



Die Ressourcenuniversität. Seit 1765.

**TU** BERGAKADEMIE  
FREIBERG



# Hydrologische Extreme

Grundlagen der Hydrologie  
Primer in Hydrology

7

# Ziel der heutigen Vorlesung

Hochwasser - Bewertung und Vorsorge zu Hochwassern  
Trockenheit - Abschätzung mit verschiedenen Indizes

7

Ziele:

- Beispiele für Extrema kennen
- Extremwertstatistik verstehen
- Anomalien als zusätzliches Werkzeug
- Unterschied Hochwasser und Trockenheit erkennen

# British Columbia Flood

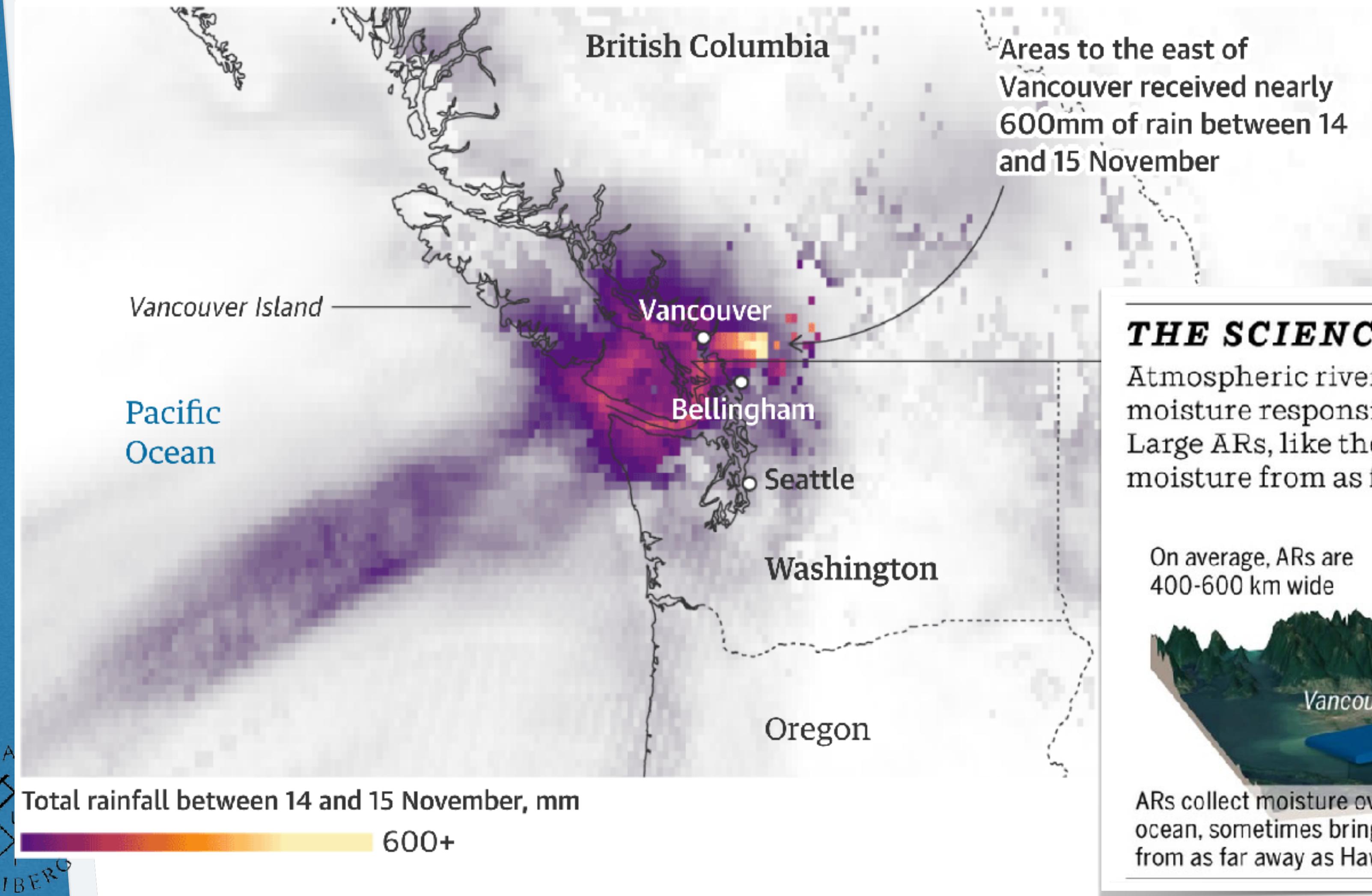
seit 14.11.2021

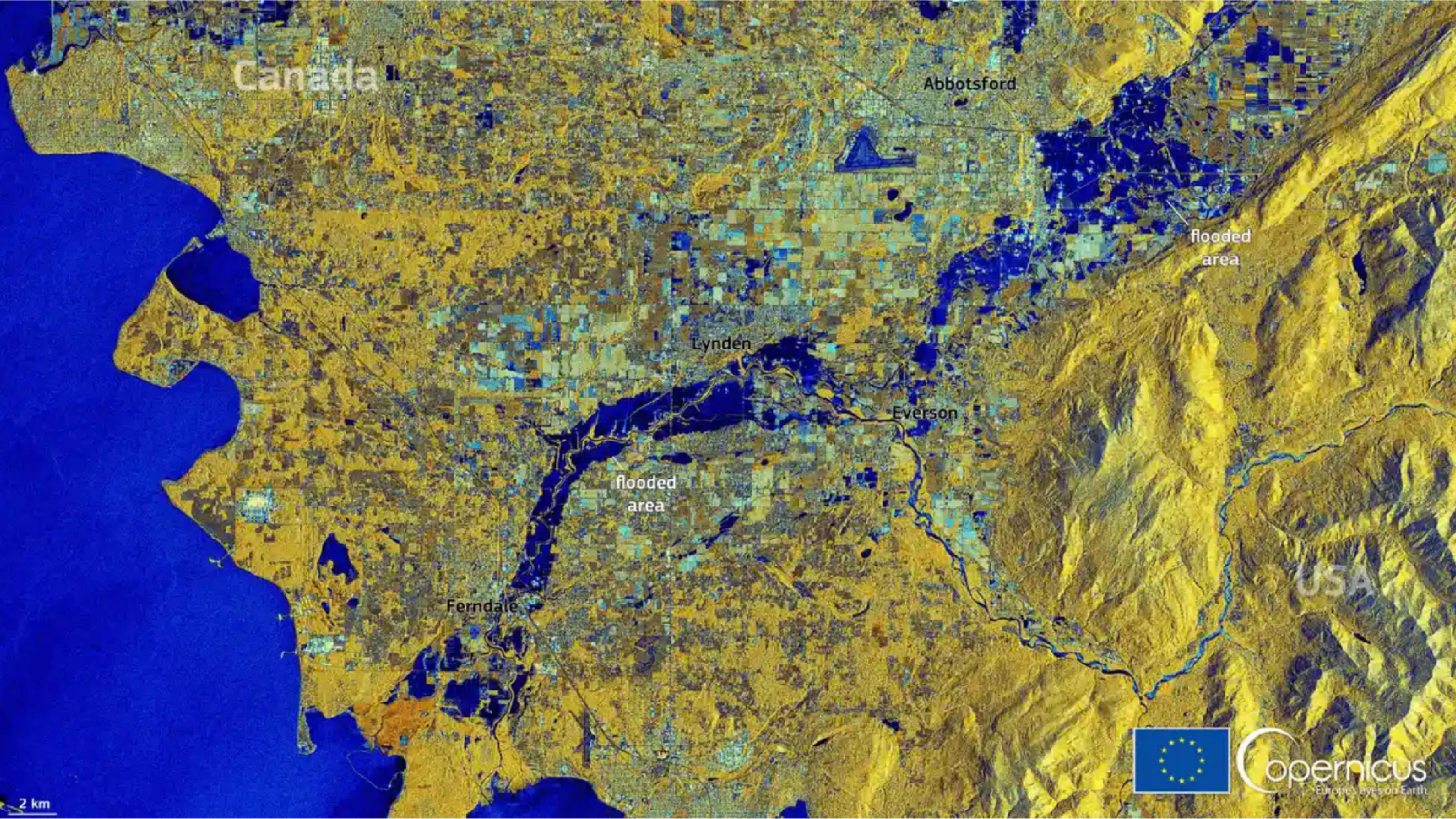


- bis zu 600 mm Niederschlag in wenigen Stunden

# British Columbia Flood

seit 14.11.2021





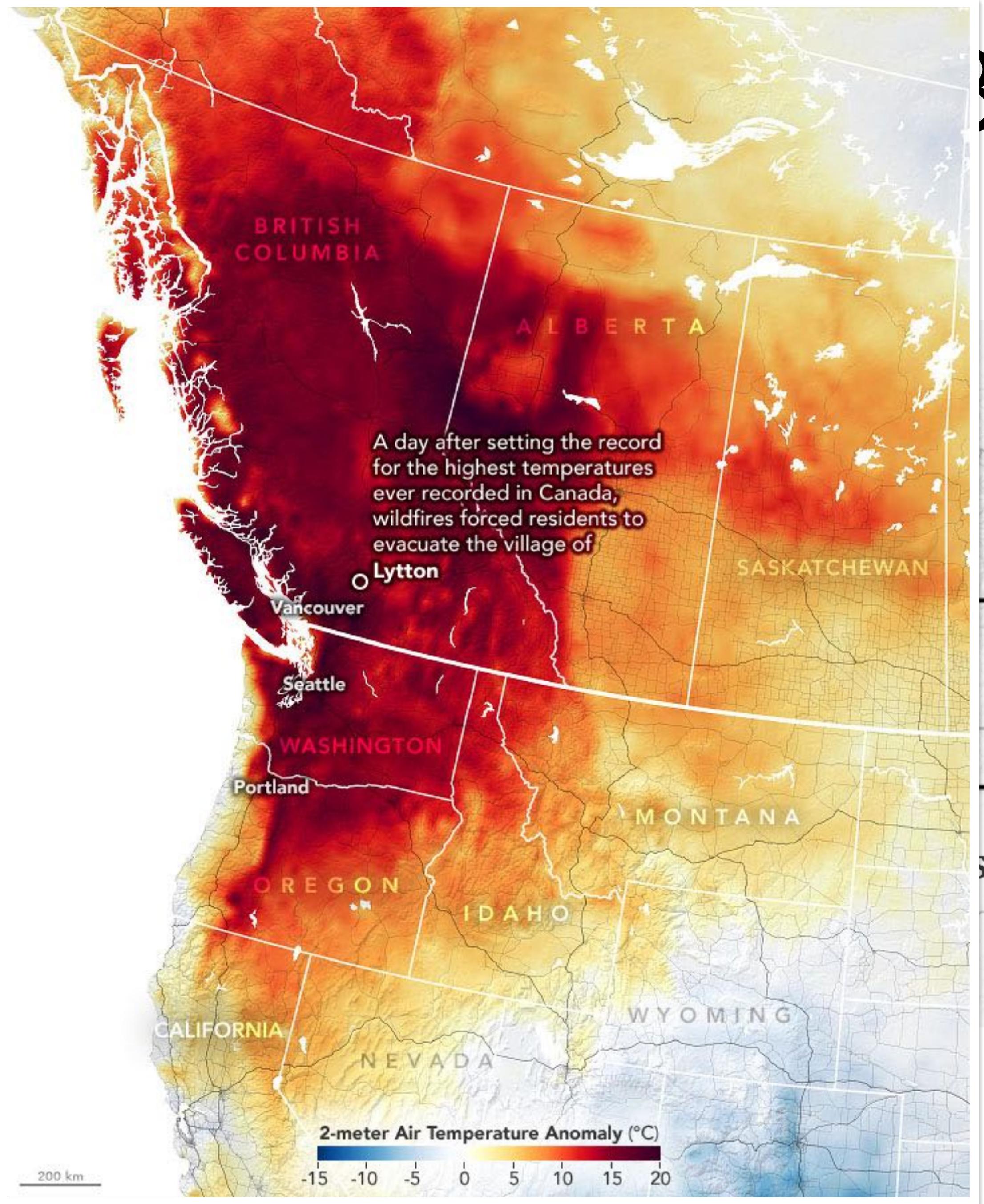
Copernicus  
Europe's eyes on Earth

# British Columbia Flood

seit 14.11.2021



- bis zu 600 mm Niederschlag in wenigen Stunden
- trifft auf allgemein sehr trockene Ausgangslage
- Folgen der Dürreperiode im August noch immer vorhanden

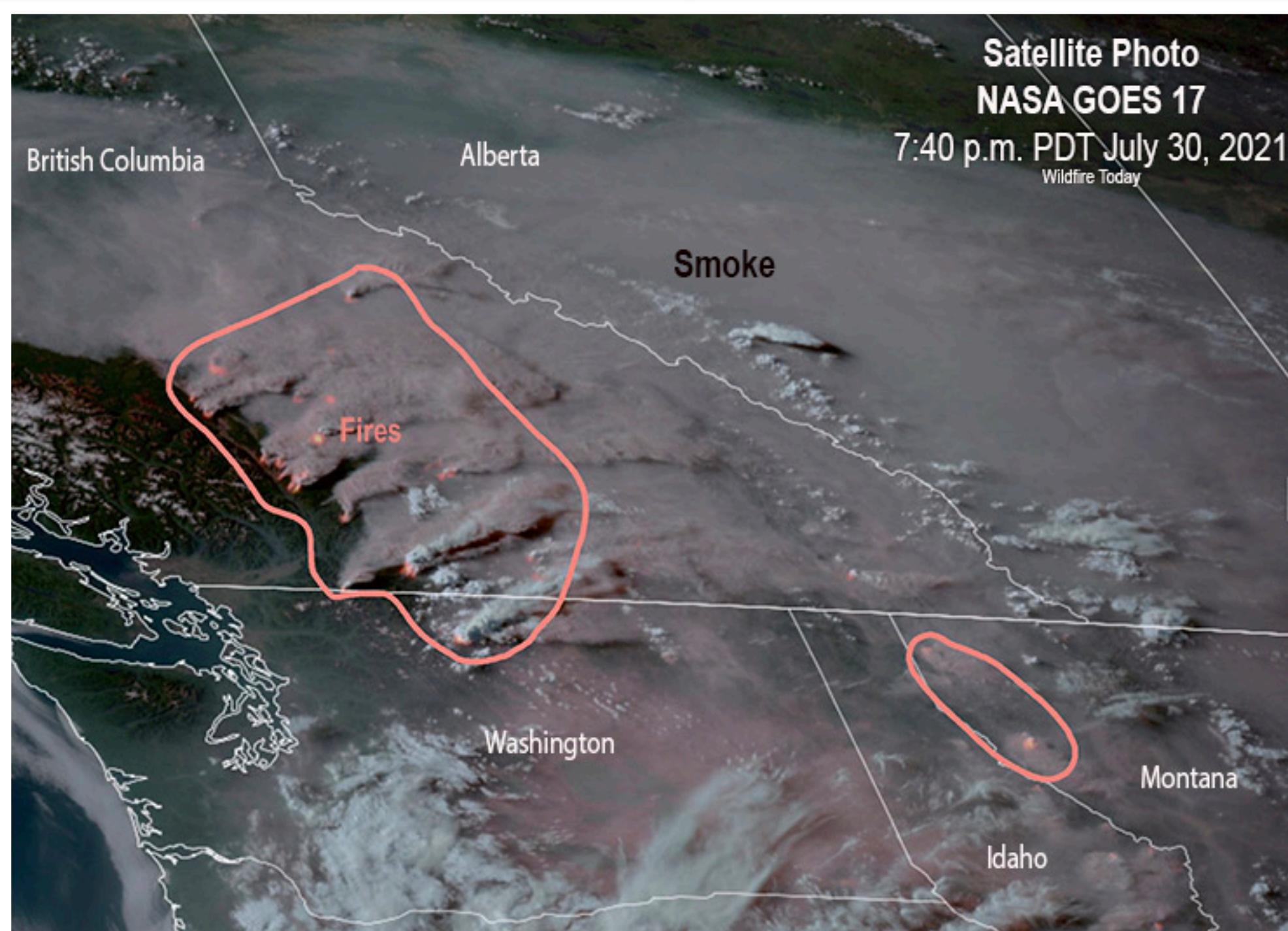
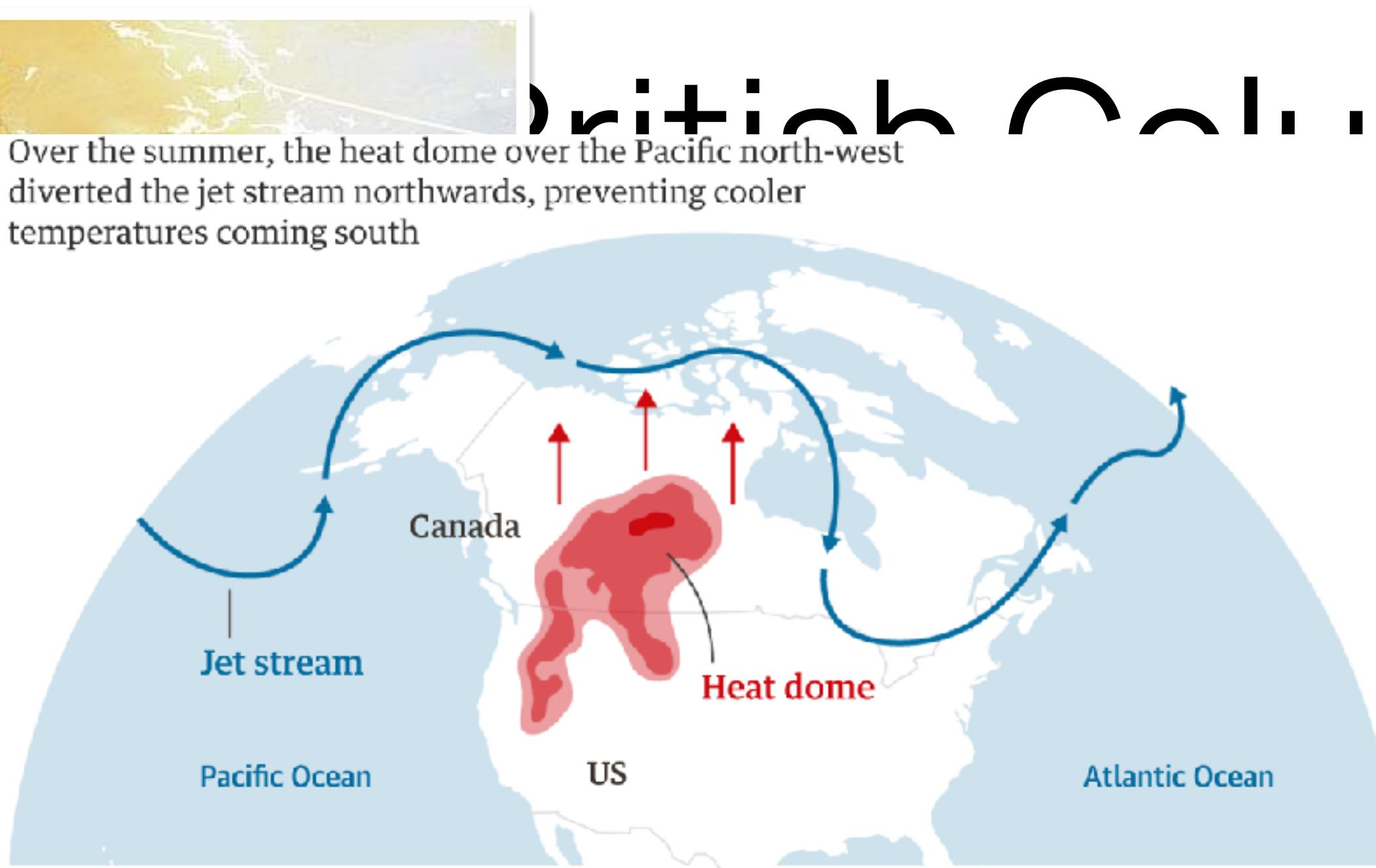
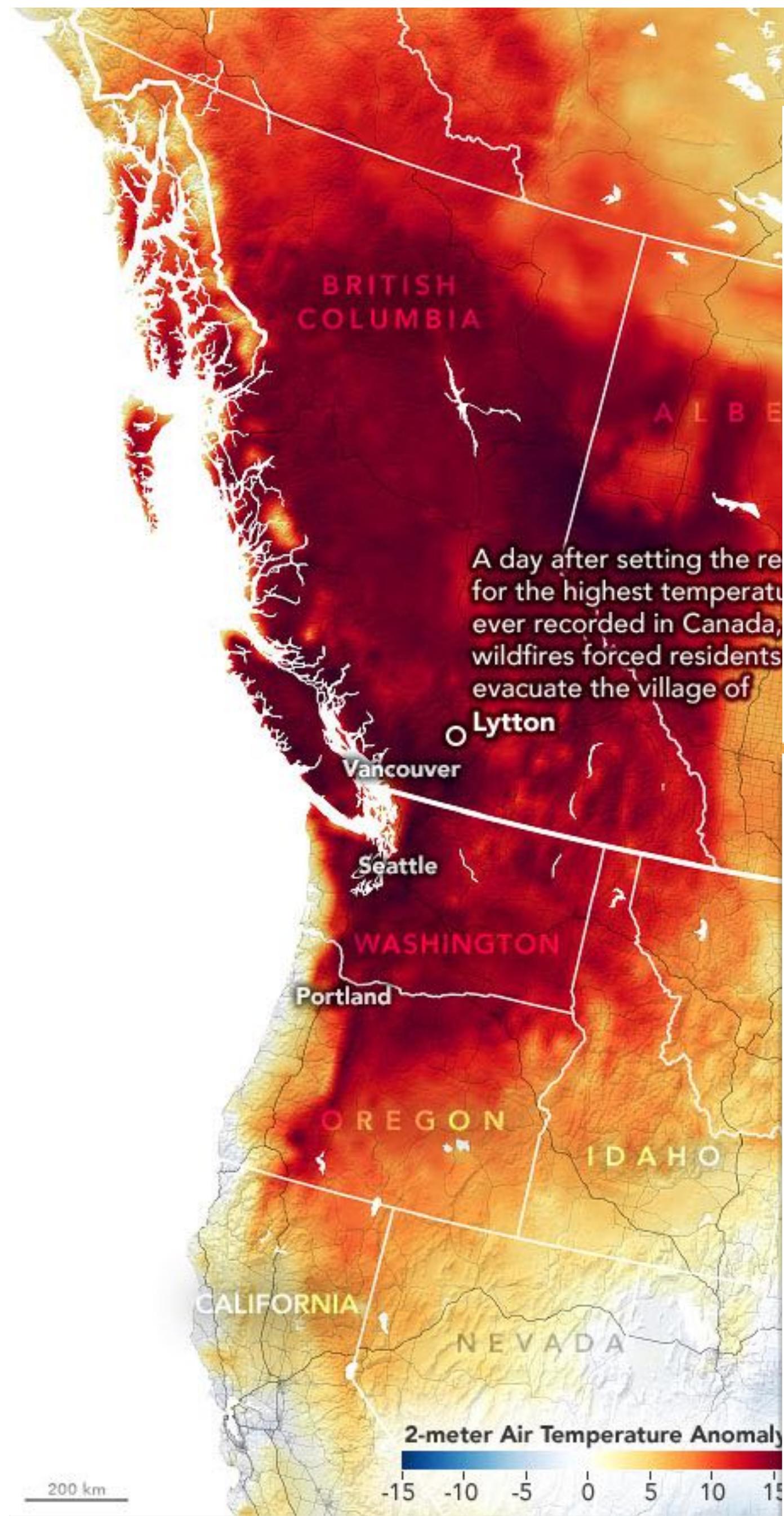


# British Columbia Flood

seit 14.11.2021



- bis zu 600 mm Niederschlag in wenigen Stunden
- trifft auf allgemein sehr trockene Ausgangslage
- Folgen der Dürreperiode im August noch immer vorhanden



# British Columbia Flood

seit 14.11.2021

is zu 600 mm  
Niederschlag in  
wenigen Stunden

- trifft auf allgemein sehr trockene Ausgangslage
- Folgen der Dürreperiode im August noch immer vorhanden

# British Columbia Flood

seit 14.11.2021



- bis zu 600 mm Niederschlag in wenigen Stunden
- trifft auf allgemein sehr trockene Ausgangslage
- Folgen der Dürreperiode im August noch immer vorhanden
- Hangrutschungen...

