

Folgen des Klimawandels für Europa - Reißt der Golfstrom ab?



Marcus Dengler

FB1 / Physikalische Ozeanographie

Leibniz-Institut für Meereswissenschaften, Kiel

Physikalische Ozeanographie am IFM-GEOMAR

Beobachtungsprogramme zur

Rolle des Ozeans im
Klimasystem

und zu Wechselwirkungen
zwischen physikalischen,
biologischen und chemischen
Prozessen im Meer

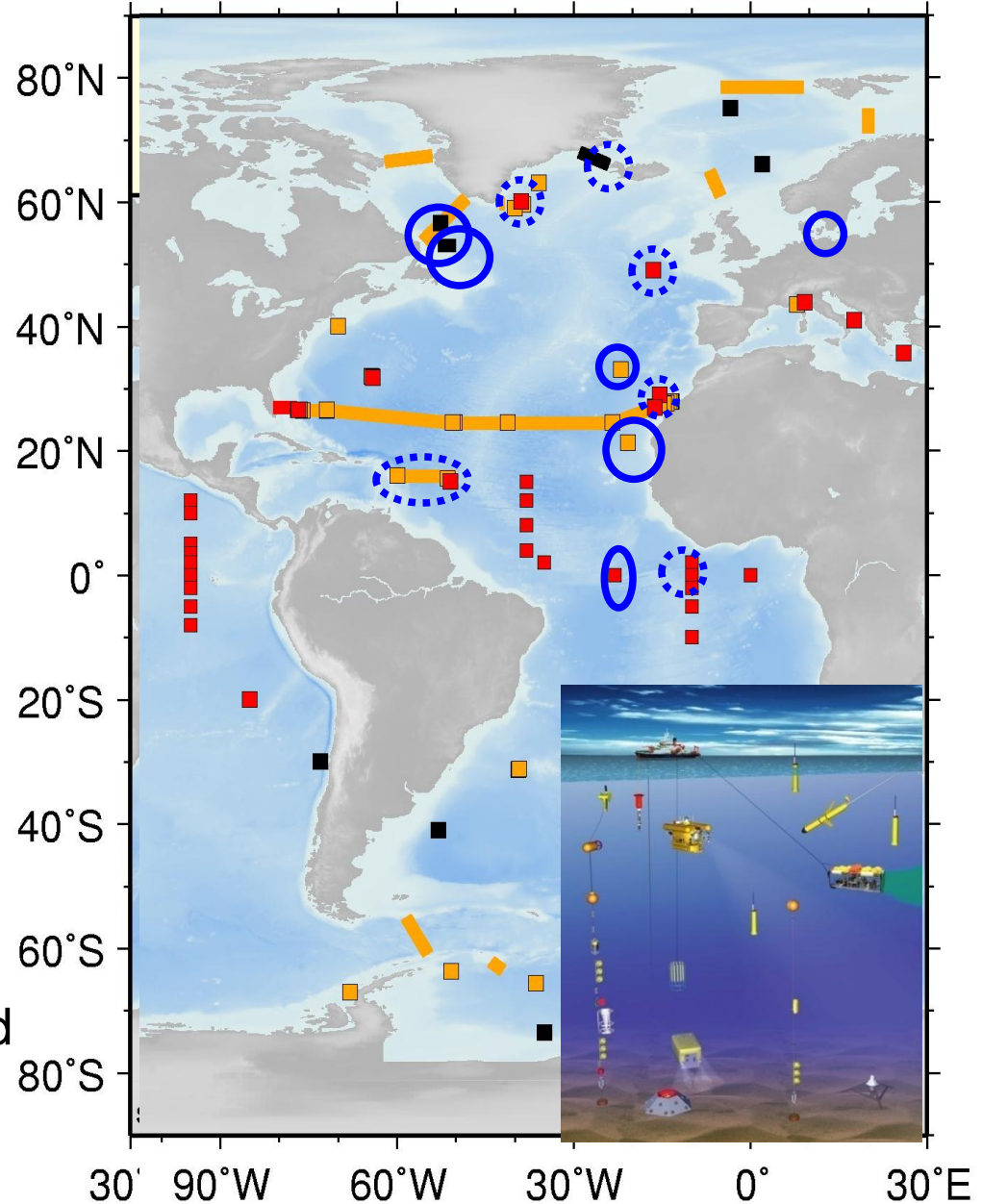
mit Fokus auf den Atlantischen
Ozean.



Ozean Observatorien

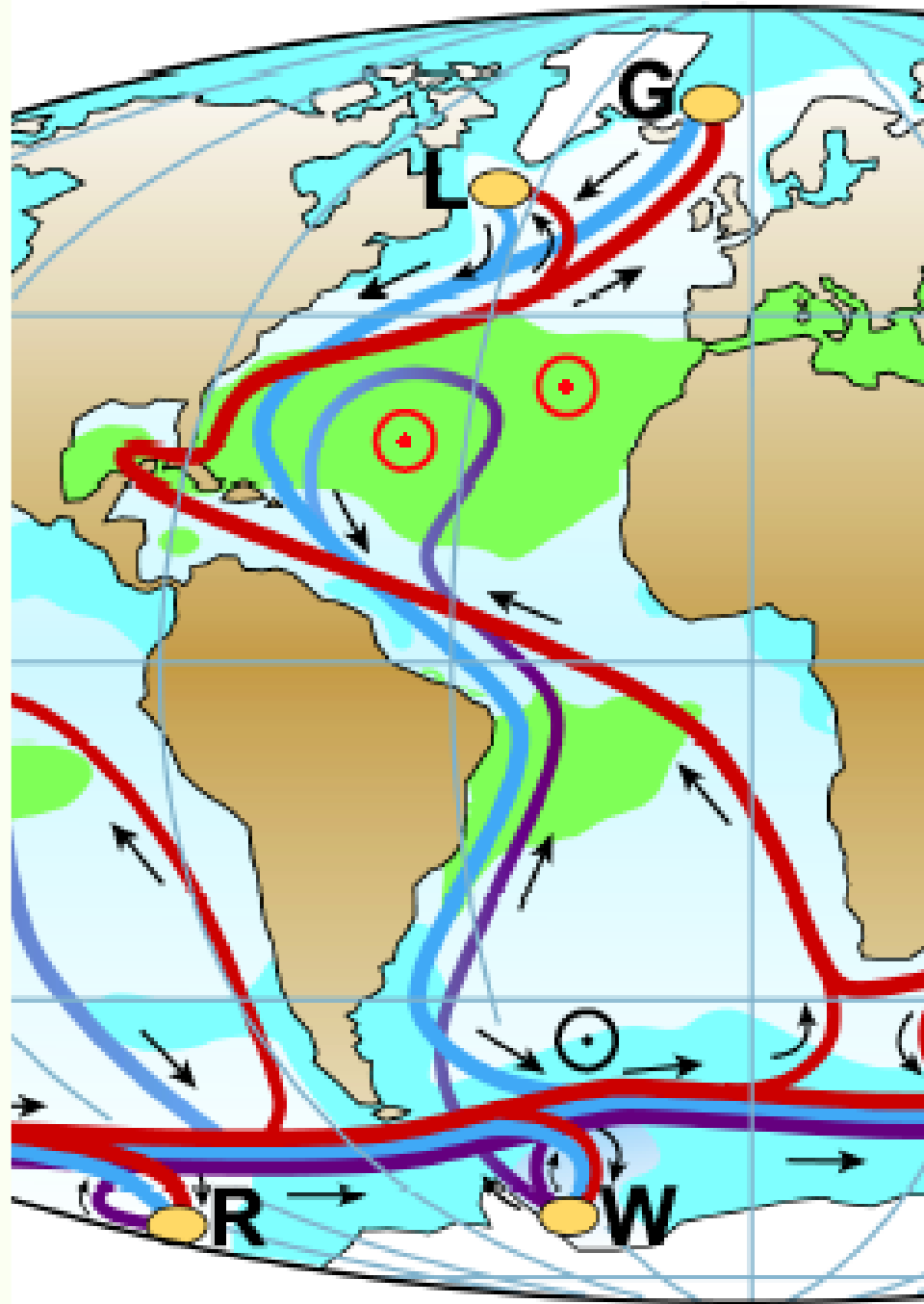
Verankerte Observatorien
die zur Zeit von der
Physikalischen
Ozeanographie
des IFM-GEOMAR
betrieben werden

- Full IFM-GEOMAR operated
- Partly IFM-GEOMAR operated



Fahrplan

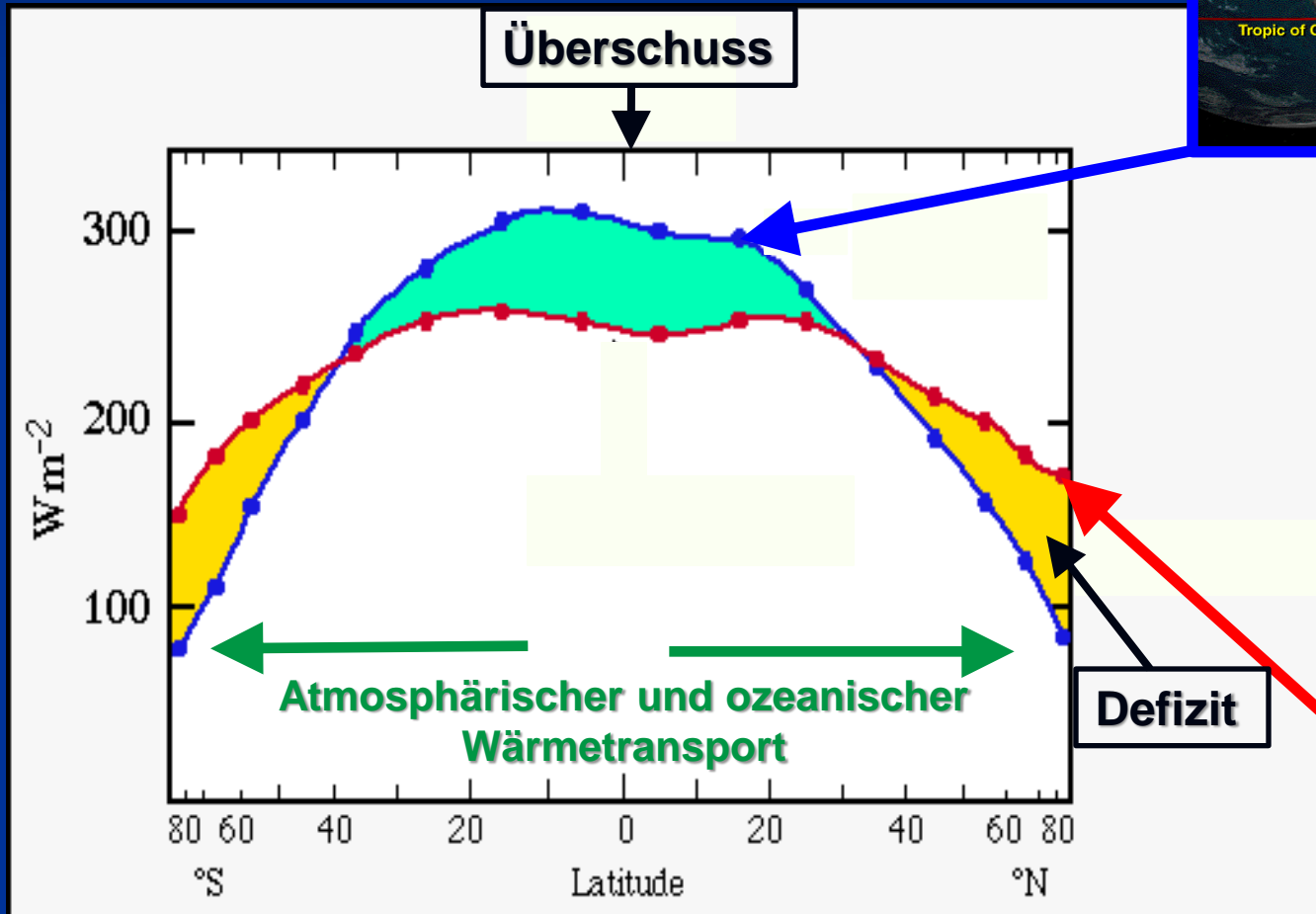
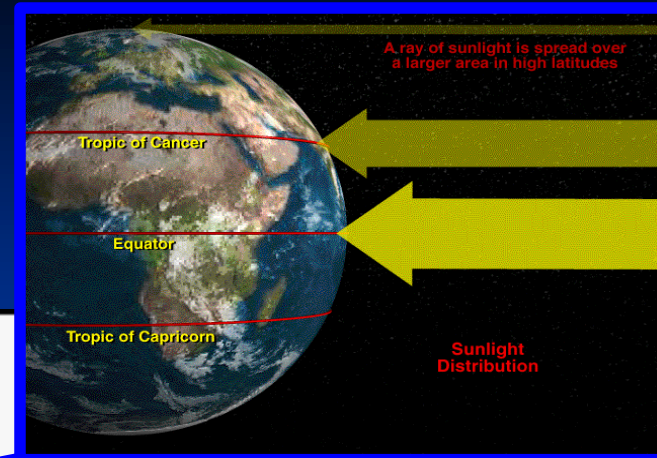
- **Hintergrund**
“Energie der Strömungen”
- **Beobachtungen**
“Messungen des Pulses der Meere”
- **Modelle**
“Was kommt auf uns zu?”



Frage # 1

**Woher kommt die Energie der Strömungen
im Ozean?**

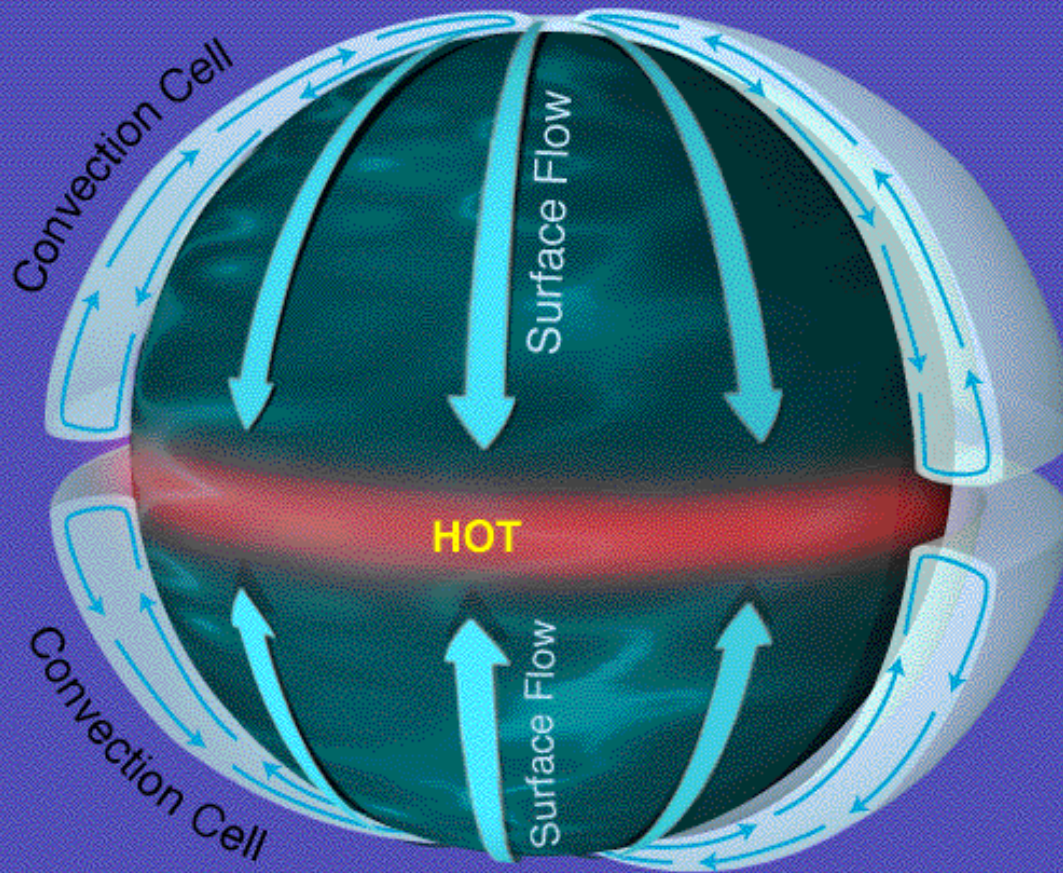
Strahlungsbilanz der Erde



- Zufuhr von Energie in den Tropen und den Subtropen
- Abgabe von Energie in subpolaren und polaren Regionen

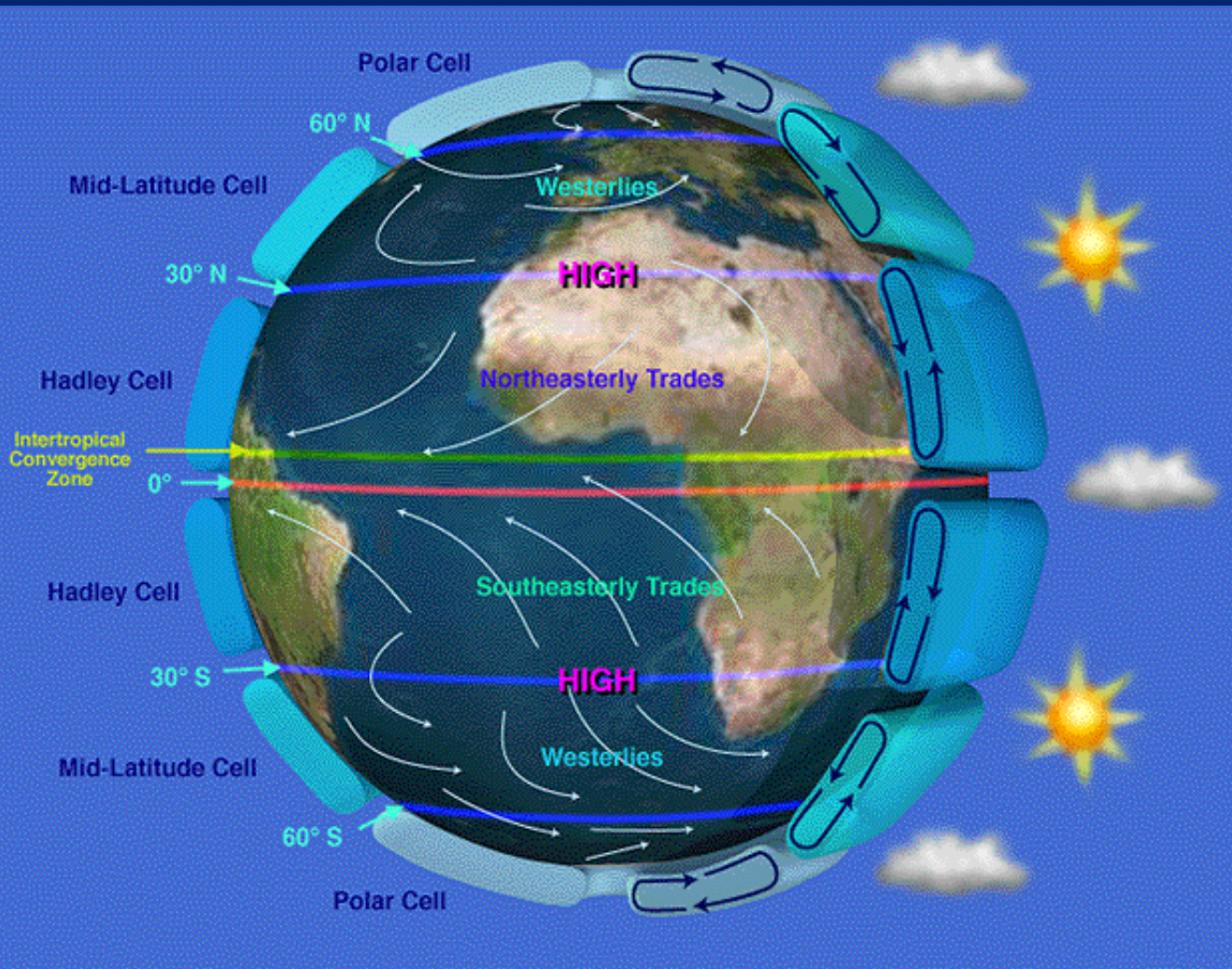
$$I \sim \sigma T_E^4$$

Großräumige Konvektionsbewegung



Wenn die Erde sich nicht drehen würde, würden die Winde an der Meeresoberfläche aus dem Norden kommen

Großräumiges Windsystem der Atmosphäre



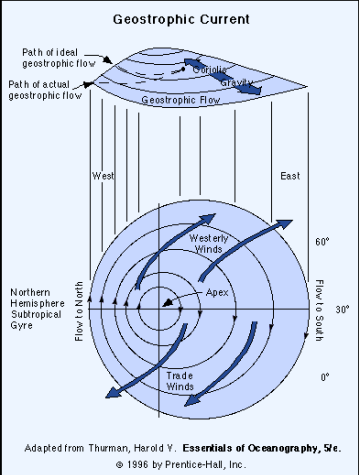
Die Winde werden
von der
Corioliskraft
beeinflusst

Polare Ostwinde

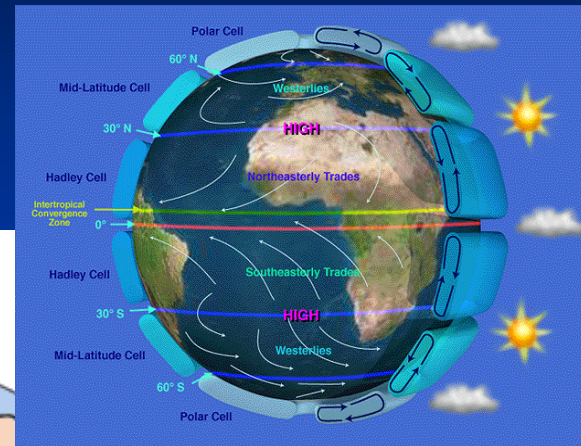
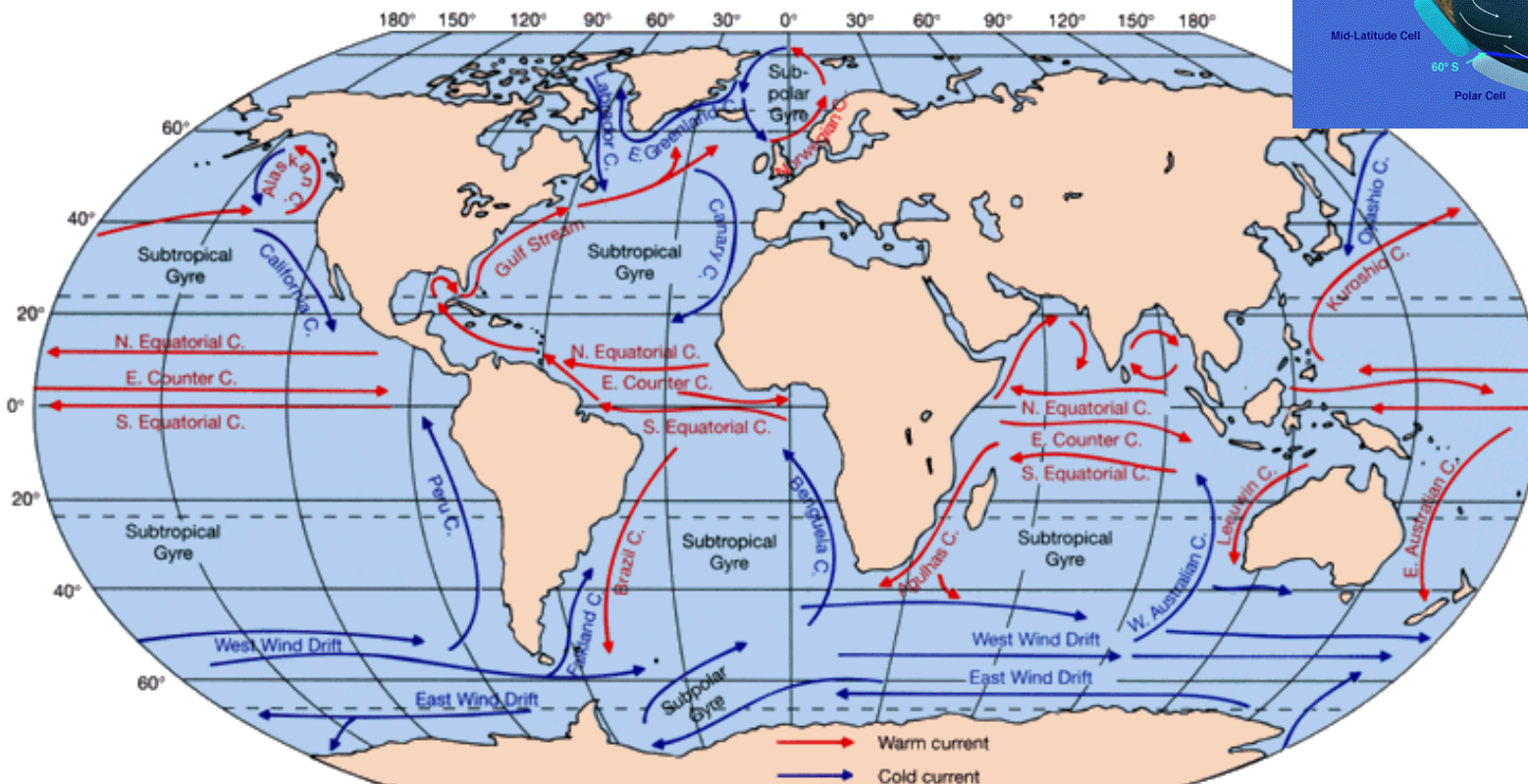
Westwinde

