

Grundvorlesung Hydrologie

Die Ozeane und deren Bedeutung für das Erdsystem



<https://www.zdf.de/dokumentation/terra-x/themenpaket-meere-und-ozeane-100.html>

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. Räumliche Abgrenzung und Zonierung des ozeanischen Wasserkörpers
2. Temperaturprofil und Salinität
3. Windinduzierte Wellenbewegung und Oberflächenzirkulation
4. Thermohaline Zirkulation - Tiefenwasserbildung und deren Mechanismen
5. Ozean-Atmosphäre Wechselwirkungen

1. Räumliche Abgrenzung und Zonierung des ozeanischen Wasserkörpers

Die Bedeutung der Ozeane für das Erdsystem

Die Bedeutung der Ozeane für das Erdsystem

- Wärmetransport
- Wassertransport- und Lieferant für die Landmassen
- Elementare Wasser- und CO₂-Speicher
- Orte der Tiefenwasserbildung
- Antreiber von Klimavariabilität (*Atlantic Multidecadal Oscillation*) und Klimaextremen (*El-Nino*)
- Lebensraum und Nahrungsquelle

Die Ozeane



Laut *International Hydrographic Organization (IHO)* **5 Ozeane**

71 % der Erdoberfläche wird von Wassermassen bedeckt

Die Ozeane

Atlantischer Ozean

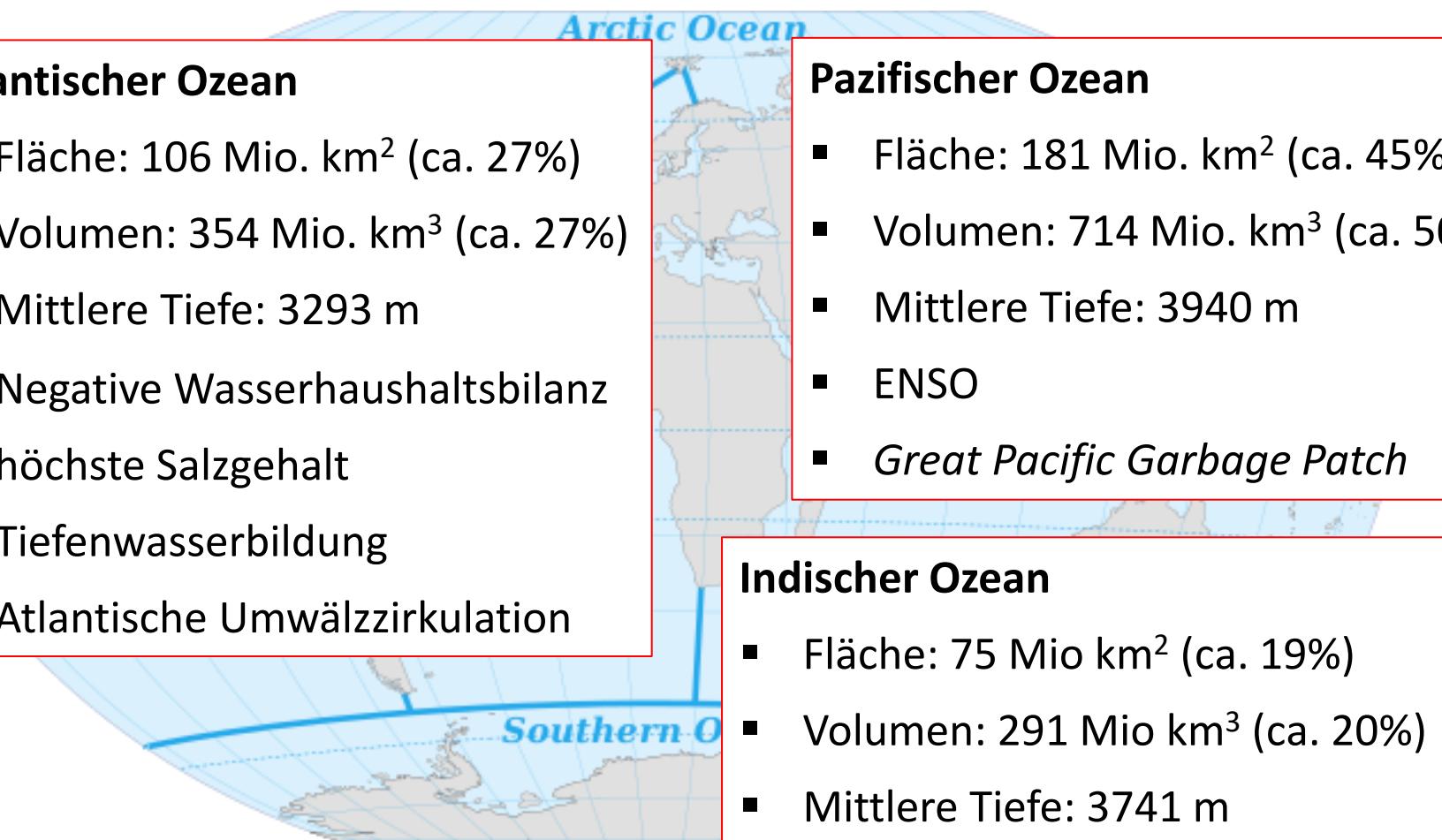
- Fläche: 106 Mio. km² (ca. 27%)
- Volumen: 354 Mio. km³ (ca. 27%)
- Mittlere Tiefe: 3293 m
- Negative Wasserhaushaltsbilanz
- höchste Salzgehalt
- Tiefenwasserbildung
- Atlantische Umwälzzirkulation

Pazifischer Ozean

- Fläche: 181 Mio. km² (ca. 45%)
- Volumen: 714 Mio. km³ (ca. 50%)
- Mittlere Tiefe: 3940 m
- ENSO
- *Great Pacific Garbage Patch*

Indischer Ozean

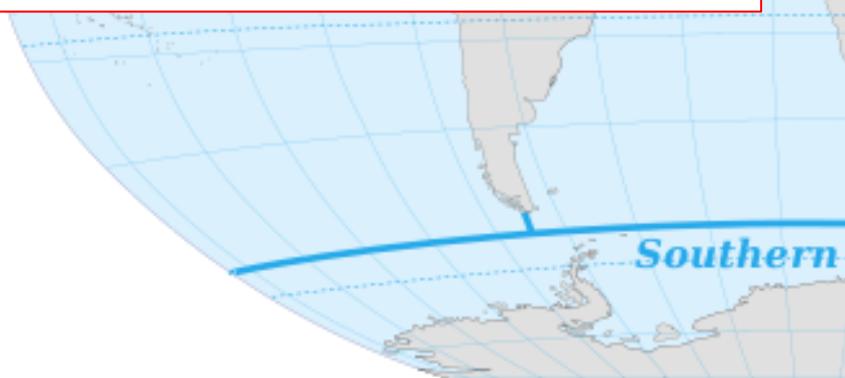
- Fläche: 75 Mio km² (ca. 19%)
- Volumen: 291 Mio km³ (ca. 20%)
- Mittlere Tiefe: 3741 m
- Wärmster Ozean
- Indian Ocean Dipole



Die Ozeane

Arktischer Ozean

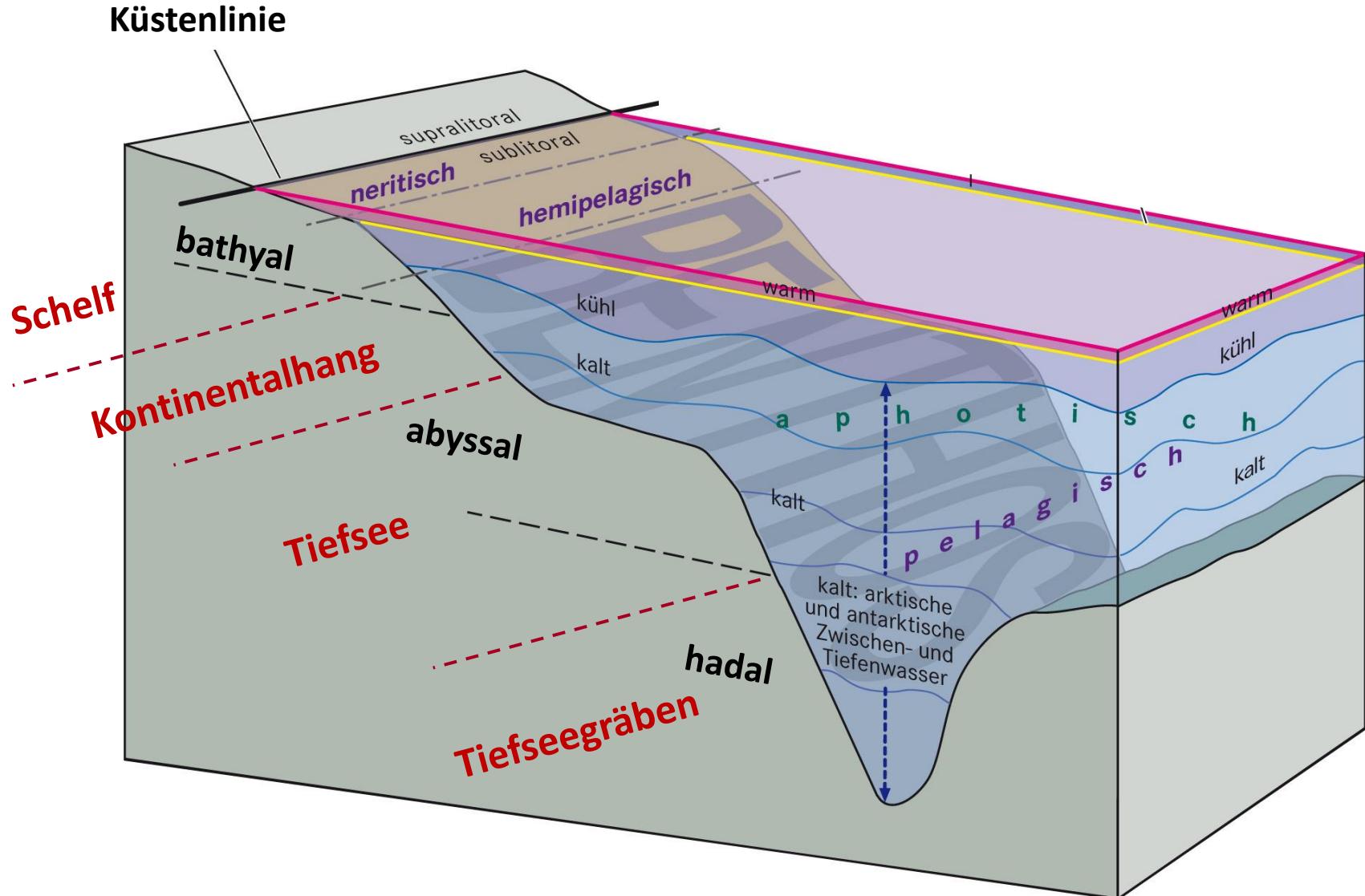
- Fläche: 15 Mio km² (ca. 4%)
- Volumen: 354 Mio km³ (ca. 27%)
- Mittlere Tiefe: 987 m
- Positive Wasserhaushaltsbilanz
- Ca. 40% Meereis – Energiehaushalt der Erde



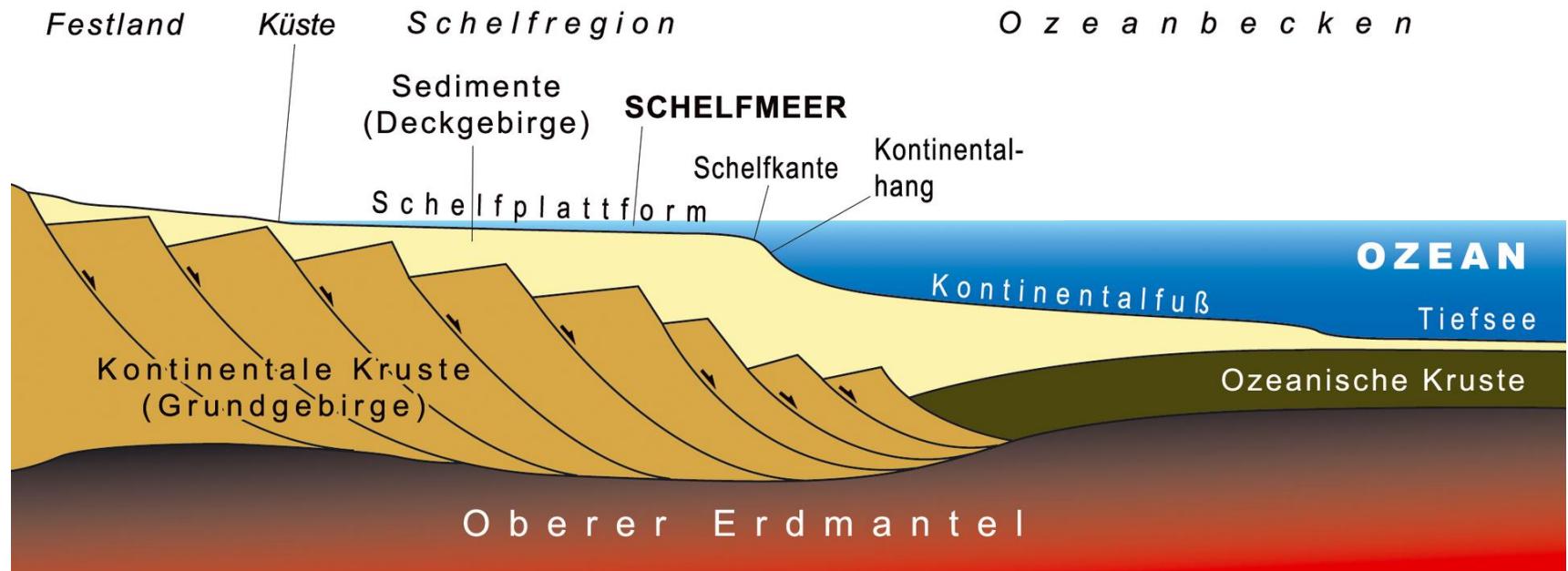
Antarktischer Ozean

- Fläche: 20 Mio km² (ca. 5%)
- Volumen: 354 Mio km³ (ca. 27%)
- Mittlere Tiefe: 1038 m
- Tiefenwasserbildung
- Antarktische Zirkumpolarstrom und Konvergenzzone

Vertikale Untergliederung der Ozeane

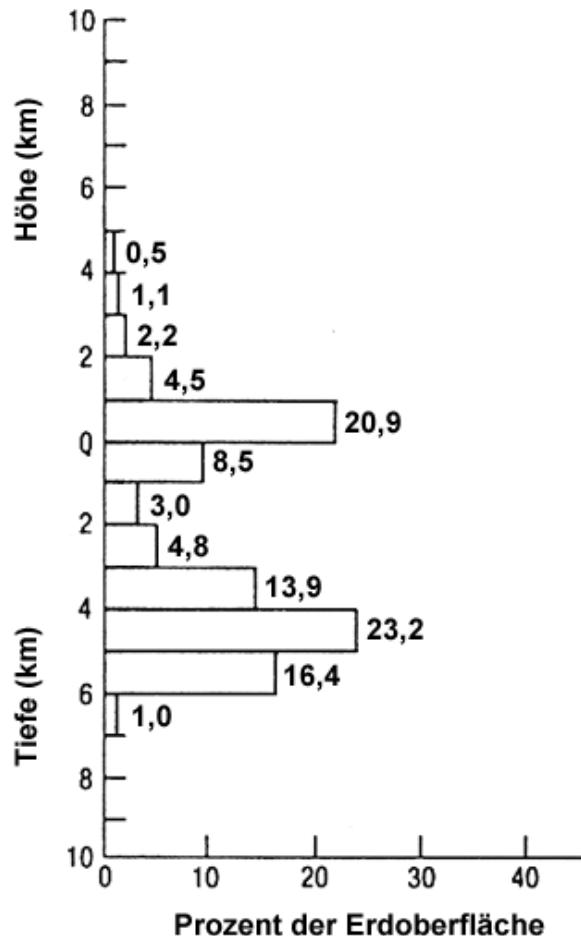


Schematisches Profil des Kontinentalrandes



<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=24491080>

Gebirgshöhen und Meerestiefen



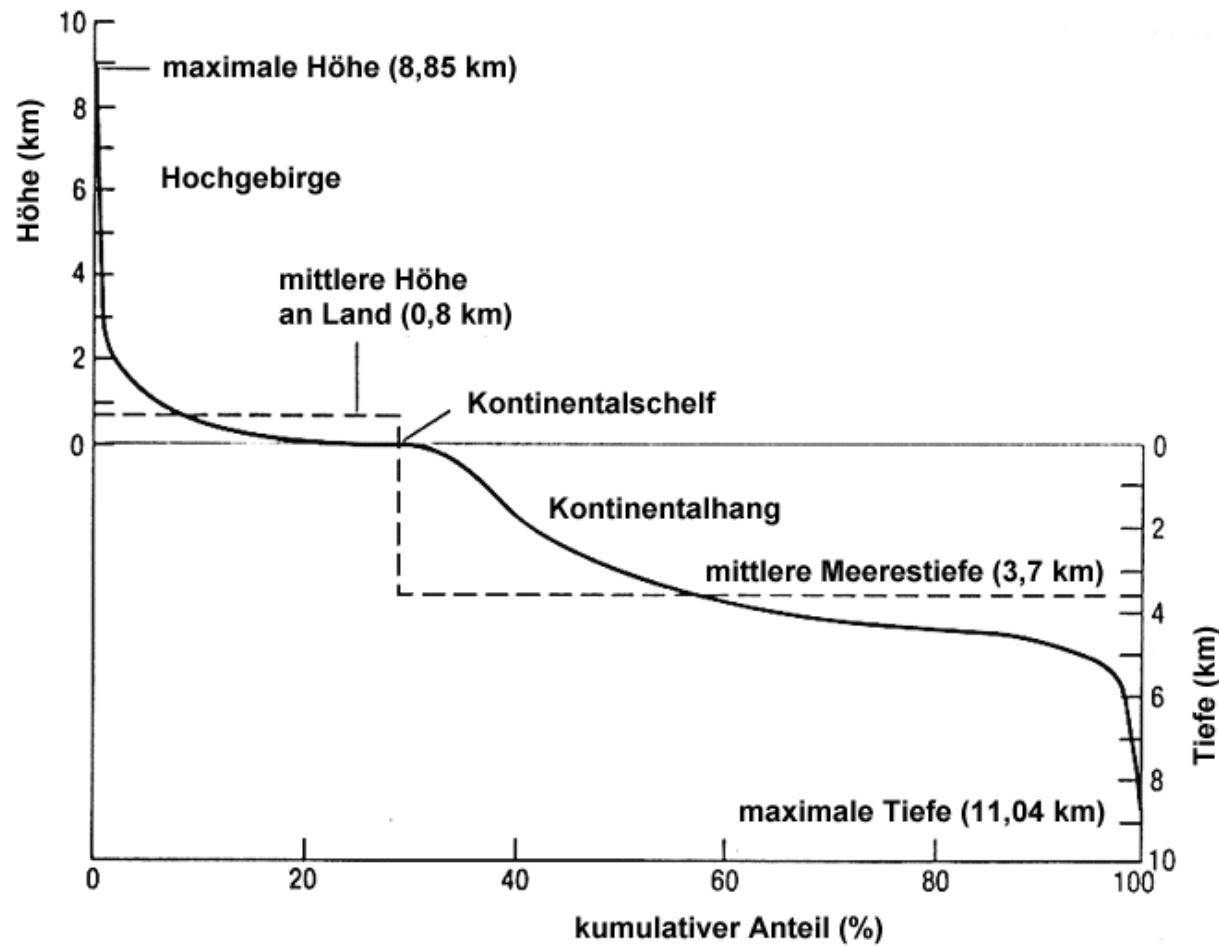
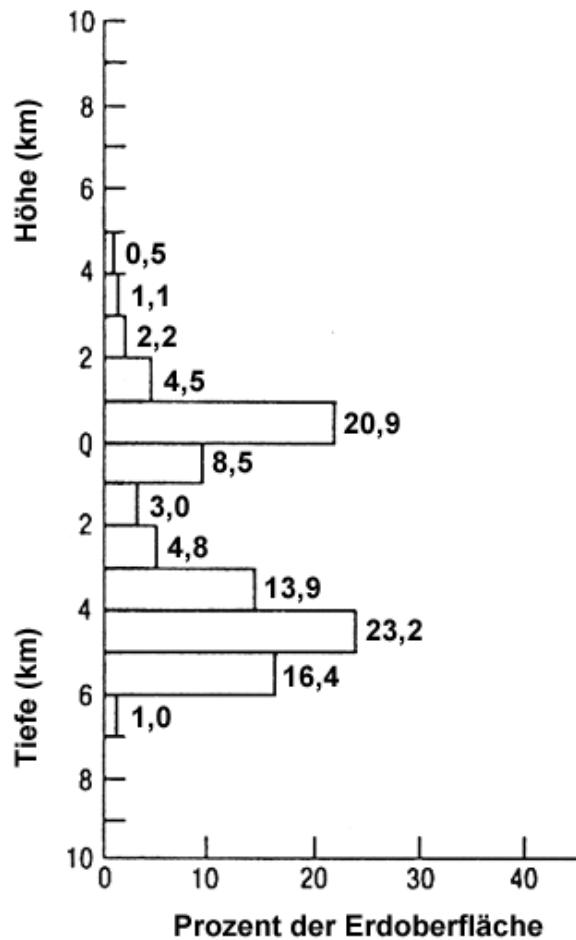
Bimodaler Verlauf:

- 1. Maximum: Küsten / Kontinentalschelf &
- 2. Maximum: Tiefsee (mittleren Meerestiefen)

https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/EarthHypso_german.png

rel. Flächenanteile und Summenkurve (hypsographische Kurve) der Häufigkeitsverteilung für Gebirgshöhen und Meerestiefen