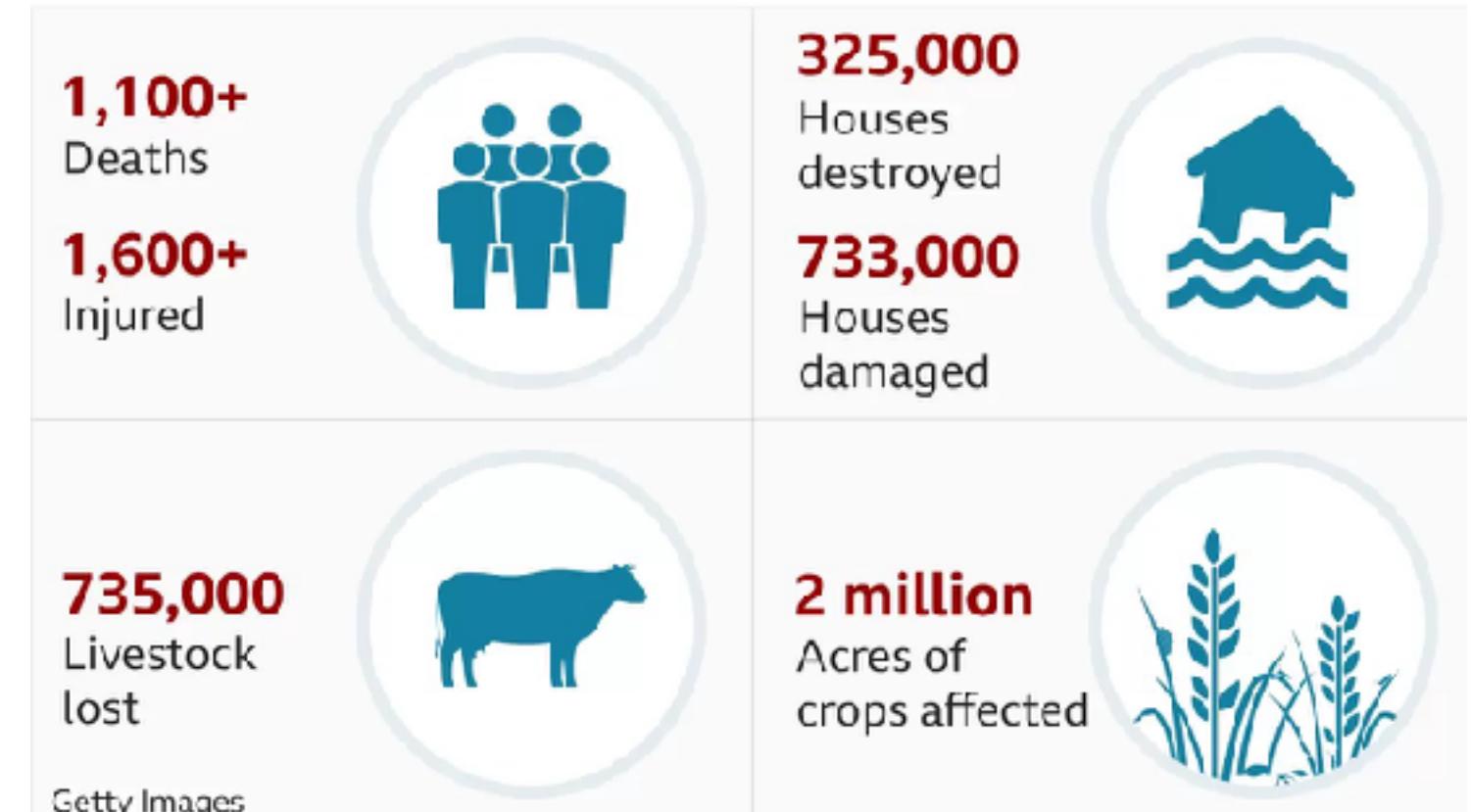
# Pakistan Sommer 2022

½ unter Wasser, 33 mio. Menschen betroffen, 1325 Fatalitäten



Ein besonders starker  
Sommermonsun  
• vor allem ein Problem  
mit Regenmengen

## Pakistan floods situation report

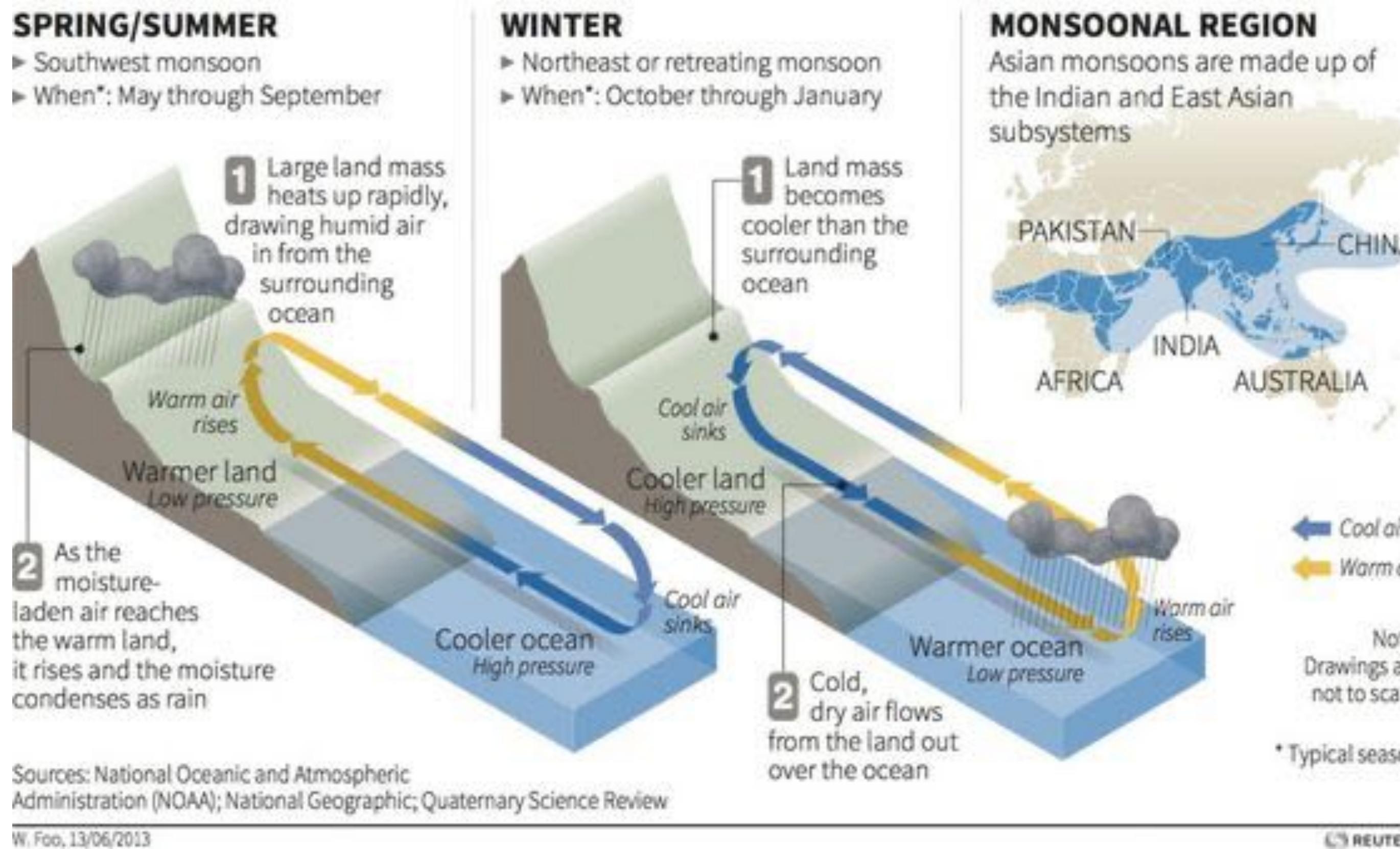


Source: Pakistan Government, UN, 30 Aug 2022

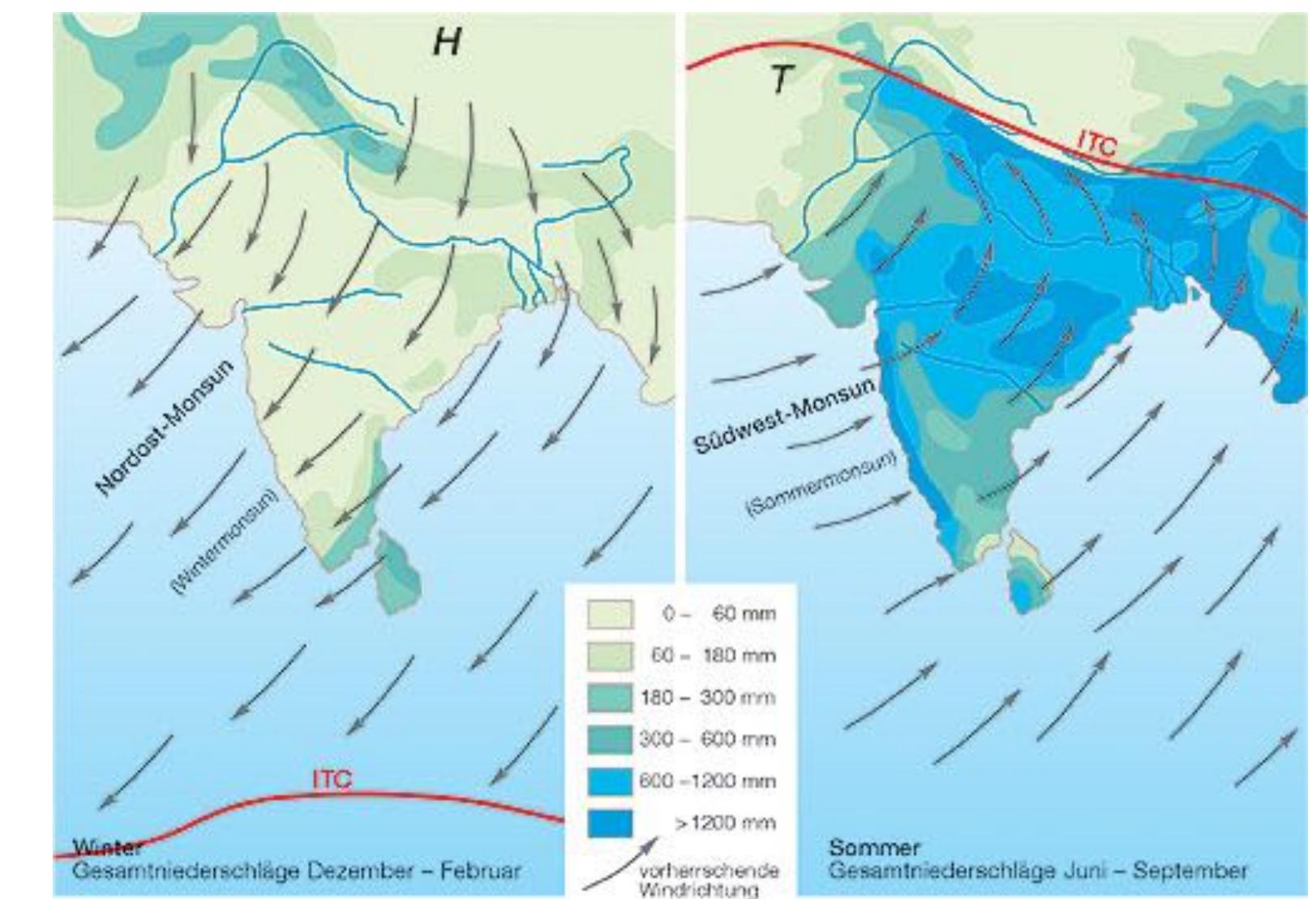
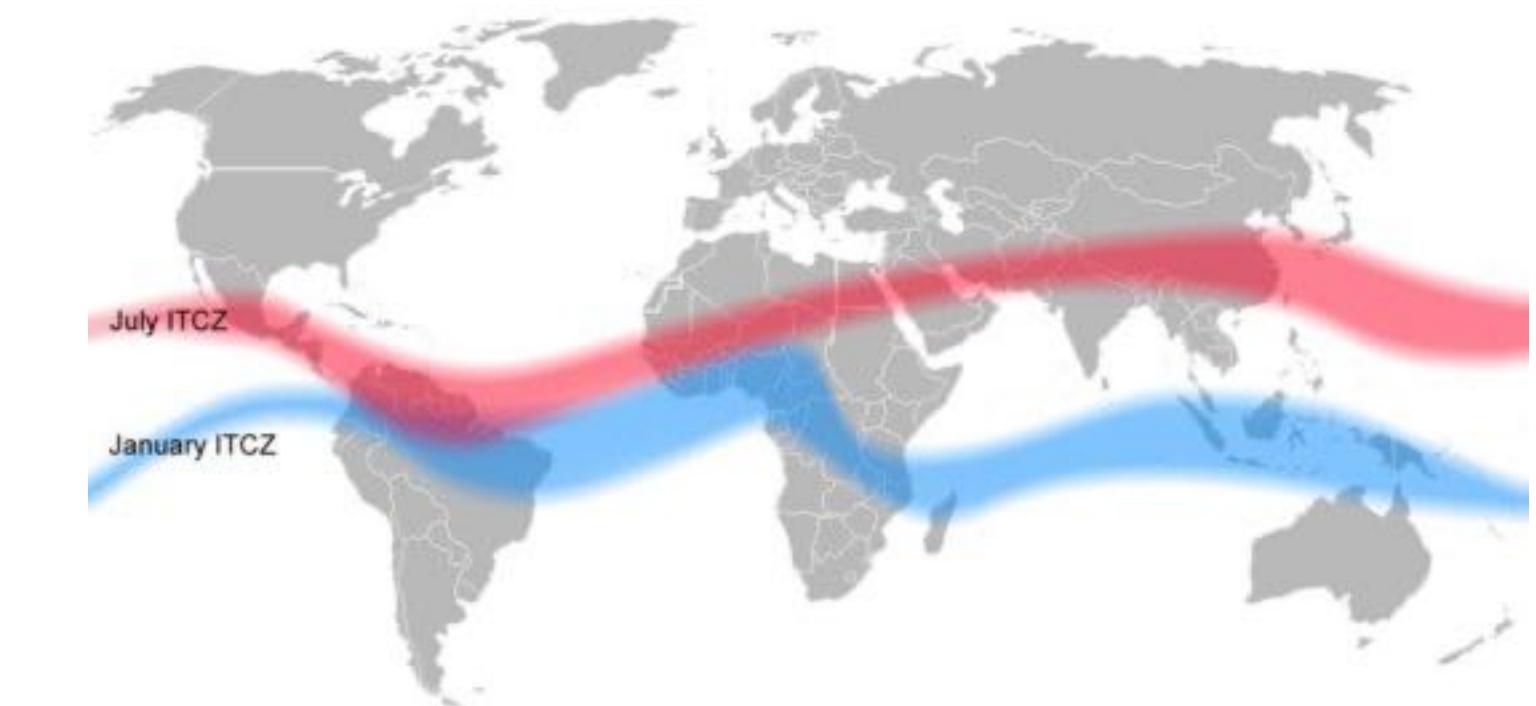
BBC

# Indischer Sommermonsun

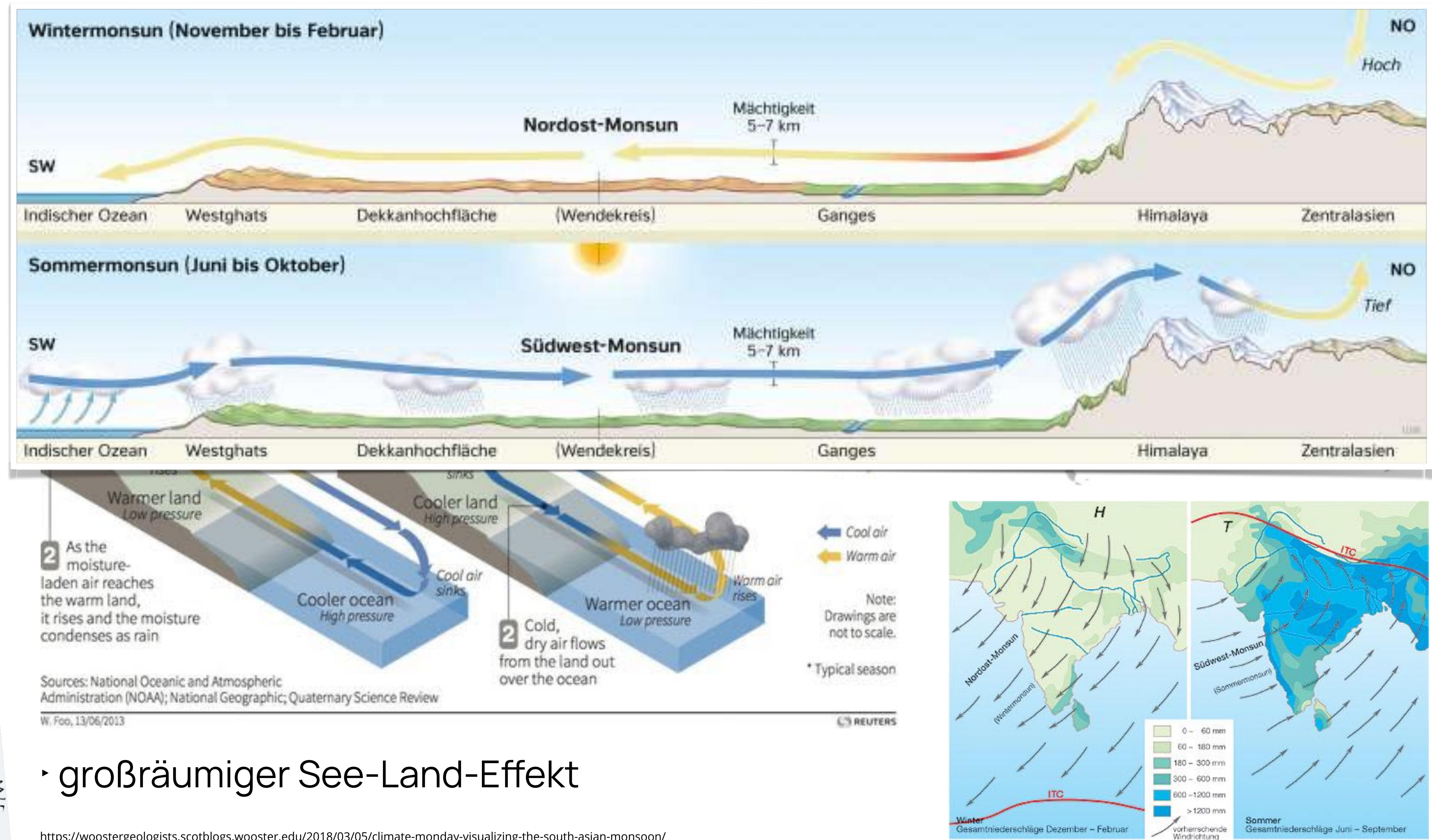
Monsun: Jahreszeitliche Umkehr der Hauptwindrichtung



