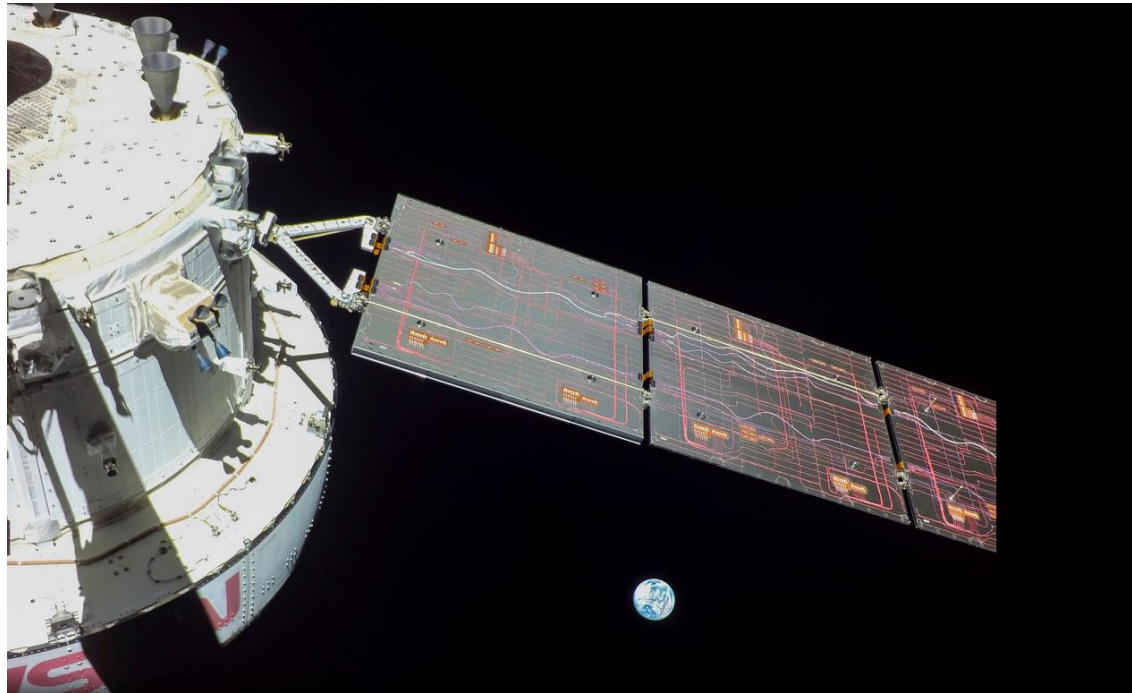


## Das Wasser auf der Erde und seine Verteilung



Die Artemis am 9. Flugtag im November 2022 mit Blick auf unsere Erde, den blauen Planeten.

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. Globaler Wasserkreislauf: Antreiber, Prozesse und Komponenten
2. Globale Wasserhaushaltsgleichung nach Brückner
3. Wasserbilanzen der Hemisphären, Ozeane und Kontinente
4. Globale Verteilung des Niederschlags und Verdunstung und Meridianprofile
5. Quellregionen des Niederschlags
6. Aridität und Humidität
7. Methoden, Qualität und Unsicherheiten bei der Bestimmung globaler Wasserhaushaltsbilanzen

# Wasser als erneuerbare Ressource



- Wasser bleibt im globalen Wasserkreislauf erhalten
  - Wasserzufluss durch Meteoriten = Diffusion von Wassermolekülen ins Weltall
  - „Wasserverbrauch“ suboptimale Definition
  - Wasser wird genutzt und dem Wasserkreislauf wieder hinzugefügt
- 
- Wasser ist daher eine erneuerbare Ressource = unerschöpflicher Vorrat
  - Änderung der Aggregatzustände / Verhältnis Meer- und Süßwasser / raumzeitliche Verteilung

# Deckung des Wasserbedarfes aus globaler Sicht

---

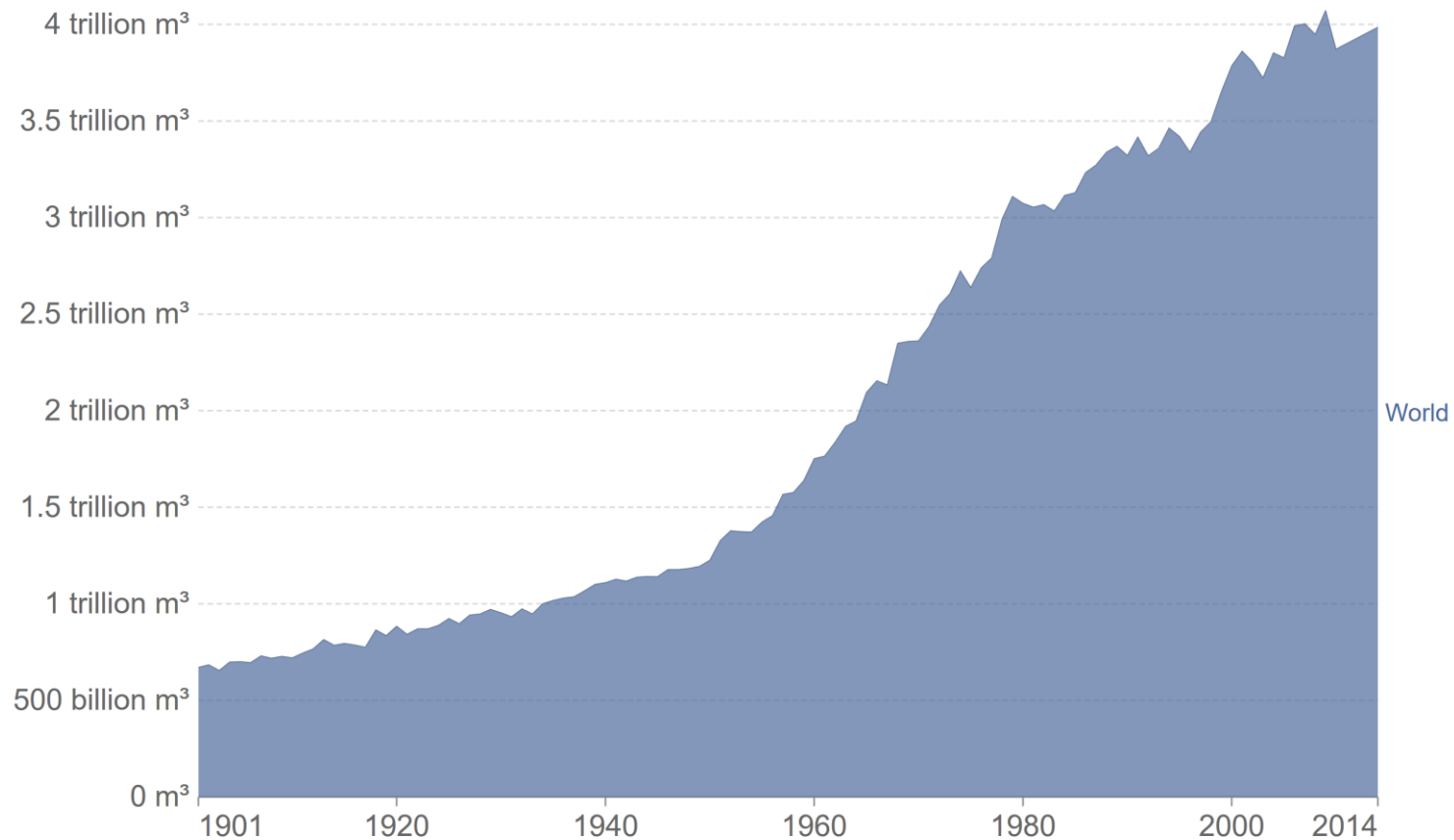
viele Herausforderungen (Baumgartner & Liebscher, 1996)

- Wasservorräte sind aufgrund der Land-Meer-Verteilung und von Klimazonen raumzeitlich sehr ungleichmäßig verteilt
- Immenses Bevölkerungswachstum: Bedarf an Süßwasser/Trinkwasser steigt exponentiell

# Globaler Bedarf an Süßwasser seit 1900

## Global freshwater use over the long-run

Global freshwater withdrawals for agriculture, industry and domestic uses since 1900, measured in cubic metres (m<sup>3</sup>) per year.



Source: Global International Geosphere-Biosphere Programme (IGB)

OurWorldInData.org/water-use-stress • CC BY

# Deckung des Wasserbedarfes aus globaler Sicht

---

viele Herausforderungen (Baumgartner & Liebscher, 1996)

- Wasservorräte sind aufgrund der Land-Meer-Verteilung und von Klimazonen raumzeitlich sehr ungleichmäßig verteilt
- Immenses Bevölkerungswachstum: Bedarf an Süßwasser/Trinkwasser steigt exponentiell
- Wasserbedarf für die Industrie steigt gerade in Schwellenländern enorm
- Klima- und Landnutzungswandel kann das Wasserdargebot in vielen Regionen der Welt langfristig ändern

# Deckung des Wasserbedarfes aus globaler Sicht

---

Aufgrund den Herausforderungen ergeben sich viele zentrale Aufgaben in der Hydrologie und angrenzenden Wissenschaften

- ➡ Monitoring von Wasservorräten und -entnahme notwendig (Beschlüsse von COP27)
- ➡ Änderungen des Wasserkreislaufes müssen geschätzt und anthropogene Eingriffe (Landnutzung, Klimawandel) müssen quantifiziert werden
- ➡ Technische Innovation zur Reduzierung des Wasserbedarfs
- ➡ unterschiedliche Skalen: von global zu lokal

Wie sind die Wasservorräte global verteilt? Welche Komponenten des Wasserkreislaufes wirken als Speicher für Süßwasserreserven?



---

# 1. Globaler Wasserkreislauf und dessen Speicher

# Schema des globalen Wasserkreislauf

---

# Globale Wasserreservoirare: Meer- und Süßwasser

Bereich	Menge S [km <sup>3</sup> ]	Anteil [%]
Meerwasser	$1.348 \cdot 10^6$	97,4 % des freien Wassers
Süßwasser	$36,1 \cdot 10^6$	2,6 %

Gesamtmenge:

- $1400 \cdot 10^6 \text{ km}^3$
- Würfel mit  
Kantenlänge 1120 km
- 0.13% des  
Erdvolumens

# Globale Wasserreservoir: Anteil Süßwasser

Bereich	Menge S [km <sup>3</sup> ]	Anteil [%]
Meerwasser	1348 * 10 <sup>6</sup>	97,4 % des freien Wassers
Süßwasser	36,1 * 10 <sup>6</sup>	2,6 %
<b>Anteile Süßwasser:</b>		
Eis	27,8 * 10 <sup>6</sup>	77,1 %
Grundwasser	8,06 * 10 <sup>6</sup>	22,3 %
Bodenwasser	0,065 * 10 <sup>6</sup>	0,18 %
Seen	0,125 * 10 <sup>6</sup>	0,35 %
Fließgewässer	0,0012 * 10 <sup>6</sup>	< 0,01 %
Atmosphäre	0,013 * 10 <sup>6</sup>	0,04 %

- Großteil des Wassers nicht direkt nutzbar (Meerwasser, Eis)
- Grundwasser wichtigste Trinkwasserressource, aber nur 0.6% des verfügbaren Wasser
- Seen unbedeutend trotz riesiger Seen wie das Kaspische Meer
- Fehlend: Wasser der Biosphäre und in Gesteinen gebundenes Wasser

leicht angepasst, nach Wilhelm (1997) aus Korzun (1978)

# Globale Wasserreservoirre - Schichtdicke

Bereich	Menge S [km <sup>3</sup> ]	Anteil [%]	Schichtdicke [m]
Meerwasser	1348 * 10 <sup>6</sup>	97,4 % des freien Wassers	2550
Süßwasser	36,1 * 10 <sup>6</sup>	2,6 %	72
<b>Anteile Süßwasser:</b>			
Eis	27,8 * 10 <sup>6</sup>	77,1 %	56
Grundwasser	8,06 * 10 <sup>6</sup>	22,3 %	15,7
Bodenwasser	0,065 * 10 <sup>6</sup>	0,18 %	0,12
Seen	0,125 * 10 <sup>6</sup>	0,35 %	0,24
Fließgewässer	0,0012 * 10 <sup>6</sup>	< 0,01 %	0,002
Atmosphäre	0,013 * 10 <sup>6</sup>	0,04 %	0,024

leicht angepasst, nach Wilhelm (1997) aus Korzun (1978)

# Berechnung von Verweilzeiten

---

Verweilzeit:  $T = \frac{S}{D}$

$T$  = Verweilzeit [a]

$S$  = Wassermenge eines Wasserreservoirs [ $\text{km}^3$ ] = Speicherkapazität

$Q$  = Umsatzmenge (Durchflussmenge) [ $\text{km}^3/\text{a}$ ]

Beispiel Atmosphäre:  $S = 0,013 \cdot 10^6 \text{ km}^3$  und  $Q = 0,4961 \cdot 10^6 \text{ km}^3/\text{a}$

$$T = \frac{S}{D} = \frac{0,013 \cdot 10^6 \text{ km}^3}{0,4961 \cdot 10^6 \text{ km}^3 \text{ a}^{-1}} \approx 0.0262 \text{ a} \approx 9.5 \text{ d}$$



interessante Betrachtung: alle 9.5 Tage erneuert sich das Wasser in der Atmosphäre

# Hausaufgabe: Verweilzeiten

---

1. Berechnen Sie die Verweilzeiten für die hydrologischen Speicher:  
Ozean bzw. Meerwasser, Eis, Grundwasser, Bodenwasser, Seen und  
Fließgewässer
2. Vergleichen Sie Ihre Resultate mit den Angaben in der  
nachfolgenden Tabelle

# Globale Wasserreservoir: Verweilzeiten

Bereich	Menge S [km <sup>3</sup> ]	Anteil [%]	Schichtdicke [m]	Verweilzeit T Jahre, Tage
Meerwasser	1348 * 10 <sup>6</sup>	97,4 % des freien Wassers	2550	ca. 2500 a
Süßwasser	36,1 * 10 <sup>6</sup>	2,6 %	70	
<b>Anteile Süßwasser:</b>				
Eis	27,8 * 10 <sup>6</sup>	77,1 %	56	1000 a
Grundwasser	8,06 * 10 <sup>6</sup>	22,3 %	15,7	1400 a
Bodenwasser	0,065 * 10 <sup>6</sup>	0,18 %	0,12	1 a
Seen	0,125 * 10 <sup>6</sup>	0,35 %	0,24	17 d
Fließgewässer	0,0012 * 10 <sup>6</sup>	< 0,01 %	0,002	11 - 12 d
Q/a	0,04 * 10 <sup>6</sup>			
Atmosphäre	0,013 * 10 <sup>6</sup>	0,04 %	0,024	9 - 10 d
Q/a	0,4961 * 10 <sup>6</sup>			

leicht angepasst, nach Wilhelm (1997) aus Korzun (1978)



# Welche Bedeutung hat die Verweilzeit?

---

Hinweis auf die Gefährdung des Wasserreservoirs durch menschliche Eingriffe!