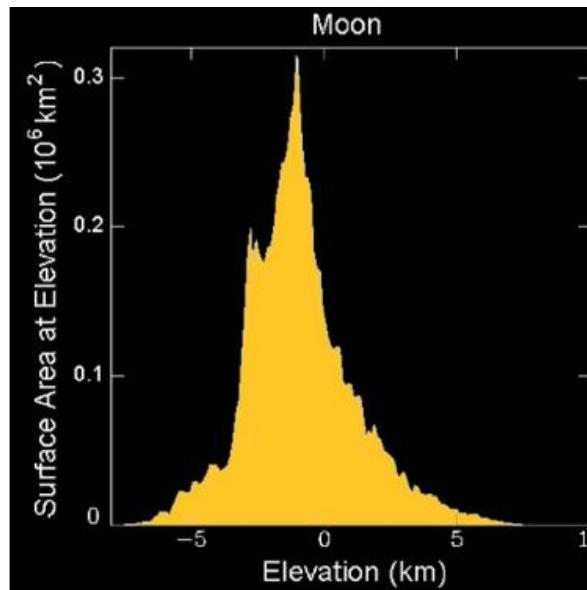
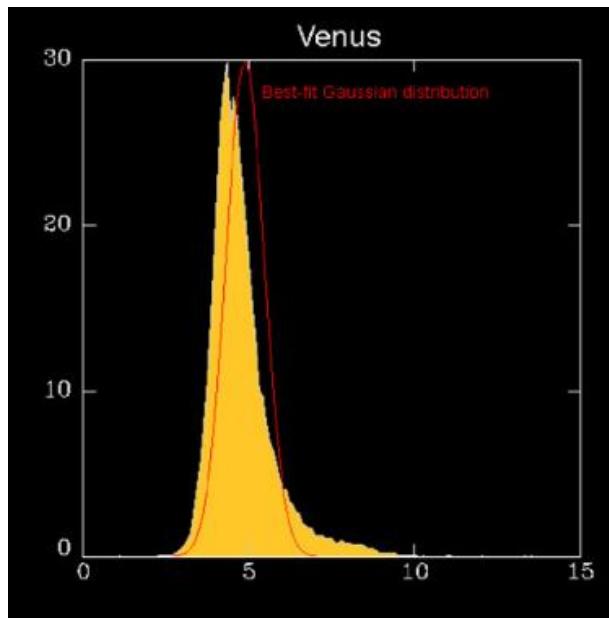
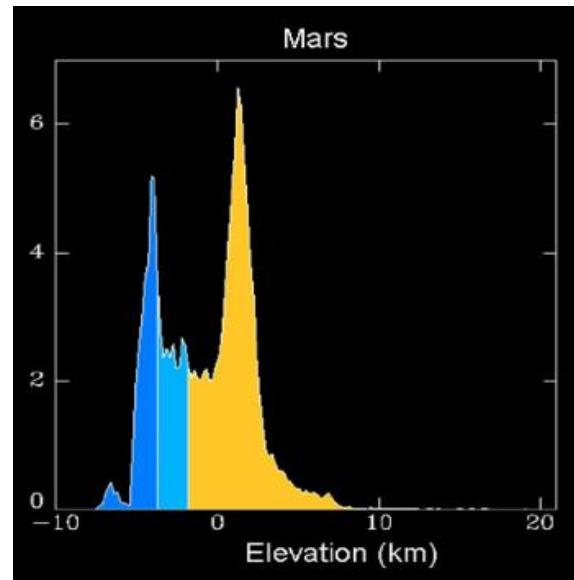
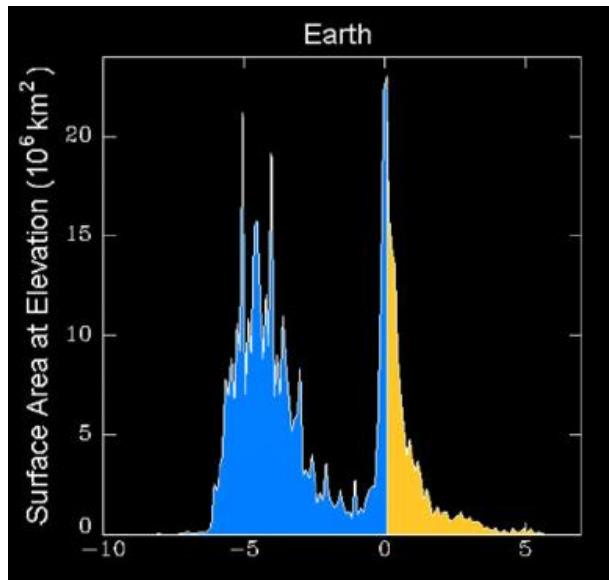
Gebirgshöhen und Meerestiefen



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/EarthHypso_german.png

rel. Flächenanteile und Summenkurve (hypsographische Kurve) der Häufigkeitsverteilung für Gebirgshöhen und Meerestiefen

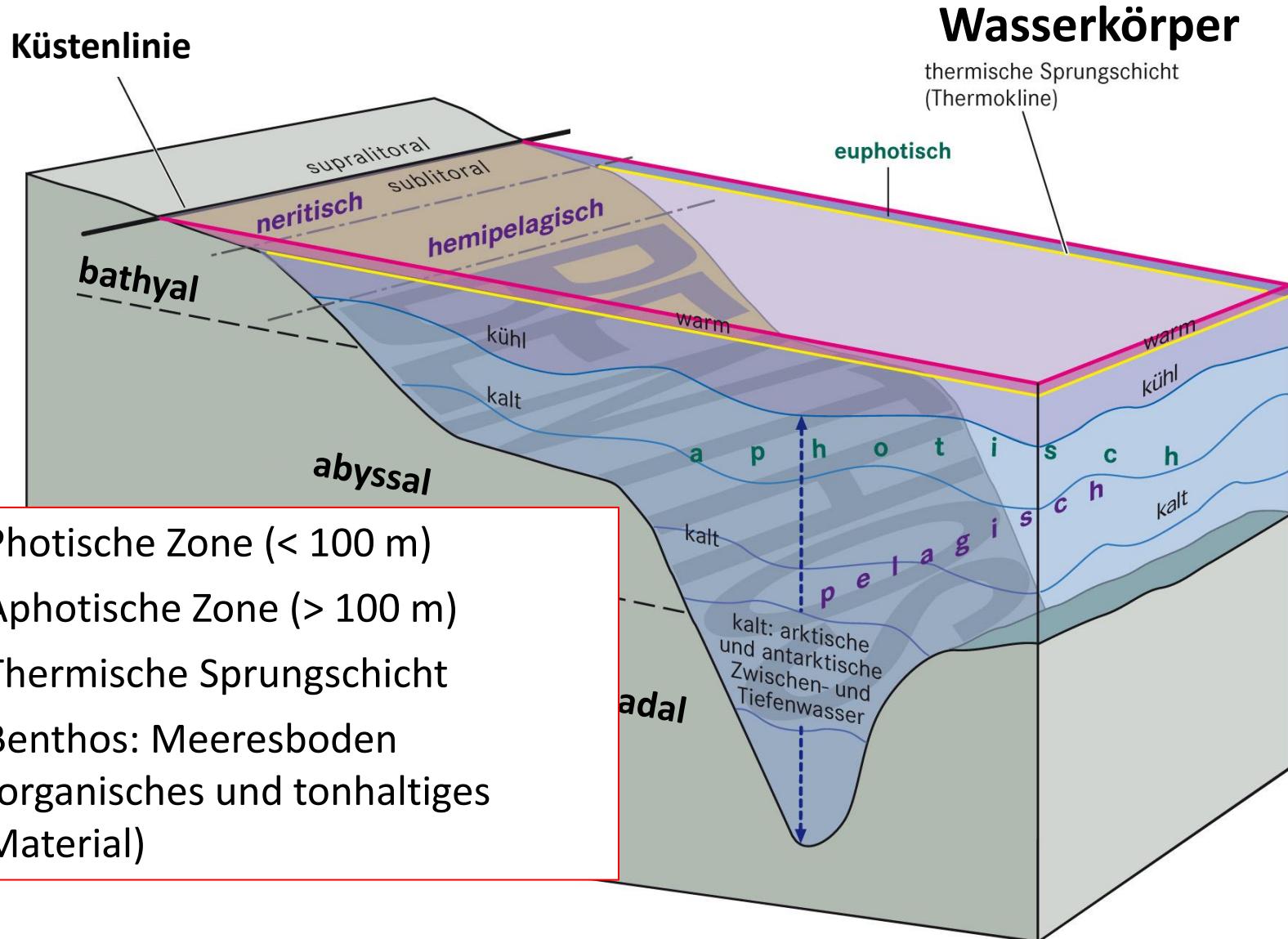
Hypsographische Kurve



Stoddard and Jurdy (2012),
<https://doi.org/10.1016/j.icarus.2011.09.003>

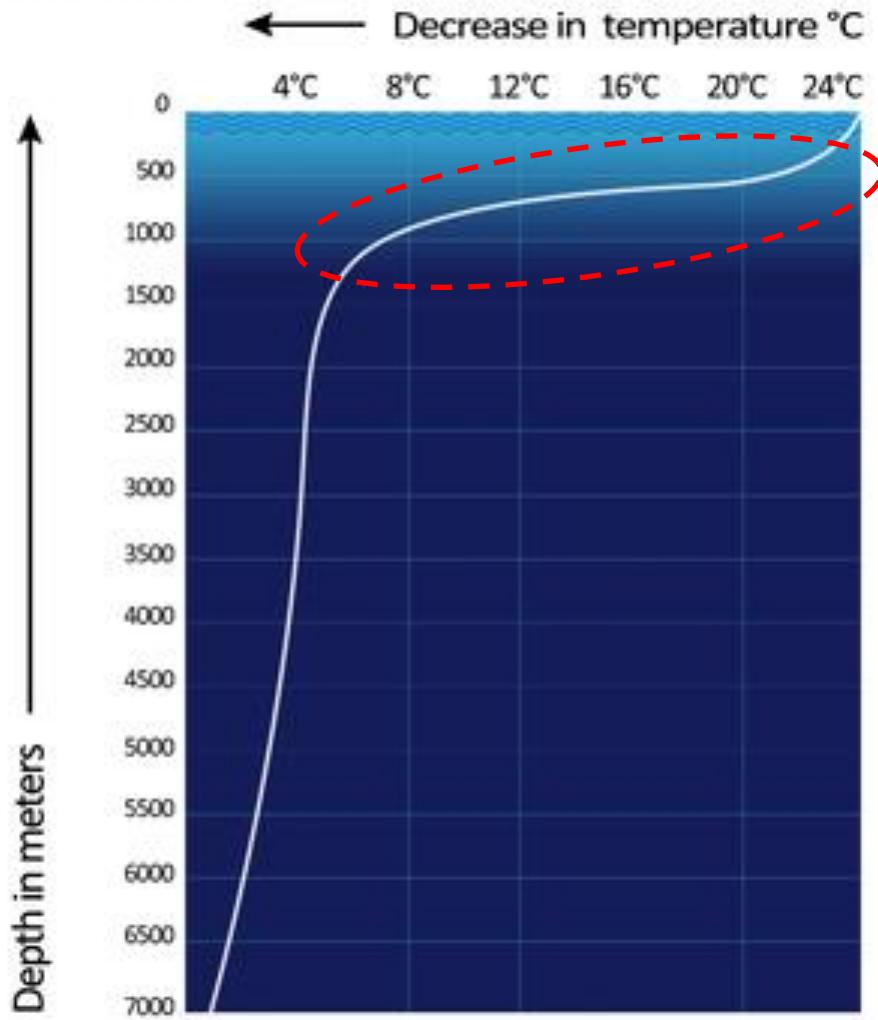
2. Temperaturprofil und Salinität der Ozeane

Die Ozeane – Zonierung



Vertikales Temperaturprofil der Ozeane

THERMOCLINE



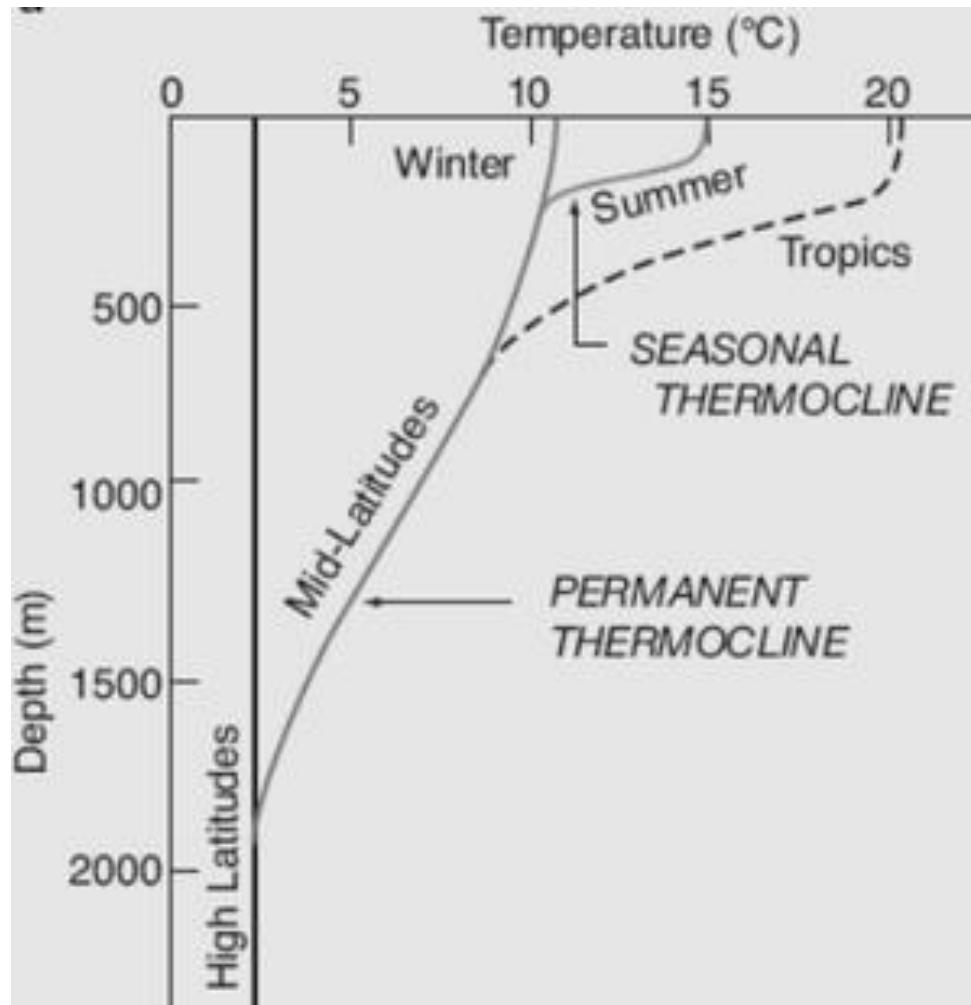
<https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/cb/THERMOCLINE.png>

Thermokline (Sprungschicht): starker Temperaturgradienten zwischen 200 m und 1000 m

Was ist die Folge der Thermokline ?

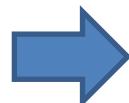
1. Starke Dichtezunahme mit größer werdender Tiefe
2. Sehr stabile Schichtung, je stärker die Thermokline ausgeprägt ist
3. Keine vertikale Durchmischung
4. „ähnlich einer Inversionswetterlage in der Atmosphäre“

Vertikales Temperaturprofil der Ozeane



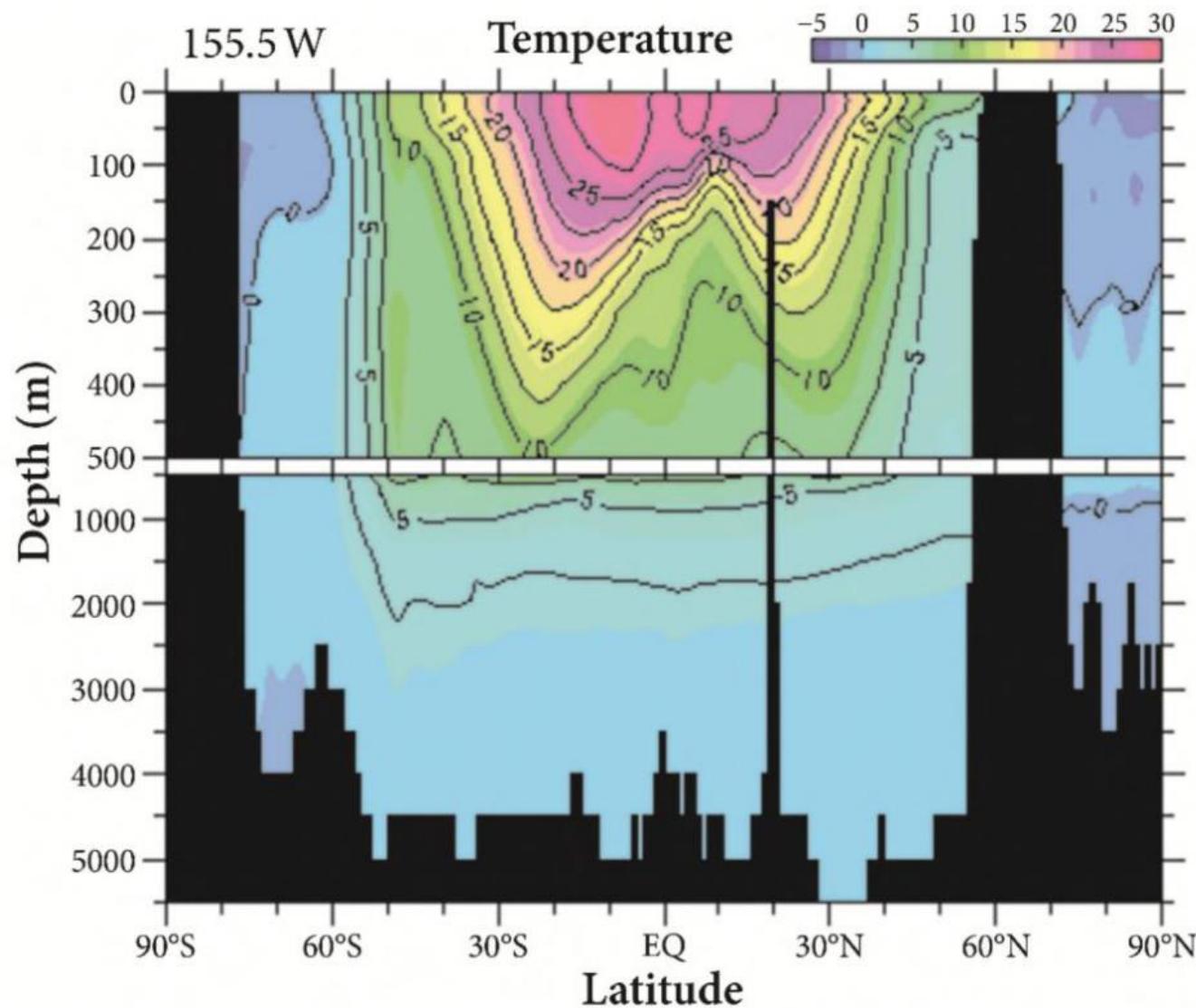
- Thermokline ist stark breitenabhängig
- Tropen viel stärker ausgeprägt als in den Mittelbreiten und den polaren Gebieten
- Saisonale Effekte sind vorhanden, aber weniger stark ausgeprägt
- Breitenabhängiger Einfluss verringert sich mit der Tiefe

<https://en.wikipedia.org/wiki/Thermocline#/media/File:ThermoclineSeasonDepth.png>

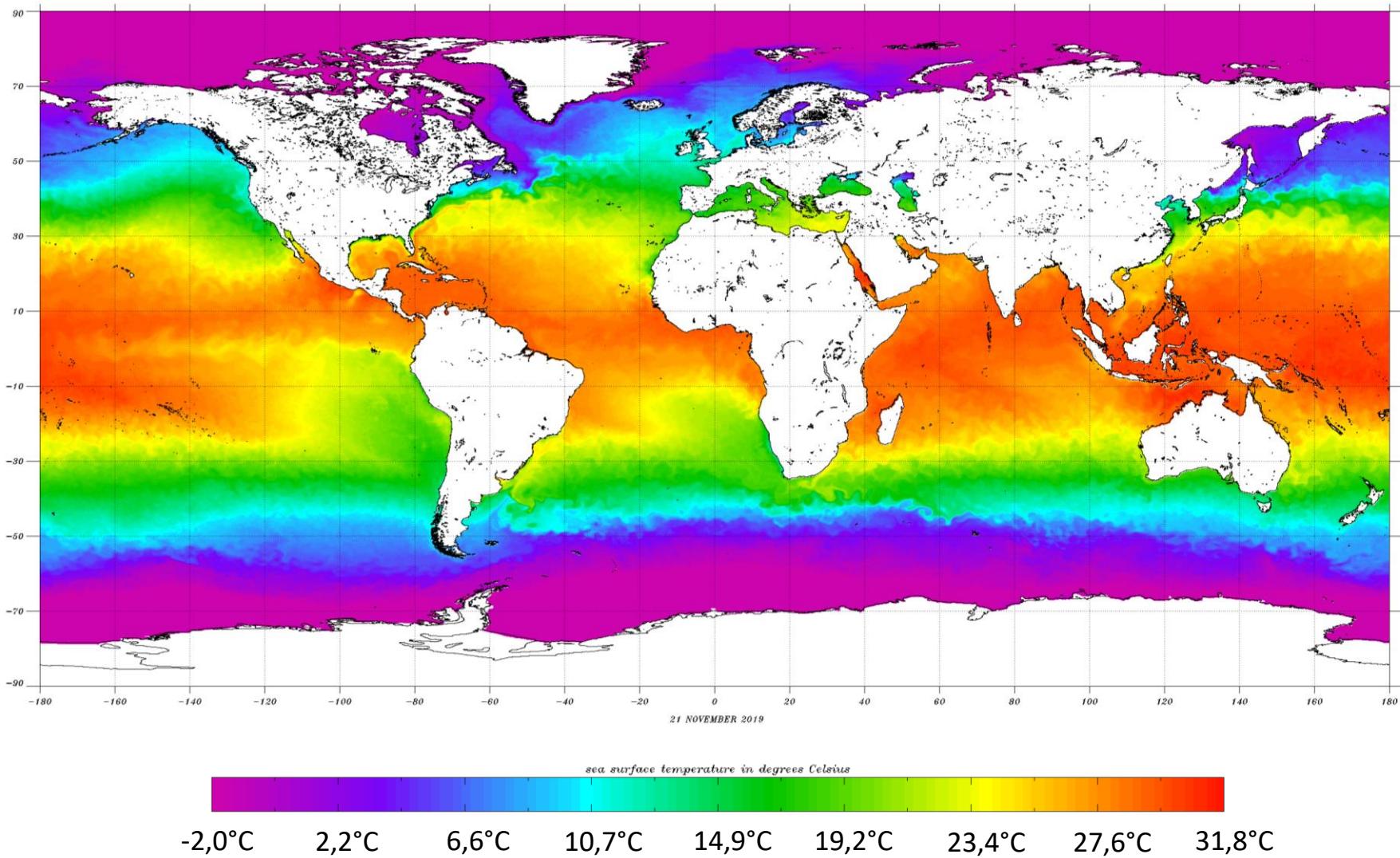


Ausprägung der Thermokline nimmt mit der Breite stark ab!