• Jahres-Zyklus der ITCZ

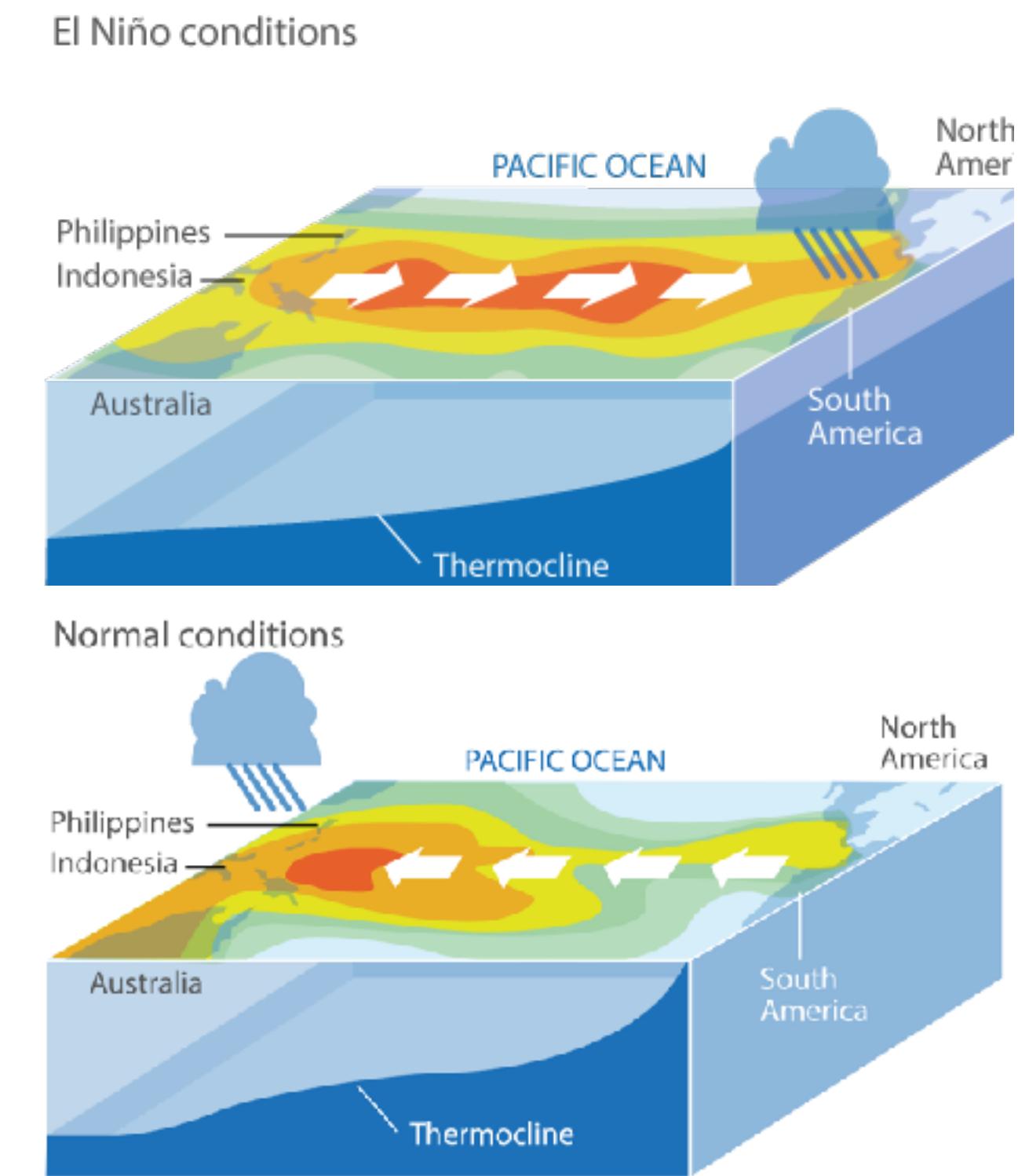
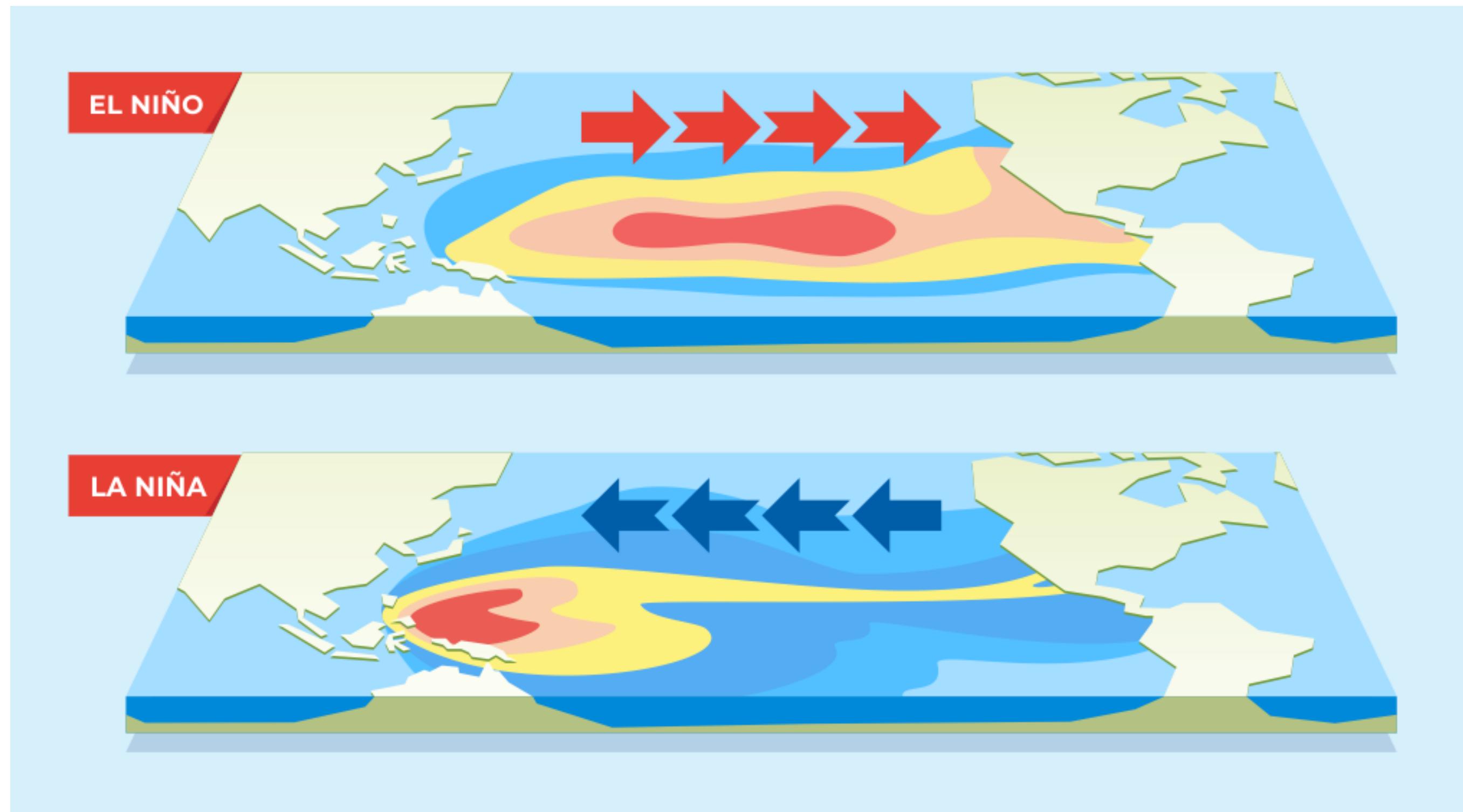


• großräumiger See-Land-Effekt



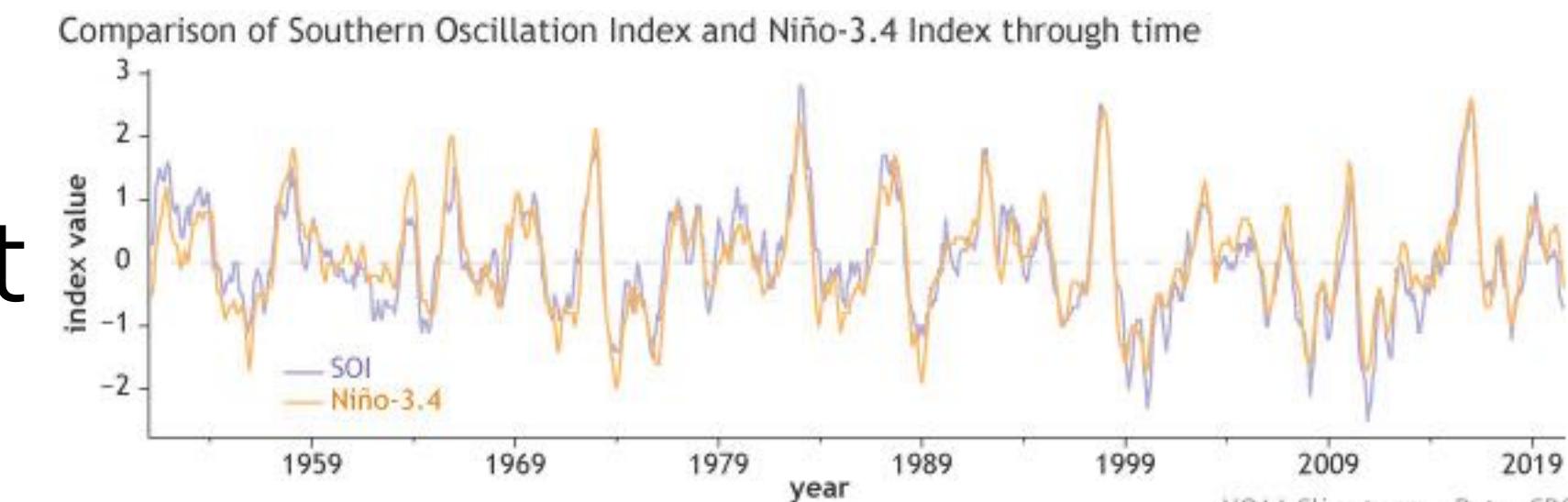
# El Niño & La Niña (ENSO)

Äquatorialpazifische Ozean-Atmosphären-Interaktion mit globalen Effekten



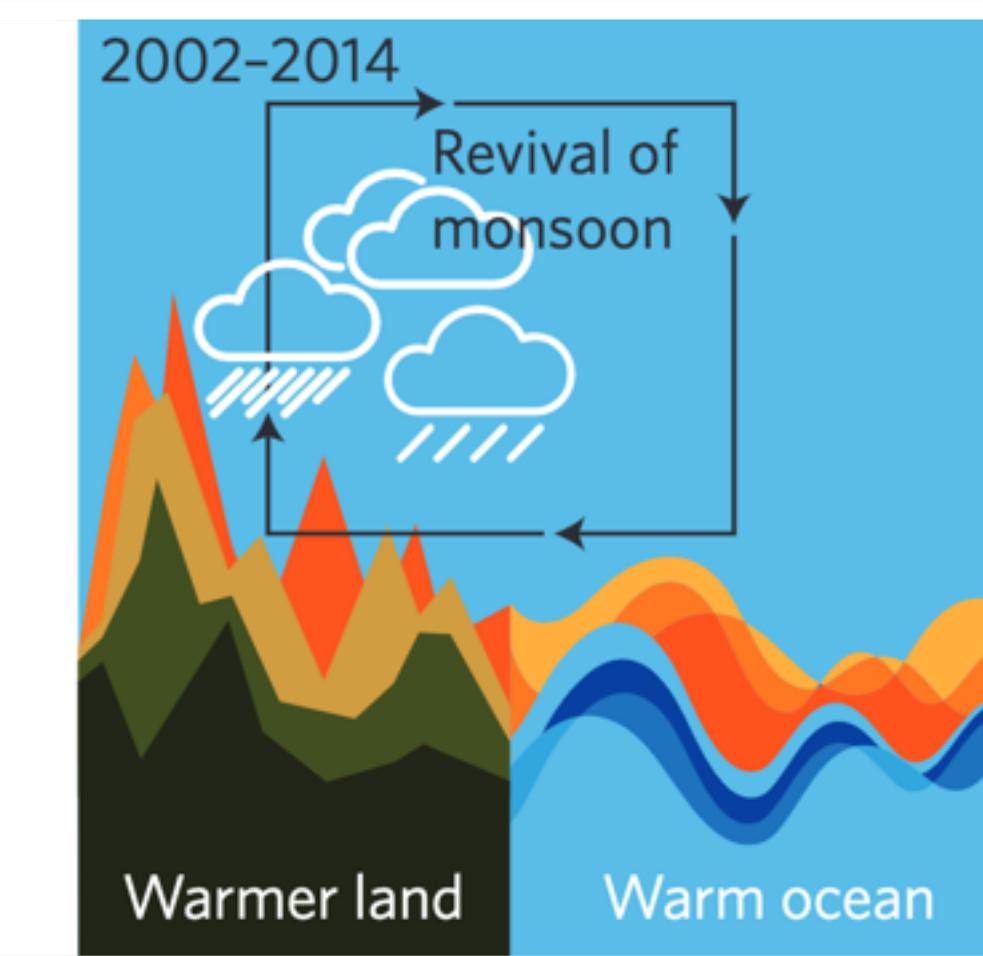
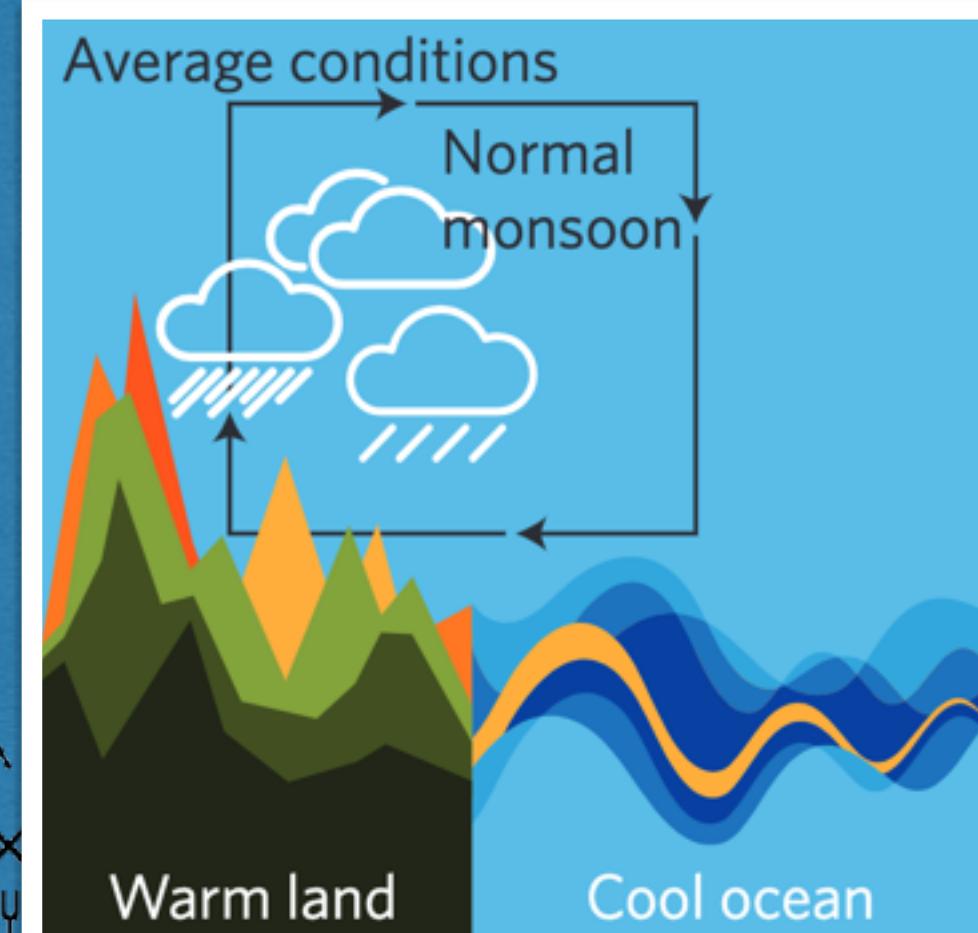
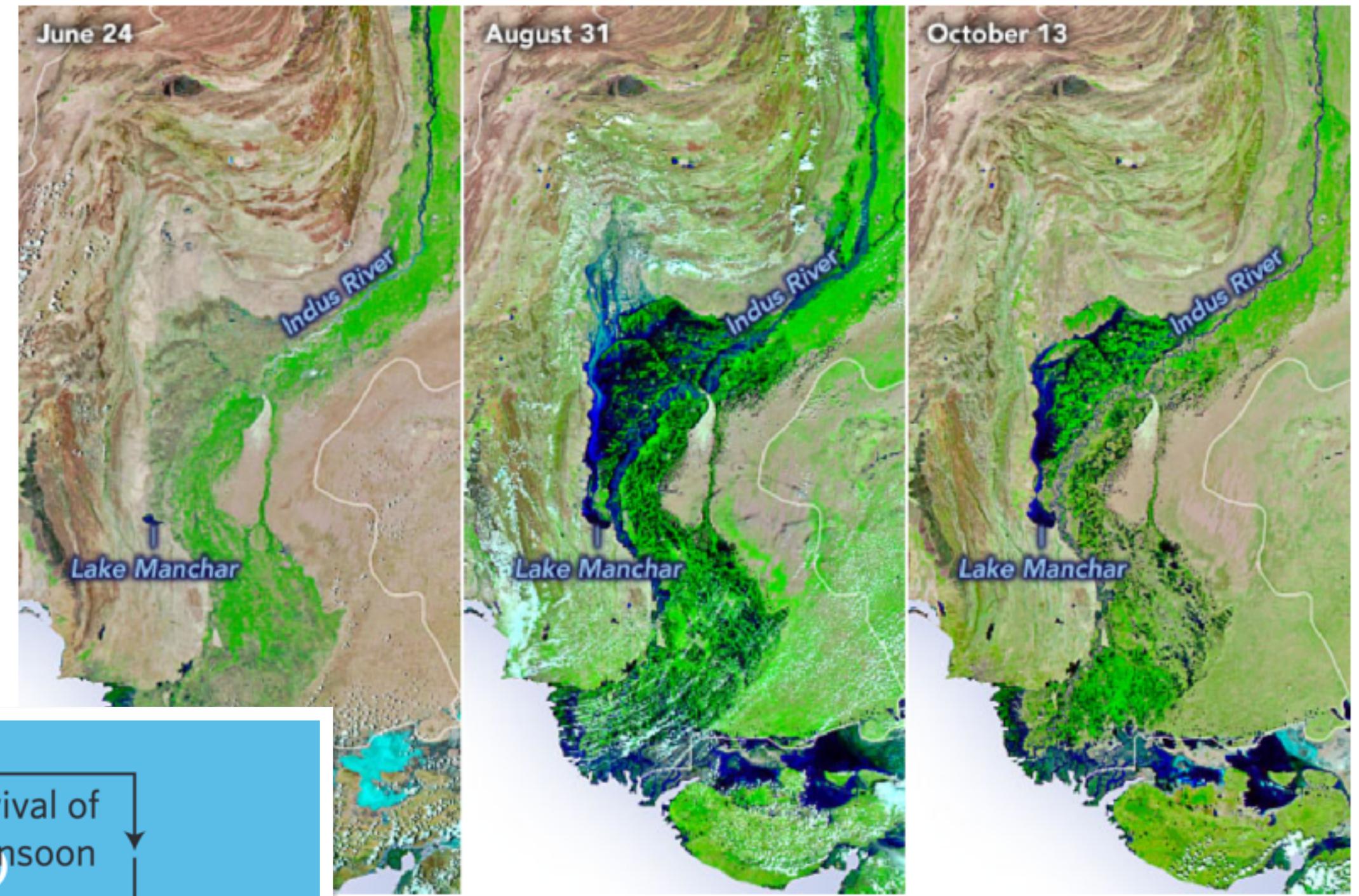
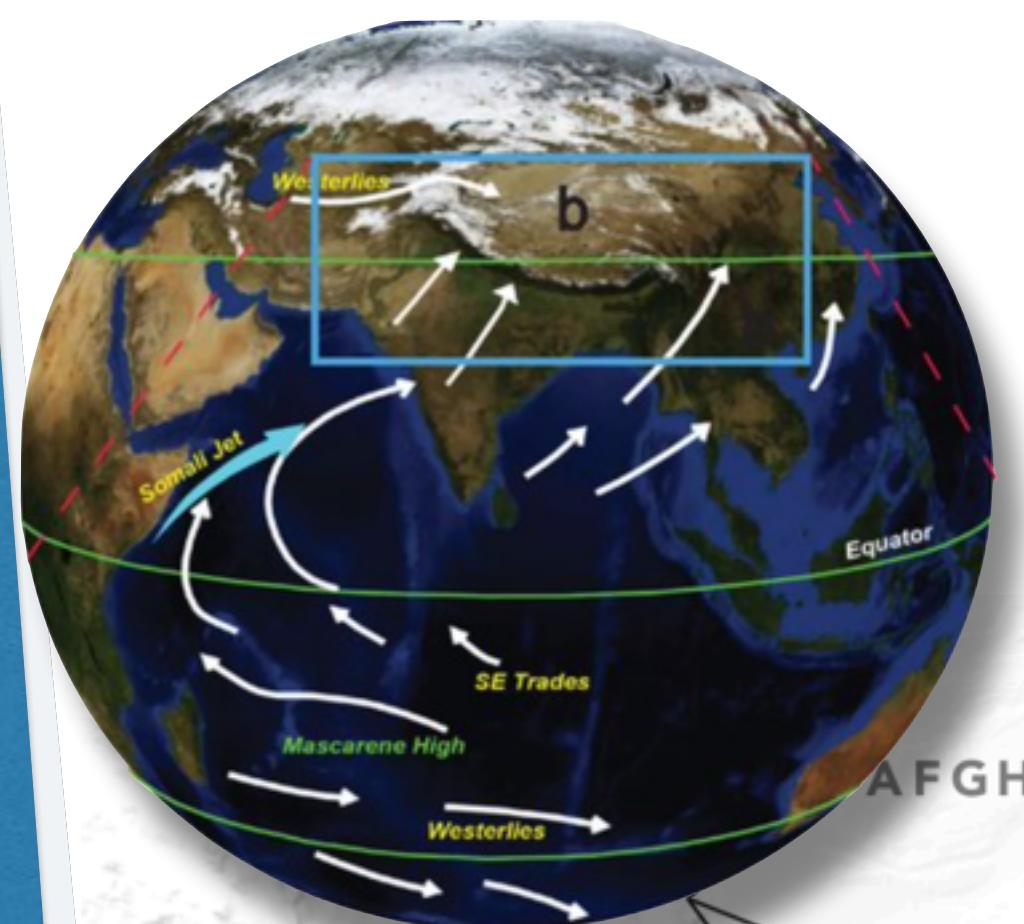
El Niño (ca. alle 3-5 Jahre, häufig im Dezember)