- kurze Verweilzeiten: rascher Austausch der Wassermenge (z. B. Atmosphäre)
- lange Verweilzeiten: Kontaminationen werden nur schwer entdeckt (z. B. Grundwasser)
- Erneuerungsrate  $\lambda$ :  $\lambda = \frac{1}{T}$   $\longrightarrow$  Schadstoffbetrachtung sehr wichtig

mit  $T$  = Verweilzeit [a]

- Kehrwert der Verweilzeit
- Berechnung der Ausdünnung der Schadstoffkonzentration

# Berechnung von Verweilzeiten (Verweildauer)

Vorratsspeicher	Verweildauer		Jahresumsatz Schichthöhe m/a
	Jahre a	Tage d	
Globales Wasservolumen	2 800		0,97
Permafrost, Bodeneis	10 000		0,14
Polareis	9 700		0,15
Weltmeer	3 150		1,20
Gebirgsgletscher	1 600		0,11
Grundwasser, inaktiv	1 400		0,12
Grundwasser, aktiv	300		
Seen	17		4,35
Moore, Sümpfe	5		0,85
Bodenfeuchte	1		0,20
Flüsse		16	0,32
Atmosphäre		9	0,97
Biologisches Wasser		1	0,73

---

## 2. Globale Wasserhaushaltsgleichung nach Brückner

# Wasserhaushaltsgleichung

---

**Regionale Wasserhaushaltsgleichung** (z. B. für ein Flussgebiet)

$$N = V + Q + \Delta S$$

N = Niederschlag [mm]

V = Verdunstung (Evaporation E) [mm]

Q = Abfluss [mm]

$\Delta S$  = Änderung der gespeicherten Wassermenge (z. B. die Bodenfeuchte innerhalb eines Flussgebietes) [mm]

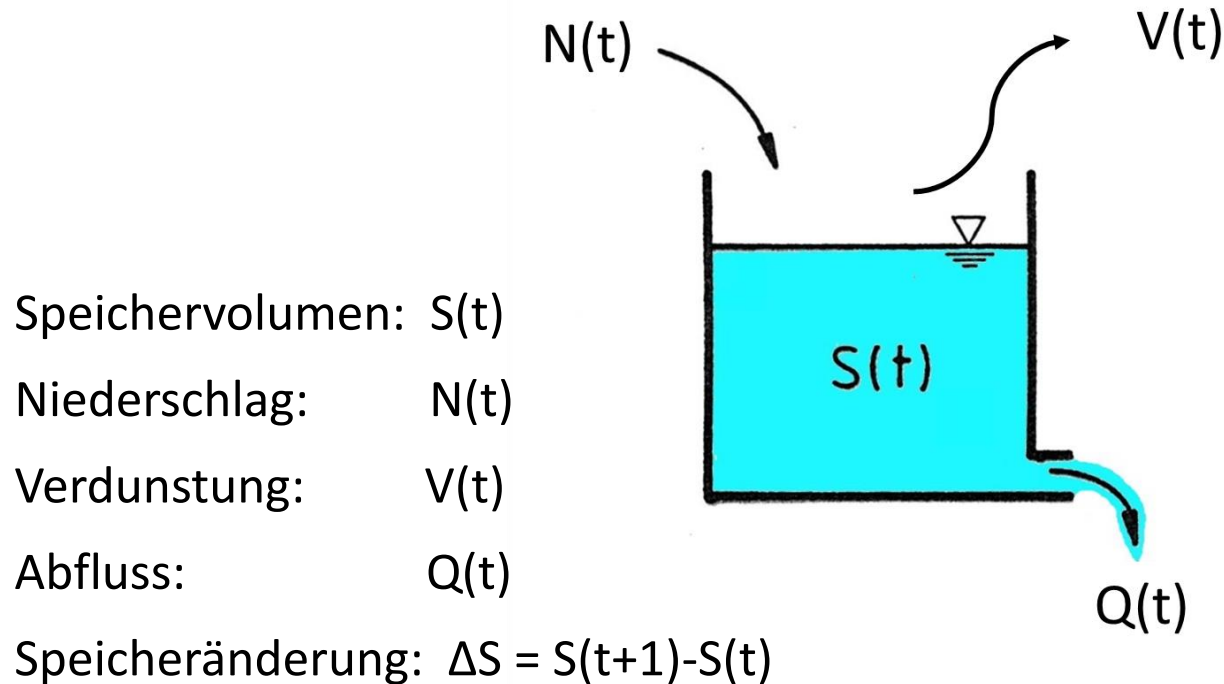
**Basis: Massenerhaltungssatz der Wasserbilanz (Plausibilitätskontrolle)**

**stationäre Verhältnisse**  $\Delta S = 0$ , wenn  $N = V + Q$ , andernfalls **instationär**

Aufgabe:

- $N = 650$  mm,  $V = 500$ , Annahme stationäres Verhältnis. Wie ist der Abfluss Q?
- Wie verändert sich Q wenn die Bodenfeuchte zunimmt?

# Speicherkonzept & lineare Speicher



- **Speicherkonzept** bildet die **Grundlage** für die einfachsten (konzeptionellen) **mathematischen Modelle** in der Hydrologie (z. B. **Wasserhaushaltsmodelle**)
- **lineare Speicher**:  $Q(t) = k S(t)$

# Wasserhaushaltsgleichung des Erdsystems

---

**Wasserhaushaltsgleichung** (z. B. für ein Flussgebiet)

$$N = V + Q + \Delta S$$

$N$  = Niederschlag [mm]

$V$  = Verdunstung (Evaporation  $E$ ) [mm]

$Q$  = Abfluss [mm]

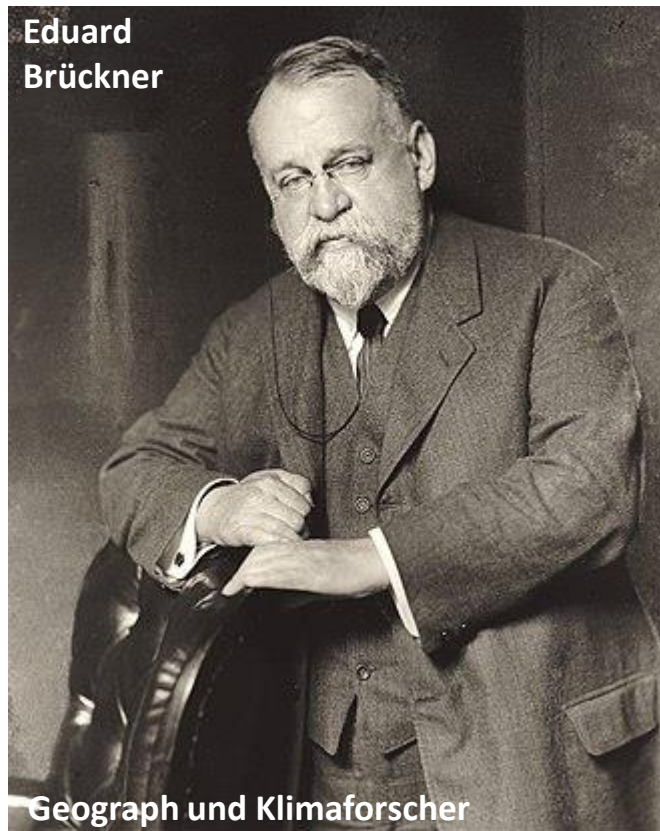
$\Delta S$  = Änderung der gespeicherten Wassermenge (z. B. des Flussgebietes) [mm]

**Wasserhaushaltsgleichung des Erdsystems** als Spezialfall:

$$N = V$$

- $\Delta S$  und  $A$  verschwinden
- geschlossenes System

# Wasserhaushaltsgleichung: Land-/Meeresflächen



[https://de.wikipedia.org/wiki/Eduard\\_Br%C3%BCckner](https://de.wikipedia.org/wiki/Eduard_Br%C3%BCckner)

## DIE ALPEN IM EISZEITALTER

VON

ALBRECHT PENCK  
PROFESSOR AN DER UNIVERSITÄT  
BERLIN

UND

ED.  
BRÜCKNER

436

Ed. Brückner:

### Die Bilanz des Kreislaufs des Wassers auf der Erde.

Von Prof. Dr. Ed. Brückner in Halle a. S.

Vor bald sechs Jahren habe ich in einem vor dem internationalen Geographenkongreß zu Berlin gehaltenen und auch im VI. Jahrgang dieser Zeitschrift S. 89 abgedruckten Vortrag über die Herkunft des Regens den Nachweis zu führen gesucht, daß die Niederschläge, die auf das Festland niederfallen, zu einem sehr erheblichen Teil nicht den Wasserdampfmassen der Ozeane entstammen, sondern Wasserdämpfen, die vom Lande aus durch Verdunstung der Atmosphäre zugeführt werden. Mein Resultat bestätigte eine kurz vorher von Alexander Supan und früher schon von Alexander Woeikof ausgesprochene, wenn auch nicht ziffernmäßig belegte Anschauung. Ein Vortrag im Institut für Meereskunde in Berlin über die Beziehungen zwischen Meer und Regen<sup>1)</sup> bot mir die Veranlassung den damals eingeschlagenen Gedankengang weiter zu verfolgen. Ich kam dabei zur Aufstellung einer Bilanz des Kreislaufs des Wassers auf der Erde, d. h. zu einer Bestimmung der Wassermengen, die im Kreislauf des Wassers vom Ozean zum Ozean in Bewegung sind. Selbstverständlich handelt es sich nur um angenäherte Schätzungen. Nichtsdestoweniger scheinen mir auch Schätzungen nicht uninteressant, weil sie einen Begriff von der Größenordnung der bewegten Wassermassen geben.

Der Kreislauf des Wassers vollzieht sich auf der Erde in zweierlei Weise. Von der Oberfläche des Meeres findet Verdampfung von Wasser statt; ~~das verdampfte Wasser verdichtet sich in der Atmosphäre zu Wolken und~~

BRÜCKNER, Ed. Die Bilanz des Kreislaufs des Wassers auf der Erde. Geographische Zeitschrift, 1905, 11. Jg., Nr. 8. H, S. 436-445.

<https://www.jstor.org/stable/27805335>

Jaeger, L., Hupfer, P., & Kessler, A. (2006). 100 Jahre globale Wasserbilanz von Eduard Brückner, eine Würdigung aus heutiger Sicht (100 Years Global Water Balance by Eduard Brückner, an Appreciation from Today's Point of View). Erdkunde, 273-286. <https://www.jstor.org/stable/25647884>

# Wasserhaushaltsgleichung - Landflächen

## Wasserhaushaltsbilanzen für Landflächen (Brückner, 1905):

$$\text{Land: } N_l = V_l + A = V_l + D_{ml} - D_{lm}$$

- Niederschlag Land  $N_l$
- Verdunstung Land  $V_l$
- Abfluss vom Land  $A = D_{ml} - D_{lm}$
- Wasserdampf vom Land zum Meer  $D_{lm}$
- Wasserdampf vom Meer zum Land  $D_{ml}$

**Bedingung:  $D_{ml} > D_{lm} \rightarrow A > 0$**

**Annahme:  $\Delta S = 0$  (stationäre Verhältnisse)**



# Wasserhaushaltsgleichung - Meeresflächen

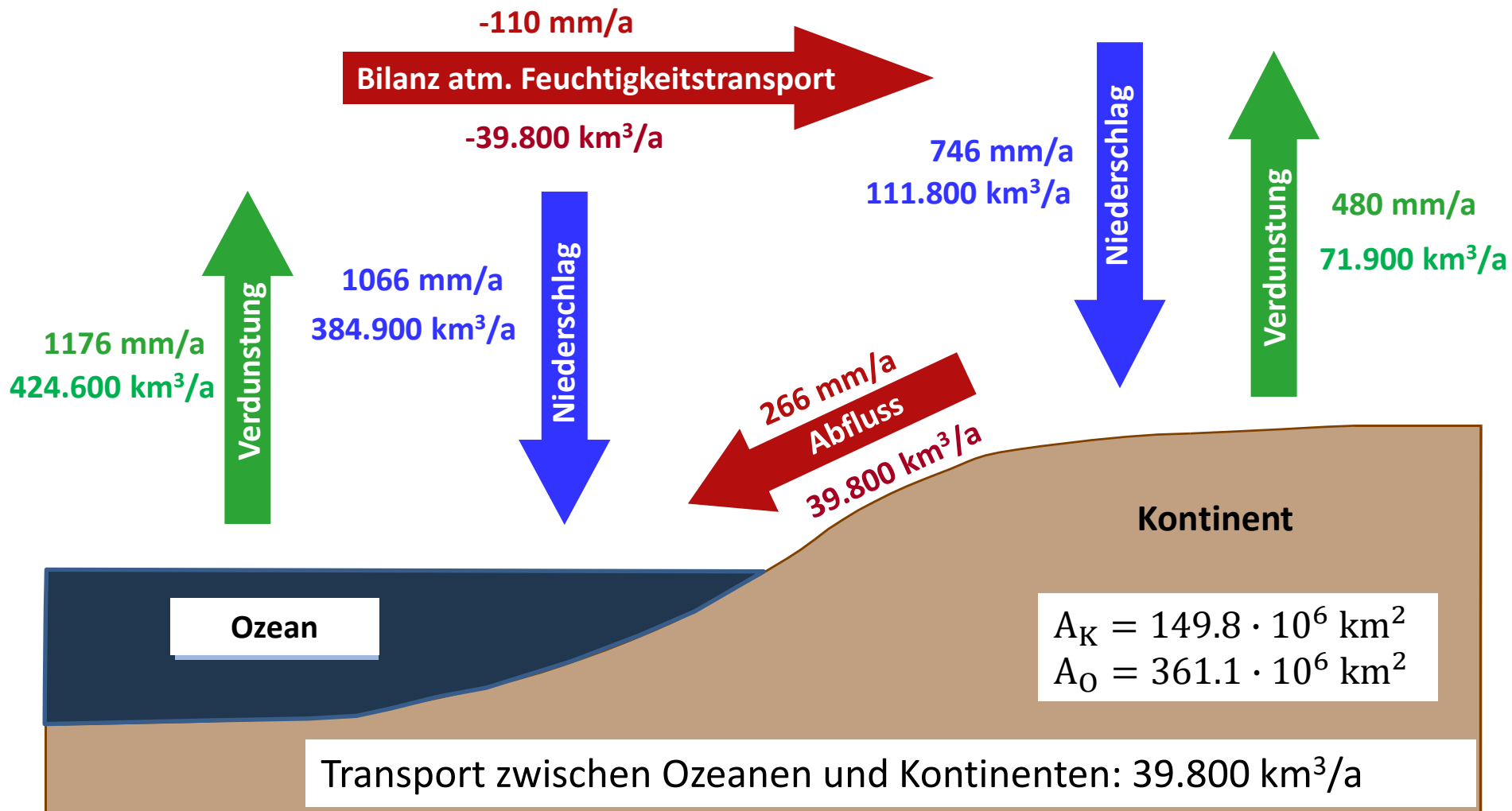
## Wasserhaushaltsbilanzen für Meeresflächen (Brückner):

$$\text{Meer: } N_m = V_m - A = V_m - D_{ml} + D_{lm}$$

- |                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| • Niederschlag Meer             | $N_m$                 |
| • Verdunstung Meer              | $V_m$                 |
| • Wasserdampf vom Meer zum Land | $D_{ml}$              |
| • Wasserdampf vom Land zum Meer | $D_{lm}$              |
| • Abfluss vom Land              | $A = D_{ml} - D_{lm}$ |