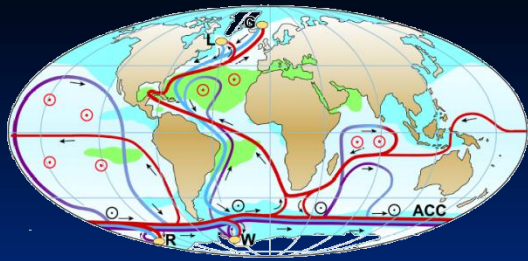
Passatwinde

Winde treiben die Meeresströmungen an: windgetriebene Zirkulation



Wind-Driven Surface Currents in February and March



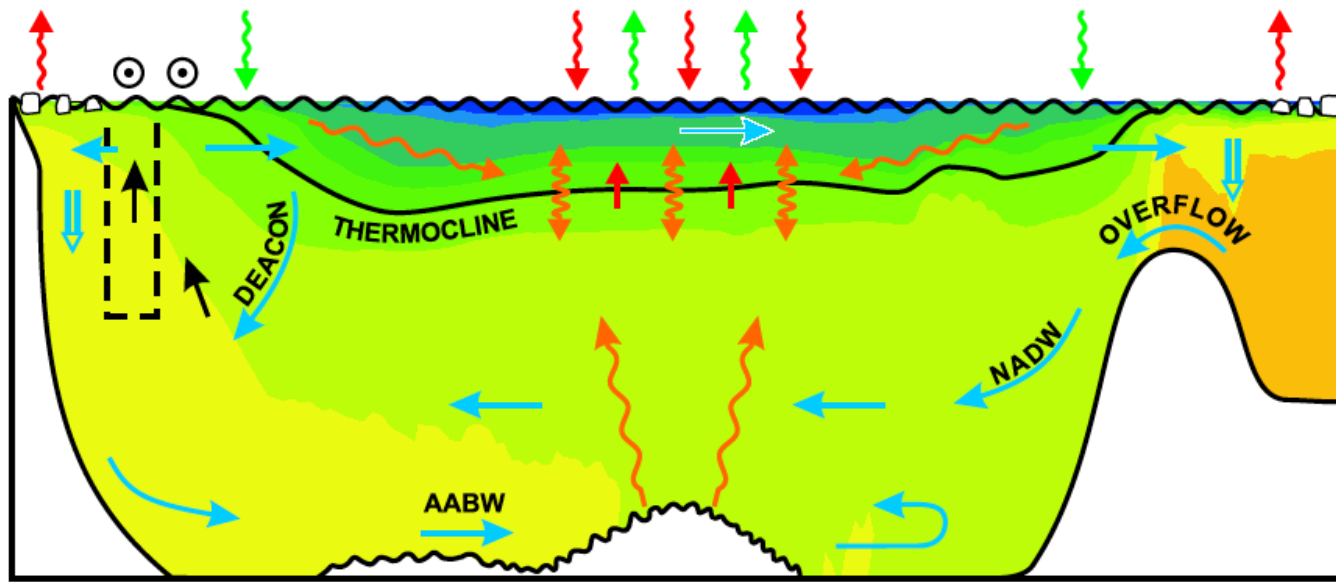


Wind und Sonne ändern auch die Meeresoberflächentemperatur

abkühlen

erwärmen

abkühlen



S

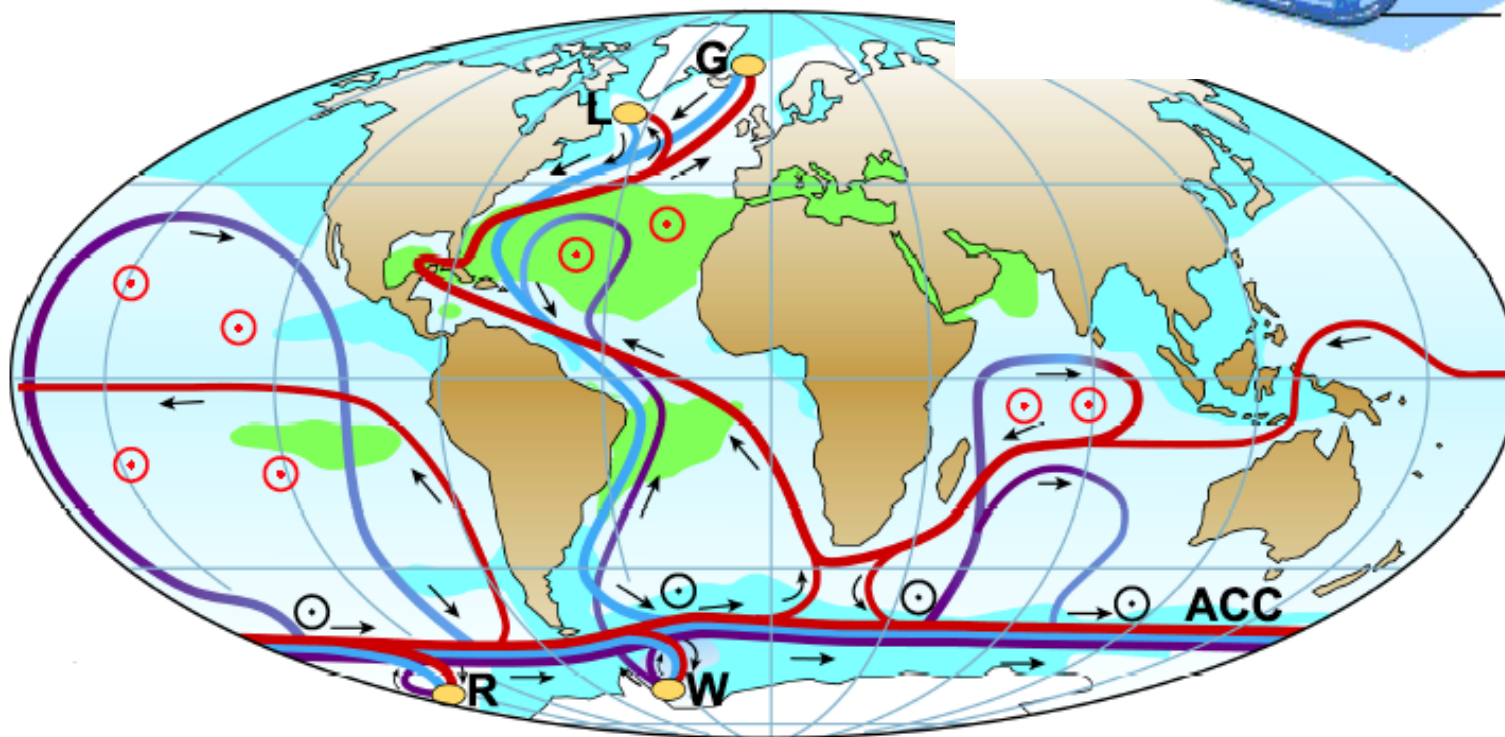
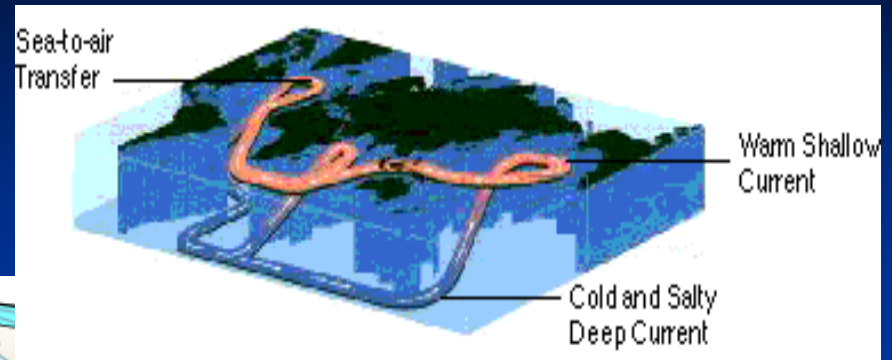
EQ

N

- | | | |
|--------------------------|-------------------------|----------------------|
| volume transport | mixing-driven upwelling | deep-water formation |
| wind-driven upwelling | internal waves | heat fluxes |
| wind | diapycnal mixing | freshwater fluxes |
| profile of Drake passage | | |

Thermohaline Zirkulation

The grand ocean
“conveyor” of heat



- Surface flow
- Deep flow
- Bottom flow
- Deep Water Formation

- ⊙ Wind-driven upwelling
- ⊙ Mixing-driven upwelling
- Salinity > 36 ‰
- Salinity < 34 ‰

- L** Labrador Sea
- G** Greenland Sea
- W** Weddell Sea
- R** Ross Sea

(Kuhlbrodt et al. 2005)

Punkt # 1

Sowohl der „mechanische“ Antrieb des Windes, als auch der thermische (und haline) Austausch zwischen Ozean und Atmosphäre treiben die ozeanischen Strömung an.

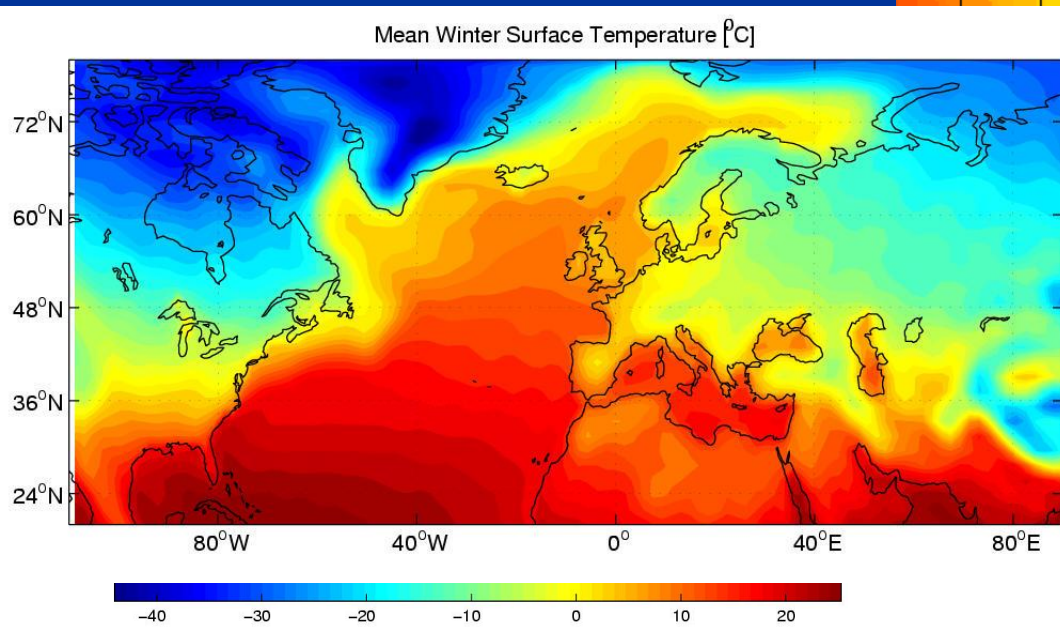
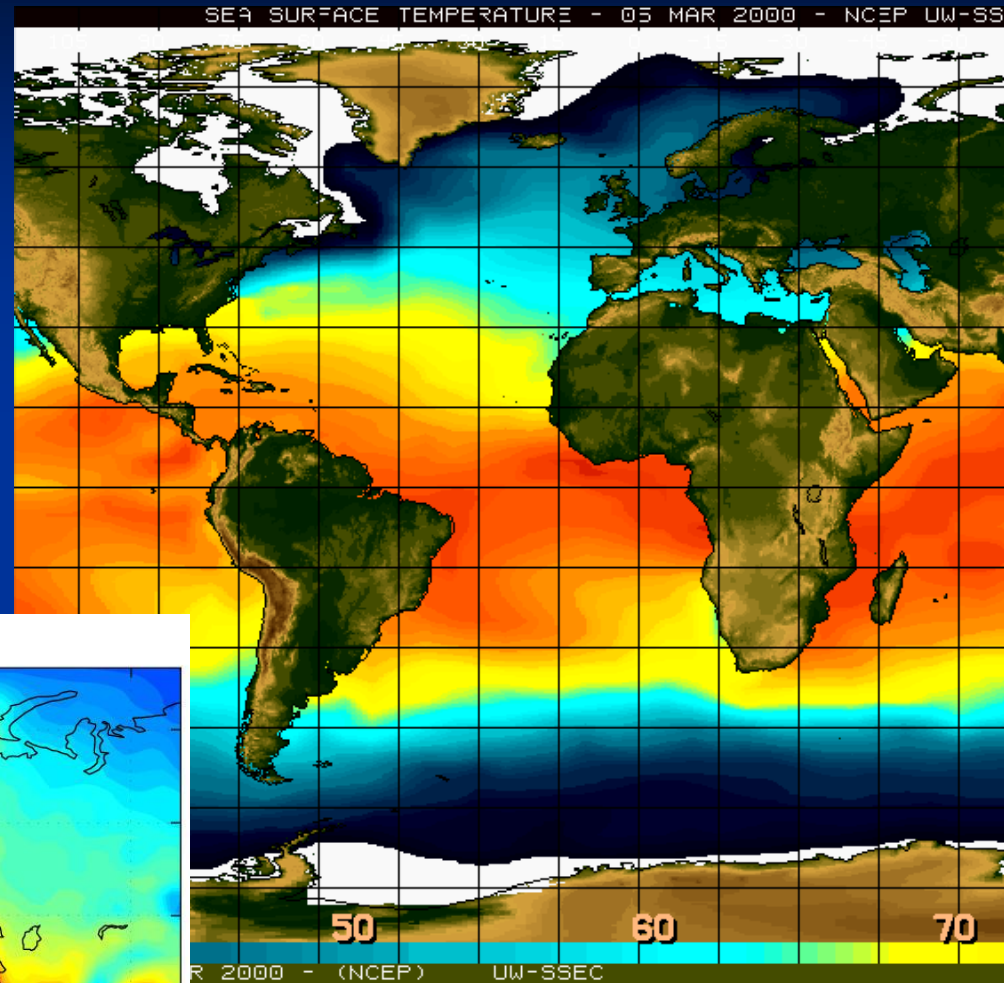
Frage # 2

Wie verteilt sich der Wärmetransport zwischen Ozean und Atmosphäre?

Oder was hält Europa warm?

Oberflächentemperaturen im Atlantik

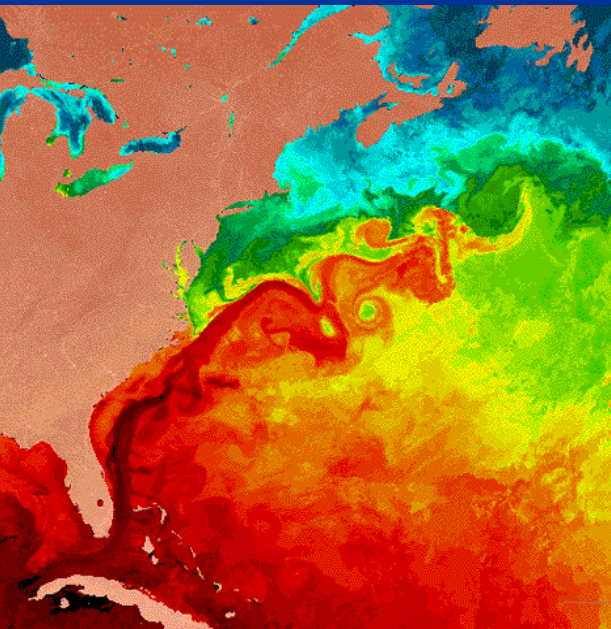
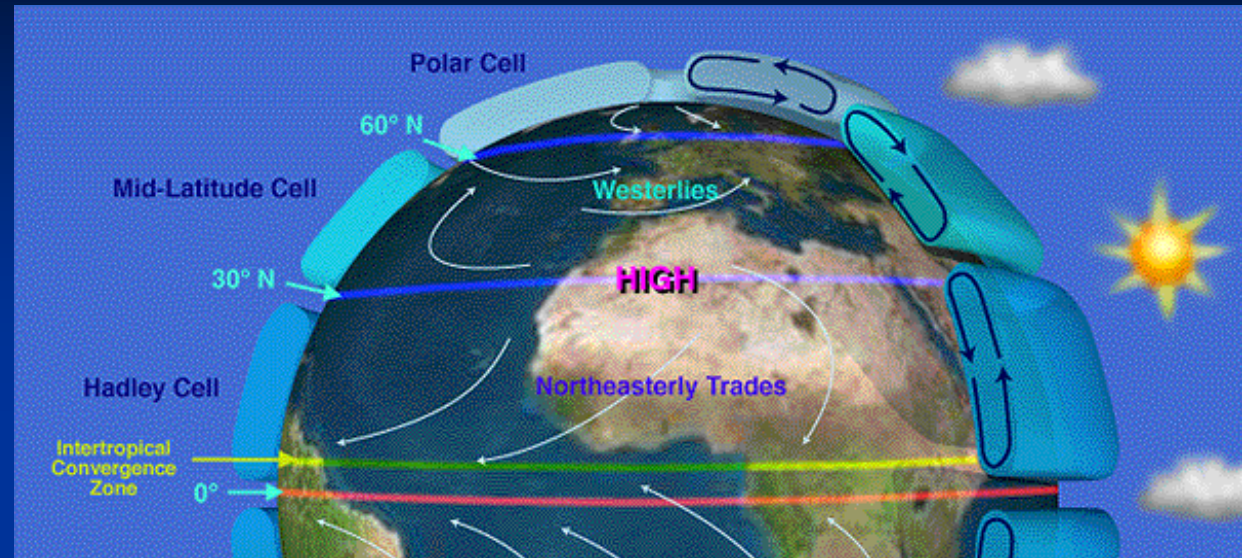
- Temperaturdifferenz zwischen Äquator und den Polen
- Ozean ist im Winter viel wärmer als das Land.



- Wärmespeicherung
- Wärmetransport

Wärmetransport

Wissenschaft durch
Abstimmen?



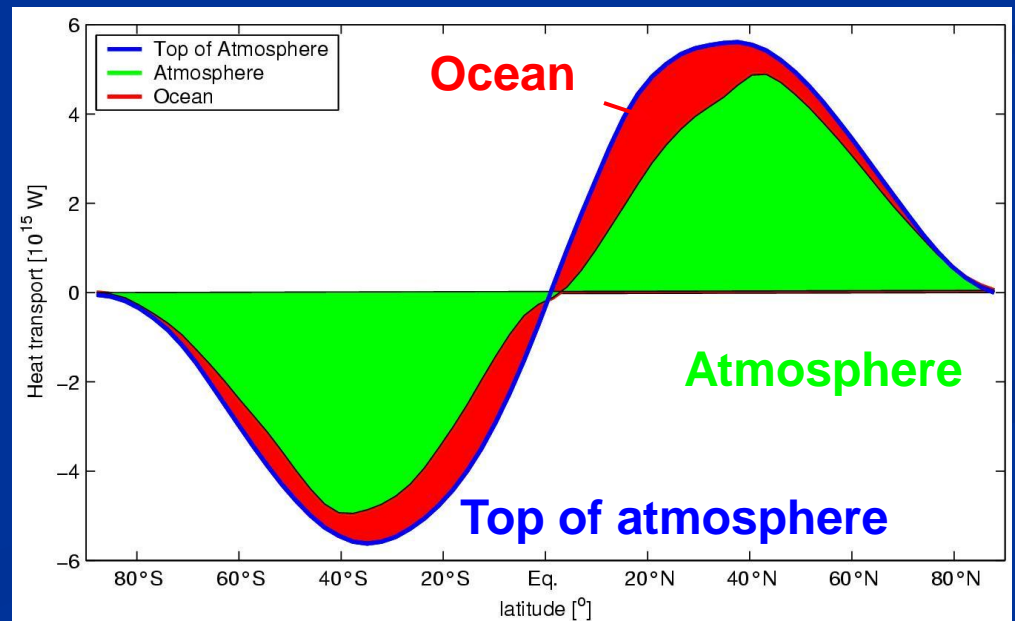
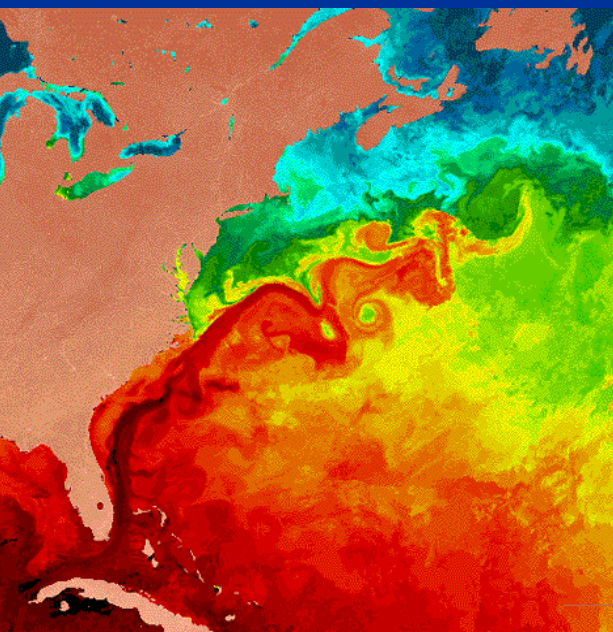
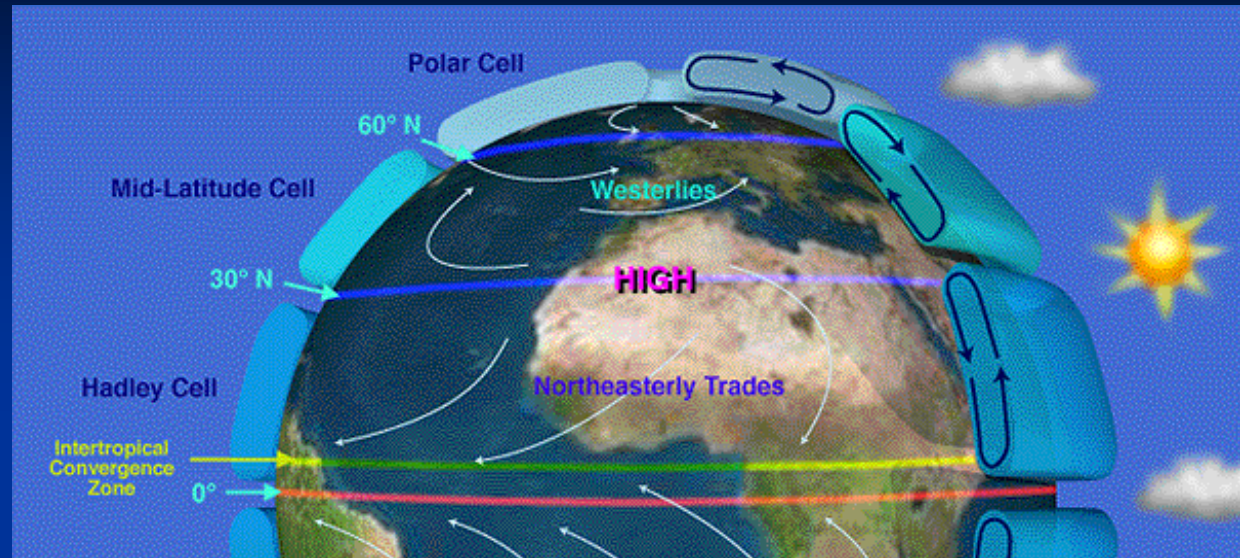
Ozean und Atmosphäre können große
Mengen von Wärme transportieren.

- A) Der Ozean transportiert am meisten
- B) Die Atmosphäre transportiert mehr

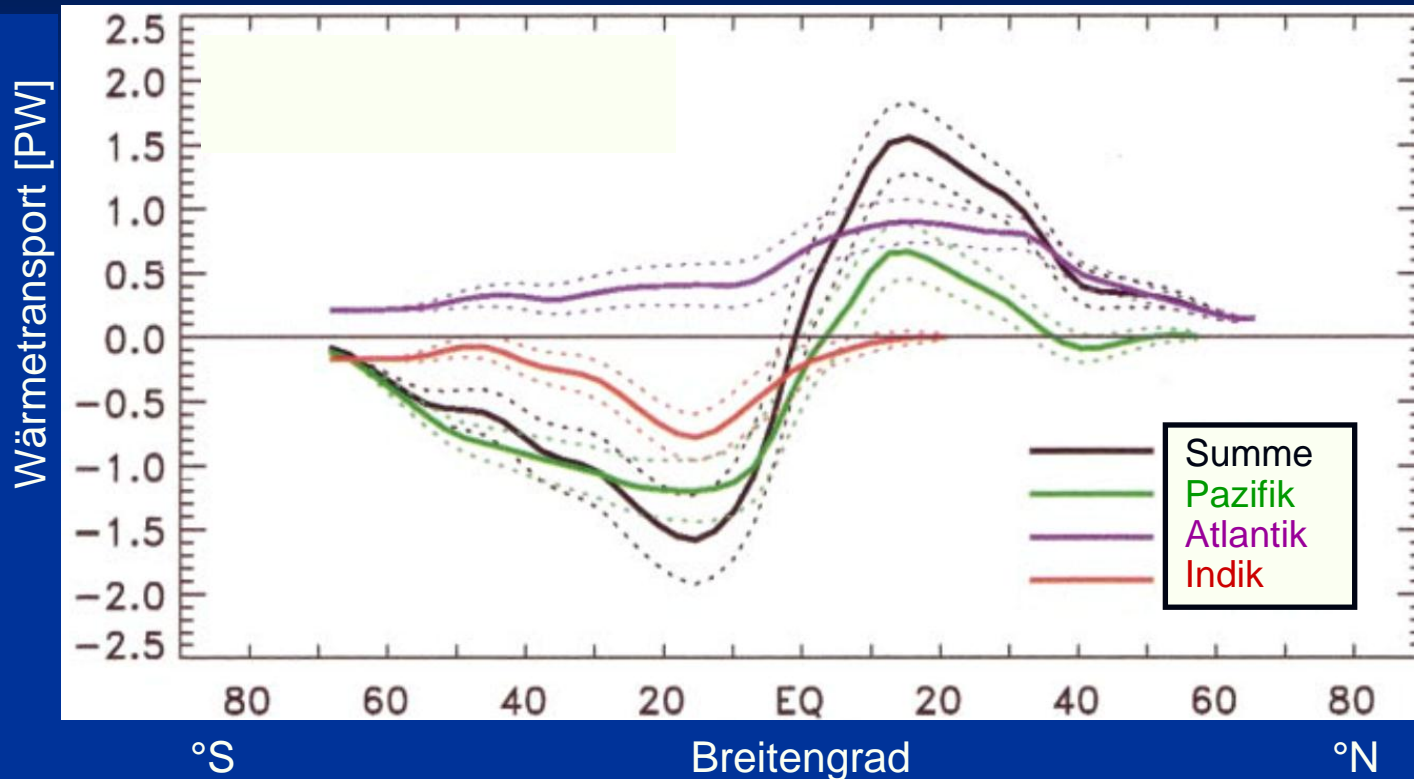
Wärmetransport

Man bräuchte eine Millionen 1000-Megawatt Kraftwerke (größte existierende Kraftwerke) um eine vergleichbare Menge an Energie zu erzeugen.

ca. $\sim 6 \cdot 10^{15} \text{ W}$ 30°N/S .