- wenn sich das Oberflächenwasser stärker erwärmt
- und schwache Ostwinde wehen



# zurück zu Pakistan 2022

Extreme Regenmengen durch Sommermonsun + La Niña

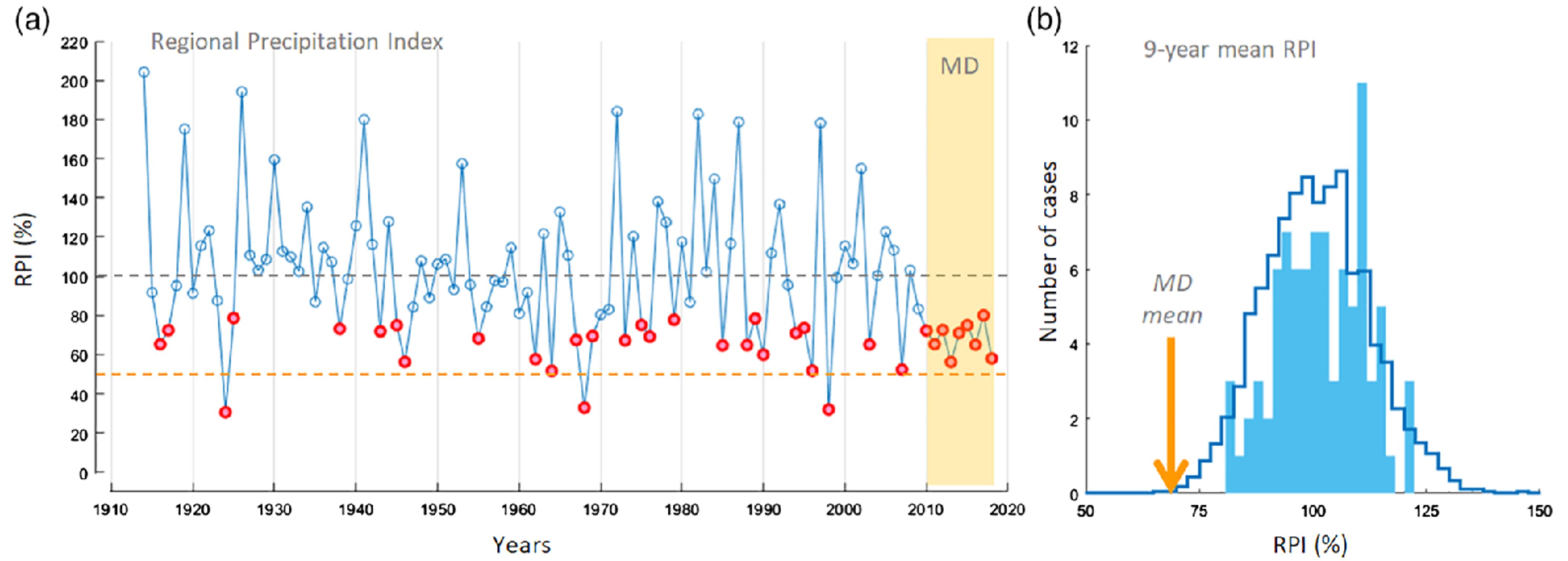


# Central Chile Mega Drought



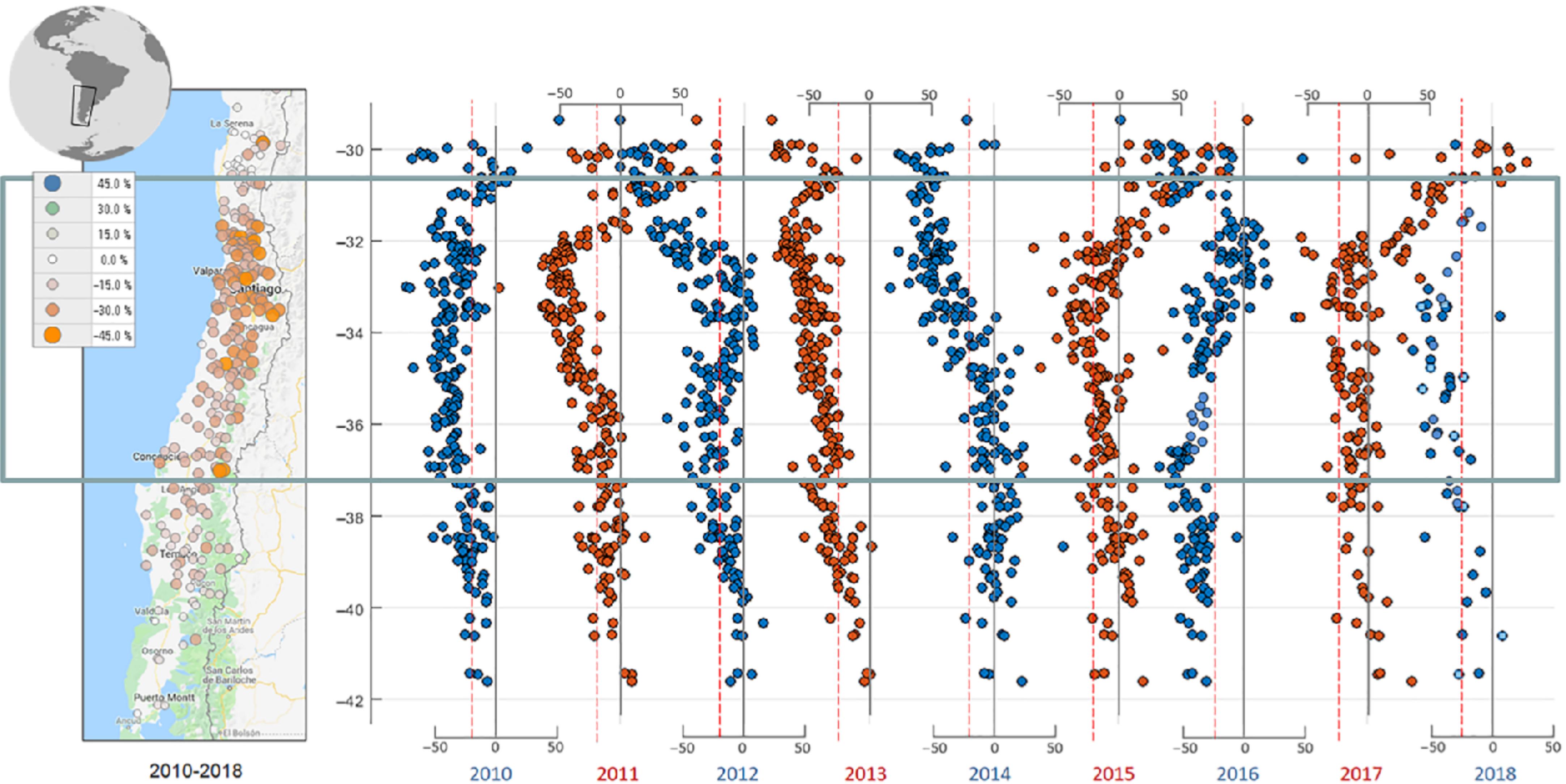
Trockenheit seit 12 Jahren

- Zentral Chile seit 2010 mit 20-40% Regendefizit



# Central Chile Mega Drought

Trockenheit seit 10 Jahren

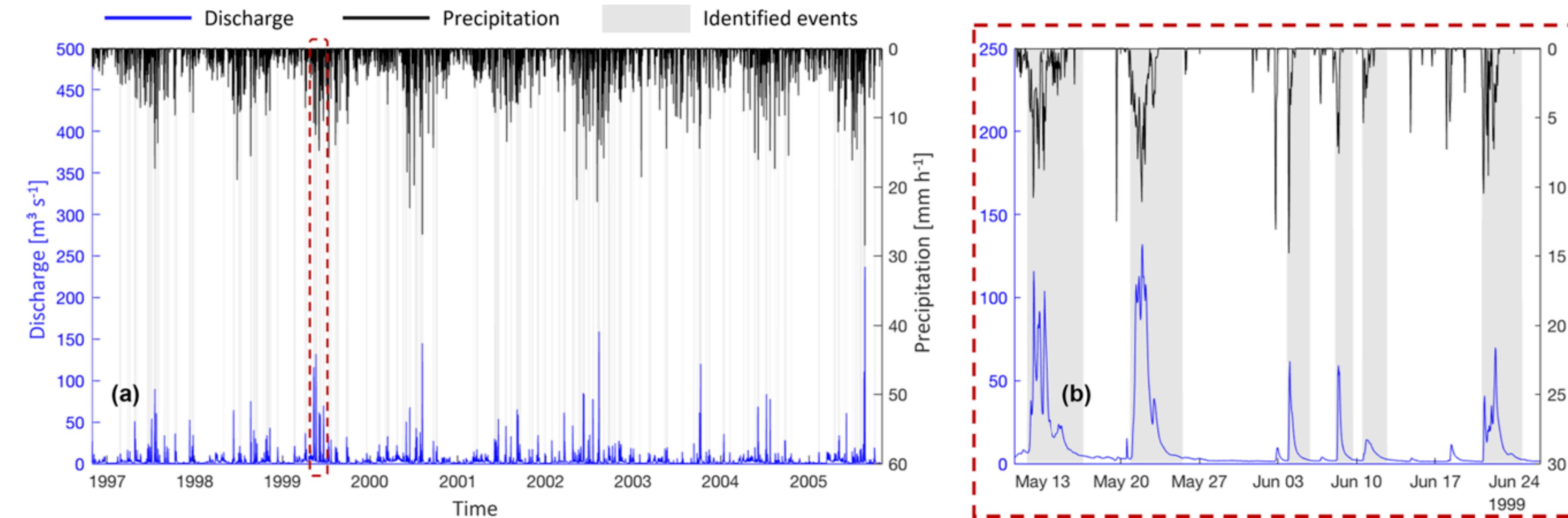


# Abfluss Zeitreihen und Statistik

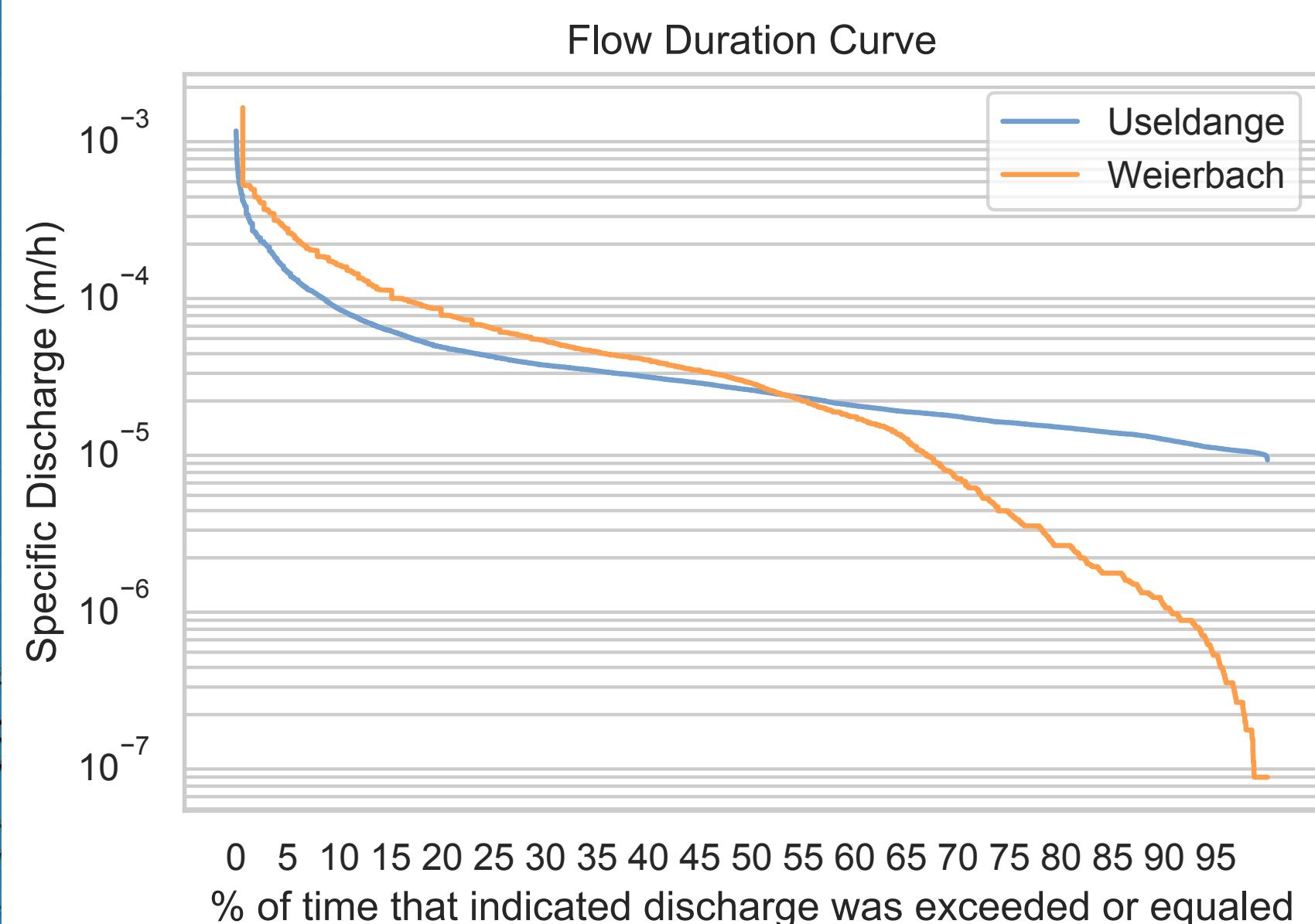
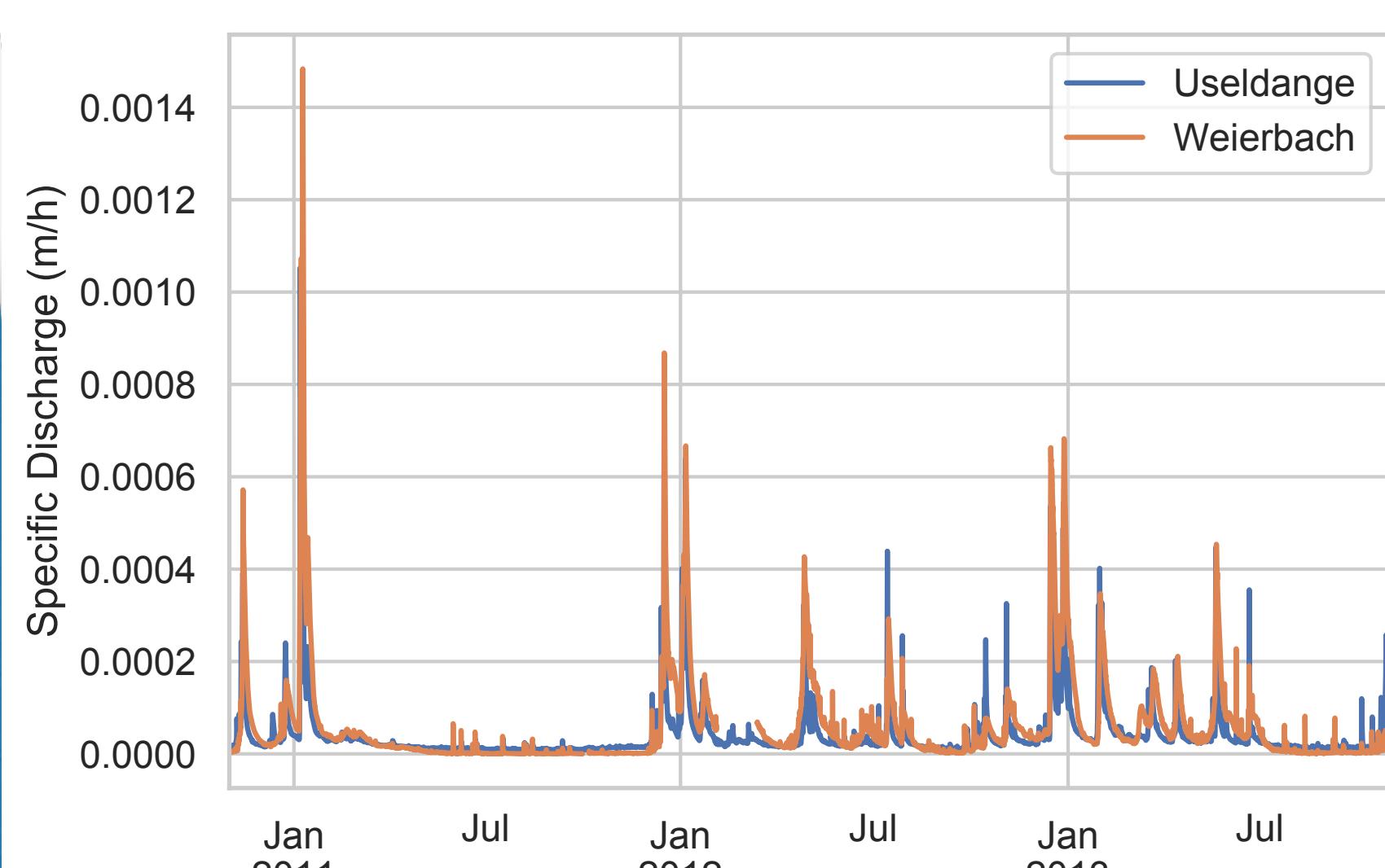
Wiederholung: Flow Duration Curve

Rang-Statistik der Abflüsse

- Über-/Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines gegebenen Abflusses



# Abfluss Zeitreihen und Statistik



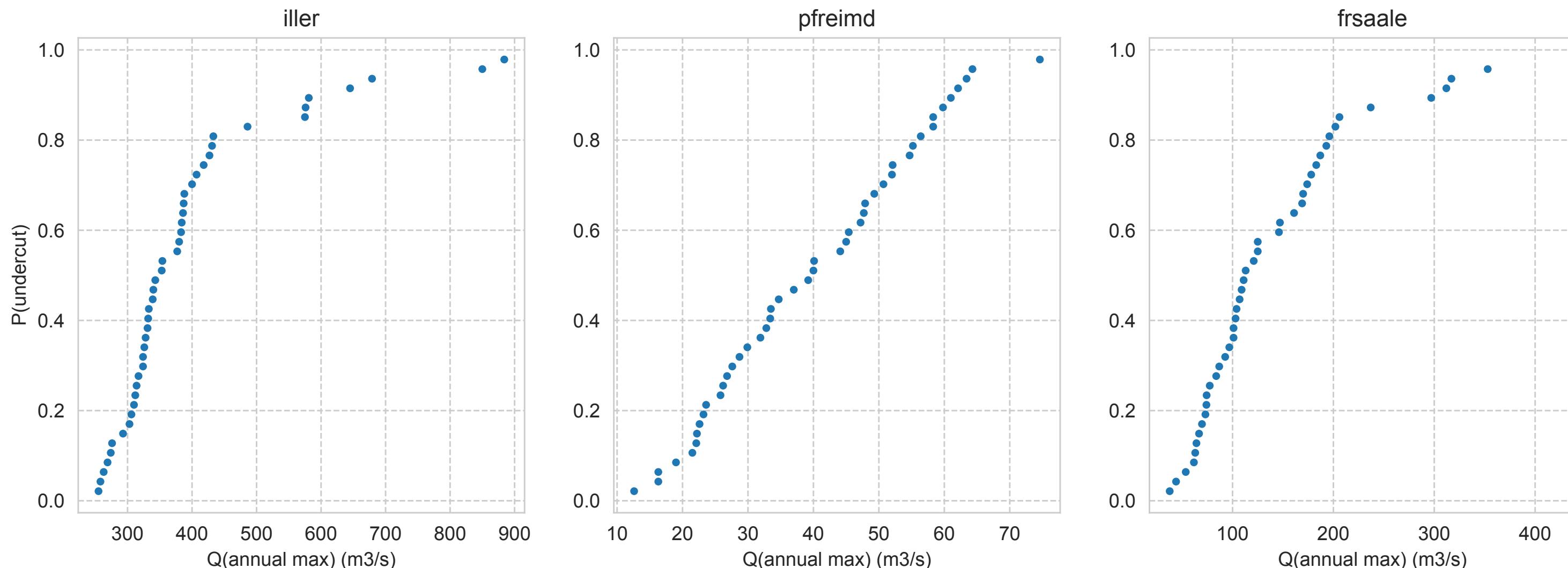
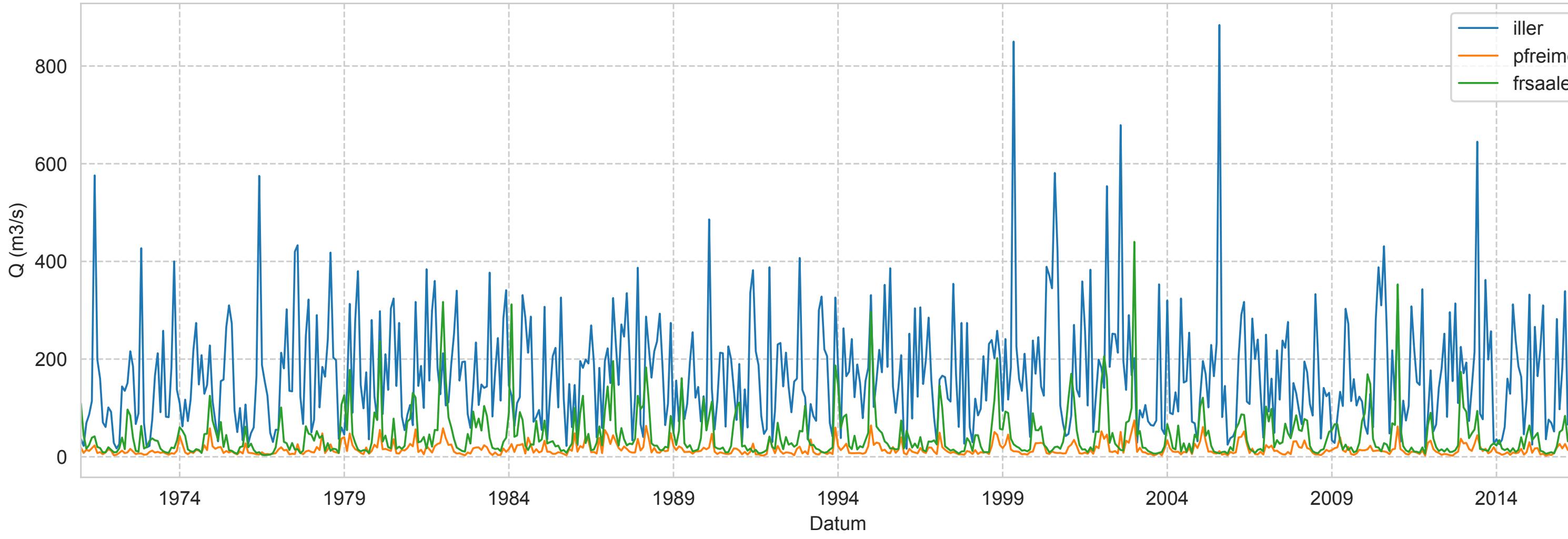
## Wiederholung: Flow Duration Curve

### Rang-Statistik der Abflüsse

- Über-/Unterschreitungswahrscheinlichkeit eines gegebenen Abflusses
1. Bedingung: Regelmäßige Zeitreihe
  2. Sortieren aller Werte (Anzahl N) in absteigender Reihenfolge
  3. x-Achse bekommt statt Sortiernummer n die Überschreitungswahrscheinlichkeit  $P_{ex} = n/(N+1)$

# Hochwasserstatistik

## experimentelle Unterschreitungs-Wahrscheinlichkeiten



Bsp. monatliche Maxima  
Bayrischer Pegel

- Zeitreihe wird aggregiert  
(zB. Jahre, Maximum)