**Annahme:  $\Delta S = 0$  (stationäre Verhältnisse)**

# Globaler Wasserhaushalt: Land- und Ozeanflächen

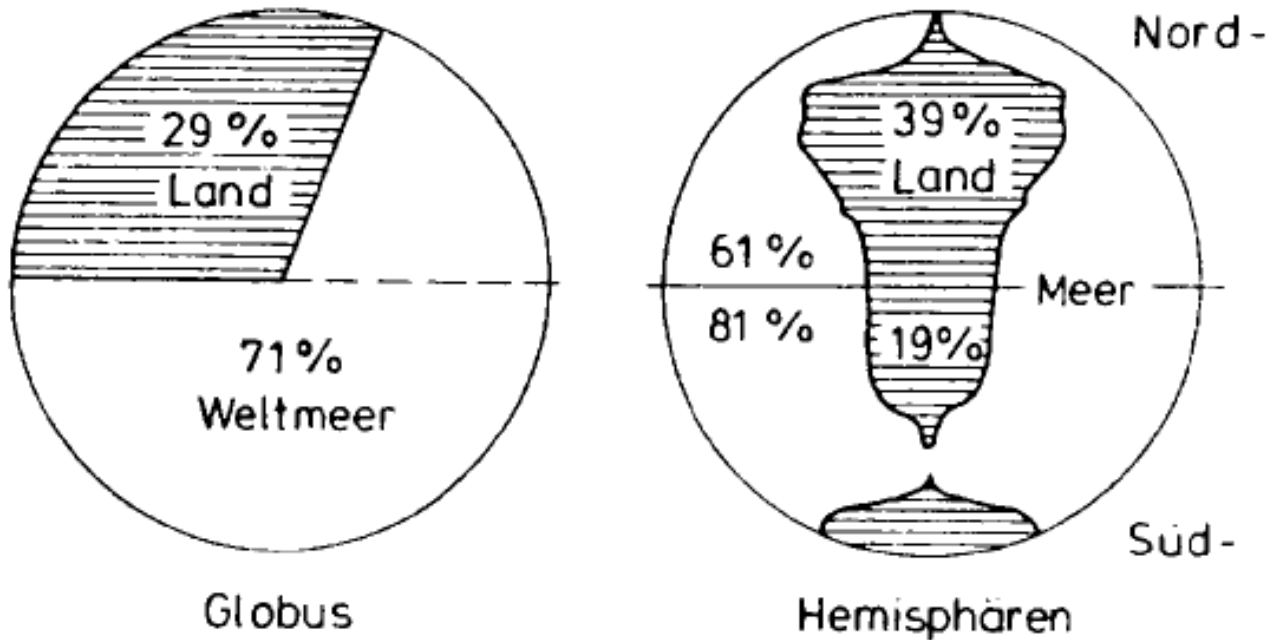


Zahlen leicht modifiziert von Baumgartner & Liebscher (1996) aus Baumgartner & Reichel (1975)

---

# 3. Wasserbilanzen der Hemisphären, Ozeane und Kontinente

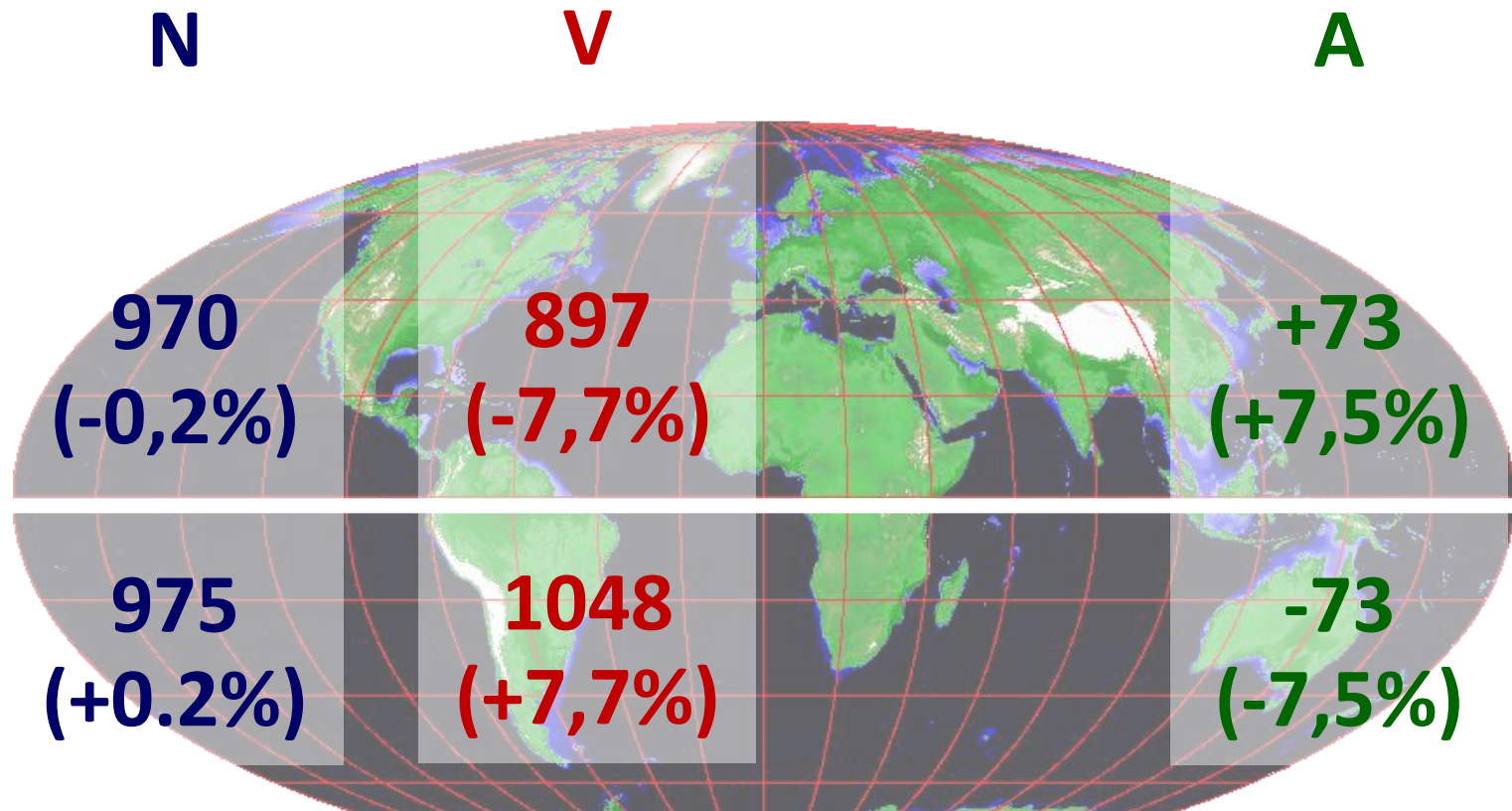
# Land- und Meerverteilung des Erdsystems



- Hemisphärische Unterschiede der Wasserbilanz im wesentlichen durch die unterschiedliche Land-Meer-Verteilung begründet
- Nordhemisphäre mit positive Bilanz, Südhemisphäre mit negativer Bilanz

# Globaler Wasserhaushalt – Hemisphären

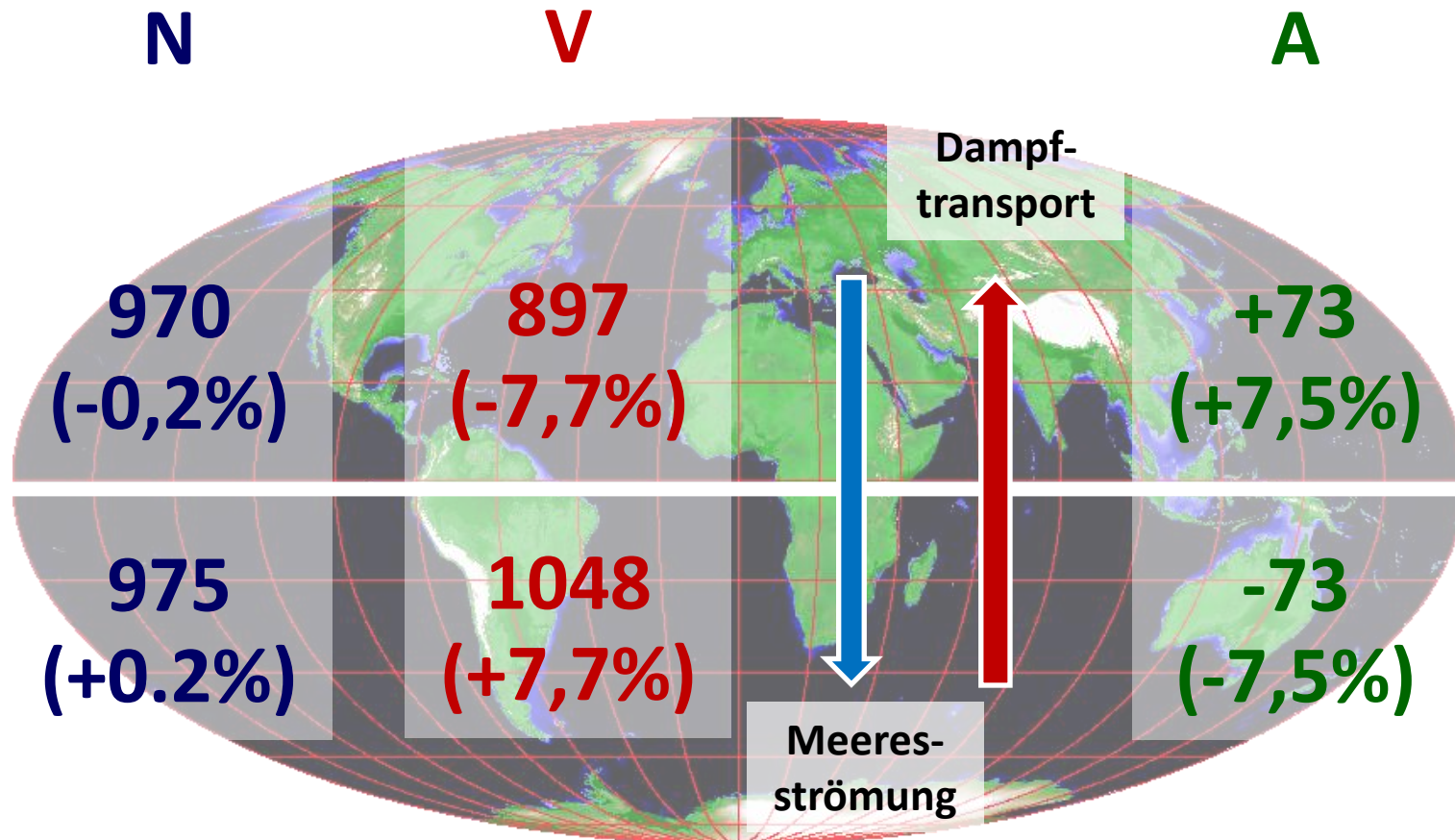
Wasserhaushaltsgleichung der Hemisphären [mm/a]:  
mit Abweichung vom Globalwert in %



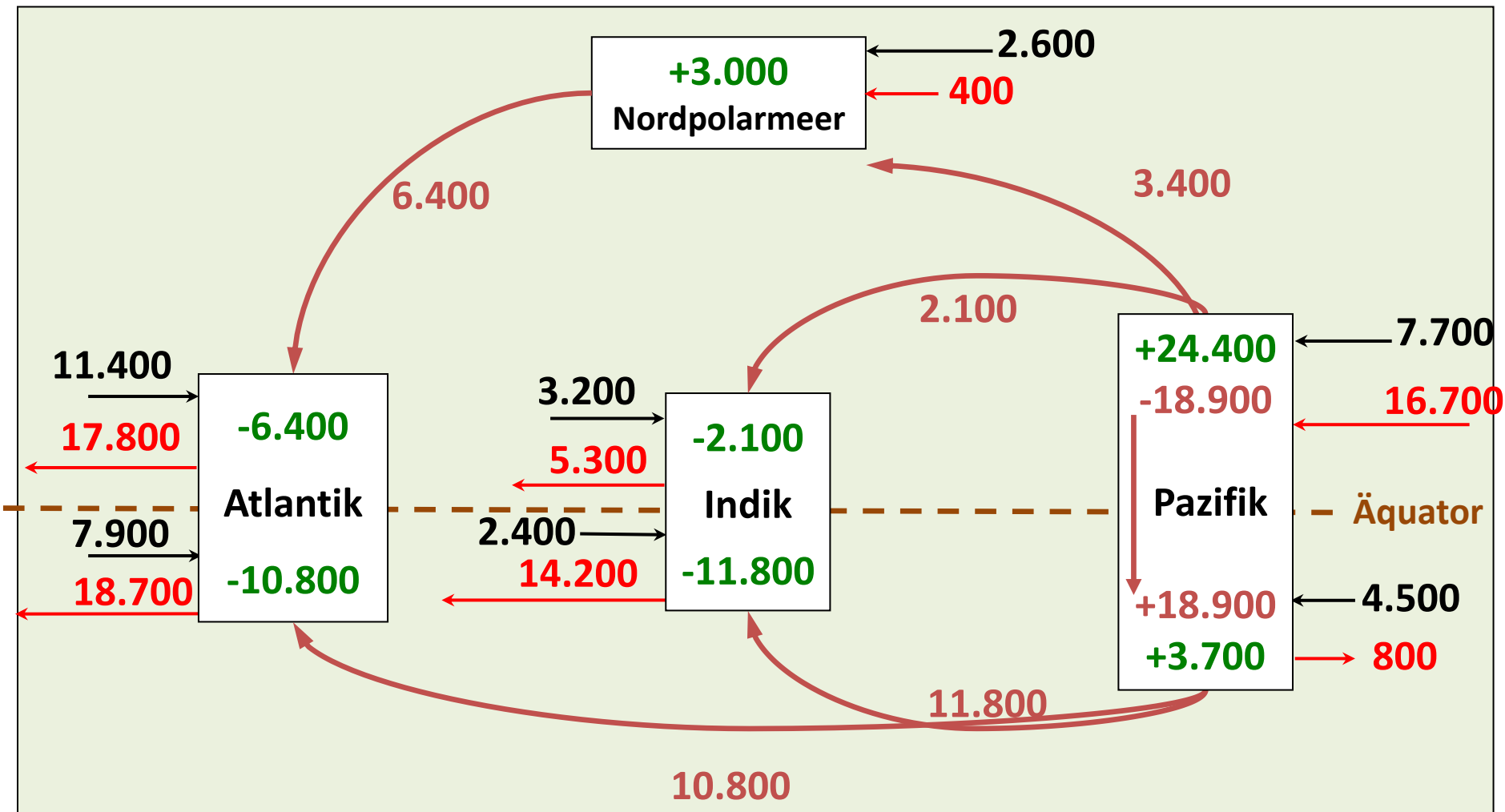
Überschuss auf der Nordhalbkugel weist auf einen Austausch zwischen den Hemisphären hin

# Globaler Wasserhaushalt – Hemisphären

Wie erfolgt der Austausch zwischen den Hemisphären?



