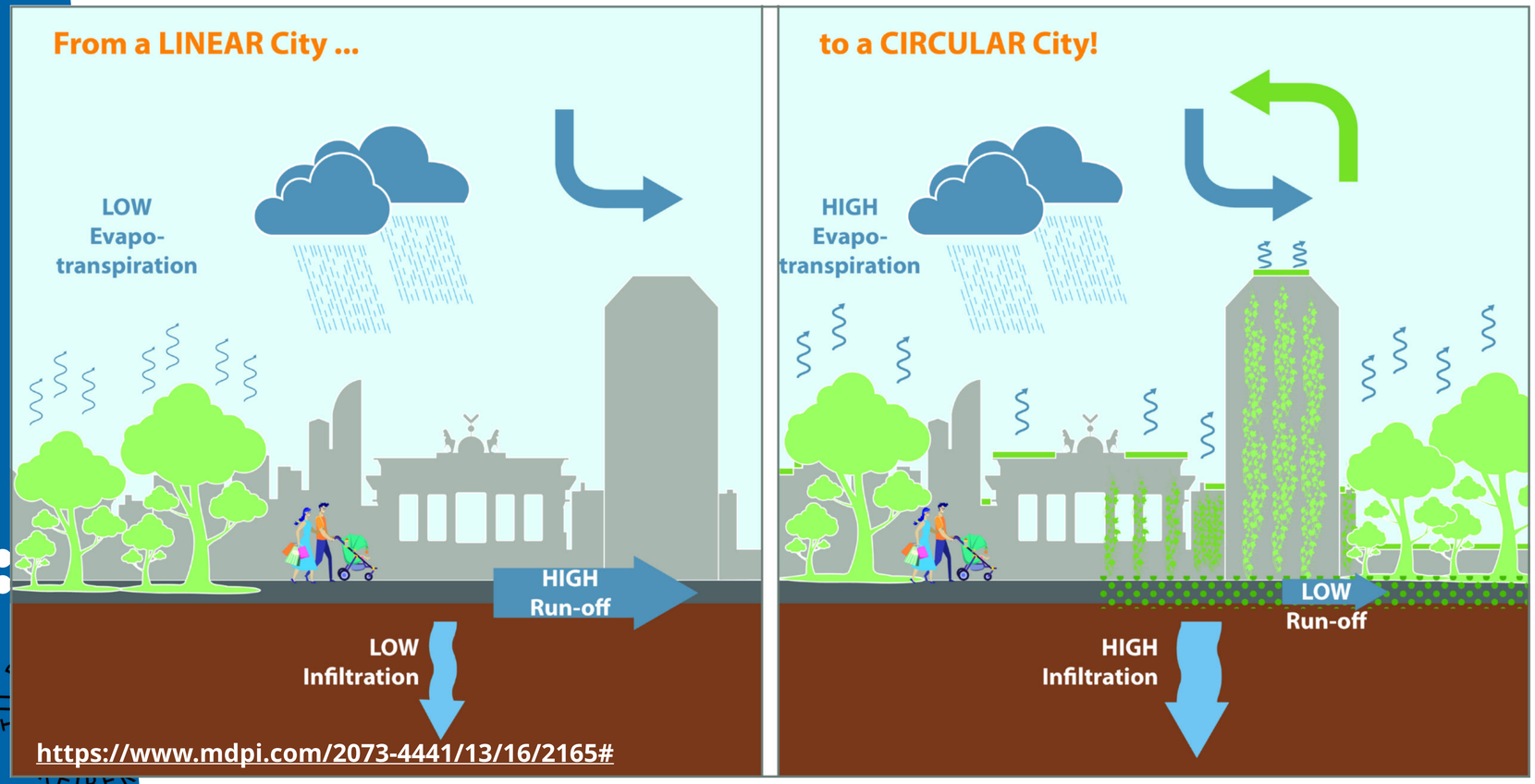
0 %nFK, Welkepunkt
< 30 %nFK, Trockenstress
< 50 %nFK, beginnender Trockenstress

Aktuell bereits Dürre

https://www.ufz.de/index.php?de=37937
d.de/DE/leistungen/wasserbilanzq/wasserbilanzq.html

