

# Grundsätzliche Beschreibung des Wasserkreislaufs

Fortbildungstag der DMG Sektion München 16.11.2018



DMG

Deutsche Meteorologische Gesellschaft

Malte Neuper, Dipl.-Met; Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Fachbereich Hydrologie



# Wasser ist speziell



*„Dat Wasser vun Kölle es jot“ Bläck Föös, 1987*

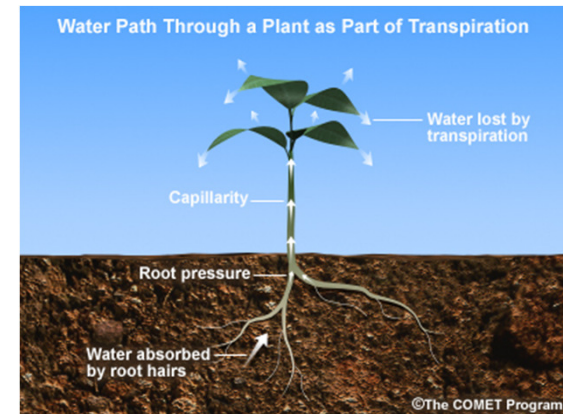
→ **Nit nur vun Kölle, natürlich, denn:**

## Wasser ist speziell

- Übergang zwischen 3 Aggregatzuständen in terrestrischen Temperaturbereichen
- Löslichkeit (und Transport) von Stoffen
- Verdampfungs- und Kondensationswärme 2257 kJ/kg Wasser (bei 100 °C)  
→ effektiver Energietransport
- Zum Vergleich: Grundumsatz Mensch ca. 8995 kJ/d → ~4kg Wasser verdampfen

# Wasser ist speziell

- Benetzendes Fluid: Dringt in luftgesättigten Boden ein → Wasserspeicherung im Porenraum des Bodens → Pflanzenwachstum



- Dichteanomalie (größte Dichte bei + 3,98 °C):  
→ Thermische Schichtung Überleben am Seeboden



Quelle: Joe Mastroianni,  
National Science  
Foundation  
- gemeinfrei

- Alles Leben baut auf Wasser auf

# Wasser ist speziell

- Erosionsmittel – fluviale Landschaften & Strukturen auf allen Skalen

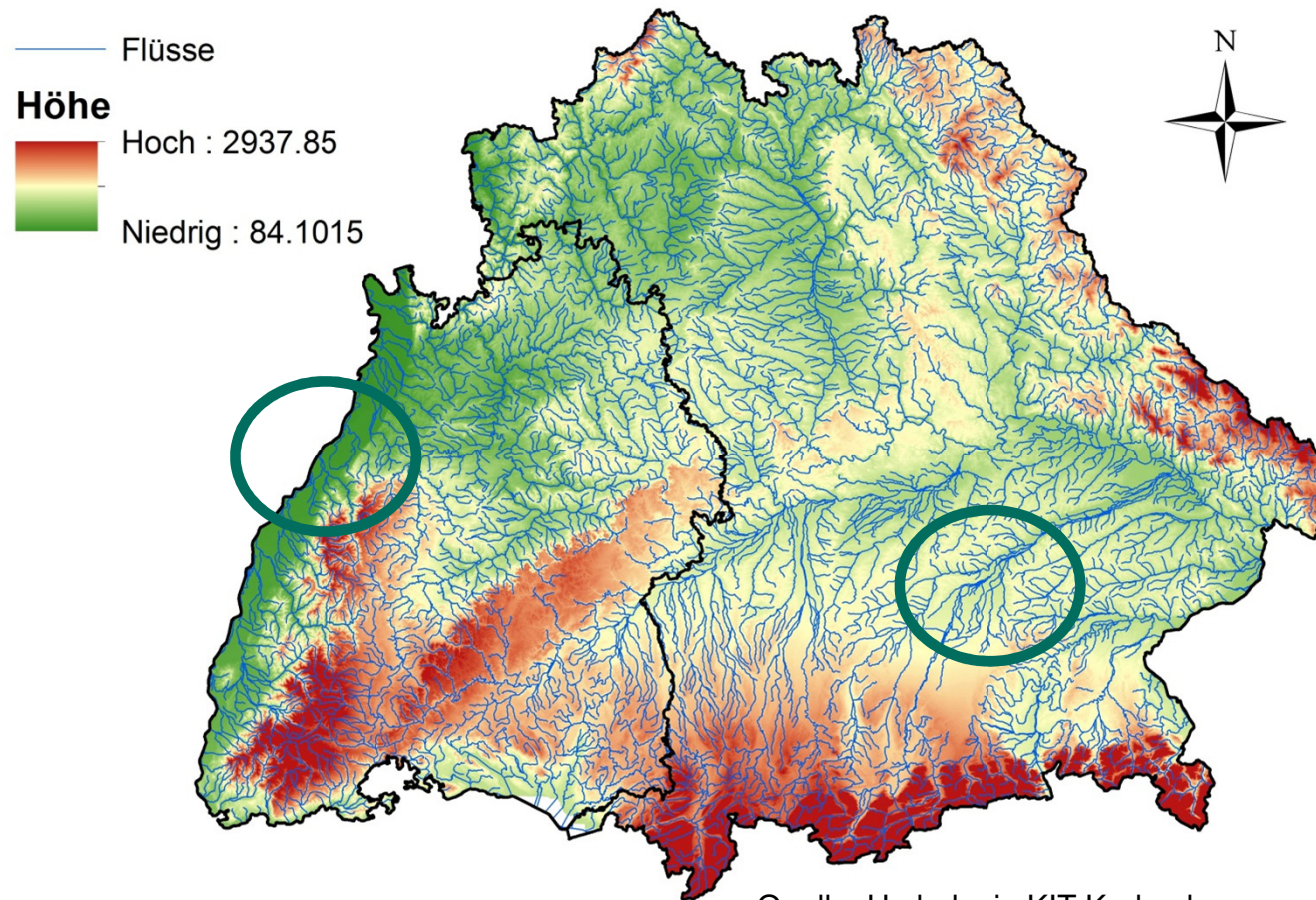


Quelle: Hydrologie KIT Karlsruhe



# Wasser ist speziell

- Erosionsmittel – fluviale Landschaften & Strukturen auf allen Skalen



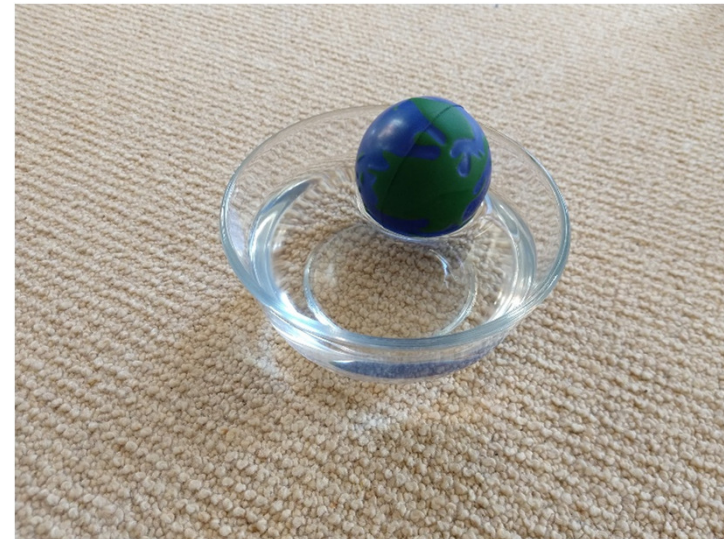
# Roadmap

- 👉 kurzer **historischer Abriss**
- 👉 Die Welt der Bilanzen → **Übersicht über den Wasserkreislauf**
- 👉 Geschlossene Gesellschaft? - Lücken im Wasserkreislauf? →  
Randeffekte
- 👉 Die verschiedenen Äste / Komponenten des Wasserkreislaufs und  
deren Messung
  - 👉 Unter uns: **Der atmosphärische Ast** (sehr kurz), bzw. eher QPE
  - 👉 Über den Tellerrand hinaus: **Wasser am und im Boden**
- 👉 **Die Welt der Flüsse – bevorzugtes Fließen**

# Historische Entwicklung der Wasserkreislauf-Idee

## - „panta rhei“ – alles fließt

- Schwimmende Landmasse: Festland schwimmt auf Wasserkörper und das Wasser der Flüsse hat seinen Ursprung unter der Erde (vertreten durch Thales 624 – 548 v. Chr., Hippon um 600 v. Chr. und Platon 428 – 347 v. Chr. , bzw. Hinweise bei Homer, ca. 800 v. Chr)



- Aber die Beobachtungen widersprachen dieser Theorie. Obwohl die Flüsse ihr Wasser ins Meer verfrachteten, wurde das Meer nie ‚voll‘



# Geschichte des Wasserkreislaufs

## - „panta rhei“ – alles fließt

→ meteorogener Wasserkreislauf:

Erste schriftl. Überlieferungen in dem Tanach  
(„Hebräische Bibel“, deren Bücher vom Christentum  
übernommen und etwas anderer Anordnung als *Altes*  
*Testament* kanonisiert wurden):

*„Der Wind weht nach Süden und dreht sich nach Norden; es  
wirbelt ständig umher, und der Wind kehrt nach seinen  
Kreisläufen wieder zurück. Alle Flüsse münden ins Meer, doch  
das Meer ist nicht voll; dahin, woher die Flüsse kommen, dorthin  
kehren sie wieder zurück“*

Datierung nicht eindeutig, ~zwischen 963 bis 922 v. Chr. – Zeit von König  
Salomon

Neben der Beobachtung - *wenn die Wolken voll sind, sie Regen zur Erde  
entleeren* - : im Buch des Propheten Amos (793-740 v. Chr.):  
*Wasser kommt vom Meer und ergießt sich über die Erde*

# Geschichte des Wasserkreislaufs

## - „panta rhei“ – alles fließt

- Im Buch Hiob (7. bis 2. Jhdt. v. Chr.) findet sich auch eine Beschreibung des Regens im Wasserkreislauf: Hiob 36:27,28;

*„Er macht das Wasser zu kleinen Tropfen und treibt seine Wolken zusammen zum Regen, dass die Wolken fließen und triefen sehr auf die Menschen“;*



Bild: wikipedia.org

# Geschichte des Wasserkreislaufs

## - „panta rhei“ – alles fließt

- In anderen Religionen / Kulturkreisen ebenso frühe Beschreibungen und Darstellungen des Wasserkreislaufs:
- Hinduismus im Epos **Adityahridayam** (einer Opfer-Hymne zu Ehren des Sonnengottes): *“die das Wasser aufheizt und es als Regen herunter schickt“* (4. Jhdt. v. Chr.)
- Im indianischen Kulturkreis:  
Regengott als zusammengerollte Schlange (Kreisförmig) mit Peyote Kaktus Samen (Schnapskopfkaktus) der Energie von der Erde emittiert.
- Chinesische Gelehrte **Chi Ni Tzu** und **Lu Shih Ch'un Ch'iu** (300 v. Chr) (unabhängig auch griechische Gelehrte):  
Das meiste Wasser der Flüsse hat seinen Ursprung im Regen – Allerdings Anteil entstammt noch als Aufstiegswasser dem Erdinneren.



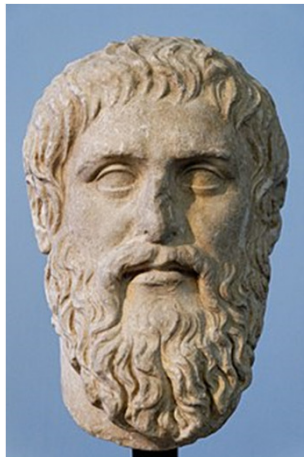
# Geschichte des Wasserkreislaufs

## - „panta rhei“ – alles fließt

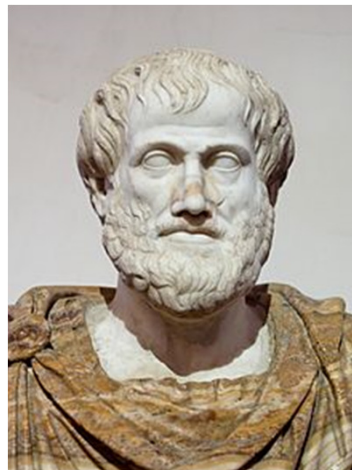
- Gedanken des geschlossenen Wasserkreislaufs erstmals von Anaxagoras (499 – 427 v. Chr) und Diogenes von Apollonia (499 – 427 v. Chr) verfasst.
- Von Plato (424-348 v. Chr.) und Aristoteles (384-322 v. Chr) Einbeziehung der Versickerung



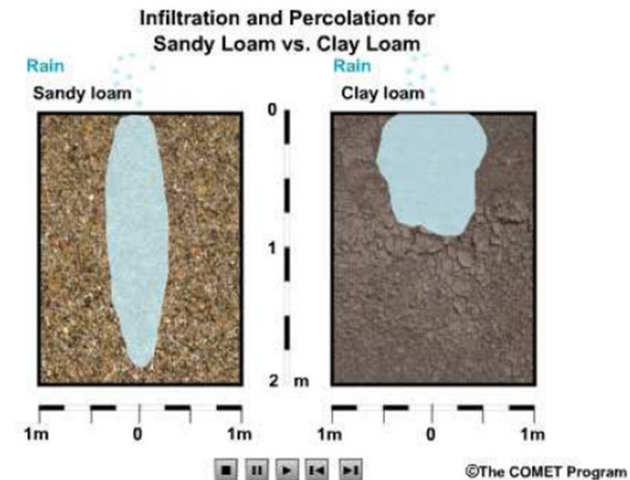
Anaxagoras  
Quelle: wikipedia.org



Plato  
Quelle: wikipedia.org



Aristoteles  
Quelle: wikipedia.org



# Geschichte des Wasserkreislaufs

## - „panta rhei“ – alles fließt

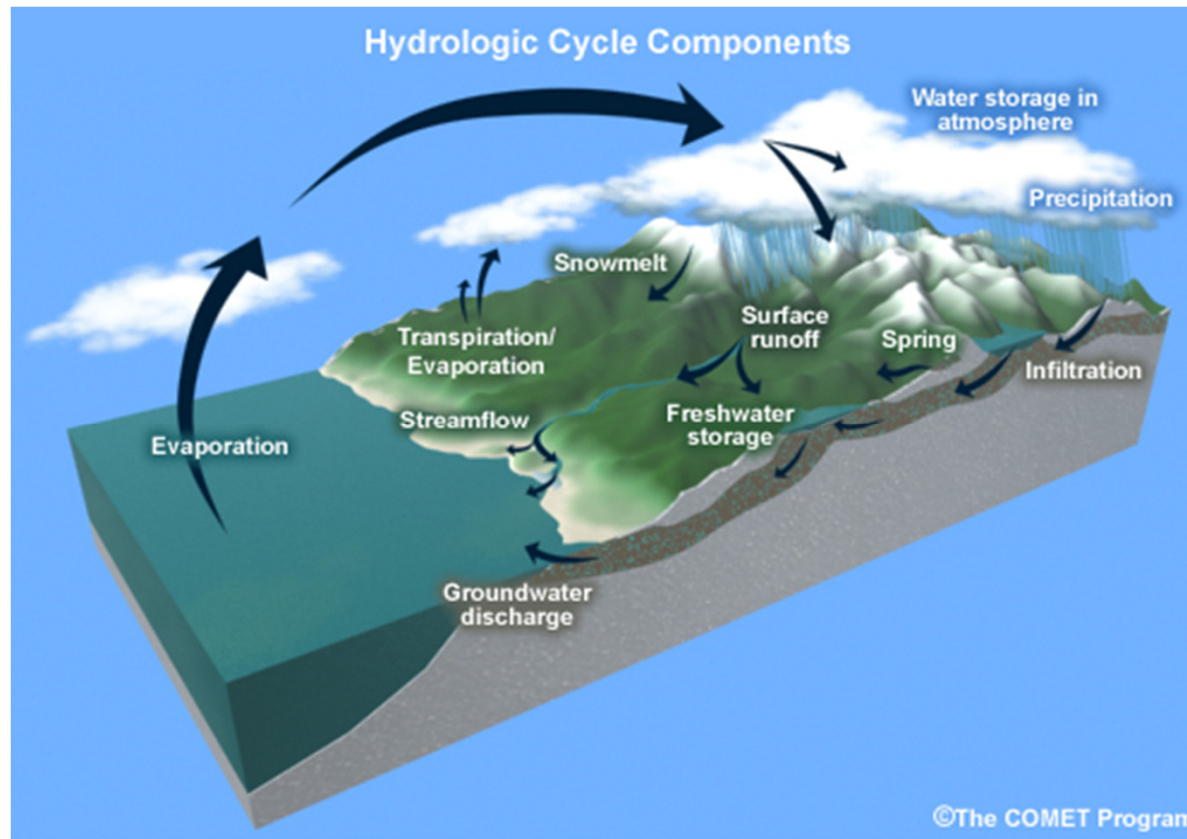
- Bis zur Renaissance:  
Niederschlag reicht nicht aus um die Flüsse vollkommen zu speisen. Hauptanteil von Wasser der Weltmeeren , das durch das Erdreich in die Flüsse gedrückt wird (z.B. Leonardo da Vinci 1500 n. Chr).
- Erste schriftlich verfasste These, dass das Wasser - das aus der Luft (über die Kondensation) entsteht und über den Niederschlag die Quellen der Flüsse speist - ausreichend ist, im Jahr **1580**.
- **Bernard Palissy** (u.a. berühmter Emaillekünstler).  
“Entdecker” der modernen Theorie des Wasserkreislaufs

Bild: wikipedia.org



Bernard Palissy  
(1510-1589)

# Grundsätzlicher Wasserkreislauf



Es handelt sich um den vertikalen und horizontalen Transport und die Speicherung von Wasser in seinem gasförmigen, flüssigen und festen Zustand zwischen oder in der Erdoberfläche, im Erdboden, in der Atmosphäre und in den Ozeanen.