# Hemisphärischer Transport [km<sup>3</sup>/a] - Ozeane



**Bilanz**

Baumgartner und Liebscher (1996)



**Abfluss von  
den Landflächen**



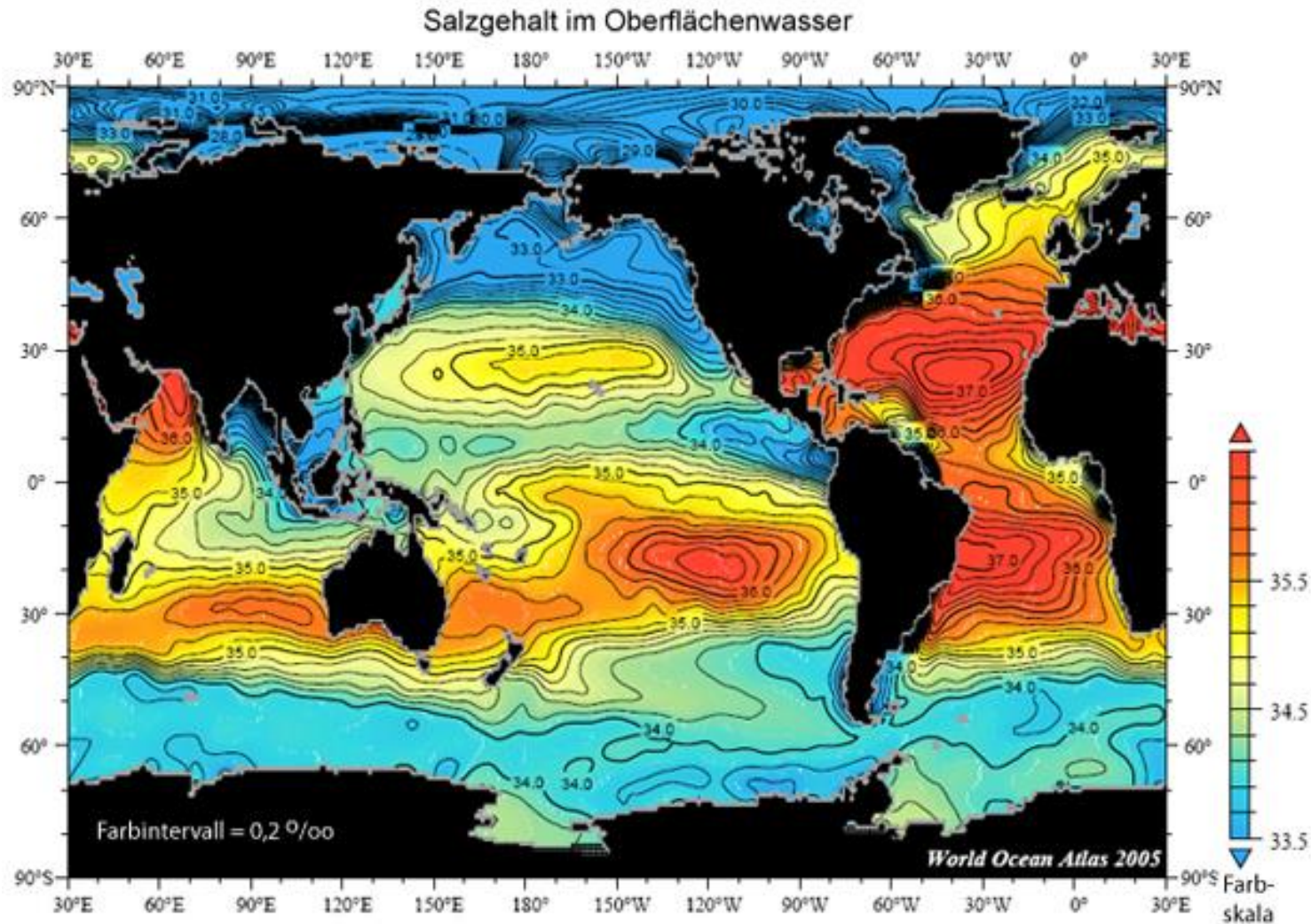
**Wasserdampfzu-  
oder -abfluss d. Ozeane**



**Wasserzu- oder -abfluss  
durch Meeresströmungen**



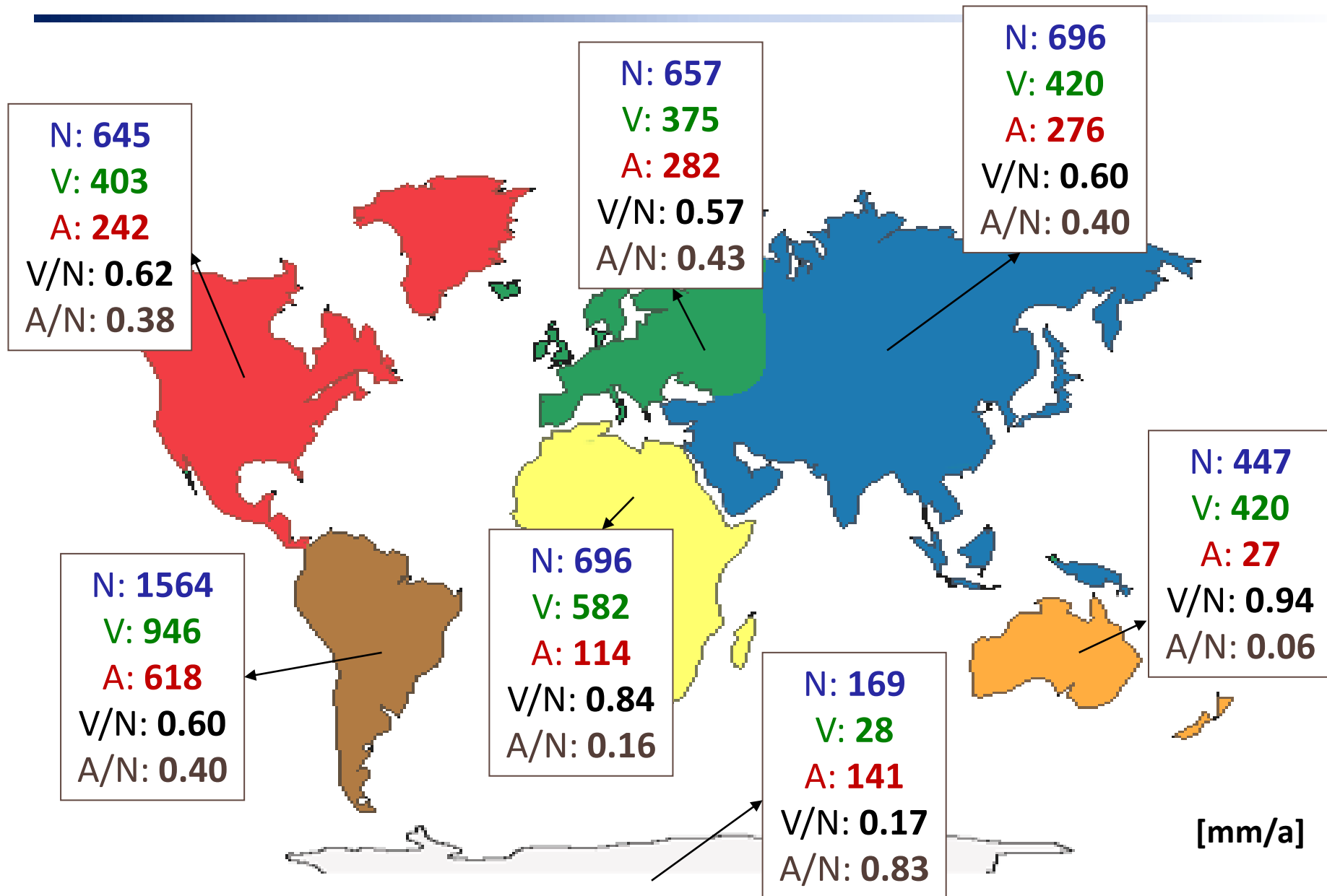
# Salzgehalt in den Ozeanen



<https://bildungsserver.hamburg.de/wasserressourcen-nav/2182190/wasserkreislauf-global/>



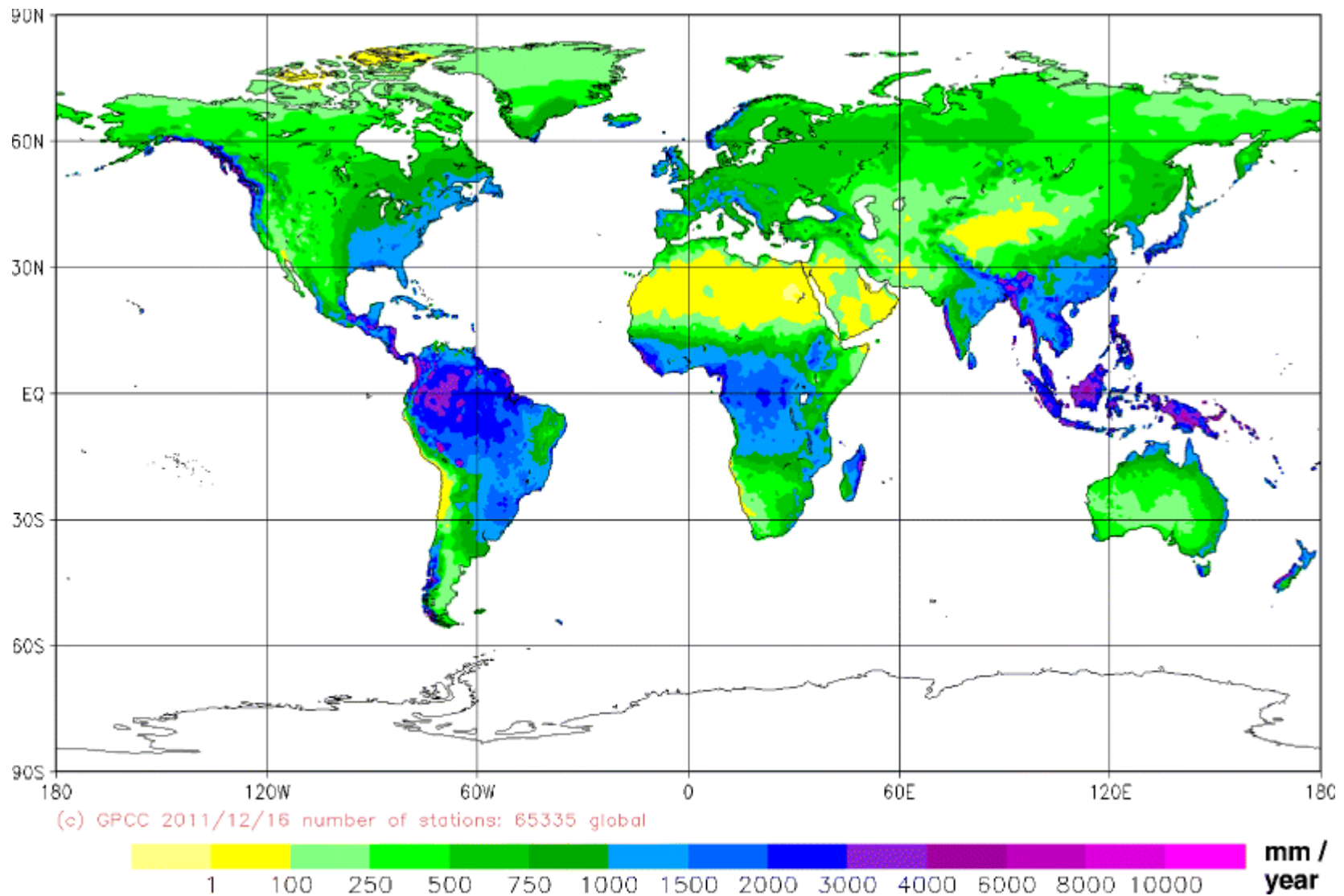
# Wasserbilanzen der Kontinente



---

## 4. Globale Verteilung des Niederschlags und der Verdunstung und deren Meridianprofile

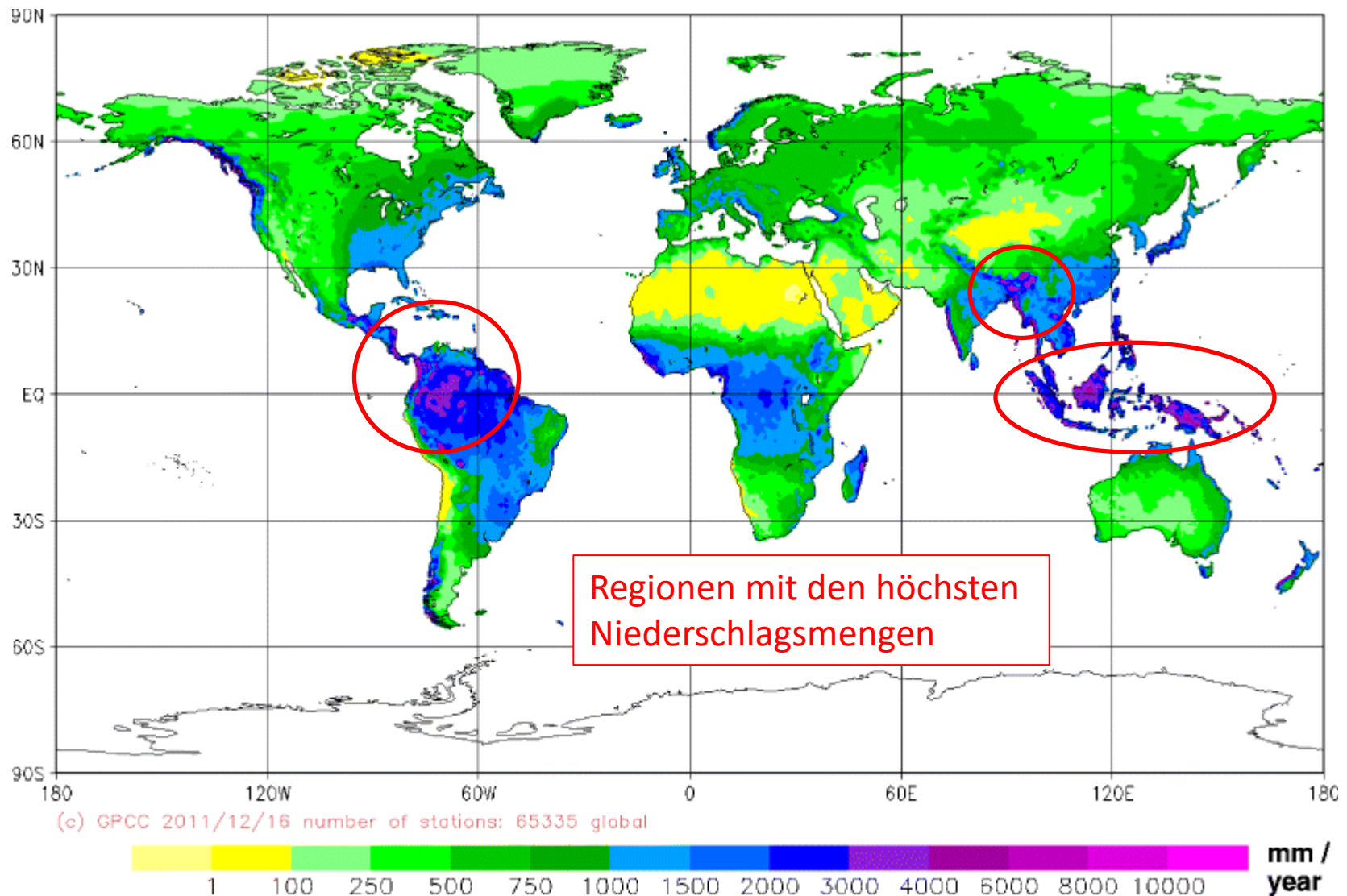
# Globaler Niederschlag für Landmassen



Globale Niederschlagsverteilung für Landmassen, 1950 – 2000  
Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)

Schneider et al. (2014)  
<https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>

# Wasser – globaler Niederschlag



Globale Niederschlagsverteilung für Landmassen, 1950 – 2000  
Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)

Schneider et al. (2014)  
<https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>