Zurück zur Schwammstadt

Wasserverfügbarkeit = Regenwasserrückhalt

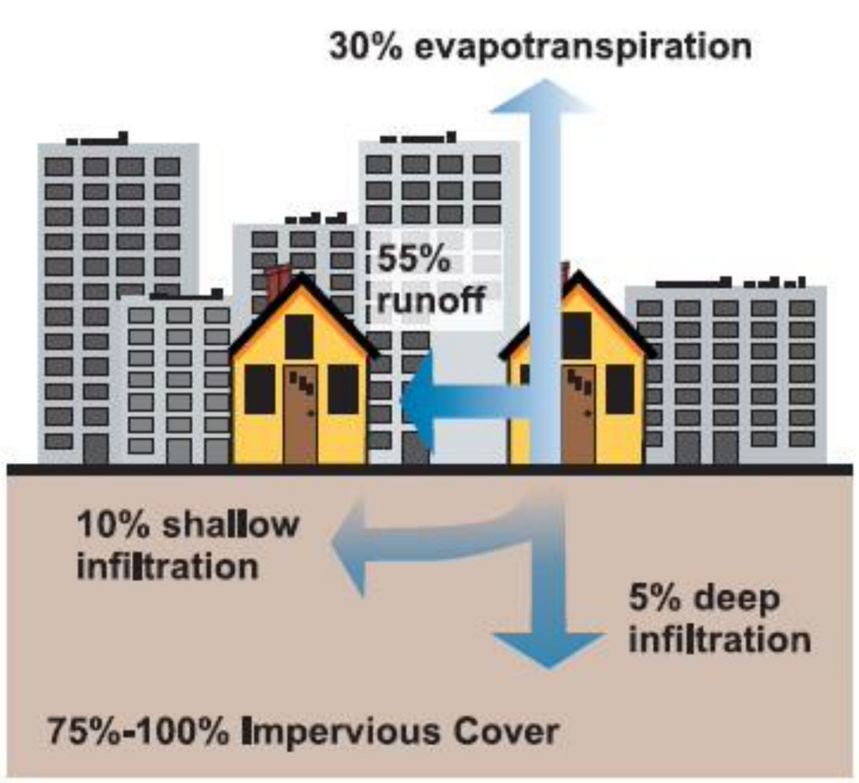


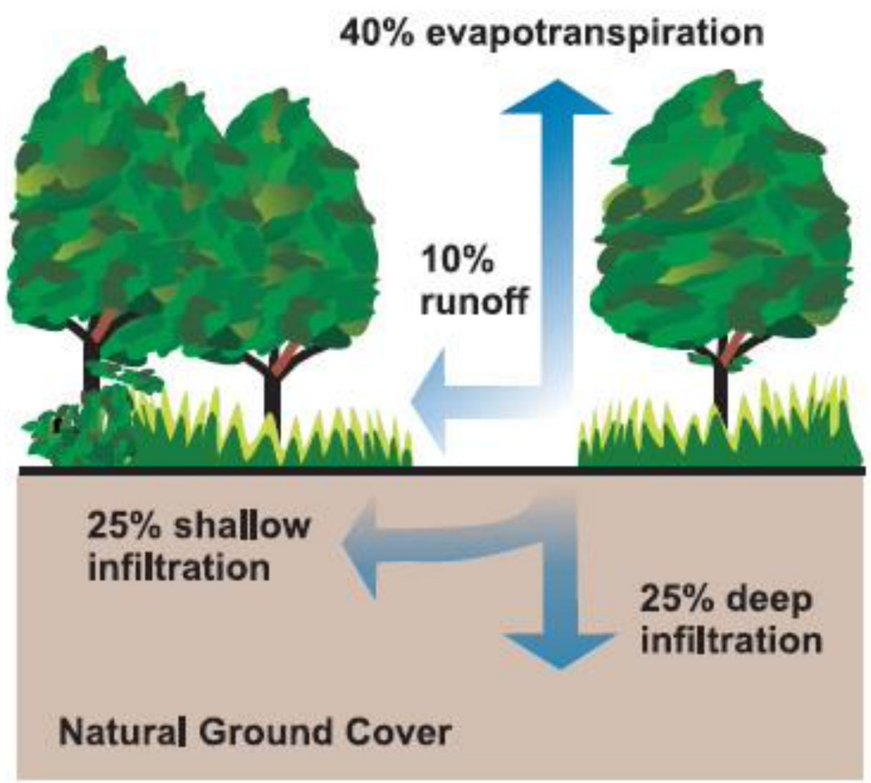
https://www.mdpi.com/2073-4441/13/16/2165#

- bisher Fokus auf schnelle Drainage
- führt einer deutlich kürzeren Verweilzeit des Wassers (Stunden)
- und zu überlasteten Abwassersystemen
- und steht dann der Blau-Grünen-Infrastruktur nicht mehr zur Verfügung