Vertikales Temperaturprofil – Pazifischer Ozean

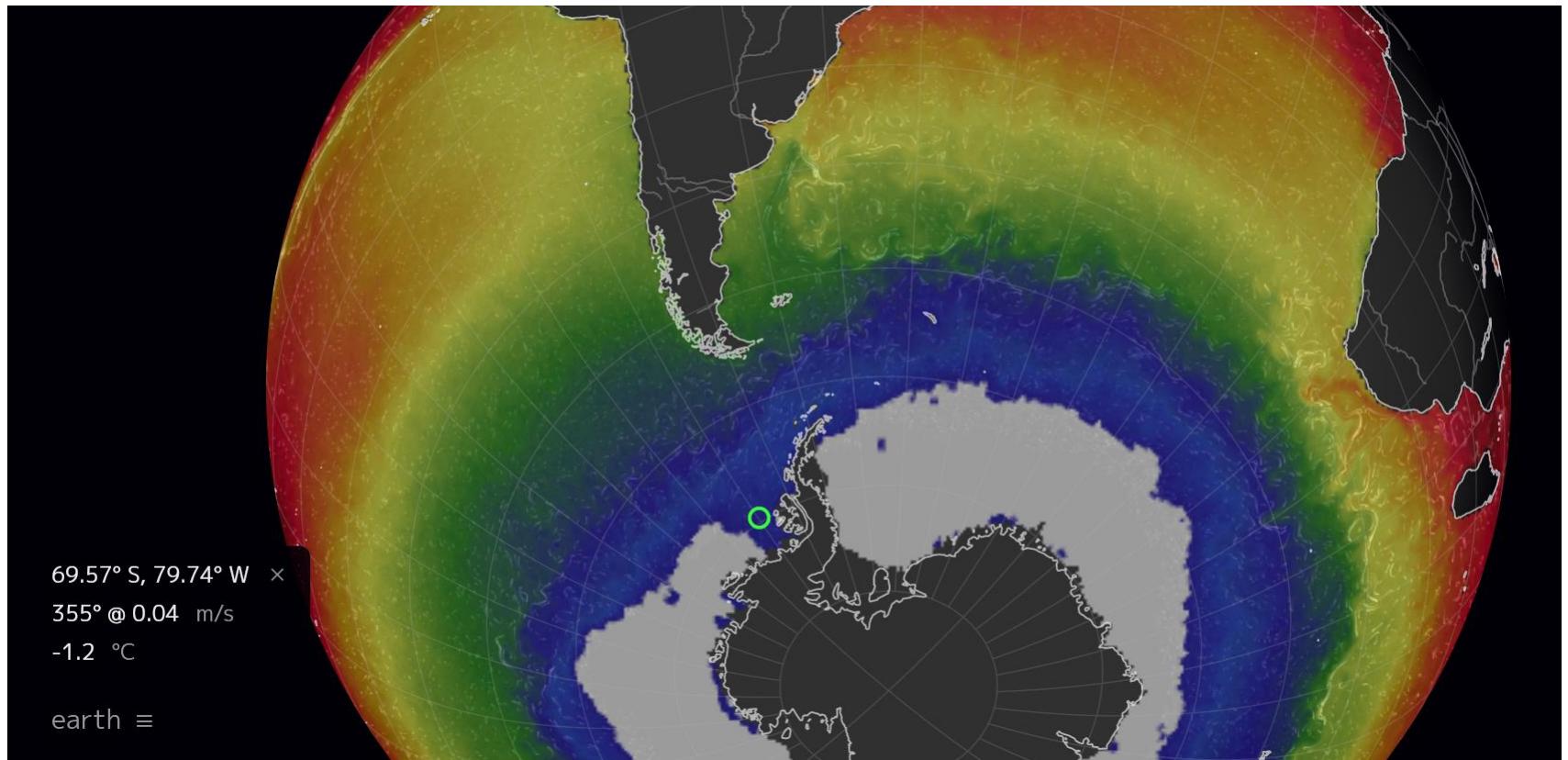


Die Ozeane - Oberflächentemperatur



https://www.ospo.noaa.gov/data/sst/contour/global_small.cf.gif

Meeresoberflächentemperatur



siehe unter <https://earth.nullschool.net> → Ocean → SST (Sea Surface Temperature)

Meeresoberflächentemperatur nahe dem Meereis deutlich unterhalb von 0°C in der Antarktis oder Arktis

Dichteanomalie und Salzgehalt

Die Dichte von Wasser ist abhängig vom Salzgehalt

Salzgehalt S	0	0,5	1,0	2,0	3,0	4,0	%
$(\rho - 1) \cdot 1000$	1,0	3,9	7,7	15,3	22,9	30,6	g/cm^3
$T(\rho_{max})$	3,95	2,85	1,86	-0,31	-2,47	-4,54	$^\circ\text{C}$

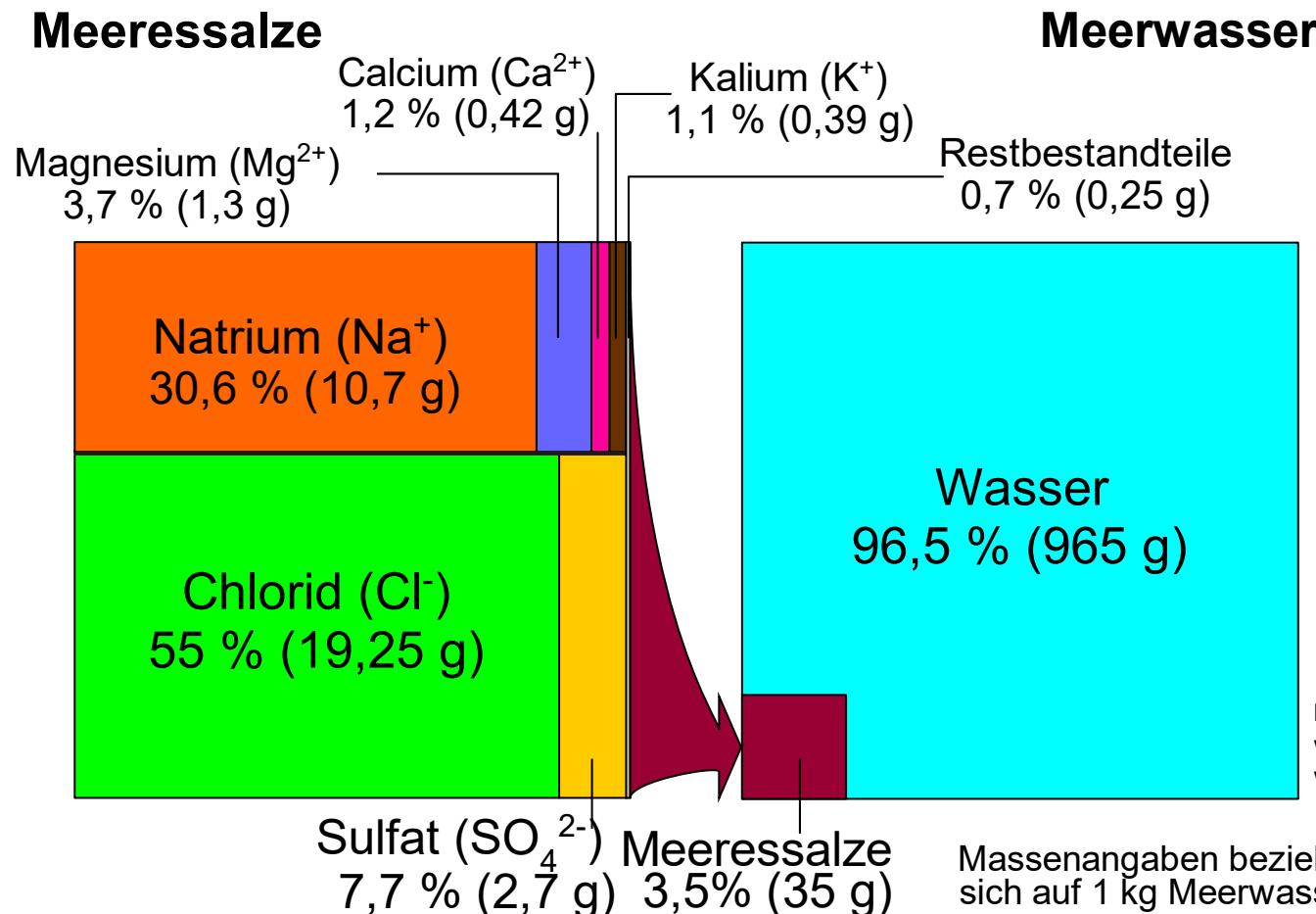
Baumgartner & Liebscher (1996, S.60)

Tabelle 3.8.

Dichte ρ und Temperatur des Dichtemaximums $T(\rho_{max})$ in Abhängigkeit vom Salzgehalt S .

- deutlicher Effekt für das Maximum der Dichteanomalie (von 4°C zu –4°C)
- Meerwasser (4% Salzgehalt) gefriert daher erst deutlich unterhalb von 0°C
- Tiefenwasserbildung im Ozean sehr bedeutsam

Salinität des Meerwassers

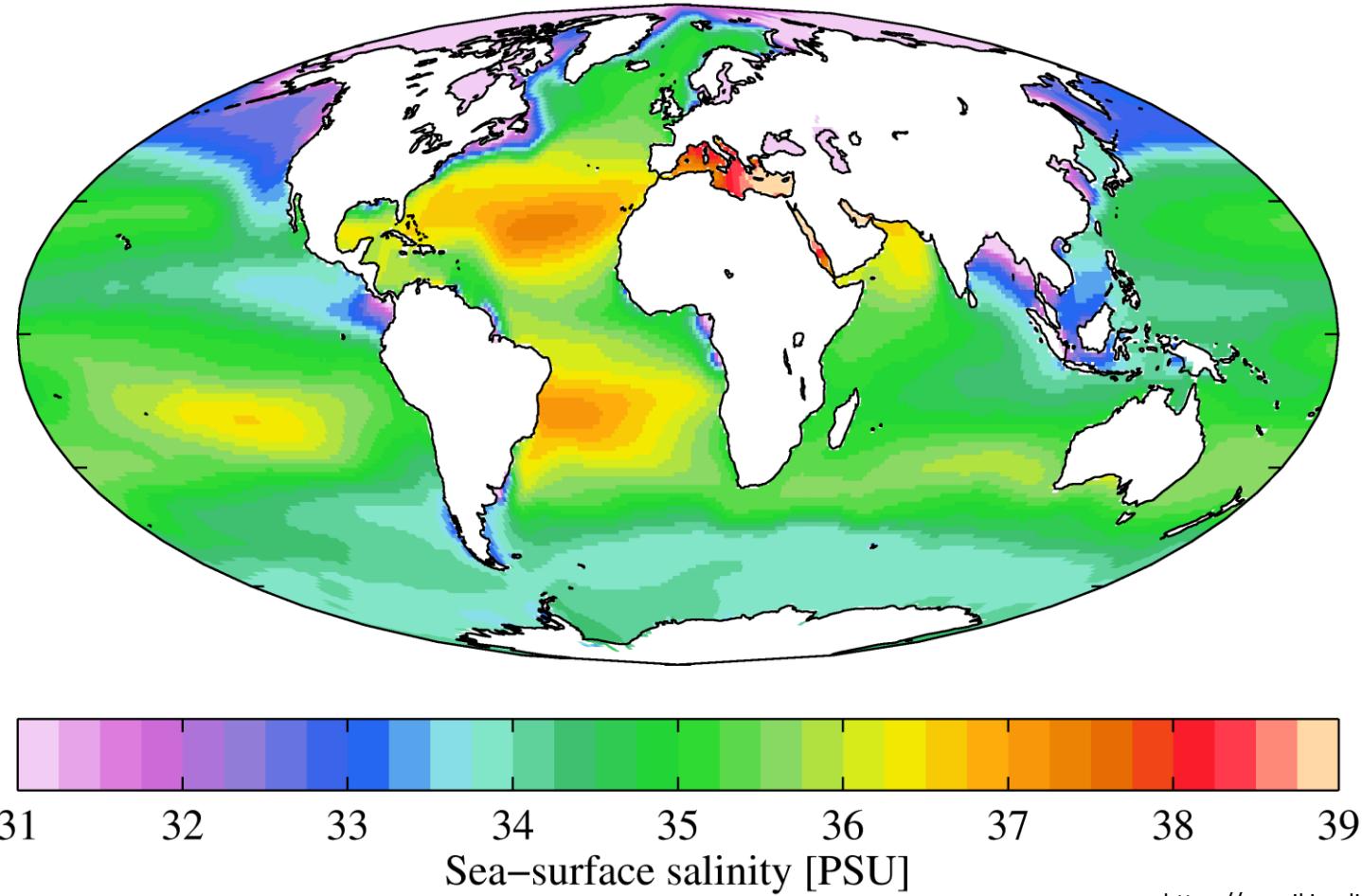


- Der mittlere Salzgehalt beträgt 3,5 % mit Schwankungen zwischen 3,1 und 3,8 % und der Hauptbestandteil ist NaCl

Unterteilung des Wasser nach Salinitätsgraden

- **Süßwasser: 0 bis 0,5%** - Trinkwasser (< 0,1%), landwirtschaftliche nutzbar Wasser (< 0,2%)
- **Brackwasser: 0,5% bis 3 %** - Flussmündungen wie Mangroven, Schwarzes Meer (1,8%) und Ostsee (0,8%)
- **Salzwasser: 3% bis 5%** - mittlerer Salzwassergehalt Ozean (3,47%), Mittelmeer (3,8%), Rotes Meer (4%)
- **Hypersalines Wasser (Sole): > 5%**, Aralsee (8%), Totes Meer (34%), Don Juan Pond (40%)

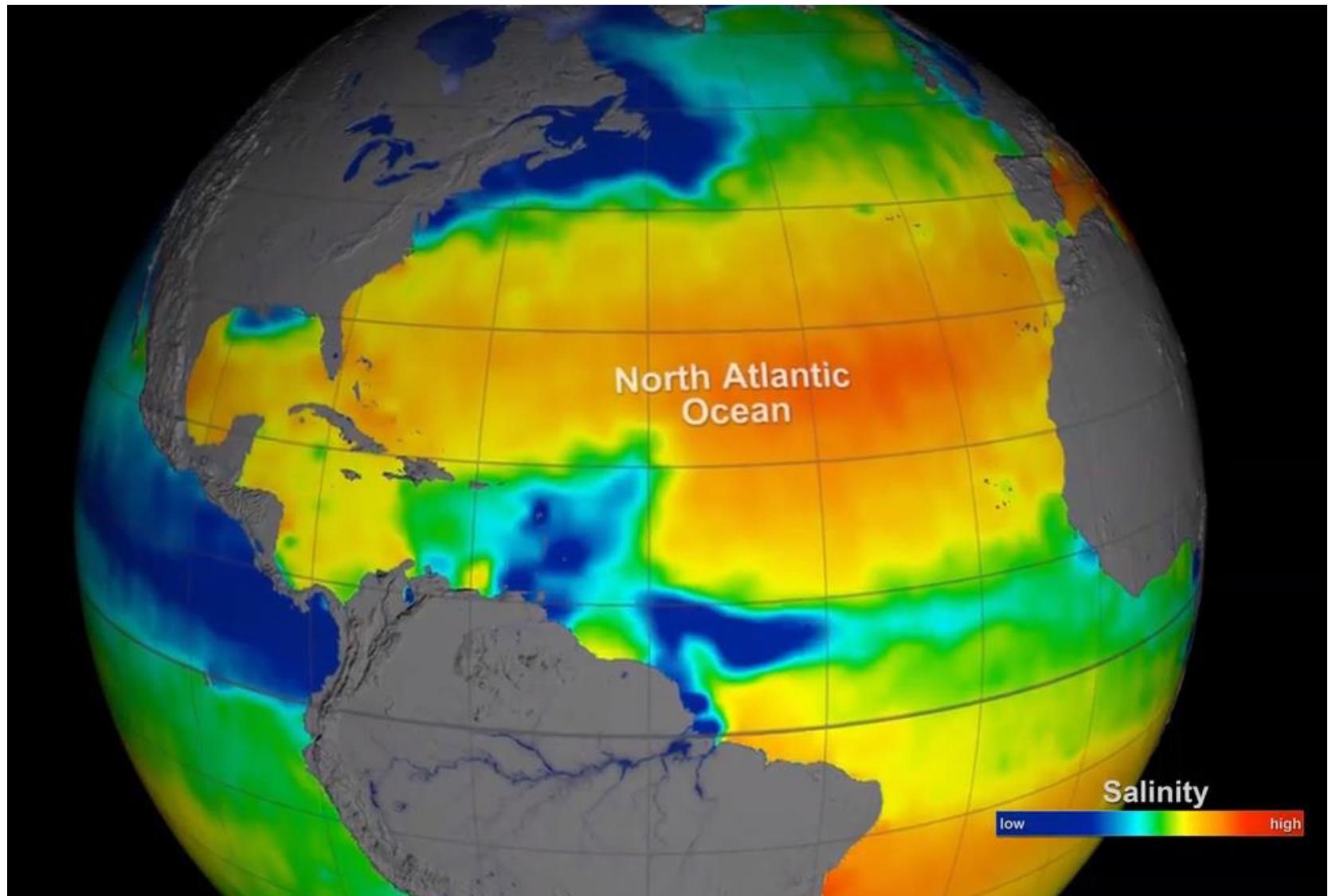
Räumliche Verteilung des Salzgehaltes



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

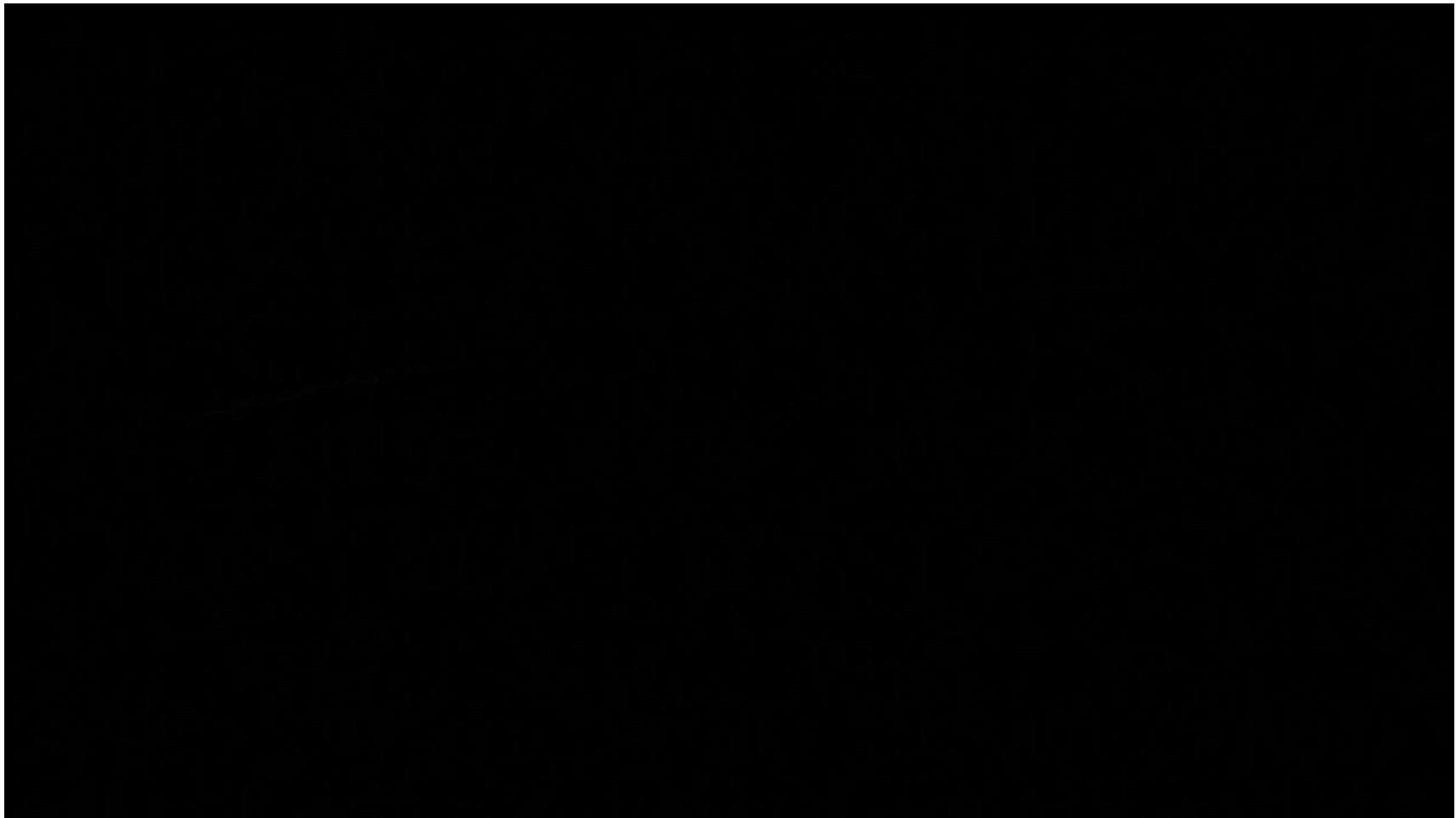
- Der Salzgehalt weist große **räumliche Unterschiede** auf
- Welche Regionen zeigen hohe Salzgehalte und warum?