# Hydrologische Grundgleichung

■ Niederschlag = Abfluss + Verdunstung ( $N = A + V$ )

■ Verfeinerung

$N = A_O + A_U + V$  , mit  $A_O$  oberirdischer Abfluss (Bäche, Flüsse,...)  
und  $A_U$  unterirdischer Abfluss

oder

$N = A_O + V + (R - B)$  , mit R: Rücklage (= Zunahme des  
Grundwasservorrats)  
B: Aufbrauch (= Abnahme des  
Grundwasservorrats)

# Hydrologische Grundgleichung

■  $N = A_O + V + (R - B)$

Rücklage und Aufbrauch spielen besonders im Jahresrhythmus eine Rolle

Im humiden Klimabereich im Winterhalbjahr i. d. R. mehr Grundwasserneubildung, da Wasserverbrauch durch Vegetation und Verdunstung verringert.

Außerdem weniger Wasserverbrauch durch Bevölkerung.



# Hydrologie

■  $N = A_O + V + (R - B)$

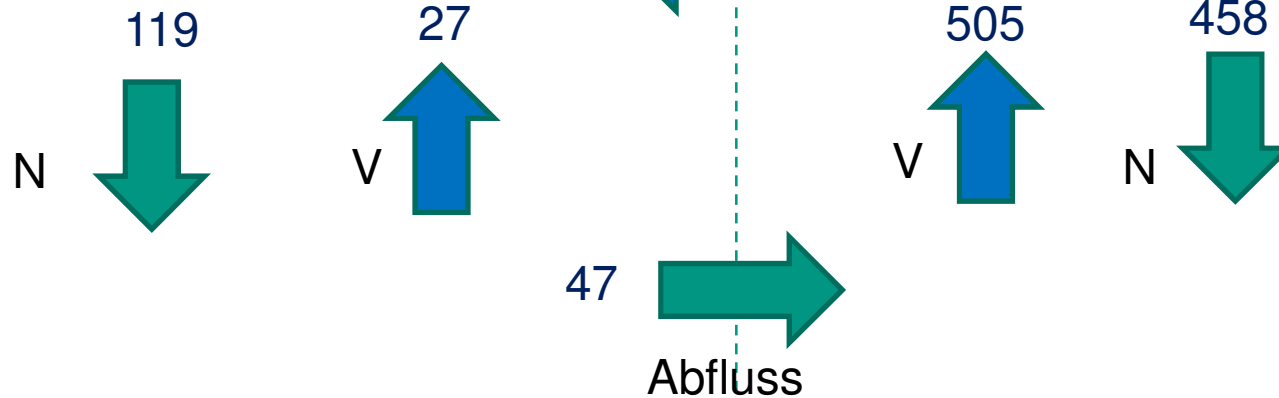
→ Bestimmung der einzelnen Terme

# Schema des globalen Wasserkreislaufs

terrestrische  
Atmosphäre  
*3*

atmosphärischer Transport

maritime  
Atmosphäre  
*10*



nach Krauss,  
2004

Land

Ozean

Biomasse	<i>1</i>
Eis und Schnee	<i>32 000</i>
Oberflächenwasser	<i>178</i>
Bodenfeuchte	<i>65</i>
Grundwasser	<i>24 000</i>

*1 340 000*

Wasserdampf- /Wasser-Flüsse in  $10^{15} \text{ kg a}^{-1}$

*Wasservorräte in  $10^{15} \text{ kg}$*

# Schema des globalen Wasserkreislaufs

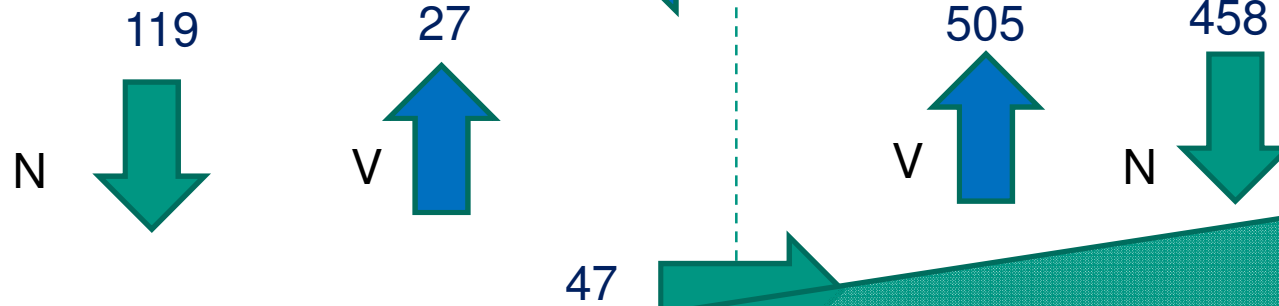
terrestrische Atmosphäre

3

atmosphärischer Transport

maritime Atmosphäre

10



nach Krauss, 2004

**Anteil des gesamten ozeanischen Verdunstungsstromes, der in den Netto Transport zum Festland eingeht?**

- Biomasse
- Eis und Schnee
- Oberflächenwasser
- Bodenfeuchte
- Grundwasser

32 000  
178  
65  
24 000

Wasserdampf- / Wasser-Flüsse in  $10^{15} \text{ kg a}^{-1}$   
Wasservorräte in  $10^{15} \text{ kg}$

# Schema des globalen Wasserkreislaufs

terrestrische  
Atmosphäre

atmosphärischer Transport

maritime  
Atmosphäre

3

Anteil des gesamten ozeanischen  
Verdunstungsstromes, der in den Netto  
Transport zum Festland eingeht:

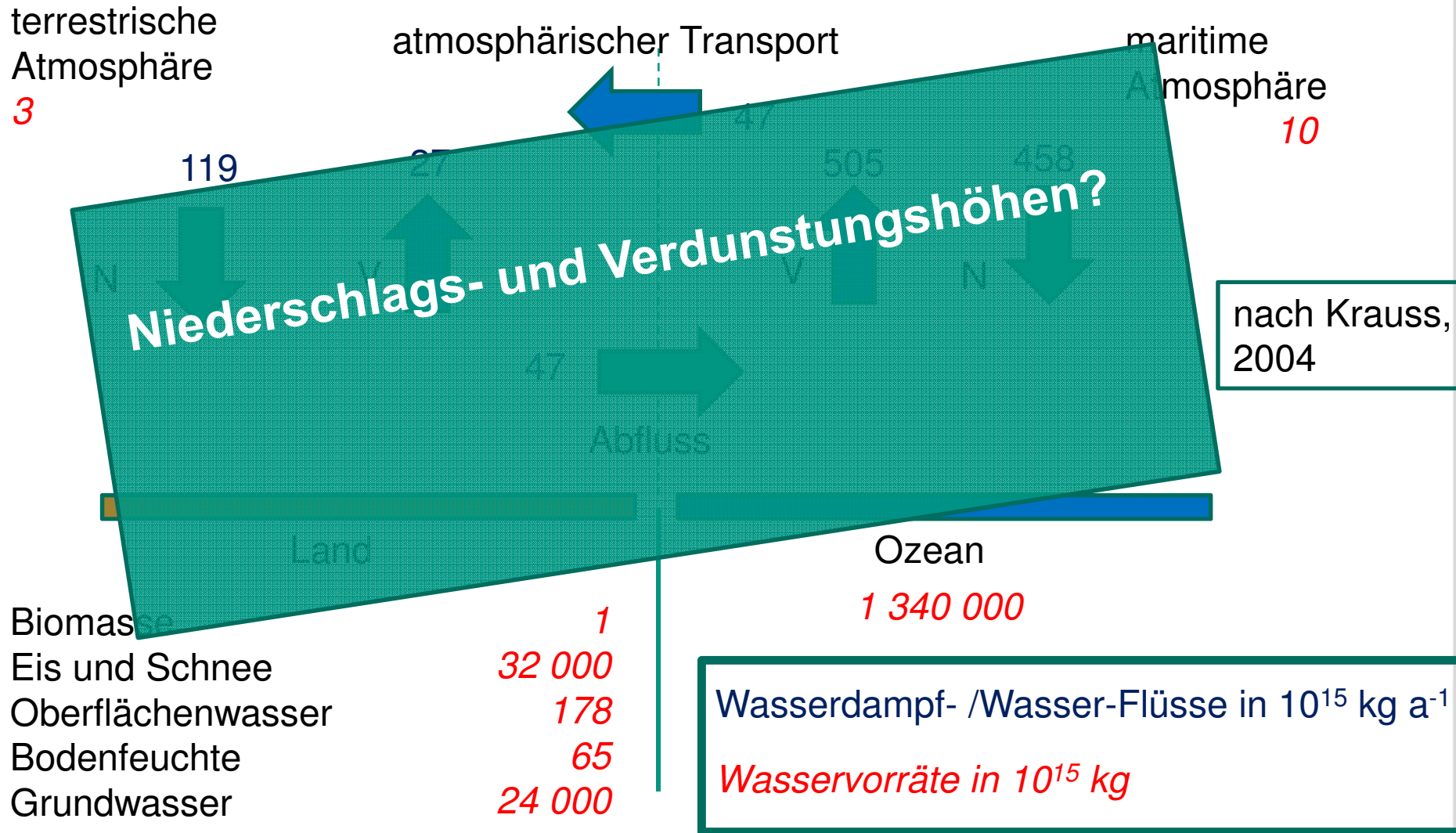
$$47 \cdot 10^{15} \text{ kg a}^{-1} / 505 \cdot 10^{15} \text{ kg a}^{-1} = 0.093$$

nach Krauss,  
2004

Biomasse	1
Eis und Schnee	32 000
Oberflächenwasser	178
Bodenfeuchte	65
Grundwasser	24 000

Ozean  
/ 340 000  
Wasserdampf- / Wasser-Flüsse in  $10^{15} \text{ kg a}^{-1}$   
Wasservorräte in  $10^{15} \text{ kg}$

