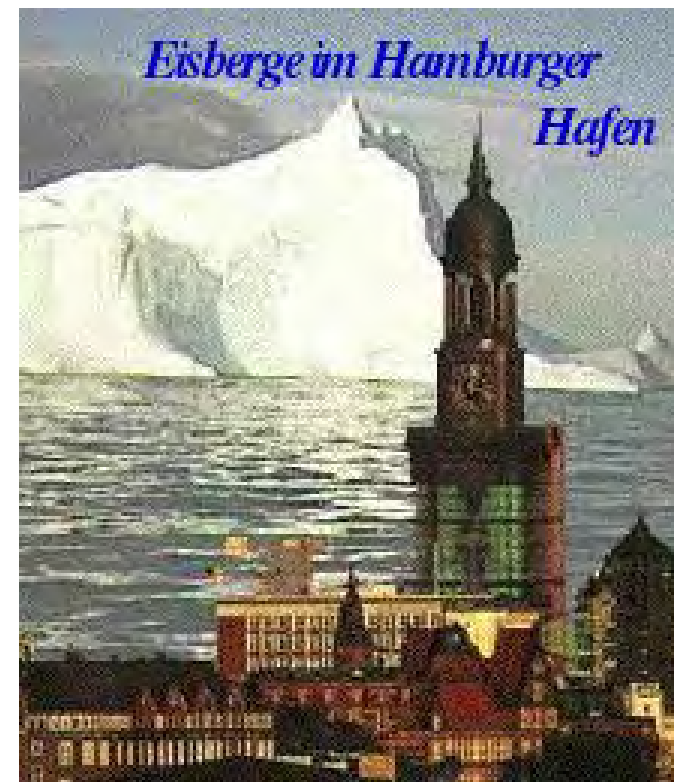




Thermohaline Zirkulation im Klimawandel

Johann Jungclaus

Max-Planck-Institut
für Meteorologie





Max-Planck-Institut für Meteorologie



ZMAW: Bundesstrasse 53



Maschinensaal des Deutschen Klimarechenzentrums (DKRZ)

Ca. 130 Wissenschaftler und Doktoranden betreiben in den drei Abteilungen

Atmosphäre im Klimasystem (Prof. Brasseur)

Ozean im Klimasystem (Prof. Marotzke)

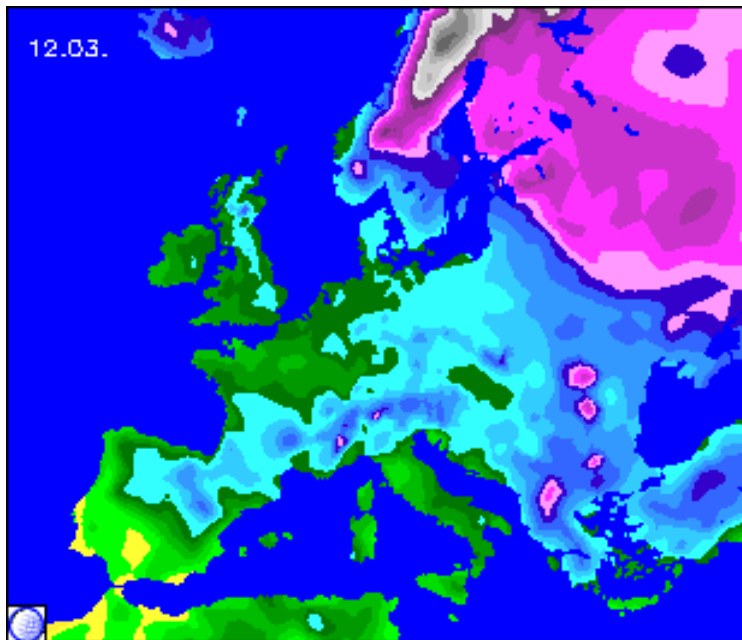
Land im Klimasystem (Prof. Claußen)

Grundlagenforschung zur Physik und Chemie des Klima- und Erdsystems und erstellen Computersimulationen des vergangenen, gegenwärtigen und zukünftigen Klimas

Das MPI-M ist eins von 80 Instituten der Max-Planck-Gesellschaft und arbeitet im Zentrum für Marine und Atmosphärische Wissenschaften mit Universitätsinstituten zusammen



Alltagswissen: Maritimes und kontinentales Klima



Temperaturkarte vom 12.03. 2005
(wetter-online.de)

Die moderierende Wirkung des Meeres ist den Menschen seit Urzeiten bekannt.

Die Wärmespeicherkapazität des Wassers ist wesentlich höher als die der Luft

Der Ozean gibt seine Wärme an die Luft ab. Die vorherrschende Westwindwetterlage trägt diese Wärme über die Kontinente



Seefahrer- und Entdeckerwissen: „Da gibt es einen Fluss im Ozean...“



Karte des Golfstroms (18. Jh)

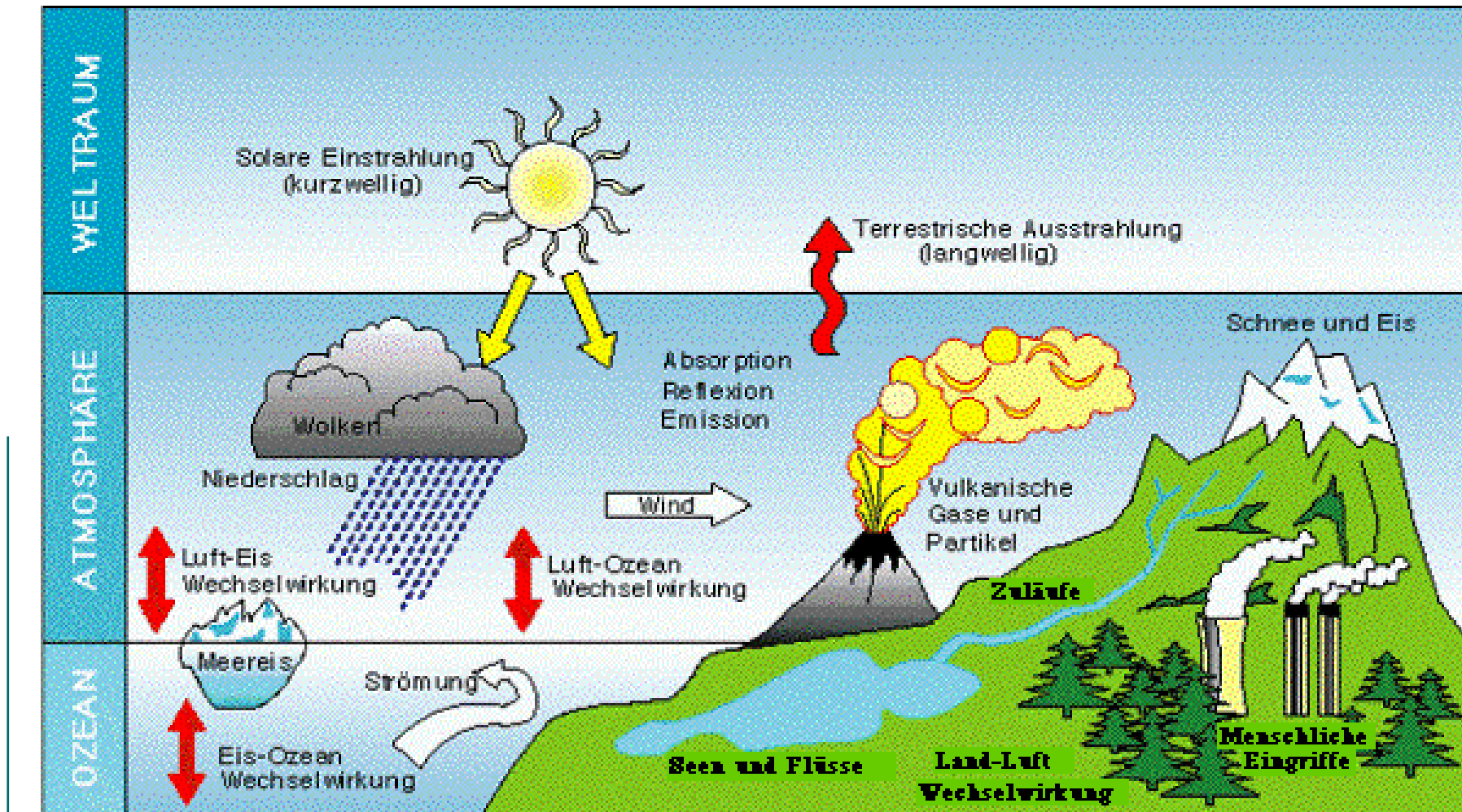
B. Franklin und T. Folgers (1768): Der Golfstrom beschleunigt ostwärts fahrende Schiffe: Navigation mit dem Thermometer

Alexander v. Humboldt (Kosmos, 1845): „...oceanische Flüsse, welche die Weltmeere durchstreifen, führen warme Wasser in höhere, kalte Wasser in niedere Breiten“

M. Maury (1855): „There is a river in the ocean...; its banks and its bottom are of cold water, while its current is of warm; the Gulf of Mexico is its fountain, and its mouth is the Arctic Sea. It is the Gulf Stream. There is in the world no other such majestic flow of waters.“