# Cherrapunji, Indien, 1.313 m

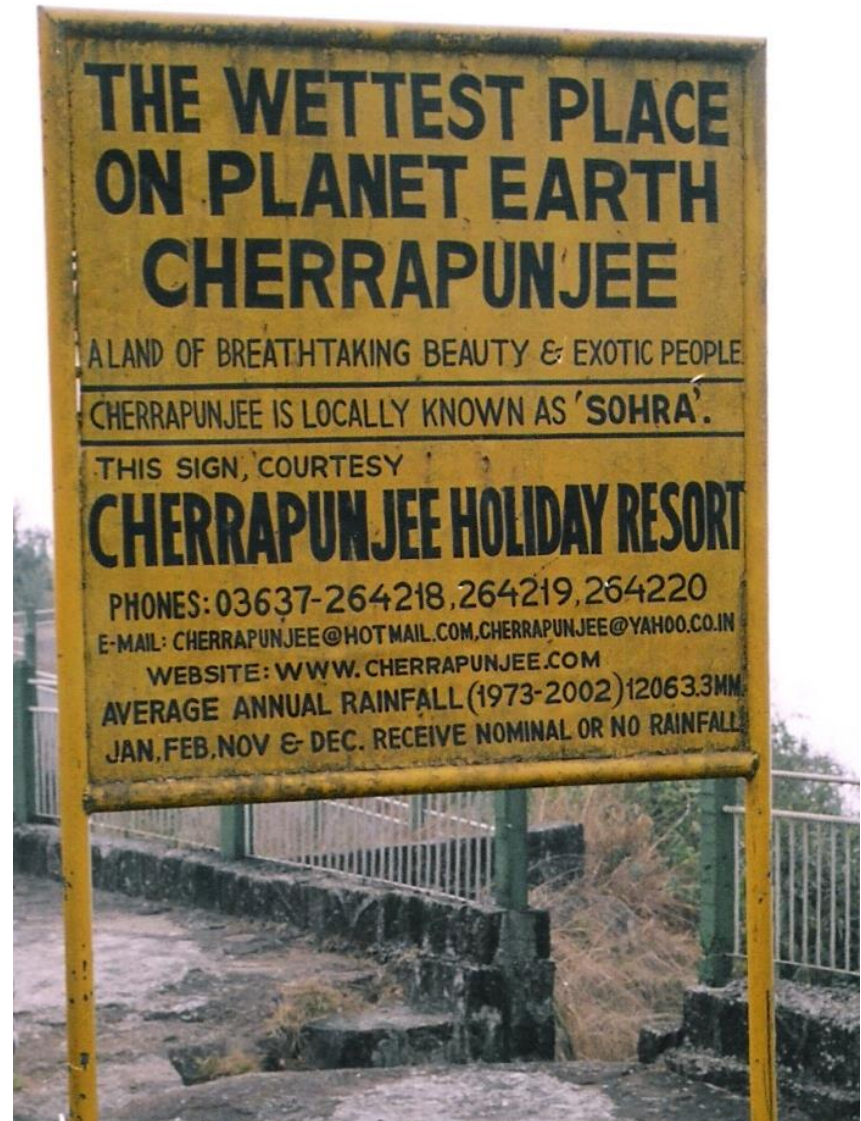
Ort mit den höchsten jährlichen Niederschlägen (Schneider et al., 2014):

im Mittel:

- 11.000 mm/a
- ca. 3.000 mm im Juni
- 4 Monate < 100 mm

1974 Rekordmonat und -jahr:

- Juli: 8.205 mm
- Jahr: 24.555 mm





# Cherrapunji, Indien

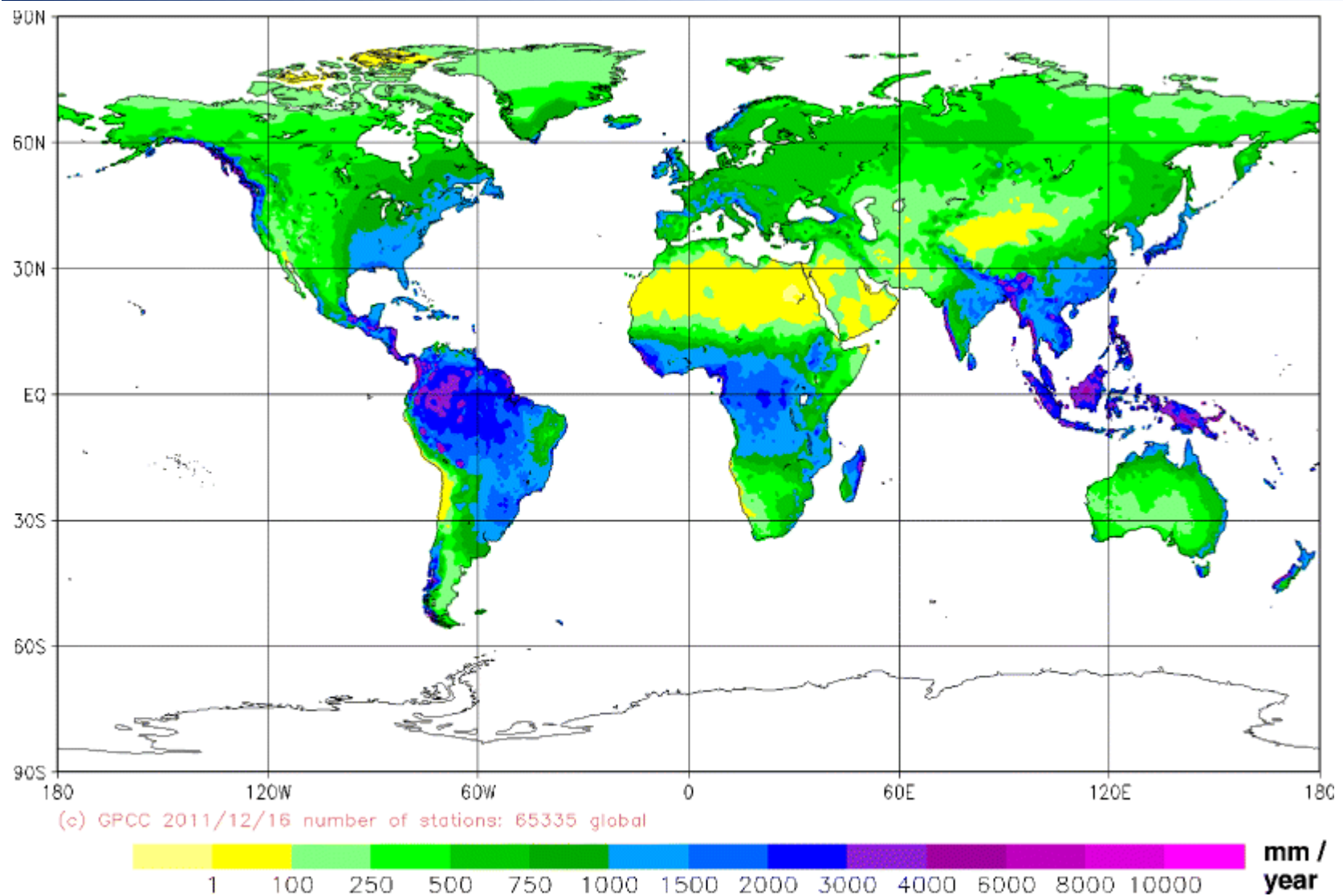
---



[https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bengladesh\\_Plains,\\_View\\_FromThangkharang\\_Cherrapunjee\\_105.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bengladesh_Plains,_View_FromThangkharang_Cherrapunjee_105.JPG)

Blick von Cherrapunji auf die Ebenen von Bangladesh

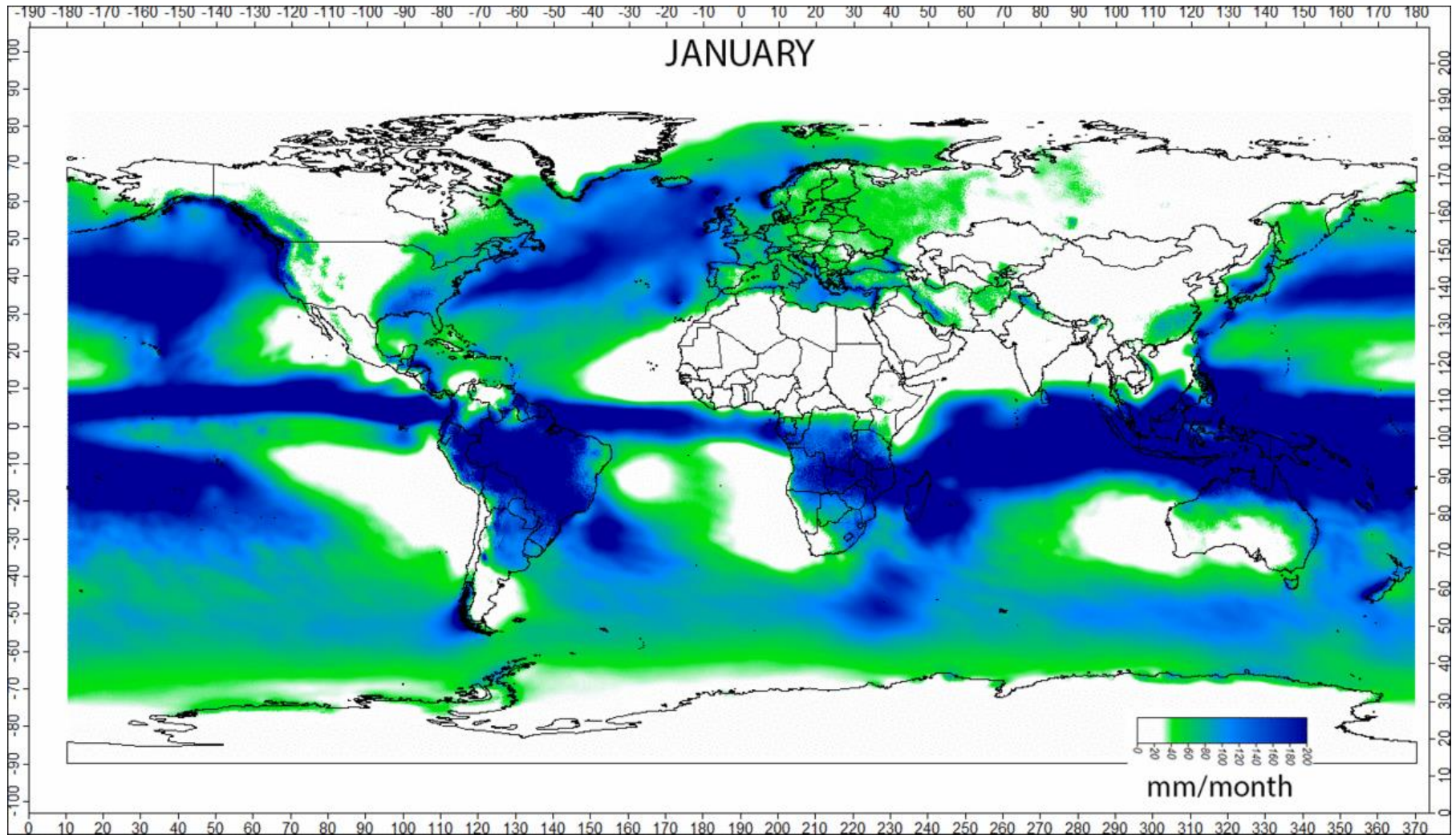
# Globaler Niederschlag für Landmassen



Globale Niederschlagsverteilung für Landmassen, 1950 – 2000  
Global Precipitation Climatology Centre (GPCC)

Schneider et al. (2014)  
<https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>

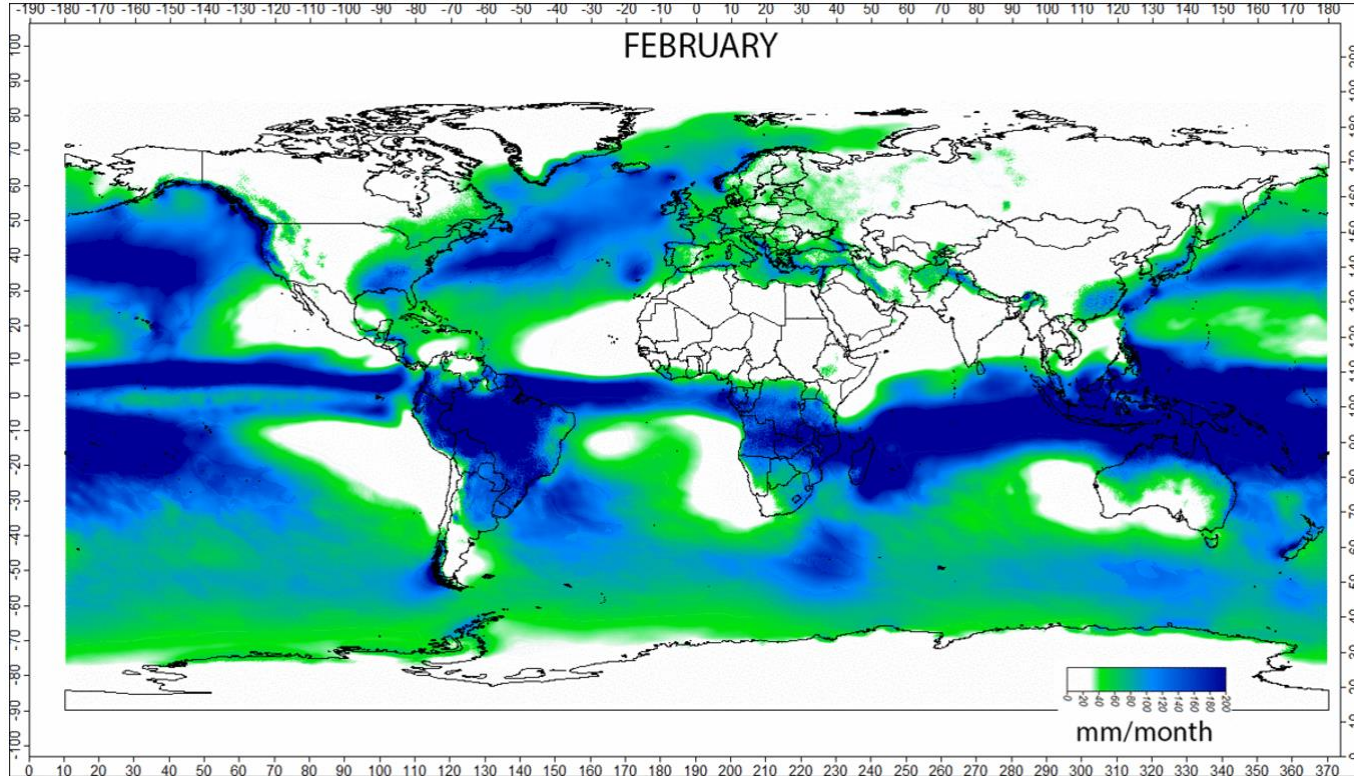
# Dynamik der globalen Niederschlagsverteilung