NASA Aquarius Mission: „One Year of Observing Salty Seas“



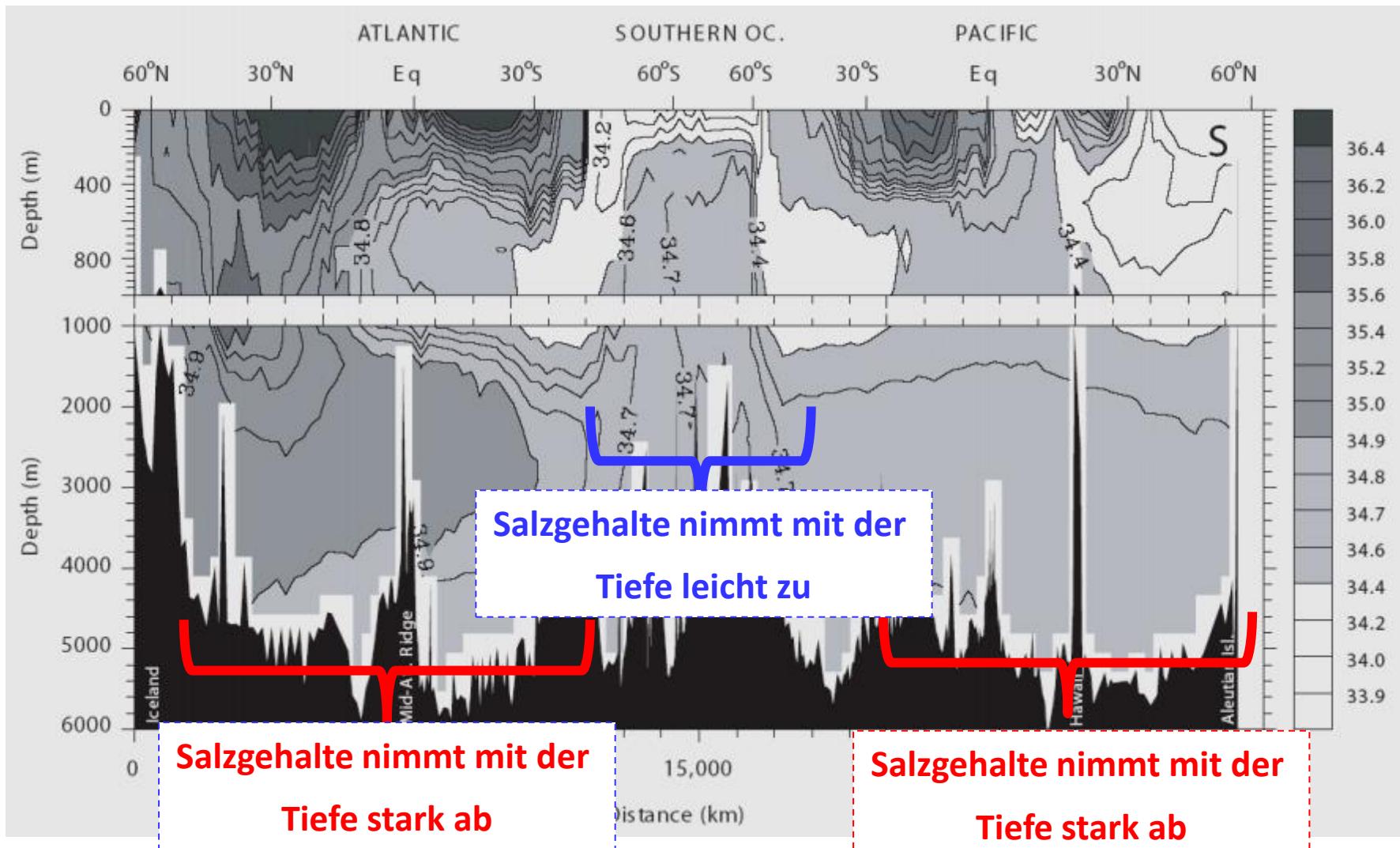
https://www.youtube.com/watch?v=5xQP_B18vMw

NASA Aquarius Mission: „One Year of Observing Salty Seas“

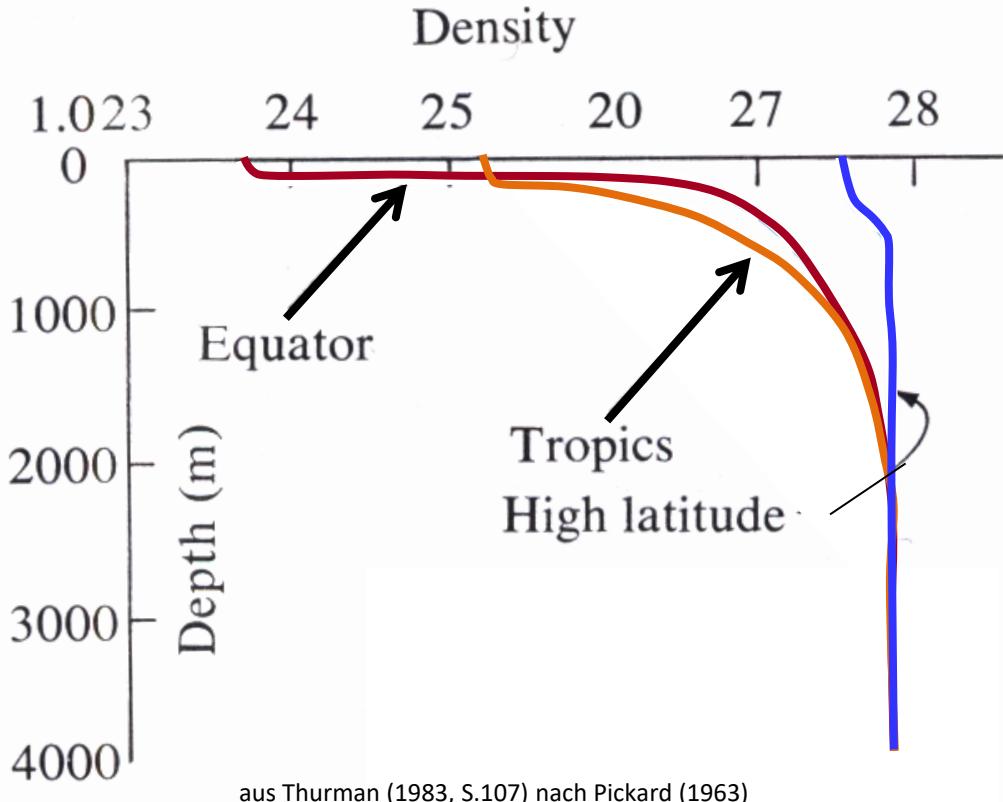


https://www.youtube.com/watch?v=5xQP_B18vMw

Salzgehalte im Tiefen- und Breitenprofil



Vertikale Dichteverteilung & Pyknokline



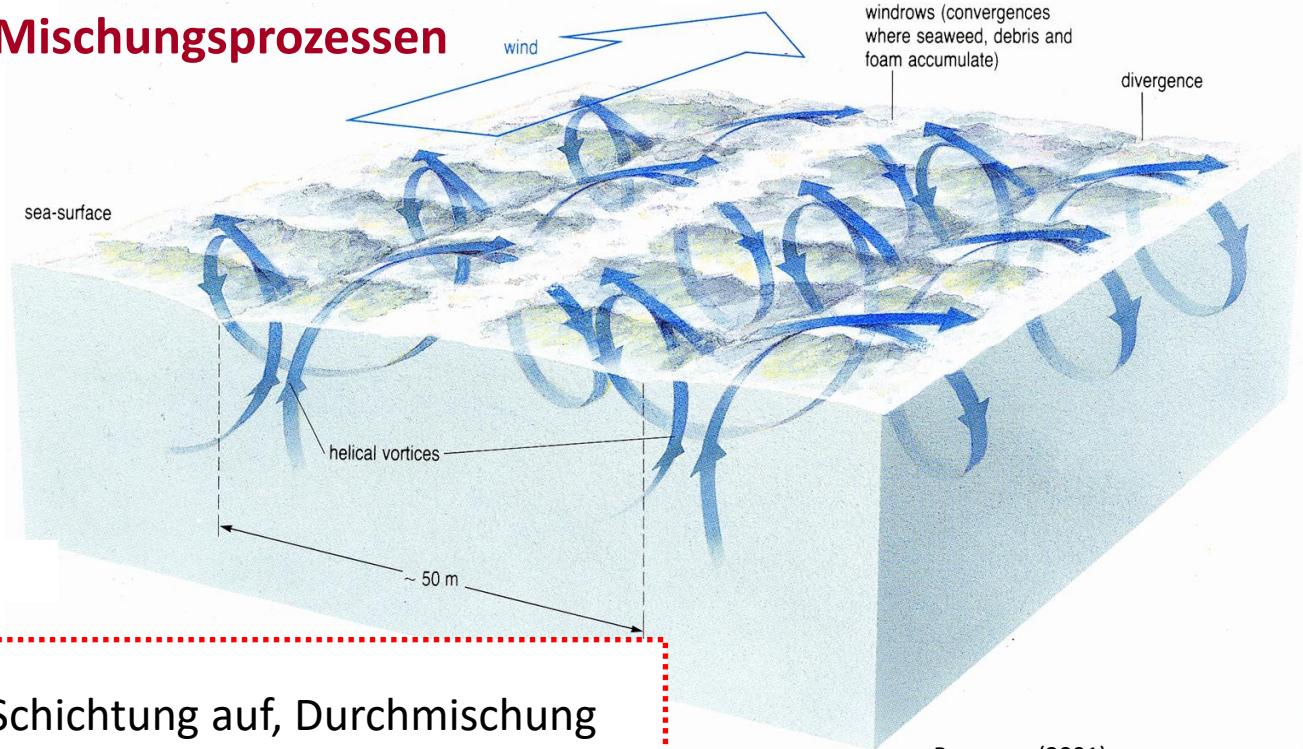
- abrupter **Dichesprung** abh. von Temperatur und Salinität (Sprungschicht)
- Trennschicht wird **Pyknokline** genannt
- In **Tropen** und **Subtropen** **stark ausgeprägt**: stabile Schichtung
- in **hohen Breiten**: **schwächer / nicht ausgeprägt**

→ Konsequenz: **Bildung von Tiefenwasser** in den **polaren Regionen** am wahrscheinlichsten

3. Windinduzierte Strömungen und Oberflächenzirkulation

Windinduzierte Mischungsprozesse

Der **Wind** wirkt auf Wasserflächen ein und führt zu oberflächennahen **Mischungsprozessen**



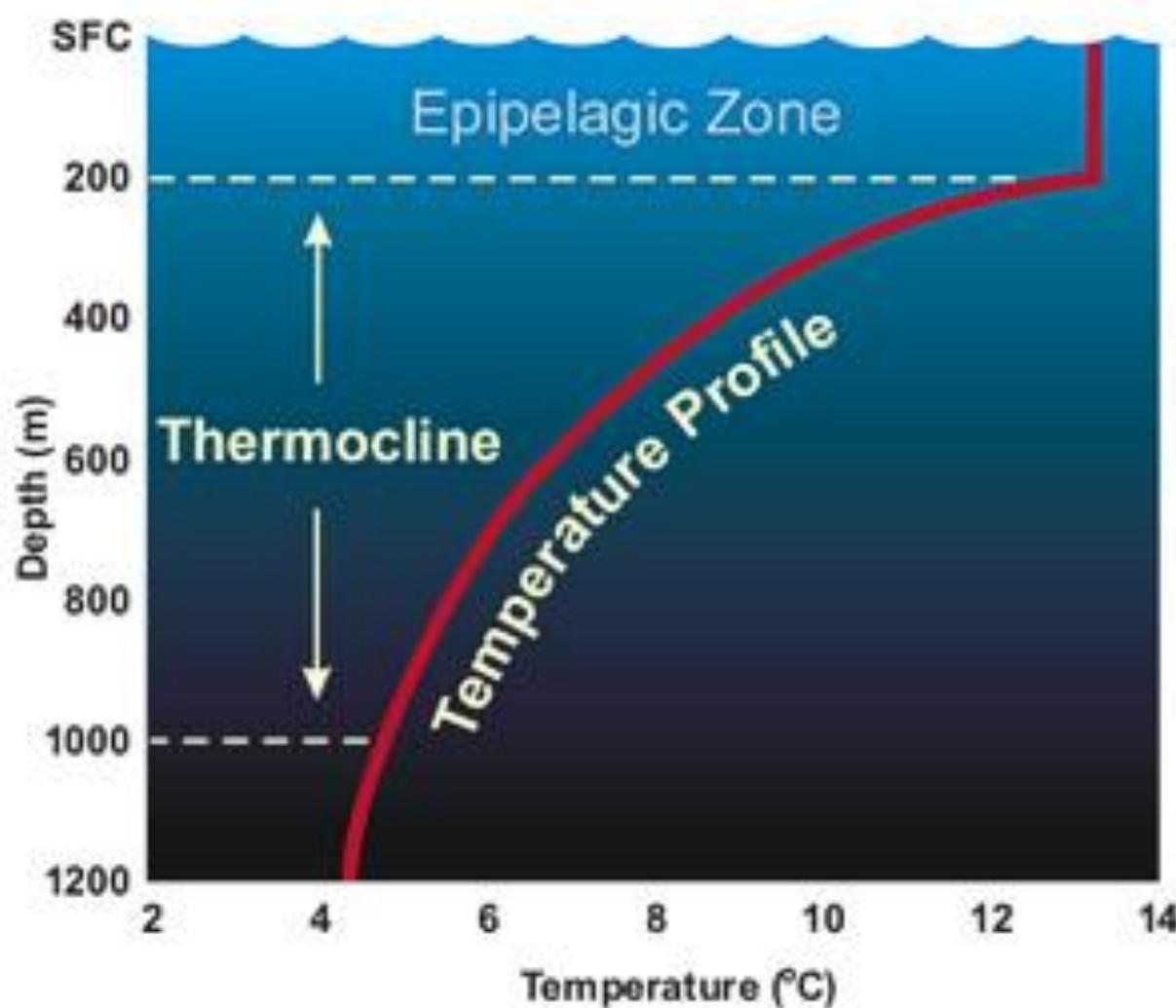
bricht stabile Schichtung auf, Durchmischung der oberflächennahen Wasserschicht



relative homogene Temperaturverteilung

Bearman (2001)

Vertikale Temperaturprofil



Wellenbewegungen in der Physik

Wellen → Transport von **kinetischer Energie**
(Bewegungsenergie)

1. Longitudinalwellen: z.B. Schall,
Erdbeben-P-Wellen (Primärwellen)



2. Transversalwellen: z.B. Erdbeben-S-
Wellen (Sekundärwellen)



3. Orbitalwellen: z. B. windinduzierte
Meeresoberflächenwellen

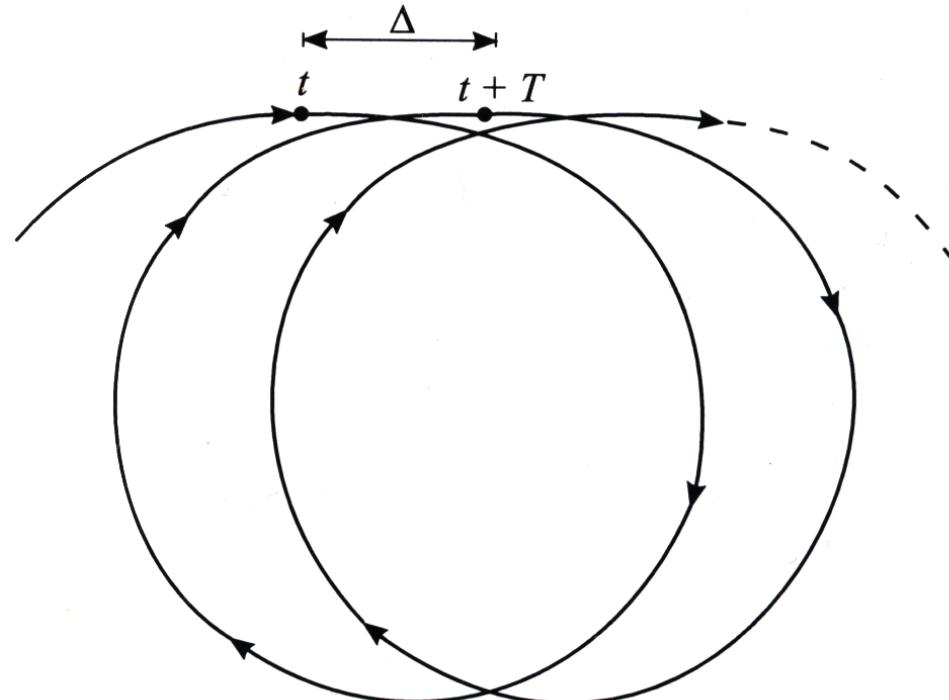


Orbitalbahnen einer Wasserwelle

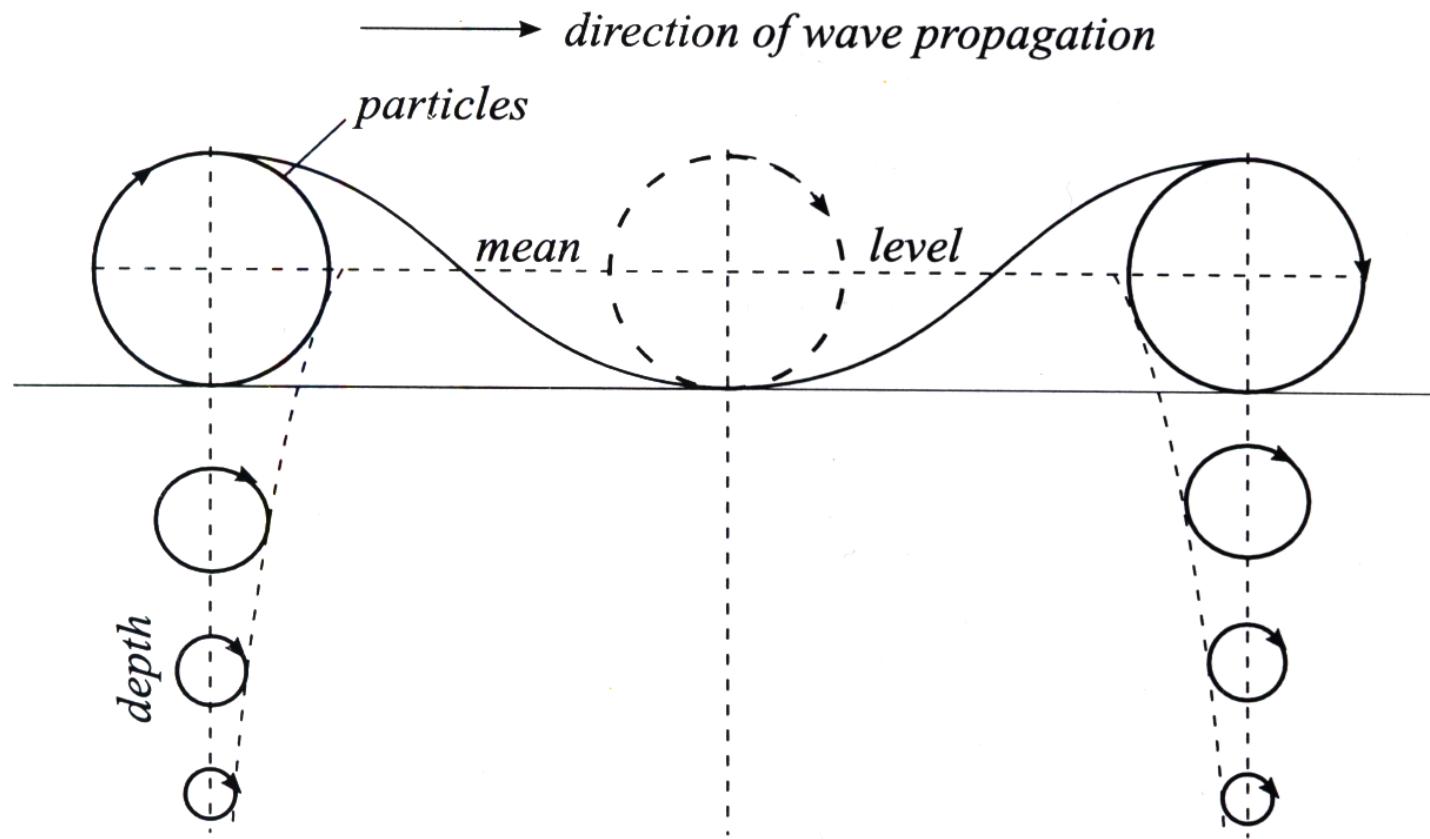
wind direction 

direction of wave propagation 

- Wind überträgt **Bewegungsenergie** durch **Reibung** an der Wasseroberfläche
- Die Wasserteilchen bewegen sich dann auf Kreisbahnen (**Orbitalbahnen**) in Richtung der Hauptwindrichtung