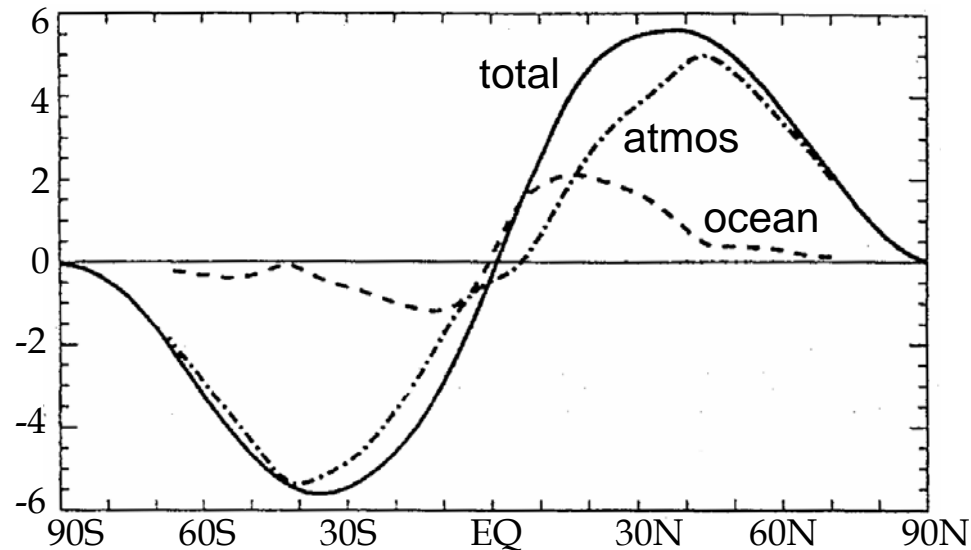


Die Komponenten des Klimasystems



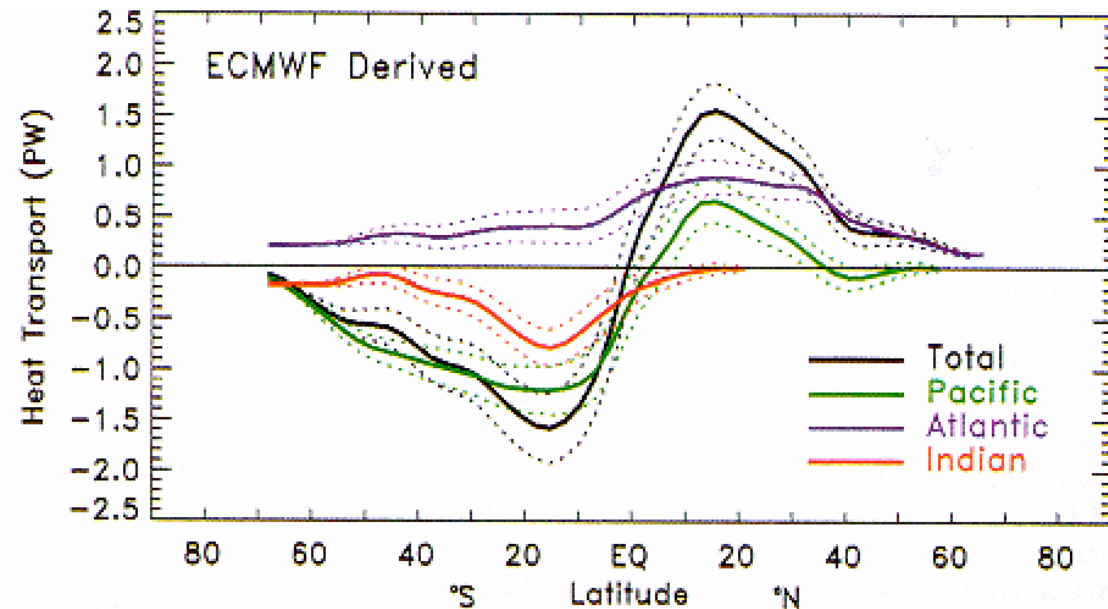


Atmosphäre und Ozean im Klimasystem

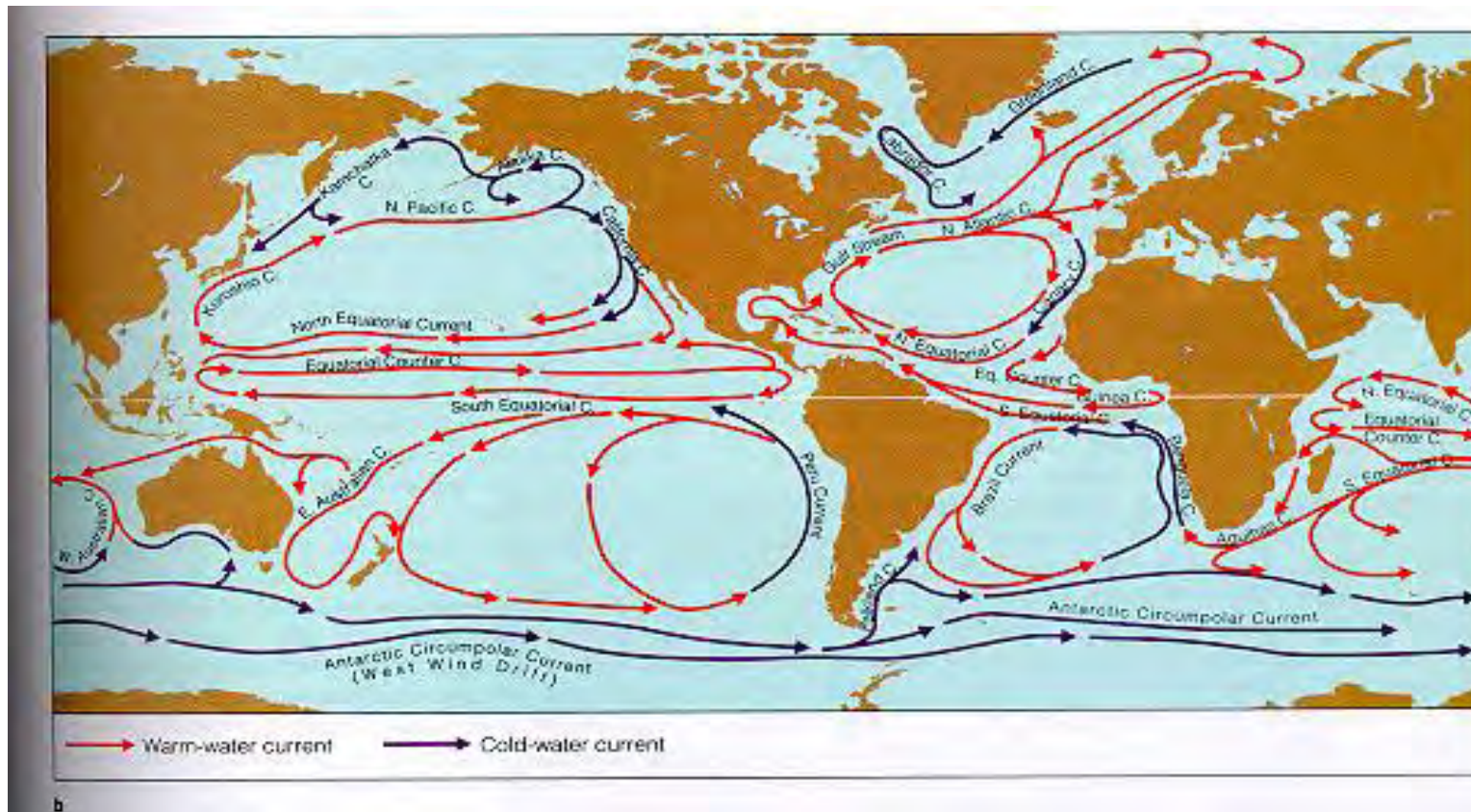


Atmosphäre und Ozean zusammen transportieren auf jeder Hemisphäre fast 6 PW ($1 \text{ PW} = 10^{15} \text{ W}$) an Wärme vom Äquator in die mittleren und hohen Breiten

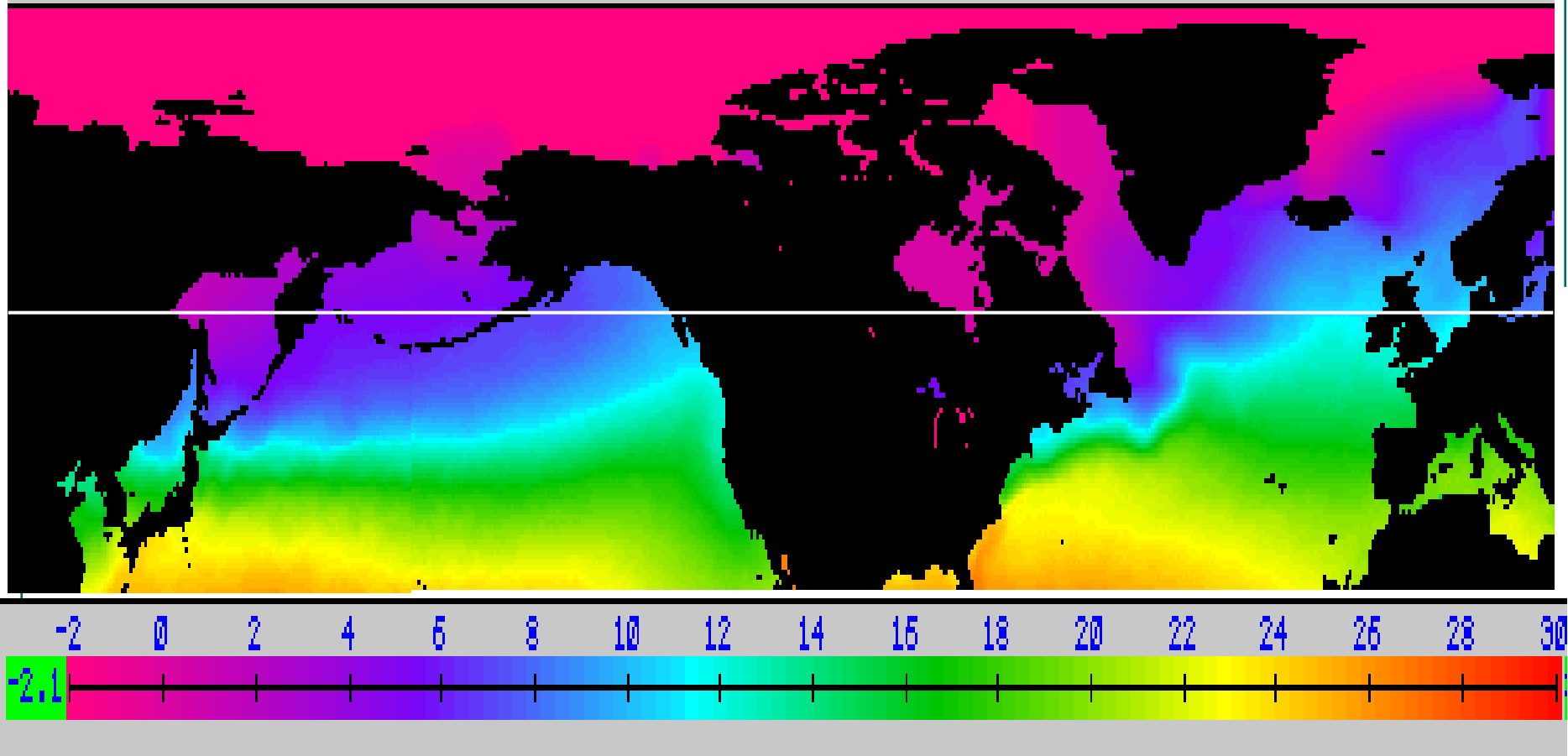
Der Weltozean übernimmt davon etwa 1/3 (ca. 2 PW). Auf den Atlantik entfallen etwa 2/3 (1.3 PW)



Die Sonderrolle des Atlantik: Ist der Golfstrom wirklich die Warmwasserheizung Europas?