<https://en.wikipedia.org/wiki/Precipitation>



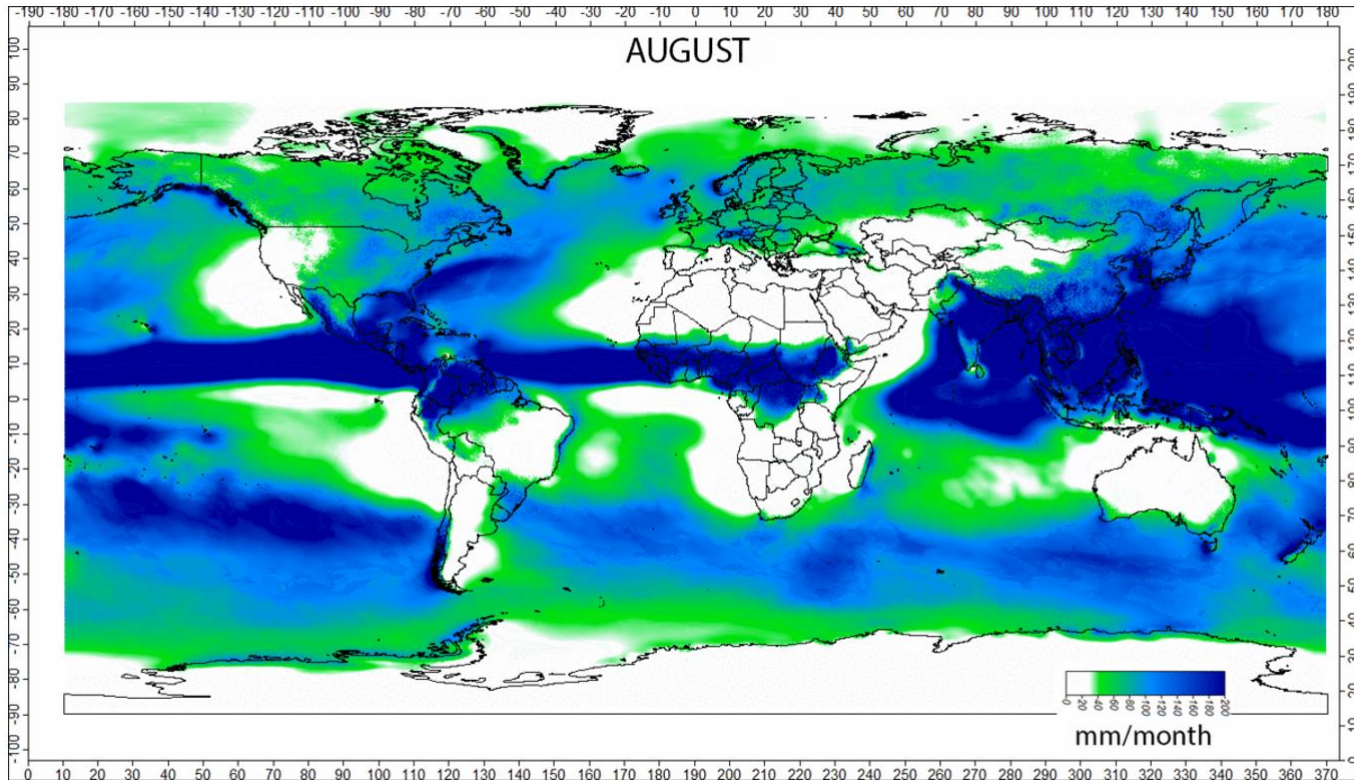
# Dynamik der globalen Niederschlagsverteilung



<https://en.wikipedia.org/wiki/Precipitation>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Precipitation>

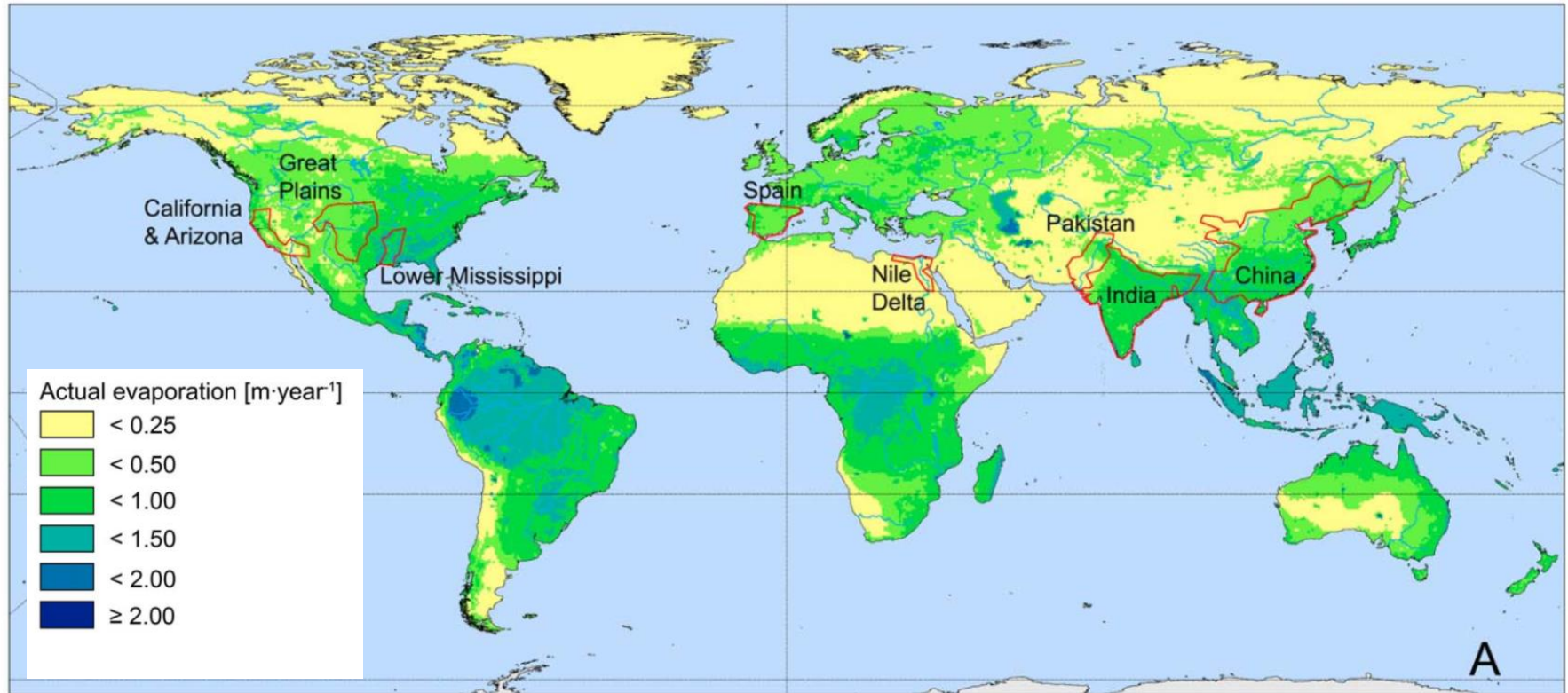
# Dynamik der globalen Niederschlagsverteilung



<https://en.wikipedia.org/wiki/Precipitation>

<https://en.wikipedia.org/wiki/Precipitation>

# Globale Verdunstung für Landmassen

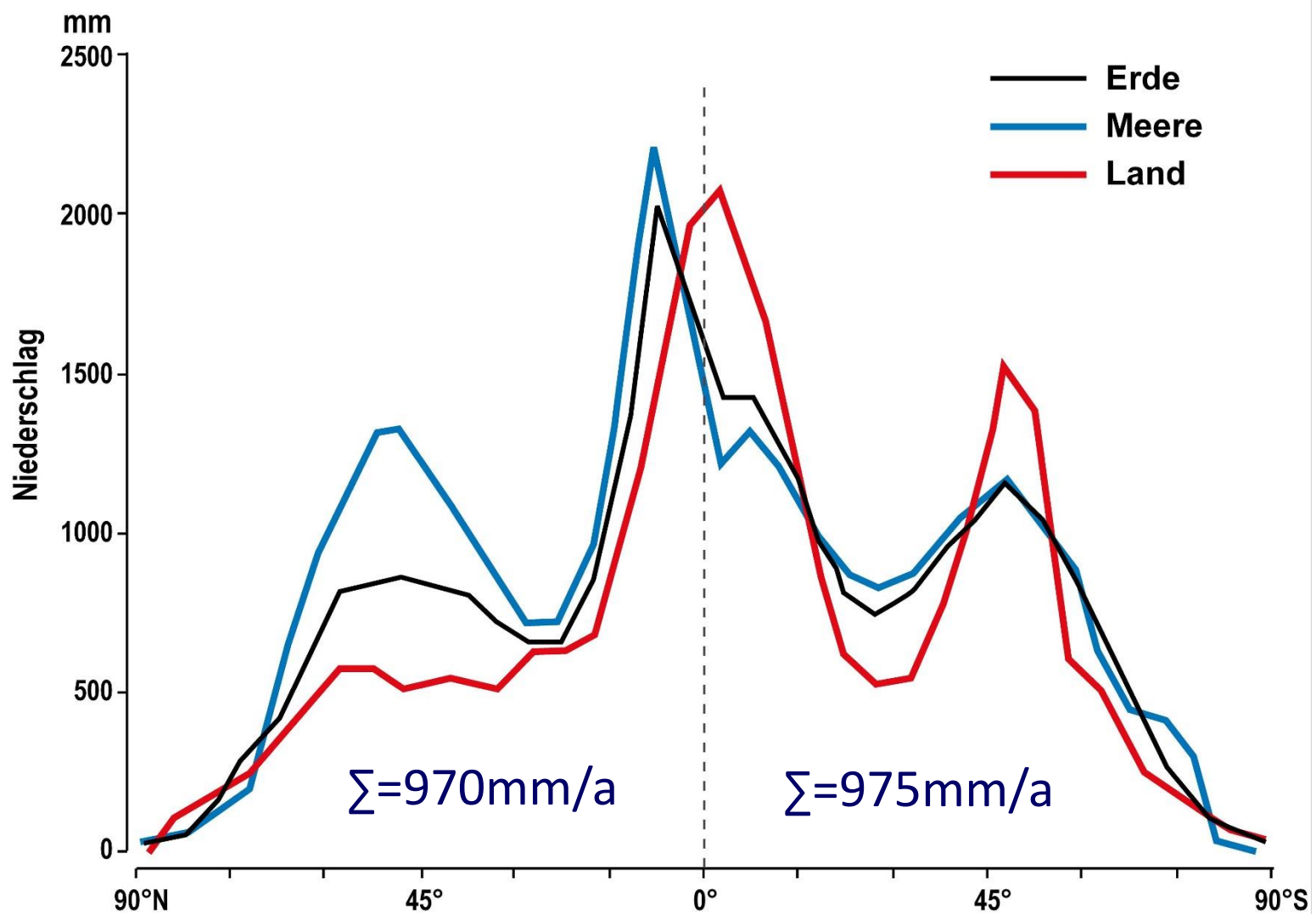


1958 – 2001

van Beek, L. P. H., Wada, Y., and Bierkens, M. F. P. ( 2011), Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability, *Water Resour. Res.*, 47, W07517, doi:[10.1029/2010WR009791](https://doi.org/10.1029/2010WR009791).

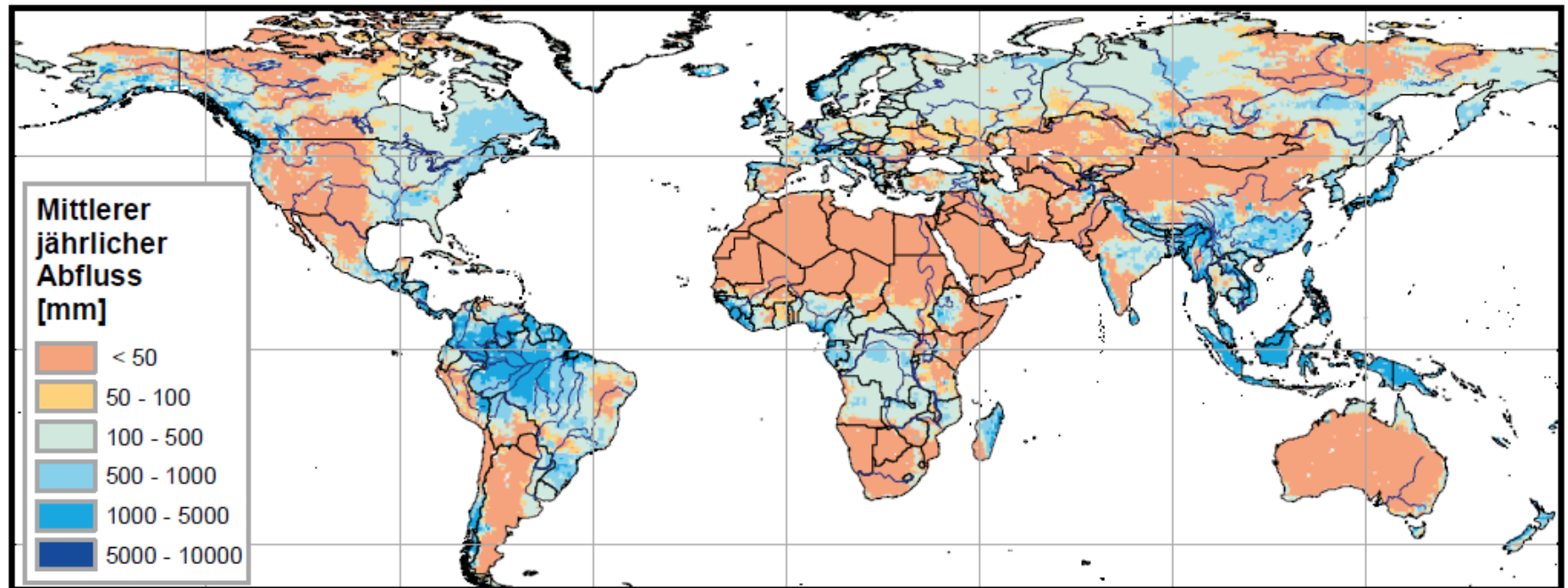


# Meridianprofil der Niederschlagshöhen



nach Baumgartner & Reichel (1975) aus Baumgartner & Liebscher (1996)

# Globale Verteilung des Abflusses



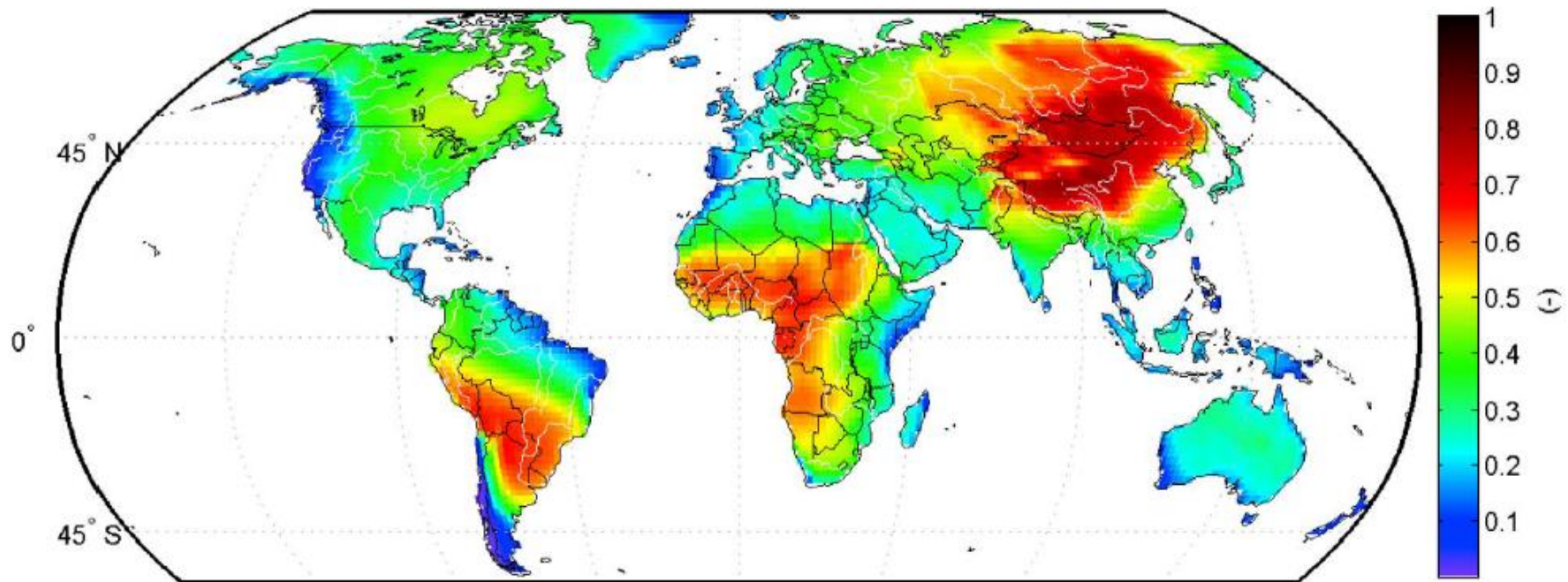
<https://bildungsserver.hamburg.de/wasserressourcen-nav/2182190/wasserkreislauf-global/>