# Schema des globalen Wasserkreislaufs



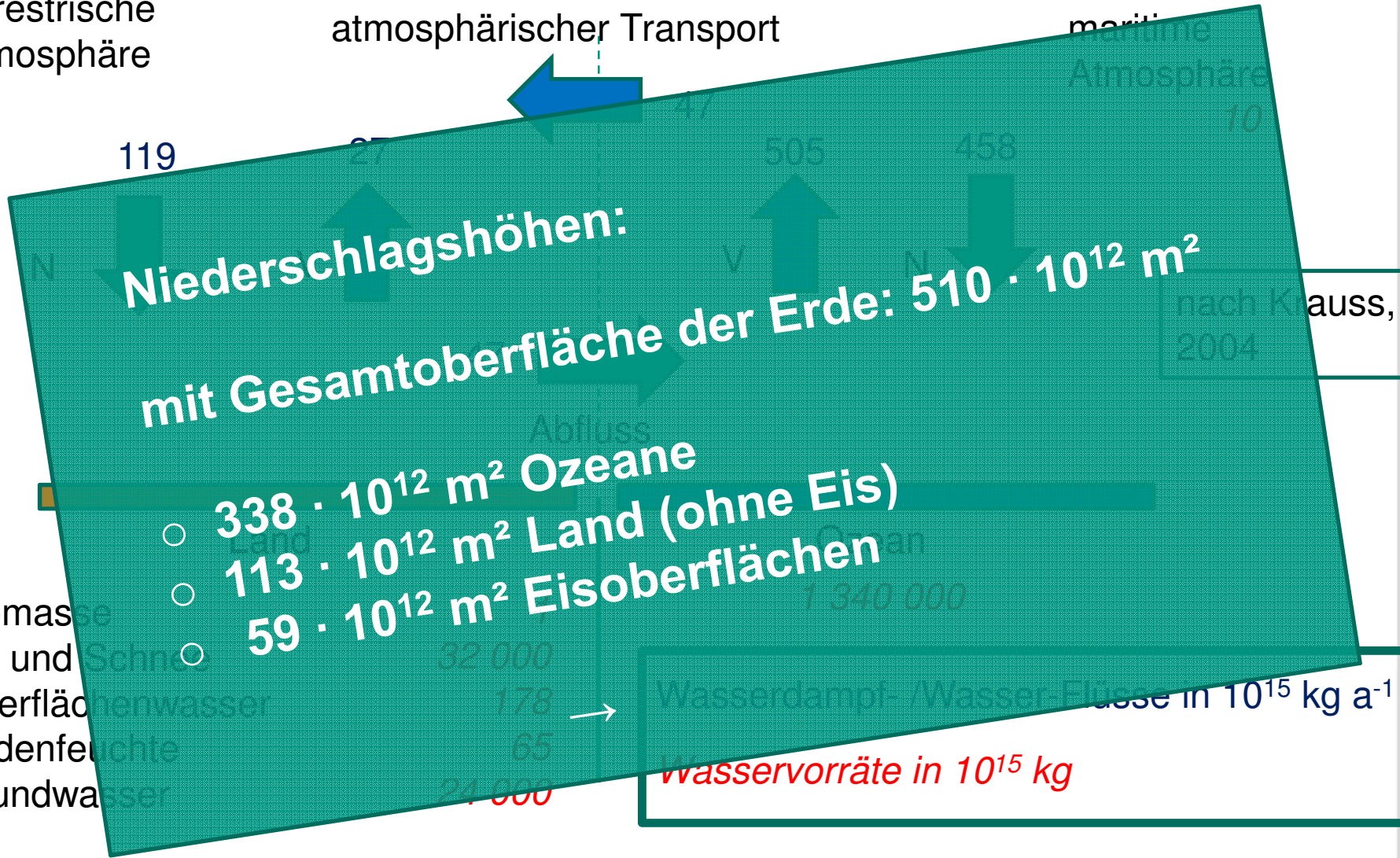
# Schema des globalen Wasserkreislaufs

terrestrische  
Atmosphäre

3

atmosphärischer Transport

marine  
Atmosphäre



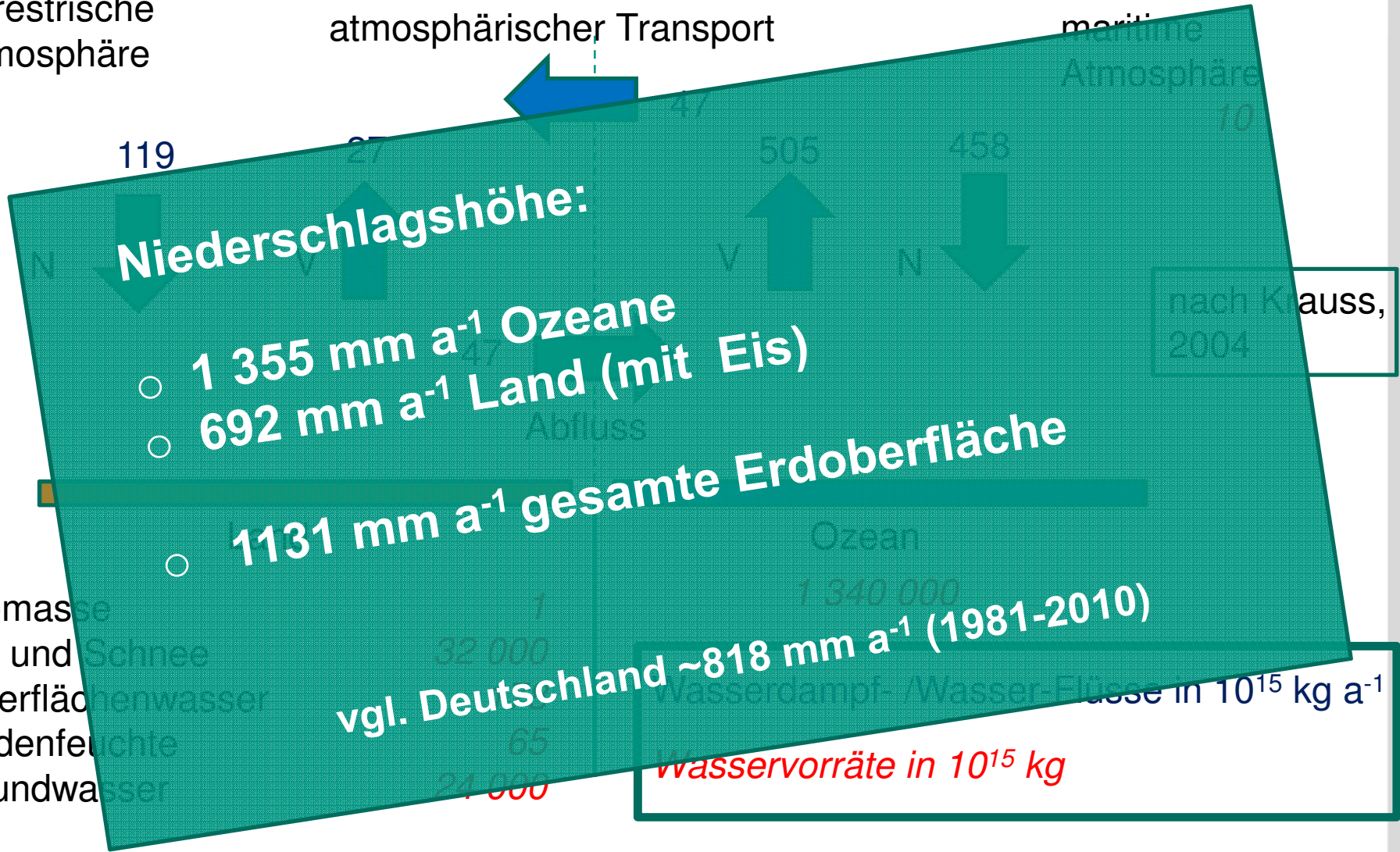
# Schema des globalen Wasserkreislaufs

terrestrische  
Atmosphäre

3

atmosphärischer Transport

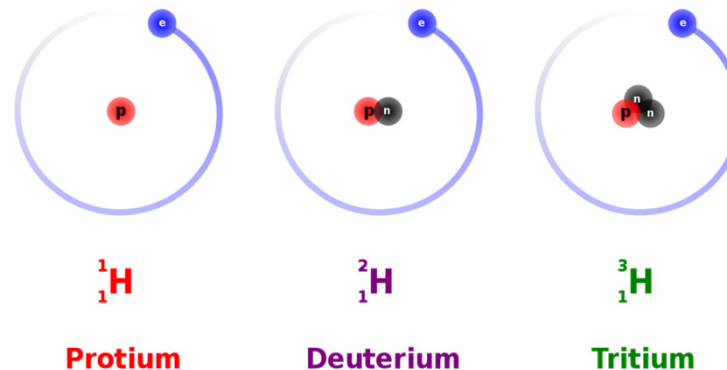
marine  
Atmosphäre



Biomasse  
Eis und Schnee  
Oberflächenwasser  
Bodenfeuchte  
Grundwasser

# Mittlere Verweildauer

- Abschätzung mit zwei Methoden:
- Über die Massenerhaltung:
  - Wassermenge des Hydrosphärenteils ungefähr konstant.
  - Verweildauer = Volumen des Hydrosphärenteils / Netto Wasserfluss
  - Entspricht der Zeit mit der Wasseranteil des Hydrosphärenteils komplett befüllt oder entleert werden würde.
- Über Isotopen-Methode.



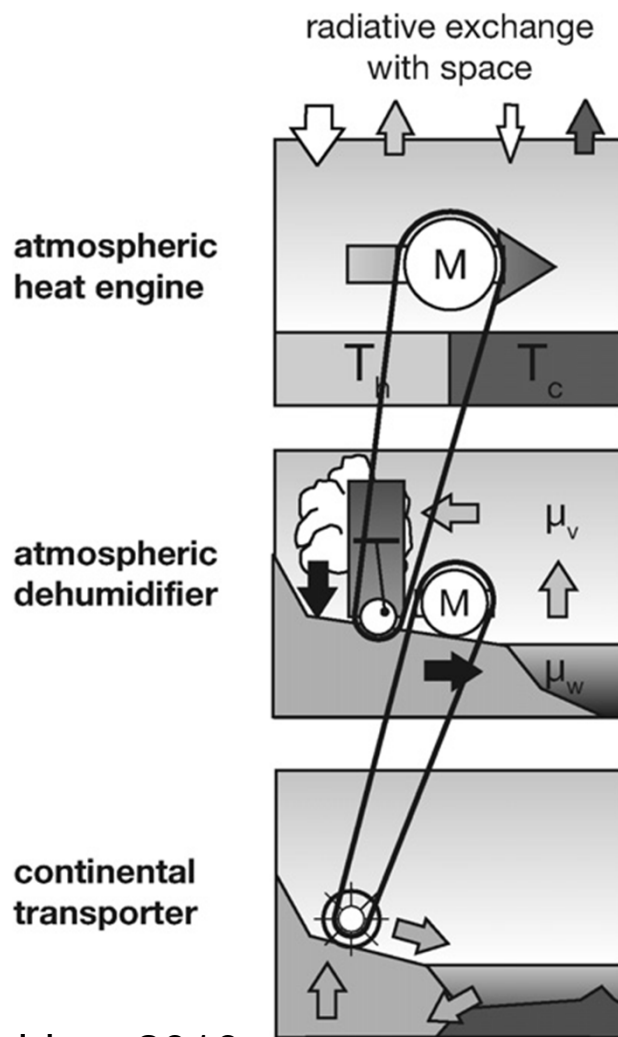


# Der globale Wasserkreislauf

Teil der Hydrosphäre	Bezugsfläche [1000 km <sup>2</sup> ]	Menge [1000 km <sup>3</sup> ]	Anteil in % bezogen auf die Gesamtmenge	Anteil in % bezogen auf die Süßwassermenge	mittlere Verweilzeit
1. Weltmeer	361 300	1 338 000	96,5	-	2650 a
2. Grundwasser	134 800	23 400	1,7	-	
davon Süßwasser		10 530	0,76	30,1	
aktives Grundwasser		4 000	0,289	11,42	286 a
3. Bodenfeuchte	82 000	85	0,0047	0,18	280 a
4. Gefrorenes Wasser	16 228	24 365 <sup>1)</sup>	1,766	69,56	8 400 a
Antarktis	13 980	21 600	1,56	61,7	
Grönland	1 802	2 340	0,17	6,68	
Arktische Inseln	226	84	0,006	0,24	
Gebirgsgebiete	224	41	0,003	0,117	1600 a
Eis in Dauerfrostböden	21 000	300	0,022	0,86	
5. Seen	2 059	176	0,013	-	10 a
Süßwasser	1 237	91	0,007	0,26	
Salzwasser	822	85	0,006	-	
6. Sümpfe	2 683	11	0,0008	0,03	
7. Flüsse	148 800	2,1	0,0002	0,006	18,5 d
8. Biologisches Wasser	510 000	1,1	0,0001	0,003	7 d
9. Atmosphäre	510 000	13	0,001	0,04	8,2 d
Gesamte Wassermenge	510 000	1 386 032	100	-	2 400 a
Süßwasser	148 800	35 077	2,53	100	

<sup>1)</sup> Nicht berücksichtigt sind die unterirdischen Wasservorräte in der Arktis (ca. 2 Mio. km<sup>3</sup>). Darin sind 1 Mio. km<sup>3</sup> Süßwasser enthalten.

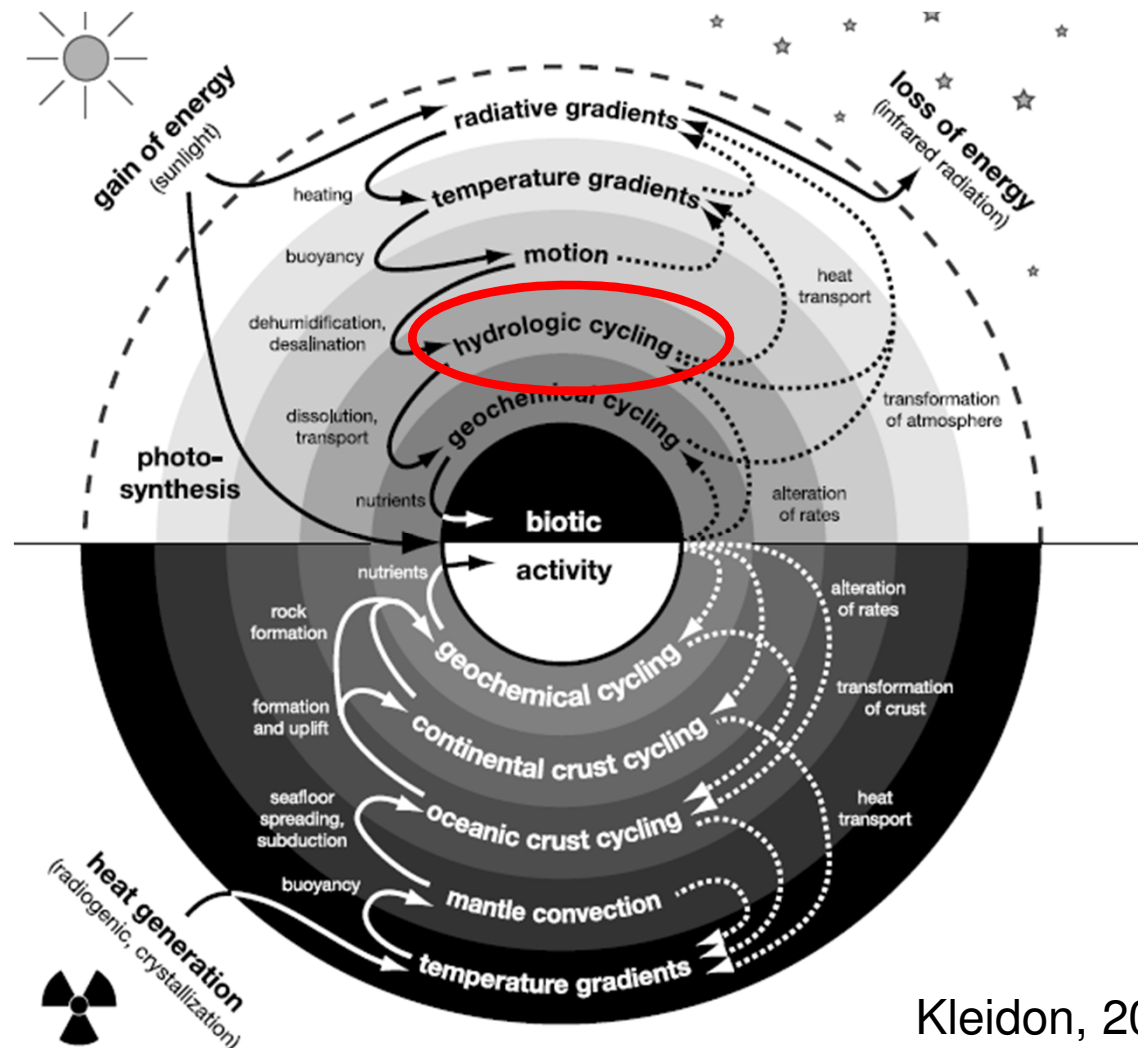
# Wasser in der globalen Energiebilanz



Kleidon, 2010

1. Strahlungsflüsse führen zu räuml./zeitl. Temperaturdifferenzen
2. T-Differenzen treiben Wärmekraftmaschine (M) an, die Strömungen innerhalb der Atmosphäre hervorruft ( $E_{kin}$  zu Hebung feuchter Luft, Abkühlung, Sättigung, Kondensation, Niederschlag) → *„Atmosphärischer Motor treibt den Entfeuchter an“* (und dadurch (weiterer M) den hydrologischen Kreislauf)
3. Wasserkreislauf bringt Wasser auf ein höheres Niveau -> kontinentaler Abfluss mit gelösten Feststoffen zum Meeresboden
4. Transporter der Festlandmasse interagiert mit Prozessen des Erdinneren der globalen Gesteinskreislaufs

# Wasser in der globalen Energiebilanz



Energieerzeugung:

- Absorption solarer Strahlung
- Wärme aus dem Erdinneren

→ natürliche Startpunkte für eine planetarische Hierarchie der Energieerzeugung und des Energietransfers

Wasserkreislauf hierarchisch in den Energietransfer eingebunden

Kleidon, 2010

# Ist der Wasserkreislauf geschlossen?

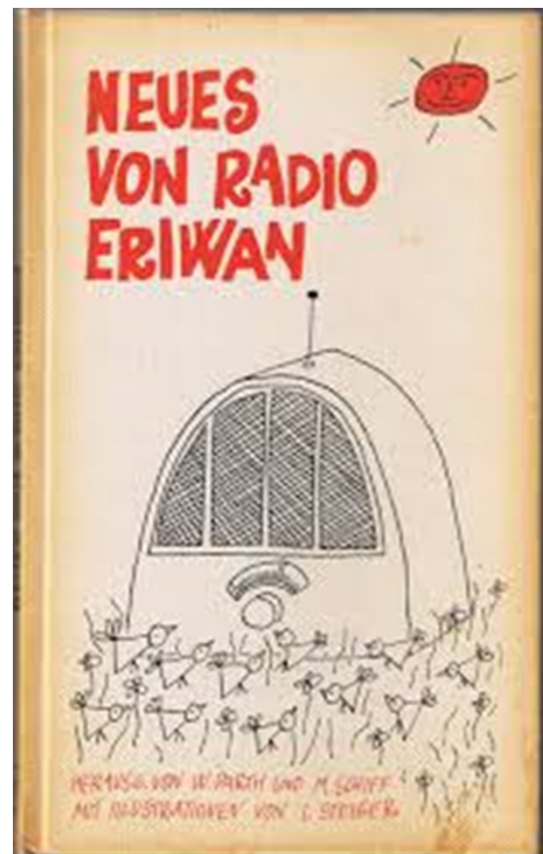


Bild: amazon.de

# Lücken / Bruchstellen im Wasserkreislauf

**ZWAR NUR HYPOTHETISCHES  
INTERESSE, ABER AUCH ÄSTHETISCH!**

## Lücken / Bruchstellen im Wasserkreislauf

### ■ Theorie des juvenilen Wassers:

**juveniles Wasser:** Wasser, das noch nicht am irdischen Wasserkreislauf teilgenommen hat und aus der magmatischen Differentiation stammt.

Bild: wikipedia.org

Magma enthält Wasser, das z.B. bei vulkanischen Eruptionen an die Erdoberfläche tritt und dann am irdischen Wasserkreislauf beteiligt ist.