Wärmetransport der verschiedenen Ozeane



(Trenberth und Caron, 2001)

Der Atlantik weist einen anomalen Wärmetransport auf. Der Ozean transportiert Wärme ausschließlich nach Norden.

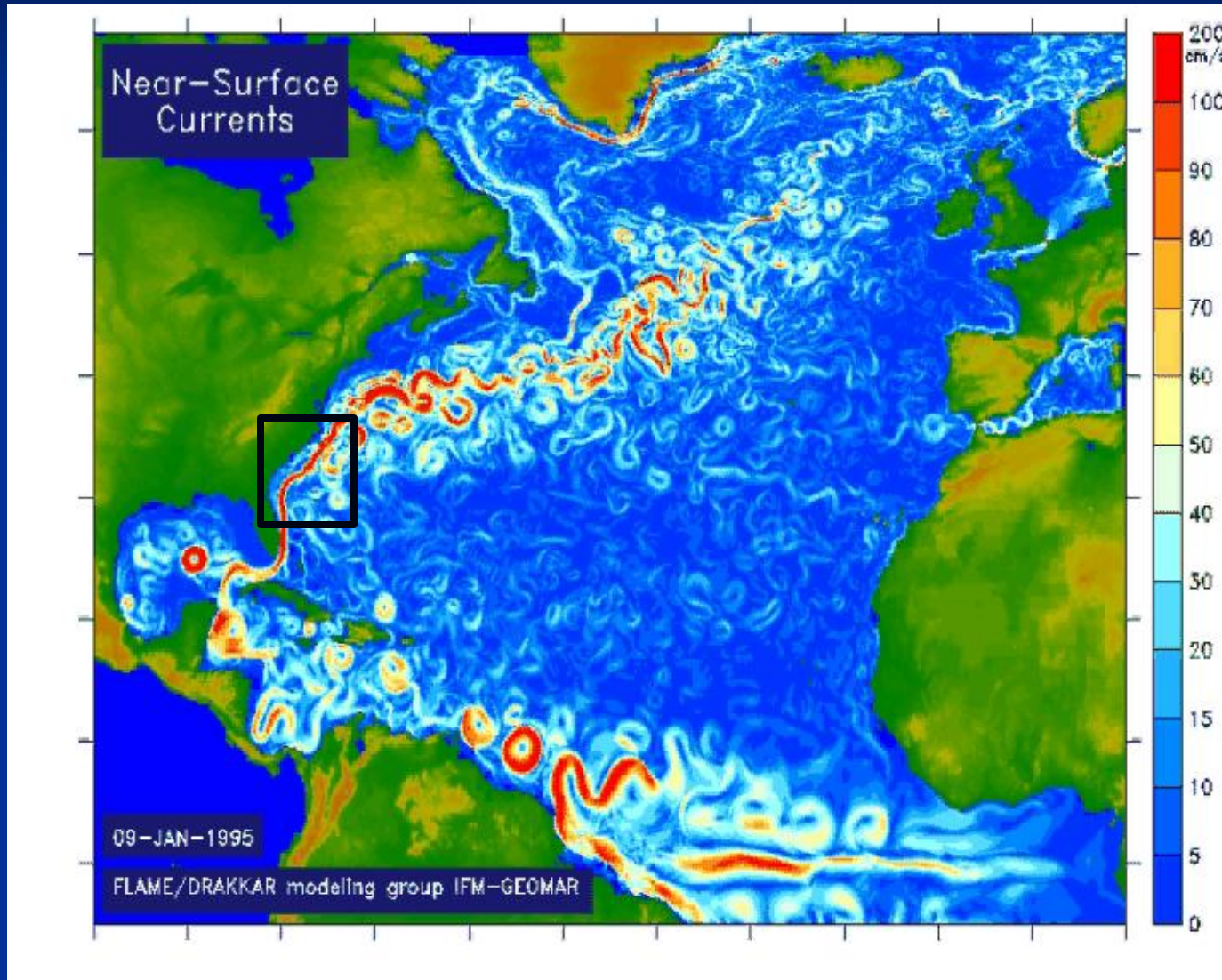
Punkt # 2

- Im klimatischen Mittel liefert die Atmosphäre (Winde) >70% der Wärme nach Norden.
- Der Wärmetransport im Atlantik ist im gesamten Ozean nordwärts gerichtet
- Der Ozean könnte aber für starke Variationen sorgen.

Frage # 3

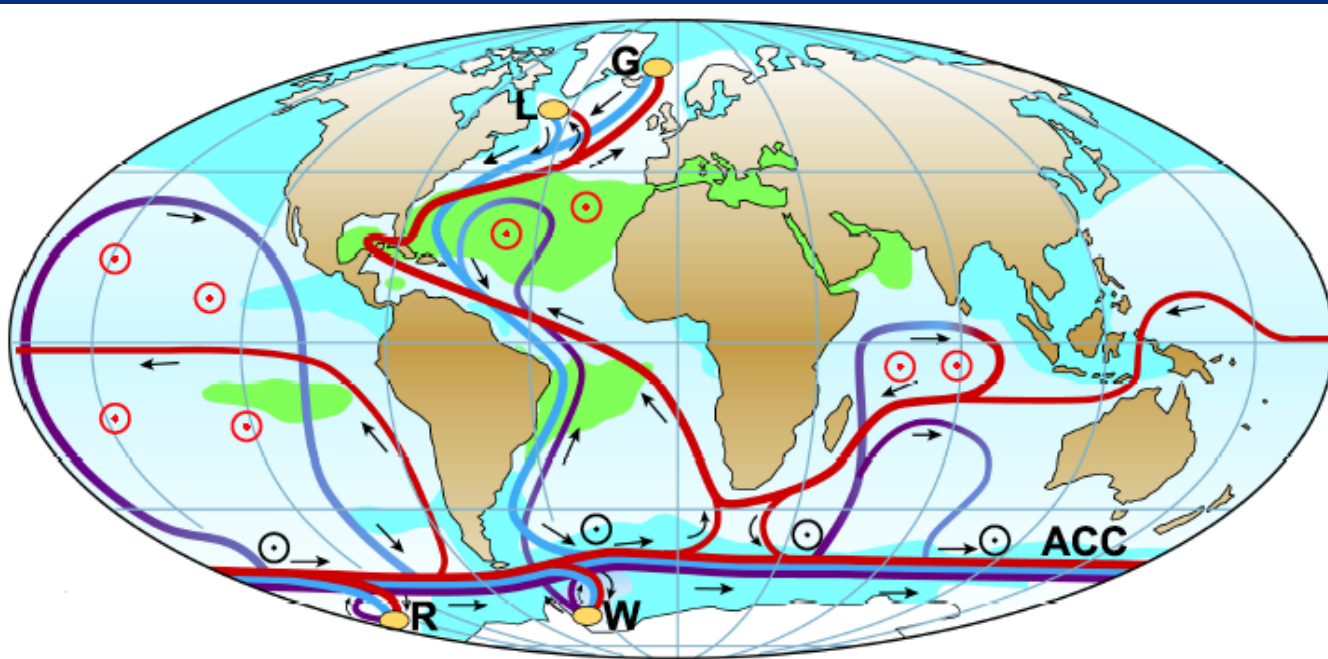
**Reißt der Golfstrom ab – oder besser:
verändert sich die Zirkulation im Nordatlantik?**

Simulierte Oberflächenströmungen (1995-2005) in einem hochauflösenden Ozeanmodell



Thermohaline Zirkulation

The grand ocean “conveyor” of heat



Antrieb des
Golfstroms

Wind:
ca. 80% - 90%

Thermohalin
(Dichteunterschiede)
ca. 10%-20%

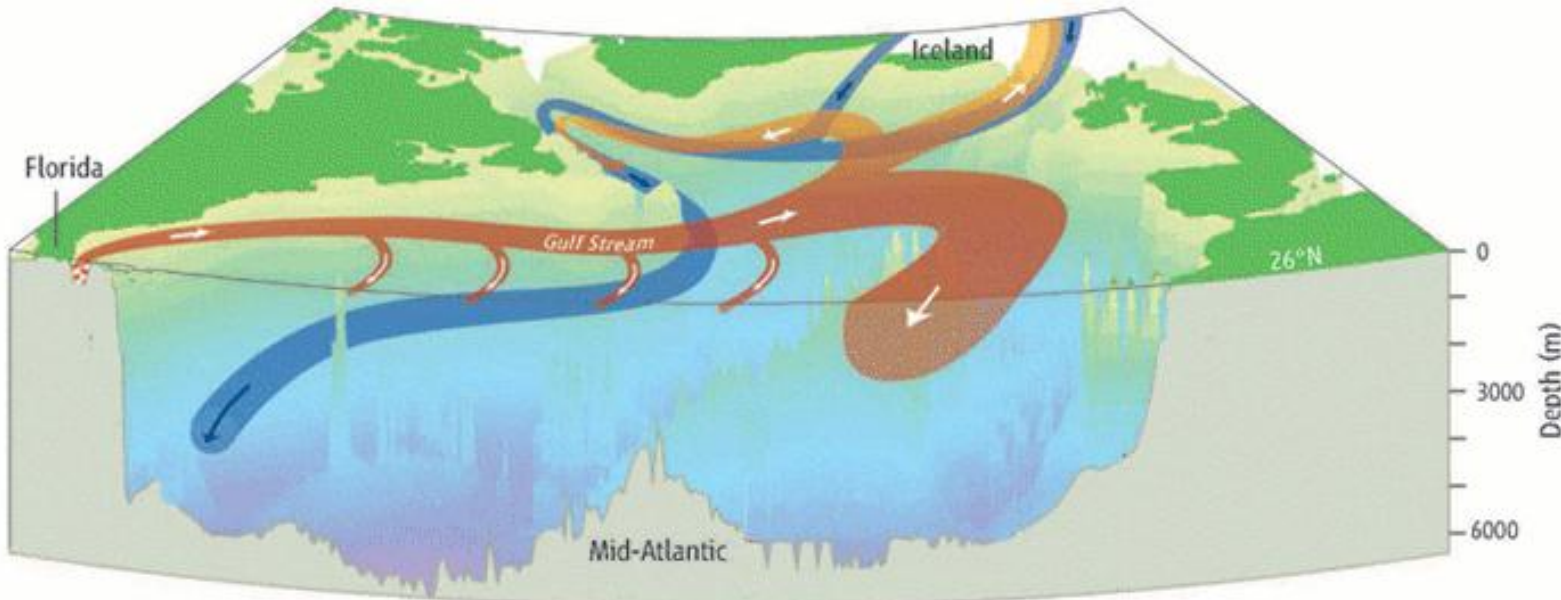
— Surface flow	⊙ Wind-driven upwelling	L Labrador Sea
— Deep flow	⊙ Mixing-driven upwelling	G Greenland Sea
— Bottom flow	■ Salinity > 36 ‰	W Weddell Sea
● Deep Water Formation	■ Salinity < 34 ‰	R Ross Sea

Der thermohaline Transport lässt sich nur schwer bestimmen.

Meridionale Umwälzzirkulation (Meridional Overturning Circulation, MOC) (La cellule méridienne de circulation)

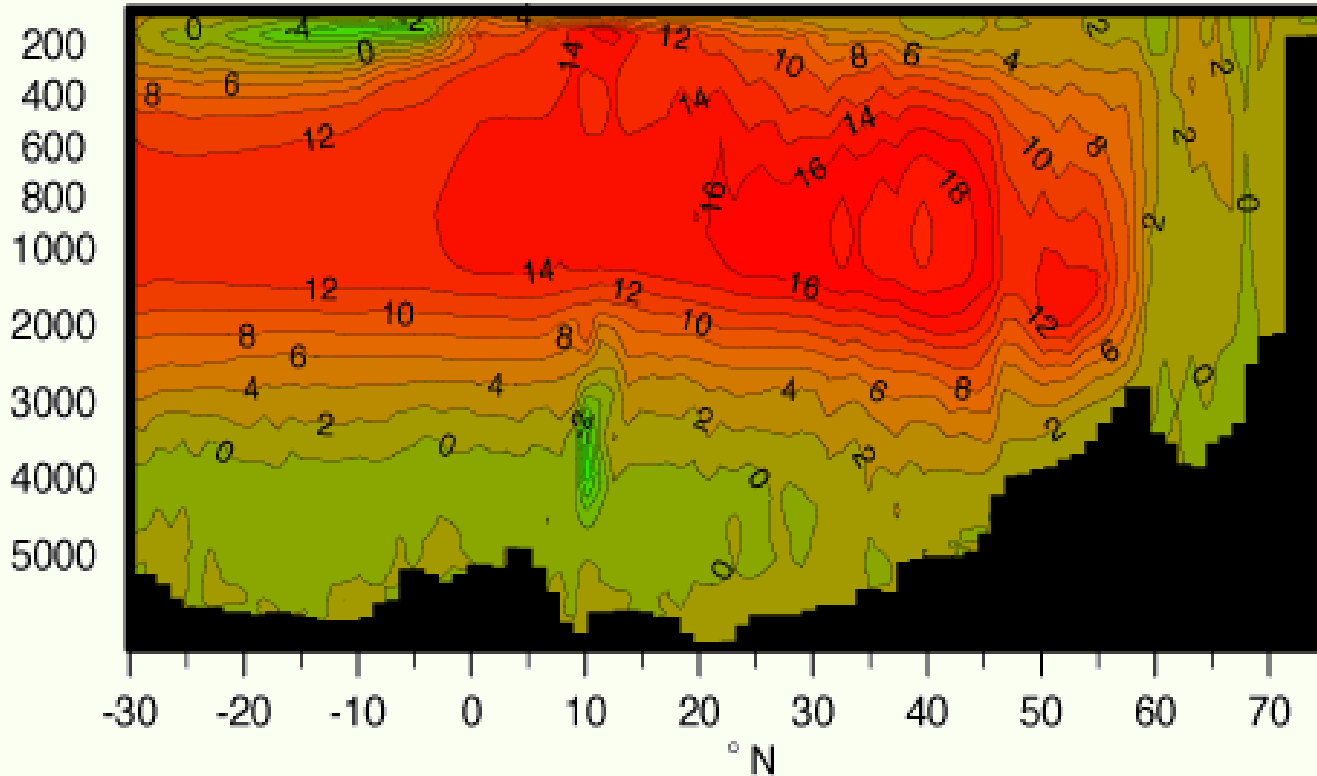
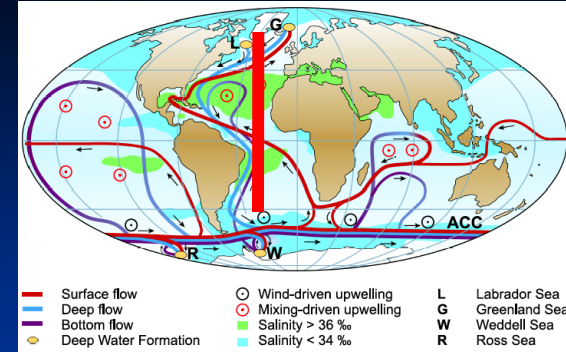
Die meridionale Umwälzzirkulation stellt die zonal (Ost-West-Richtung) gemittelte Strömung in Abhängigkeit der Tiefe und der Breite da.

Sie enthält thermohaline und windgetriebene Anteile.



Meridionale Umwälzzirkulation

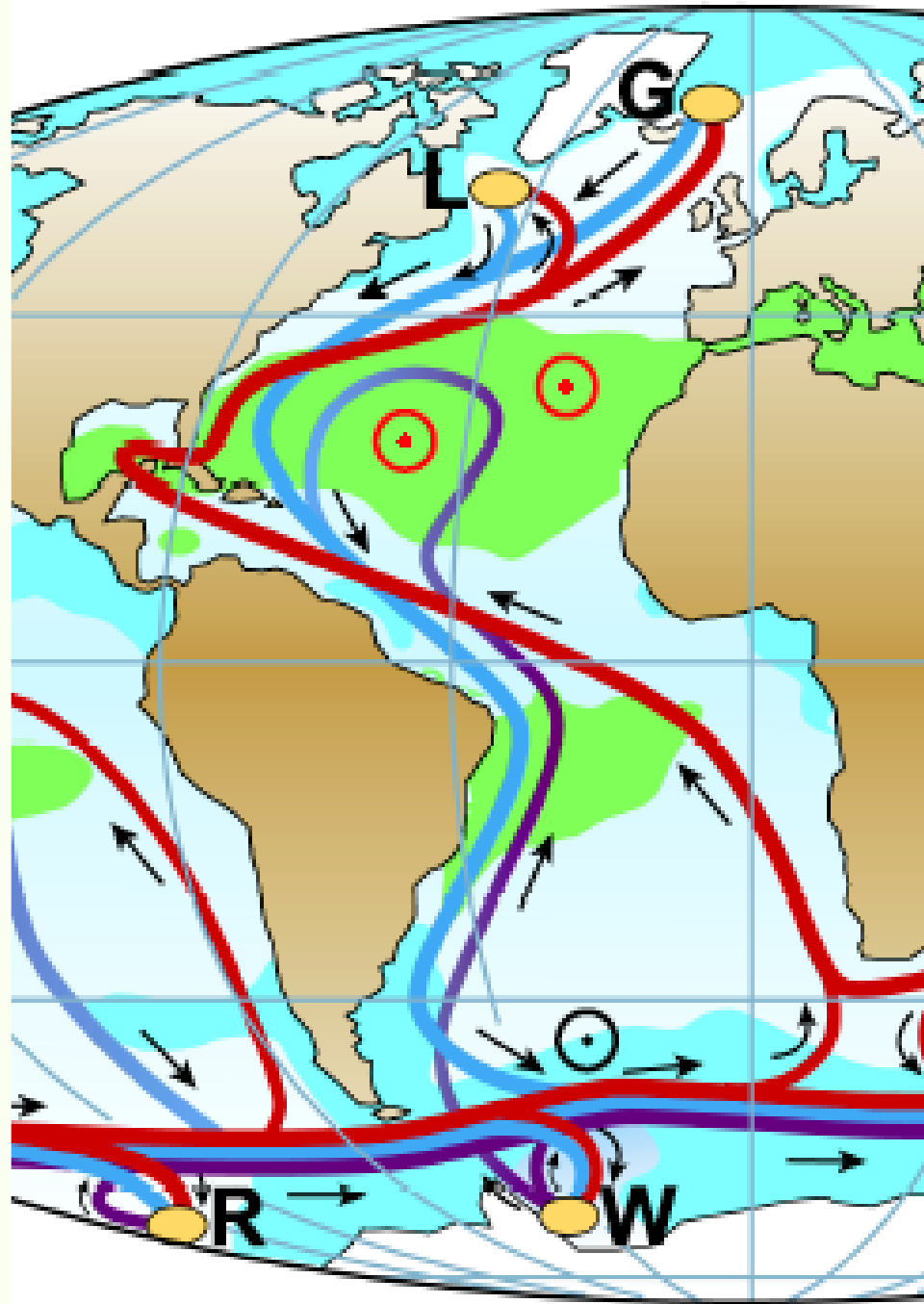
Stromfunktion der Atlantischen Meridionalen Umwälzzirkulation



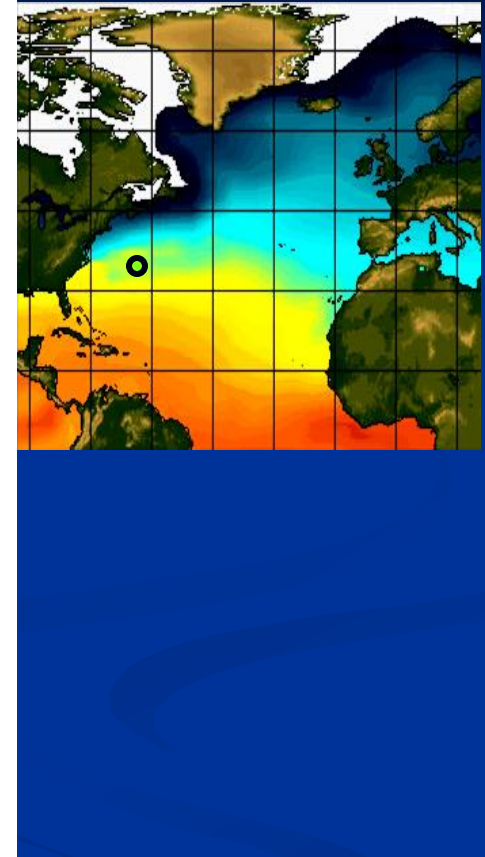
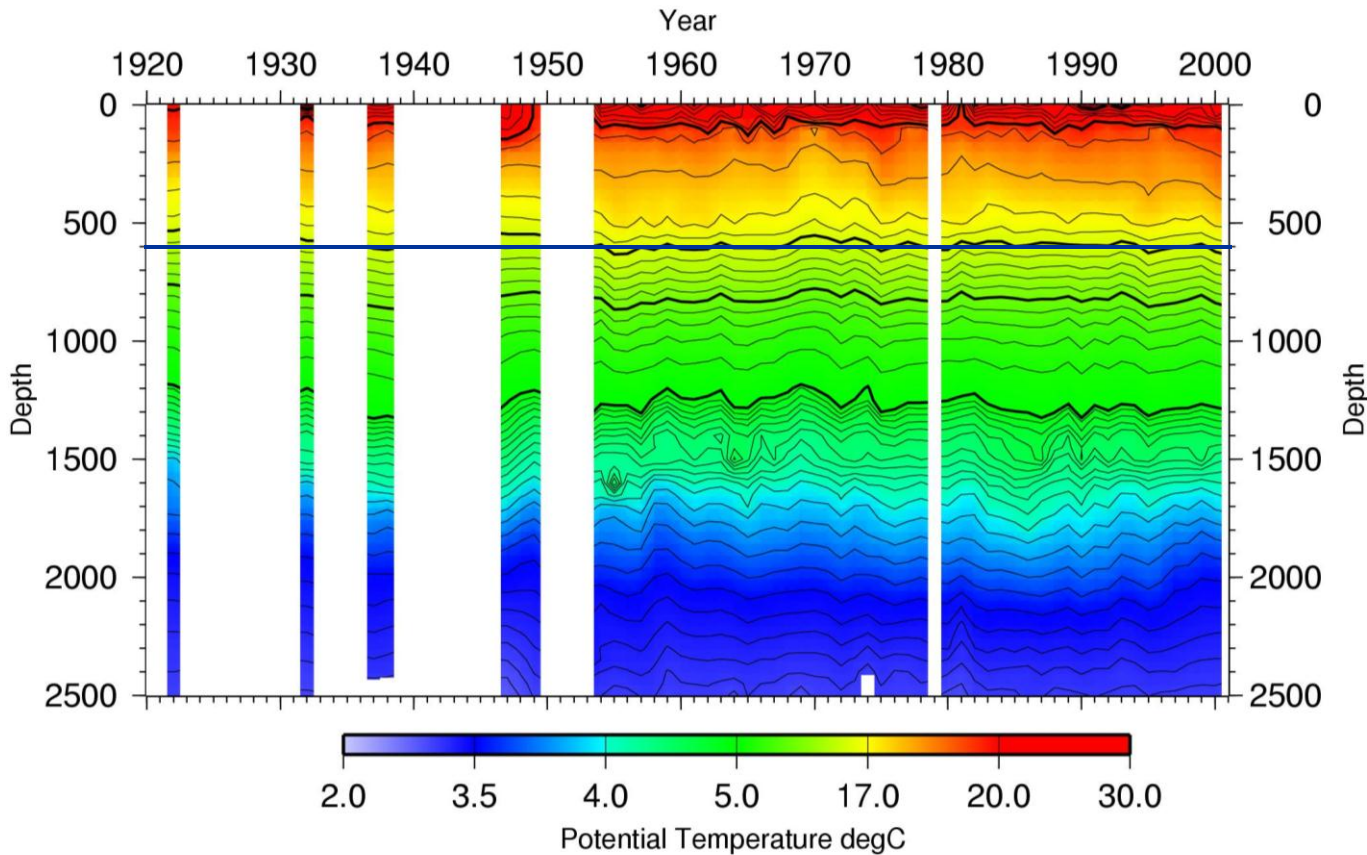
Die Zirkulation beschreibt den nordwärts gerichteten Transport warmer Wassermassen, das Absinken von Wasser in hohen Breiten und den südwärts gerichteten Transport kalter Wassermassen im tiefen Ozean.

Fahrplan

- Hintergrund
“Energie der Strömungen”
- Beobachtungen
“Messungen des Pulses der Meere”
- Modelle
“Was kommt auf uns zu?”