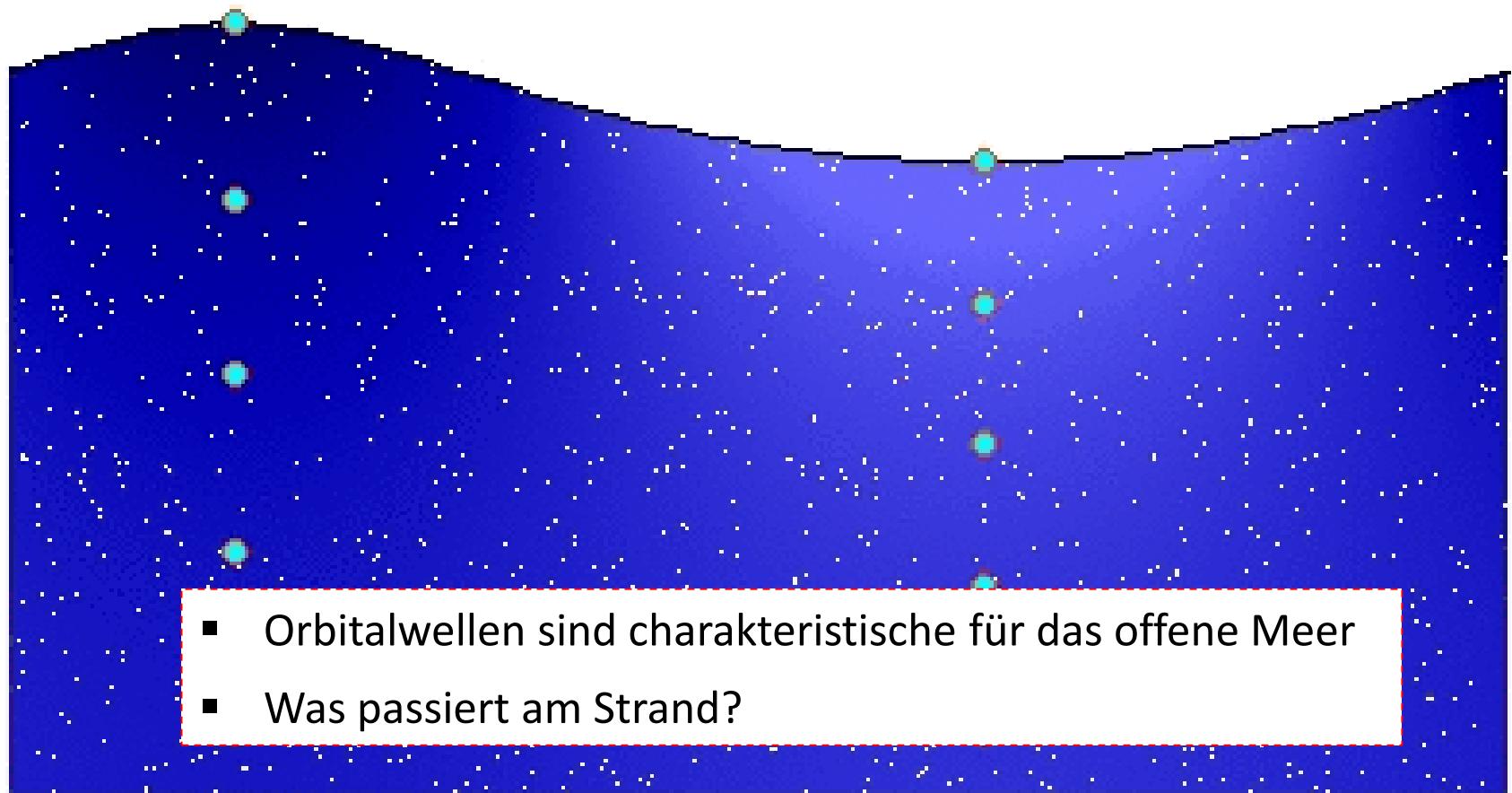
Durchmischung der obersten Ozeanschicht



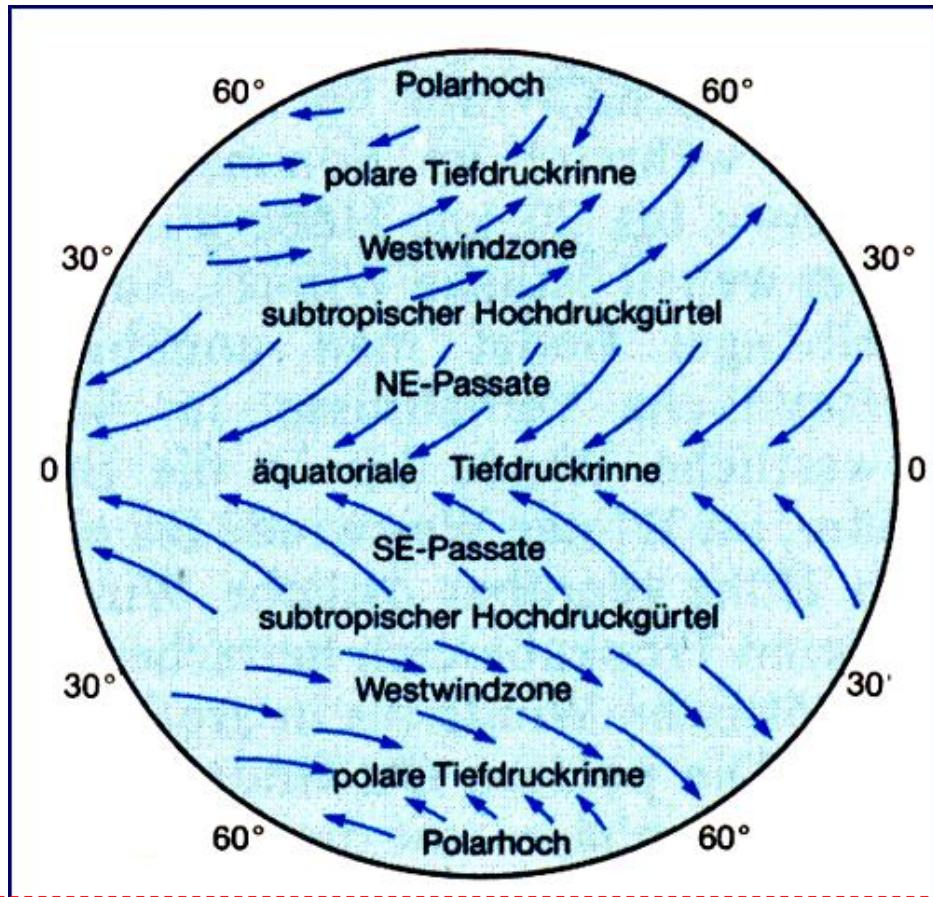
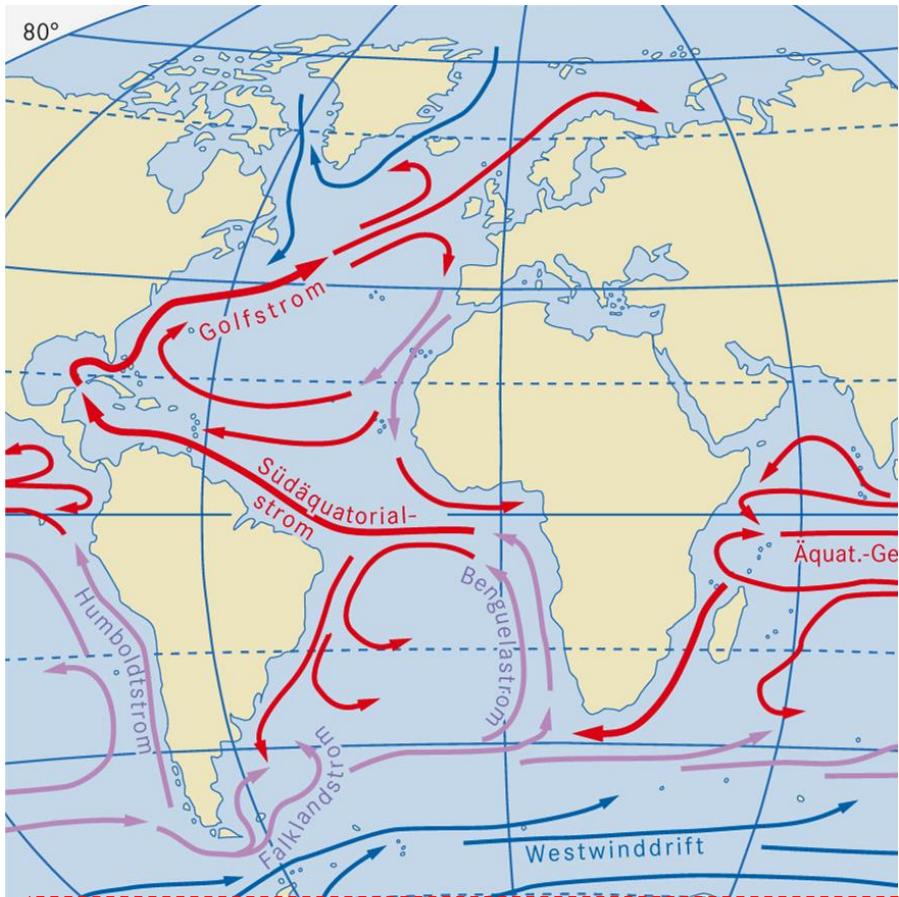
- Der Radius der Kreisbahnen bzw. die Länge der Wellen nehmen in der Tiefe ab
- Abnahme der Bewegungsenergie und geringere Durchmischung
- Ursache: Reibungsverluste zwischen den Wasserschichten

Durchmischung der obersten Ozeanschicht

wave phase : $t / T = 0.000$

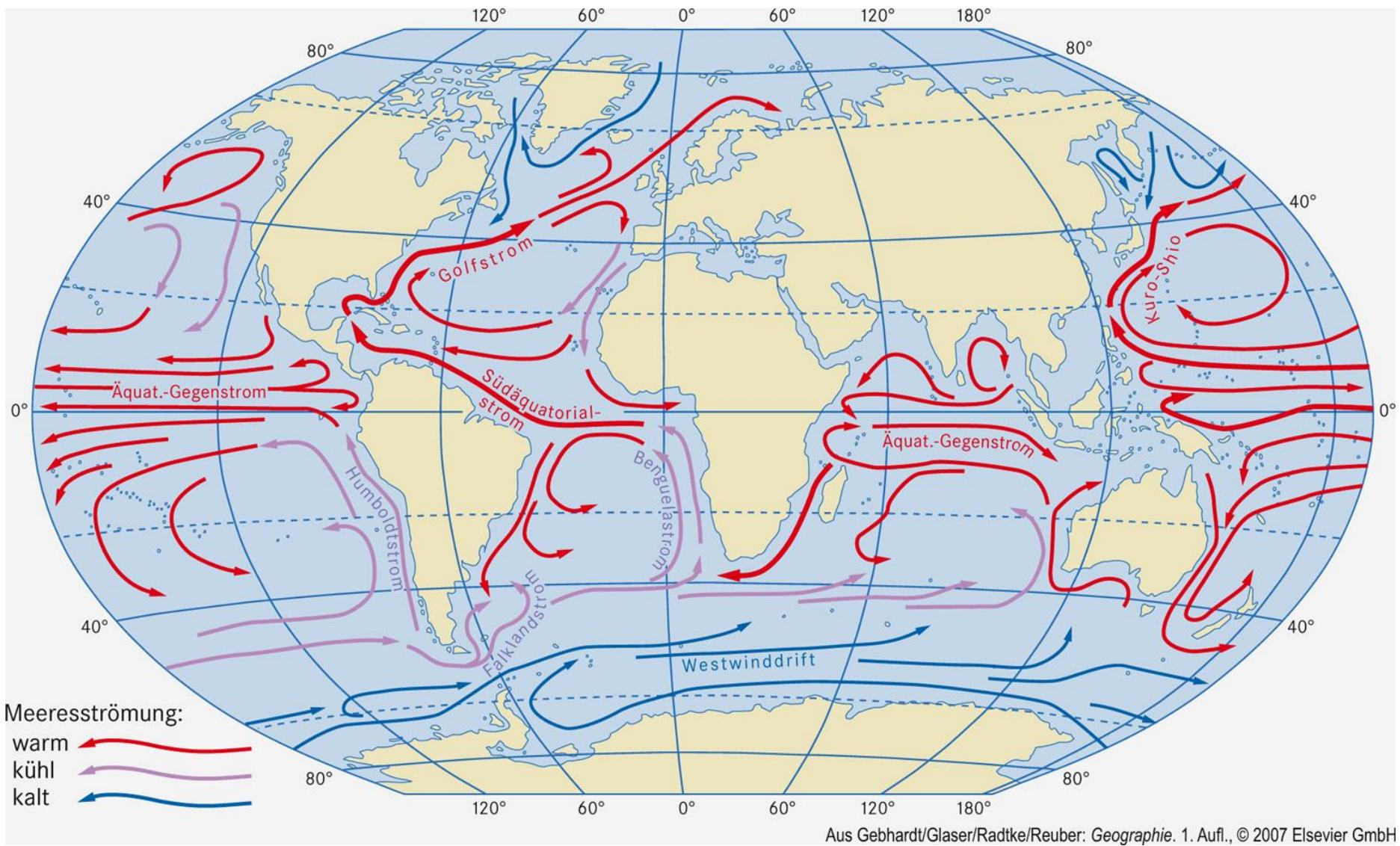


Oberflächenzirkulation der Meere

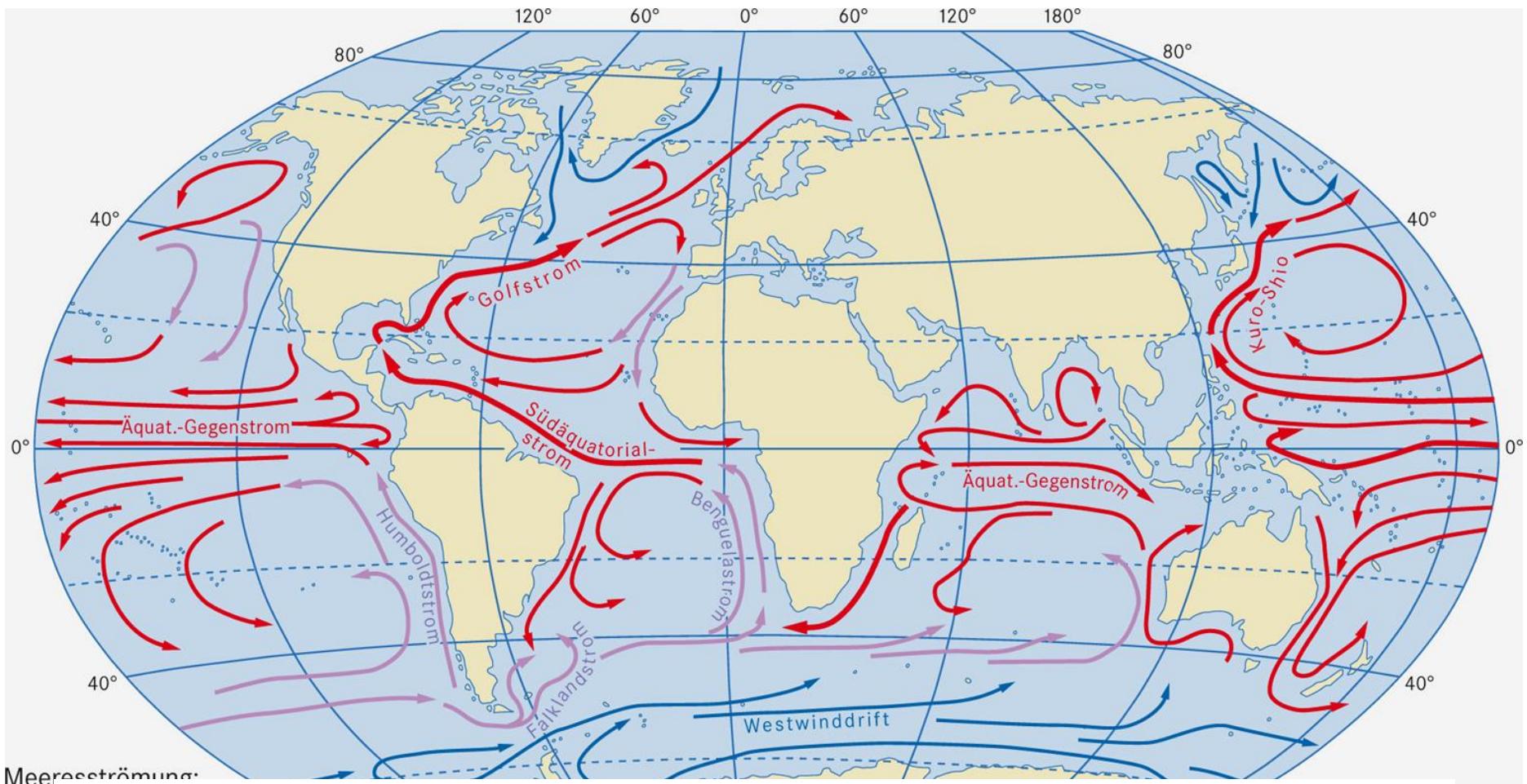


- Oberflächennahe Meereszirkulation ist das Resultat der globalen atmosphärischen Zirkulation
- Deutlich sichtbar in den Subtropen (Passatwinde) & Mittelbreiten (Westwinddrift)

Oberflächenzirkulation der Meere



Oberflächenzirkulation der Meere



Meeresströmung:

war
kühl
kalt

- Kontinente führen zu einer zusätzlichen Ablenkung der Wassermassen nach Norden oder Süden
- Corioliskraft wirkt auf die Wasserschichten (Ekman-Transport)

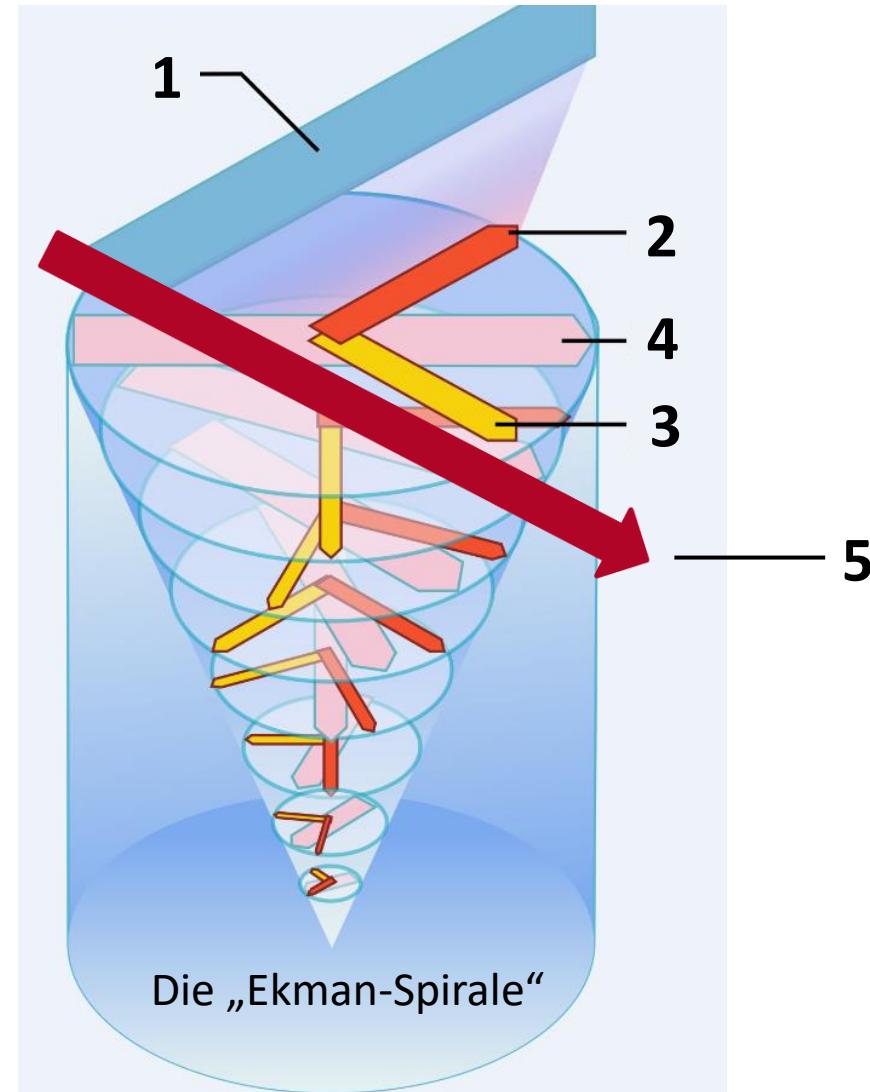
Der Ekman-Transport

Ablenkung der ozeanischen Wassermassen in die Tiefe

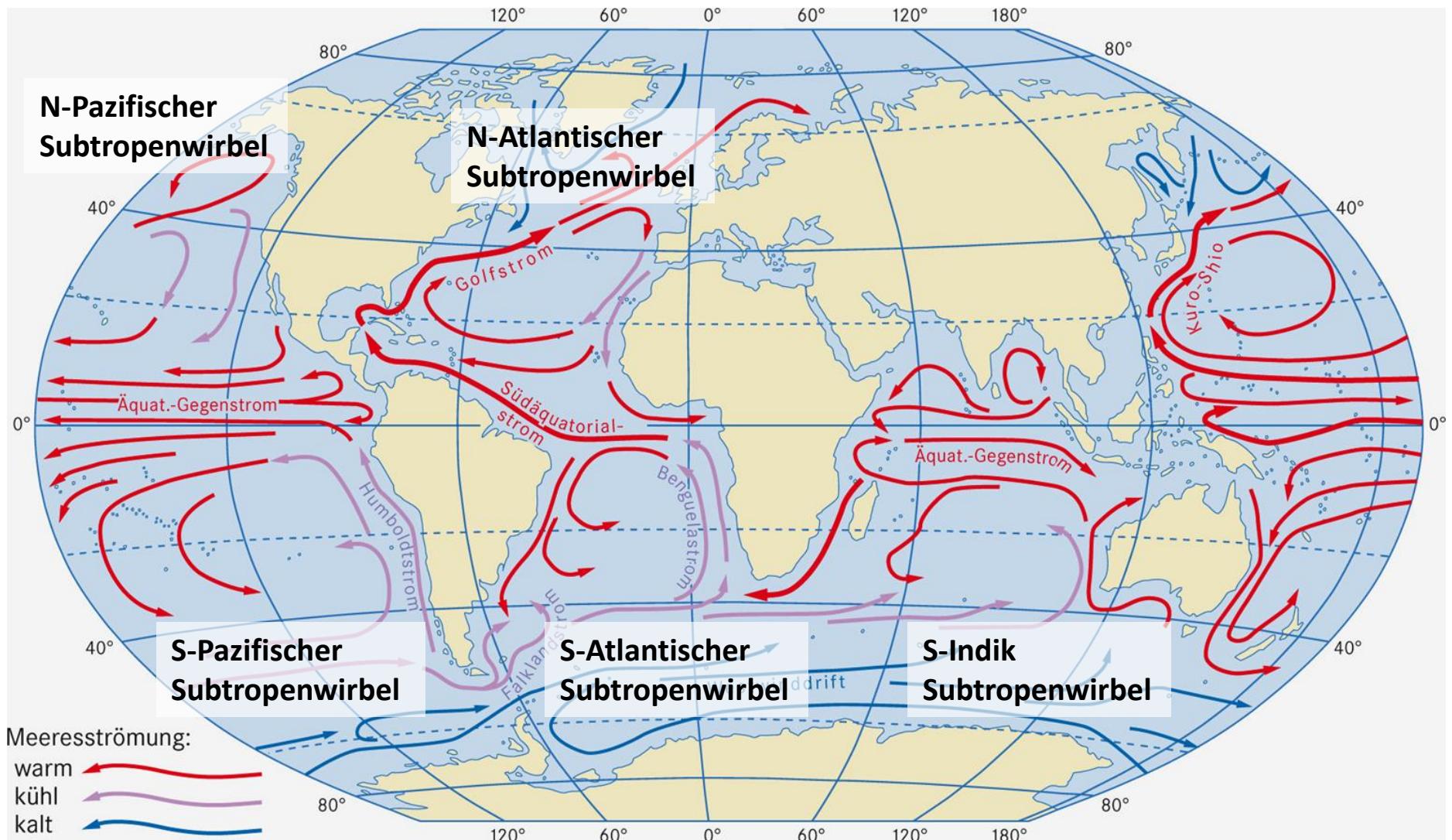
- 1: Windrichtung
- 2: induzierte Wasserbewegung
- 3: Coriolis-Ablenkung
- 4: result. Oberflächenströmung (45°)

schichtweise Ablenkung der Wasserschichten in die Tiefe

- **spiralförmige Bewegung**
- 5: result. **mittlere Wasserbewegung (90°) abweichend von der Windrichtung**



Bildung subtropischer Ozeanwirbel

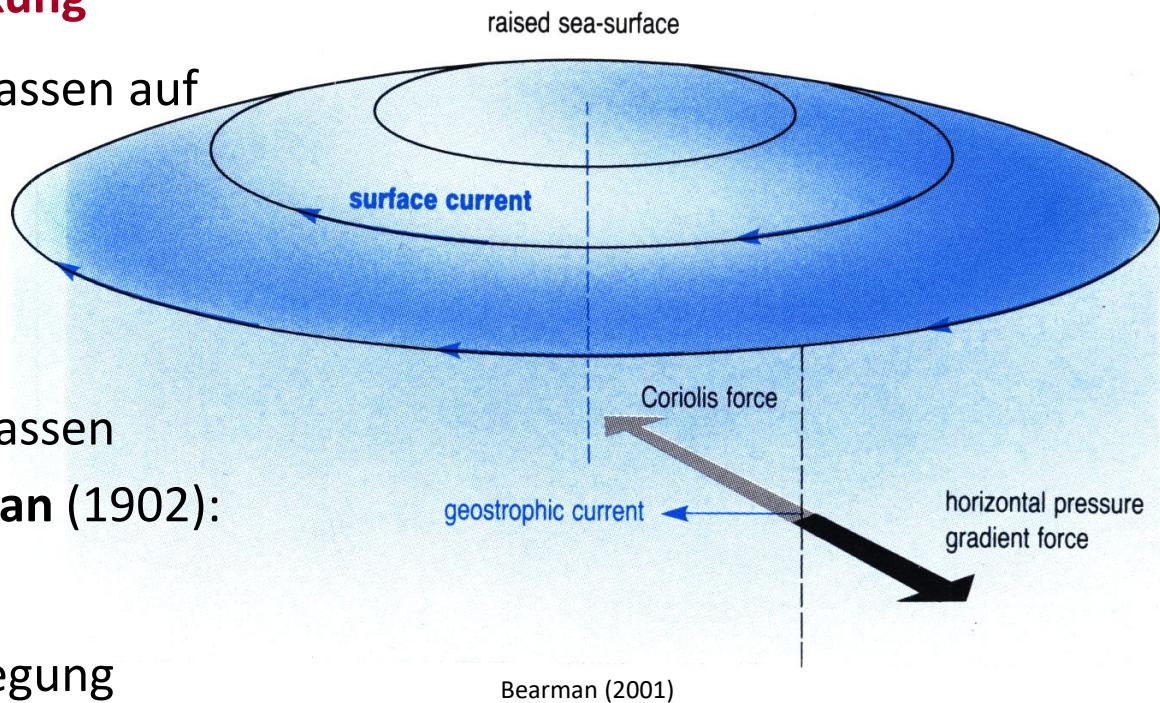


Gebhardt et al. (2011, S.599)