Zurück zur Schwammstadt

Wasserverfügbarkeit = Regenwasserrückhalt



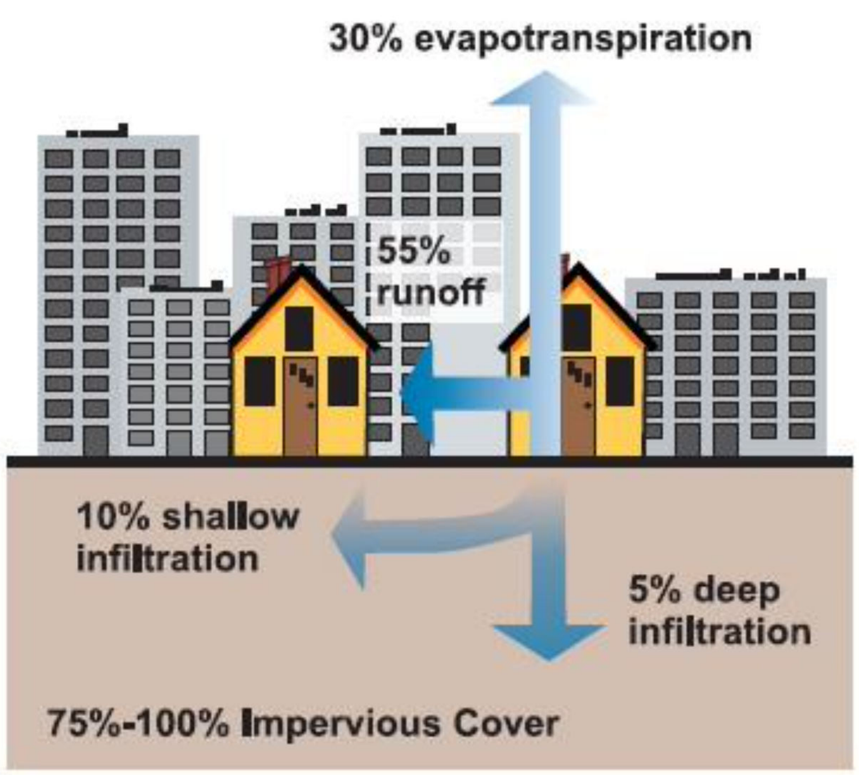


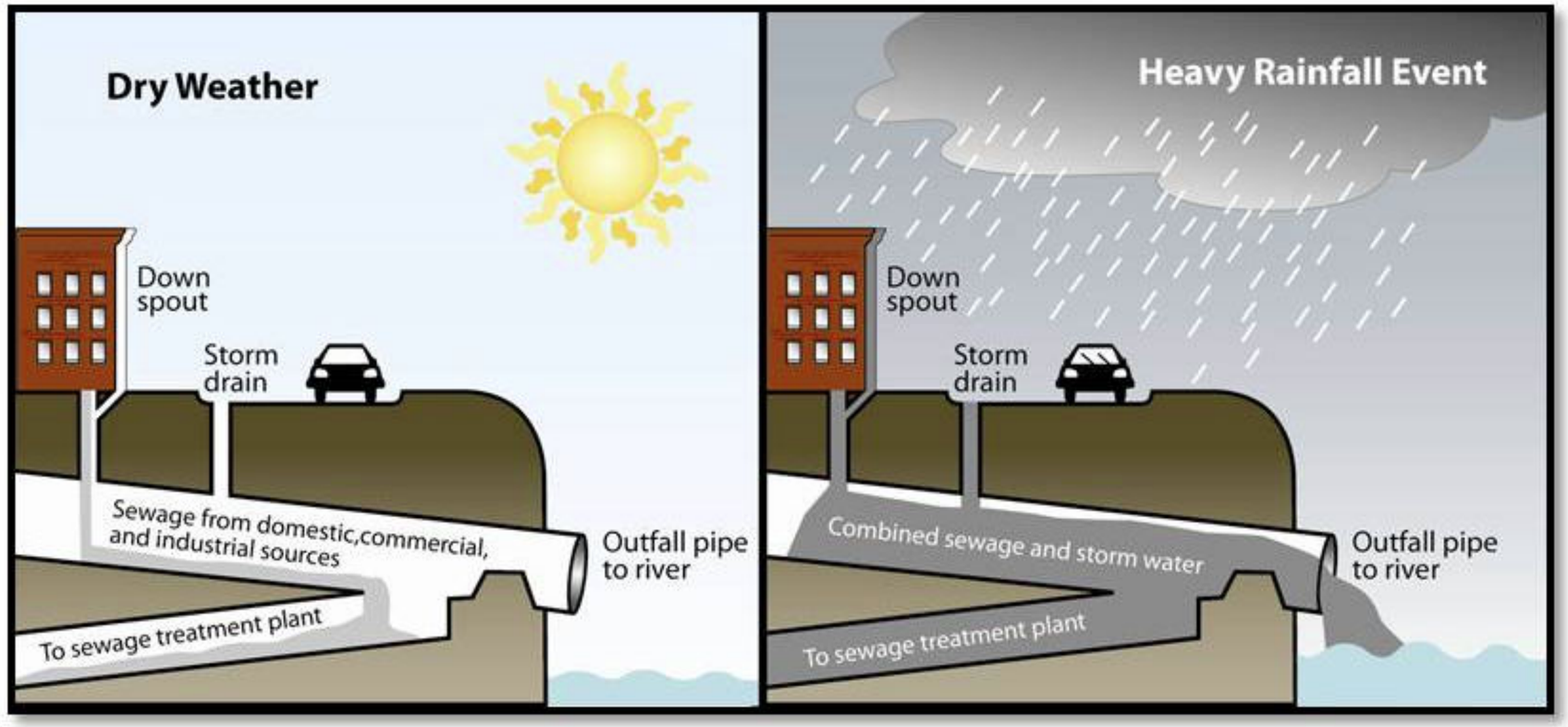
- bisher Fokus auf schnelle Drainage
- führt einer deutlich kürzeren Verweilzeit des Wassers (Stunden)
- und zu überlasteten Abwassersystemen
- und steht dann der Blau-Grünen-Infrastruktur nicht mehr zur Verfügung