Begriff geprägt  
durch den  
österreichischen  
Geologen  
Eduard Suess  
(1831-1914)



Bild: wikipedia.org

**Info:** vadose Wasser: hat bereits am Wasserkreislauf teilgenommen

# Lücken / Bruchstellen im Wasserkreislauf

## ■ Atmosphärische Lücken:



Bild: wikipedia.org



Bild: wikipedia.org

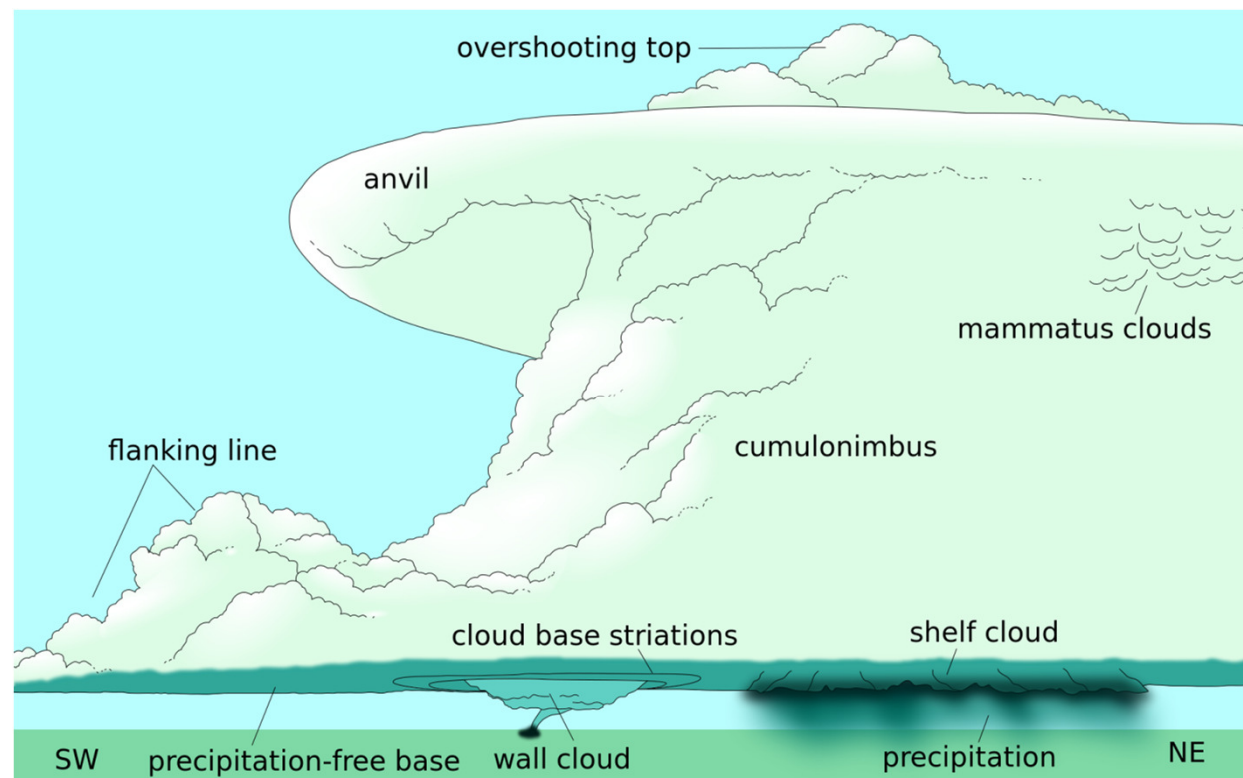
Im Zwischenschritt sichtbar beispielsweise als polare Stratosphärenwolken

Später Diffusion der atomaren Bestandteile in den interstellaren Raum

# Lücken / Bruchstellen im Wasserkreislauf

Wassertransport in die Stratosphäre:

## 1. Overshooting tops



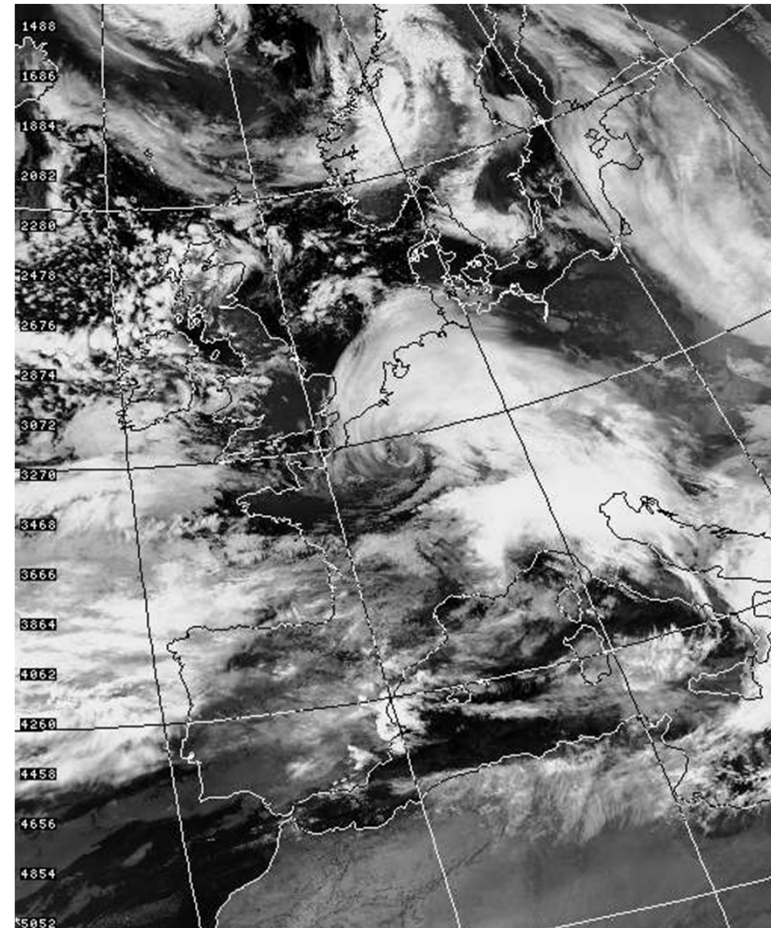
Quelle: \*<http://www.photolib.noaa.gov/htmls/nssl0032.htm>



# Lücken / Bruchstellen im Wasserkreislauf

Wassertransport in die Stratosphäre:

1. Overshooting tops
2. ...



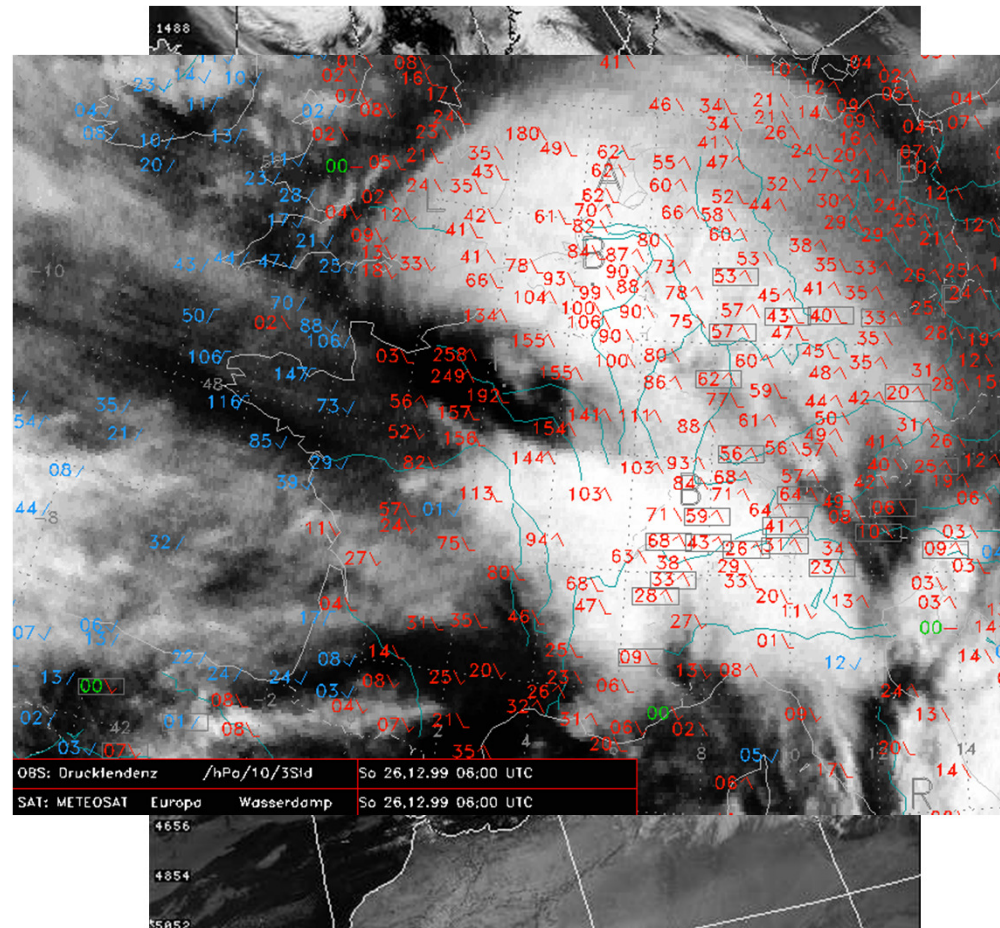
Quelle: [forum.wetterzentrale.de](http://forum.wetterzentrale.de)  
(gepostet von Dipl.-Met. Matthias  
Jaenicke - wetterfuchs)

# Lücken / Bruchstellen im Wasserkreislauf

Wassertransport in die Stratosphäre:

1. Overshooting tops
2. dry intrusion

z.B. Lothar,  
Weihnachten 1999



Quelle: [forum.wetterzentrale.de](http://forum.wetterzentrale.de)  
(gepostet von Dipl.-Met. Matthias Jaenicke - wetterfuchs)

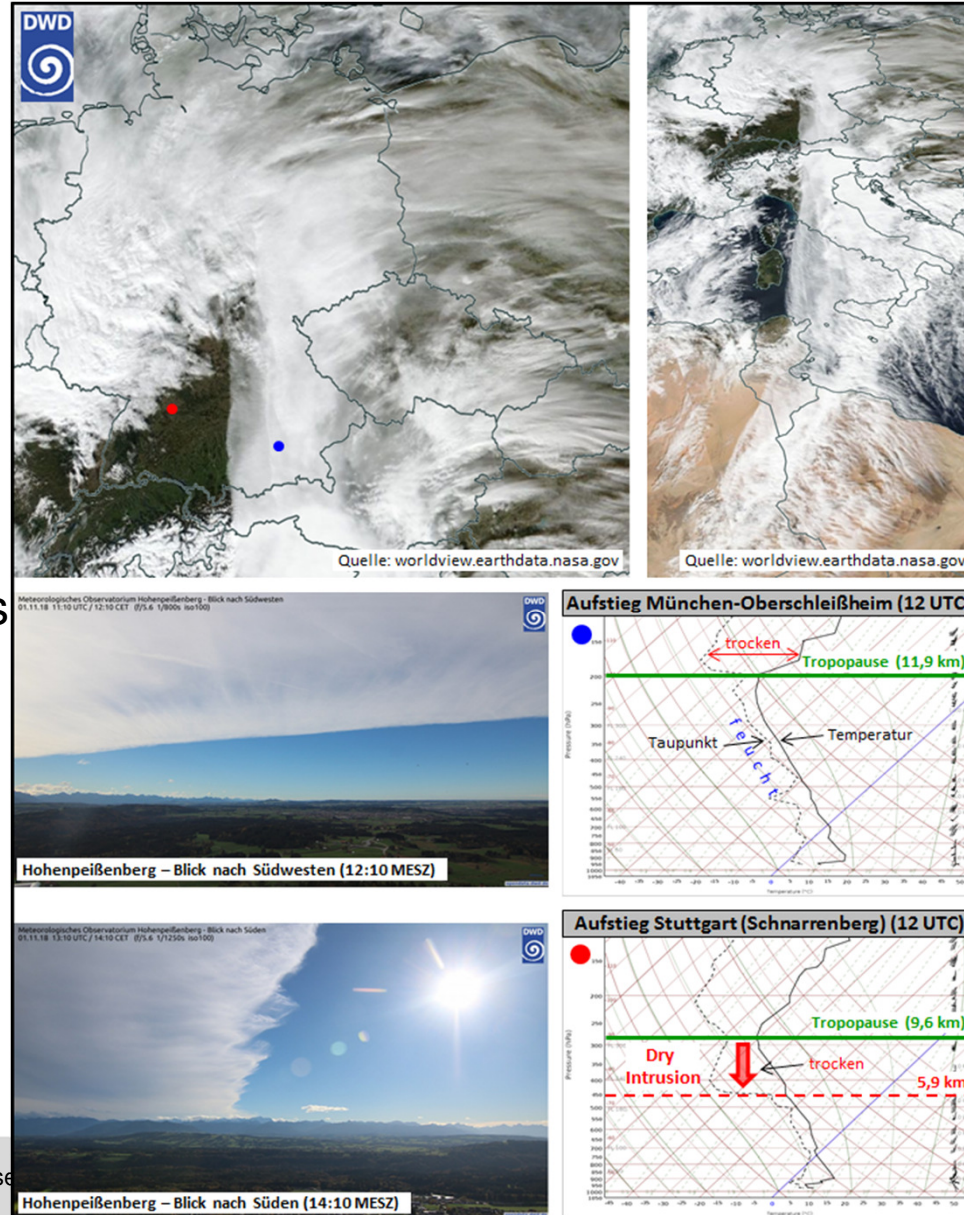
# Lücken / Bruchstellen im Wasserkreislauf

Wassertransport in die Stratosphäre:

1. Overshooting tops
2. dry intrusion / Tropopausenbrüche

z.B. Wolkenkante 01.11.2018

Quelle DWD, Thema des Tages



# Äste des Wasserkreislaufs

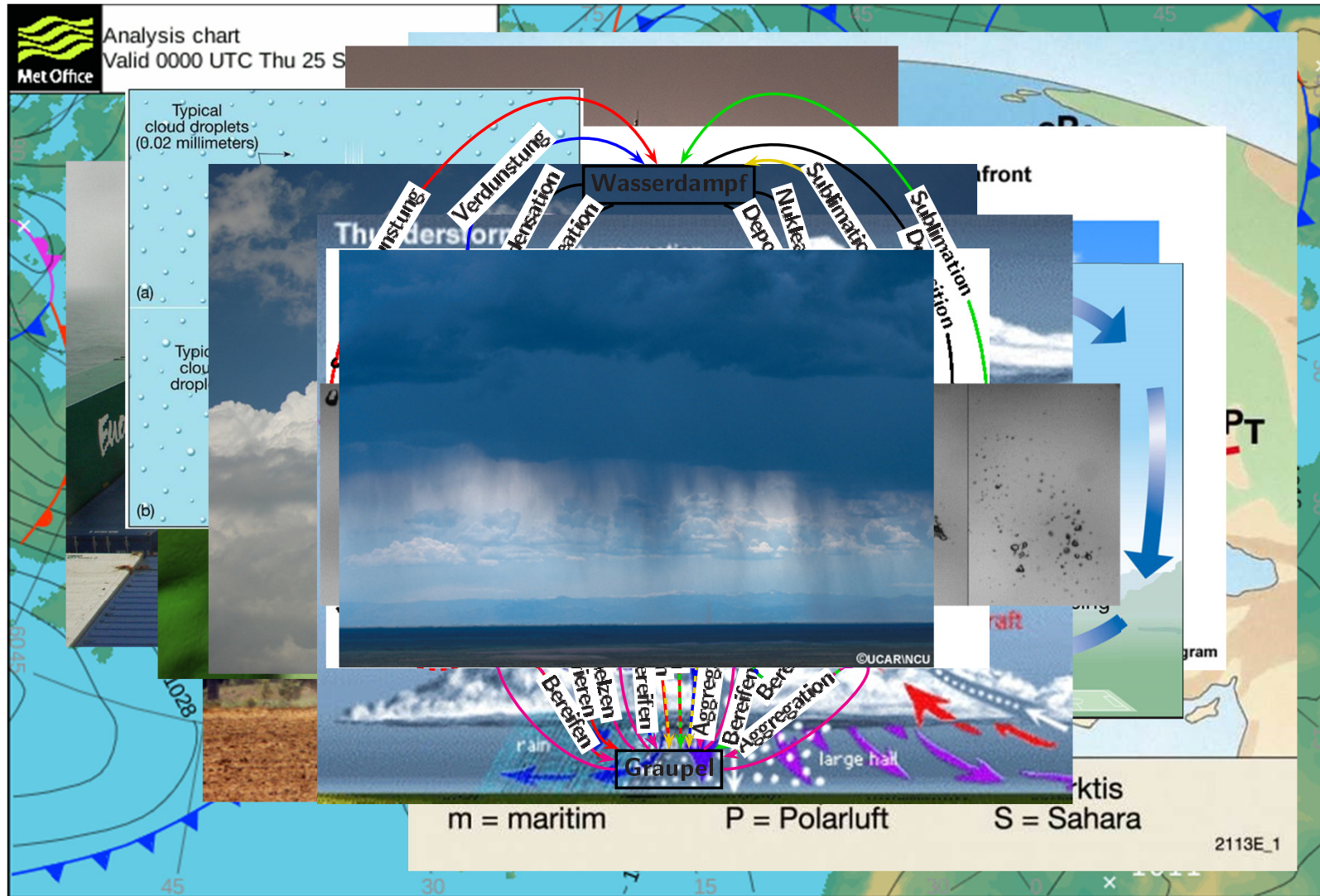
# Atmosphärischer Ast

- Jeder Regentropfen erzählt eine ganz besondere, einzigartige Geschichte:



- Ergebnis: zahlreicher Prozesse auf vielen Raum und Zeitskalen:

# Atmosphärische Skalen



# Niederschlagsmessung

- Niederschlag mit das längste beobachtete meteorologische Element  
→ Einfache, aber meist schon sehr gut (akzeptable) Messung