---

## 5. Quellregionen des Niederschlags

# Kontinental gebildeter Niederschlag

Continental precipitation recycling ratio  $\rho_c$



**Figure 3.** Average continental precipitation recycling ratio  $\rho_c$  (1999–2008).

van der Ent et al. (2010)

$$P(t, x, y) = P_c(t, x, y) + P_o(t, x, y)$$

$$\rho_c(t, x, y) = \frac{P_c(t, x, y)}{P(t, x, y)}$$

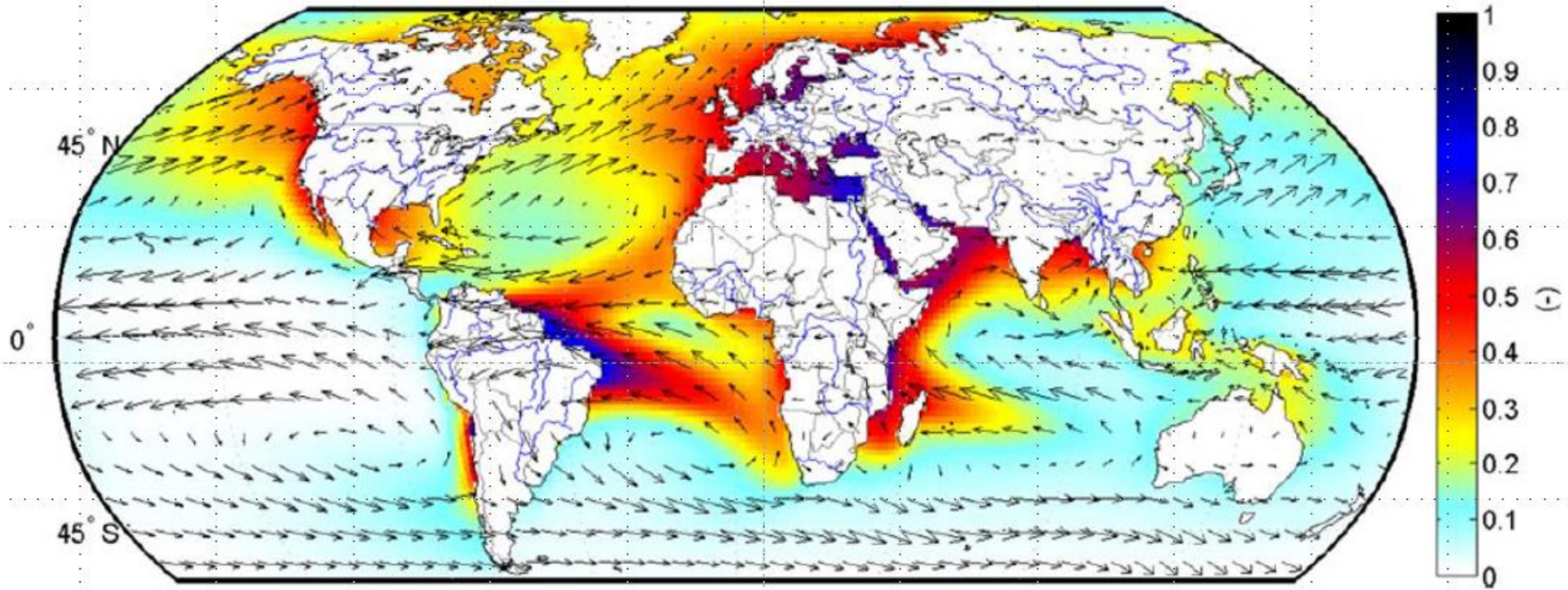
mit  $P$  = ges. Niederschlag  
 $P_c$  = auf Kontinent generierter Niederschlag  
 $P_o$  = auf Ozean generierter Niederschlag



# Ozeanische Quellregionen des kont. Niederschlags

Continental evaporation cycling ratio  $\varepsilon_c$

1990 - 2009



$$\varepsilon_c(t, x, y) = \frac{E_c(t, x, y)}{E_o(t, x, y) + E_c(t, x, y)} = \frac{E_c(t, x, y)}{E(t, x, y)}$$

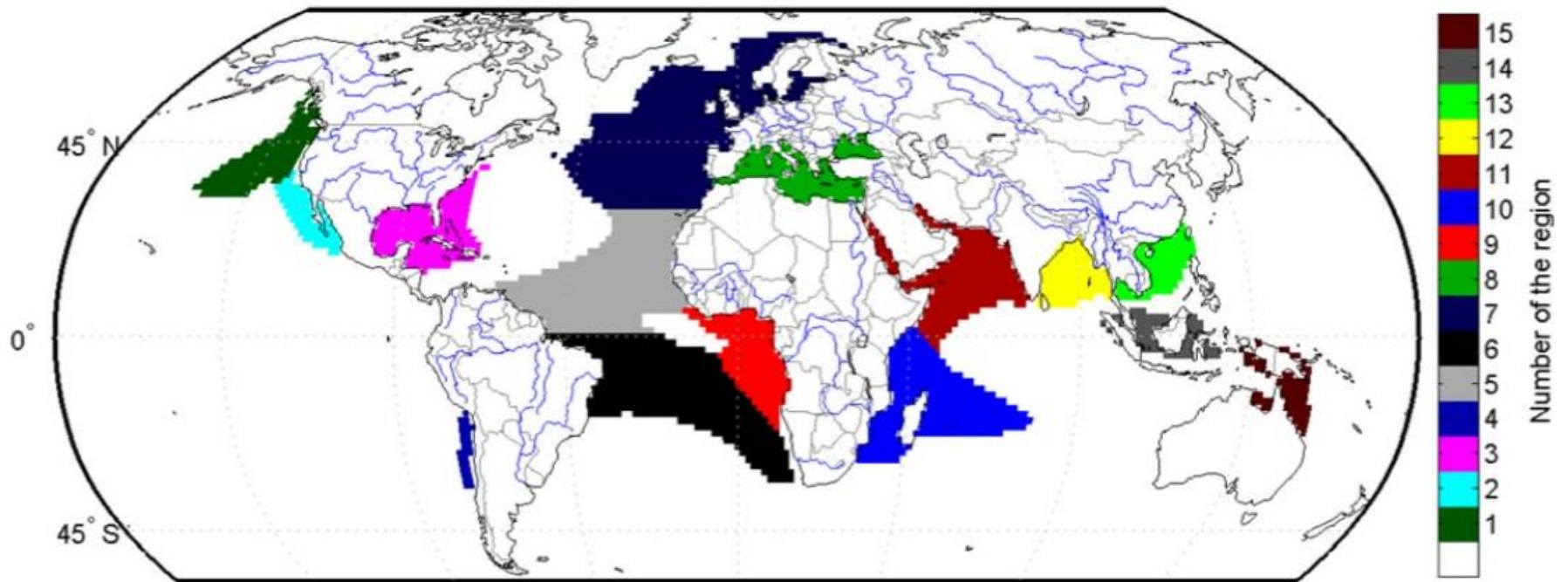
van der Ent et al. (2013)

<https://doi.org/10.1002/wrcr.20296>

mit E = gesamte Evaporation  
E<sub>c</sub> = Evaporation mit kontinentaler Senke  
E<sub>o</sub> = Evaporation mit ozeanischer Senke



# Ozeanische Quellgebiete des Niederschlags



van der Ent et al. (2013)

<https://doi.org/10.1002/wrcr.20296>

---

## 6. Aridität und Humidität

# Aridität und Humidität nach Penck

---

**Aridität** und **Humidität** nach Penck (1896):

$$A = N - V$$

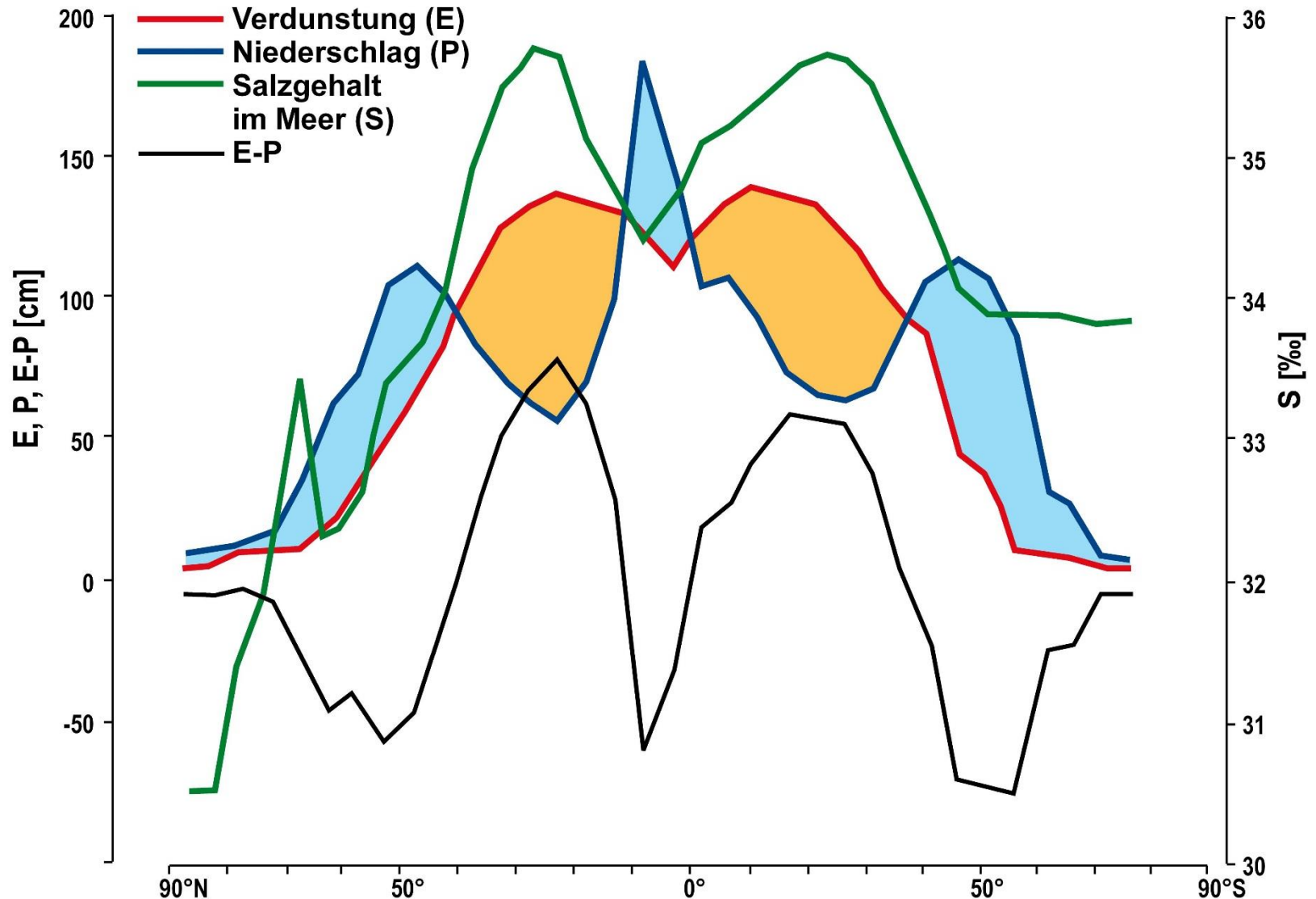
A = Abfluss [mm/a]

N = Niederschlag [mm/a]

V = Verdunstung [mm/a]

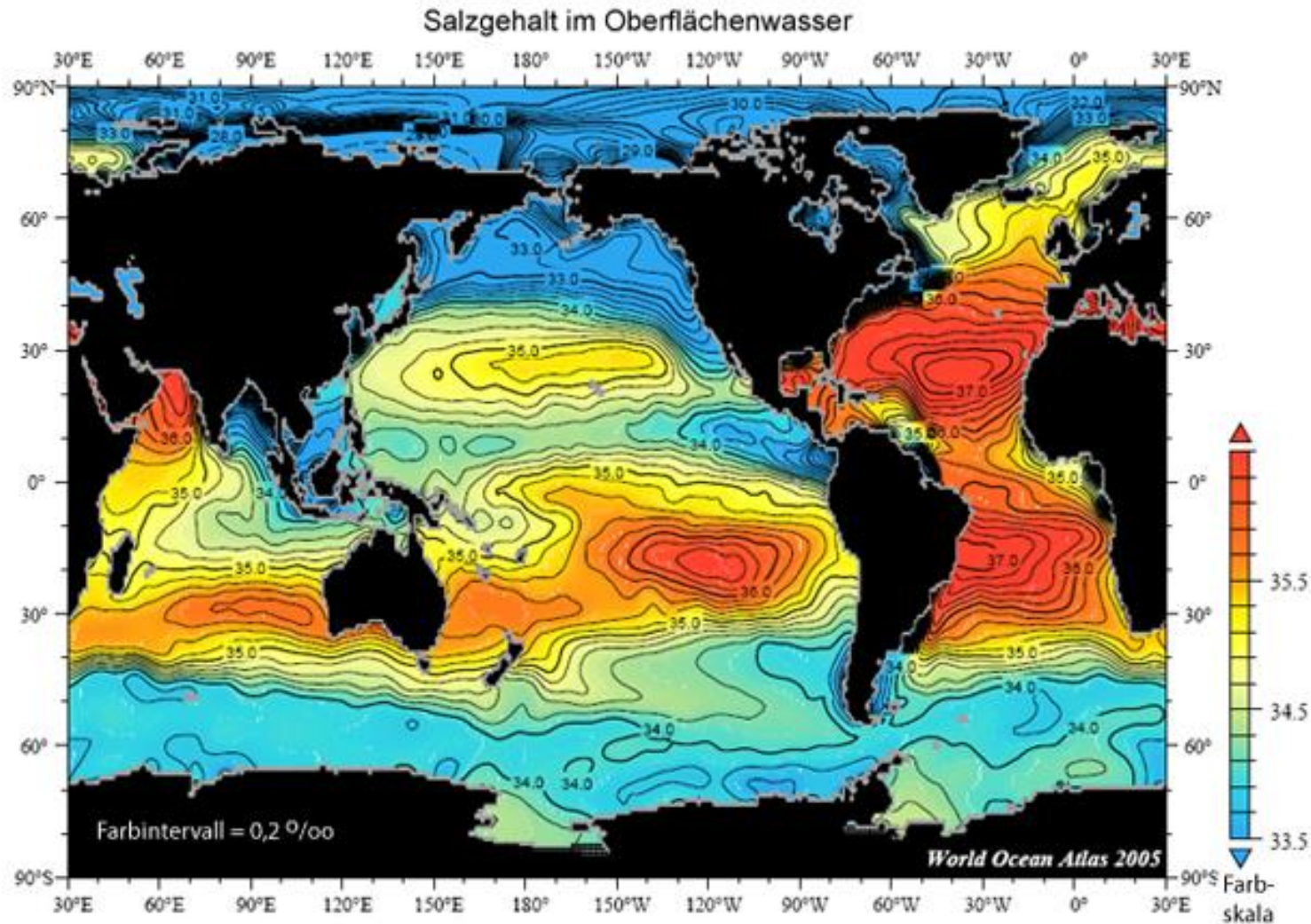
- $A > 0$ : humid
- $A < 0$ : arid
- sehr einfach, problematisch bei Vergleichen
- besser standardisierte Werte oder relativer Vergleich (N/V)