Zurück zur Schwammstadt

Wasserverfügbarkeit = Regenwasserrückhalt

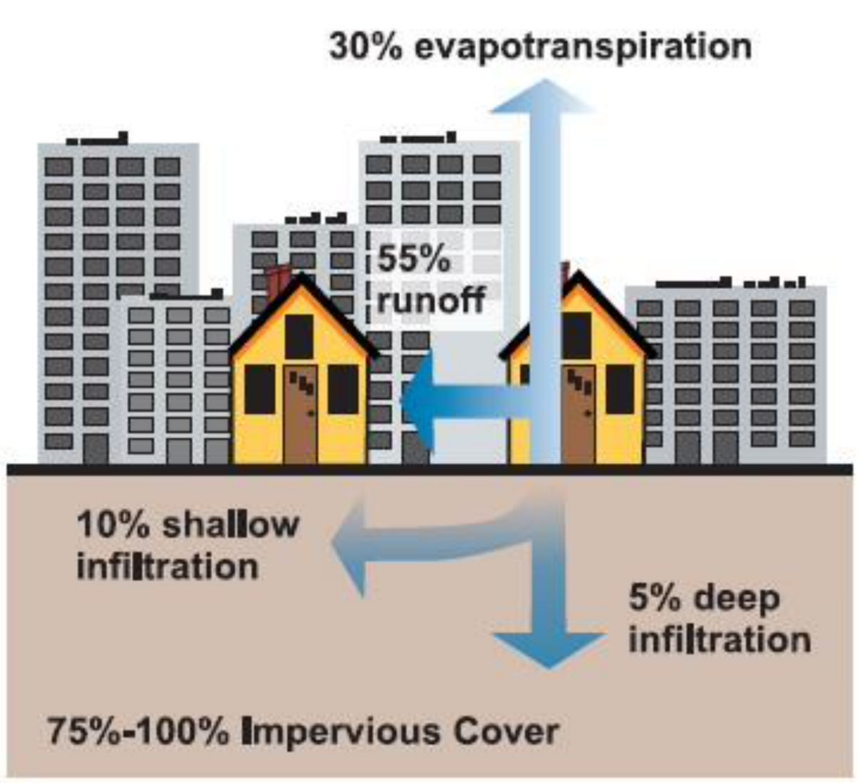
- bisher Fokus auf schnelle Drainage

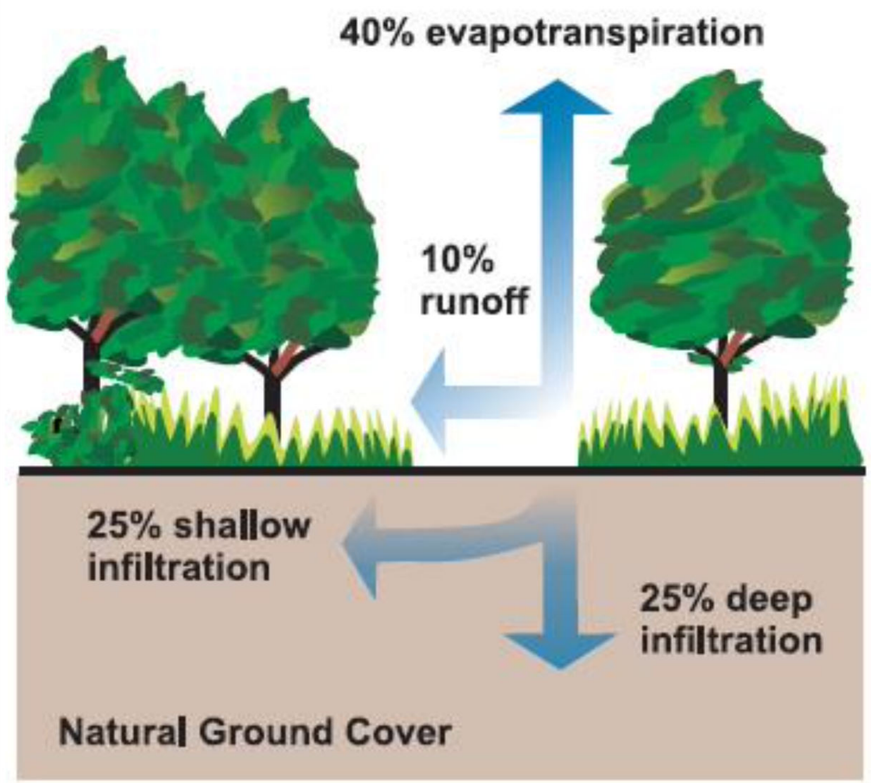




Zurück zur Schwammstadt

Wasserverfügbarkeit = Regenwasserrückhalt