„offizieller“ Regentmesser in Nebraska  
<http://www.grit.com>



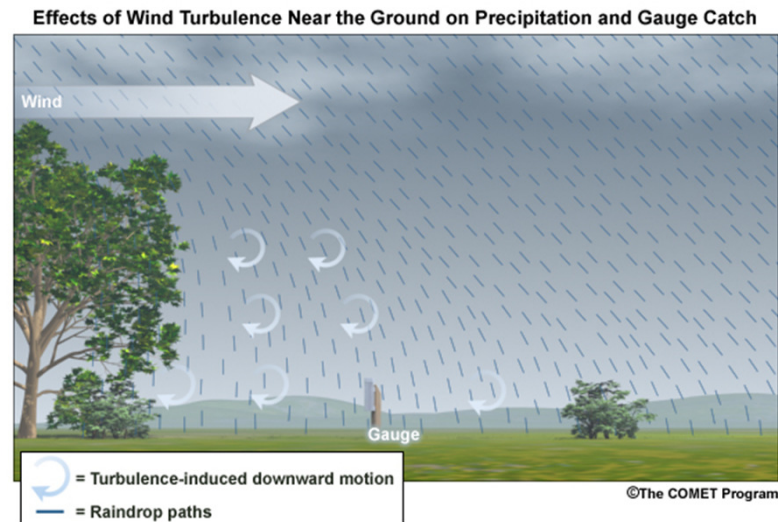
Bild: wikipedia.org

Ältestes bekanntes  
Messgerät: 1441 (Korea)

# weitere Probleme – Vorteile/Nachteile Stationsmessung

## Systematische Fehler

- Windabdrift (unterschiedlicher Einfluss bei unterschiedlichen Tropfengrößen), Verdunstung, Probleme der Repräsentativität) bei Turbulenz



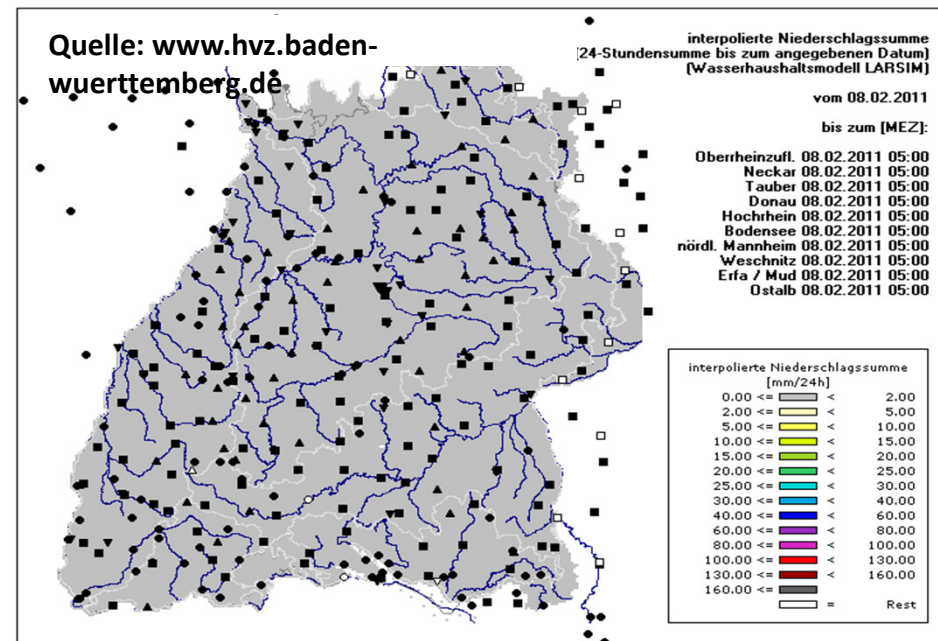
Vorteil: Lokal sehr genaue Messung  
Nachteil: kleiner „Footprint“ der Messung

Internettip: <http://www.meted.ucar.edu/qpf/rgauge/>

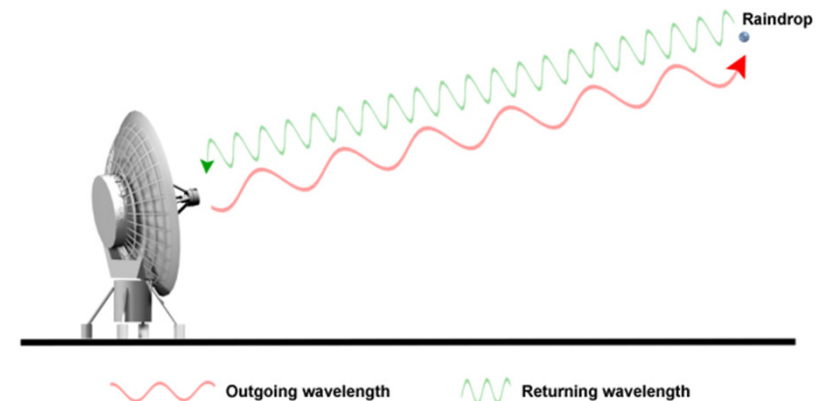
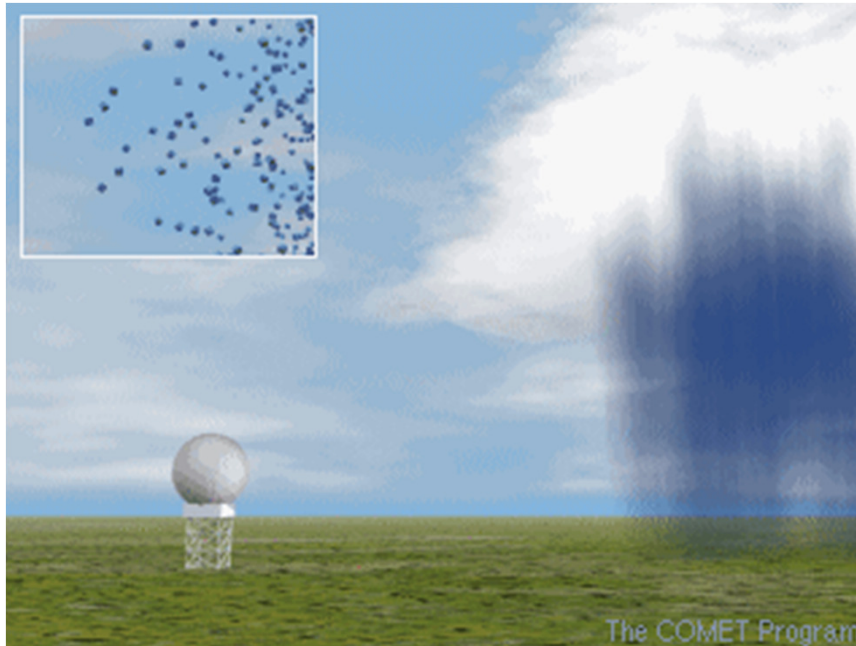


## Niederschlagsmessung mit Stationen (hier bei uns)

- BaWü: 260 Stationen
  - 200 cm<sup>2</sup> → Gesamtfläche 5.2 m<sup>2</sup>
  - 36.000 km<sup>2</sup> → ca. 1 Station pro 138 km<sup>2</sup>
- Größeres Gewitter: ca. 25 km<sup>2</sup>
- Wahrscheinlichkeit, die Zelle zu erwischen: ca. 1/5 (**d.h. Gewitterzelle entwischt schnell dem Netz**)
- Lücken, flächendeckende Niederschlagsinformation ist essentiell
- Räumliche Interpolation um Lücken zu füllen!



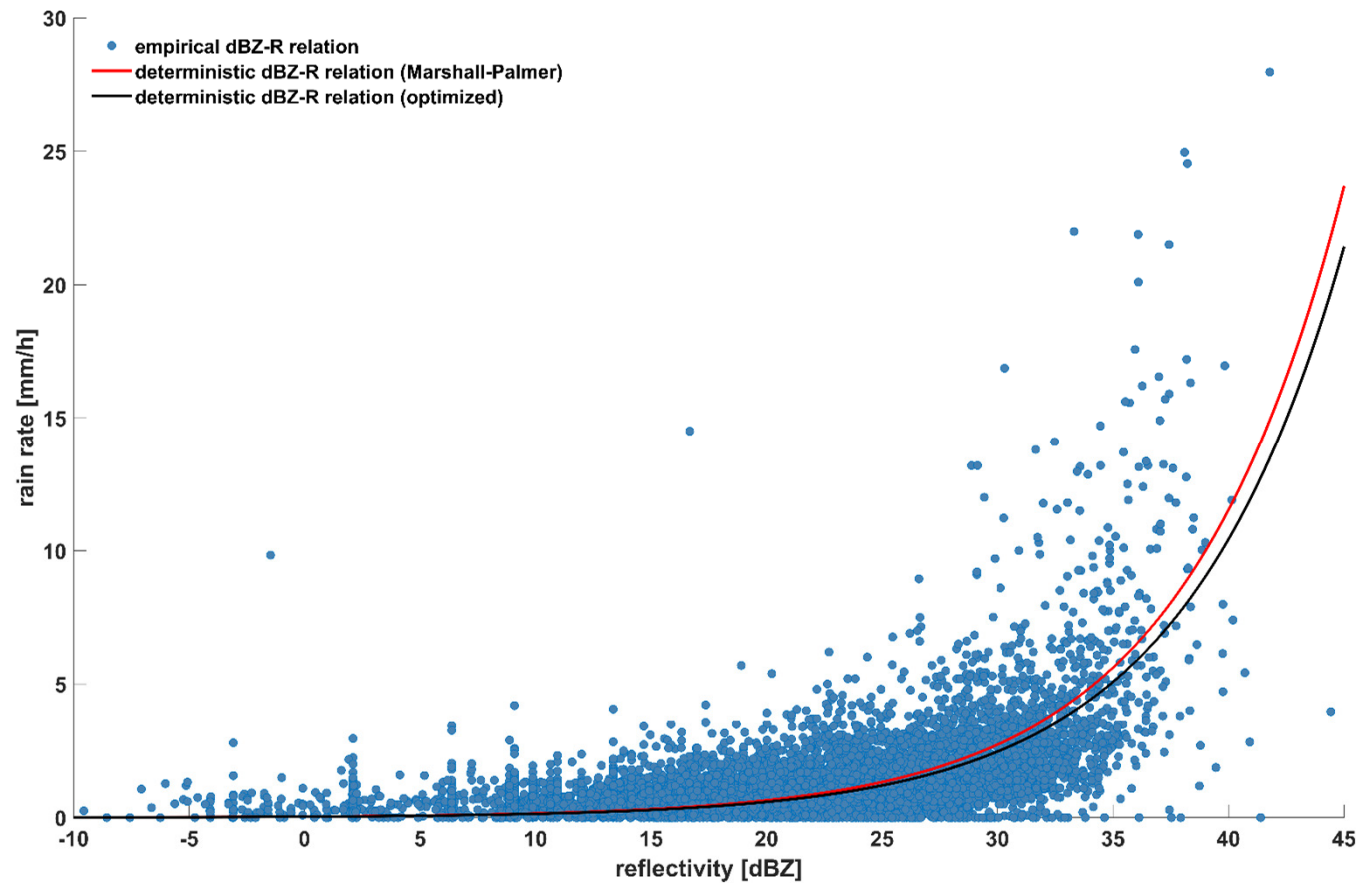
# Grundprinzip der Radarmessungen



©The COMET Program

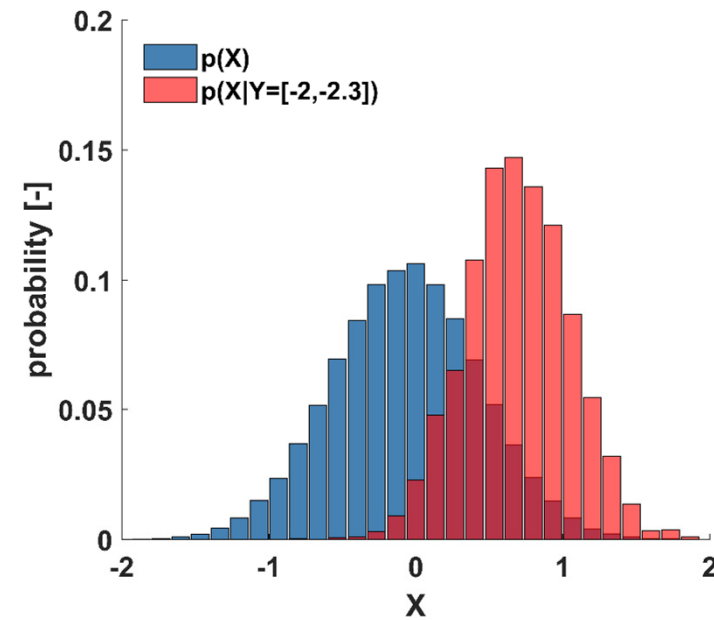
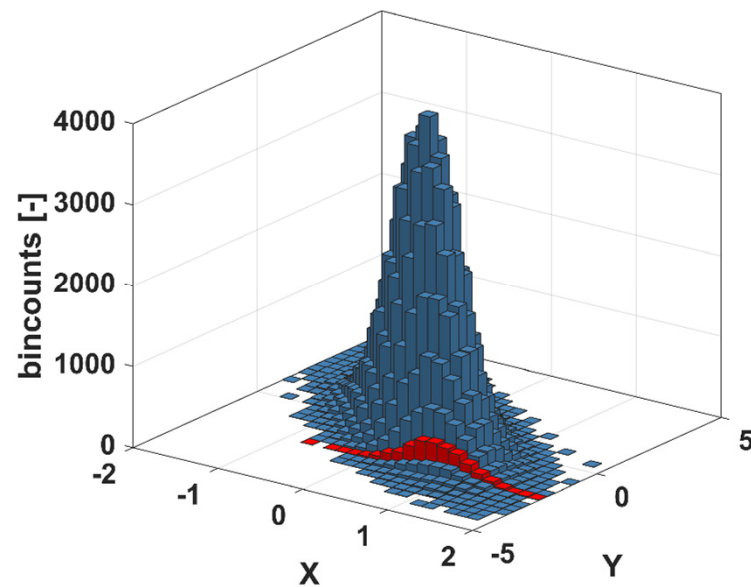
- (Meist) Aussenden eines eng gebündelten elektromagnetischen Pulses von bekannter Frequenz, Länge, Leistung (z.B. Wellenlänge Karlsruher C-Band Radar: 5.4 cm)
- Ein sehr kleiner Teil des Pulses wird u.a. Hydrometeoren zurück zur Antenne gestreut und dort registriert, bzw. ausgewertet.