# Meridianprofil von P, E und S



Meridianprofil von P, E, S und E-P im Meer (nach Marcinek & Rosenkranz 1996)

# Globale Verdunstung für Landmassen



<https://bildungsserver.hamburg.de/wasserressourcen-nav/2182190/wasserkreislauf-global/>

# Aridität und Humidität

---

## UNEP-Ariditätsindex:

$$A = N/V$$

A = Abfluss [mm/a]

N = Niederschlag [mm/a]

V = potentielle Verdunstung [mm/a]

5 Klassen:

$A < 0.05$  : hyper-arid

$0.05 < A < 0.2$ : arid

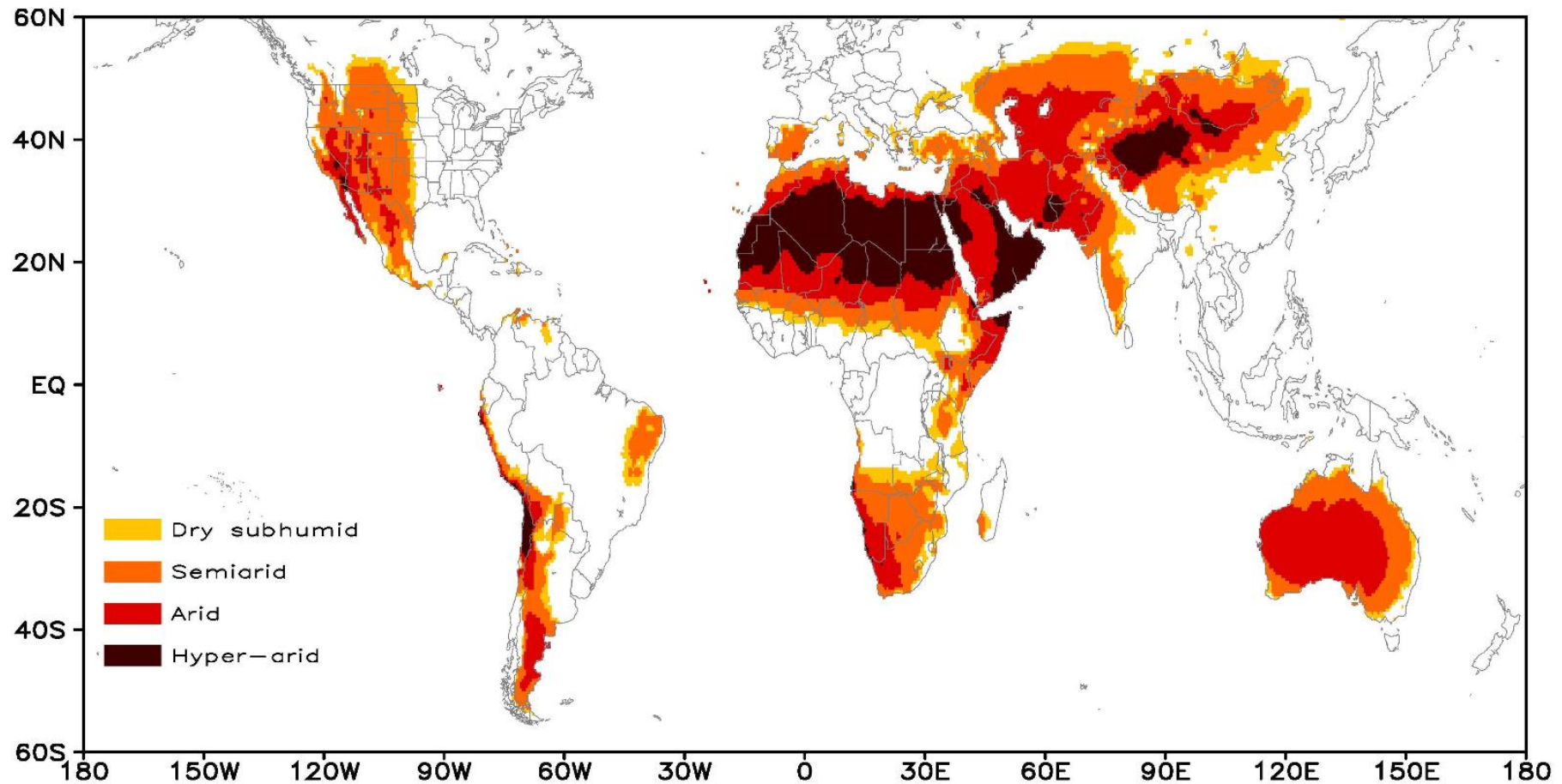
$0.2 < A < 0.5$ : semi-arid

$0.5 < A < 0.65$ : arid - subhumid

$> 0.65$  humid



# Verteilung der ariden Gebiete



Feng & Fu (2013), 1961 - 1990

<https://www.atmos-chem-phys.net/13/10081/2013/acp-13-10081-2013.pdf>

---

# 6. Methoden, Qualität und Unsicherheiten bei der Bestimmung globaler Wasserhaushaltsbilanzen



# Abschätzung weltweiter Wassermengen

---

- **Wassermengen** auf der Erde sind nur schwer abzuschätzen, Unsicherheit führen zu schwankenden Angaben:
- Mengen beruhen u.a. auf **Schätzungen** der Volumina von Teilglieder des Wasserkreislaufes, Volumen der Ozeane, Volumen der Inlandeismassen

Beispiel: siehe nachfolgende Tabelle von Marcinek (2011)

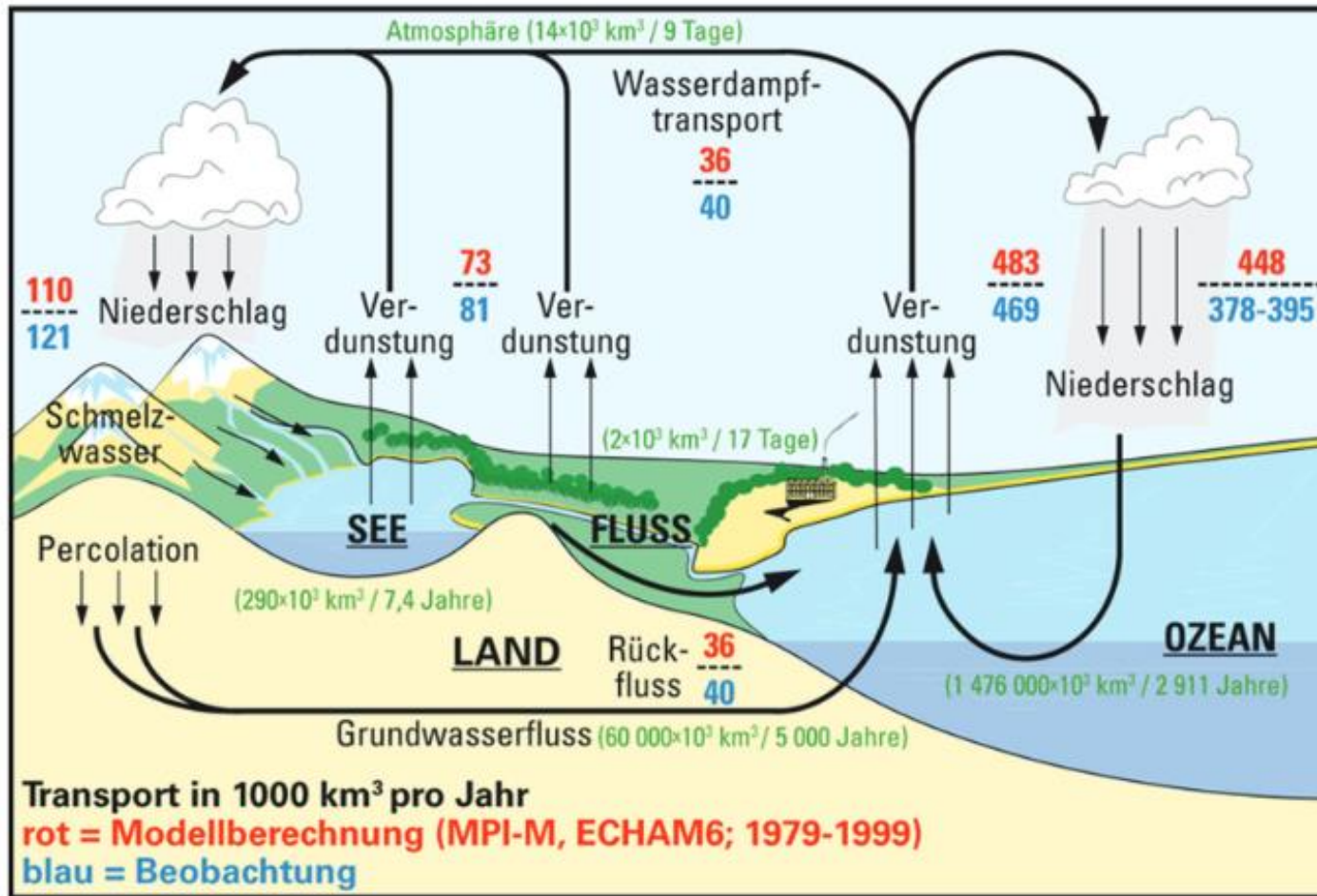
# Abschätzungen globaler Wasserhaushaltsbilanzen

		$N_L$	$V_L$	$A_L$	$V_M$	$N_M$	$N_E = V_E$
E. BRÜCKNER	1905	122	97	25	384	359	481
R. FRITZSCHE	1906	112	81	31	384	353	465
W. SCHMIDT	1915	112	81	31	273	242	354
G. WÜST	1922	112,1	75	37,1	304,2	267,1	379,2
A. A. KAMINSKIJ	1925	81	51	30	337	307	388
W. MEINARDUS	1934	99	62	37	449	412	511
W. HALBFASS	1934	100	52	48	458	410	510
G. WÜST	1936	99	62	37	334	297	396
W. WUNDT	1937	99	62	37	383	346	445
F. MÖLLER	1951	99	62	37	361	324	423
E. REICHEL	1952	100	70	30	345	315	415
M. I. BUDYKO U. A.	1956	105,1	67	38,1	407,9	369,8	474,9
M. I. BUDYKO U. A.	1963	107	61	46	450	404	511
J. MARCINEK	1966	100	63,5	36,5	411,2	374,7	474,7
M. I. L'VOVIČ	1967	108,4	71,3	37,1	448	410,9	519,3
M. I. BUDYKO U. A. (BEI DYCK 1968)	1968	107	61	46	449	403	510
M. I. L'VOVIČ	1972	113,5	71,8	41,7	-	-	-
J. MARCINEK (ERGÄNZT)	1975	100	62,5	37,5	411,2	373,7	473,7
V. I. KORZUN U. A.	1974	119	72	47	505	458	577
M. I. L'VOVIČ	1974	113,5	72,5	41	452,6	411,6	525,1
A. BAUMGARTNER U. E. REICHEL	1975	111,1	71,4	39,7	424,7	385	496,1
R. K. KLIGE (FÜR 1894–1975)	1982	119,8	69,9	50,2	507,1	457,2	$\Delta 0,3$
R. K. KLIGE U. A.(aktualisiert)	1998	119,83	69,91	50,53	507,15	457,23	577,06
M.T. CHAHINE	1992	107	71	36	434	398	505
I.A. SHIKLOMANOV	1998	119	74	45	503	458	577
T. OKI	1999	115	75	40	431	391	506
K.E. TRENBERTH et al.	2006	113	73	40	413	373	486
MITTELWERT		107	69	38	411	373	480
STANDARDABWEICHUNG		9,2	9,6	6,3	60,8	56,5	60,6
MAXIMUM		122	97	50	273	242	354
MINIMUM		81	51	25	273	242	354

Marcinek (2011):

[https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/warnsignal\\_klima\\_wasser\\_kap1\\_1.3\\_marcinek.pdf](https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/warnsignal_klima_wasser_kap1_1.3_marcinek.pdf)

# Globaler Wasserkreislauf - Klimamodell



Marcinek (2011): Wasserkreislauf und Wasserbilanz – globale Übersicht, [https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/warnsignal\\_klima\\_wasser\\_kap1\\_1.3\\_marcinek.pdf](https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/warnsignal_klima_wasser_kap1_1.3_marcinek.pdf)

aus Lozán et al. (2011): Warnsignal Klima: Genug Wasser für alle? [https://www.climate-service-center.de/products\\_and\\_publications/publications/detail/062586/index.php.de](https://www.climate-service-center.de/products_and_publications/publications/detail/062586/index.php.de)

# Weiterführende Literatur

---

- Kapitel 3 „Globaler und regionaler Wasserkreislauf“ in Fohrer et al. (2016)
- Kapitel 5 „Die Hydrosphäre der Erde: Wasservorkommen und Wasserumsätze“ in Baumgartner & Liebscher (1996)

# Literaturverzeichnis

---

- **Baumgartner und Liebscher, 1996, Lehrbuch der Hydrologie, Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin**
- Leycuer, 2013, Water on Earth, Physicochemical and Biological Properties, Wiley
- **Wilhelm, 1997, Hydrogeographie. Das Geographische Seminar, Westermann, Braunschweig**
- Schneider, Becker, Finger, Meyer-Christoffer, Ziese & Rudolf, 2014, GPCC's new land surface precipitation climatology based on quality-controlled in situ data and its role in quantifying the global water cycle; <https://doi.org/10.1007/s00704-013-0860-x>
- **Fohrer, N., Bormann, H., Miegel, K., & Casper, M. (Eds.). (2016). *Hydrologie* (Vol. 4513). UTB.**
- Van der Ent & Savenije, 2013, Oceanic sources of continental precipitation and the correlation with sea surface temperature; <https://doi.org/10.1002/wrcr.20296>
- Van der Ent et al., 2010, Origin and fate of atmospheric moisture over continents; <https://doi.org/10.1029/2010WR009127>
- van Beek, Wada & Bierkens, 2011, Global monthly water stress: 1. Water balance and water availability; <https://doi.org/10.1029/2010WR009791>
- Feng & Fu, 2013, Expansion of global drylands under a warming climate; <https://www.atmos-chem-phys.net/13/10081/2013/acp-13-10081-2013.pdf>

# Literaturverzeichnis

---

- Wang & Dickinson, 2012, A review of global terrestrial evapotranspiration: Observation, modeling, climatology, and climatic variability; <https://doi.org/10.1029/2011RG000373>
- Marcinek & Rosenkranz, 1996, Das Wasser der Erde, 2. Auflage, Justus Perthes Verlag Gotha
- **Marcinek, 2011, Wasserkreislauf und Wasserbilanz – globale Übersicht; [https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/warnsignal\\_klima\\_wasser\\_kap1\\_1.3\\_marcinek.pdf](https://www.climate-service-center.de/imperia/md/content/csc/warnsignalklima/warnsignal_klima_wasser_kap1_1.3_marcinek.pdf)**
- Baumgartner & Reichel, 1975, Die Weltwasserbilanz, Oldenbourg, München
- WBGU, 2006, [https://www.wbgu.de/fileadmin/user\\_upload/wbgu/publikationen/sondergutachten/sg2006/pdf/wbgu\\_sn2006.pdf](https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/sondergutachten/sg2006/pdf/wbgu_sn2006.pdf)
- Bryden & Imawaki, 2001, Chapter 6.1 Ocean heat transport, Elsevier Science & Technology
- Darling et al., 2006, Isotopes in Palaeoenvironmental Research, Isotopes in water, Springer, Dordrecht, The Netherlands; DOI: 10.1007/1-4020-2504-1\_01
- Korzun, 1978, World water balance and water resources of the earth, Studies and reports in Hydrology, Paris (UNESCO)