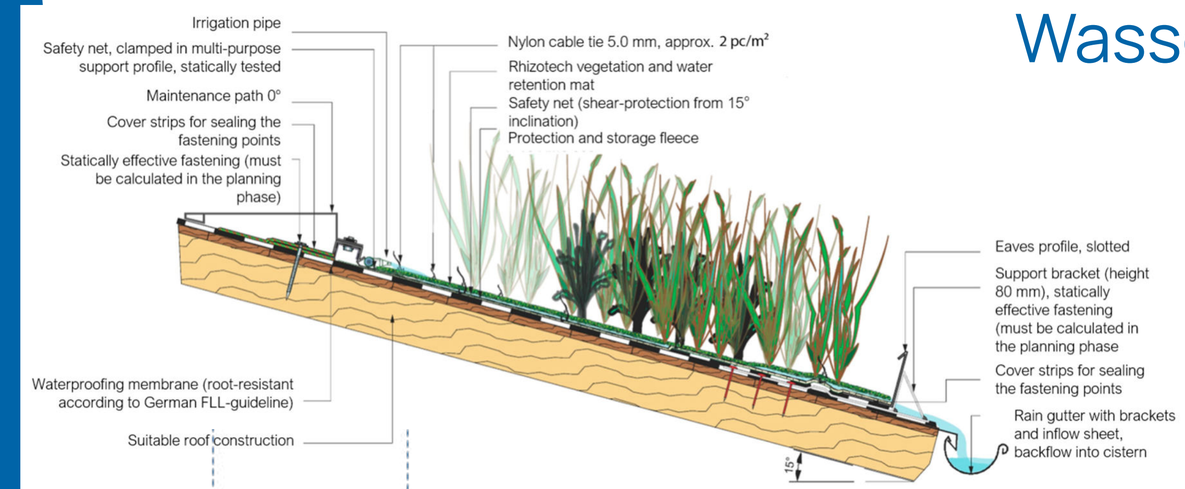




- bisher Fokus auf schnelle Drainage
- führt einer deutlich kürzeren Verweilzeit des Wassers (Stunden)
- und zu überlasteten Abwassersystemen
- und steht dann der Blau-Grünen-Infrastruktur nicht mehr zur Verfügung

Ein Speicherproblem?