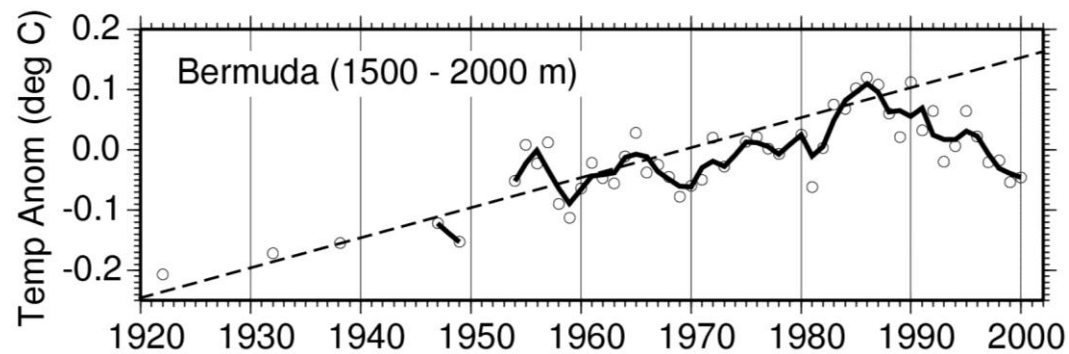


Beobachtete Temperaturänderungen im subtropischen Nordatlantik

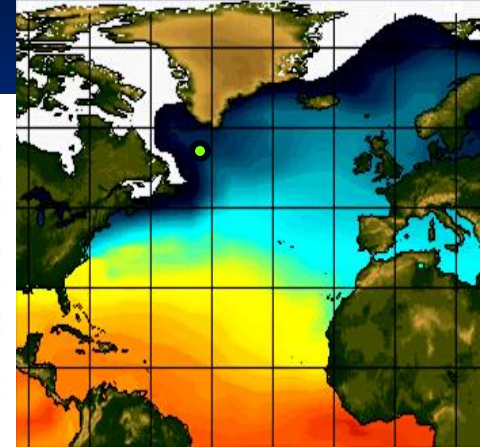
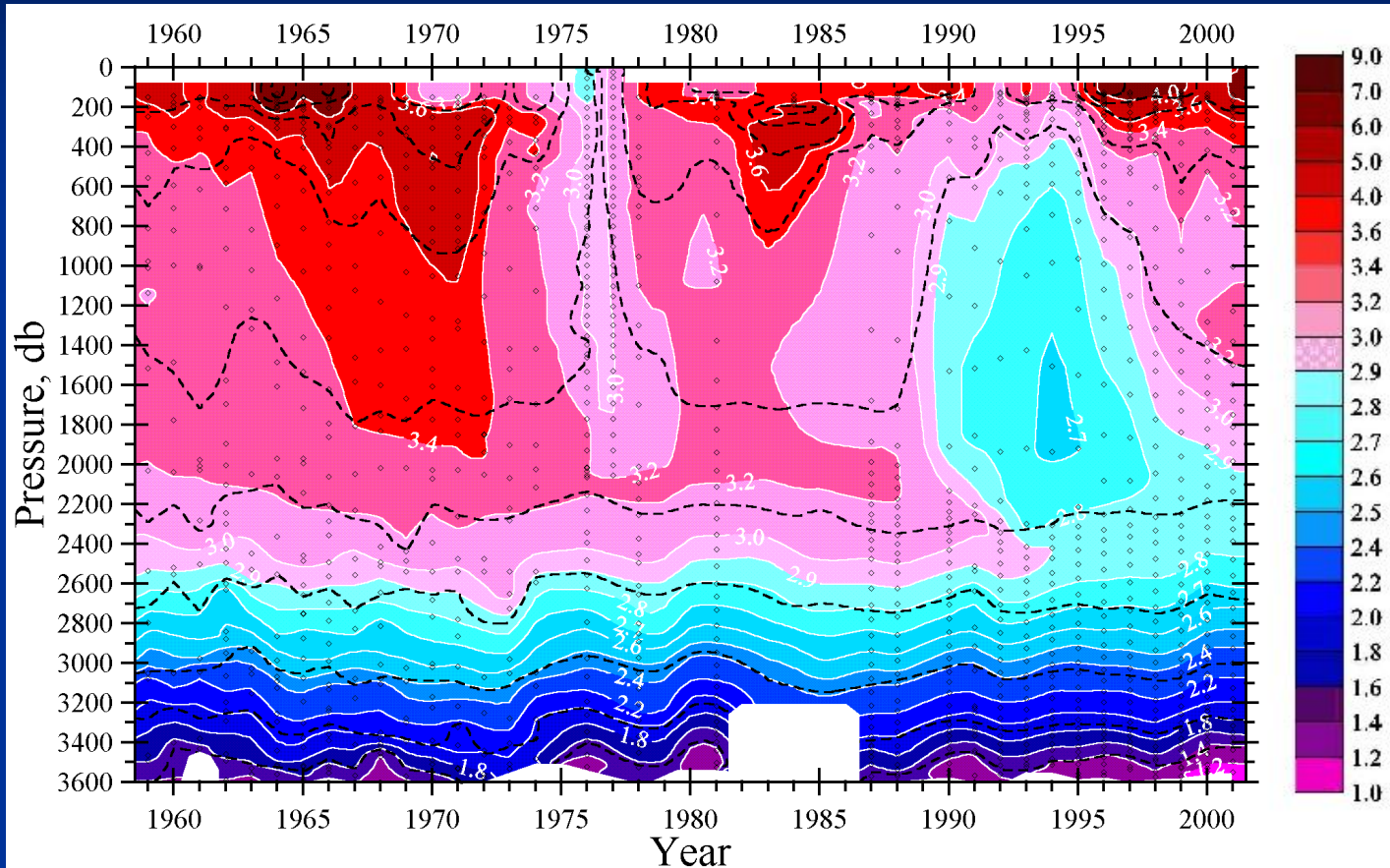


**Time-series for 1925 to 2001
of ocean temperatures at
Bermuda.**

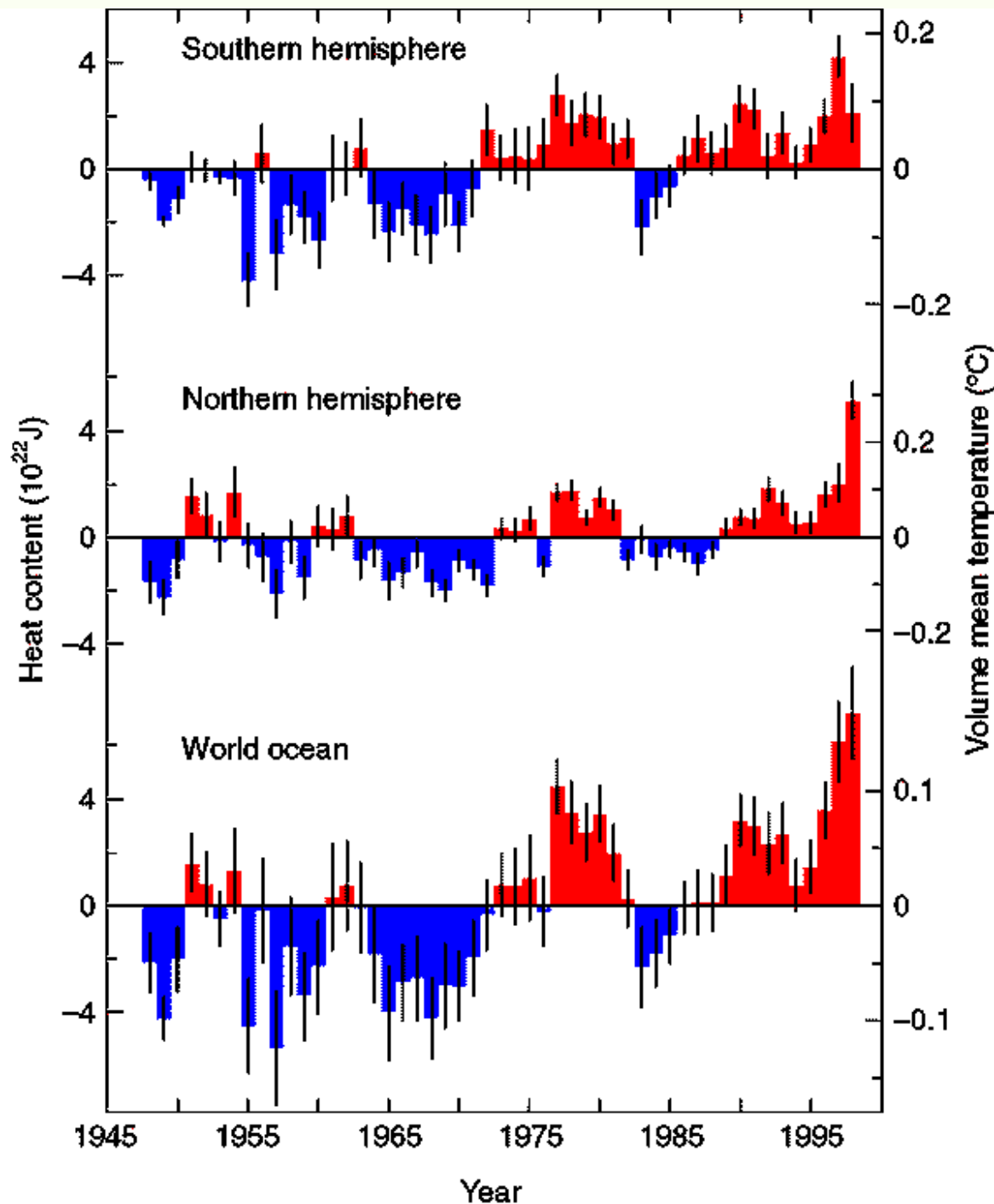
(Curry, pers. comm, 2002)



Beobachtete Temperaturänderungen im subpolaren Nordatlantik



Time-series for 1958 to 2001 of ocean temperatures in
the Labrador Sea. (*Yashavaev et al., 2007*)



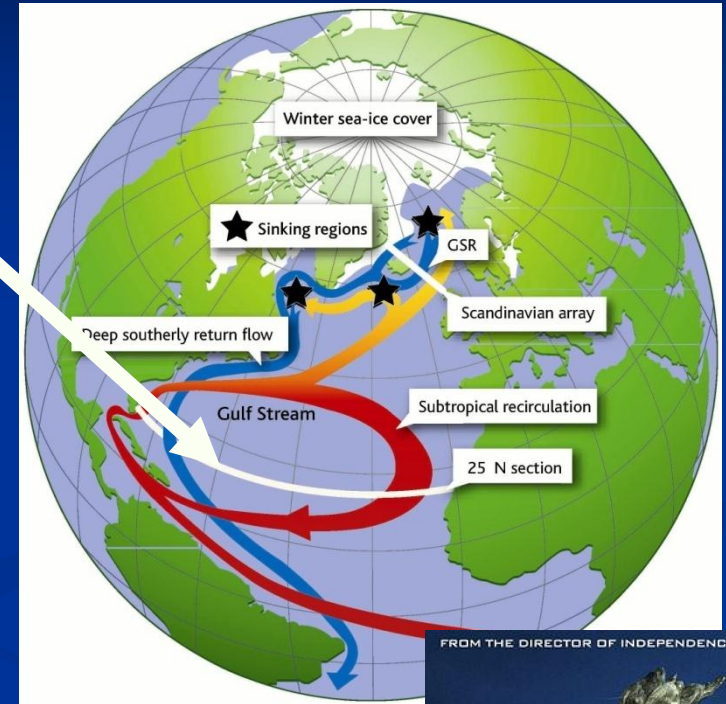
Wärmeinhalt der Meere

Zeitreihe des oeanischen
Wärmeinhalts in den
oberen 300m.

(Levitus et al., 2000)

„Alarming“ MOC change at 25°N

- Slowing (30%) of the Atlantic meridional overturning circulation at 25°N (Bryden et al., Nature, 2005)
- The Atlantic heat conveyor slows, (Quadfasel, Nature, 2005)
- The Atlantic conveyor may have slowed, but don't panic (Kerr, Science, 2005)



Bryden et al. 2005:

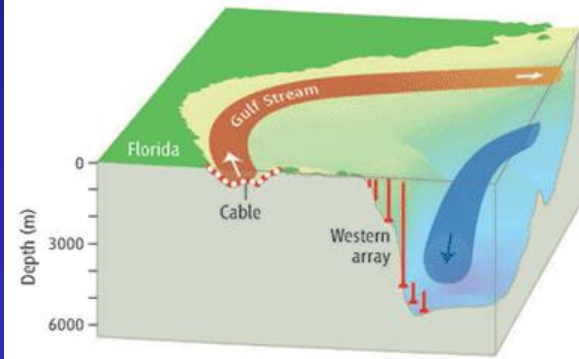
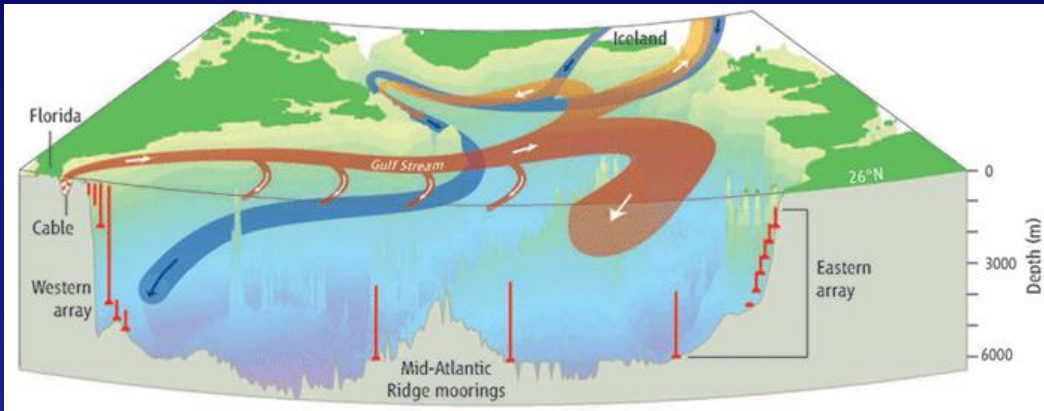
Nordwärtiger Wärmetransport bei 25°N

- in den Jahren 1957, 1981, 1992 $\approx 1.3-1.4$ PW
- in den Jahren 1998, 2004 ≈ 1.1 PW

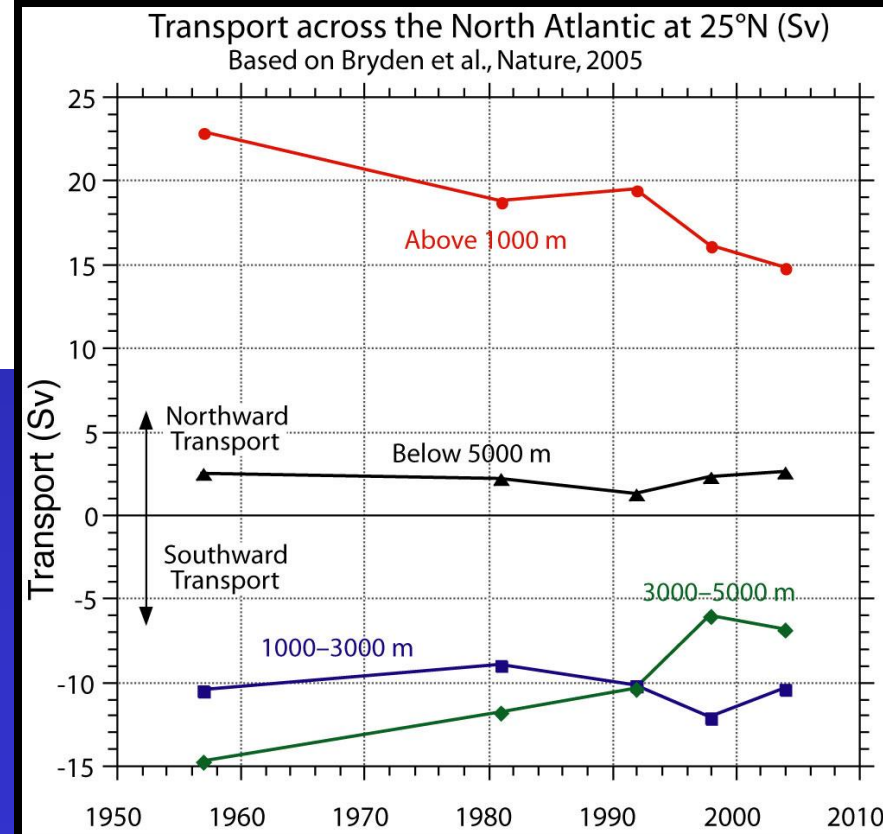
Ist das Abschwächen des Golfstroms schon da?



Zeitreihe von Schiffsmessungen entlang von 25°N



Abschwächung der Zirkulation?
(Bryden et al., 2005)



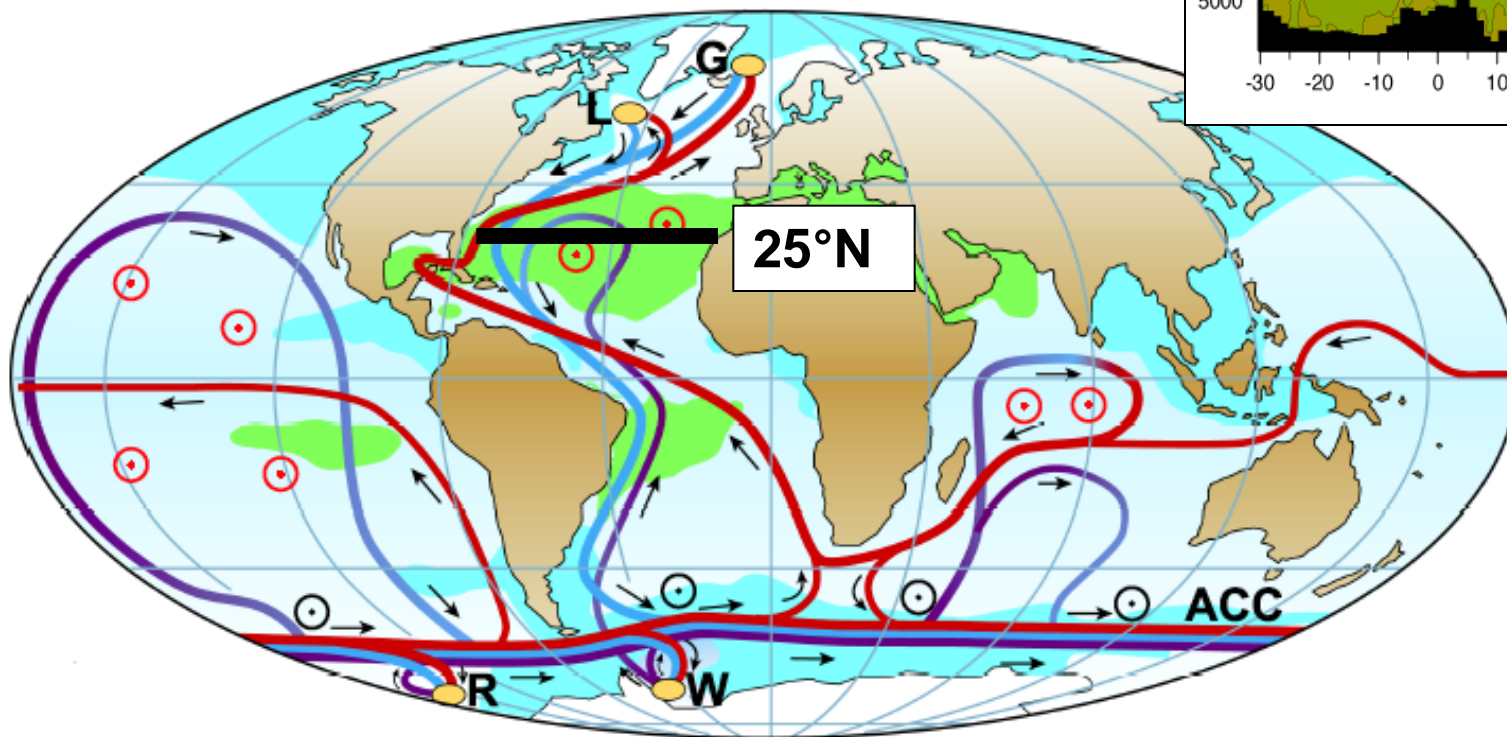
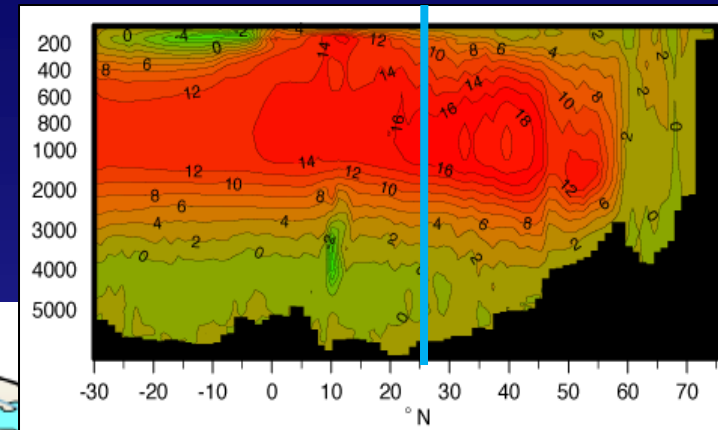
Hydrographische
Schnitte von:

1957, 1981, 1992,
1998, 2004



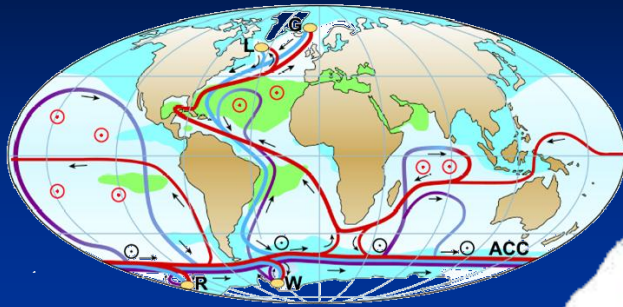
Thermohaline Zirkulation

The grand ocean “conveyor” of heat



- | | | |
|----------------------|-------------------------|------------------------|
| Surface flow | Wind-driven upwelling | L Labrador Sea |
| Deep flow | Mixing-driven upwelling | G Greenland Sea |
| Bottom flow | Salinity > 36 ‰ | W Weddell Sea |
| Deep Water Formation | Salinity < 34 ‰ | R Ross Sea |

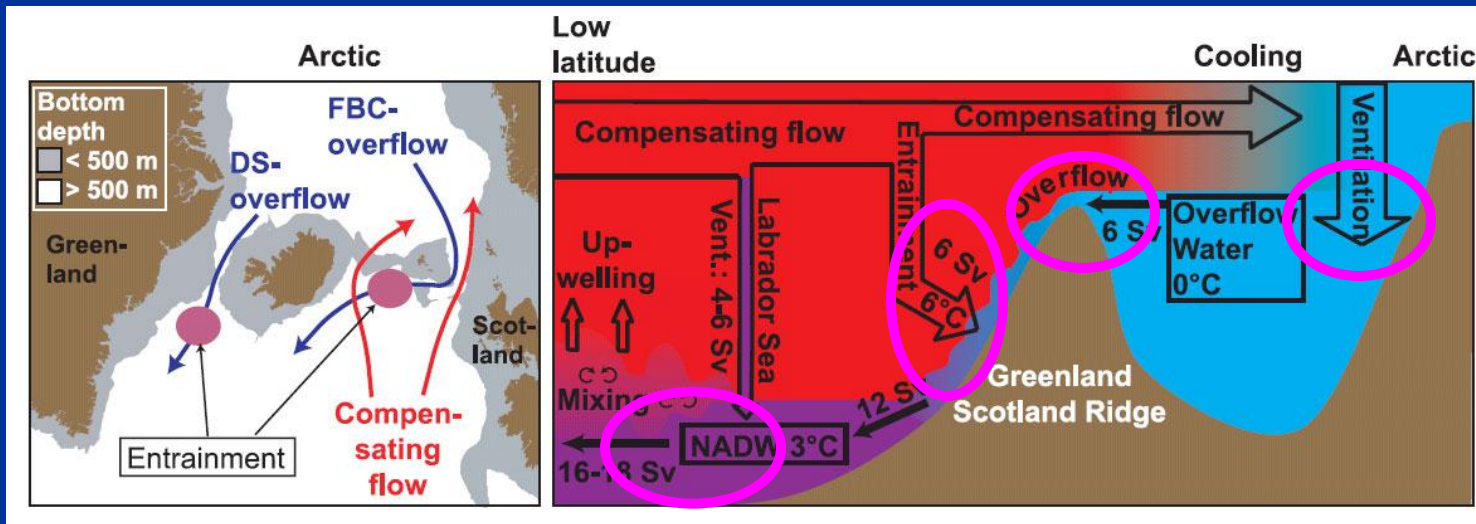
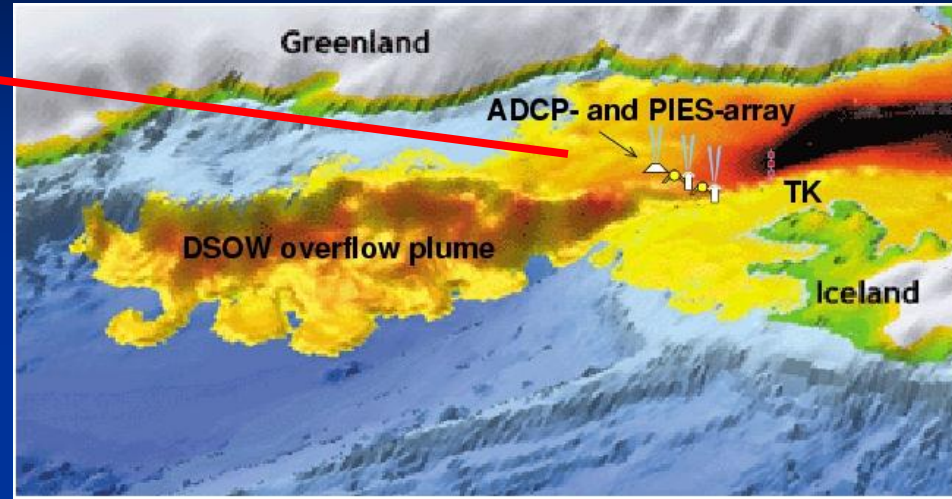
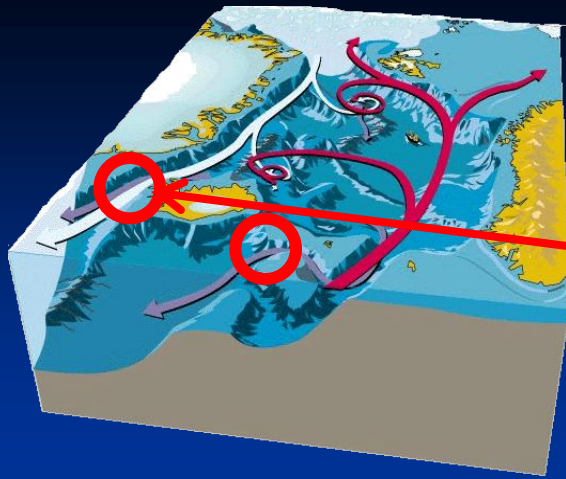
Zirkulation im Europäischen Nordmeer