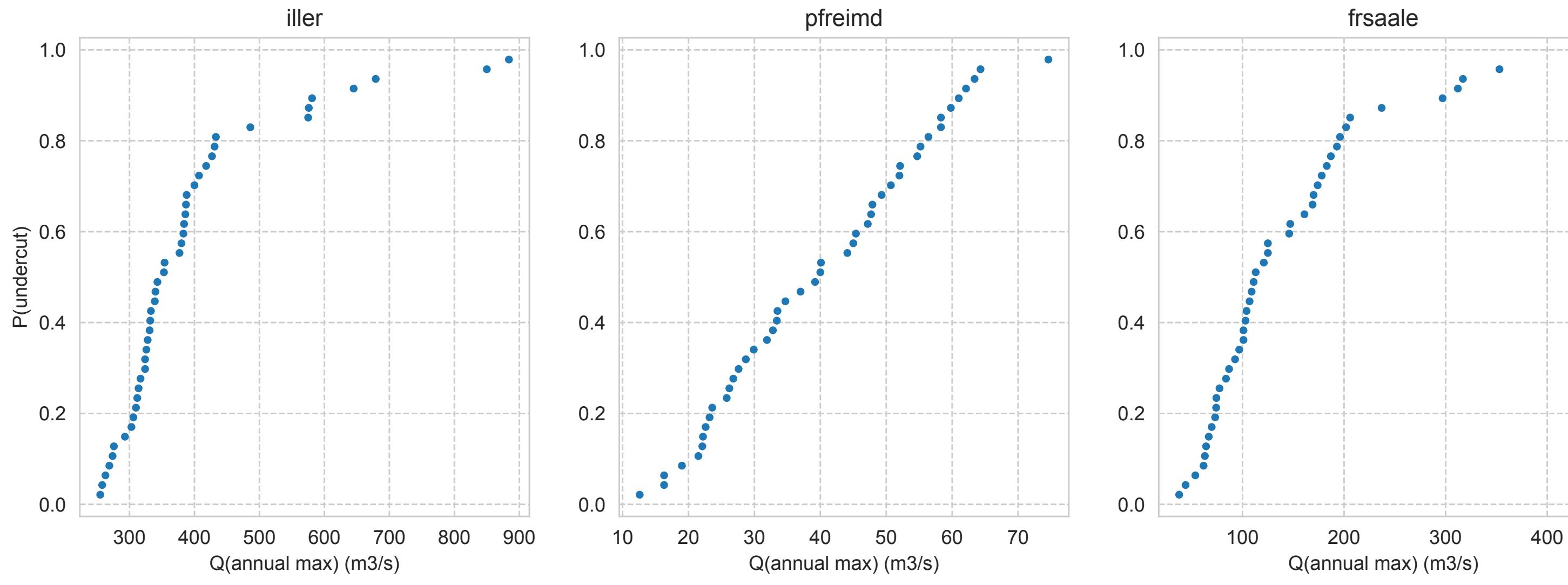
- wieder: Rangstatistik aller  
Werte → Achsen der FDC  
vertauscht,  $P_{\text{Unterschreitung}}$

$$P_{\text{un}} = 1 - P_{\text{ex}} = (N-n)/(N+1)$$

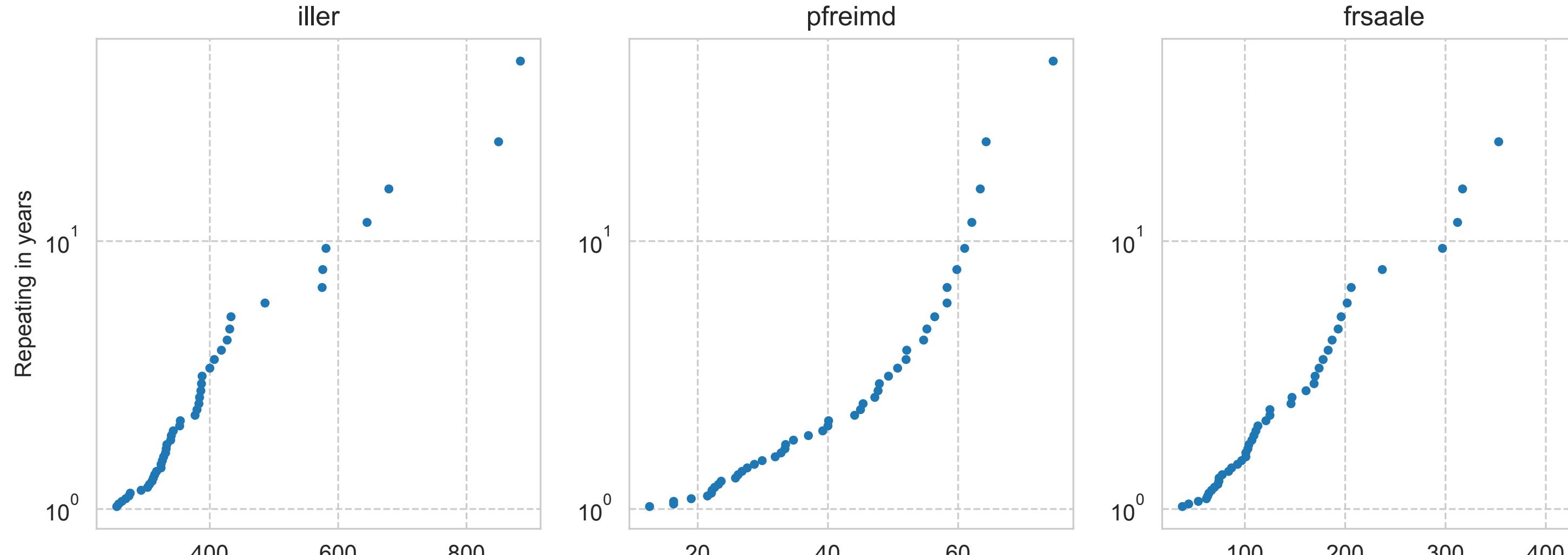
- auch Jährliche Serie oder  
“plotting positions”

# Hochwasserstatistik

## experimentelle Unterschreitungs-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:  
 $T_n = 1/(1-P_{\text{un}})$

# Hochwasserstatistik

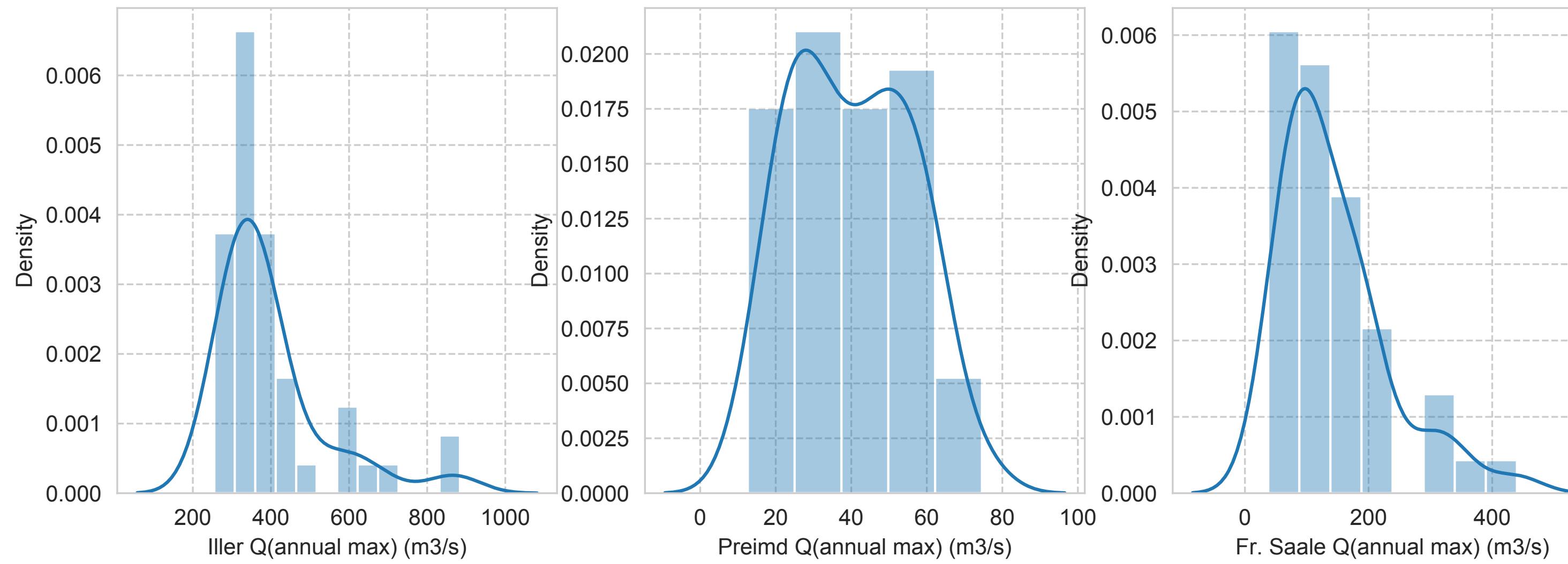
Wozu überhaupt?

HQ2, HQ20, HQ100...

- Referenzen für Raumplanung, Infrastruktur, Katastrophenmanagement
- Vorbereitung auf seltene Ereignisse, Maßnahmen der Schadensvermeidung
- Warnsysteme, Versicherung...

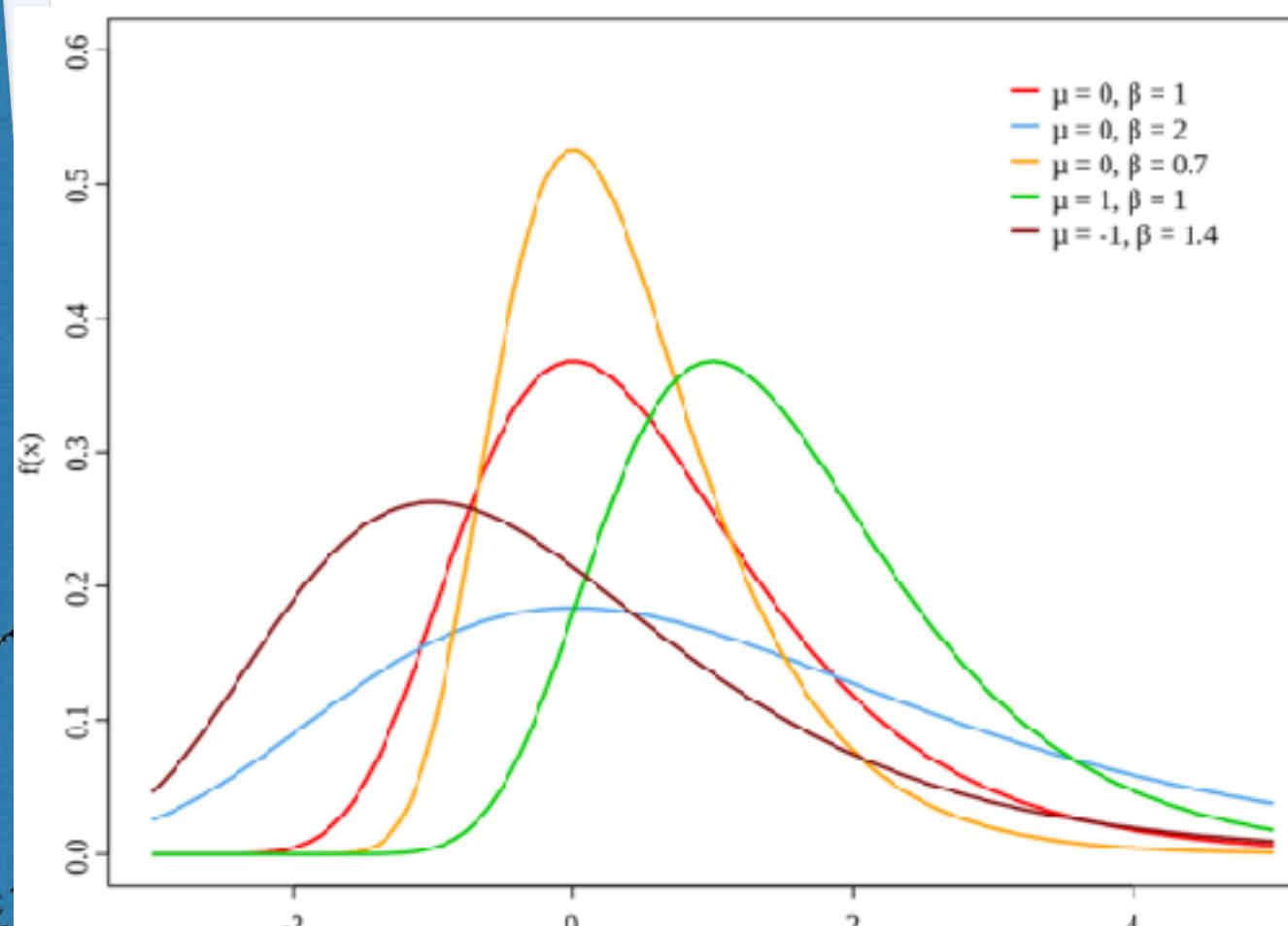
# Hochwasserstatistik

i.d.R. links-schiefe Verteilungen



Bsp. monatliche Maxima  
Bayrischer Pegel

- Wie können wir denn damit Vorhersagen über Extrema machen?

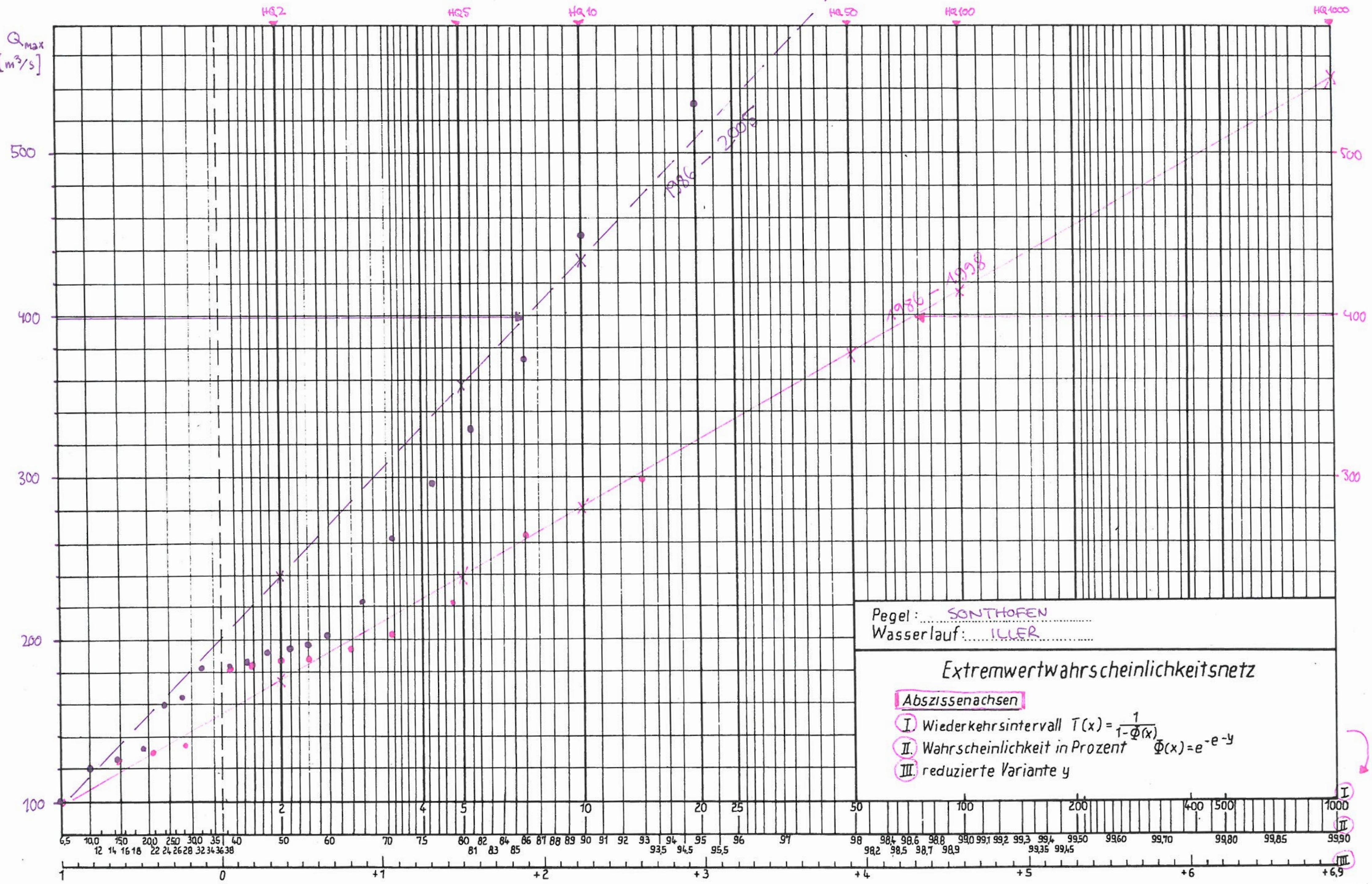


$$f(x) = \frac{1}{\beta} e^{-\frac{1}{\beta}(x-\mu)} e^{-e^{-\frac{1}{\beta}(x-\mu)}}$$

- Gumbel-Verteilung
- $\beta$  :: Skalenparameter
- $\mu$  :: Lageparameter

# Hochwasserstatistik

Hochwasserschätzung mit der Gumbel-Verteilung



# Hochwasserstatistik

## Hochwasserschätzung mit der Gumbel-Verteilung

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{1}{\beta}(x-\mu)}}$$

Gumbel-Verteilung (kumulativ)