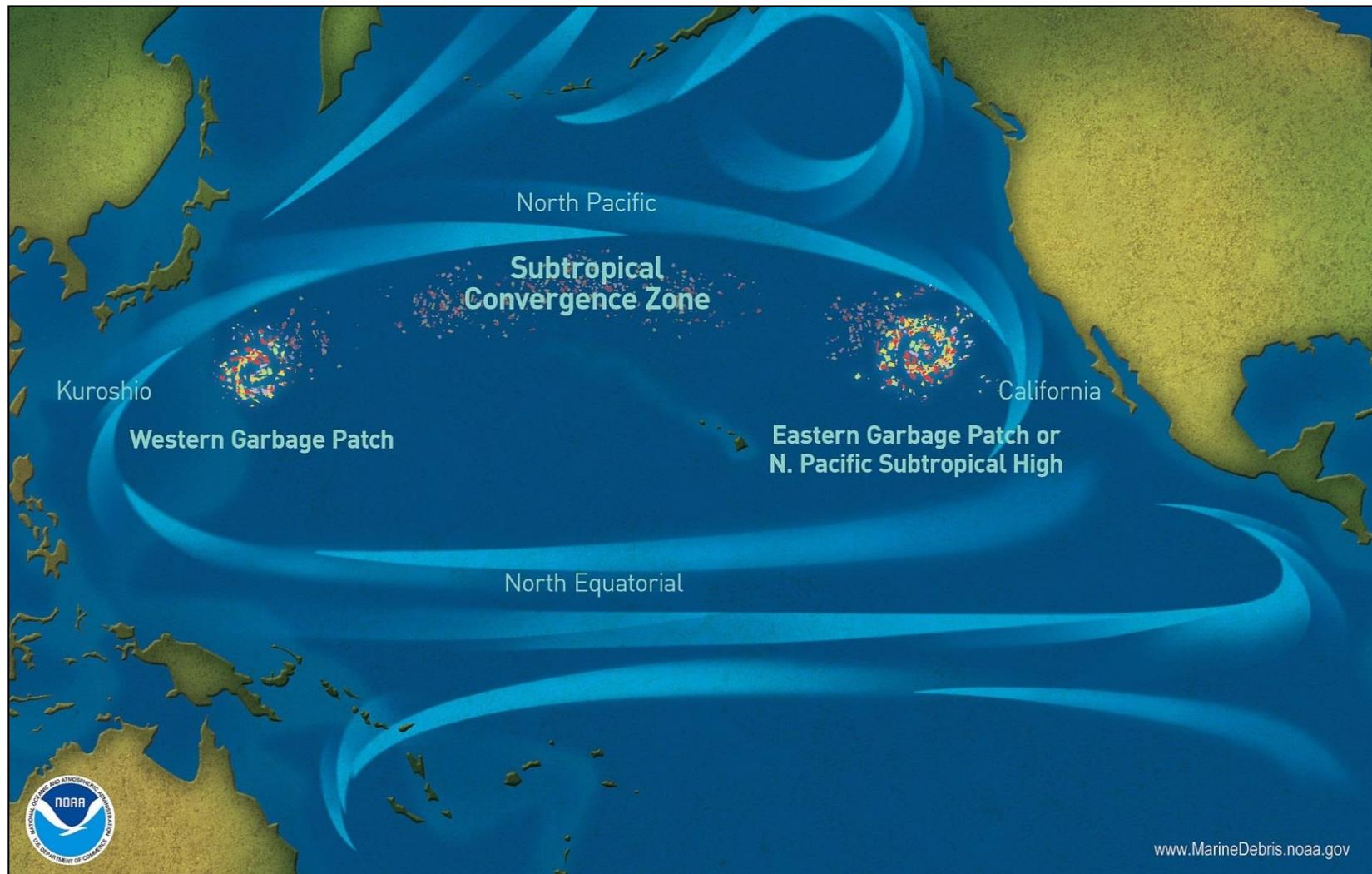
Subtropische Ozeanwirbel

Beobachtung: im Zentrum der Ozeanwirbel **erhöhter Wasserspiegel**

- Ursache: **Coriolis-Ablenkung**
- Ablenkung der Wassermassen auf NH nach rechts
- Konsequenz: erhöhter Wasserspiegel
- Ablenkung der Wassermassen wurde erstmals von **Ekman** (1902): Ekman-Transport
- Im Zentrum: Absinkbewegung (sehr langsamer Vorgang 30 m/a)

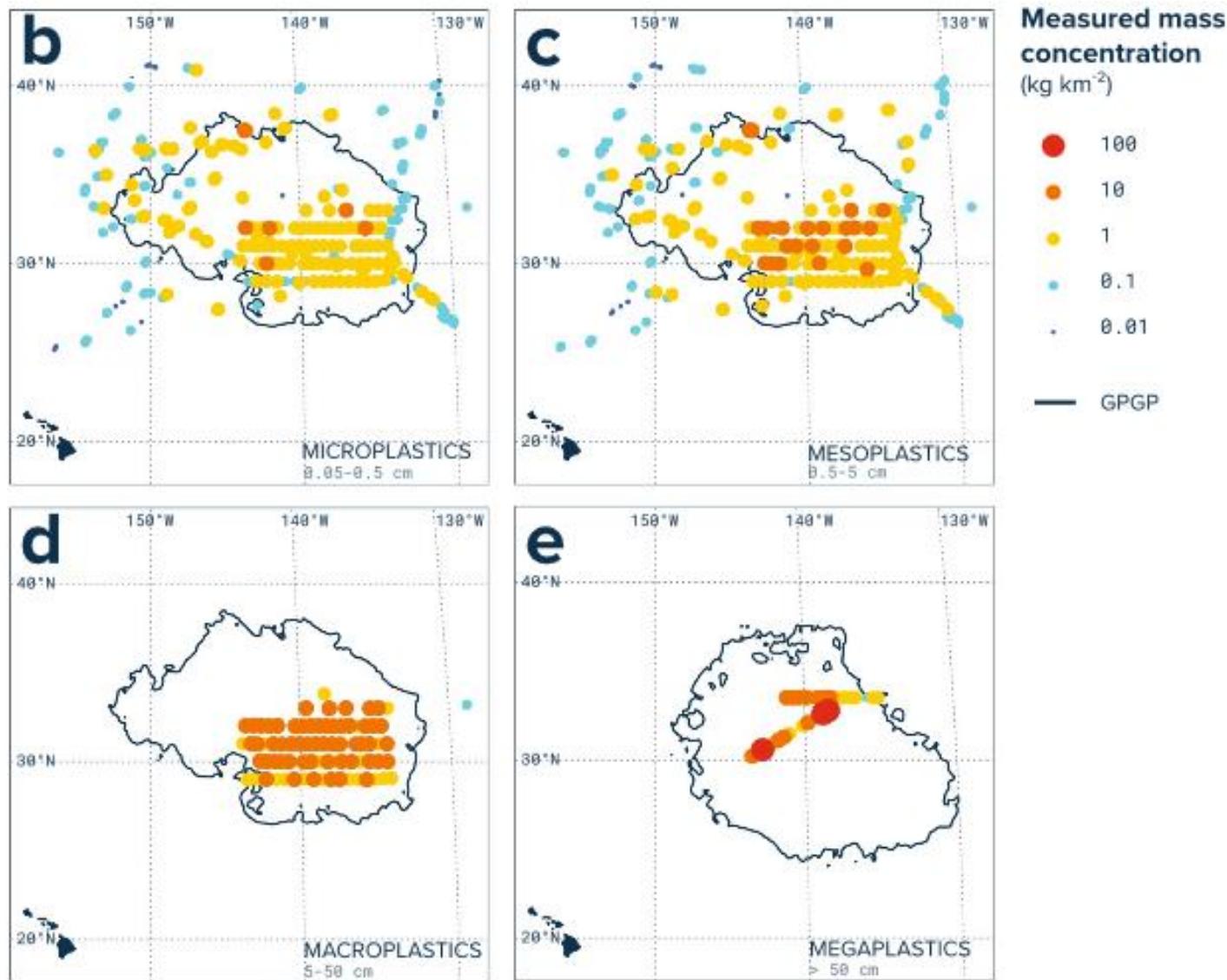


Der Nordpazifikwirbel und Müllteppiche



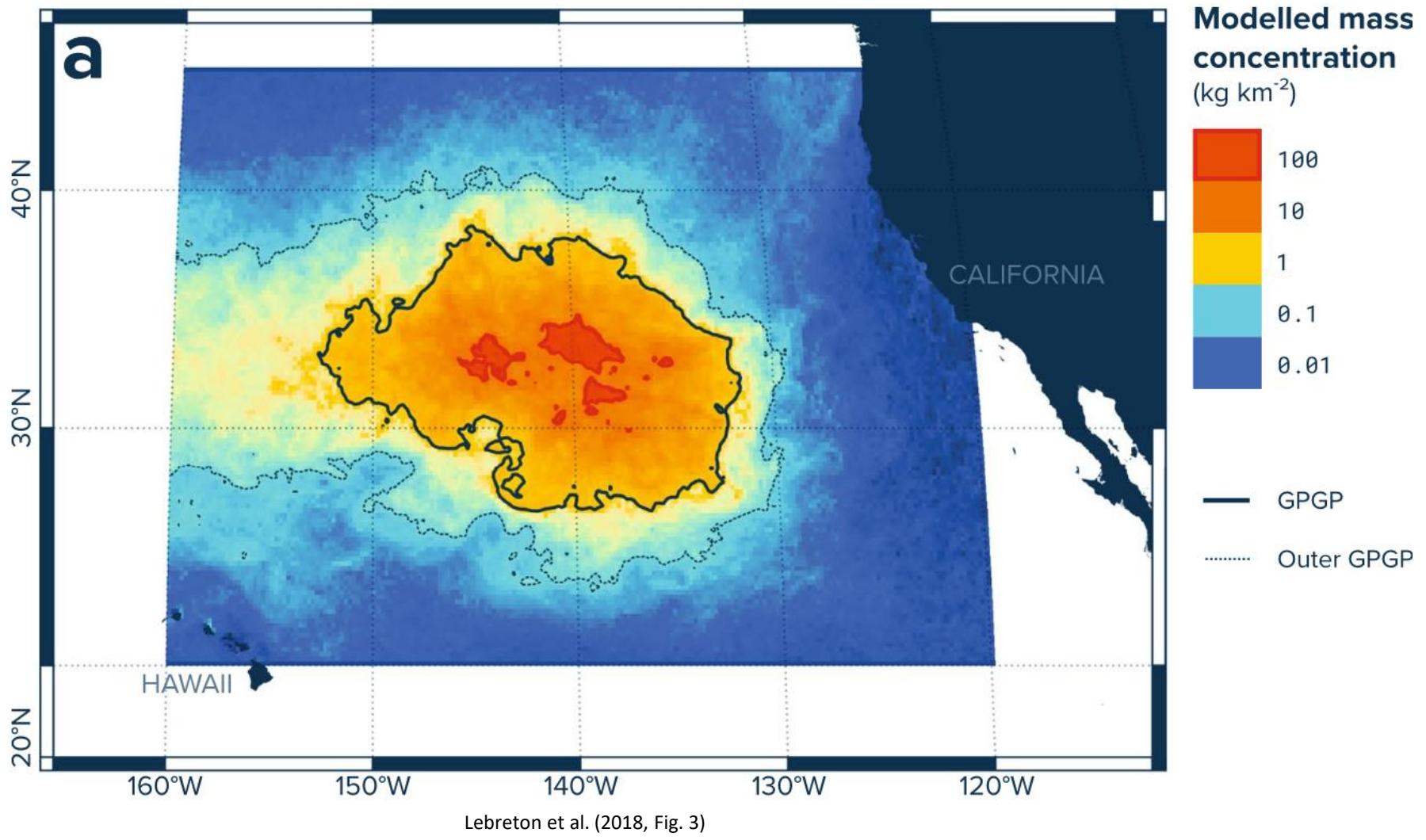
<https://aiswetter-a.akamaihd.net/masters/773832/3660x2328/manila-muellschwemme-vor-der-hauptstadt-der-philippinen.jpg>

Plastikmüll des Eastern Garbage Patch

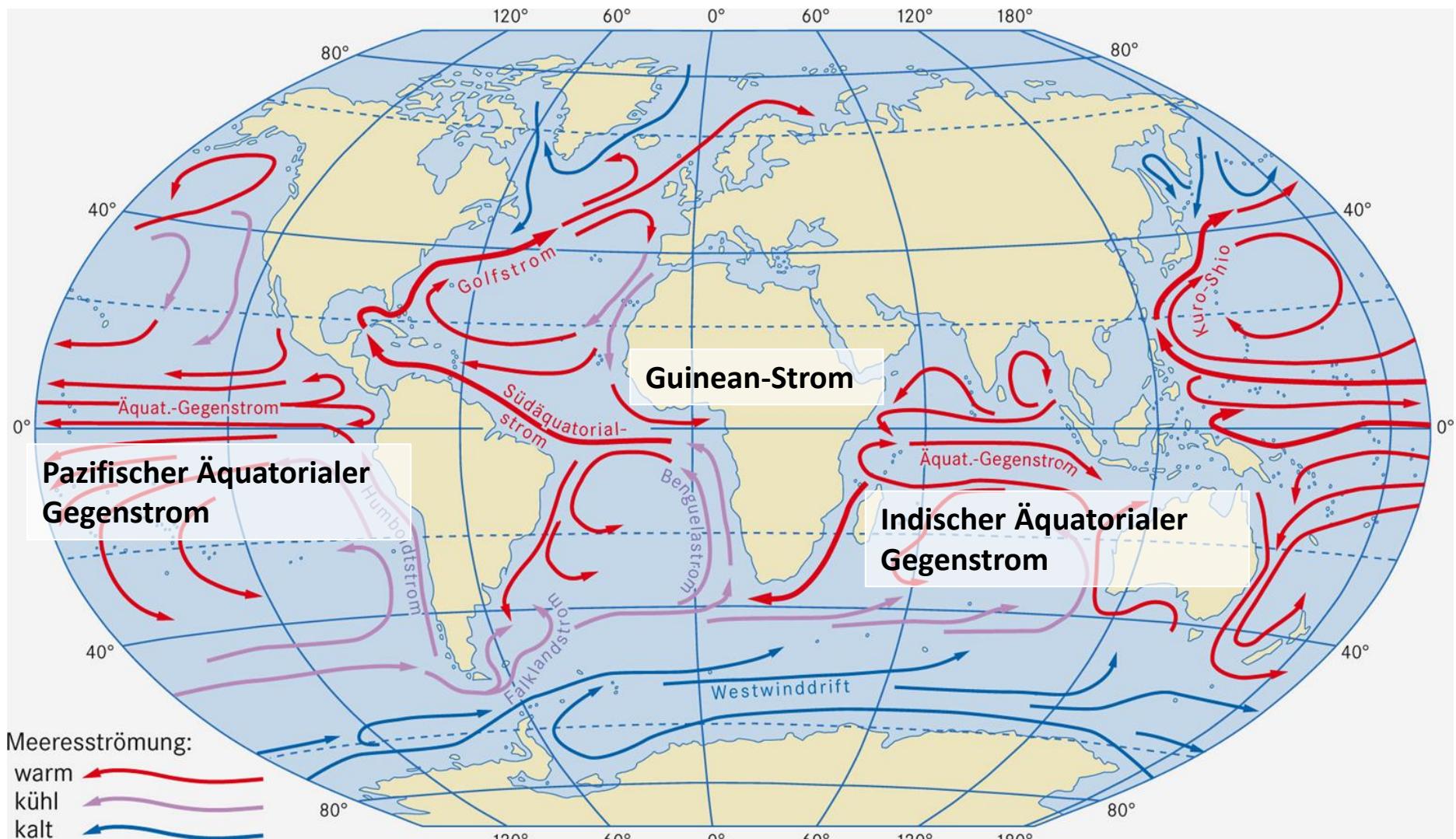


Lebreton et al. (2018, Fig. 3)

Ausdehnung des Eastern Garbage Patch

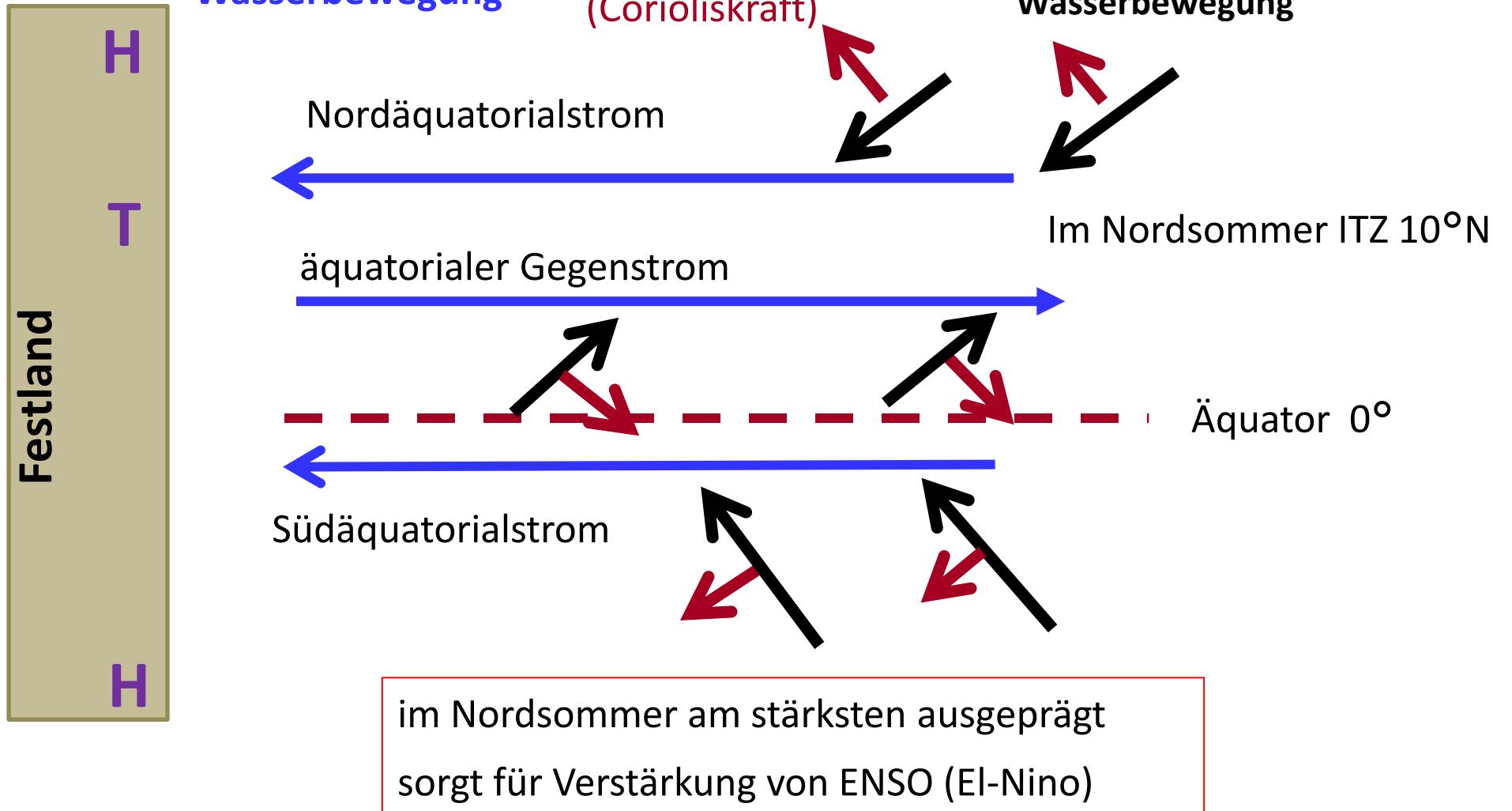


Äquatoriale Gegenströme

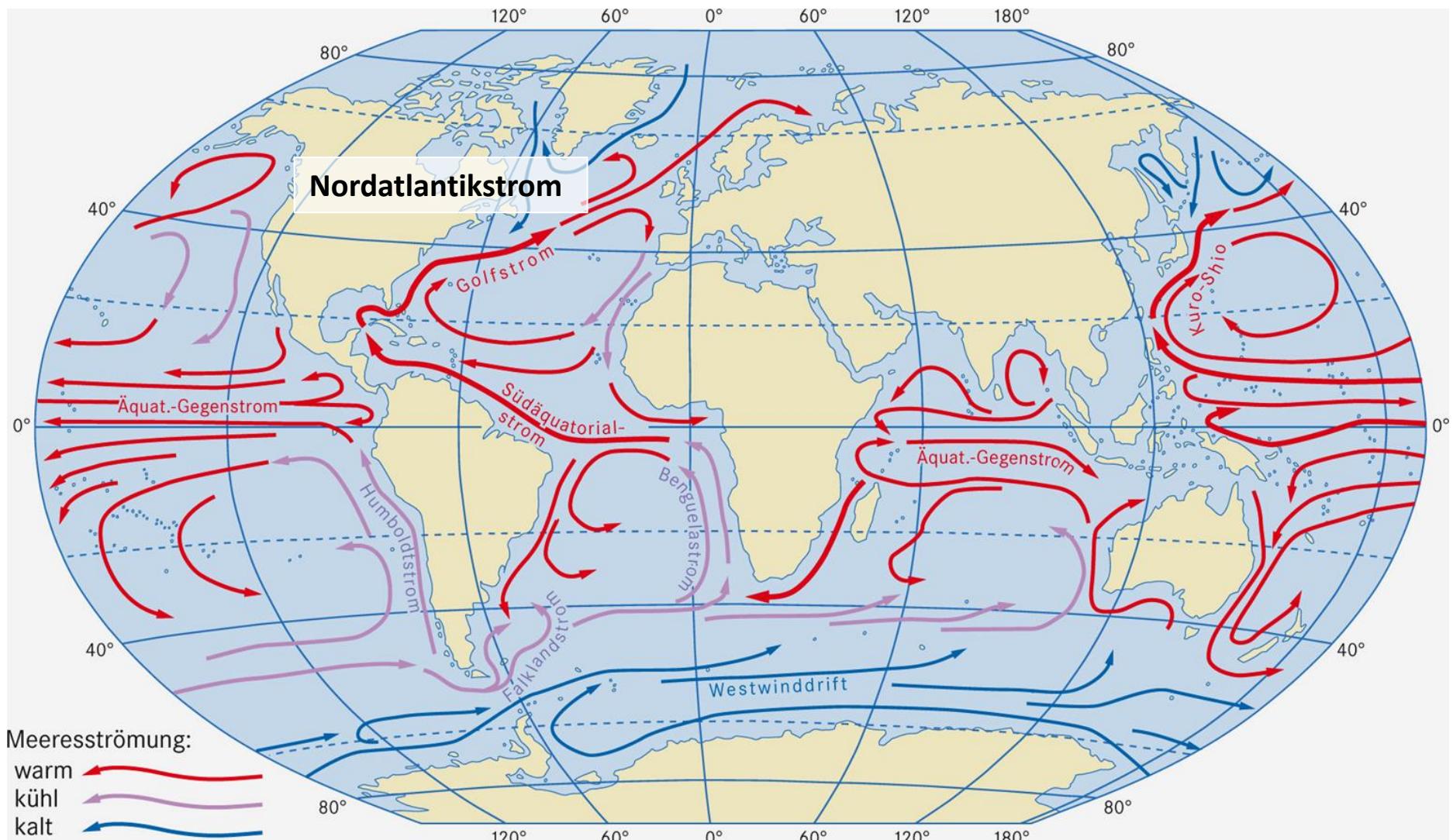


Gebhardt et al. (2011, S.599)