Warm an der
Oberfläche
nach Norden

Kalt in der
Tiefe nach
Süden

Tiefenwasser strömt über die Schwellen nach Süden

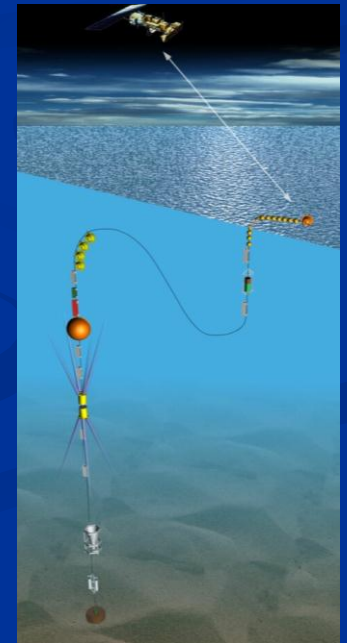


$$16-18 \text{ Sv} = 4-6 \text{ Sv} + 6 \text{ Sv} + 6 \text{ Sv}$$

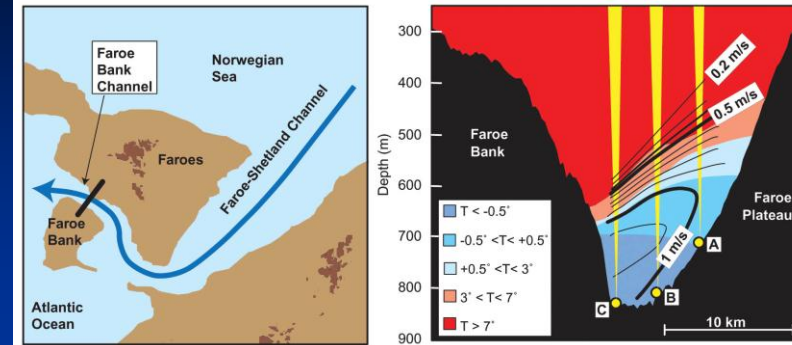
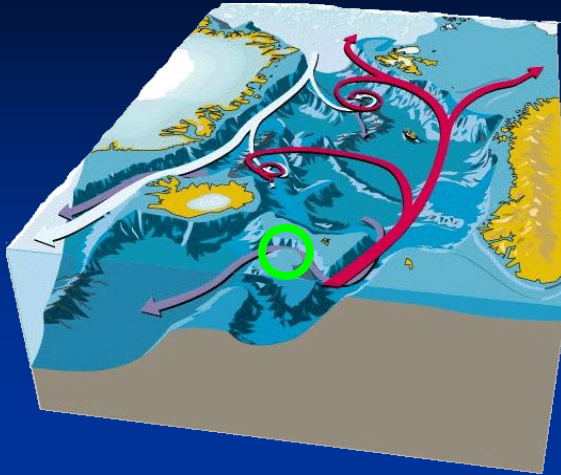
Dauermessungen im Ozean



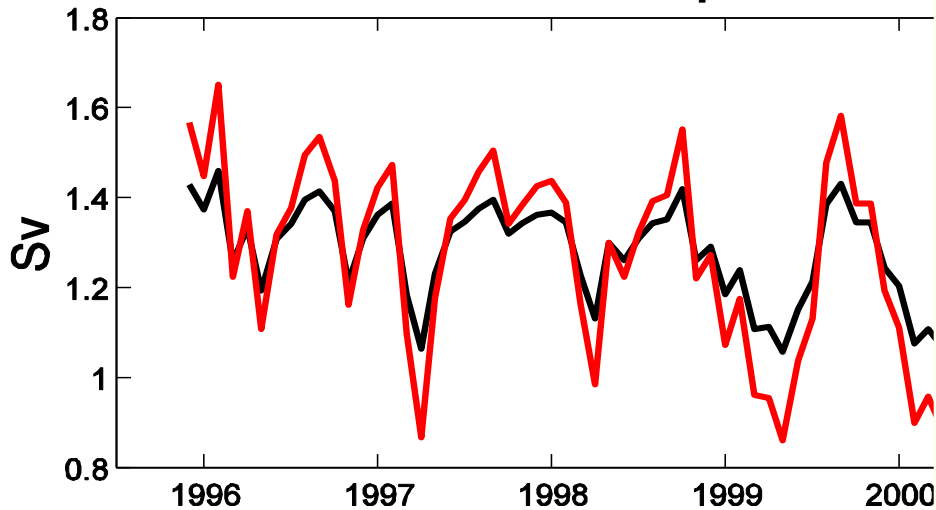
Verankerungen:
Gewicht am Boden
Glaskugeln als Auftrieb
Stahlseil
Autonome Meßgeräte



Faroe-Bank Kanal Transport

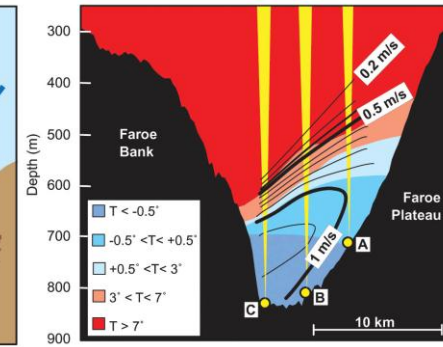
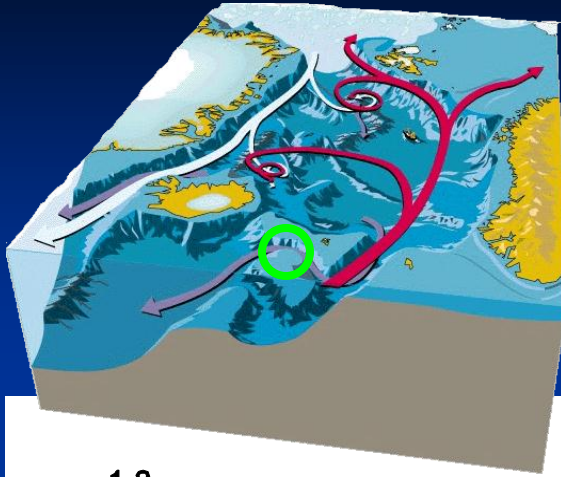


Transport FBC

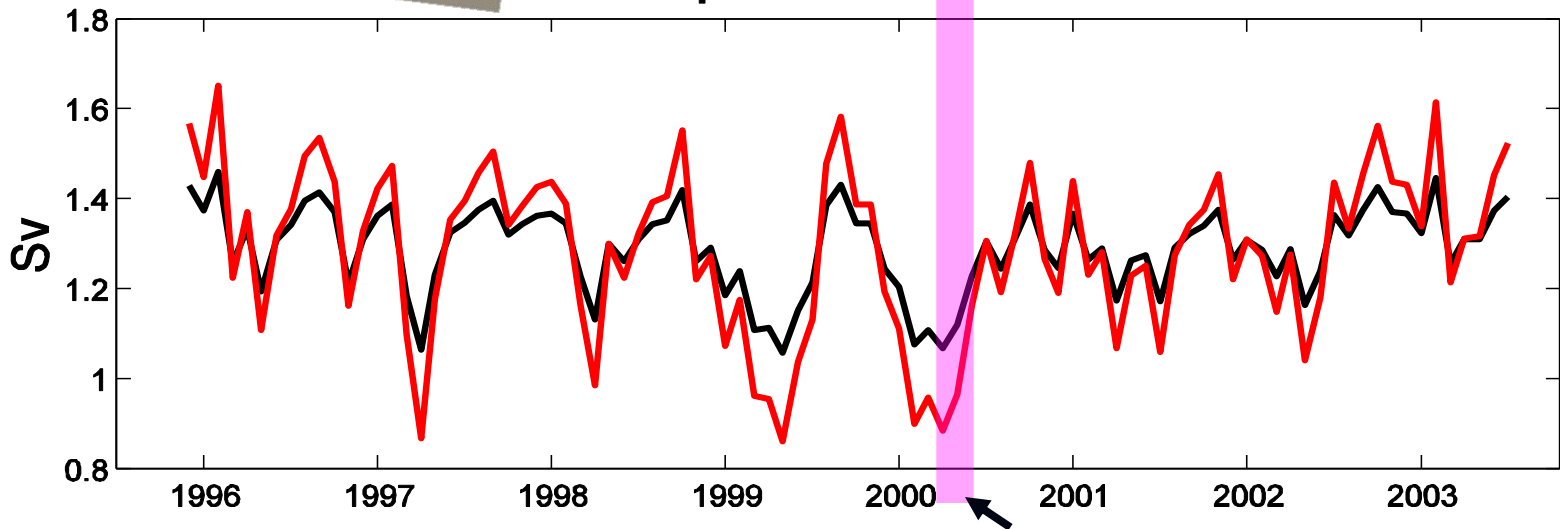


**Südwärtiger
Transport im Kanal
nimmt pro Jahr um
etwa 3% ab!**
(Hansen et al., 2001)

Faroe-Bank Kanal Transport



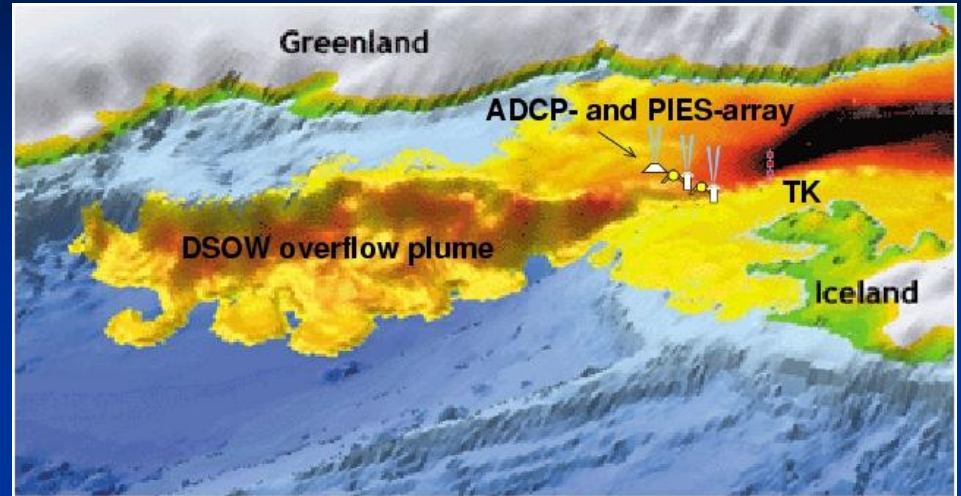
Transport FBCh ADCP



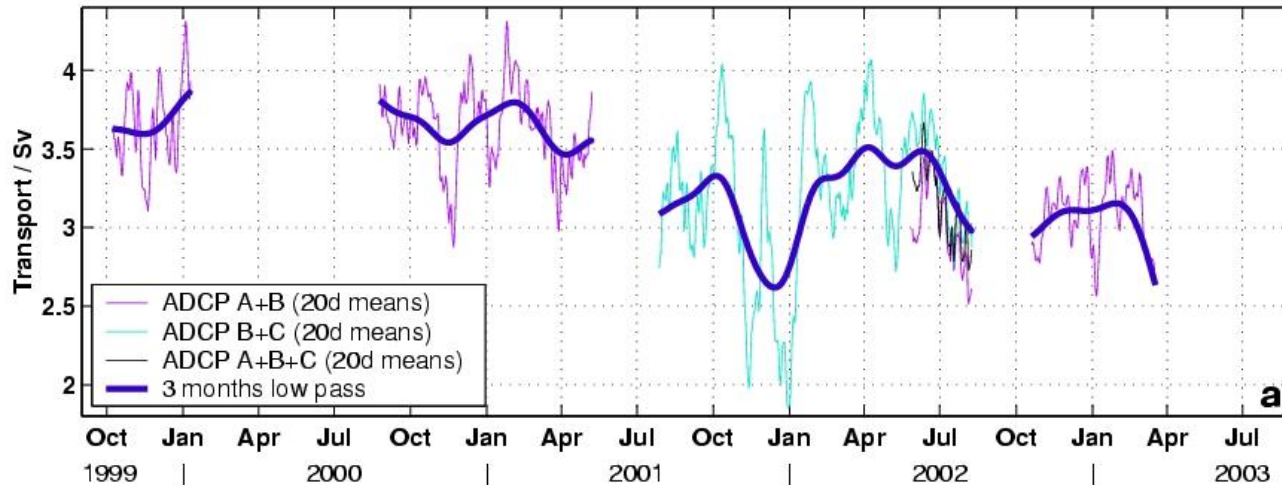
Fertigstellung des Nature Papers

KEIN TREND! Variabilität

Volumentransport durch die Dänemarkstraße 1999 - 2003



Observations Denmark Strait: DSOW Transport (below max. Shear)



Abnahme um 0,6 Sv:

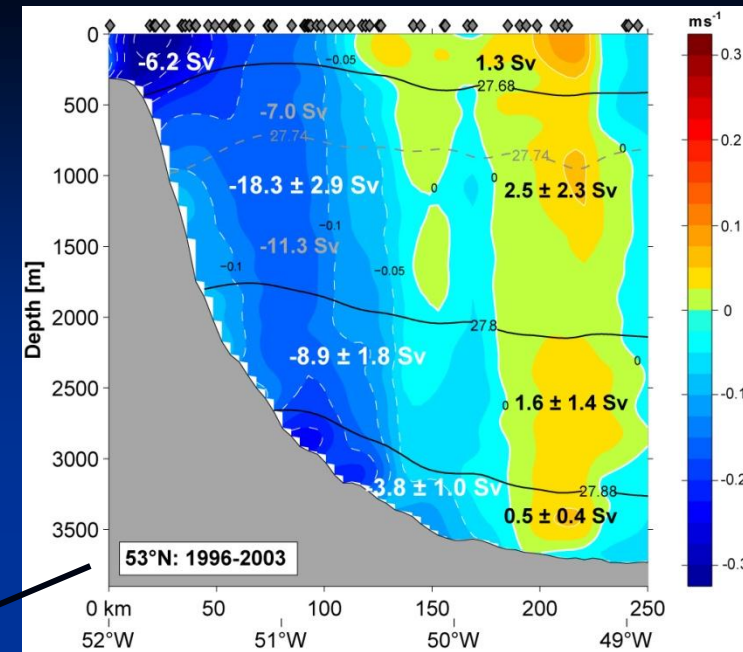
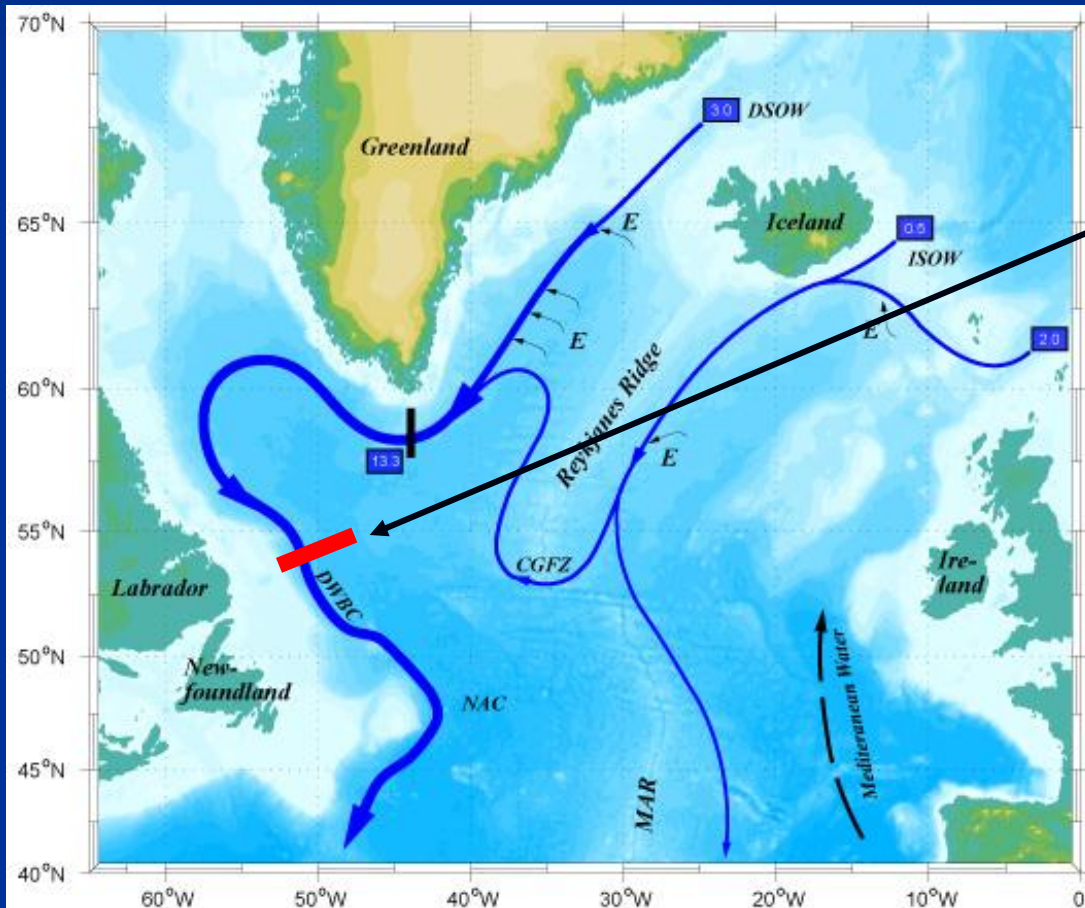
$3,7 \pm 0,1$ Sv (1999)

$3,1 \pm 0,1$ Sv (2003)

(Send et al., 2006)

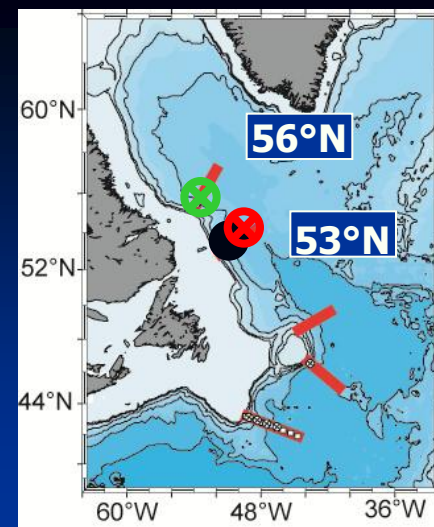
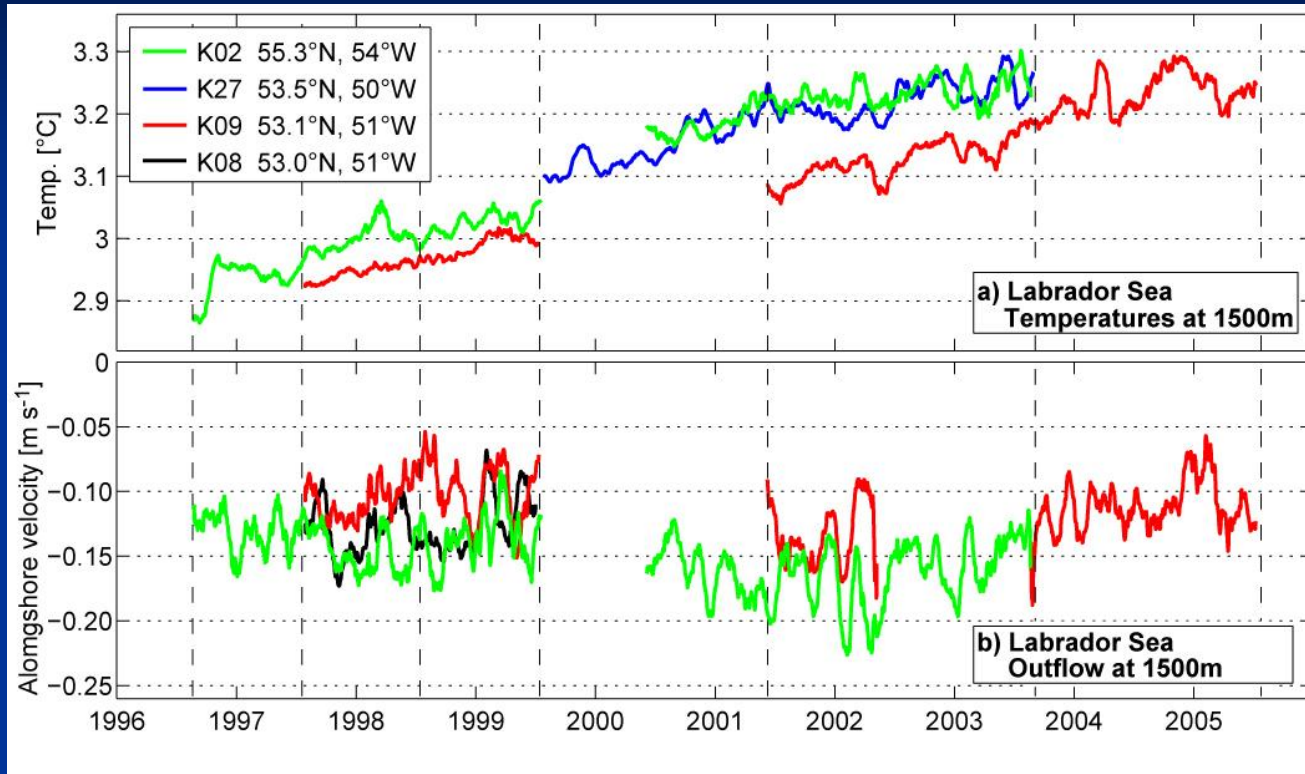
Verändert sich die Stärke der westlichen Tiefenrandströme?

Zirkulation des Tiefenwassers im subpolaren Nordatlantik



Der westliche Tiefenrandstrom transportiert die tiefen Wassermassen aus den Overflow Regionen nach Süden

Zwischenjährliche Variabilität im Tiefenrandstrom der Labradorsee

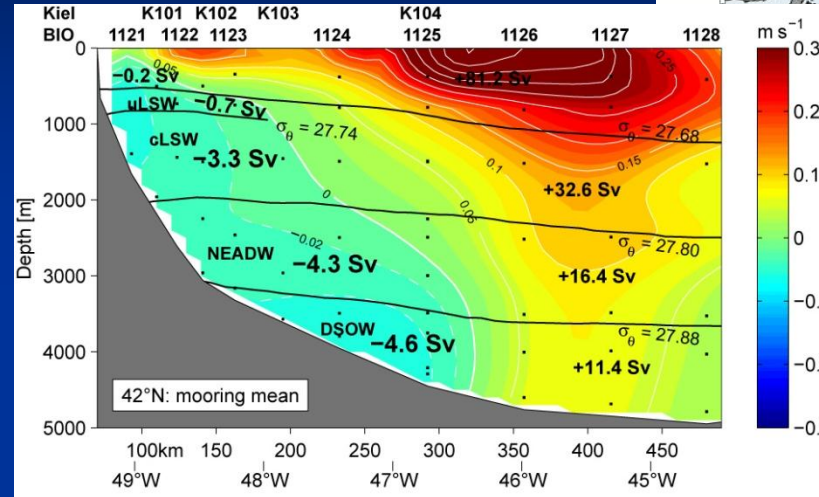
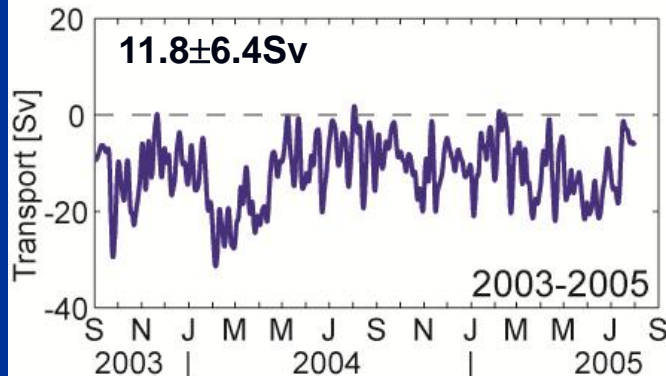
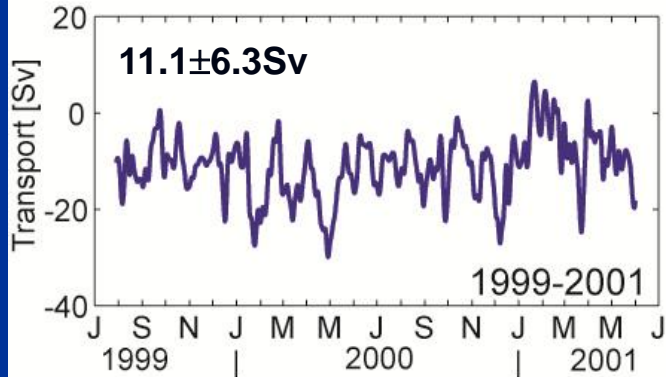
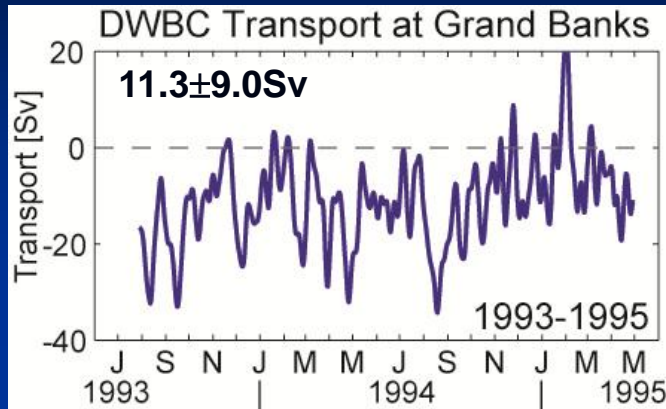


(Dengler et al., 2006)

- 1500m-Temperaturen nehmen um ca. 0.05° pro Jahr zu (1997 and 2004)
- Starke saisonale Schwankungen der Randstromgeschwindigkeit aber kein Trend
- Leichte Zunahme der südwestliche Geschwindigkeiten zwischen 1997-1999 zu 2000-2005

	Mittel	
	1997-1999	2000-2005
K2:	0.14m/s	0.17m/s
k9:	0.12m/s	0.15m/s

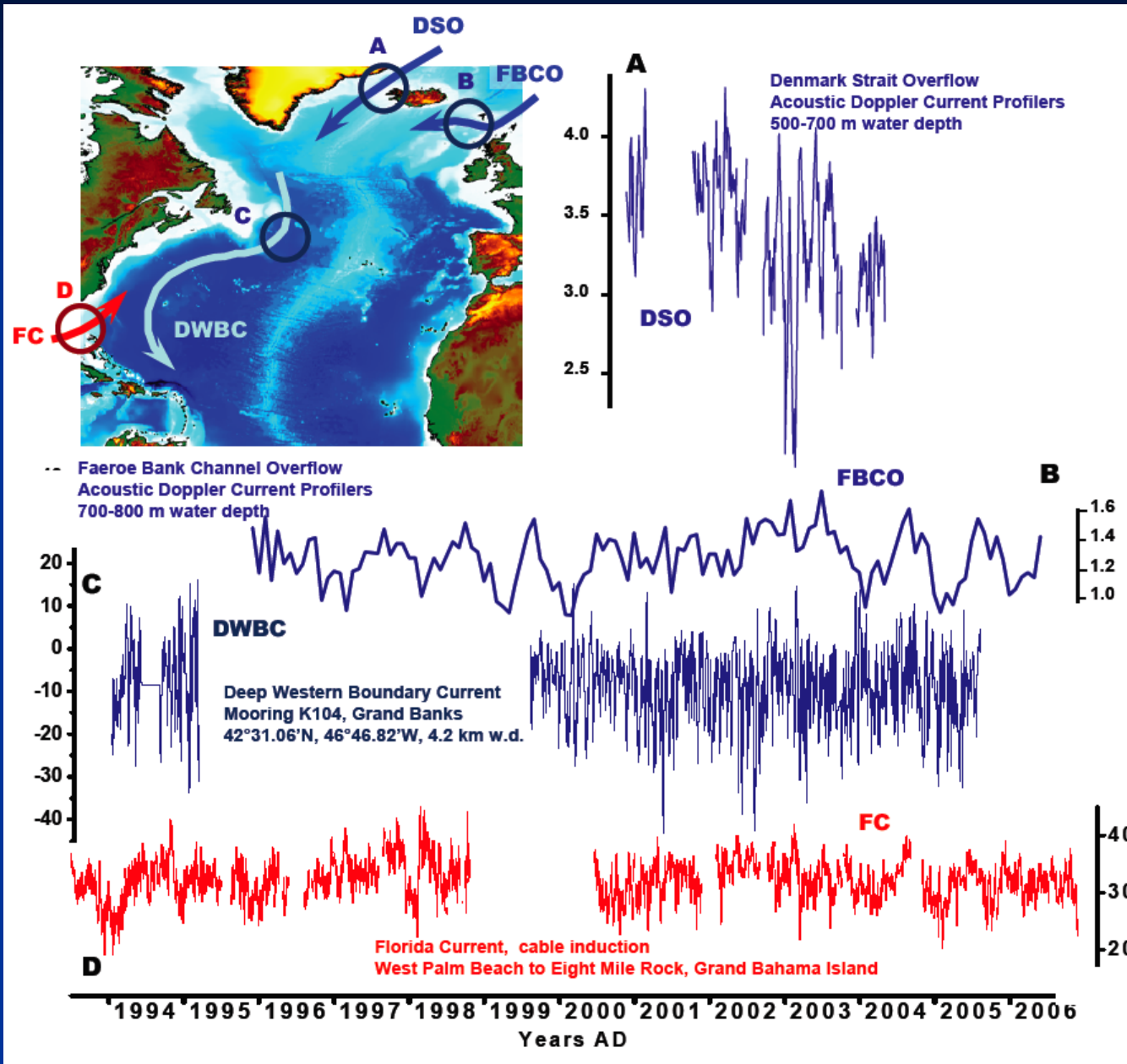
Randstromuntersuchung östlich der Grand Banks bei 42°N



- Zeitserien (über 2 Jahre) des Randstromtransports zeigen intrasaisonal Schwankungen
- Mittlere südwärtsige Strömung während verschiedener 2-Jahreszeiträume identisch
 ⇒ keine dekadische Änderung des Tiefenrandstromtransports zwischen 1993-2005.