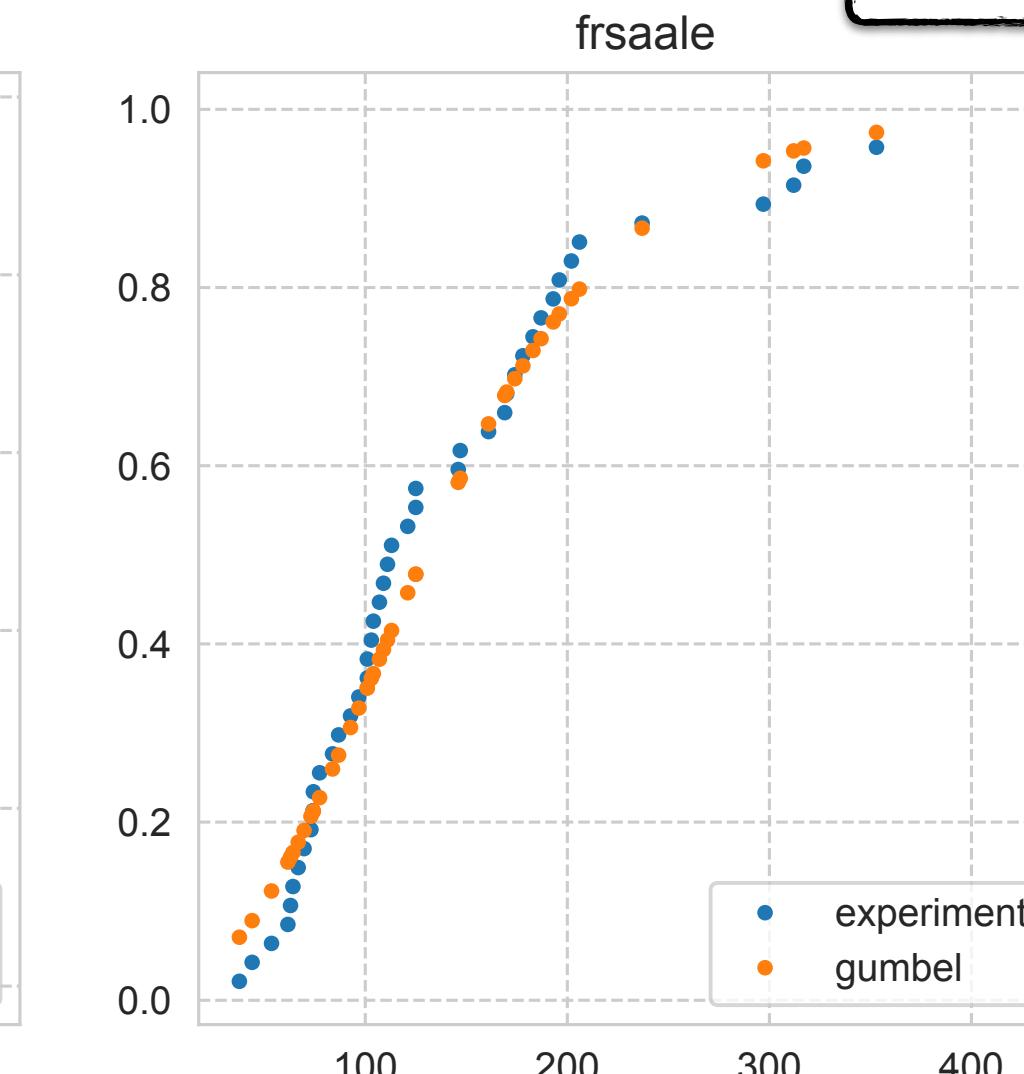
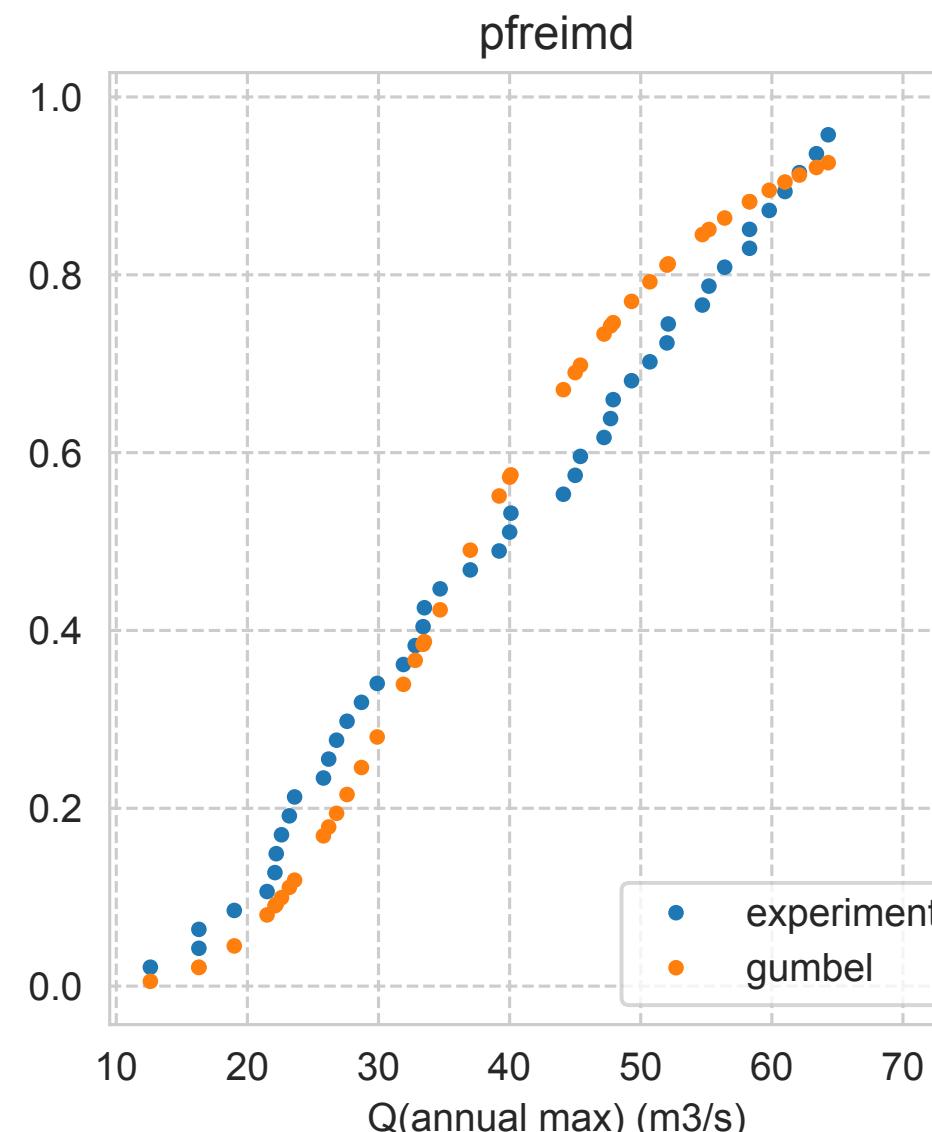
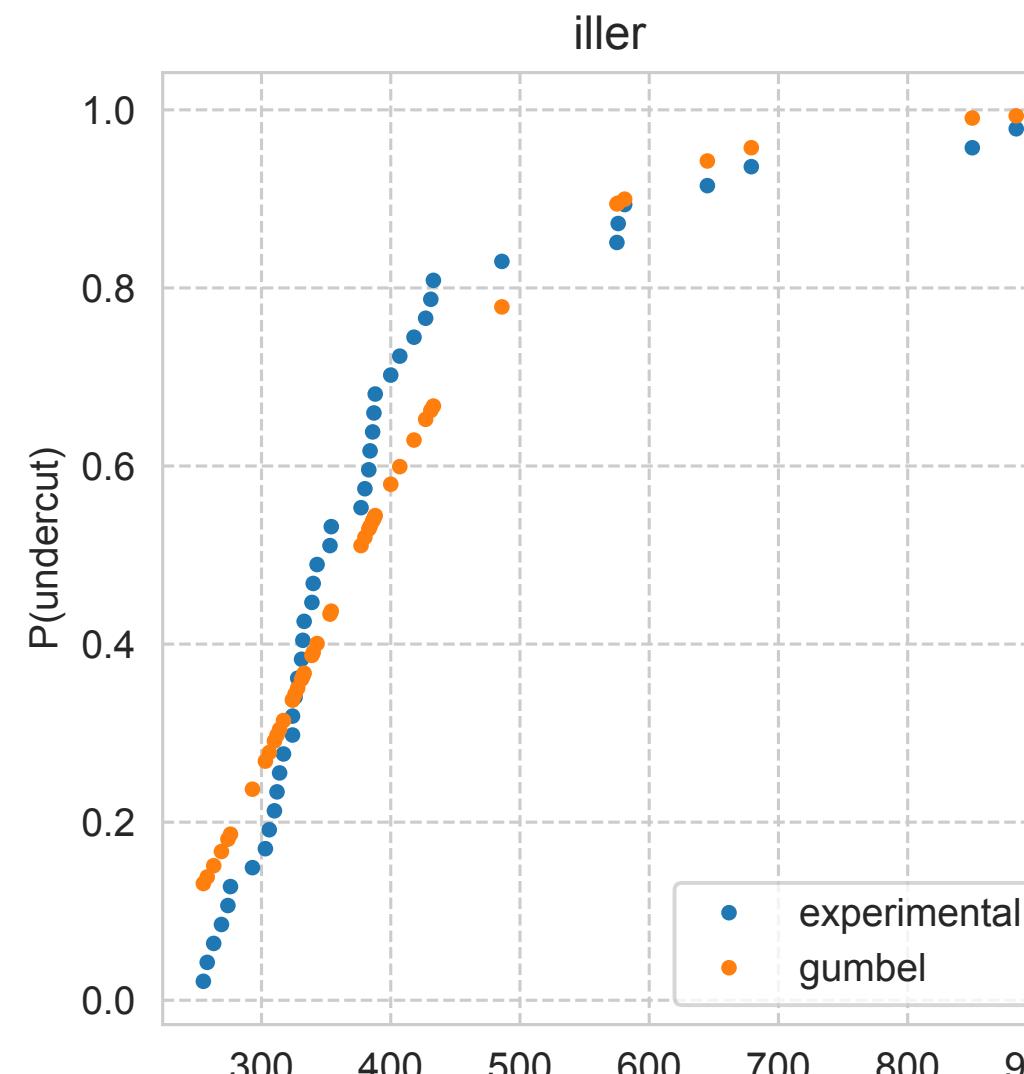
- $\beta$  :: Skalenparameter
- $\mu$  :: Lageparameter

Standardabweichung

$$\cdot 1/\beta = \pi / (\sigma_x^2 \sqrt{6})$$

$$\cdot \mu = \bar{x} - (0.5772 \cdot \beta)$$

Mittelwert



# Hochwasserstatistik

## Hochwasserschätzung mit der Gumbel-Verteilung

$$F(x) = e^{-e^{-\frac{1}{\beta}(x-\mu)}}$$

Gumbel-Verteilung (kumulativ)

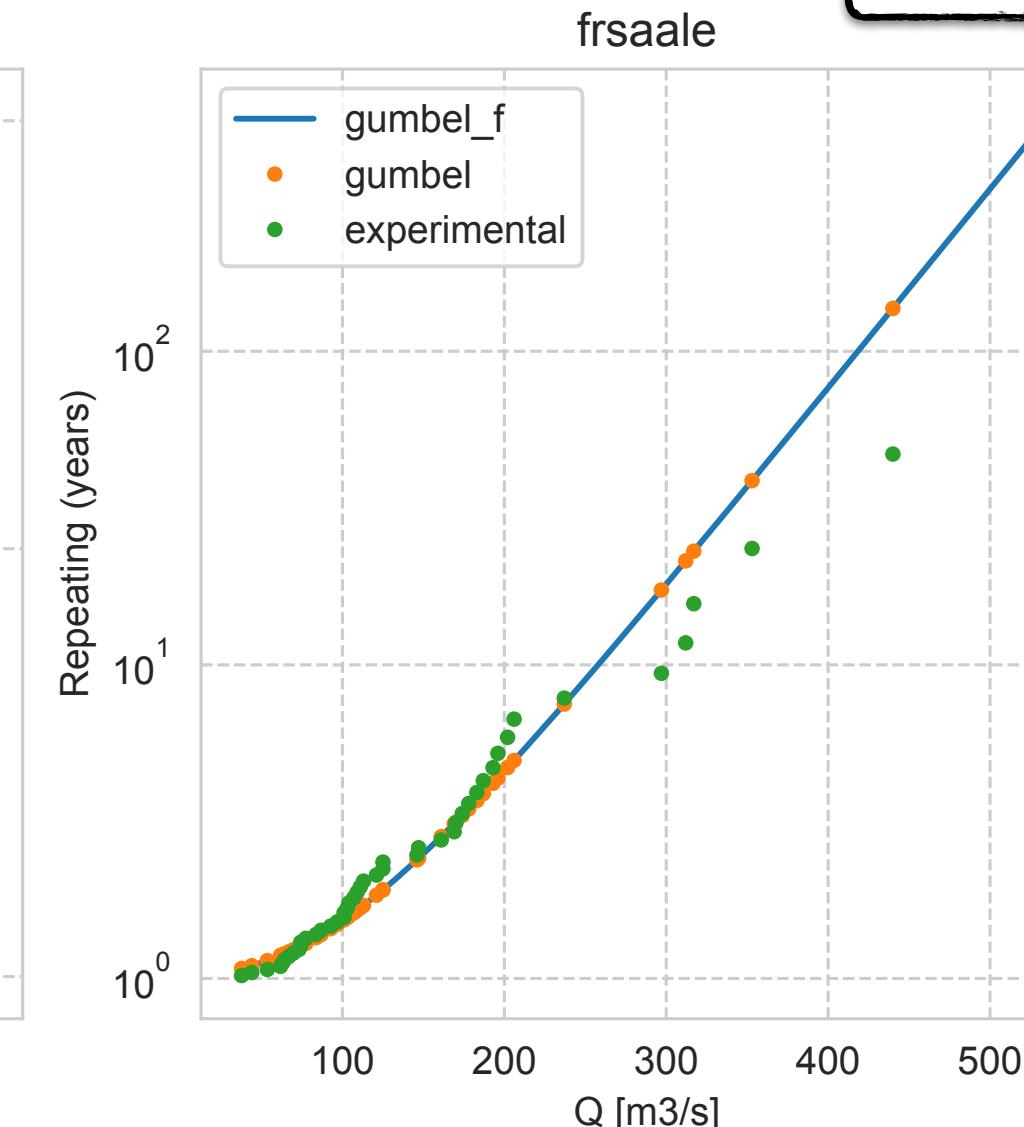
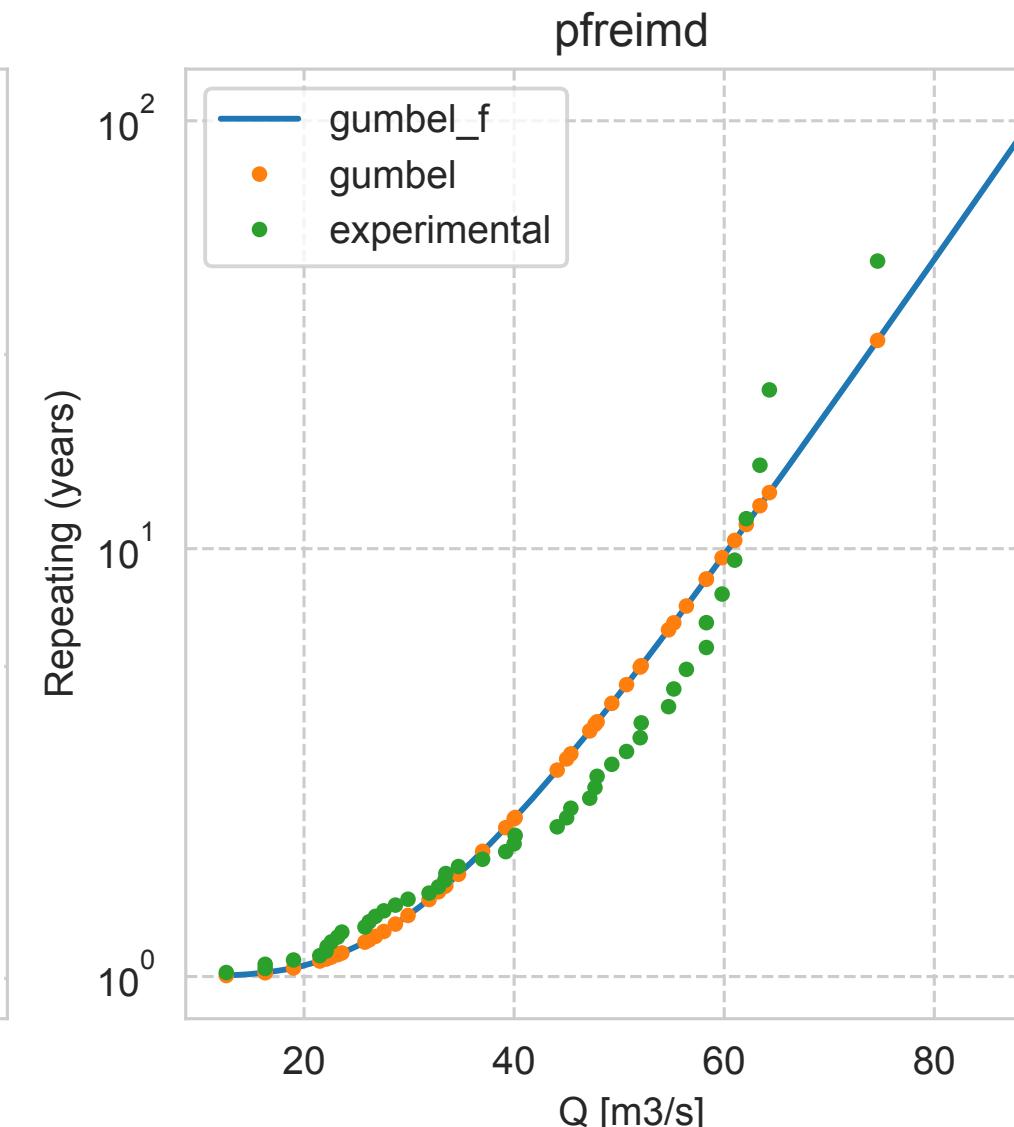
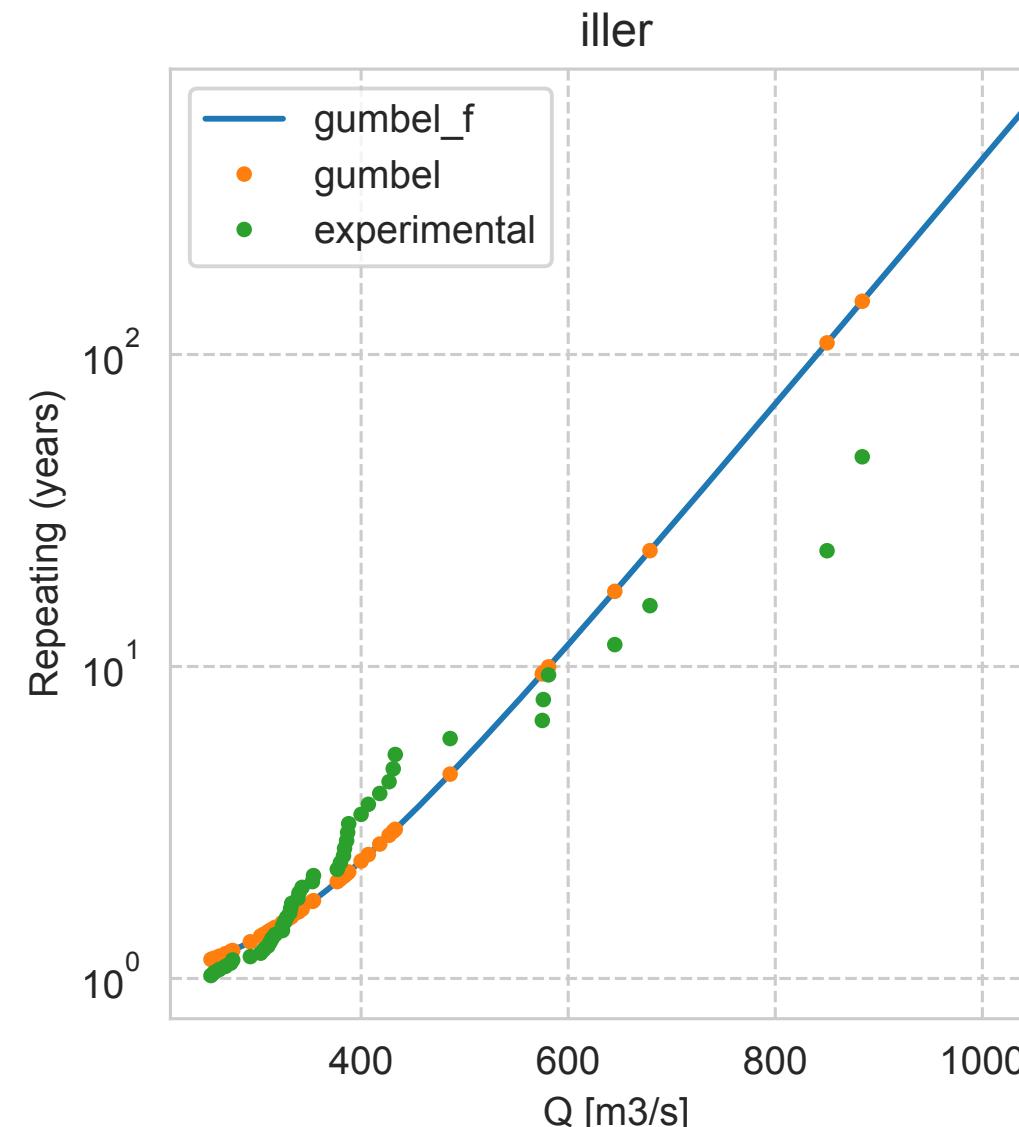
- $\beta$  :: Skalenparameter
- $\mu$  :: Lageparameter

Standardabweichung

$$\cdot 1/\beta = \pi / \sigma_x^2 \sqrt{6}$$

$$\cdot \mu = \bar{x} - (0.5772 \cdot \beta)$$

Mittelwert



bisherige Annahme: Stationarität

- die Verteilung der zu erwartenden Abflüsse bleibt gleich  
("das System ändert sich nicht")

# Hochwasserstatistik

und Global Change

- Wiederkehrintervall
- Eintretenswahrscheinlichkeit

# bisherige Annahme: Stationarität

CLIMATE CHANGE

## Stationarity Is Dead: Whither Water Management?

P. C. D. Milly,<sup>1\*</sup> Julio Betancourt,<sup>2</sup> Malin Falkenmark,<sup>3</sup> Robert M. Hirsch,<sup>4</sup> Zbigniew W. Kundzewicz,<sup>5</sup> Dennis P. Lettenmaier,<sup>6</sup> Ronald J. Stouffer<sup>7</sup>

**S**ystems for management of water throughout the developed world have been designed and operated under the assumption of stationarity. Stationarity—the idea that natural systems fluctuate within an unchanging envelope of variability—is a foundational concept that permeates training and practice in water-resource engineering. It implies that any variable (e.g., annual streamflow or annual flood peak) has a time-invariant (or 1-year-periodic) probability density function (pdf), whose properties can be estimated from the instrument record. Under stationarity, pdf estimation errors are acknowledged, but have been assumed to be reducible by additional observations, more efficient estimators, or regional or paleohydrologic data. The pdfs, in turn, are used to evaluate and manage risks to water supplies, waterworks, and floodplains, annual global impact.



An uncertain future challenges water planners.

# Hochwasserstatistik und Global Change

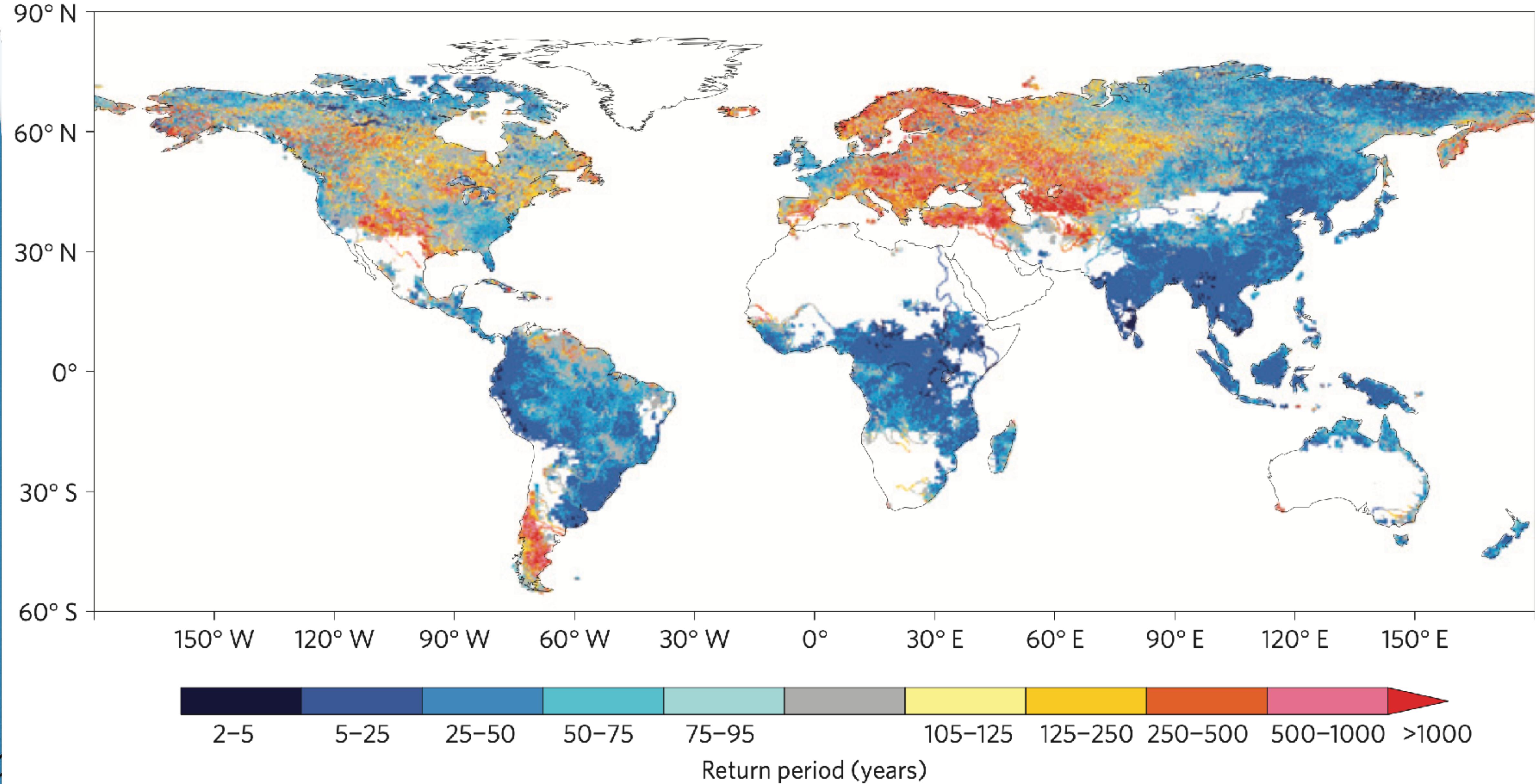
n nicht”)