Bildung des äquatorialen Gegenstroms im Pazifik

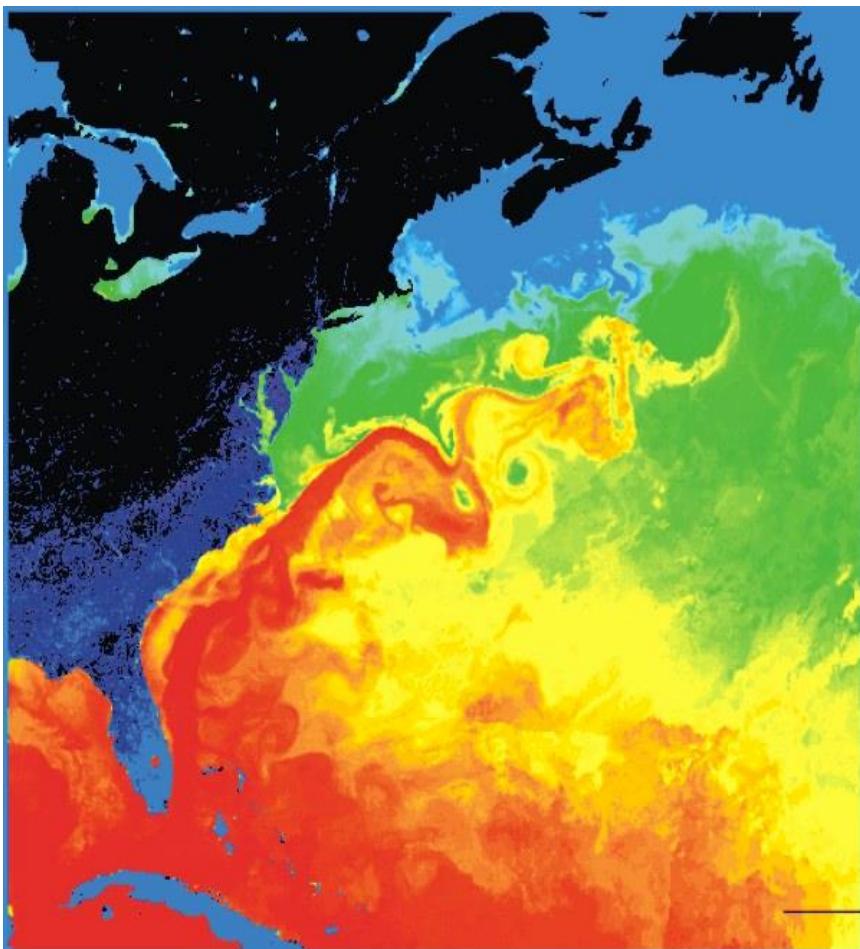


Nordatlantik-Strom („Golfstrom“)



Gebhardt et al. (2011, S.599)

Nordatlantikstrom



<https://de.wikipedia.org/wiki/Golfstrom#/media/Datei:Gulfstrom.jpg>

Oberflächentemperatur des Golfstroms
an einem Wintertag

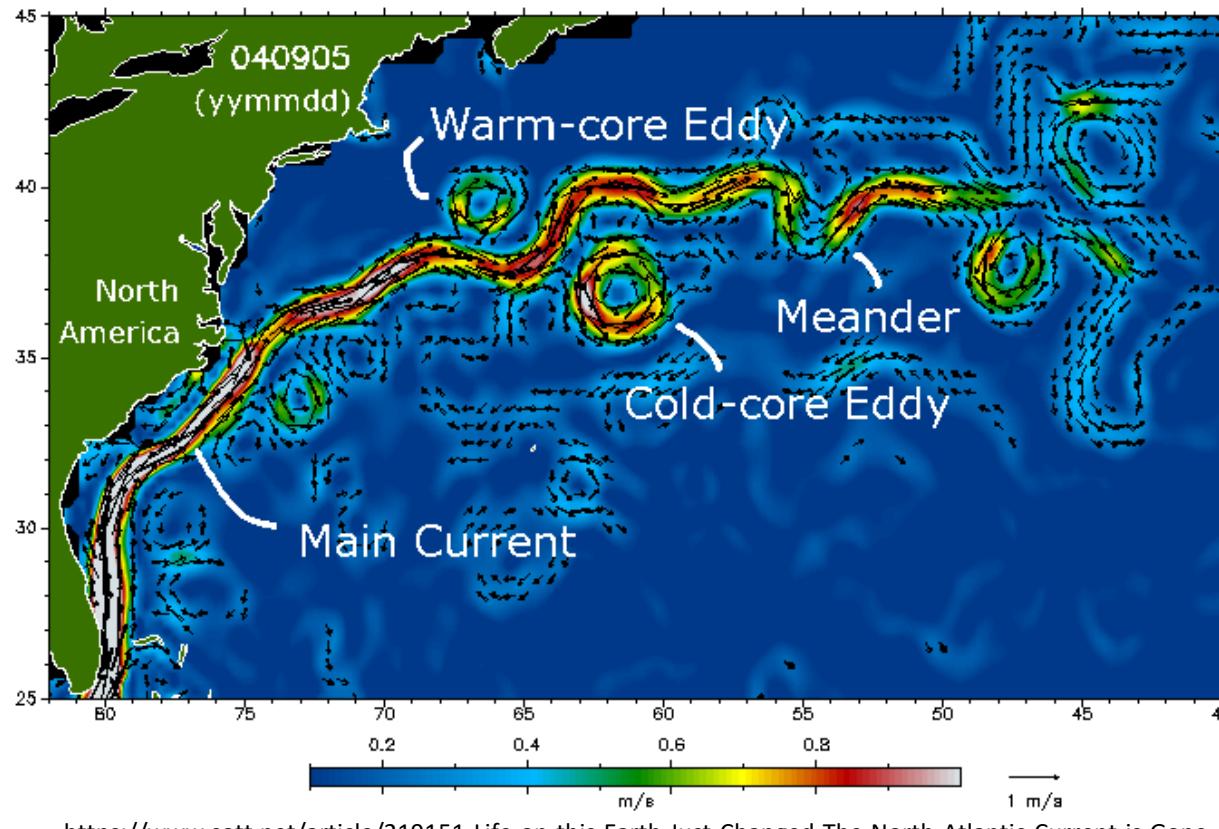
Ursprung: Nordäquatorialstrom
Vereinigung mit dem Antillenstrom

→ **Golfstrom**

50-70 km breit, bis 1000 m tief
55-63 Sv
ca. 25°C $\sim 1 \text{ PW} \sim 10^9 \text{ MW}$
 $v > 150 \text{ cm/s}$
($1 \text{ Sv} = 10^6 \text{ m}^3/\text{s}$)

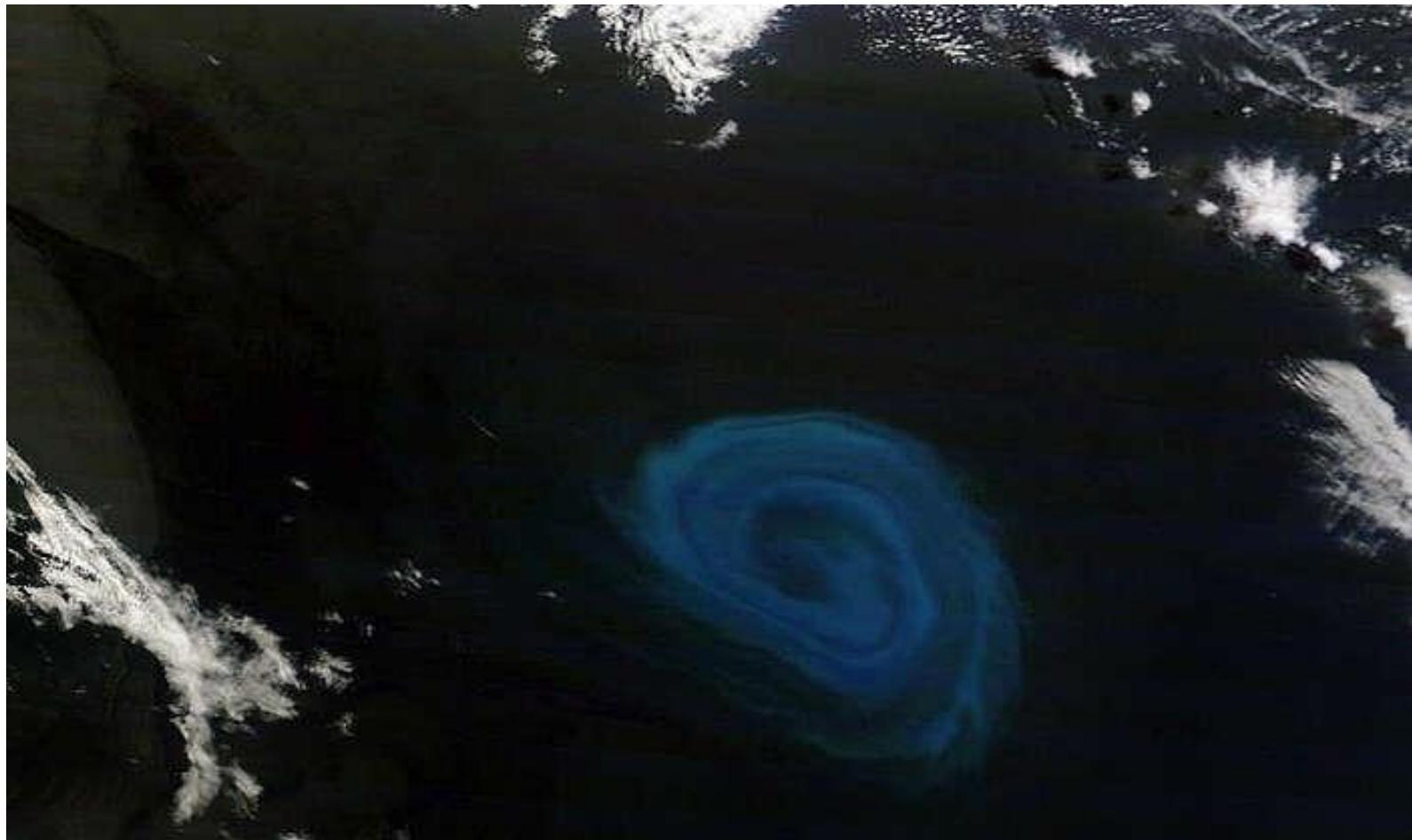
Verdunstung weltweit	$\sim 140 \text{ Sv}$
Niederschlag Meer weltweit	$\sim 131 \text{ Sv}$
Ausfluss aus dem Mittelmeer	$\sim 1-3 \text{ Sv}$
Eintrag Flüsse in den Atlantik	$\sim 0,6 \text{ Sv}$
Eintrag des Amazonas	$\sim 0,2 \text{ Sv}$
Eintrag des Mississippi	$\sim 0,02 \text{ Sv}$

Mesoskalige Wasserwirbel (ozeanische Eddies)



Die Abschnürung von Kalt- und Warmwasserwirbeln entlang des Golfstroms.
Warmwasserwirbel nördlich des Golfstroms weisen aus strömungsdynamischen
Gründen einen rechten Drehsinn auf, Kaltwasserwirbel auf der Südseite einen linken.

Mobile Todeszonen im tropischen Atlantik



NASA Earth Observatory; <https://www.eskp.de/klimawandel/mobile-todeszonen-im-tropischen-atlantik-unterwegs-935677/>

Strömungssystem des Nordatlantiks



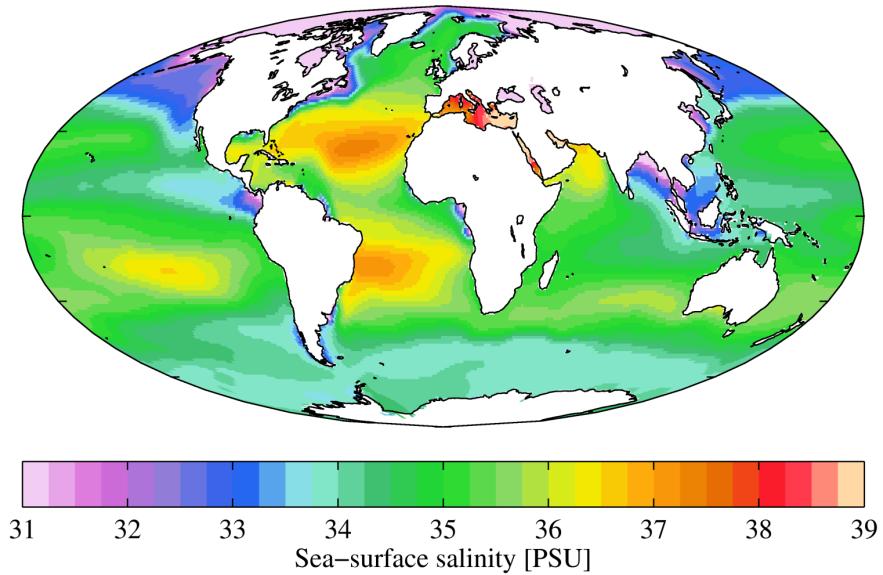
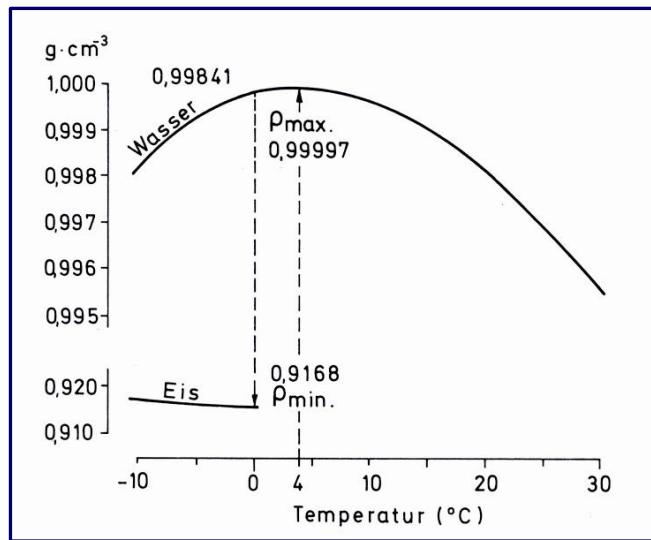
Beck et al. (2017)

4. Thermohaline Zirkulation

Thermohaliner Antrieb

Weiterer **Antrieb** der **Meereszirkulation**:

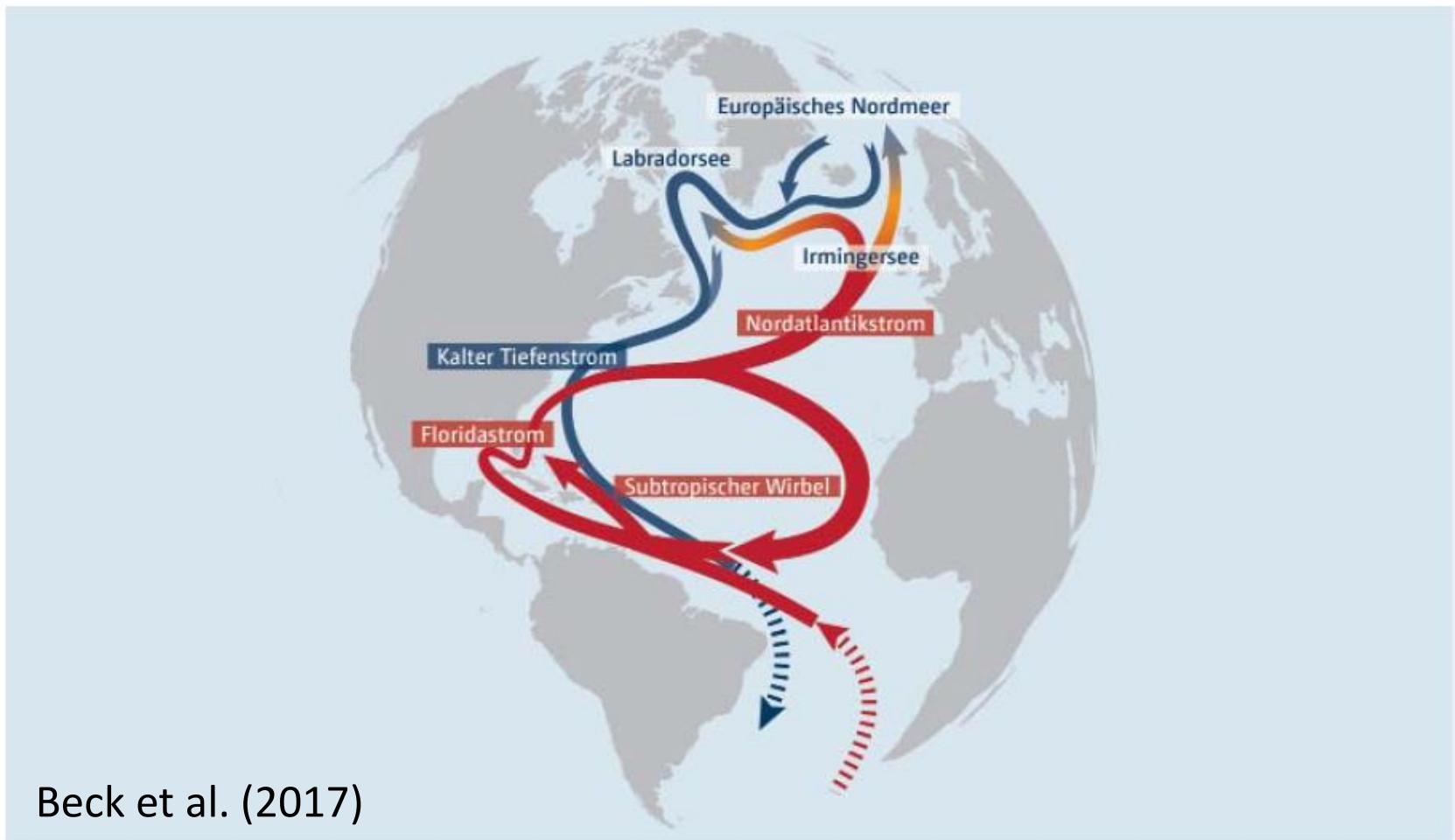
Dichteunterschiede (Temperatur und Salzgehalt)



- Kälteres Wasser hat einer höhere Dichte als warmes Wasser
- Abkühlung im Winter: Warmes oberflächennahes Wasser kann Absinken

- Salzhaltiges Wasser hat einer höhere Dichte als salzarmes Wasser
- Salzhaltiges Wasser kann über salzarmen Wasser ebenfalls Absinken

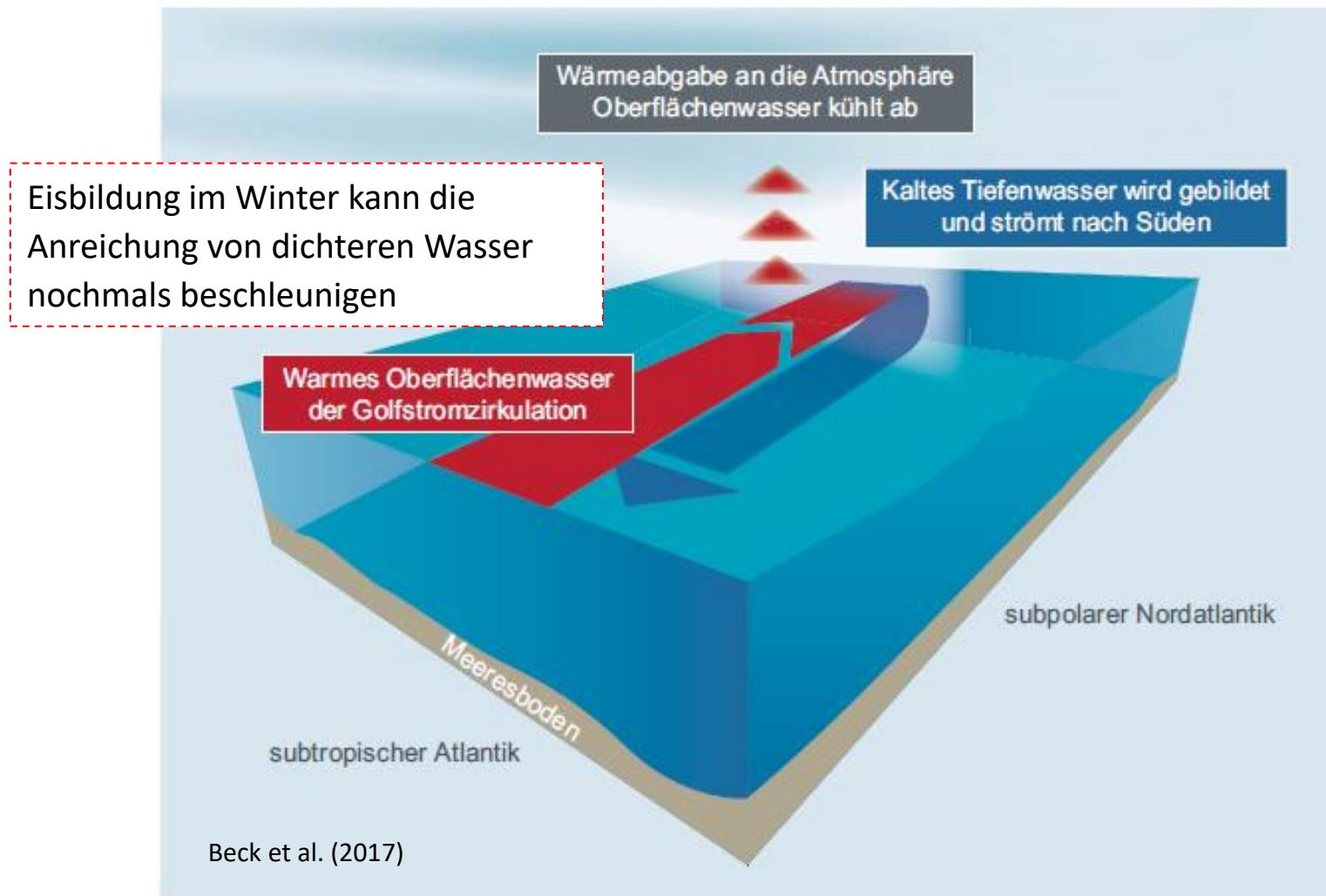
Strömungssystem des Nordatlantiks



Beck et al. (2017)