# Stochastische Niederschlagsschätzung



$$\text{Marshall-Palmer: } Z [\text{in } mm^6 m^{-3}] = 200 \cdot R^{1.6}$$

# Stochastische Niederschlagsschätzung



# Verdunstung

- Schwierig zu fassendes Glied der hydrologischen Grundgleichung
- Messung über Verdunstungspfannen ergibt nur die potentielle Verdunstung



# Einschub: Das Verdunstungspfannen-Paradoxon

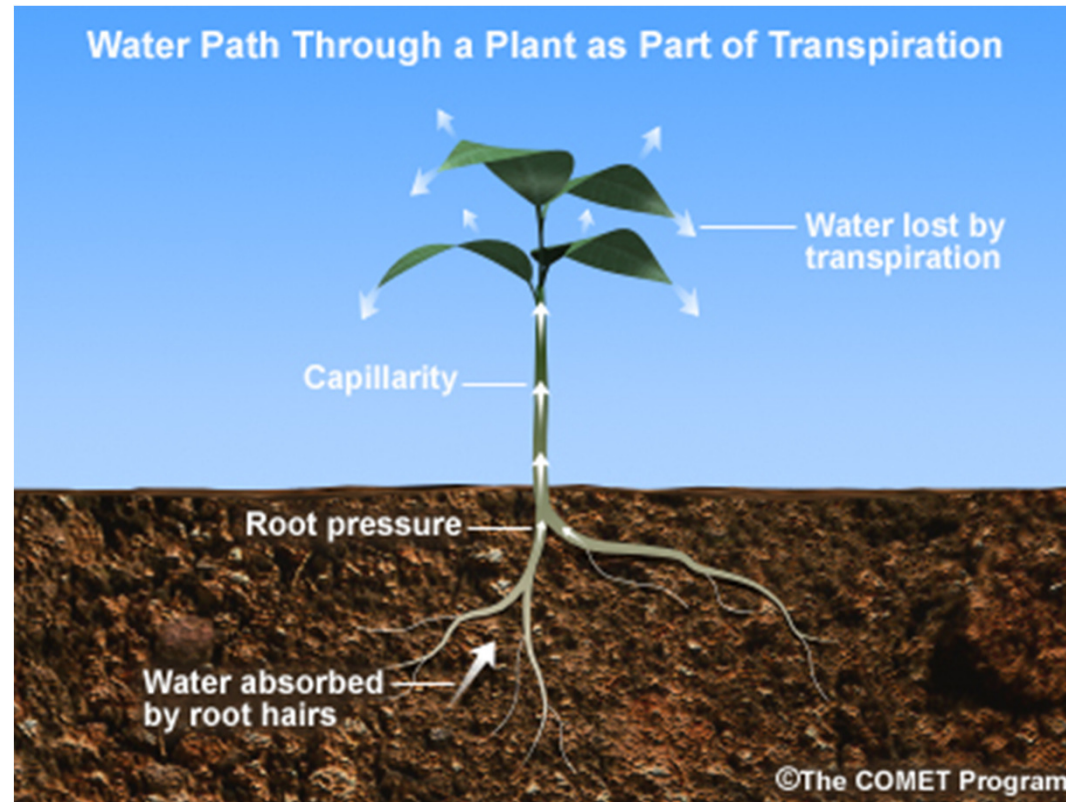


- Das Verdunstungspfannen—Paradoxon:
- Erwärmung der Erdoberfläche im 50 jährigen Mittel um  $0,15 \text{ } ^\circ\text{C}$  pro Jahrzehnt.
- Rückgang der beobachteten Werte der potentiellen Verdunstung, zwischen 1950 und 1990 auf der Grundlage von Verdunstungspfannen-Daten aus den Vereinigten Staaten und der ehemaligen Sowjetunion
- Warme, trockenere Luft in der Nähe der Erdoberfläche sollte die Verdunstung erhöhen, dies ist jedoch nicht der Fall

→ Gegenstand der Forschung



# Transpiration



Verdunstung + Transpiration = Evapotranspiration

## Jahreszyklus und Größen

- Transpiration einer „Birke“ bis zu 300 l/d
- LAI (Leaf area index) – Blattflächenindex – relevant für die Verdunstungsleistung
  - Laubbäume 11
  - Nadelbäume 14
  - Wiese 1

### Jahreszyklen

- Aufgrund des Jahreszyklus der Einstrahlung
- Transpiration dominiert im Sommer,
- Bodenversunzung dominiert im Winter
- Interzeption bis zu 18% der Wasserbilanz

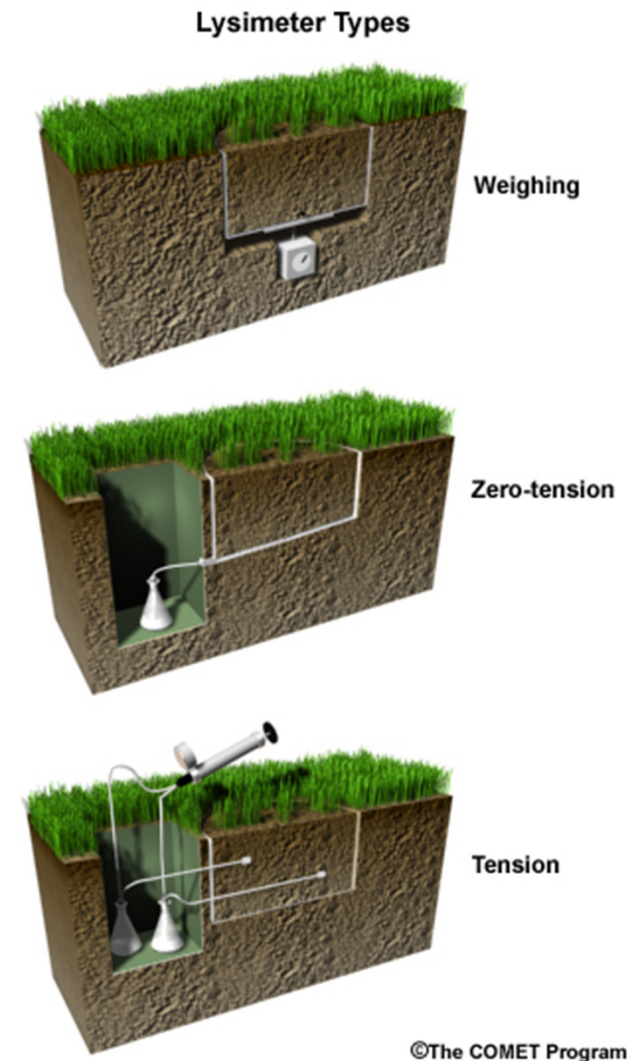


Quelle: Hydrologie KIT  
Karlsruhe



# Messung der aktuellen Evapotranspiration

- Sehr schwierig
- Bei Gras oder niedrigem Bewuchs mittels Lysimetern
  - Aber auch nur Punktmessung
  - Probleme im Wald und generell Repräsentativität



# Messung der aktuellen Evapotranspiration

- Sehr schwierig
- Bei Gras oder niedrigem Bewuchs mittels Lysimetern
  - Aber auch nur Punktmessung
  - Probleme im Wald und generell Repräsentativität
- Bäume mittel „SAP-Flow“ Messern
  - Repräsentativität
  - Bäume sterben ab



Quelle: Hydrologie KIT Karlsruhe

# Modell-Zoo für die potentielle Verdunstung

Meist streng empirisch

$$ETP = f(e^*(T_L) - e(T_L), R_n, T_L, \text{Wind})$$

## Temperatur-basierter Ansatz (billig)

- Thornwaite, Blaney Criddle,
- Haude (mittels Vegetationsspezifischen Haude-Faktoren)

## Strahlungs-basierter Ansatz (teuer)

- Turc (Frankreich, Nordfrika)
- Turc Wendling
- Priestely Taylor

## Kombinierter Ansatz (Datenaufwendig)

- Penman
- Penman-Monteith
- Priestley Taylor

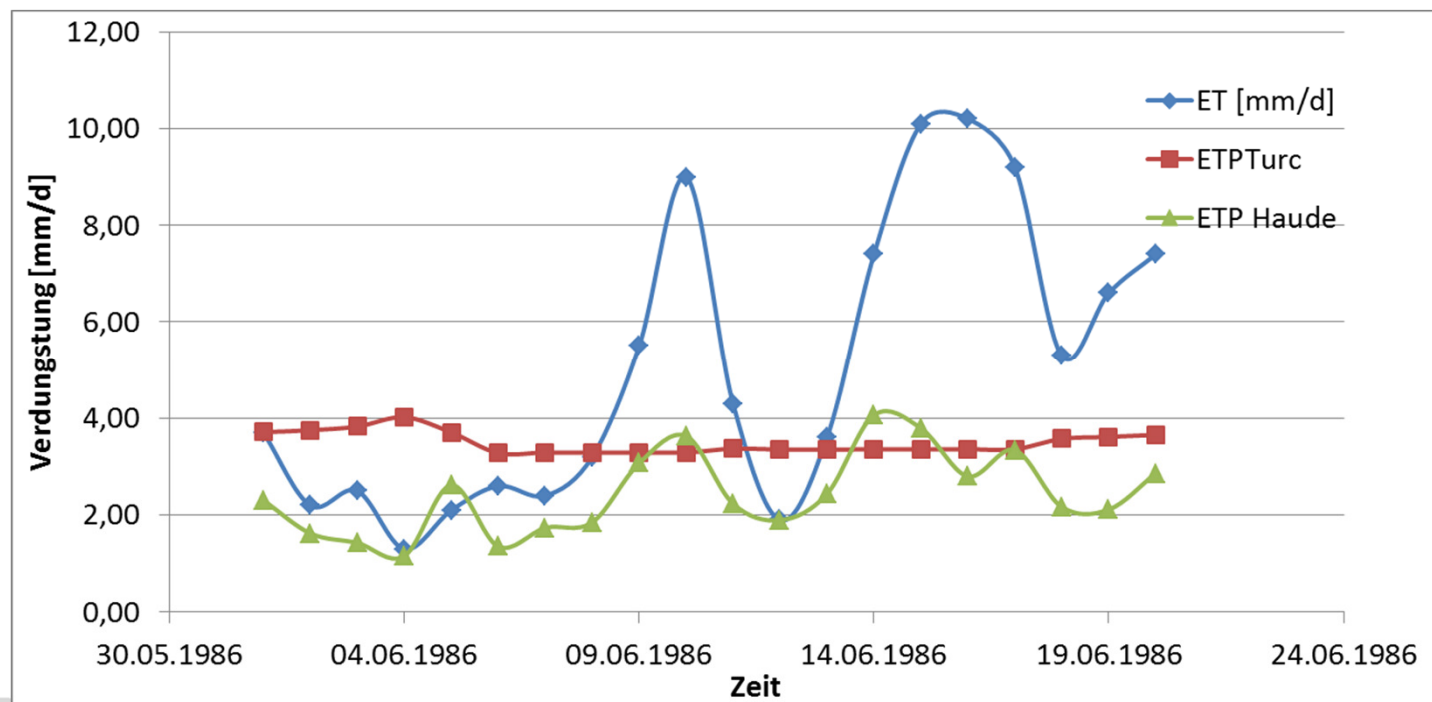
Wahl des of ETP Ansatzes

- Nicht sensitiv für hohe Abflüsse
- sehr sensitiv für geringe Abflussvorhersage

# Vergleich: ETP nach Turc und Haude

Referenz: Lysimeter Daten

- Turc: absolut falsch (empirische Beziehungen sind Regions-spezifisch)
- Haude: systematischer Fehler aber die Dynamik ist in Ordnung (begrenzt auf 7 mm/d)

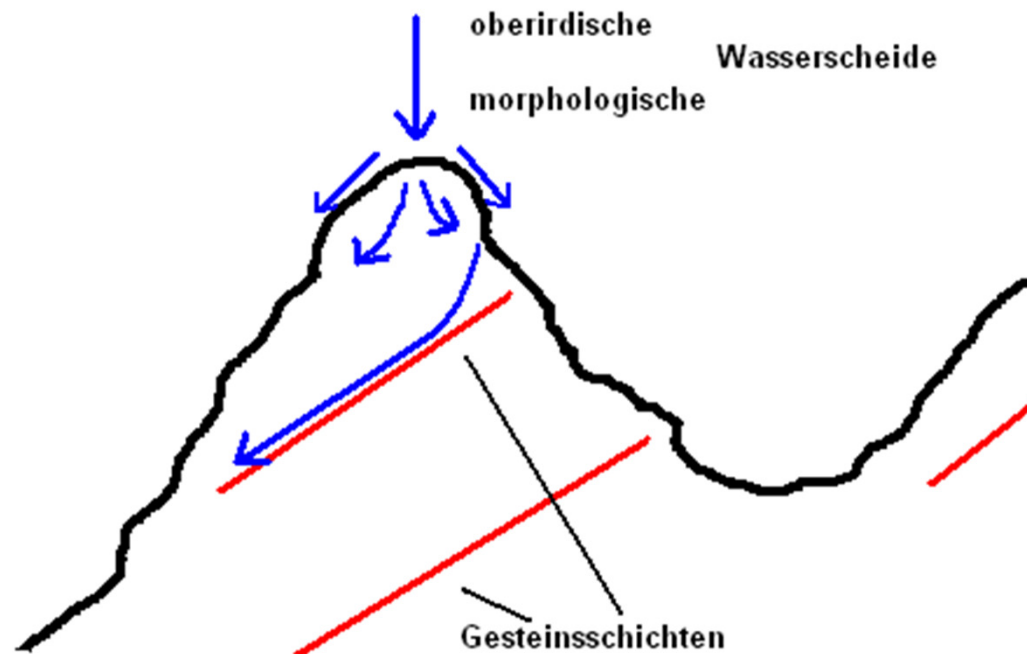


# Über Schließung der hydrologischen Grundgleichung

- Wenn Niederschlag und Abfluss bekannt, dann folgt die Verdunstung.

$$V = N - A$$

- → Ungenau, Probleme z.B. Karst

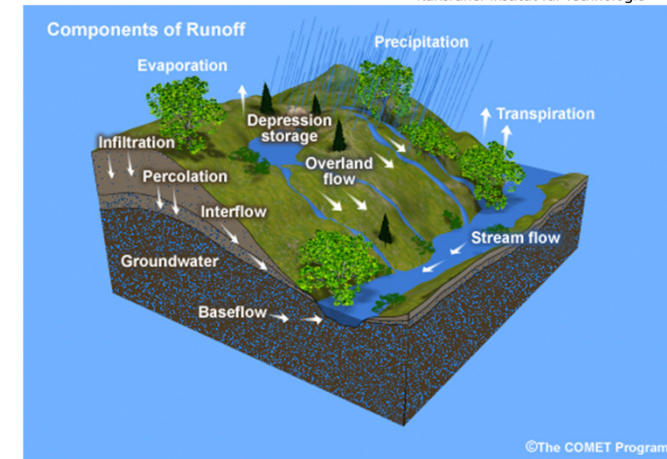
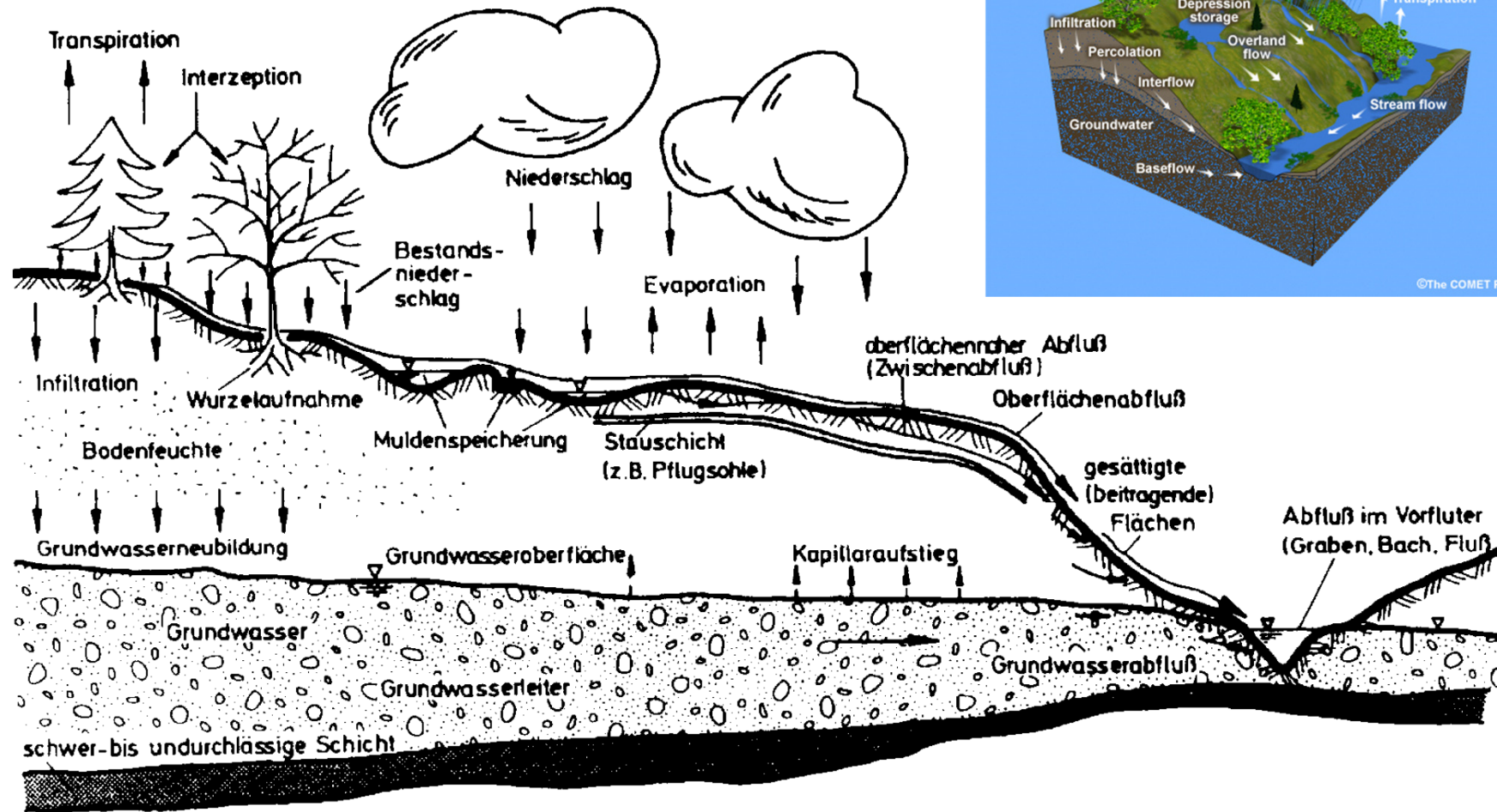