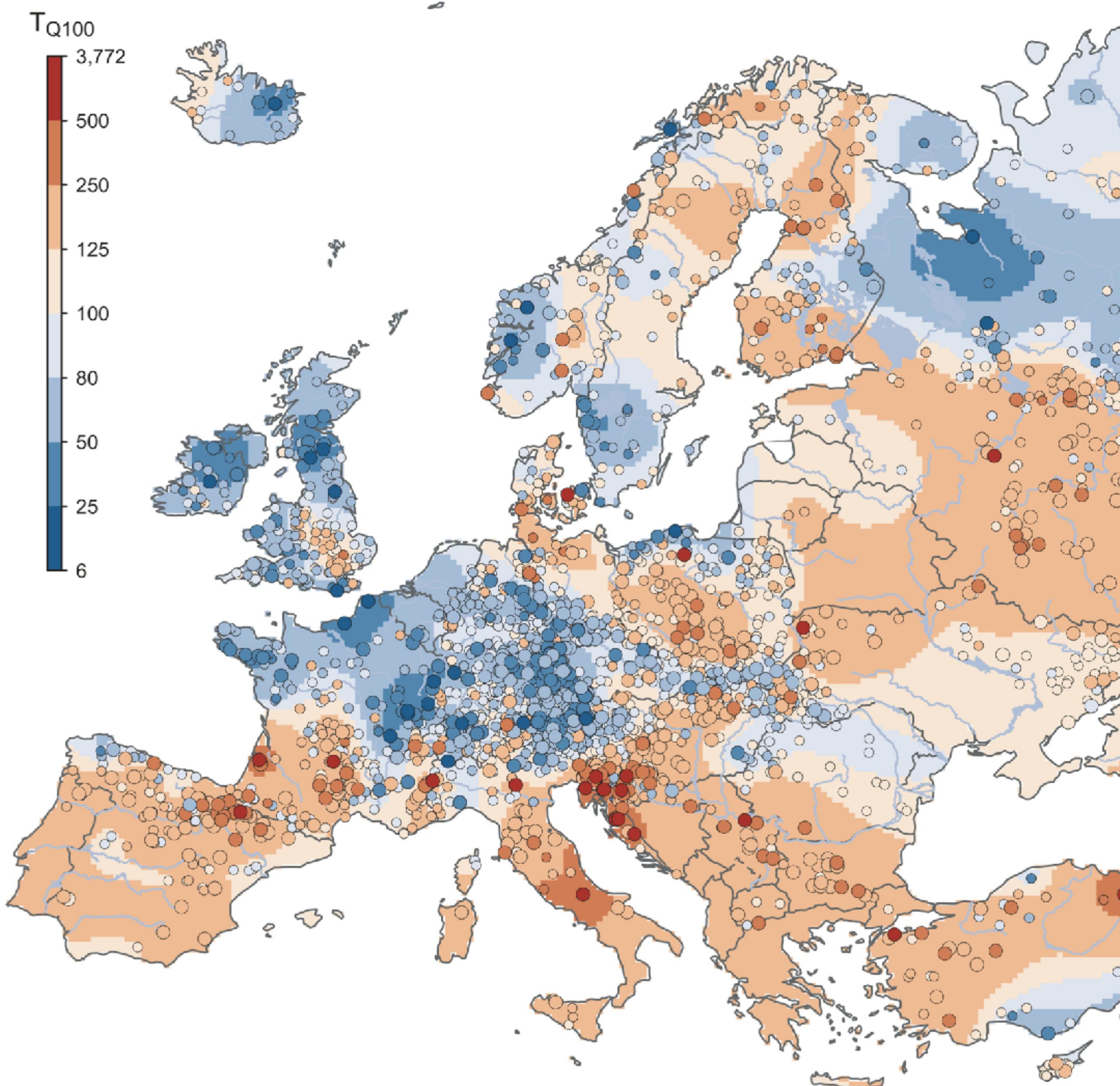
hkeit

## Global Change:

- Landnutzung hat sich deutlich erweitert und intensiviert
- Veränderungen im Wasserkreislauf im Anthropozän
- Klimakrise (mit einer wärmeren Atmosphäre)

# Voraussichtliche Änderung der Hochwasserhäufigkeit eines 100-jährigen Ereignisses bis 2100





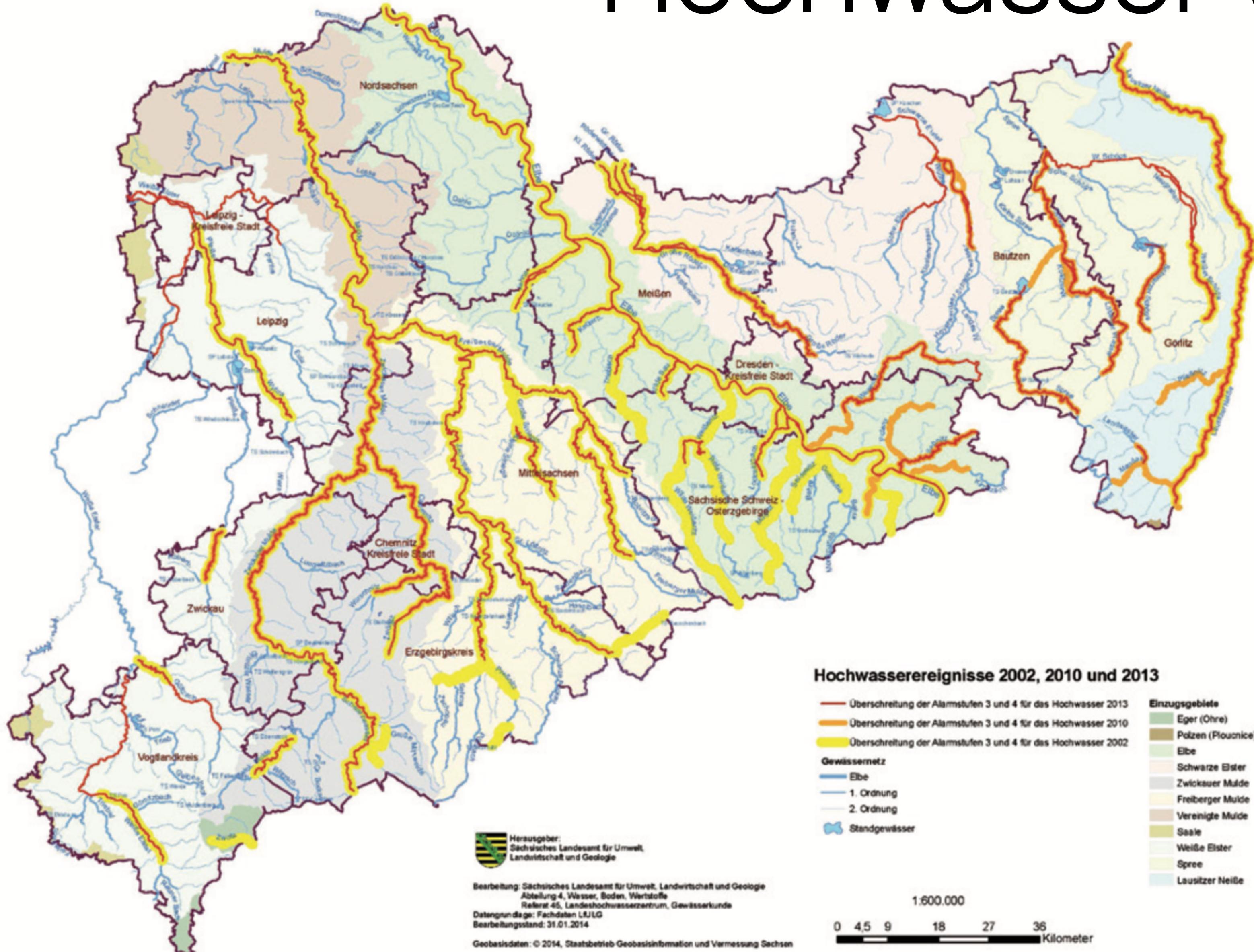
# In Europa:

Bereits deutliche Anzeichen

- Wiederkehrintervall von HQ100 in 1960 im Jahr 2010
- Relativ einfache Methoden können sehr mächtige Analysen ermöglichen
- immer die Annahmen der Methoden im Blick behalten

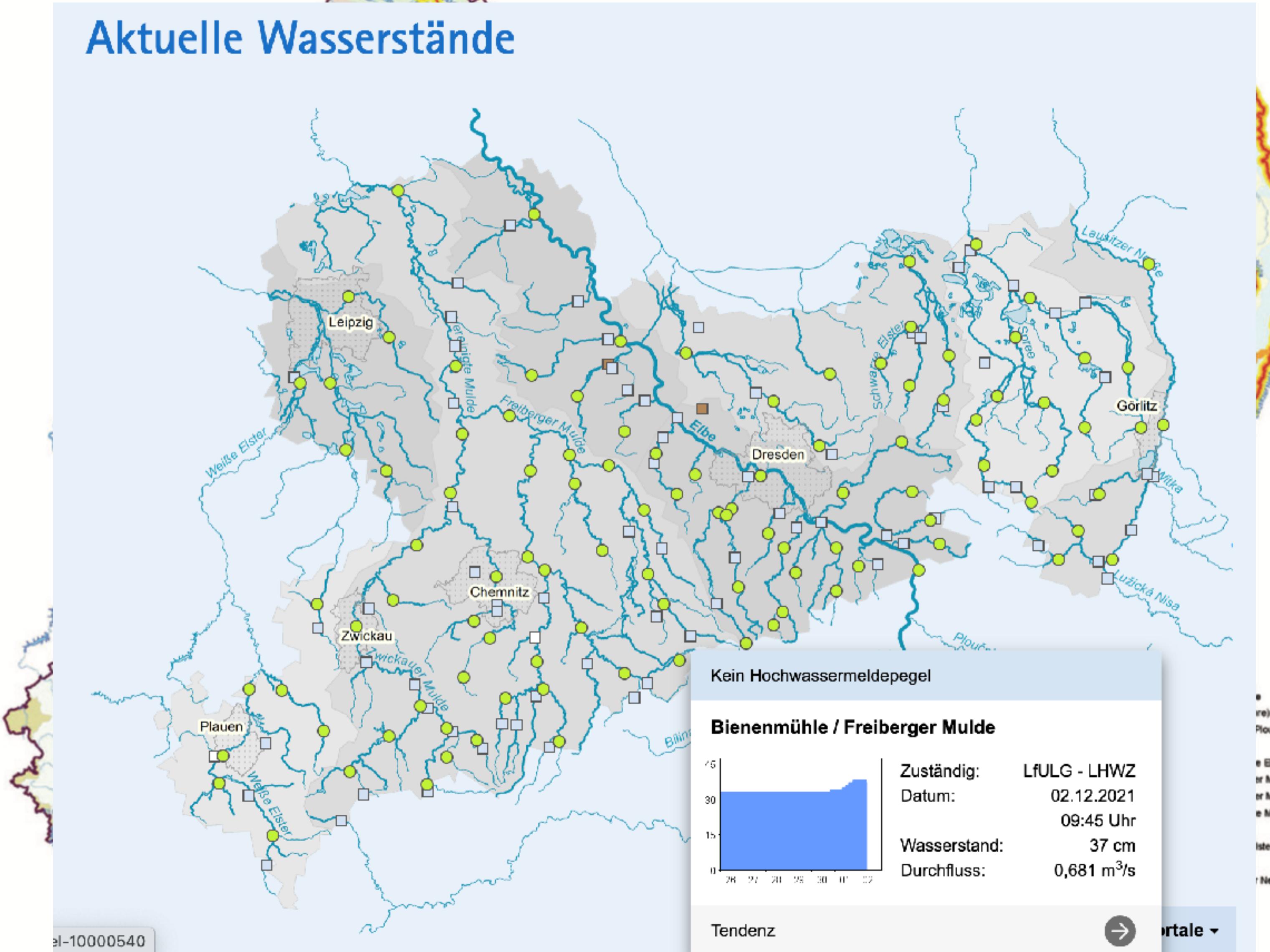
# Hochwasser Warnsysteme

Bsp. Sachsen



# Hochwasser Warnsysteme

## Aktuelle Wasserstände



Bsp. Sachsen

- Landeshochwassenzentrum
- betreibt Pegel mit entsprechenden Warnstufen
- betreibt Vorhersagemodelle für 24h

# Hochwasser Warnsysteme



# Hochwassernachrichten- und Alarmdienst

## Warngebiete (Kaskadierung)

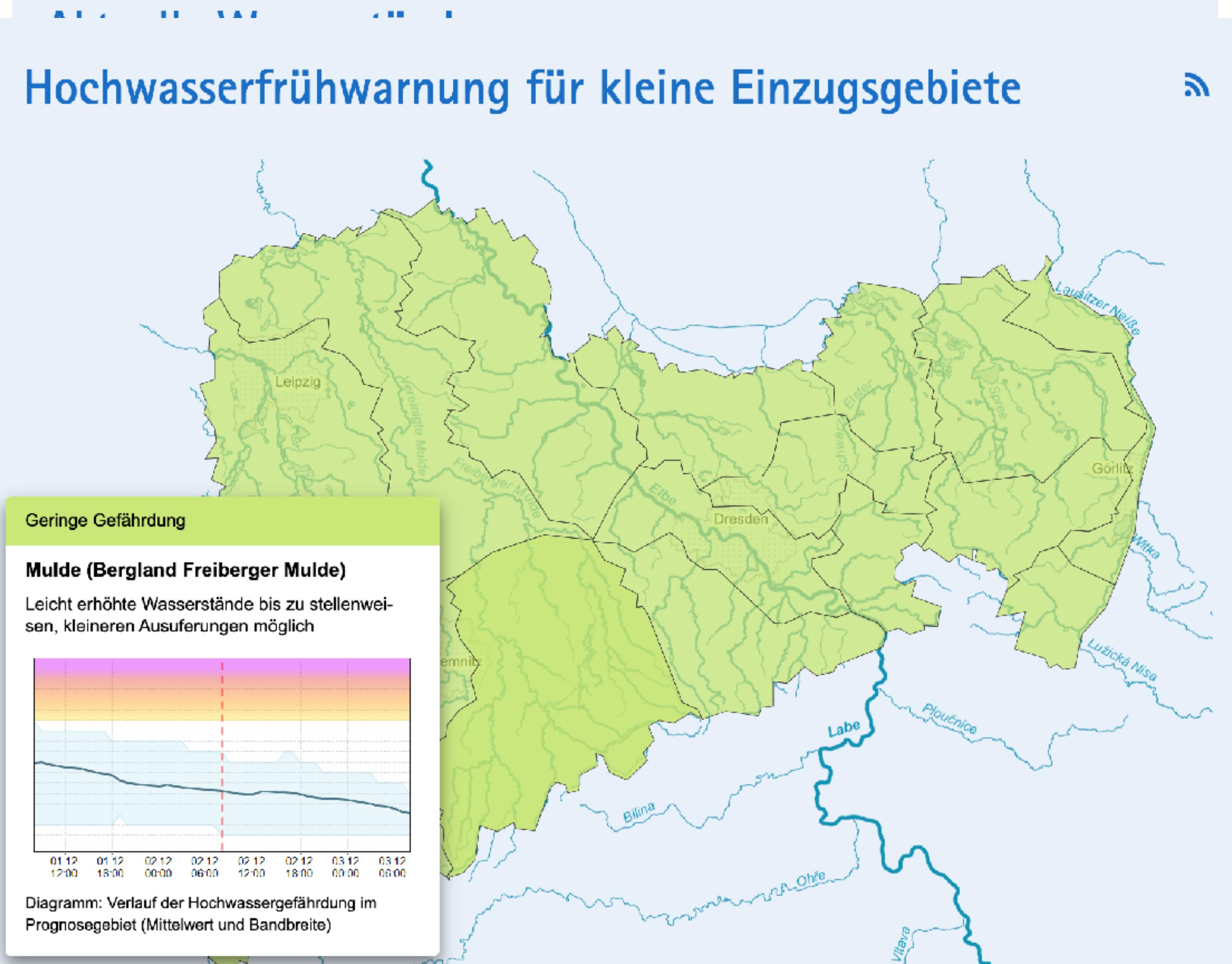


- | Warngebiet (grün) wird aktiviert
  - | unterhalb liegende Warngebiete (hellgrün) werden ebenfalls aktiviert
  - | Gemeinden dieser Warngebiete bekommen eine Eilbenachrichtigung
  - | Flussgebiet Mulde wird aktiviert
  - | HW-Warnung für Öffentlichkeit

# Bsp. Sachsen

- Landeshochwasserzentrum
  - betreibt Pegel mit entsprechenden Warnstufen
  - betreibt Vorhersagemodelle für 24h

# Hochwasser Warnsysteme



Bsp. Sachsen

- Landeshochwasserzentrum
- betreibt Pegel mit entsprechenden Warnstufen
- betreibt Vorhersagemodelle für 24h

# Niedrigwasserstatistik

analog zu Hochwasser

## Ablaufgeschwindigkeit einer Hochwasserwelle

- $U_{\text{flood}} = 5/3 \cdot u$
- $u$  als mittlere Fließgeschwindigkeit und  $U_{\text{flood}}$  als Geschwindigkeit der Hochwasserwelle

## Verweilzeit in Flüssen

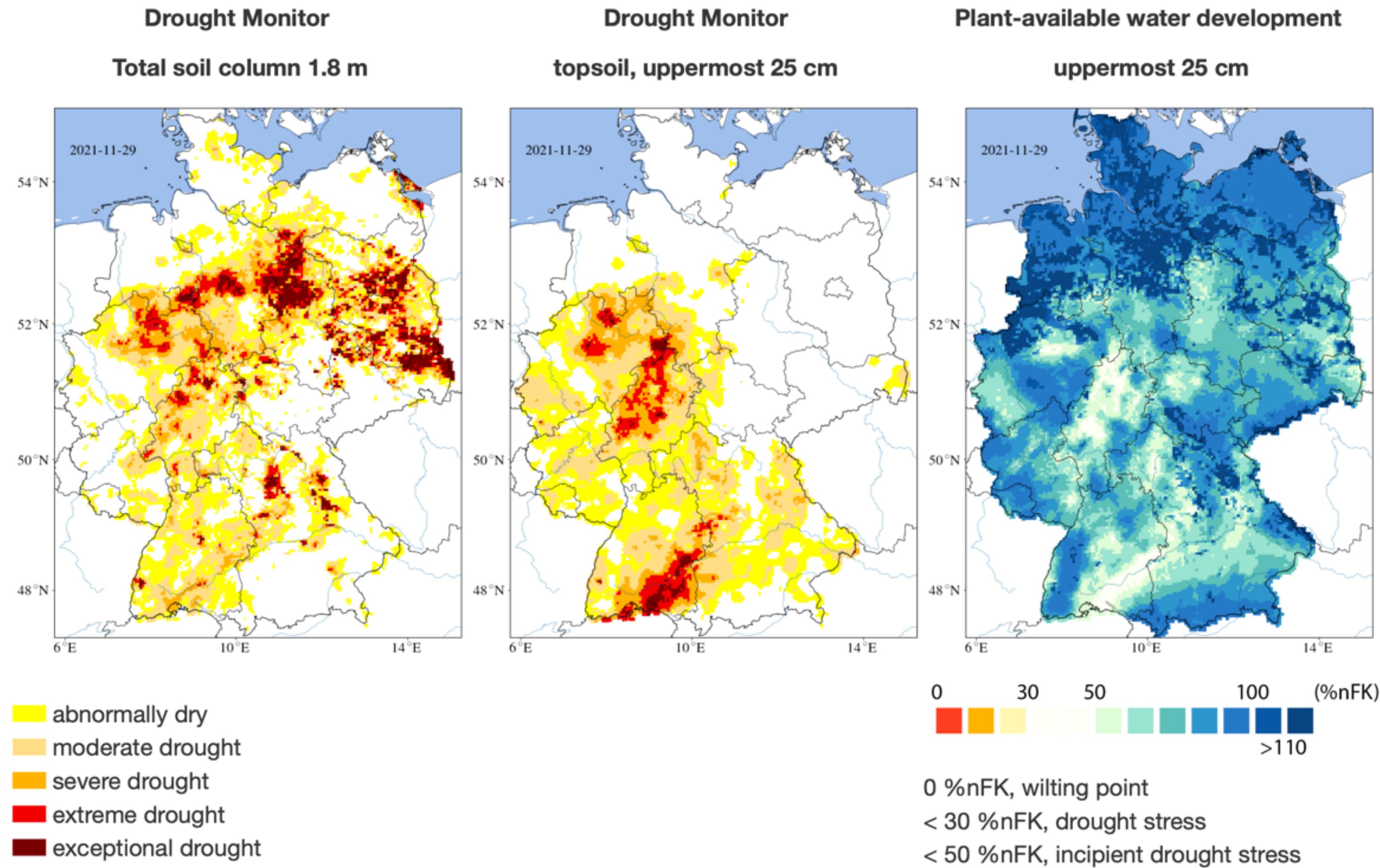
- wenige Stunden bis wenige Tage

Hochwasserstatistik ist eine Form der Extremwertstatistik

- kann grundsätzlich für alle Formen von Grenzwertüber- und -unterschreitungen genutzt werden