(Schott et al., 2006)

Zusammenfassung der Beobachtungen



Punkt # 3

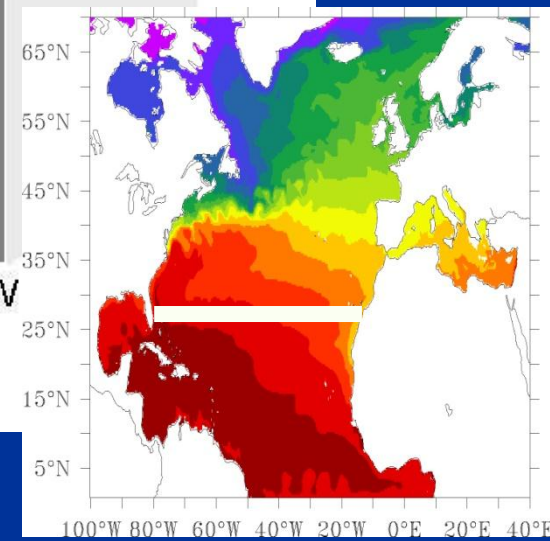
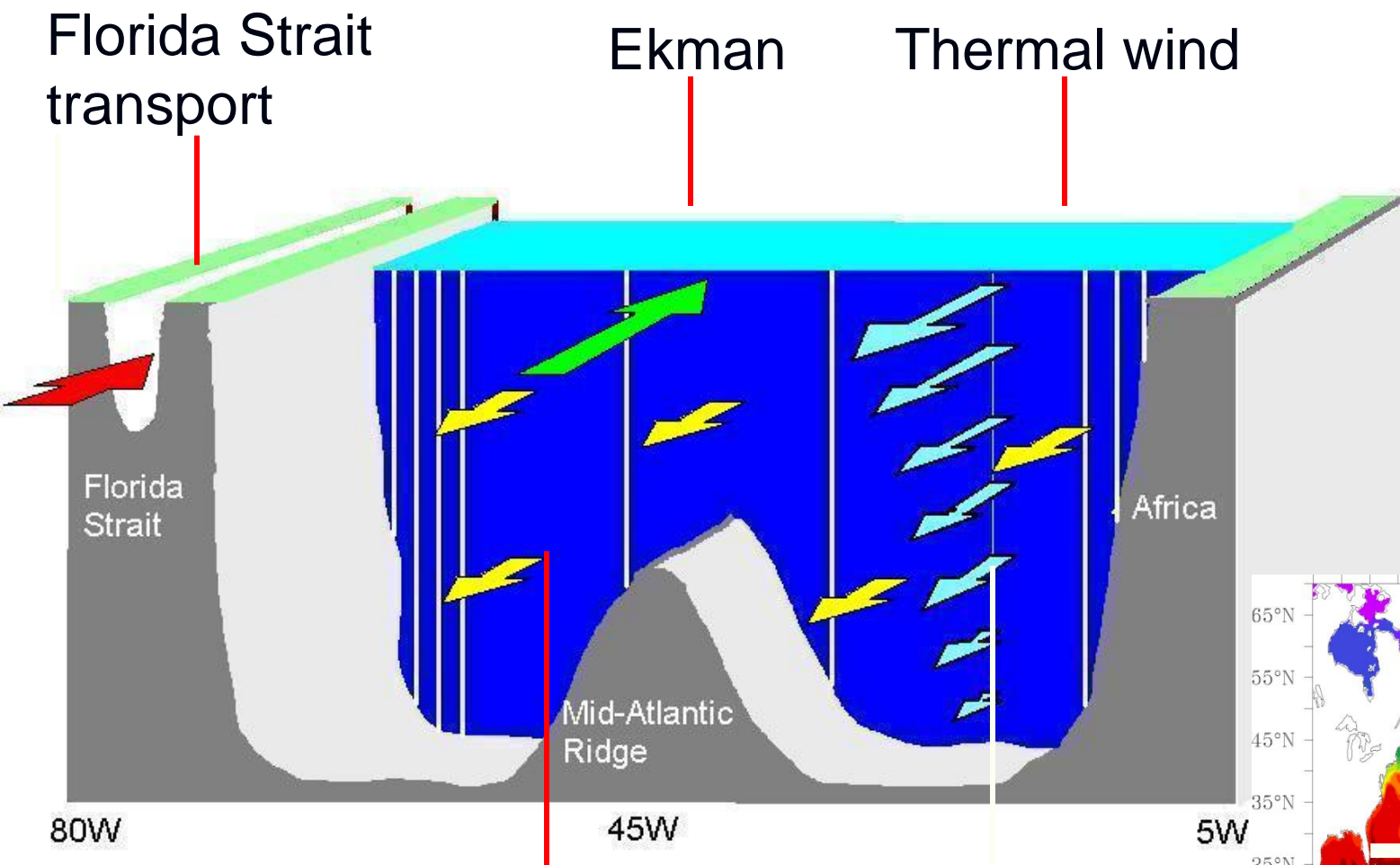
**Alle Dauermessungen mithilfe von
Ozeanobservatorien zeigen keine dramatischen
Veränderungen in der Zirkulation!**

**Gab es bei Bryden et al. (2005) ein
Abtastproblem?
Oder ist es ein lokales Signal?**

Vermessung der atlantischen Umwälzzelle bei 26°N

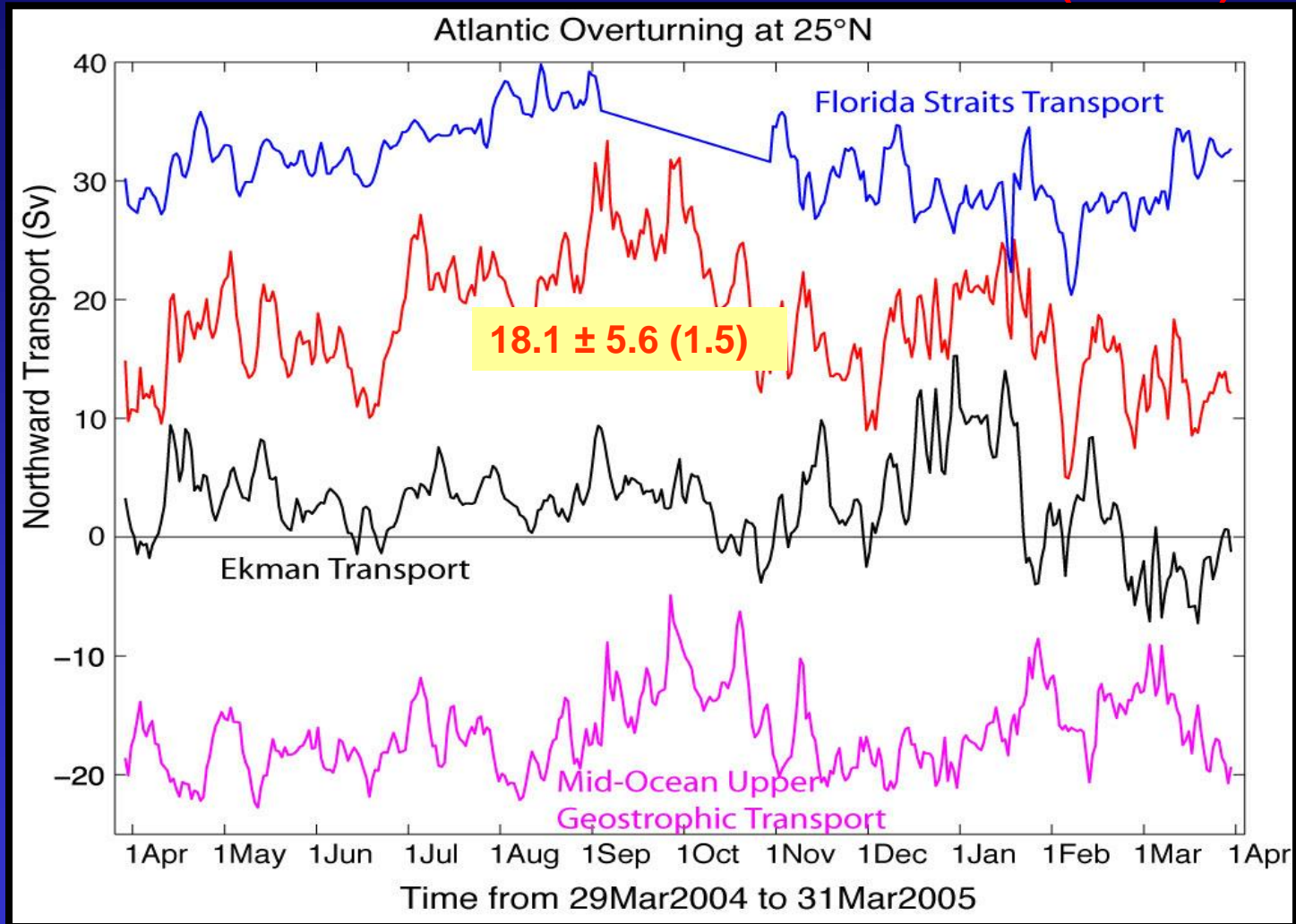


Southampton
Oceanography Centre
UNIVERSITY OF SOUTHAMPTON AND
NATURAL ENVIRONMENT RESEARCH COUNCIL



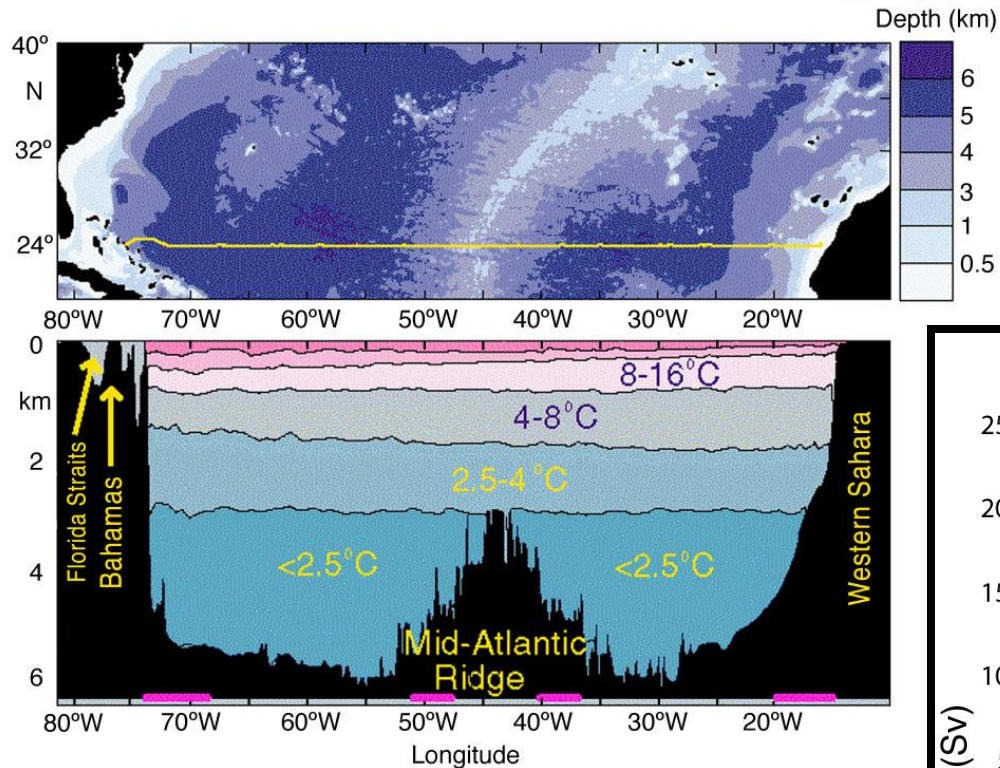
Vermessung der atlantischen Umwälzelle bei 26°N

RAPID Year 1 Continuous MOC Time Series (in Red)

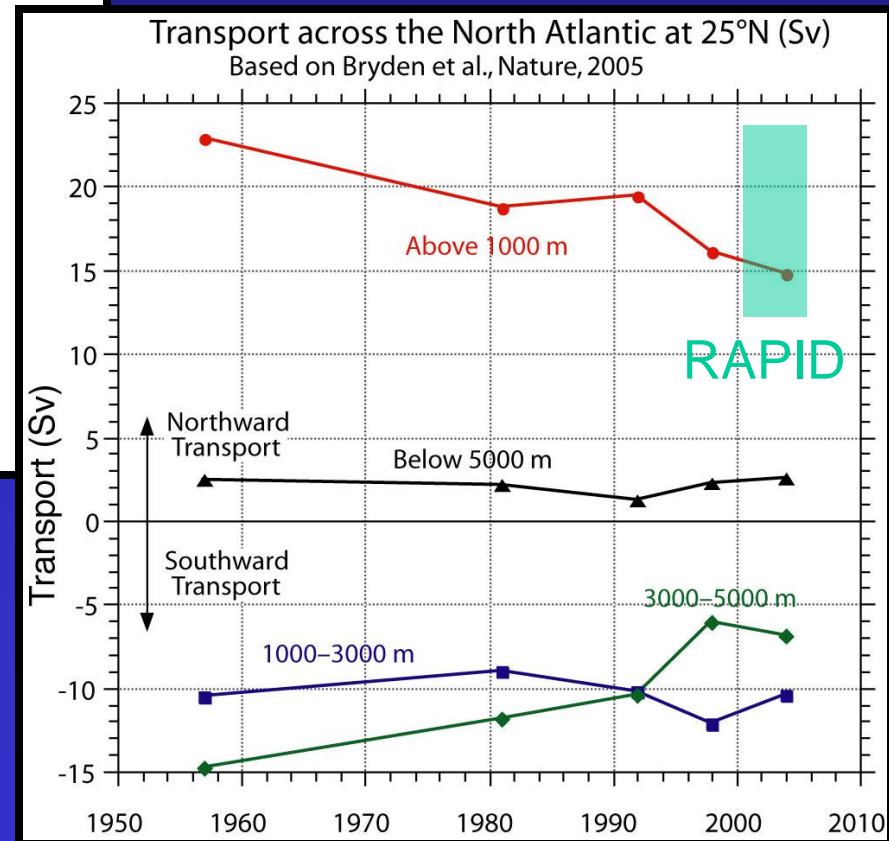


Cunningham et al. (2007)

Vergleich mit den Hydrographischen Schnitten bei 25°N



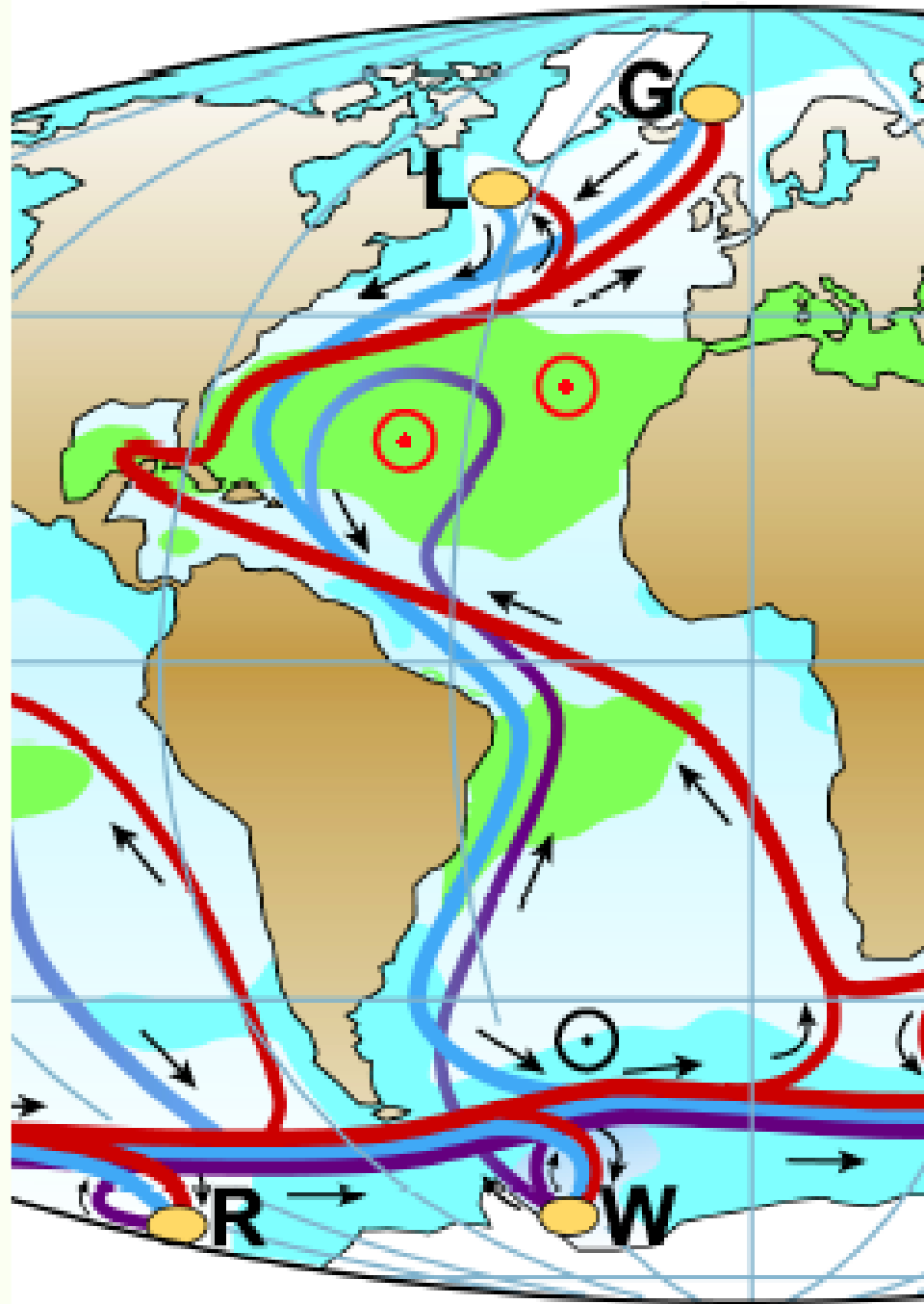
MOC “slowdown” hypothesized
(Bryden et al., 2005)



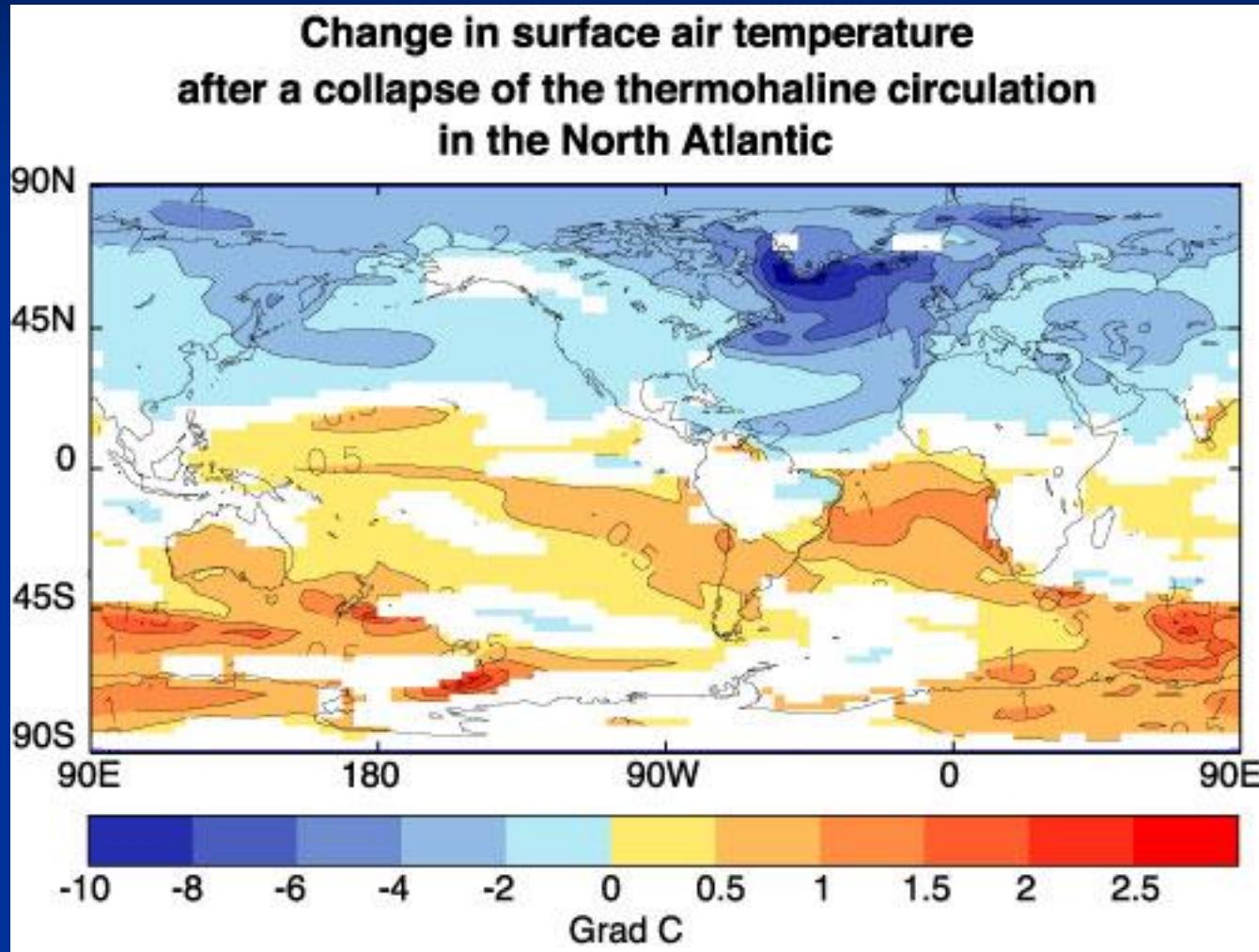
Hydrographic sections occupied:
1957, 1981, 1992, 1998, 2004

Fahrplan

- Hintergrund
“Energie der Strömungen”
- Beobachtungen
“Messungen des Pulses der Meere”
- Modelle
“Was kommt auf uns zu?”