Windgetriebene Ozeanzirkulation

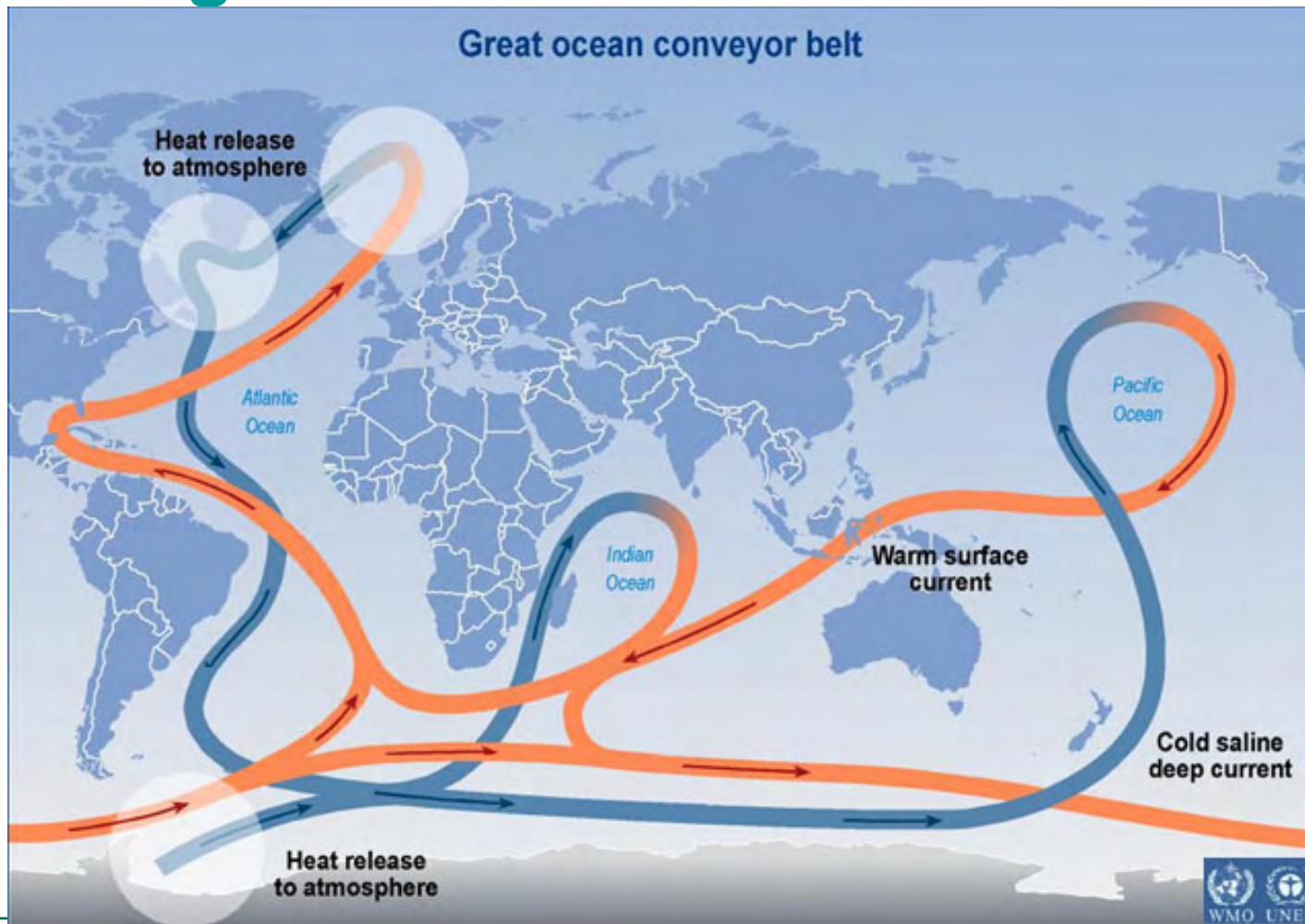


**Temperatur der Meeresoberfläche,
4. – 9. November 2002**



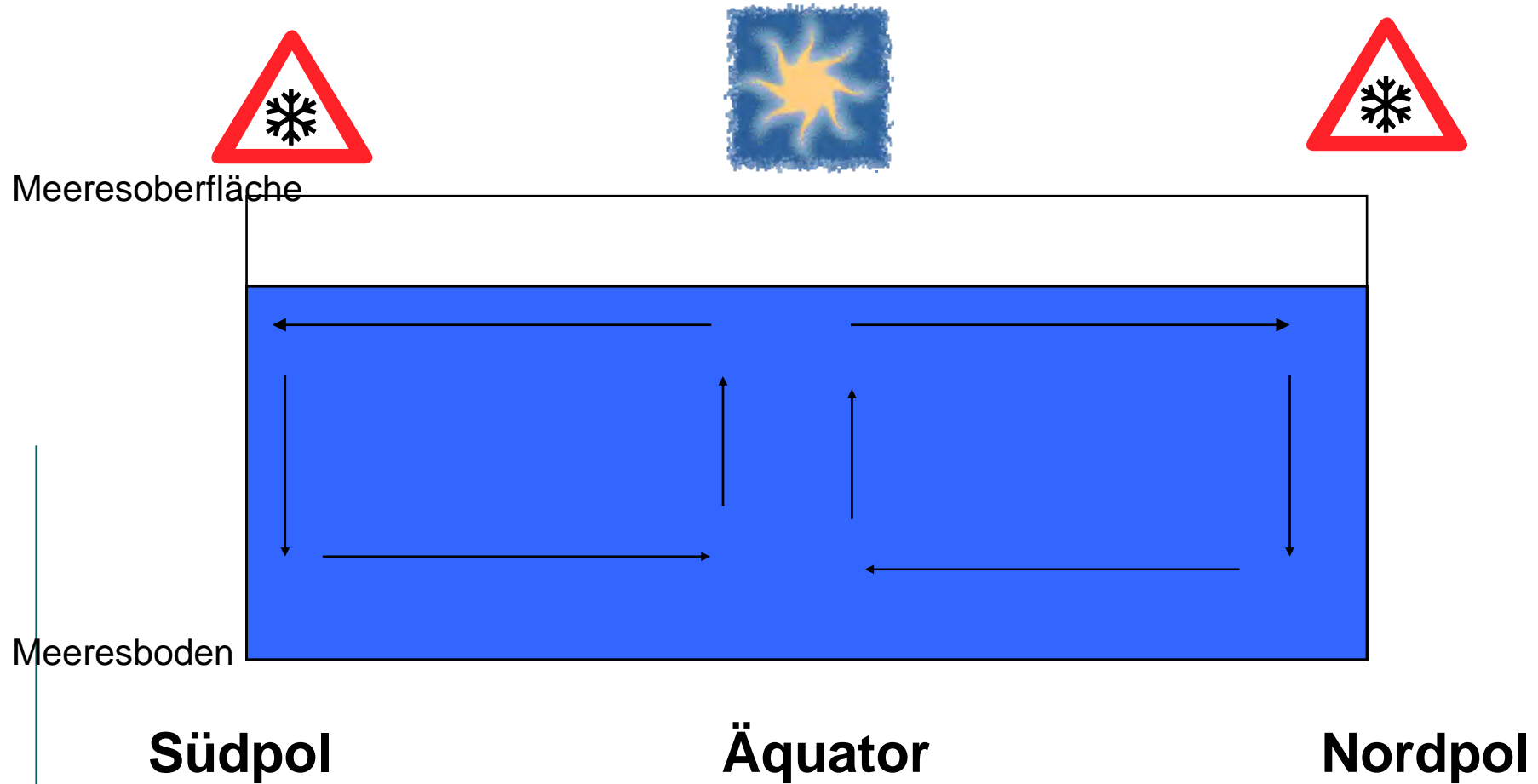


Die Thermohaline Zirkulation (THC): Das große ozeanische Förderband

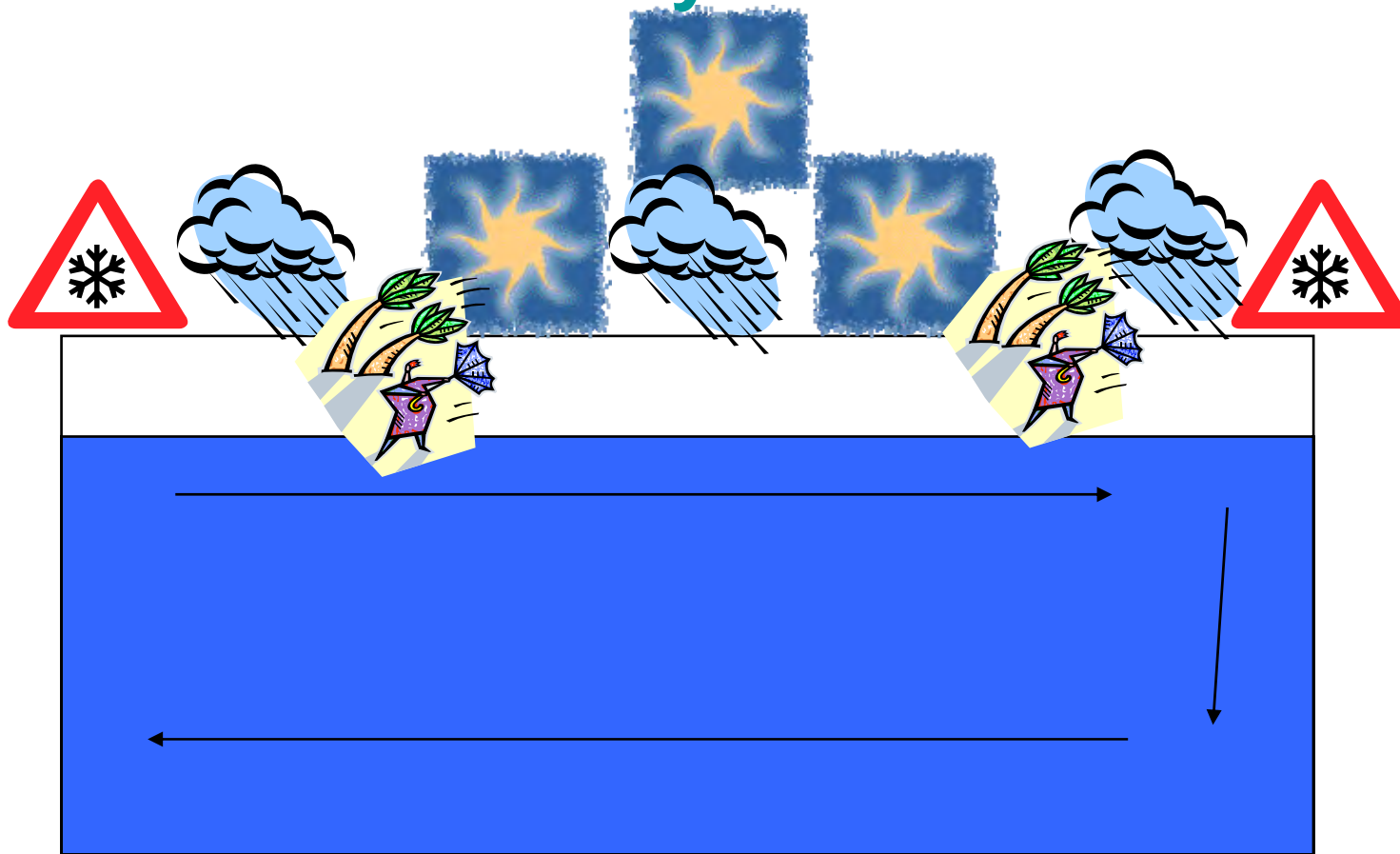




Ein thermisches System



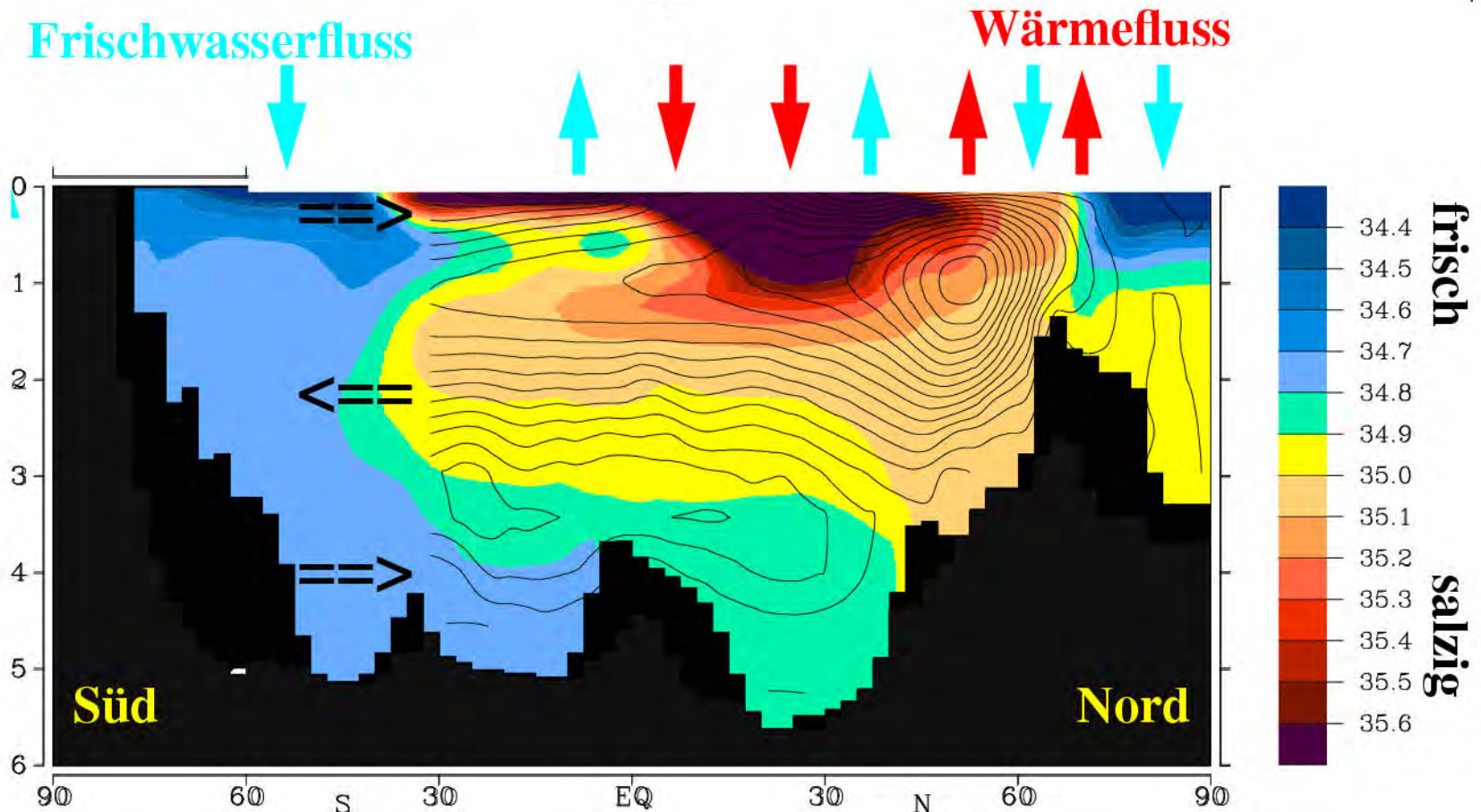
Das Thermohaline System



Die Dichte des Wassers wird durch Temperatur und Salzgehalt bestimmt. Verdunstung in den Tropen macht das Wasser salziger, Niederschlag süßt es aus. Winde und Gezeiten treiben die Strömungen und stellen Bewegungsenergie (Vermischung) bereit