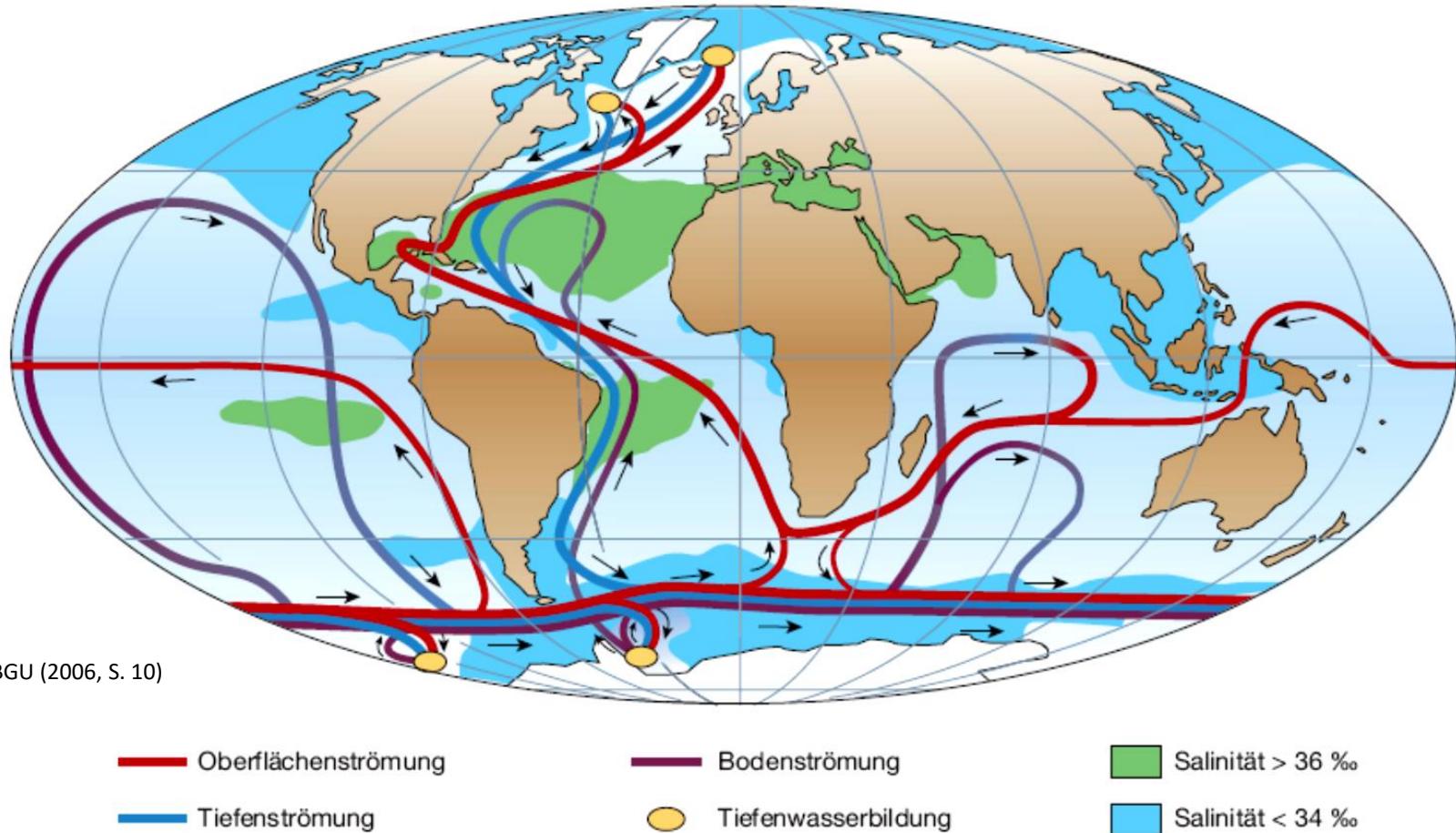
Salzreiches und warmes oberflächennahes Wasser wird gen Norden transportiert, kühlt ab, wird dadurch schwerer und versinkt in die Tiefe

Thermohaliner Antrieb: Konvektion



Typisch für die Tiefenwasserbildung im Nordatlantik

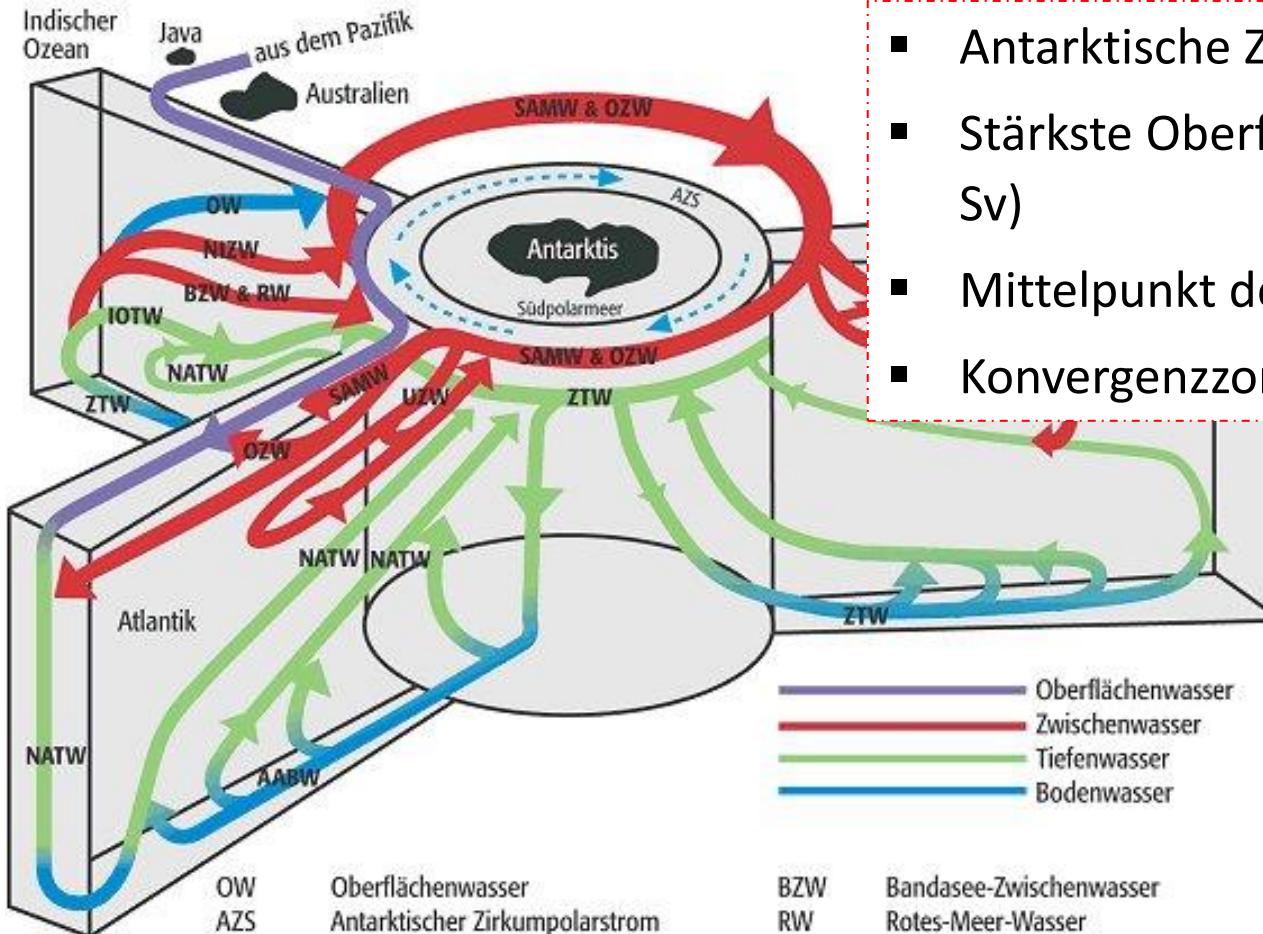
Thermohaline Zirkulation der Ozeane



WBGU (2006, S. 10)

- Die **thermohaline Zirkulation** verbindet **Oberflächen- und Tiefenströmungen** zu einem zusammenhängenden weltweiten System der **ozeanischen Zirkulation**.
- **Meridionale Umwälzzirkulation (neu):** neben Temperatur und Salzgehalt auch Wind von Bedeutung

Thermohaline Zirkulation



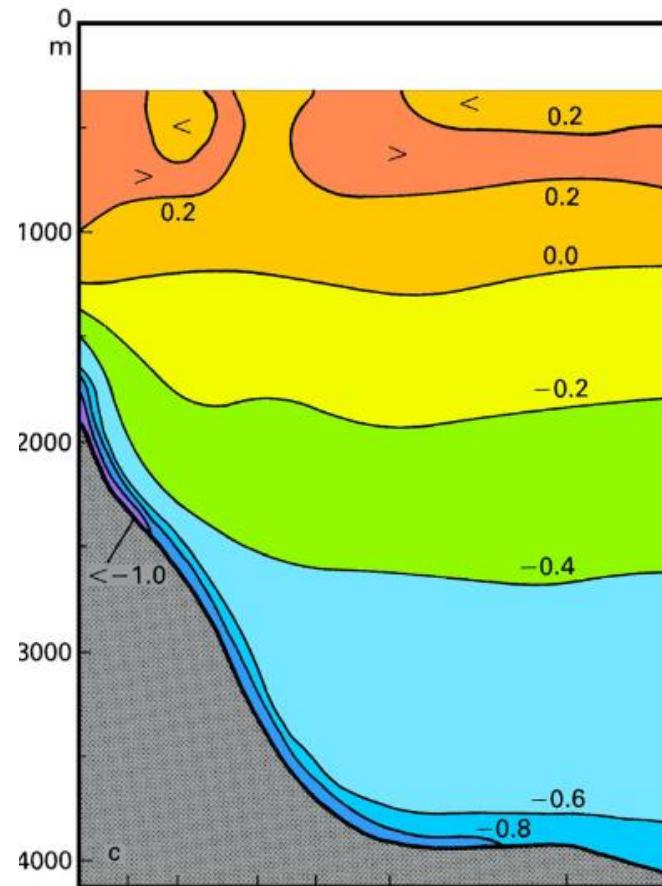
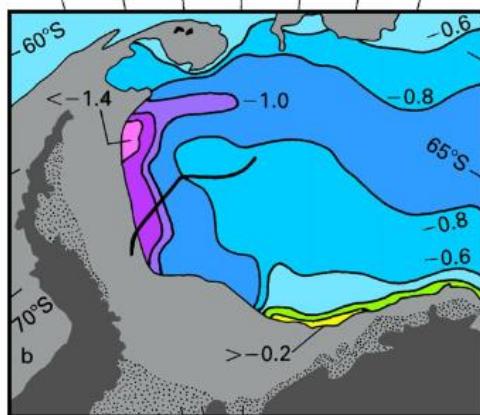
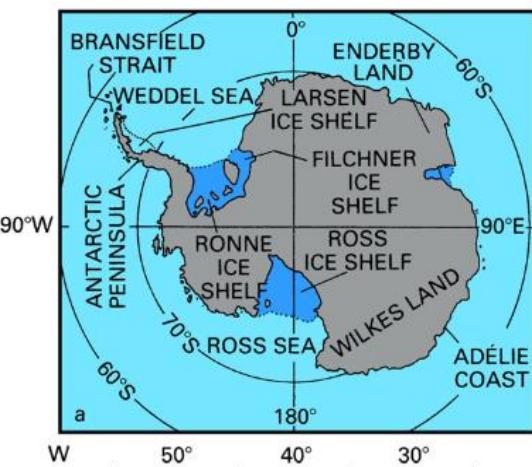
- Antarktische Zirkumpolarstrom
- Stärkste Oberflächenströmung (150 Sv)
- Mittelpunkt der THZ
- Konvergenzzone

OW	Oberflächenwasser
AZS	Antarktischer Zirkumpolarstrom
SAMW	Subantarktisches-Mode-Wasser
OZW	Oberes Zwischenwasser
UZW	Unteres Zwischenwasser
NIZW	Nordwestindisches Zwischenwasser

BZW	Bandasee-Zwischenwasser
RW	Rotes-Meer-Wasser
NATW	Nordatlantisches Tiefenwasser
NPTW	Nordpazifisches Zwischenwasser
IOTW	Indischer-Ozean-Tiefenwasser
ZTW	Zirkumpolares Tiefenwasser
AABW	Antarktisches Bodenwasser

Thermohaliner Antrieb: Abflüsse am Kontinentalhang

Typisch für die Tiefenwasserbildung im Antarktischen Ozean (Weddelmeer)



Rahmstorf (2006, Fig. 6)

Sehr kaltes **und**

salzreiches

Tiefenwasser

Schelfgebiete mit geringen Meerestiefen

Abkühlung des kompletten Wasserkörper & Bildung von Meereseis

großräumige eisfreie Zone an der Küste (Polynja)

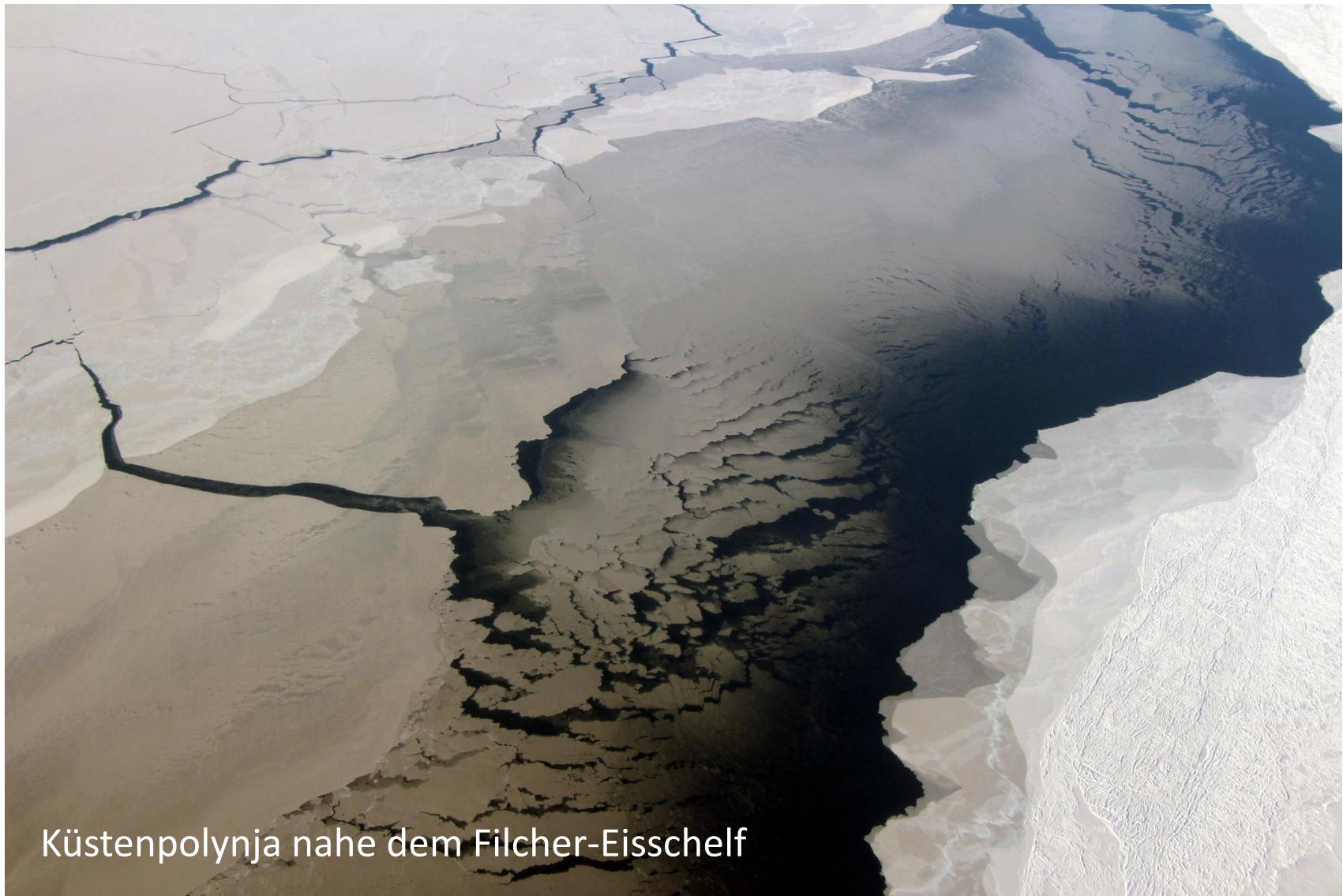
Bildung der antarktischen Bodenwasserströmung

Polynja – Antarktis



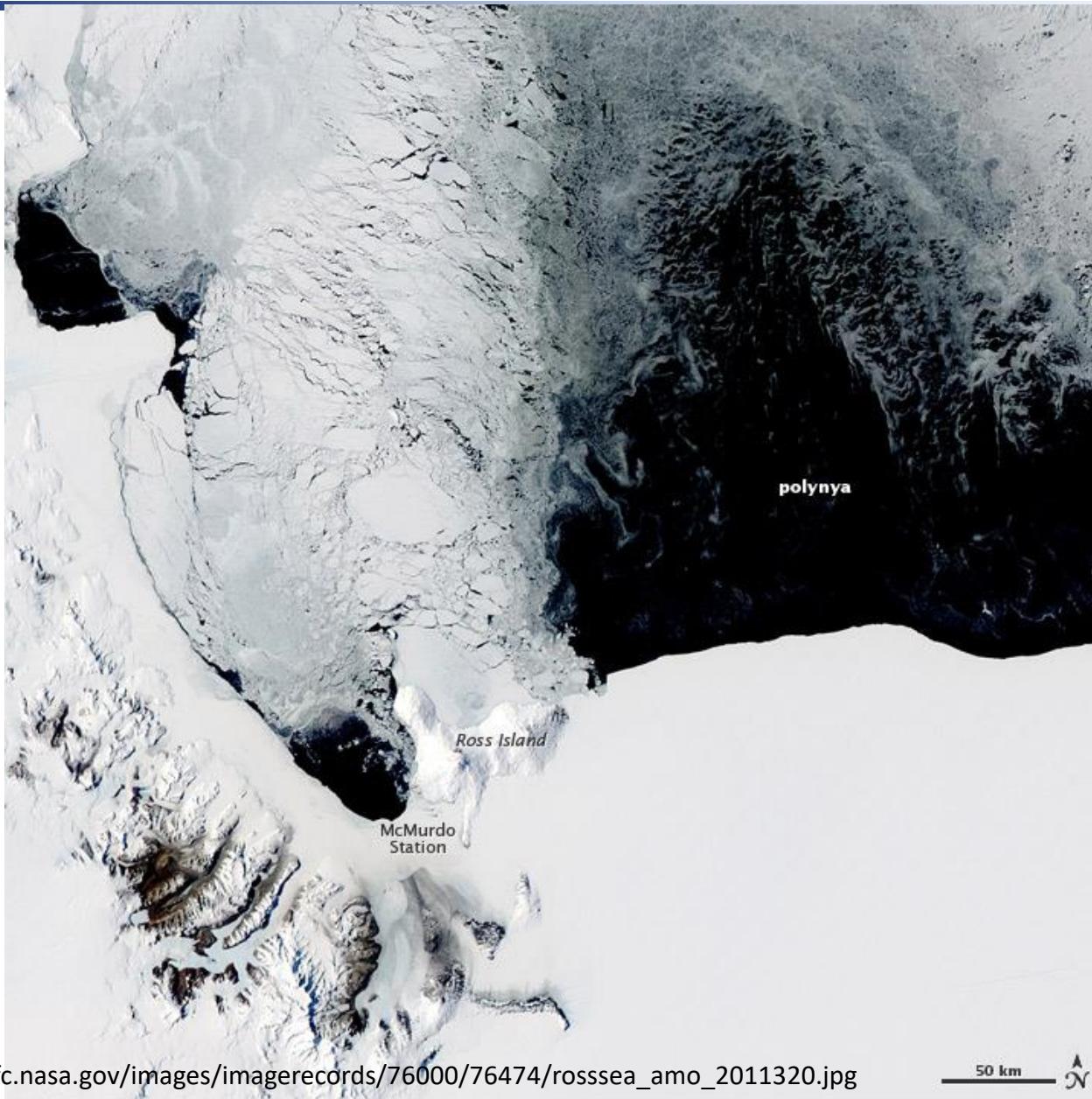
offene Wasserfläche – Bildung durch Land-Seewind-Zirkulation

Polynja – Antarktis



Küstenpolynja nahe dem Filcher-Eisschelf

Polynja – Antarktis



Weiterführende Literatur

- Fahrbach, E. (2011): Meeresströmungen und Wassermassen, in: José L. Lozán et al. (Hrsg.): Warnsignal Klima: Die Meere - Änderungen und Risiken. Wissenschaftliche Auswertungen, Hamburg, 25-31 https://www.klima-warnsignale.uni-hamburg.de/wp-content/uploads/pdf/de/meere/warnsignal_klima-die-meere-kapitel-1_2.pdf
- Rahmstorf (2006): Thermohaline Ocean Circulation; http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Book_chapters/rahmstorf_eqs_2006.pdf

Literaturverzeichnis

- McKnight et al., 2009, Physische Geographie, 9. Auflage, Pearson Studium, München
- **Beck, M. L., Konitzer, S., Weidinger, E., & Peinert, R. (2017). Zukunft der Golfstromzirkulation: Fakten und Hintergründe aus der Forschung.**
- Baumgartner & Liebscher, 1996, Lehrbuch der Hydrologie, Allgemeine Hydrologie, Quantitative Hydrologie, 2. Auflage, Gebrüder Borntraeger, Berlin
- Lebreton, Slat, Ferrari et al., 2018, Evidence that the Great Pacific Garbage Patch is rapidly accumulating plastic; doi:10.1038/s41598-018-22939-w
- **Rahmstorf, 2006, Thermohaline Ocean Circulation;** http://www.pik-potsdam.de/~stefan/Publications/Book_chapters/rahmstorf_eqs_2006.pdf
- Rhein, Stramma, Krahmann, 1997, The spreading of Antarctic bottom water in the tropical Atlantic; http://ocp.ldeo.columbia.edu/res/div/ocp/pub/rhein/rhein_aabw.pdf
- **Thurman, 2014, Essentials of oceanography, Merrill, Columbus**
- Pickard, 1963, Descriptive physical oceanography, Pergamon Press, Oxford, England
- Karstensen et al., 2015, Open ocean dead zones in the tropical North Atlantic Ocean, Biogeosciences (BG), 12, 2597-2605

Literaturverzeichnis

- WBGU, 2006,
https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/sondergutachten/sg2006/pdf/wbgu_sn2006.pdf
- Gebhardt et al., 2011, Geographie, physische Geographie und Humangeographie, 2. Auflage, Spektrum Akad. Verlag, Heidelberg
- Bearman, 2001, Hydrodynamic damping of a large scale surface piercing circular cylinder in planar oscillatory, Elsevier