Wasserrückhalt intensiverer Regenereignisse

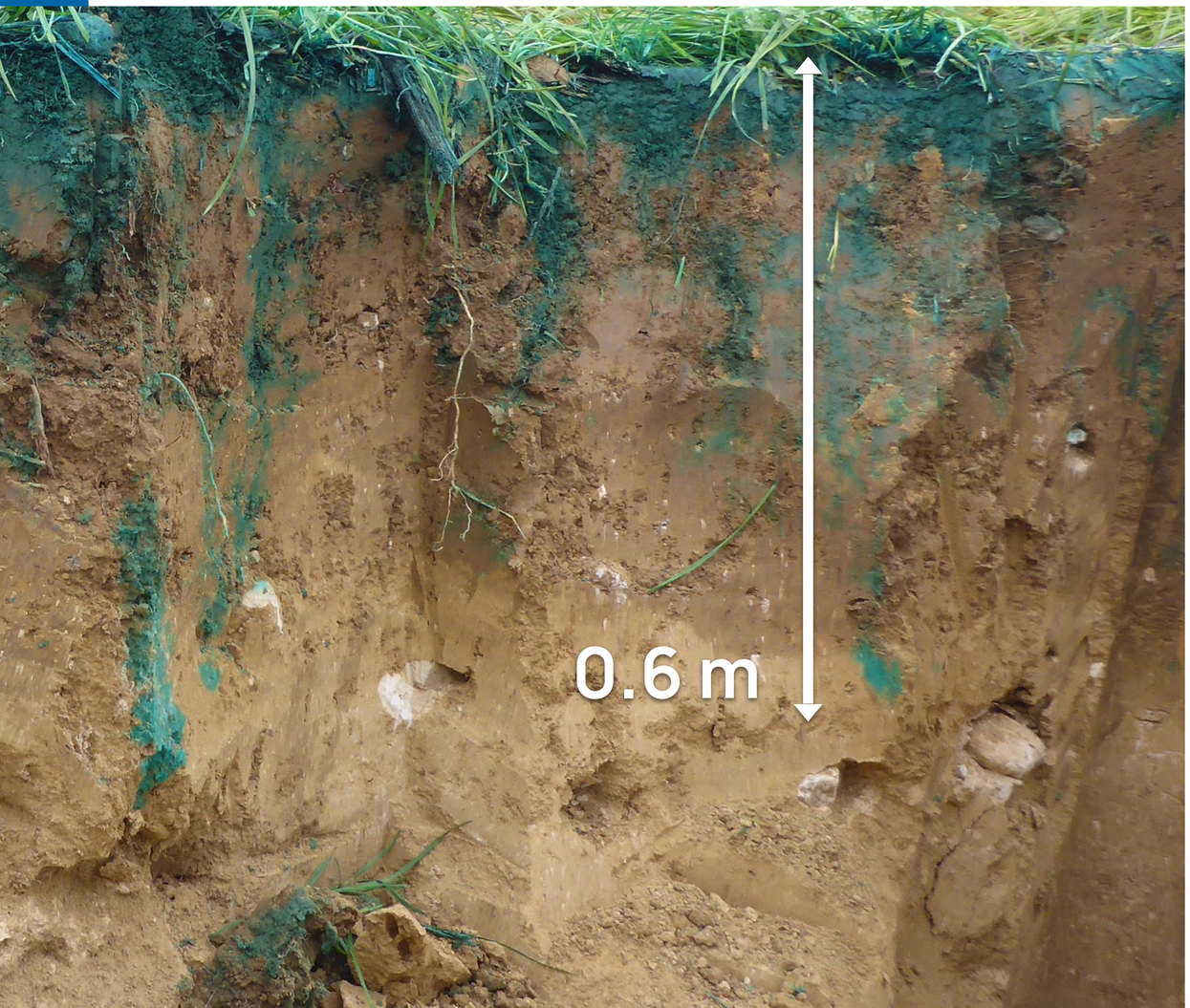


- einzelne Elemente blau-grüner Infrastruktur haben sehr begrenzte Speicher (wenige mm Wassersäule)
- Starkregen bringen 50 mm in kurzer Zeit, die Verdunstung braucht ca. 6-10 mm an Sommertagen