Die THZ/MOC im Modell: Der heutige Atlantik



Umwälzrate (THC) : 15-20 Sverdrup (Sv)

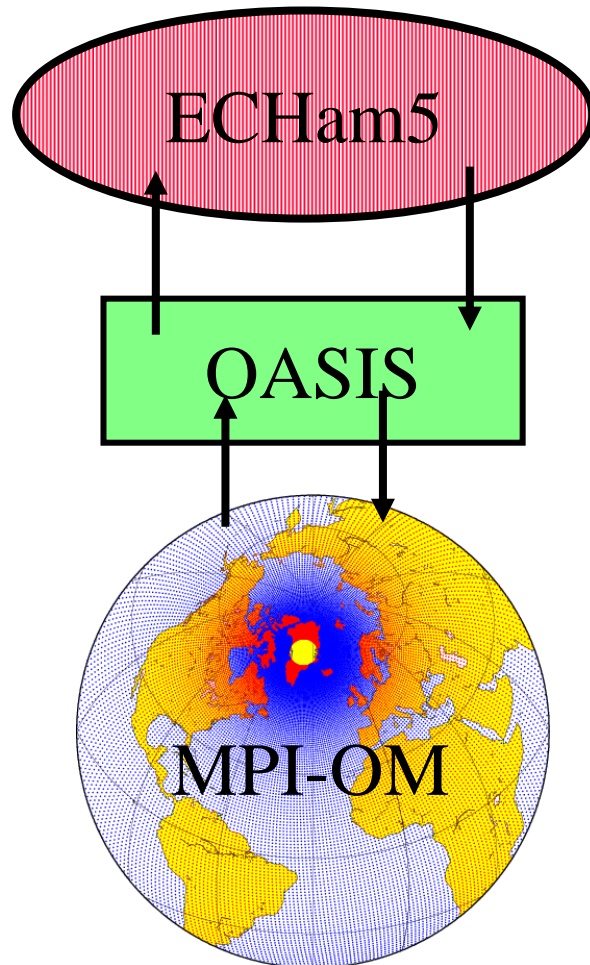
1 Sv = 1 Million m³ pro Sekunde

Show movie here...





Das gekoppelte Ozean- Atmosphärenmodell



ECHam5: MPI atmosphere model (Roeckner et al., 2003), interactive runoff and glacier calving scheme.

Resolutions: T63L31 (IPCC)

OASIS 3.0 PRISM coupler

MPI-OM (C-HOPE) (Marsland et al., 2003)

C-Grid, z-level, partial cells, BBL parameterization

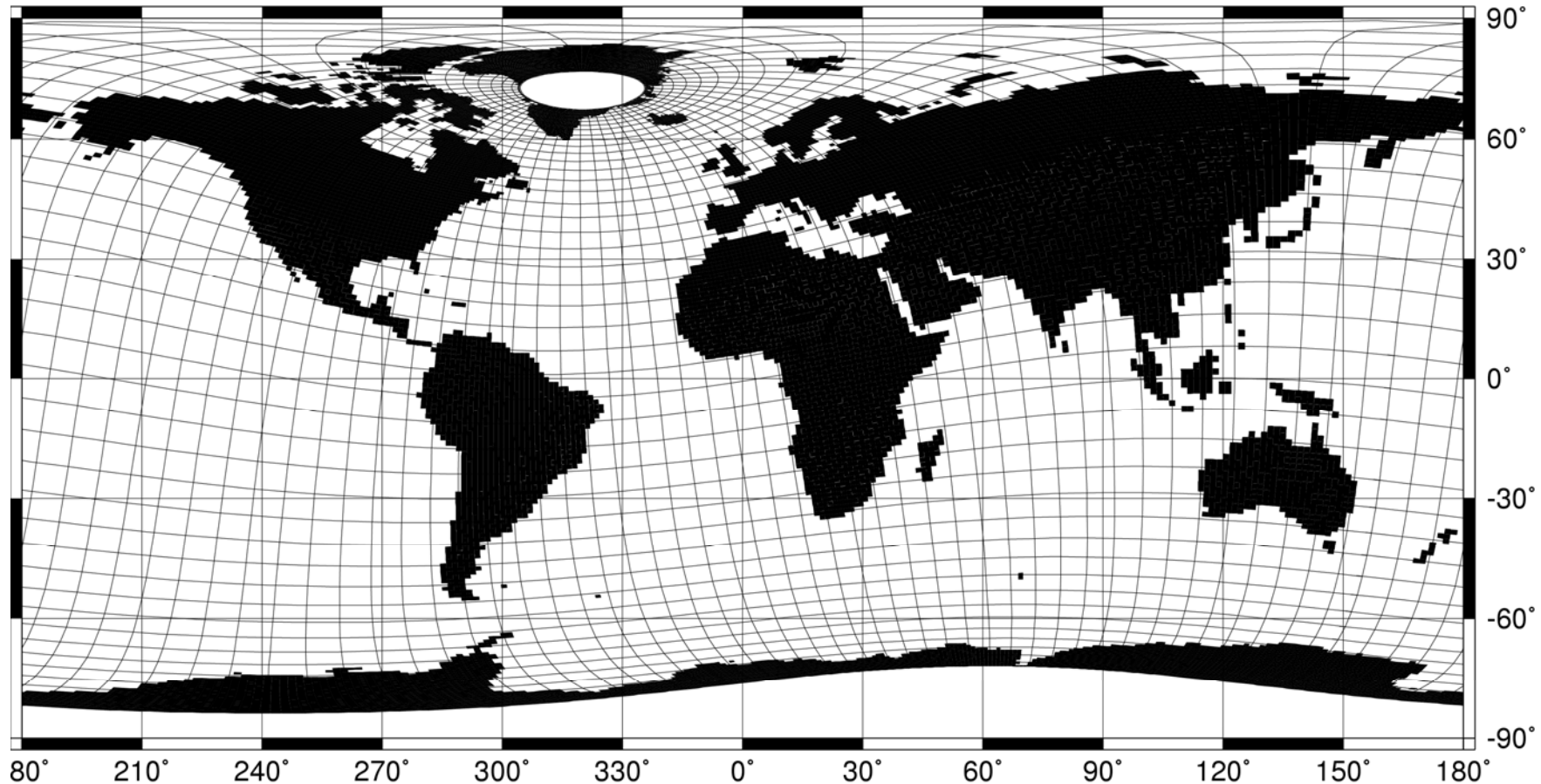
Hibler-type sea ice model incl. snow and fractional ice cover