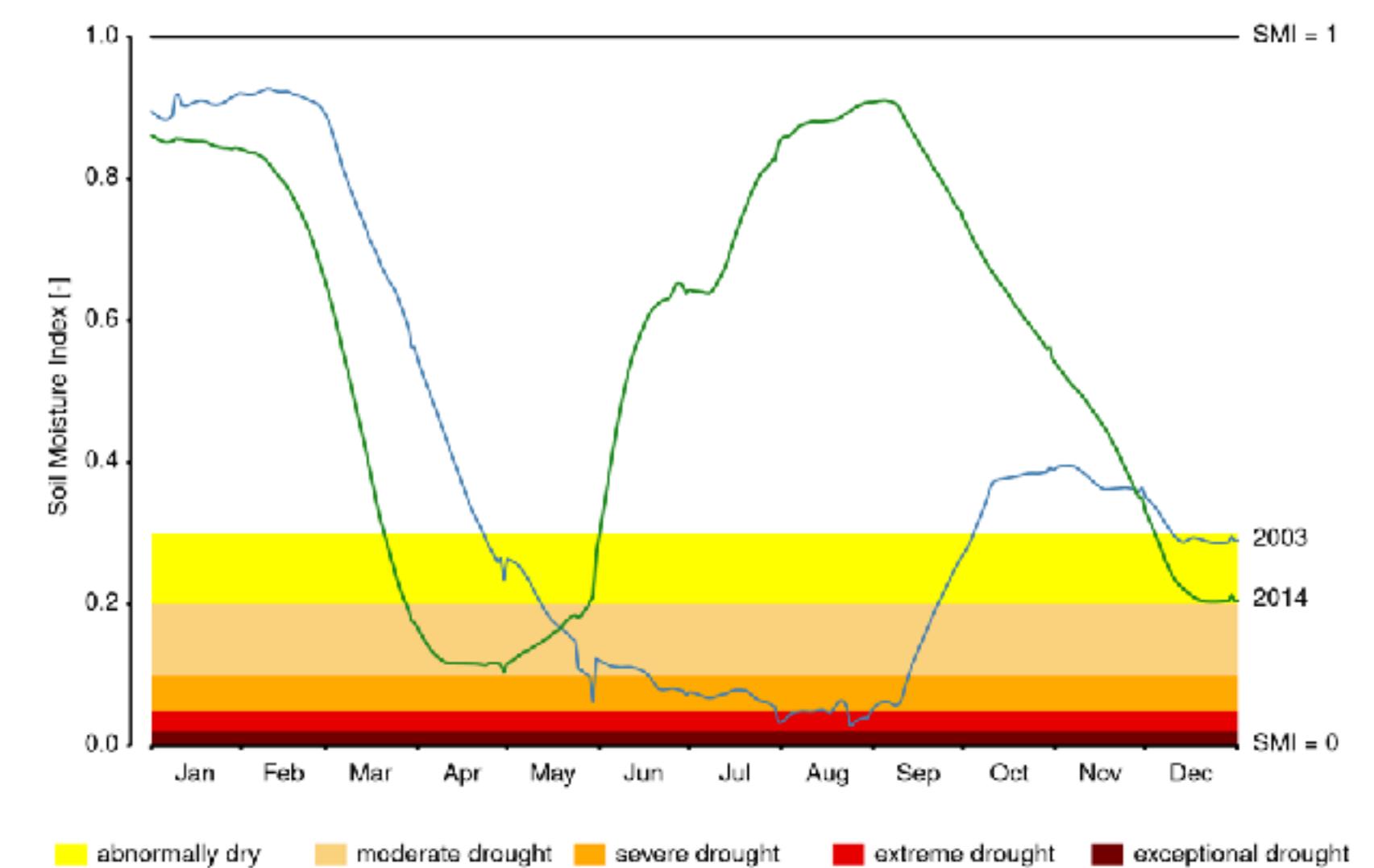
# Trockenstress

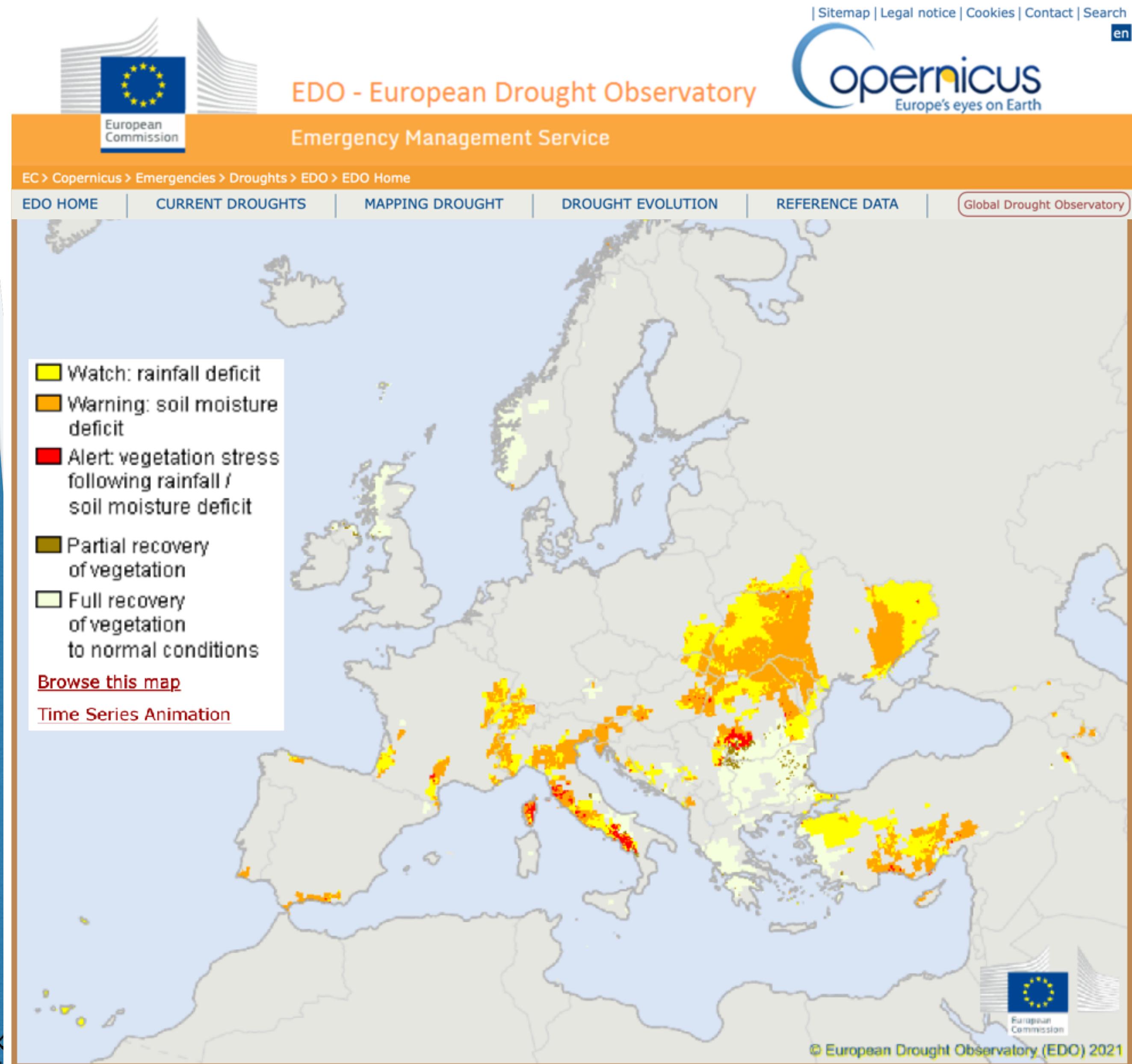
## Verschiedene Dürremonitore



## UFZ

- hydrologische Modell-Ergebnisse (mHm)
- Bodenfeuchte:





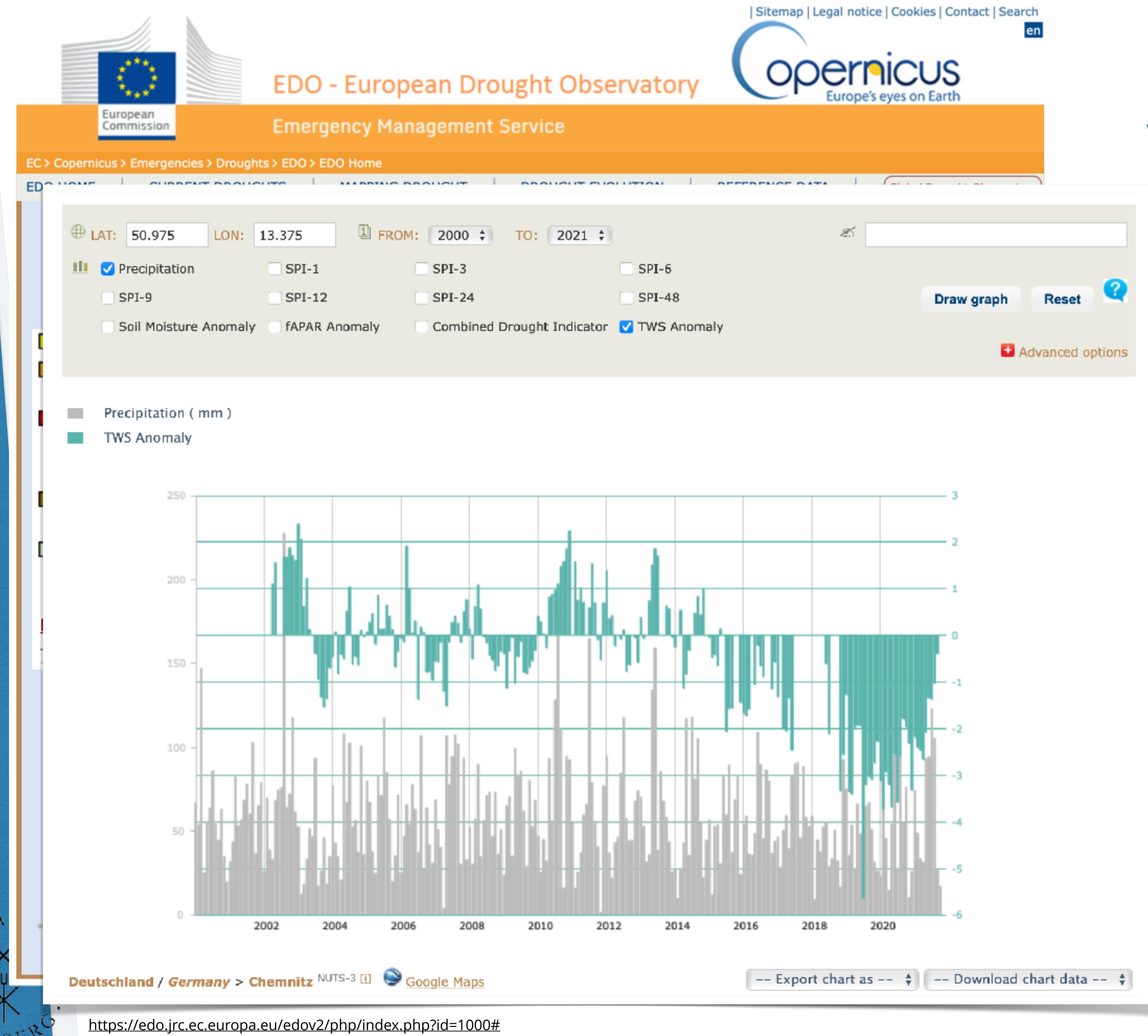
<https://edo.jrc.ec.europa.eu/edov2/php/index.php?id=1000#>

# Trockenstress

## Verschiedene Dürremonitore

### Copernicus

- Kombination verschiedener Indizes:
  - Niederschlagsindex (SPI)
  - Bodenfeuchteindex (SMI)
  - Vegetationsproduktivität Anomalie (fAPAR)
  - Hitze-/Kaltphasen Index (HCWI)
  - Wasserspeicher Anomalie (TWA)

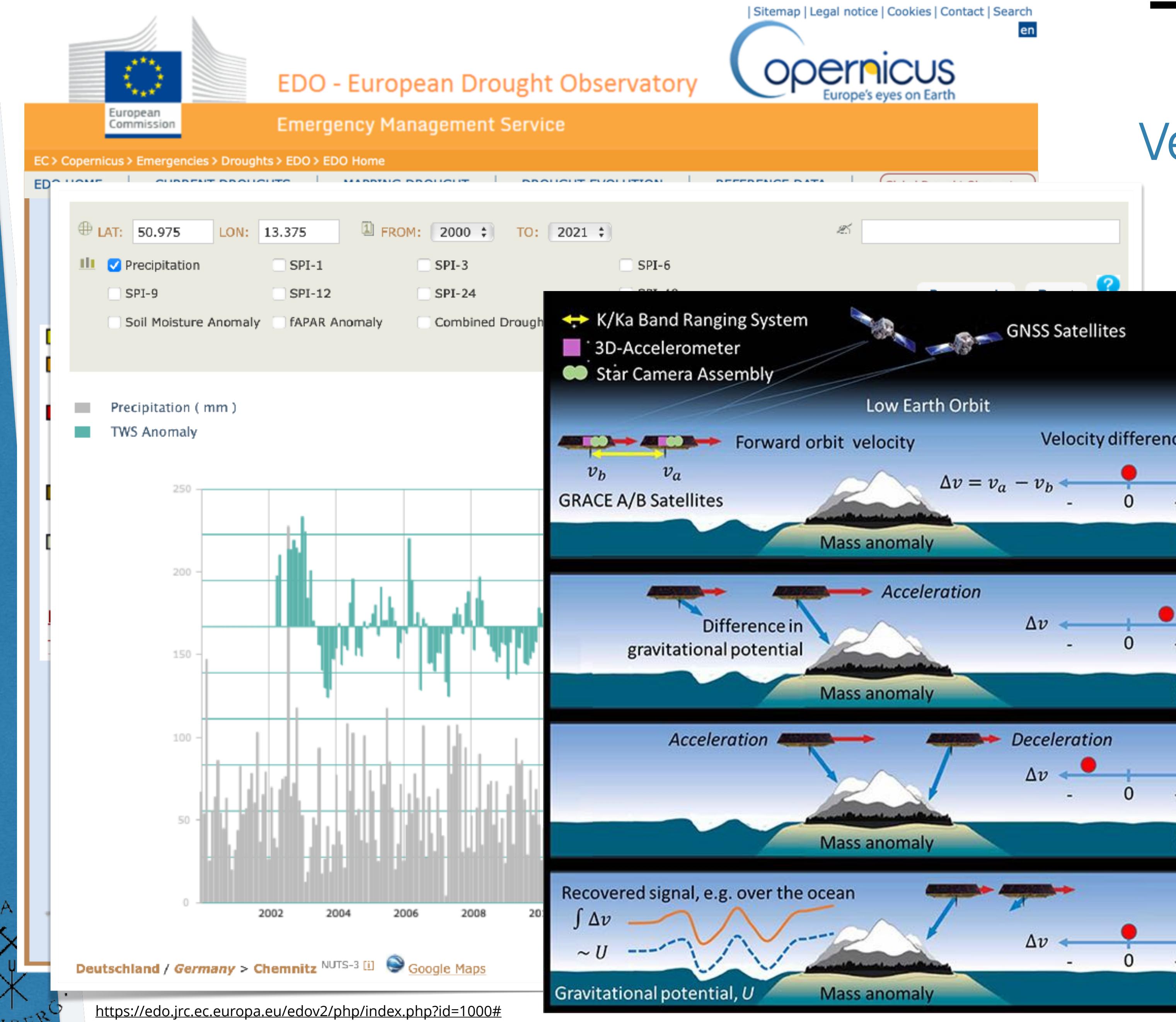


# Trockenstress

## Verschiedene Dürremonitore

### Copernicus

- Kombination verschiedener Indizes:
- Niederschlagsindex (SPI)
- Bodenfeuchteindex (SMI)
- Vegetationsproduktivität Anomalie (fAPAR)
- Hitze-/Kaltphasen Index (HCWI)
- Wasserspeicher Anomalie (TWA)

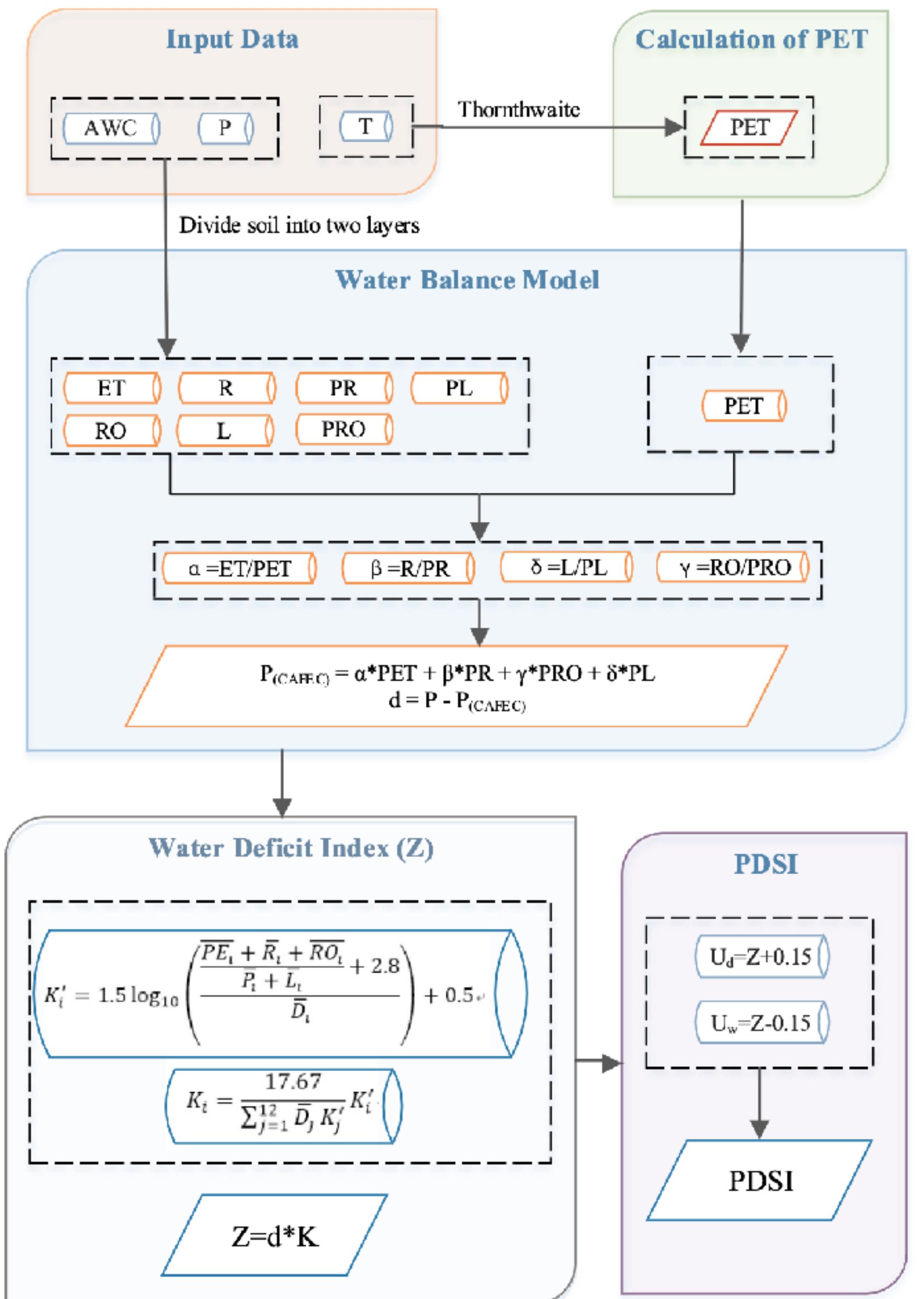


# Trockenstress

## Verschiedene Dürremonitore

### Copernicus

- Kombination verschiedener Indizes:
- Niederschlagsindex (SPI)
- Bodenfeuchteindex (SMI)
- Vegetationsproduktivität Anomalie (fAPAR)
- Hitze-/Kaltphasen Index (HCWI)
- Wasserspeicher Anomalie (TWA)

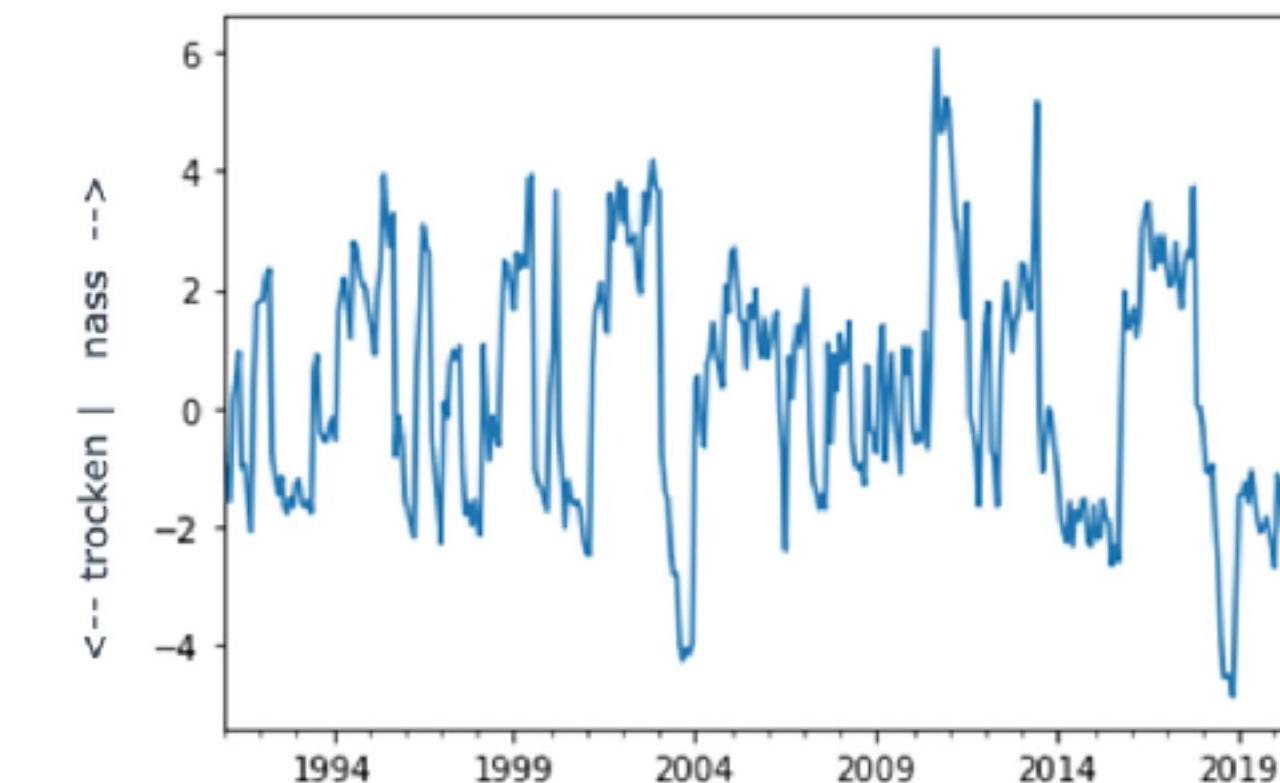


# Trockenstress

## Verschiedene Dürremonitore

### Palmer Drought Severity Index

- Schätzung einer vereinfachten Wasserbilanz mit meteorologischen Daten
- Wasserdefizit für  $ET_{pot}$  wird als Trockenstress ausgegeben



• Bsp. Sächs.  
Schweiz  
1991-2021

# 7

# Ziel der heutigen Vorlesung

Hochwasser - Bewertung und Vorsorge zu Hochwassern  
Trockenheit - Abschätzung mit verschiedenen Indizes

## Ziele:

- Beispiele für Extrema kennen
- Extremwertstatistik verstehen
- Anomalien als zusätzliches Werkzeug
- Unterschied Hochwasser und Trockenheit erkennen