# Generell nur befriedigend mittels bodennahen turbulenten atmosphärischen Feuchtefluss

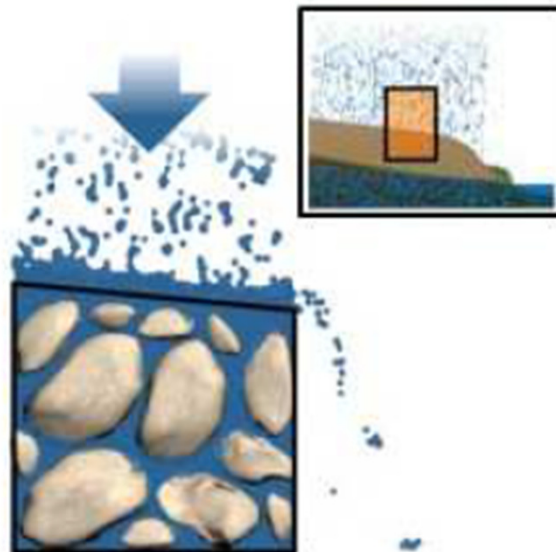
- z.B. Eddy-Kovarianz Station, Scintillometer



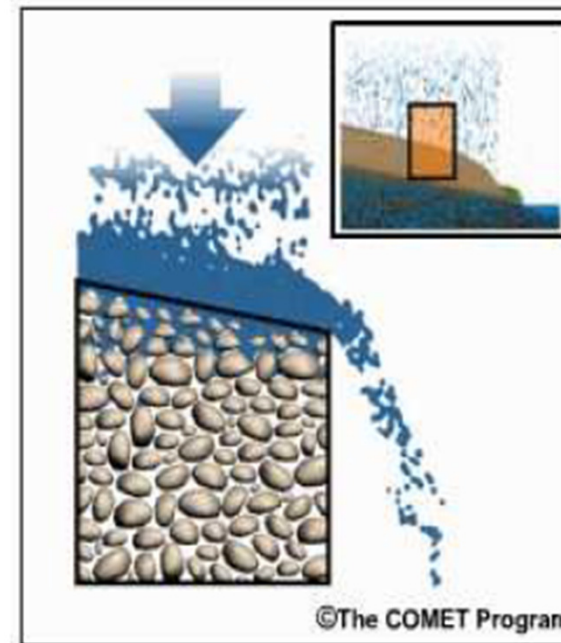
# Wassertröpfchenreise am Hang



# Infiltration vs. Oberflächenabfluss



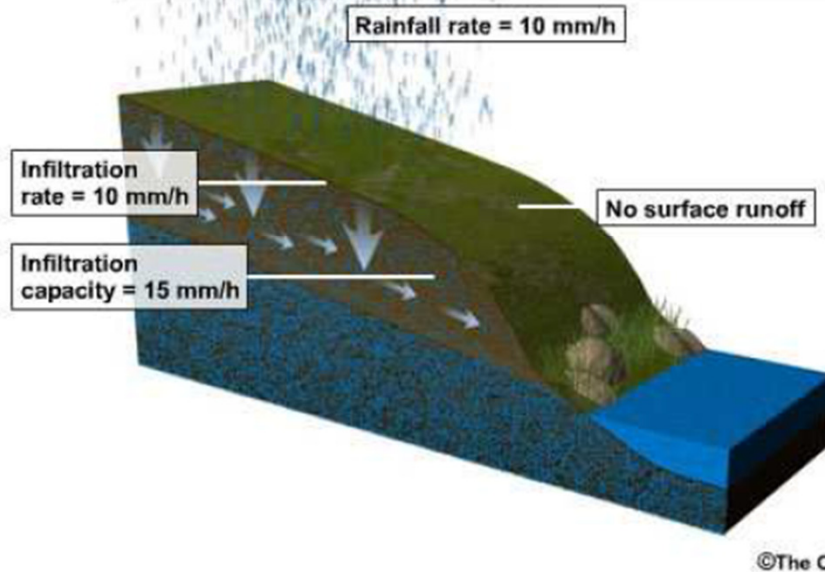
Note: Enlarged soil particles are not drawn to scale. ©The COMET Program



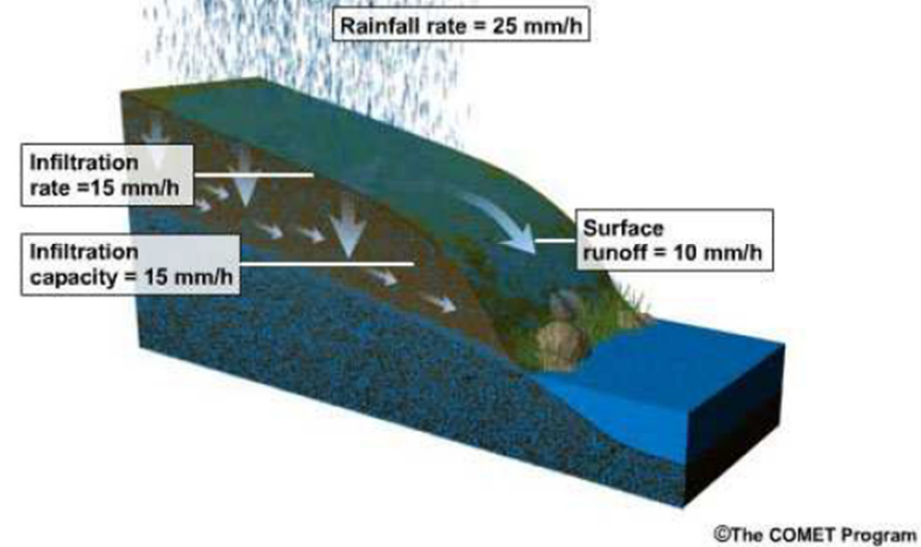


# Infiltration vs. Oberflächenabfluss

Relationship between Rainfall, Infiltration, and Runoff  
(Rainfall Rate  $\leq$  Infiltration Capacity)



Relationship between Rainfall, Infiltration, and Runoff  
(Rainfall Rate  $>$  Infiltration Capacity)



# Realisierung des effektivsten Transports



Quelle: [wikimedia.com](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earthworm.jpg) - CC BY 2.0

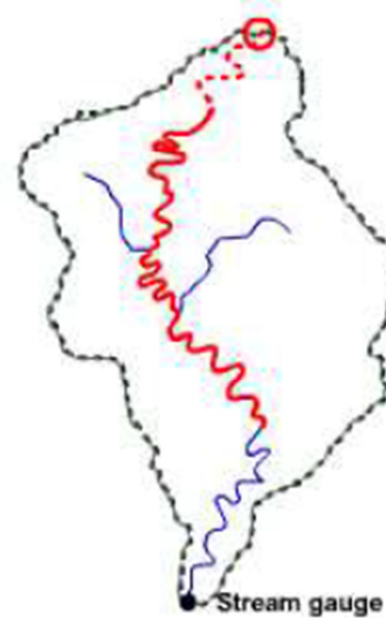
# Abfluss



Image Courtesy of FISRWG

# Abfluss

## Influence of Straight vs. Meandering Flowpath on Runoff

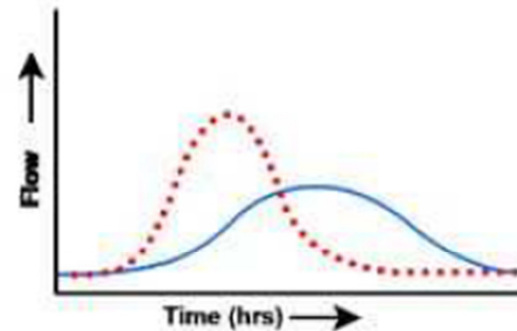
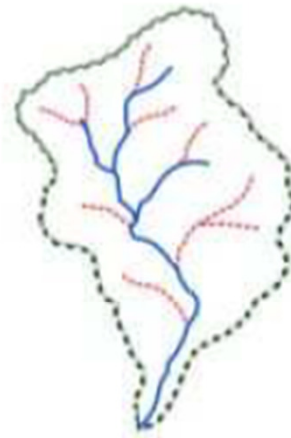


○ - Starting point for most remote runoff in basin

©The COMET Program

# Abfluss

## Influence of Stream Density on Runoff



For uniform rain coverage:

Compare high-stream density vs. low stream density

High stream density

Low stream density

Click radio button above to view animation.



©The COMET Program

Weitere Einflussfaktoren: z.B. Gewässerneigung, Einzugsgebietsform (lang und dünn oder kurz und breit);...

# Präferentielle Fließwege als effektivster Transportweg

## ■ Euler Zerlegung

$$\frac{d\psi}{dt} = \frac{\partial\psi}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla\psi$$

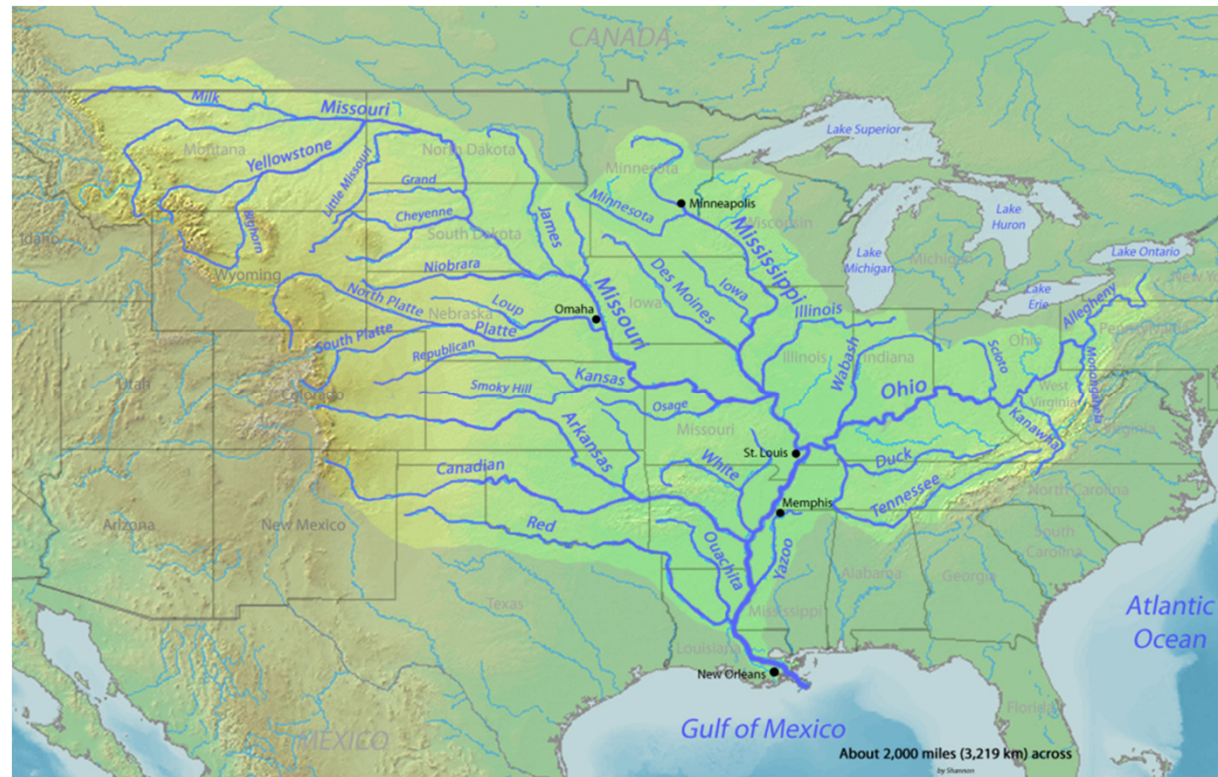
→ Grundsatz: optimale Leistung

Flächiger aber langsamer Transport ist wenig effektiv. Recht viel ‚Dissipationsverluste‘