Conformal mapping: 1.5° with refinement in grid pole regions

NO FLUX ADJUSTMENT



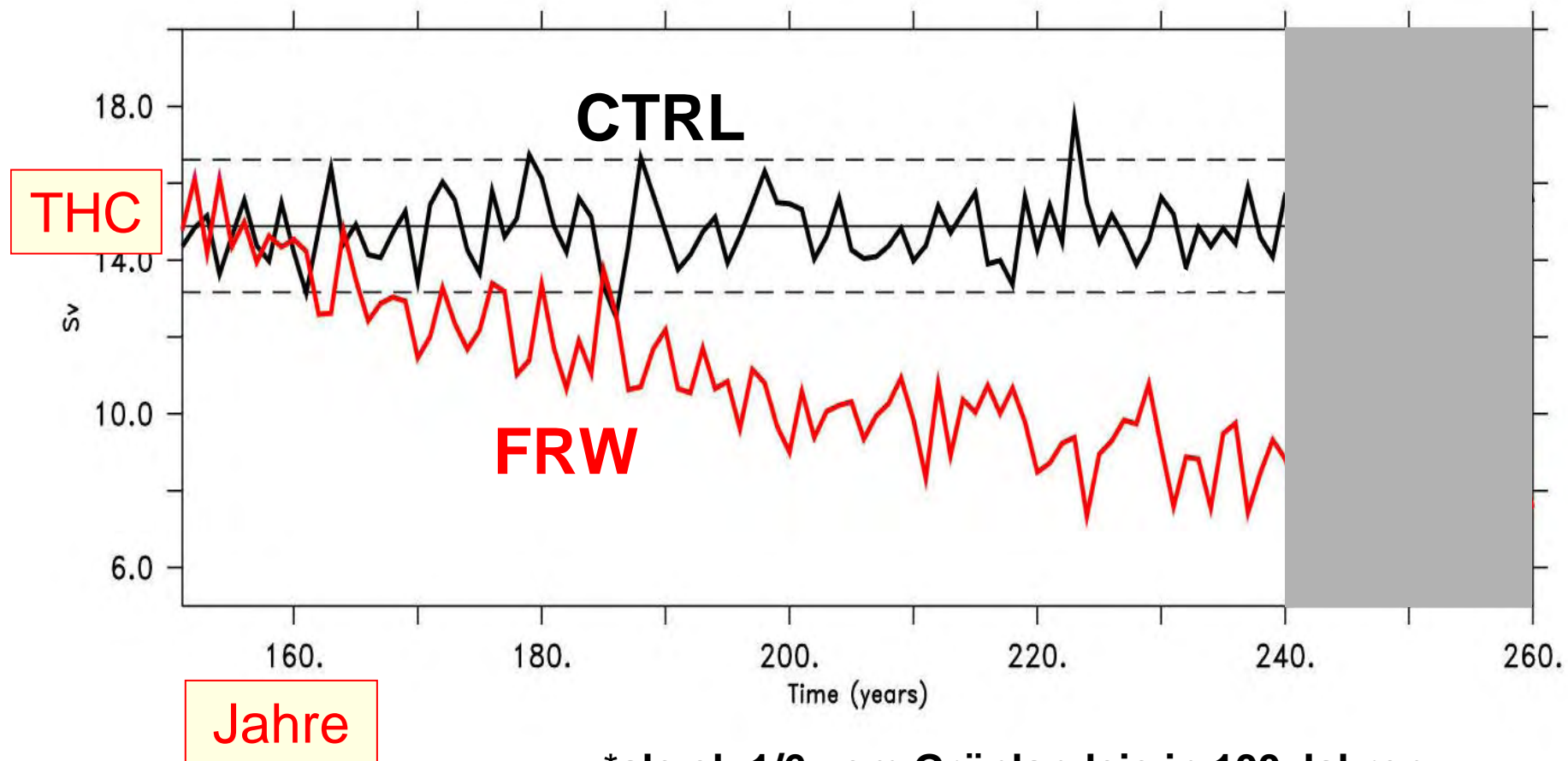
Rechengitter des Ozeanmodells



Jede fünfte Gitterlinie ist angezeigt; In der Vertikalen gibt es 40 Schichten, die mehrzahl davon in den oberen 200 m.



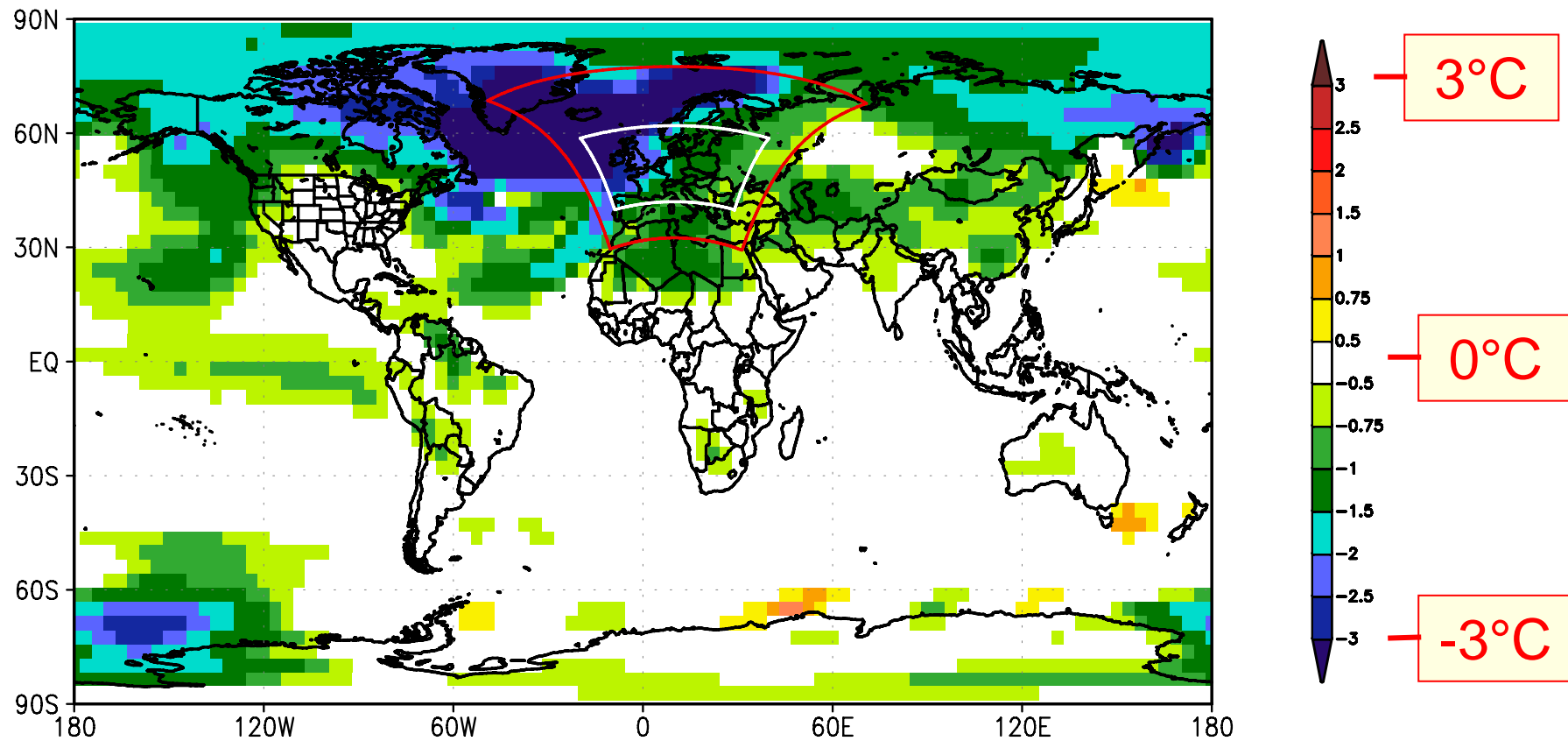
Sensitivitätsexperiment mit dem Klimamodell: Welchen Einfluss hat eine Süßwasserzufuhr von 0.1 Sv in den Nordatlantik



***als ob 1/6 vom Grönlandeis in 100 Jahren
schmilzt**

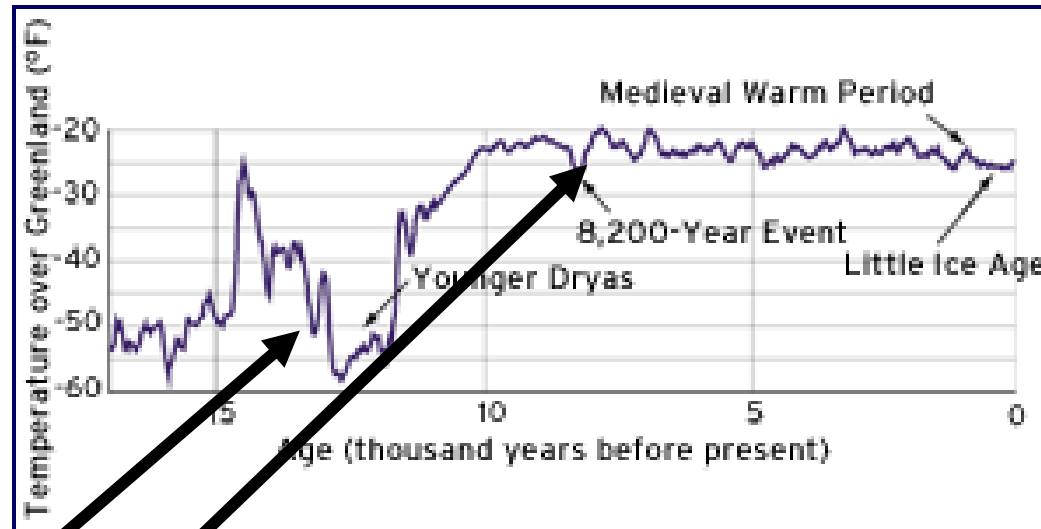


Effekt einer erheblichen Reduktion der THC durch Süßwassereintrag in den Nordatlantik



Jacob, Jungclaus, Goettel, Podzun,
Muskulus, Marotzke, 2005

Zeugnisse der Vergangenheit



Am Übergang von der letzten Eiszeit in die Warmzeit verursachten die schmelzenden Gletscher Nordamerikas gigantische Süßwassereinträge in den Nordatlantik: Die einsetzende Erwärmung wurde abrupt unterbrochen.