Zehnsdorf et al., 2019, https://doi.org/10.3390/w11091845

Trockene Strukturen

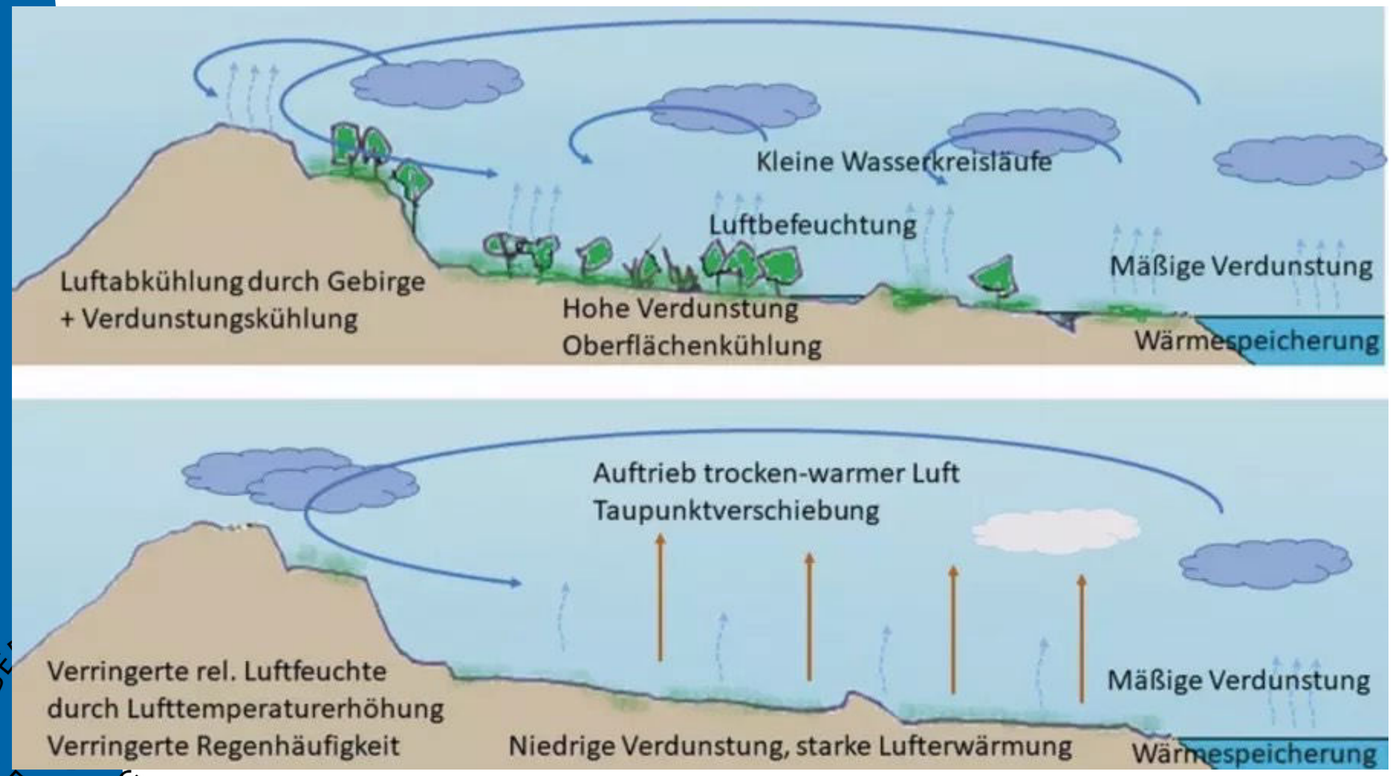
Wasserrückhalt intensiverer Regenereignisse



- in porösen Systeme spielen hydraulische Leitfähigkeit und Speicherfähigkeit oft gegeneinander:
- Nass: gut vernetzt und Wasser erreicht viele Porenräume – aber wenig Platz
- Trocken: schlecht vernetzt und Wasser erreicht viele Porenräume nicht
- **Effekt:** Systeme mit kleinen Speichern trocknen schnell aus und schaffen es nicht kurze intensive Ereignisse schnell genug aufzunehmen

Netzwerk statt Schwamm?

Ein Versuch, wie Schwammstadtkonzepte gelingen können



Meyer & Bucholz 2022: https://neuelandschaft.de/artikel/wasser-zurueckhalten-speichern-und-verdunsten-reparatur-der-landschaft-9522

Vernetzter Wasserrückhalt und kleine Kreisläufe

- Verdunstung ist nicht Wasserverlust sondern Kreislaufwirtschaft
- dafür darf jedoch kein Grund-wasser/Trinkwasser verwendet werden

Netzwerk statt Schwamm?