→ Präferentielle Fließwege

# Präferentielle Fließwege

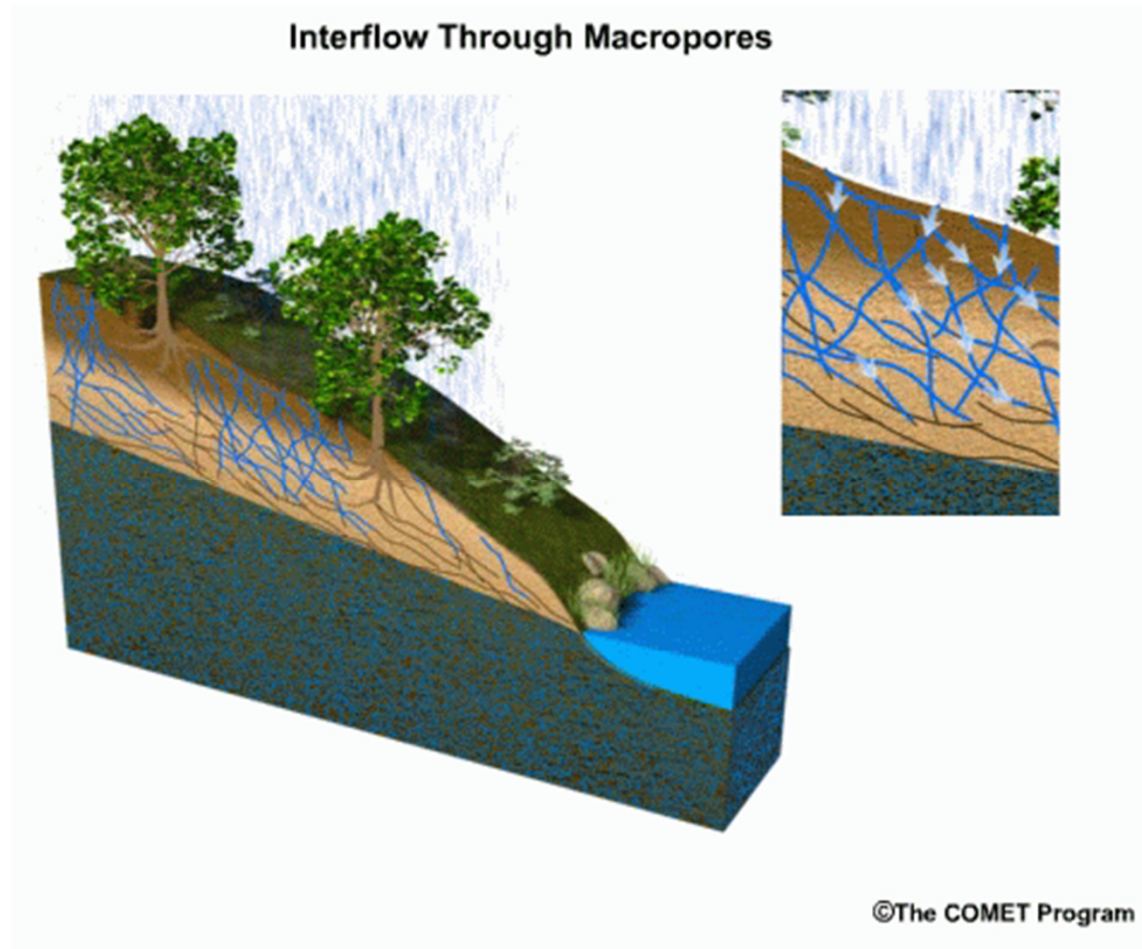
- Realisiert durch Flusssysteme



Quelle: wikipedia.com - <http://www2.demis.nl/mapserver/mapper.asp> CC BY-SA 4.0

# Präferentielle Fließwege - im Boden

- durch Makroporen

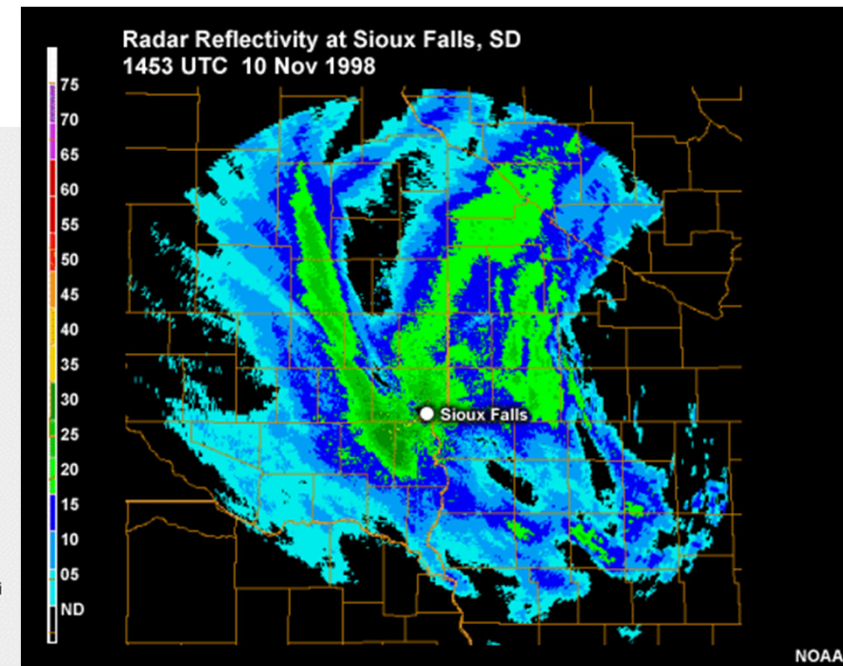
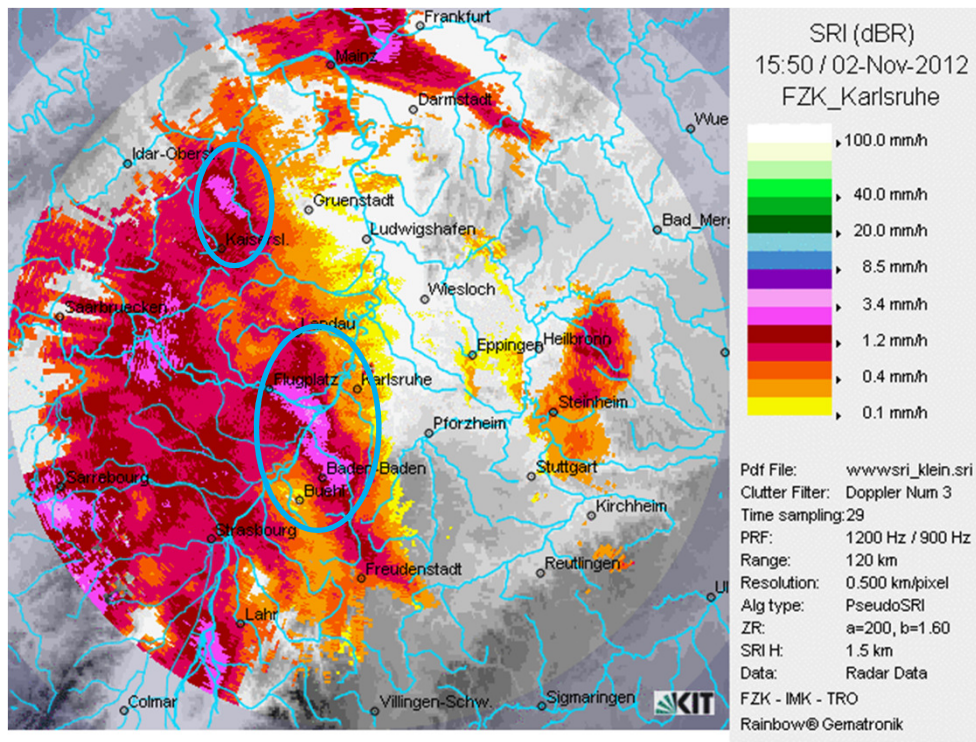


Quelle: [wikimedia.com](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Earthworm_in_soil.jpg) - CC BY 2.0



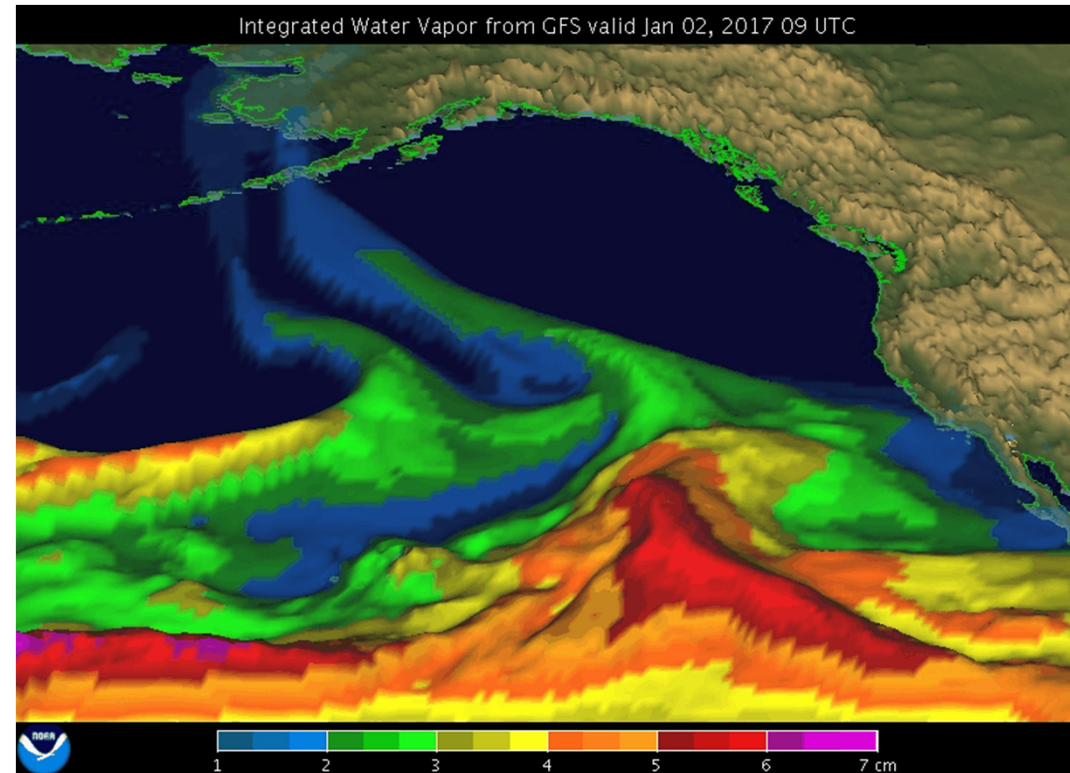
# Anmerkung stratiform – konvektiv (I)

- Bei stratiformen Niederschlägen findet man meist eingelagerte bandartige Strukturen:



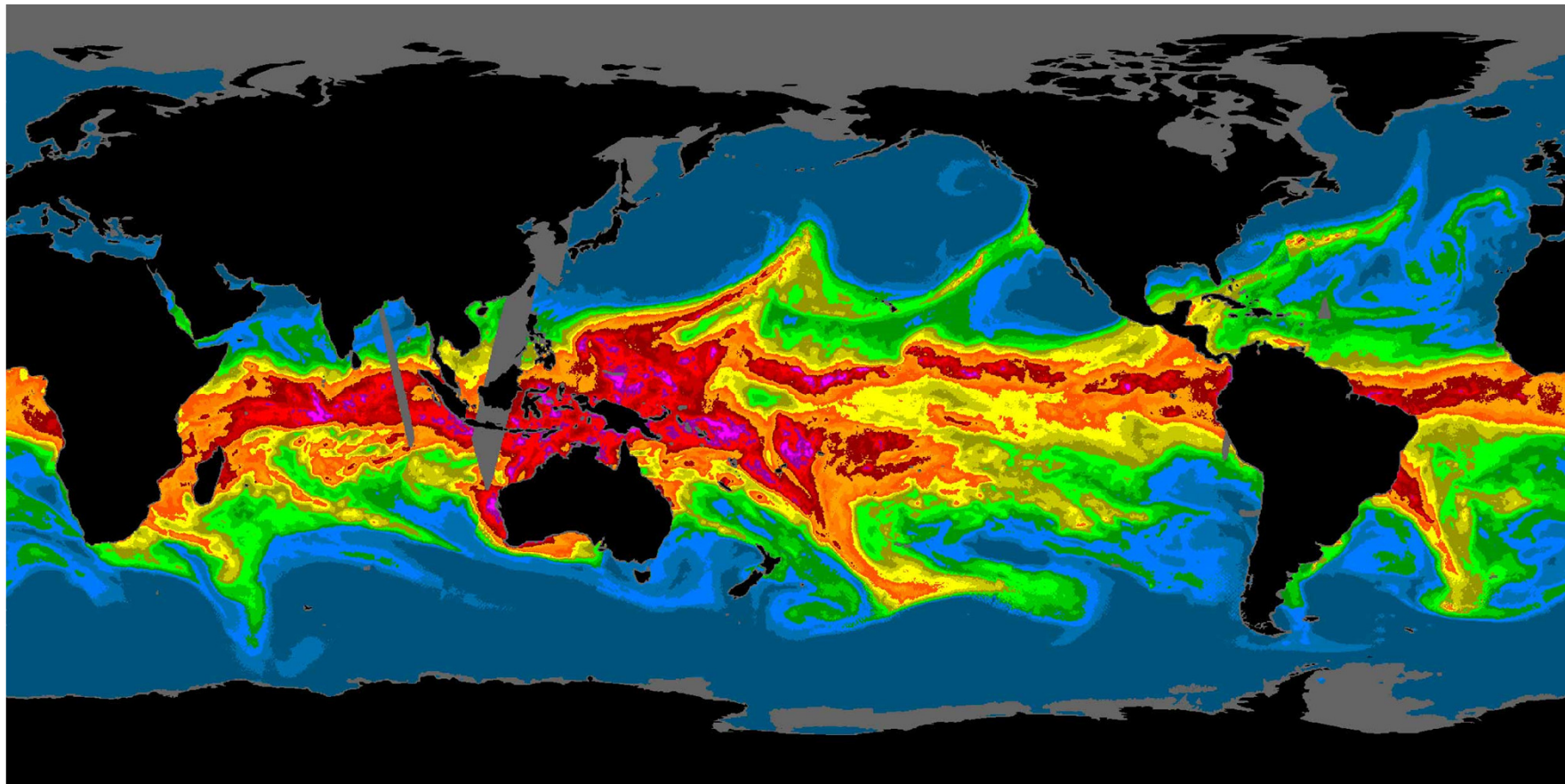
# Präferentielle Fließwege – in der Atmosphäre

- **Atmosphärische Flüsse**
- 400 - 600 km breite und bis zu mehrere tausend km lange Bänder feuchtigkeitsgesättigter Luft aus Äquatorialregionen in ca. 1 bis 2,5 km Höhe
- Modell Studien legen nahe, dass > 90% des gesamten Wasserdampftransportes vom Äquator in Richtung polarer Breiten sich auf die Atmosphärischen Flüssen konzentriert



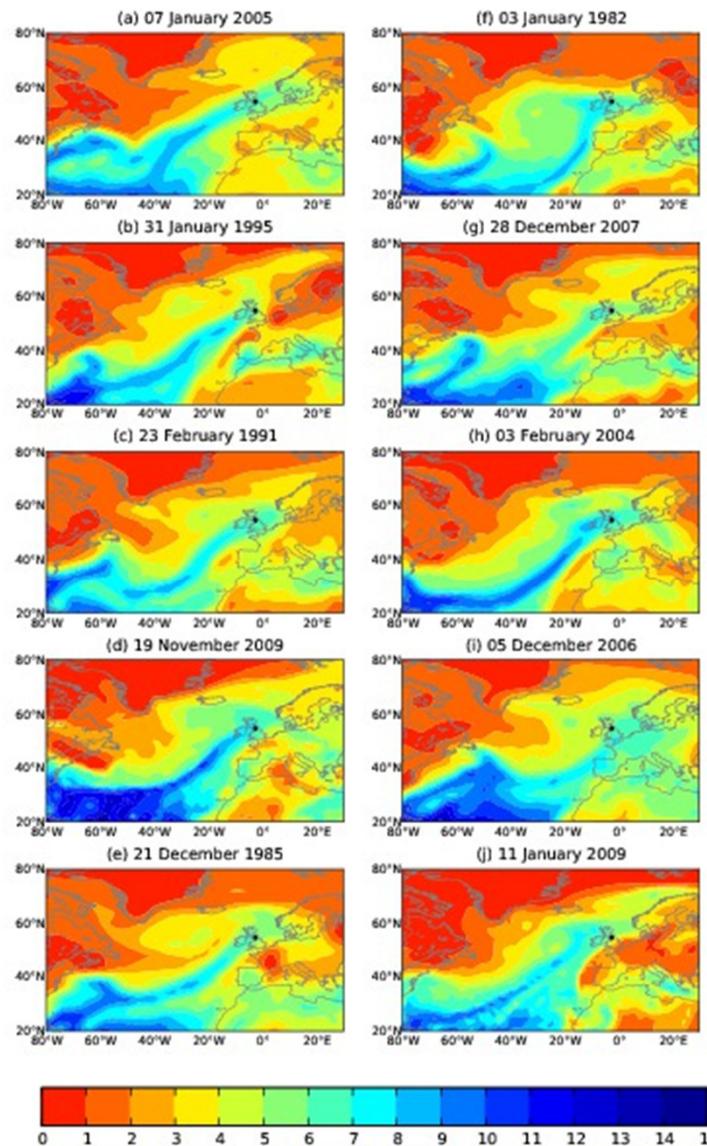
- Teil des "warm conveyor belt"

# Präferentielle Fließwege – Atmosphärische Flüsse



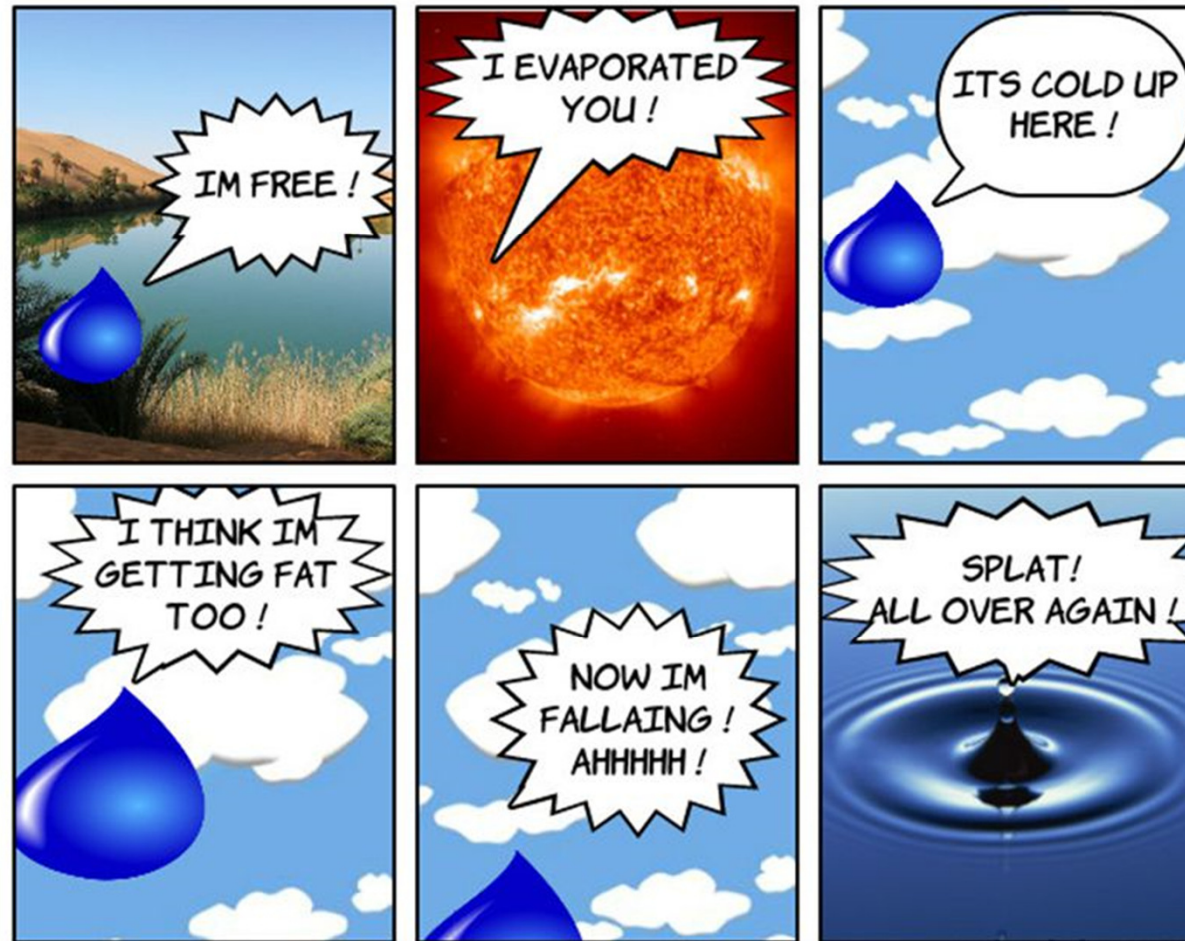
**Atmospheric river strikes California, February 2004. Image: NOAA ESRL**

# Präferentielle Fließwege – Atmosphärische Flüsse



Lavers et al., 2011 GRL

Integrated water vapor transport



made with chogger.com

<http://chogger.com/comics/EgYHk/the-water-droplets-life>