Vor 8200 Jahren rutschten die letzten großen kanadischen Gletscher ins Meer. Für mehrere hundert Jahre sanken die Temperaturen in Nordeuropa und -amerika um mehrere Grad C.



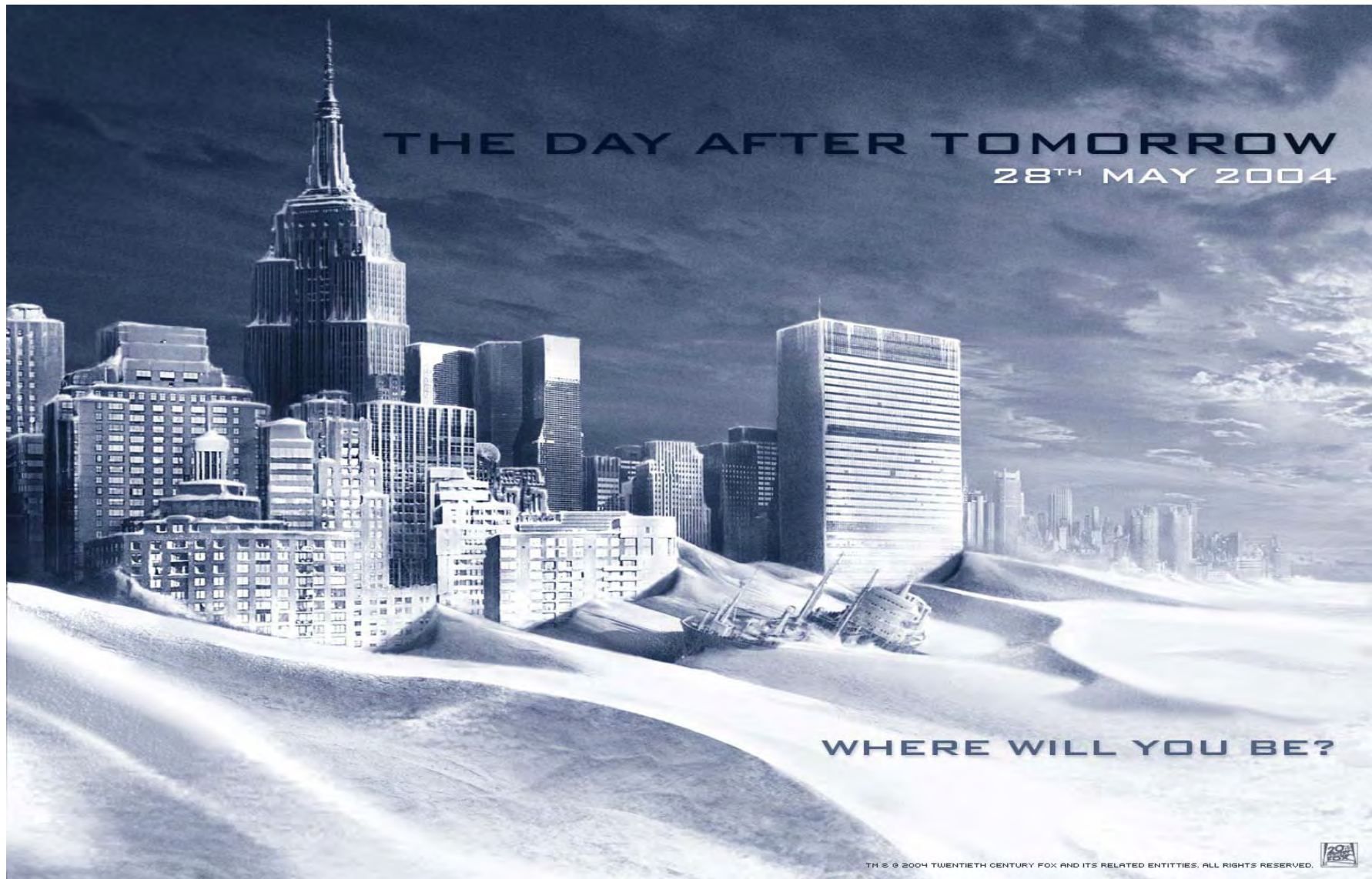
Was passiert in einem wärmeren Klima?

Im „Treibhausklima“ wird es in wärmer und auch die oberen Schichten des Ozeans werden wärmer (leichter). Gleichzeitig kann die Luft kann mehr Wasserdampf aufnehmen, die atmosphärische Wärme und Feuchtepumpe wird stärker: Es gibt mehr Niederschlag in höheren Breiten. Das Oberflächenwasser wird weniger salzig.

Arktische Eismassen (im Extremfall auch die Landeismassen über Grönland) schmelzen und geben ihr Süßwasser an den Ozean ab. Es entsteht eine salzarme, leichte Oberflächenschicht, die nicht mehr so stark abgekühlt werden kann, so dass das Wasser im Norden absinkt:

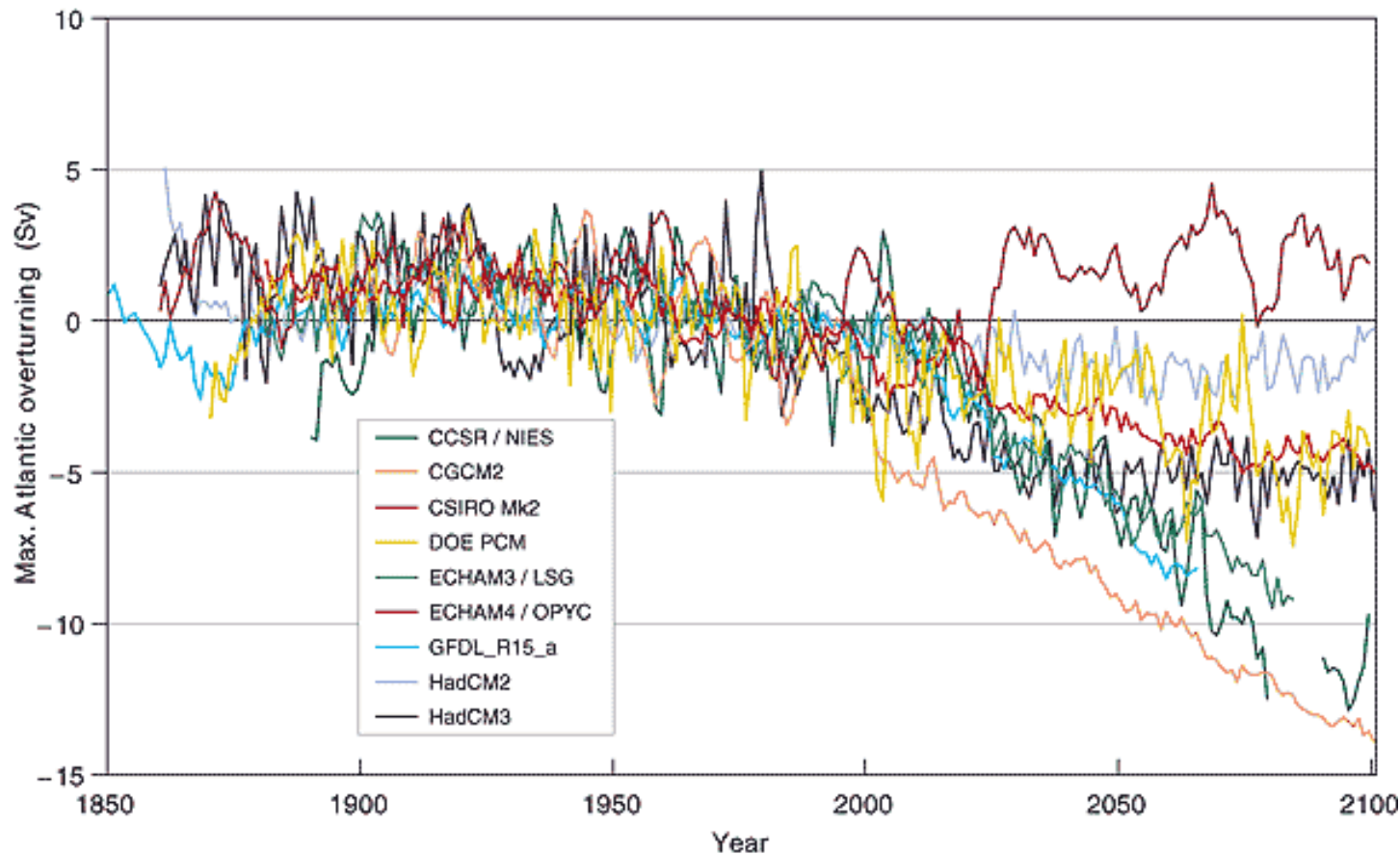
Das Förderband steht möglicherweise still!