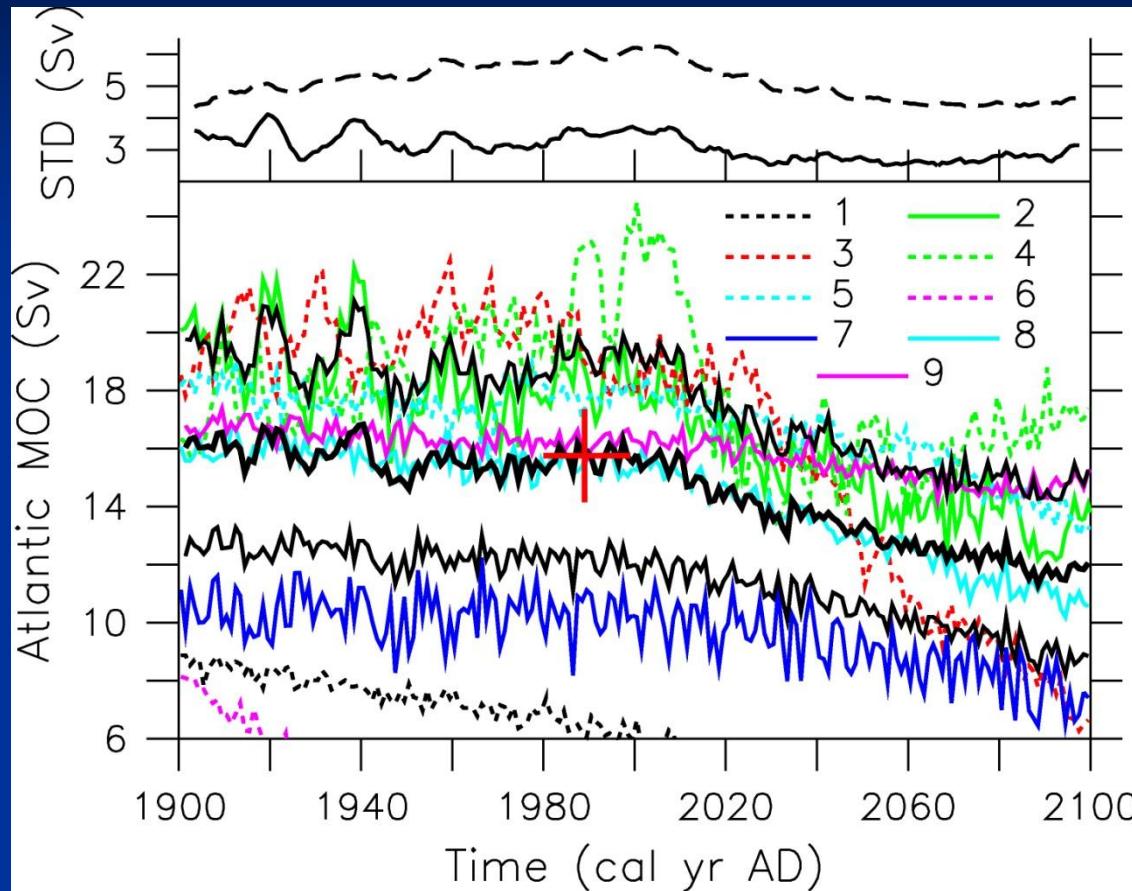
Der schlimmste “unrealistische” Fall: die thermohaline Zirkulation stoppt



- **Starke Abkühlung über dem Ozean**
- **Moderate Änderungen über dem Land**
- **Golfstrom hält nicht an! (Wind)**

HadCM3 (Vellinga)

Stärke der thermohalinen Zirkulation: Zusammenstellung aller Modelle



**„best estimate“
-25% bis 2100
(-4±3Sv)**

„best estimate“

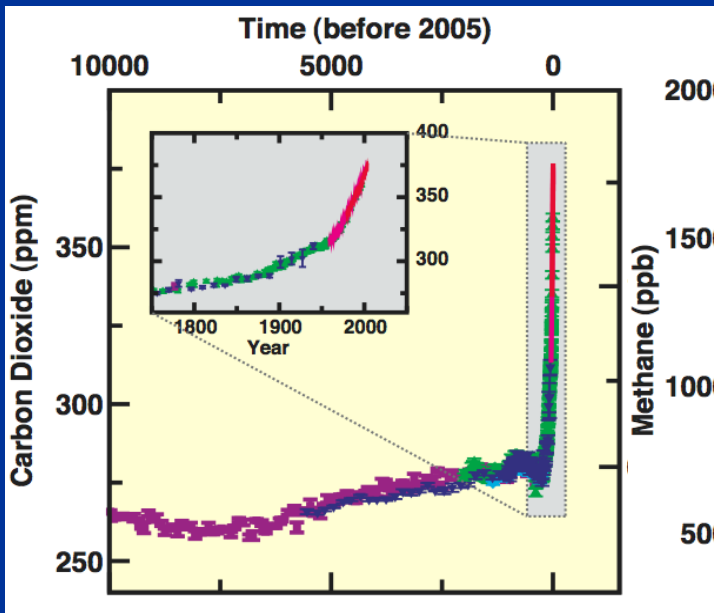
(IPCC 2007)

Reduktion von 3% pro Dekade - verbleibt innerhalb der natürlichen Variabilität für die kommenden 30-50 Jahre.

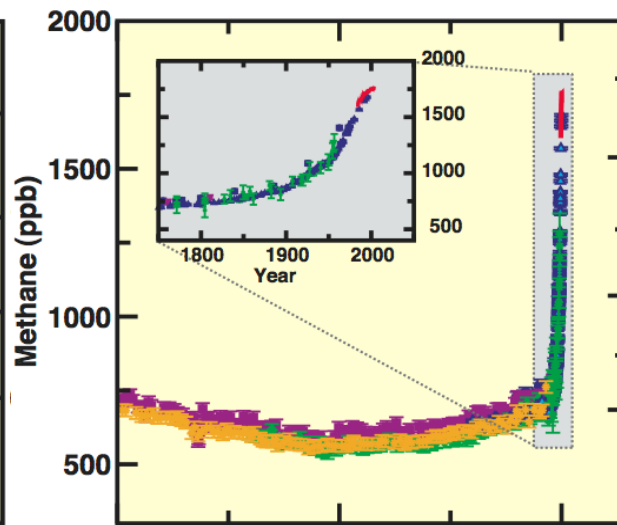
(Latif et al., 2006)

Industrielle Revolution und die Atmosphäre

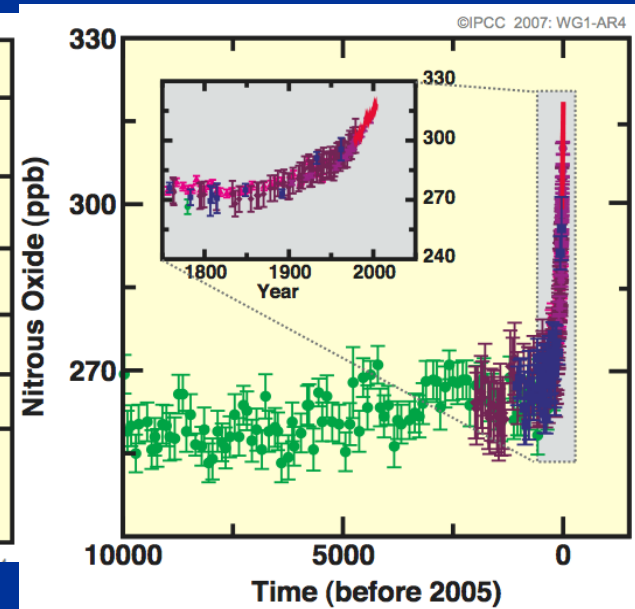
Konzentrationen von Treibhausgasen in der Atmosphäre und deren Änderungen



Kohlendioxid

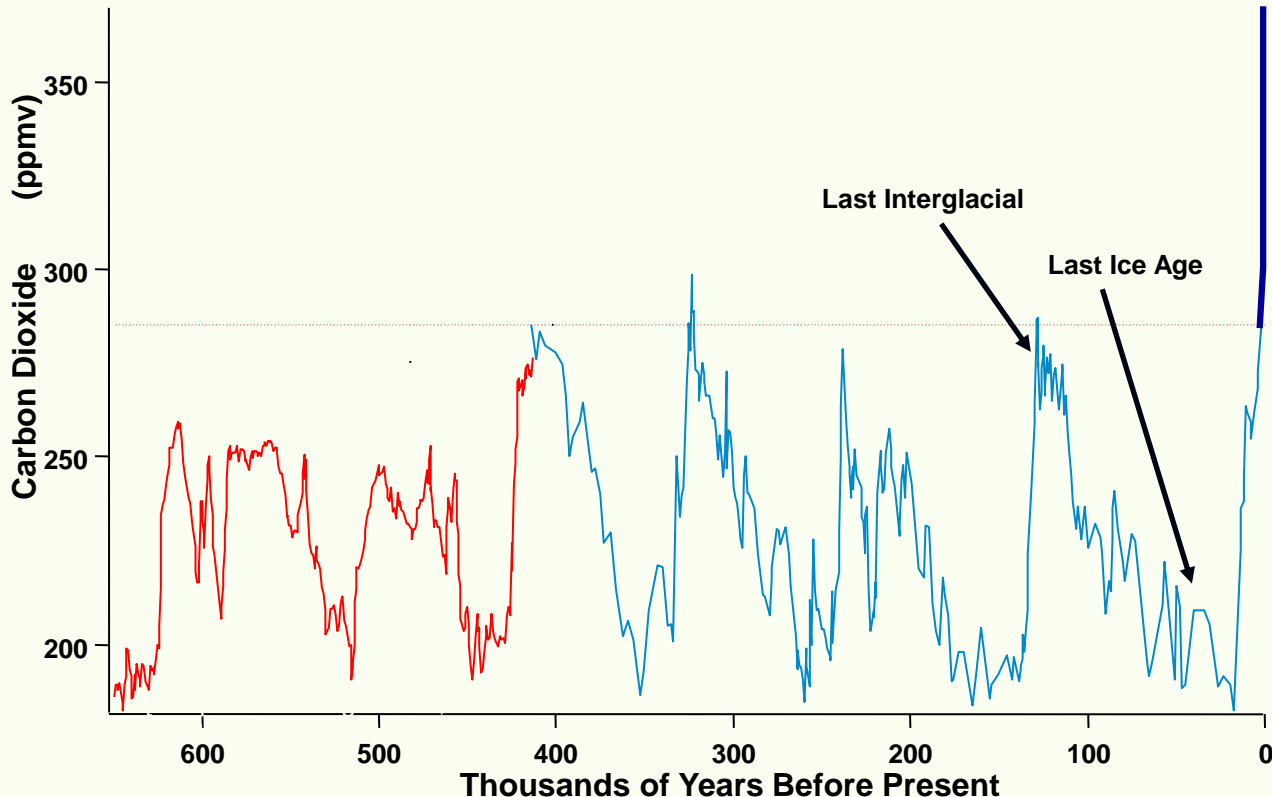


Methan



Stickstoffoxid

CO₂ Konzentration in der Atmosphäre in den letzten 700,000 Jahren

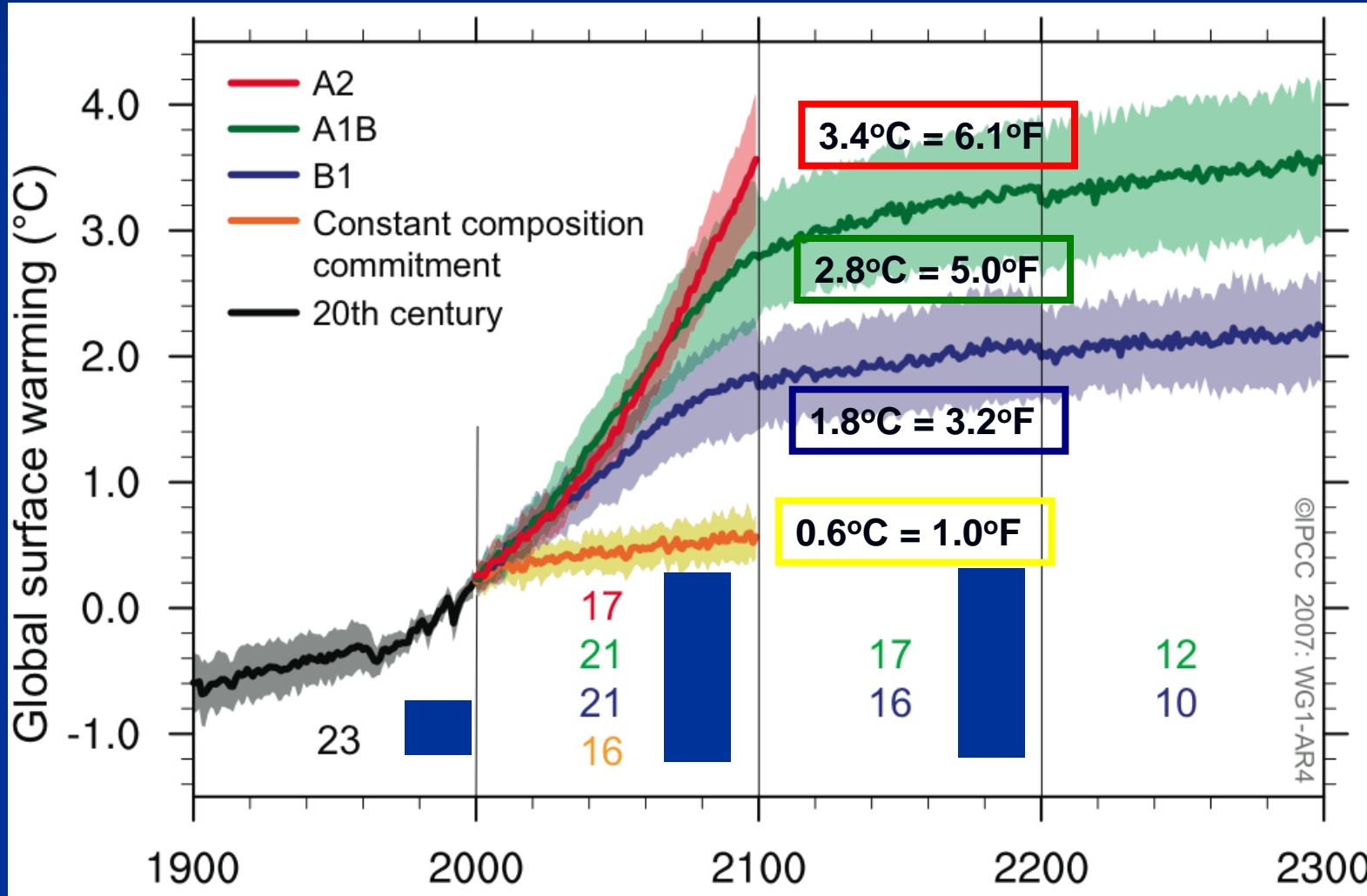


Eiszeiten werden durch Änderungen der Orbitalbahn der Erde um die Sonne hervorgerufen, die eine Änderung der Sonneneinstrahlung hervorrufen.

Die Menschen forcieren das Klimasystem der Erde auf eine neue Art. CO₂ Anstieg überwiegend aufgrund von Verbrennung fossiler Brennstoffe. Die CO₂ Konzentration war in den letzten 700,000 Jahren nicht so hoch.

Prognostizierte Globale Erwärmung

Globale Erwärmung wird zunehmen solange die Konzentrationen der Treibhausgase zunehmen.



CO2 Eq

850

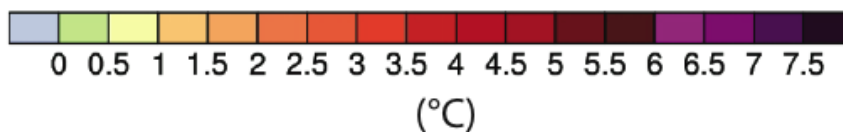
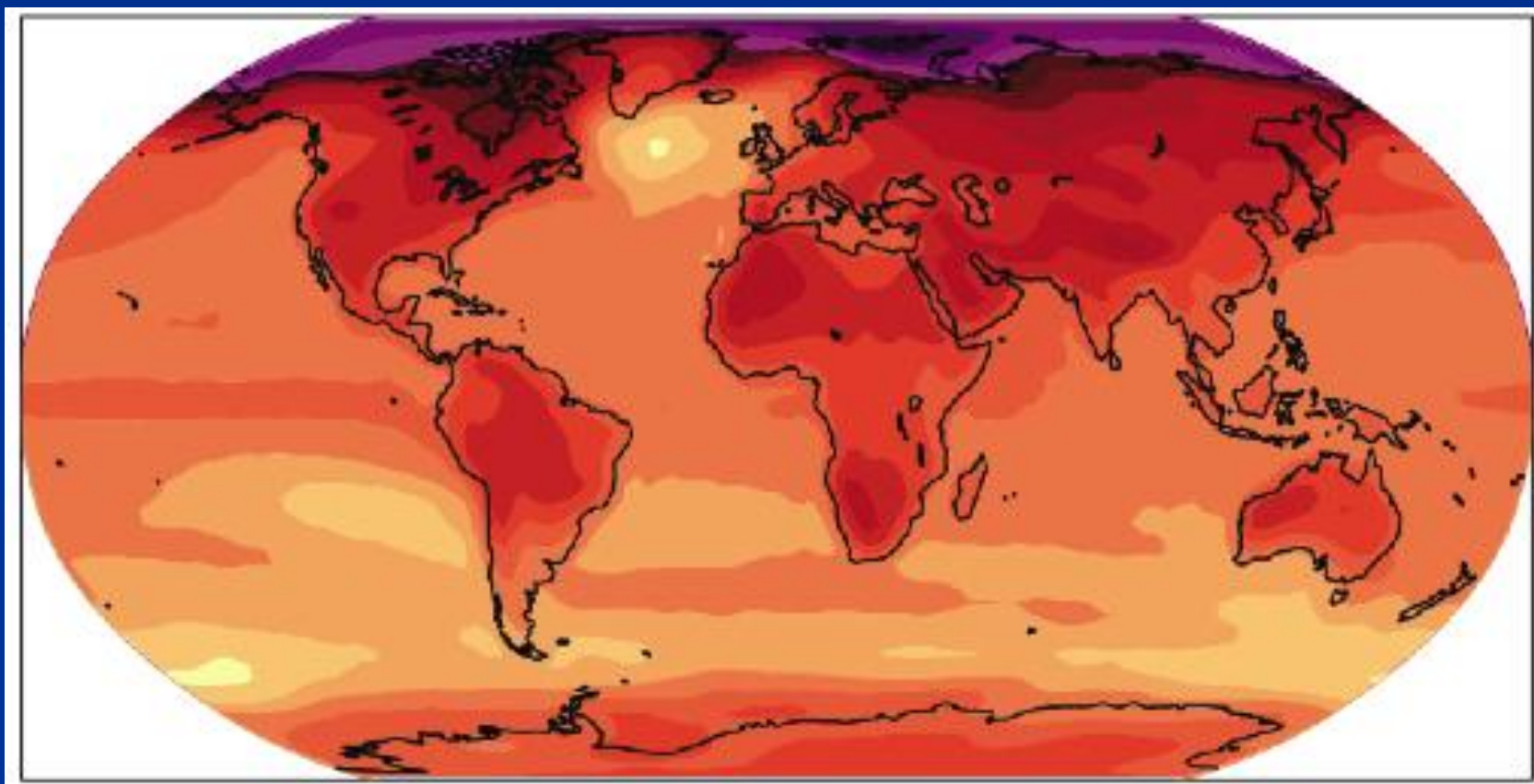
600

400

(IPCC 07)

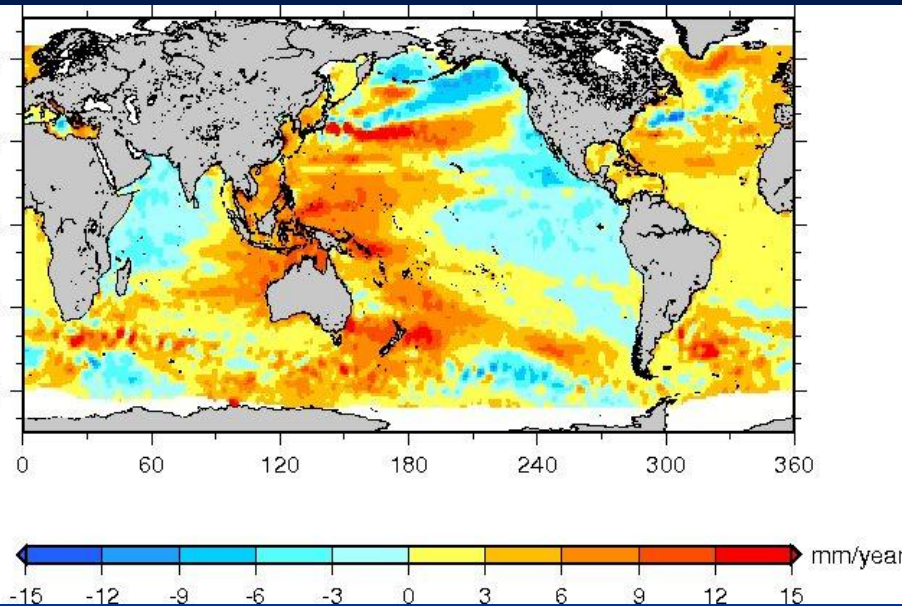
Prognostizierte Globale Erwärmung (2090-2099)

A1B ist ein typisches “business as usual” (2090-2099) Szenario. Im Mittel erwärmt sich die Erde bis 2095 um 2.8°C. Grosse Teile der Landmassen erwärmen sich um ~3.5°C. Die Arktis erwärmt sich um ~7°C.



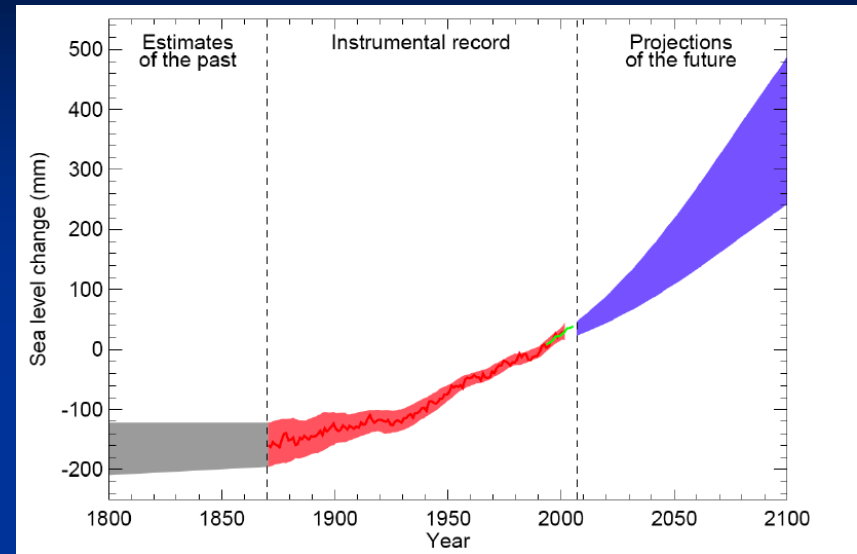
(IPCC 2007)

Was passiert noch auf einer wärmeren Erde?



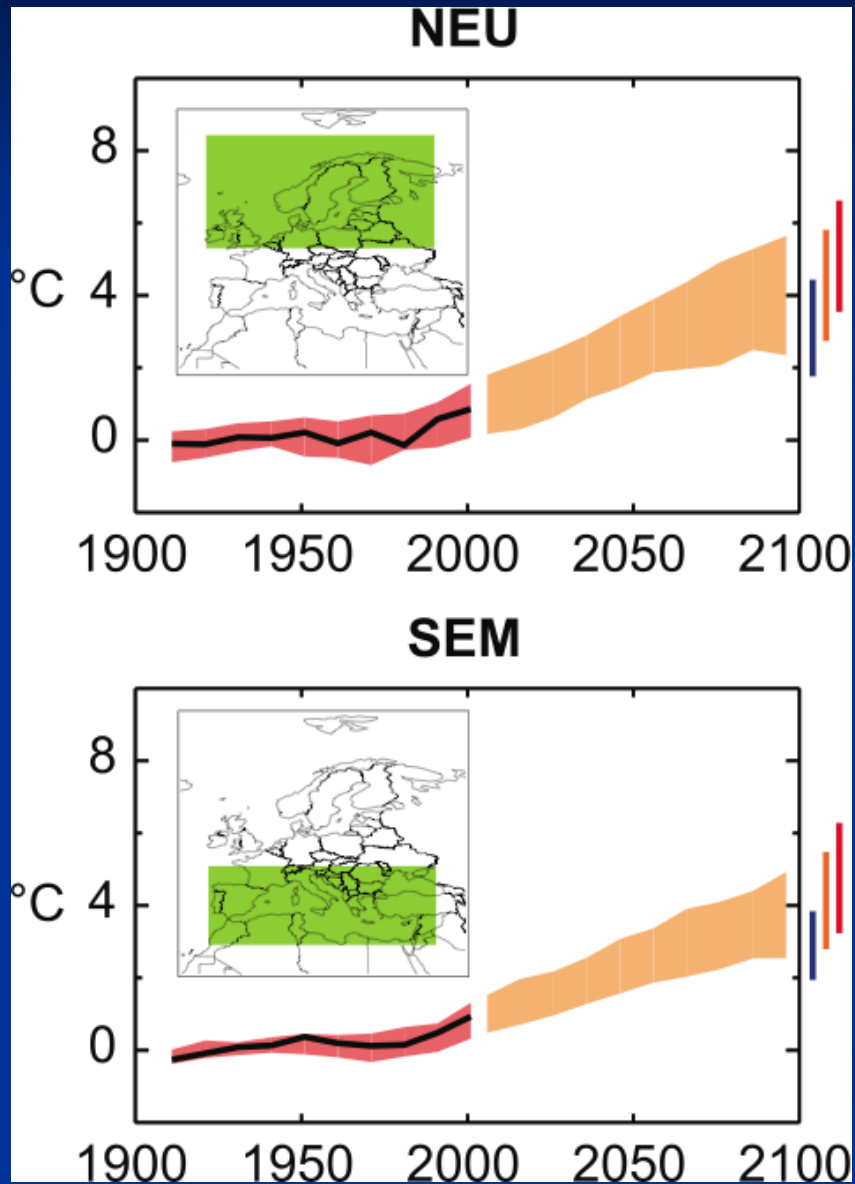
Beobachtung zur Änderung des Meeresspiegels von Satelliten (1993 - 2003).

Der mittlere Meeresspiegelanstieg im 20. Jahrhundert betrug 17cm), welcher überwiegend auf die thermische Ausdehnung des Meerwassers und Schmelzwasser zurückzuführen ist.