Ein Versuch, wie Schwammstadtkonzepte gelingen können

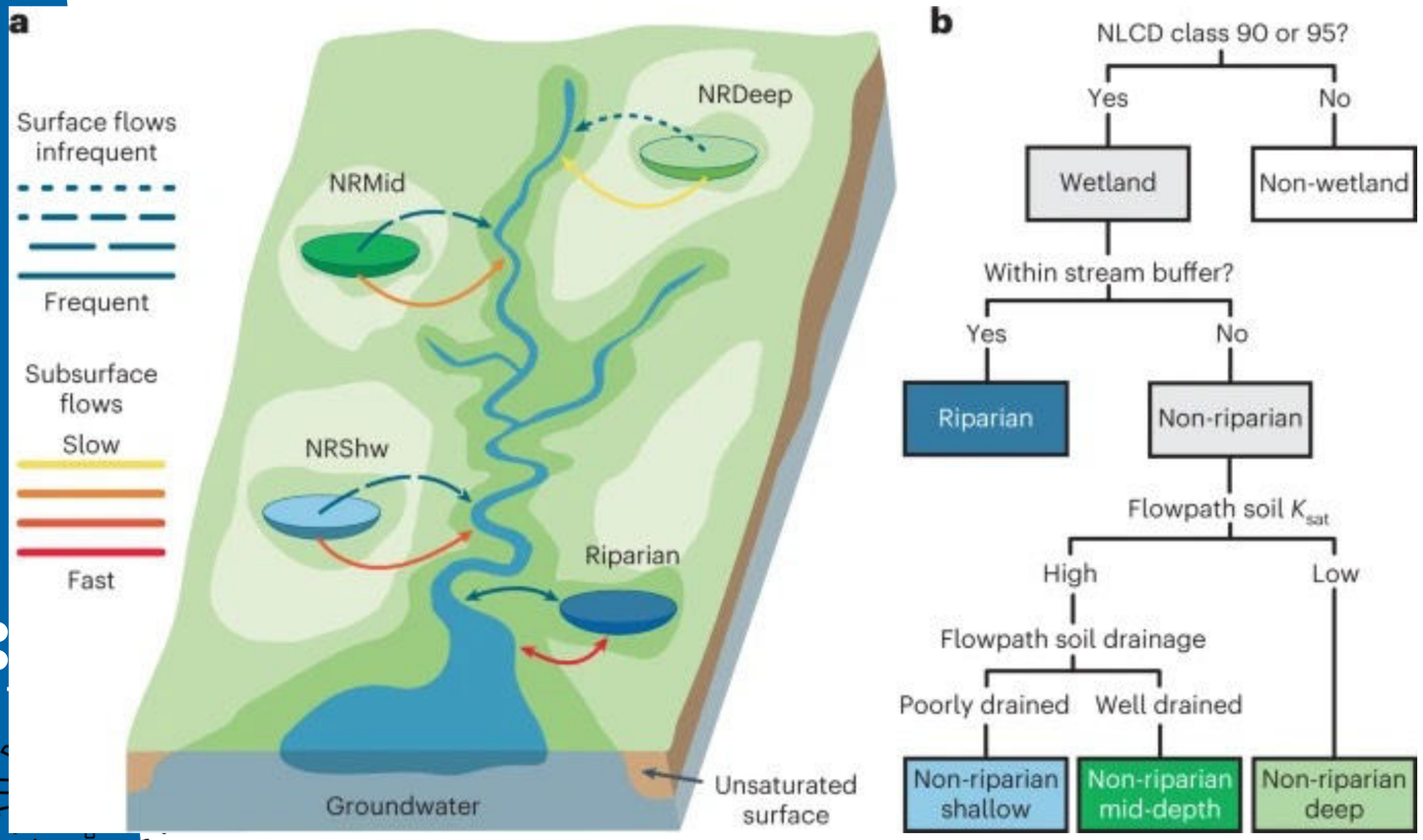
https://www.ecoshape.org/en/landscapes/riversestuaries/river-environment/

Vernetzter Wasserrückhalt und kleine Kreisläufe

- viel Kapazität für Dynamik schaffen - stehendes Wasser birg neue Probleme
- für gute Verbindung sich gegenseitig speisender Teilsysteme sorgen

Netzwerk statt Schwamm?

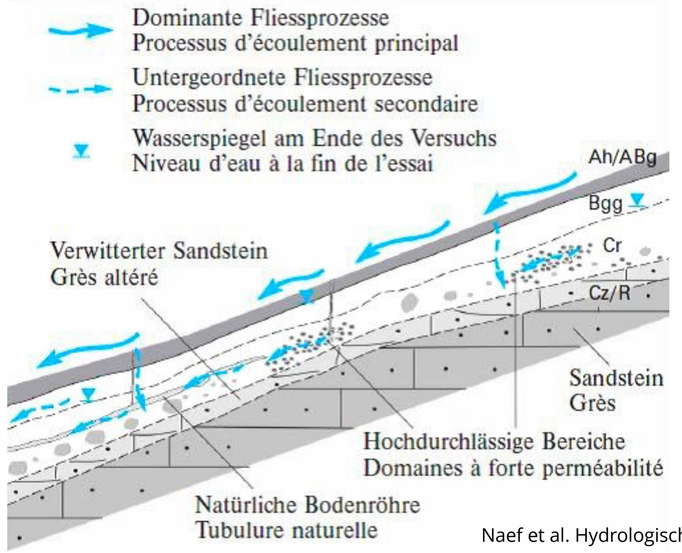
Ein Versuch, wie Schwammstadtkonzepte gelingen können



Leibowitz et al.: National hydrologic connectivity classification links wetlands with stream water quality, Nat. Water, 1, 370–380, https://doi.org/10.1038/s44221-023-00057-w, 2023.

Vernetzter Wasserrückhalt und kleine Kreisläufe

- regionale Umverteilung
- multifunktionale, verteilte Subsysteme



Naef et al. Hydrologischer Atlas CH (HADES)

Hat es am Ende einen Nutzen?

mit Resilienz gewappnet gegenüber Unsicherheit

Als Einzelstrukturen:

- nur begrenzte und sehr kleinräumige Wirksamkeit
- nur begrenzte Kapazität
- können wichtige Ankerpunkte mit direkter Wirkung sein

Im Netzwerk und System:

- erst hier wirkliche Entfaltung sich begünstigender Wirkungen
- gegenseitiges Abpuffern
- mehr Resilienz als Absicherung gegenüber Unsicherheit