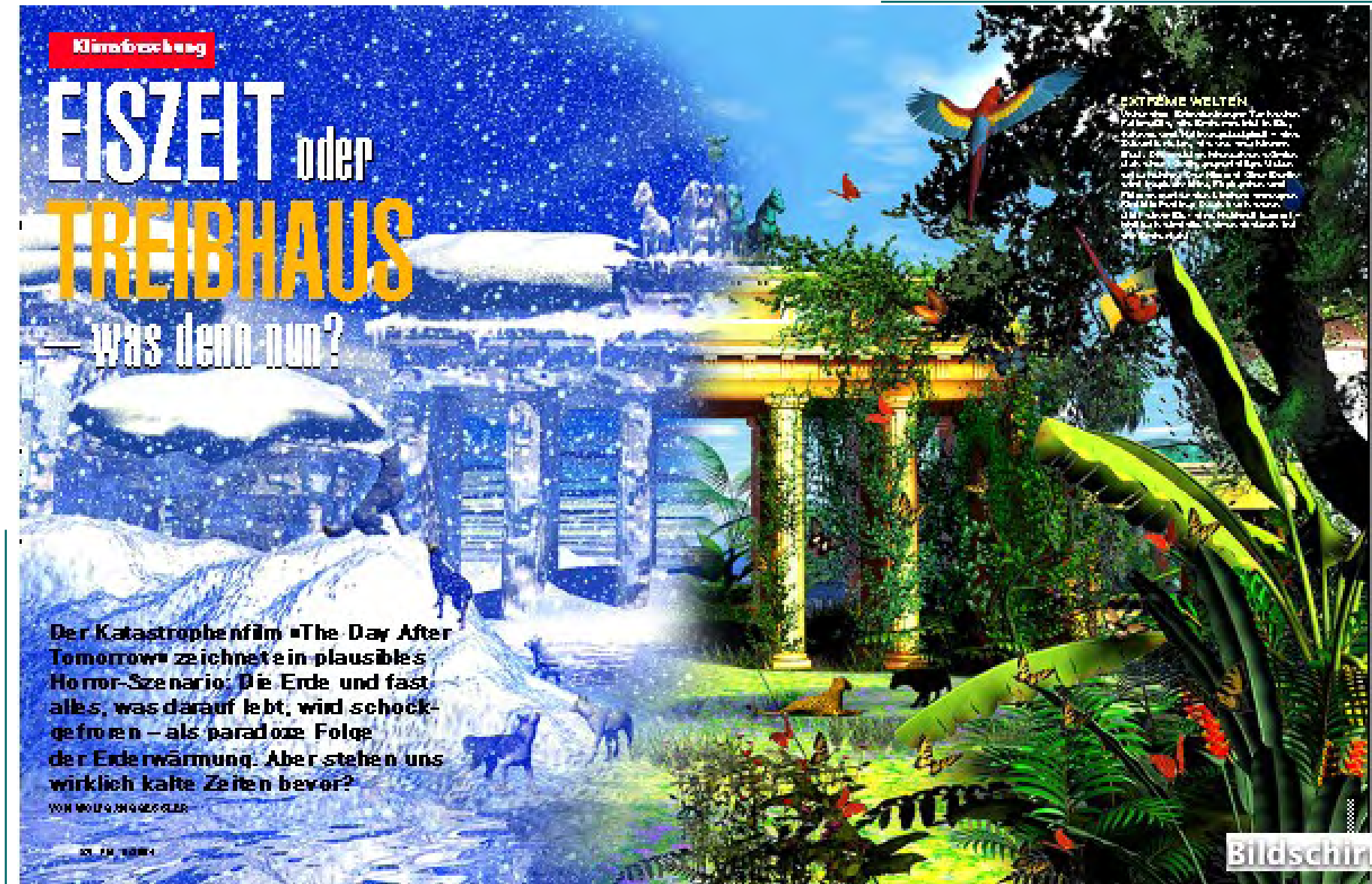






Ergebnisse verschiedener Modelle für die IPCC Szenarien (2001)

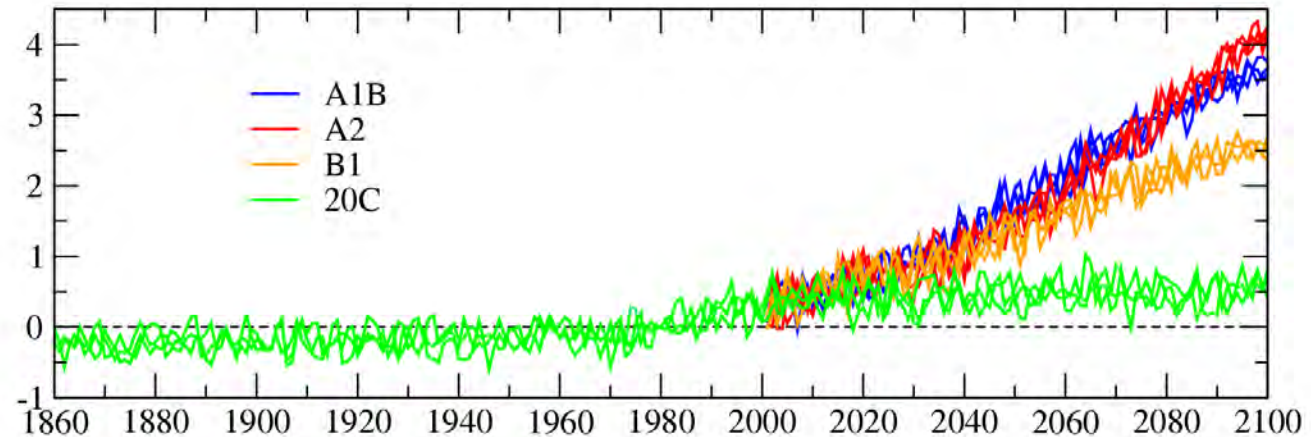




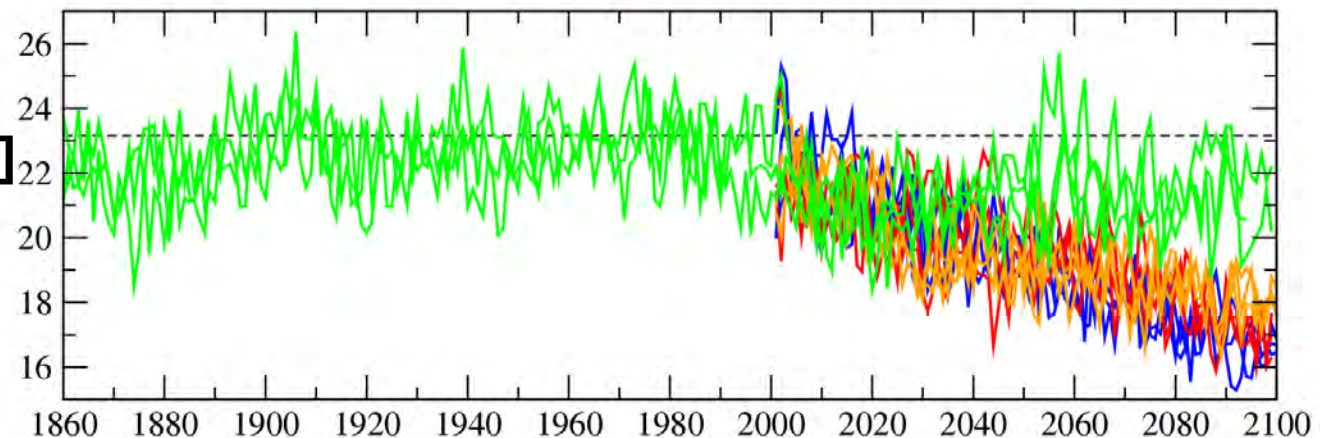


Die THZ in den IPCC Szenarien des MPI-M bis 2100

**Globale Atm.
Oberflächente-
mperatur [°C]**

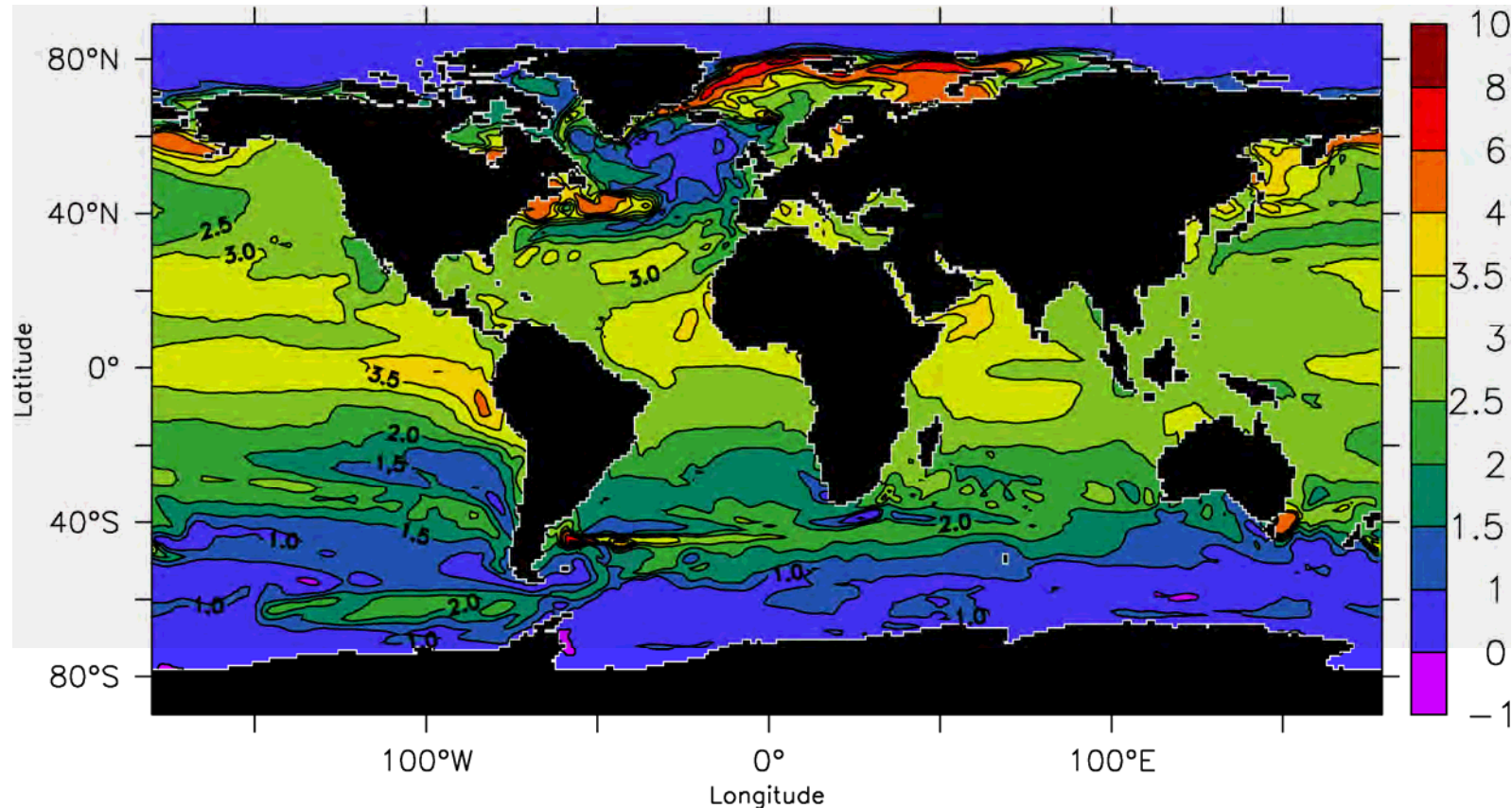


**Atlantic MOC
[Sv, 1Sv=10⁶m³s⁻¹]**





IPCC Experiment A1B: Temperaturänderung a.d. Meeresoberfläche (Ende des 21. vs. 20. Jh.)