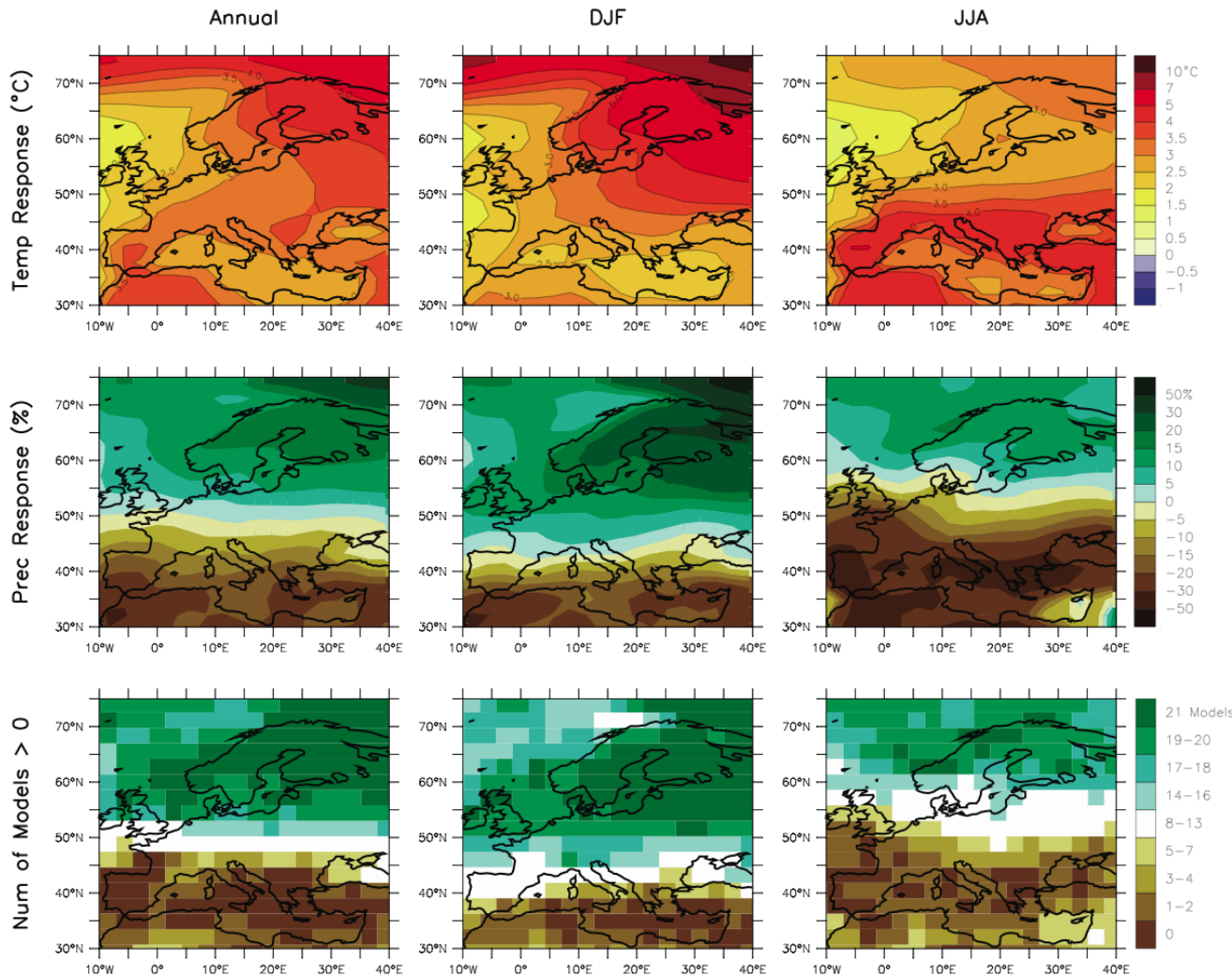


Die Änderungen im 21. Jahrhundert könnten etwas höher ausfallen (30cm-50cm).

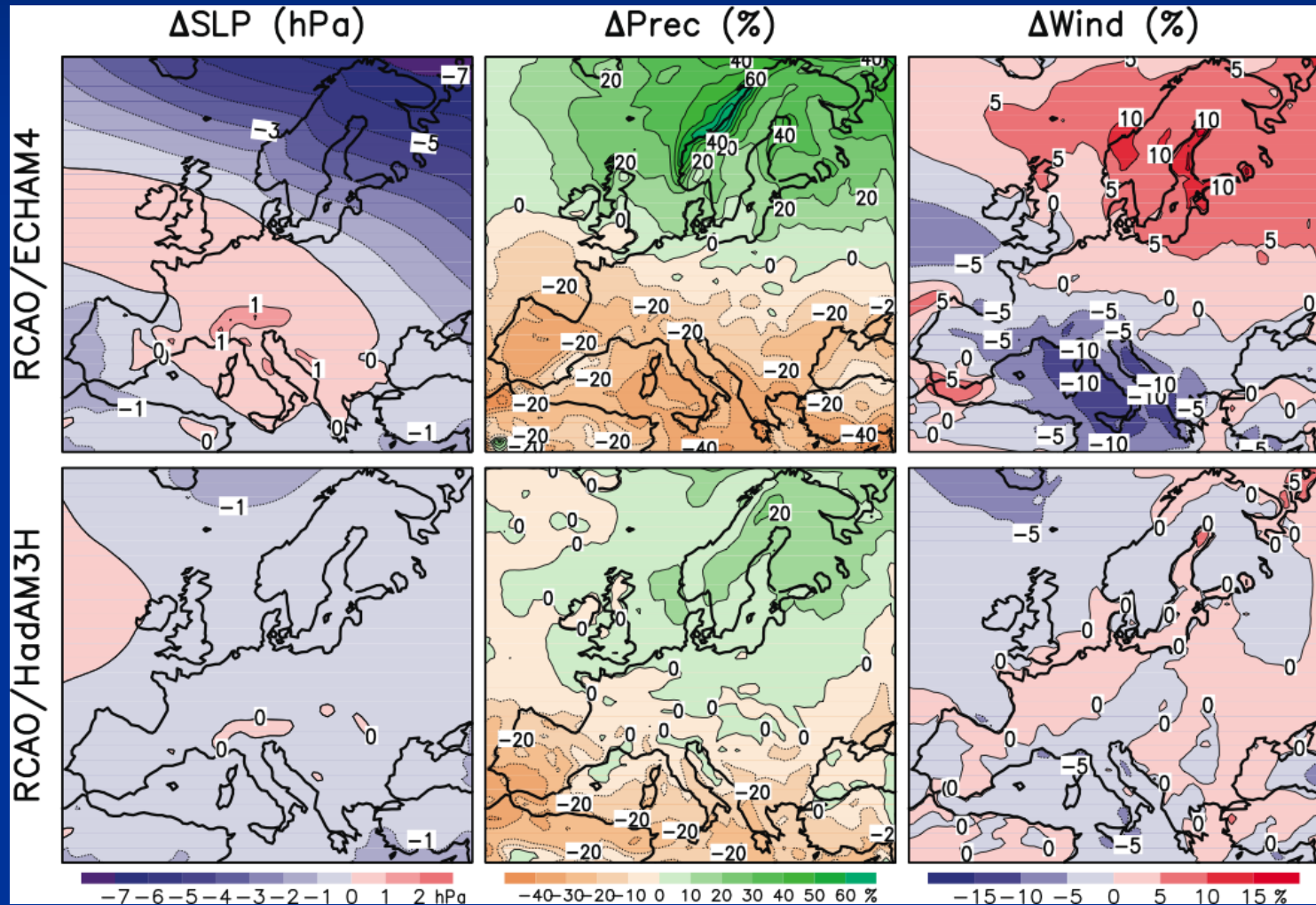
Regionale Änderungen: Erwärmung in Europa



Prognostizierte Temperatur- und Niederschlagsänderungen in Europa (2090-2099)



Simulierte Änderungen der Oberflächendruckfelds, des Niederschlags und der Windstärke in Europa (1961-1990 zu 2071-2100)





Vielen Dank

Zusammenfassung

- Der Ozean ist ein komplexes System mit starken natürlichen Schwankungen
- Geringe Änderungen der Zirkulation sind schwer zu beobachten

Wie können wir den “Puls des Ozeans” fühlen?

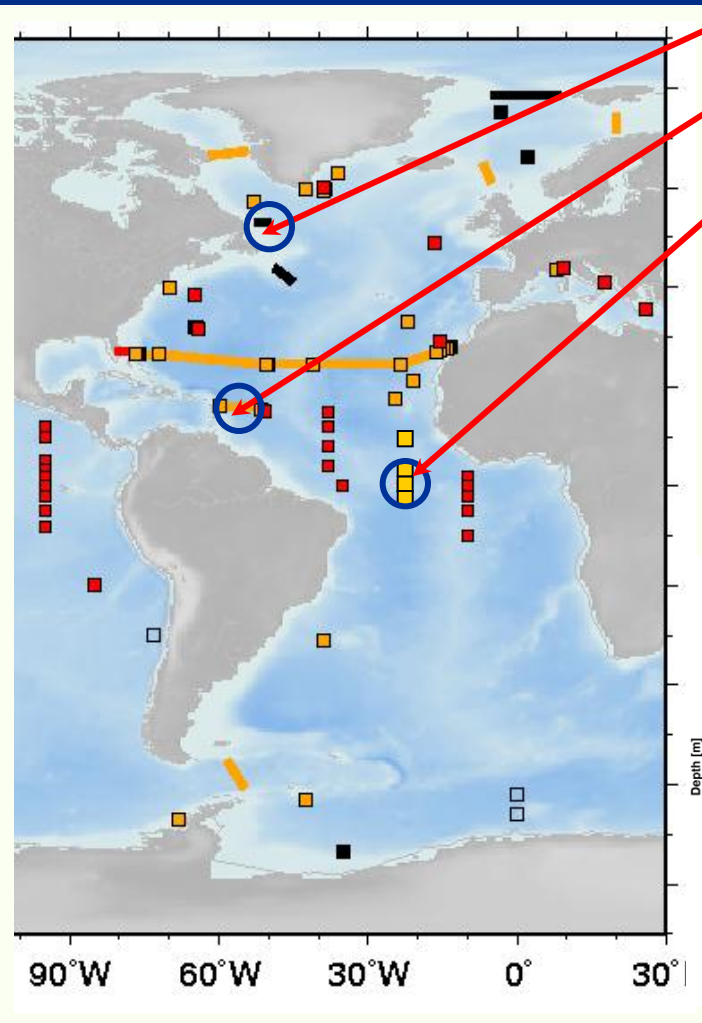
Langzeitobservatorien des IFM-GEOMAR

Zeitreihen werden
fortgeführt

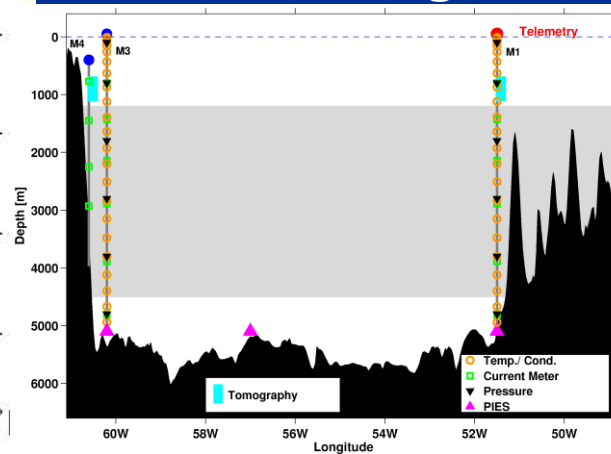
Denmark Strait in Hamburg

Thermohaline Zirkulation:

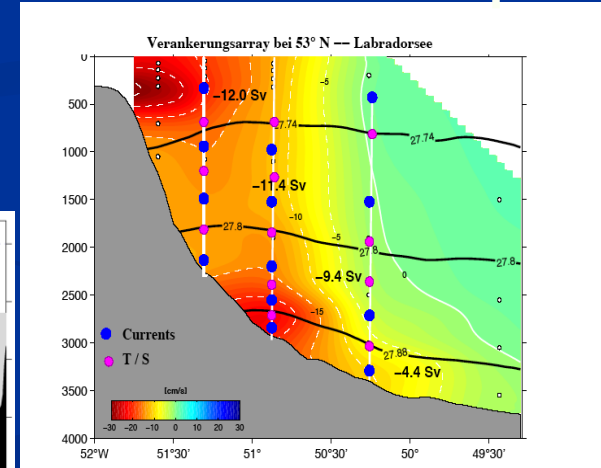
- Labrador Sea Export
- MOVE (Uwe Send, SIO)
- Äquatorialer Atlantik



MOVE Meridional Overturning

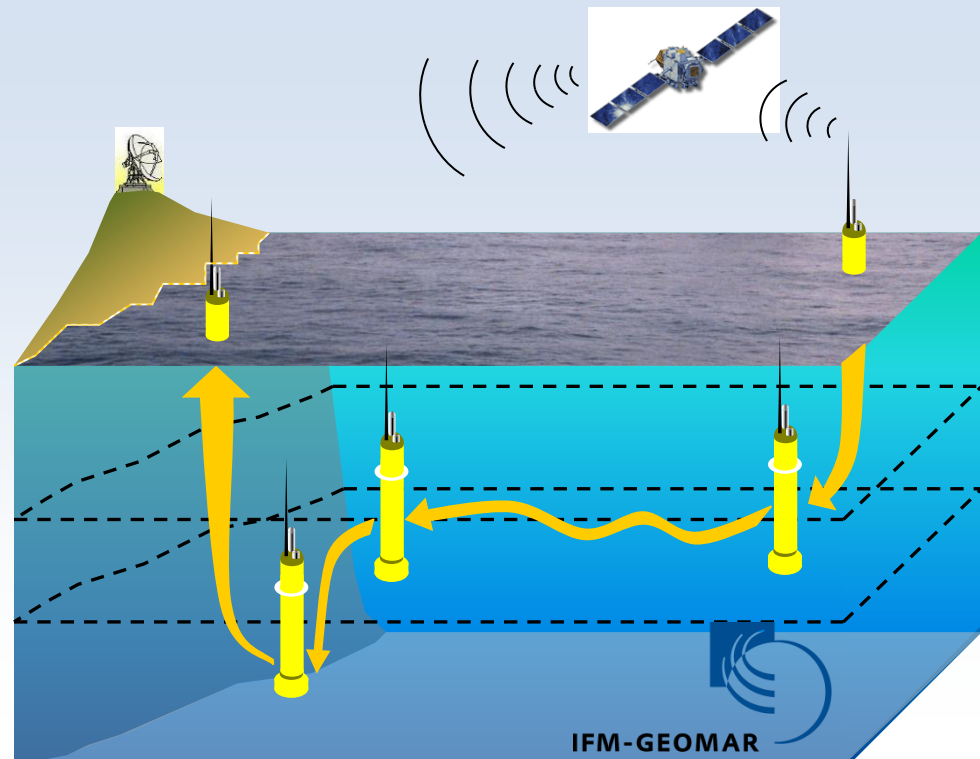


Labrador Sea Export

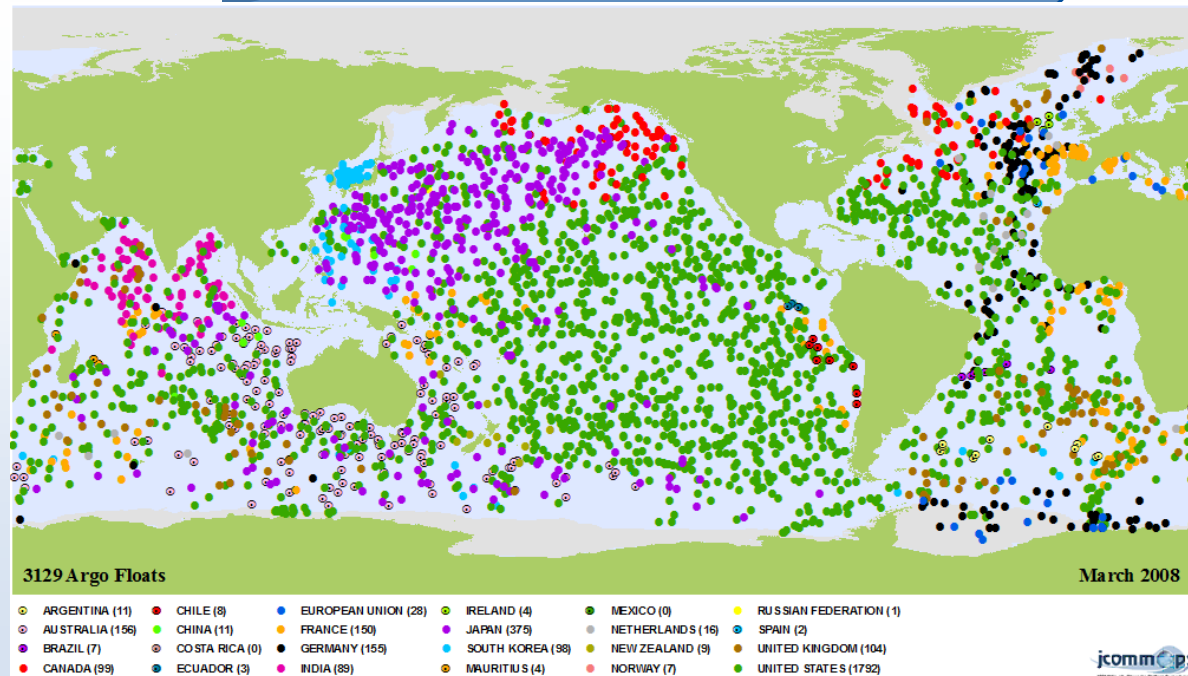


ARGO – ein globales Netz profilierender Tiefendrifter

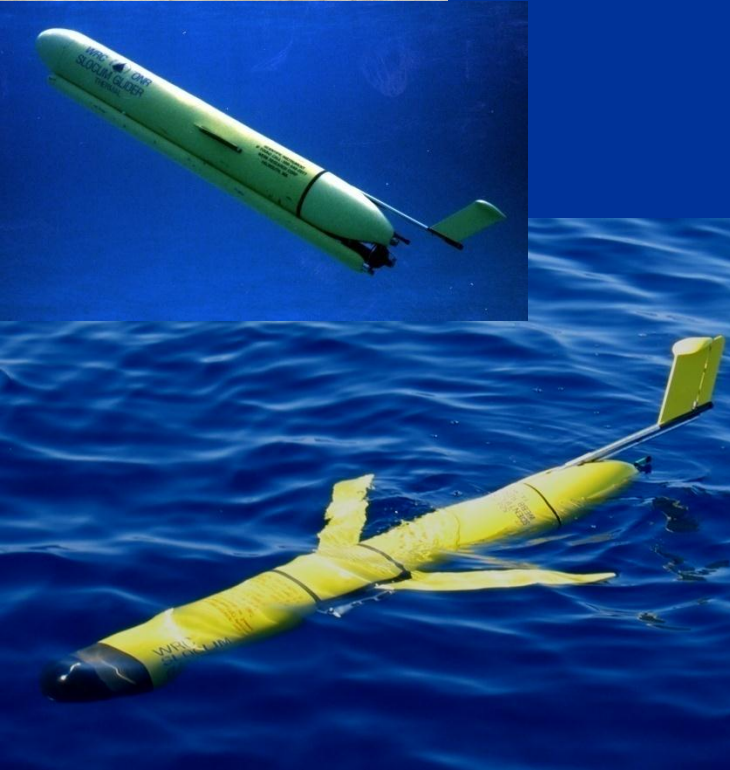
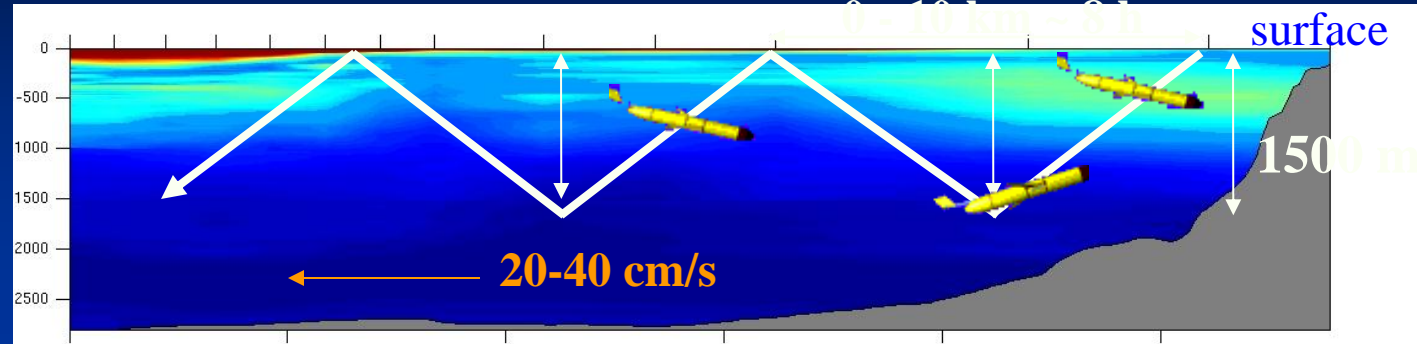
- Profile über 2000 m
- Datenübertragung in Echtzeit
- Einsatzdauer 2-3 Jahre
- Variabler Sensorträger



Neue Ideen
aus Kiel



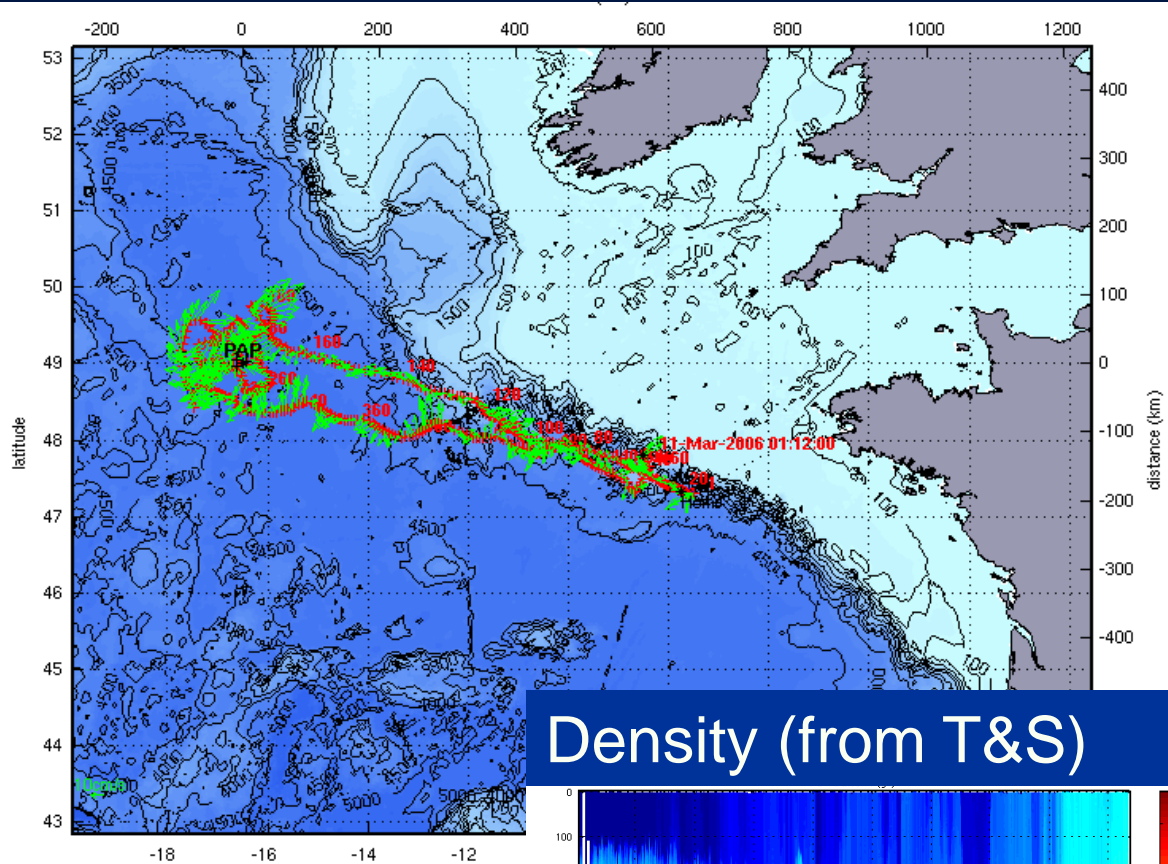
Autonome Ozean-Gleiter



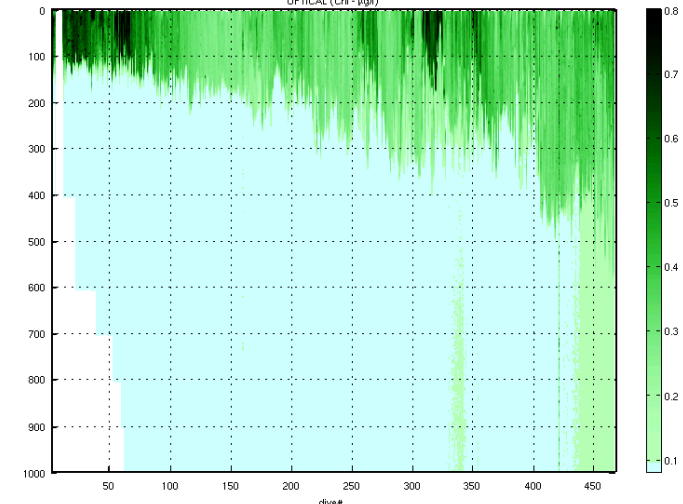
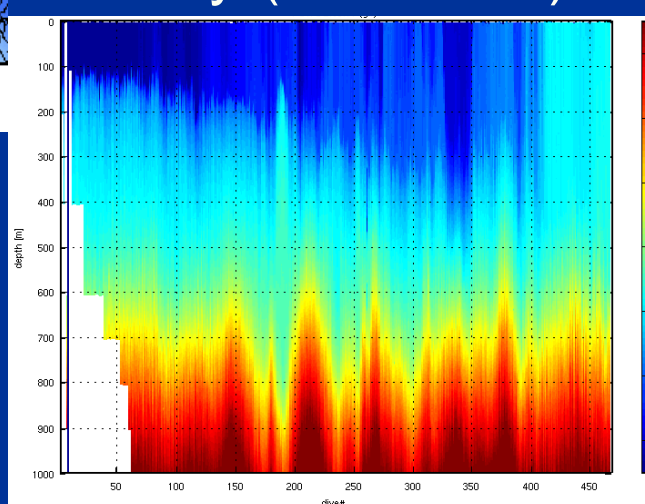
- Profilieren in den oberen 1000m
- Kommunikation in Echtzeit
- Standzeit bis zu 3 Monaten
- Viele elektrische Sensoren

Erster Europäischer Gleiter

- Dauereinsatz von SPRAY Gleiter über mehr als 3 Monate
- Hat 2300 km Strecke zurückgelegt
- 3W (Taschenlampe)



Chlorophyll - A (fluor.)



Darstellung der Ozean Observatorien am IFM- GEOMAR