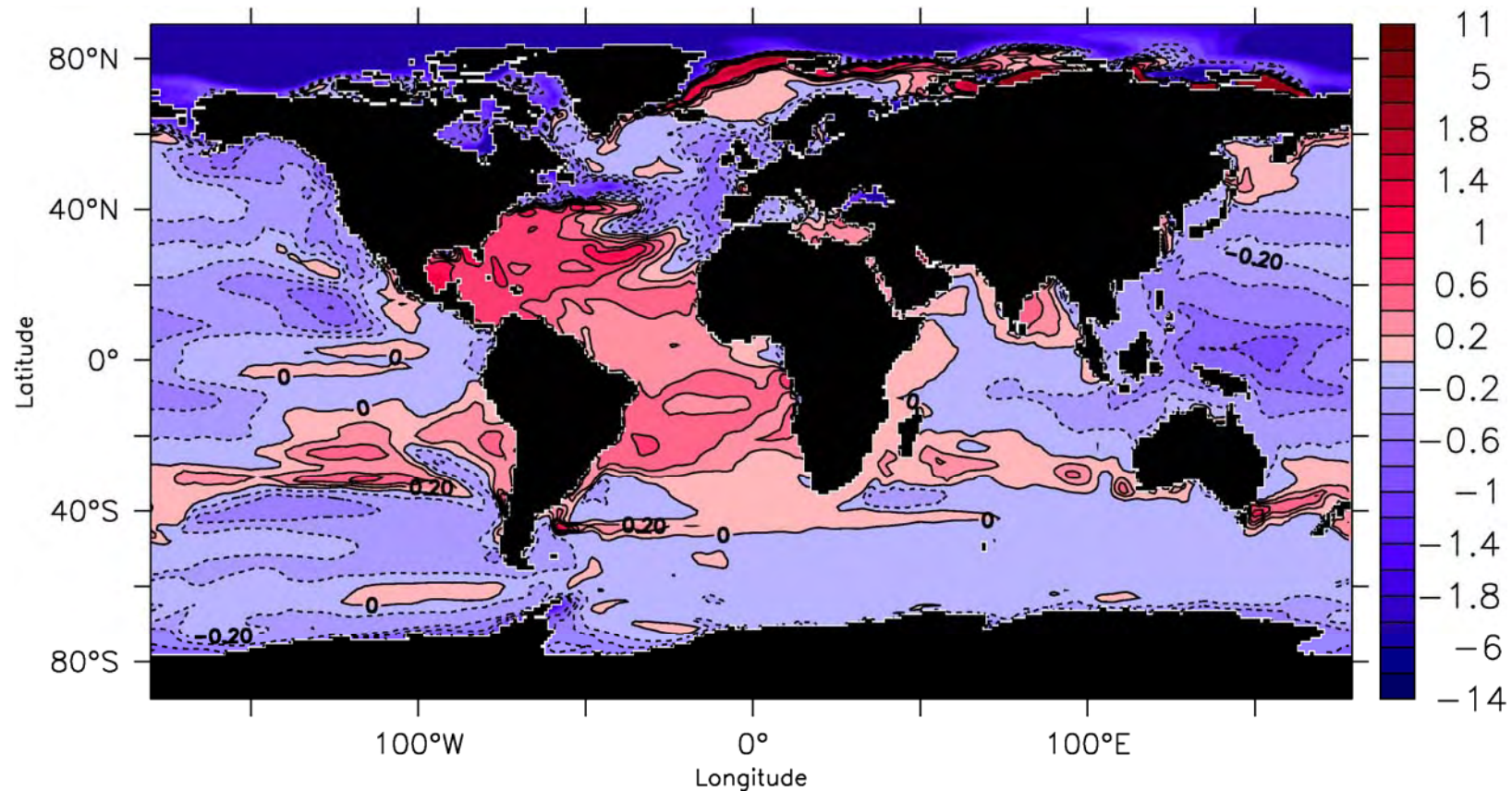


Weitverbreitete Erwärmung, Nordatlantik zeigt Einfluß der schwächeren THZ





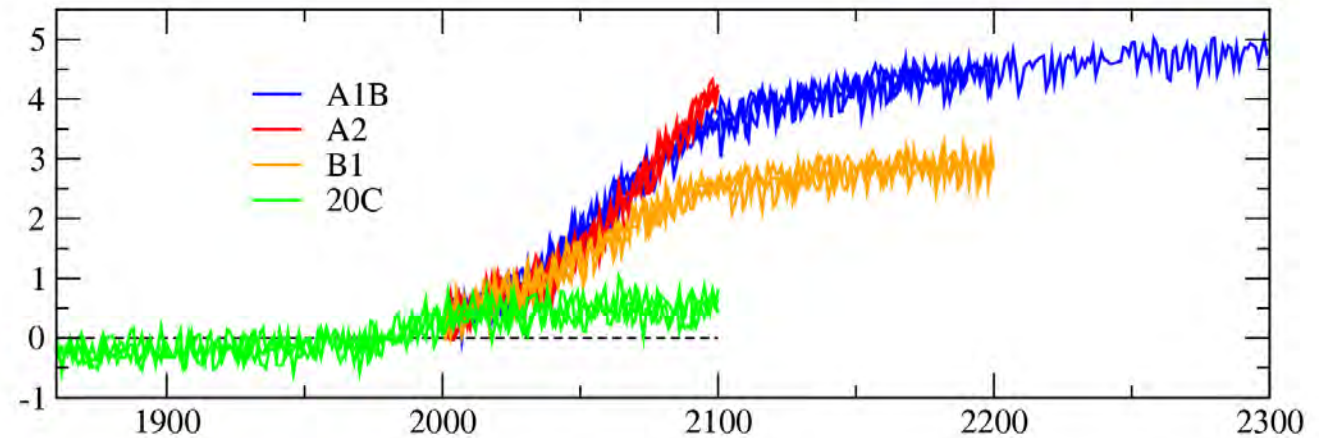
IPCC Experiment A1B: Salzgehaltsänderung a.d. Meeresoberfläche (Ende des 21. vs. 20. Jh.)



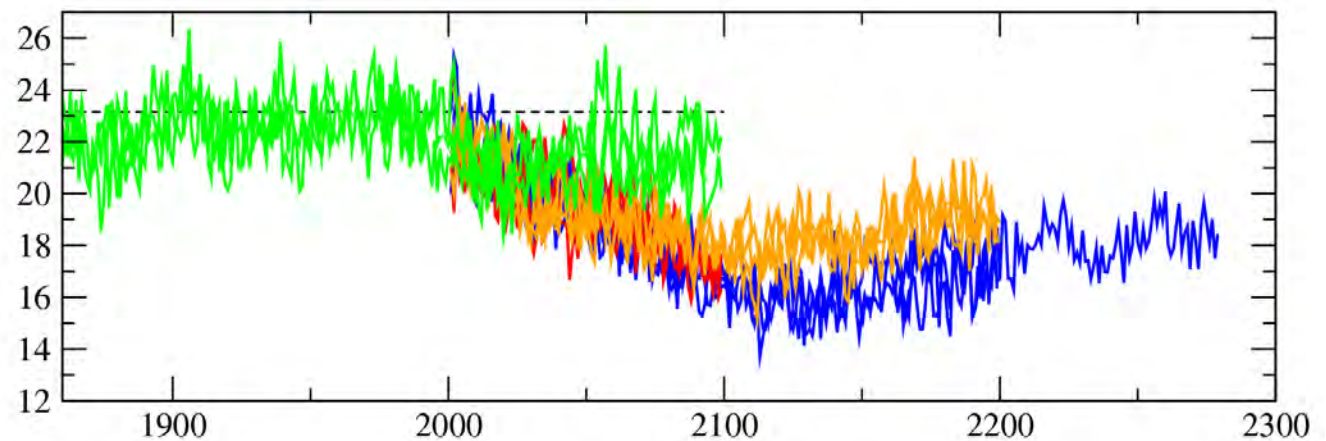


Und danach.....

Global Atm.
Surface
temperature
[°C]

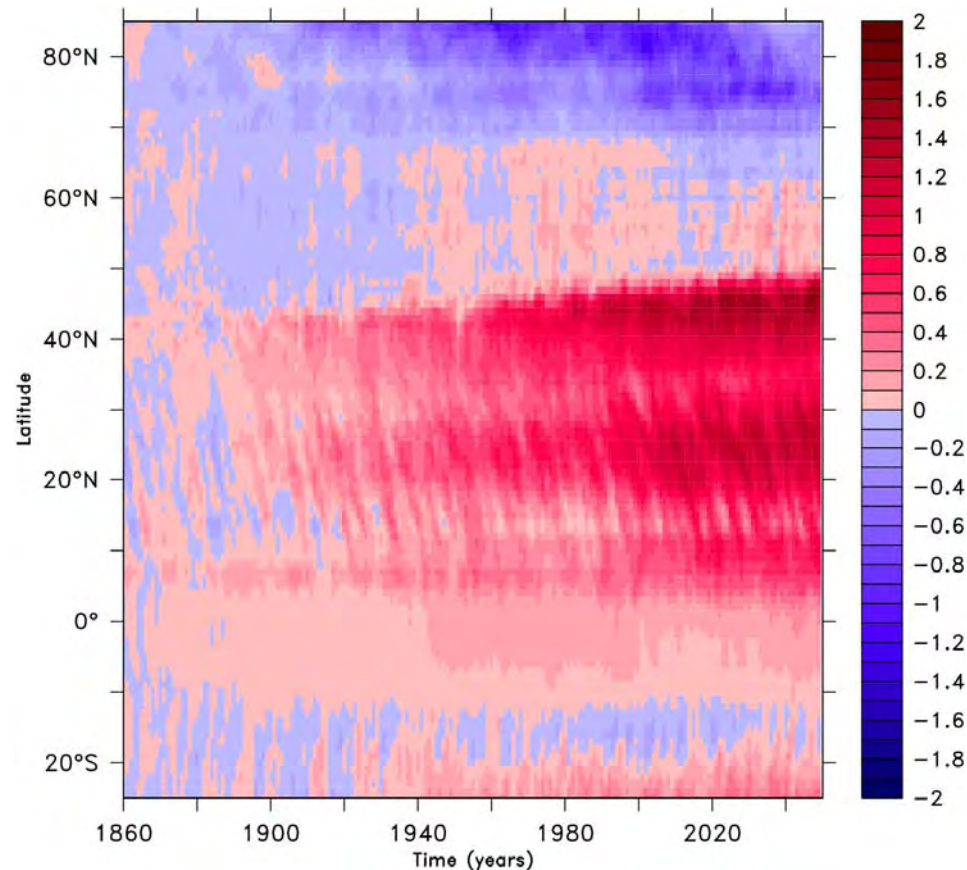


Atlantic
Meridional
overturning
circulation
[Sv,
 $1\text{ Sv} = 10^6\text{ m}^3\text{ s}^{-1}$]





Zeitliche Entwicklung des Salzgehalts im oberen Ozean (Atlantik)



Differenz der über die Breite des Atlantiks gemittelten Salzgehalts zum Anfangszustand

Positive Salzgehaltsanomalien entstehen in den Subtropen und wandern nach Norden.





Die THZ in den Klimaänderungsrechnungen

- ◆ **Je nach Szenario ist eine Reduktion um 25-30% zu erwarten.**
- ◆ **Dies führt zu verringerter Erwärmung im Nordatlantik und Westeuropa**
- ◆ **Kein Zusammenbruch, sondern graduelle Wiederherstellung der THZ Stärke**
- ◆ **Die „Erholung“ liegt an der Zufuhr von salzigem Wasser aus den niederen Breiten, wo mehr Wasser verdunstet und mehr Wasser vom Atlantik in den Pazifik transportiert wird.**





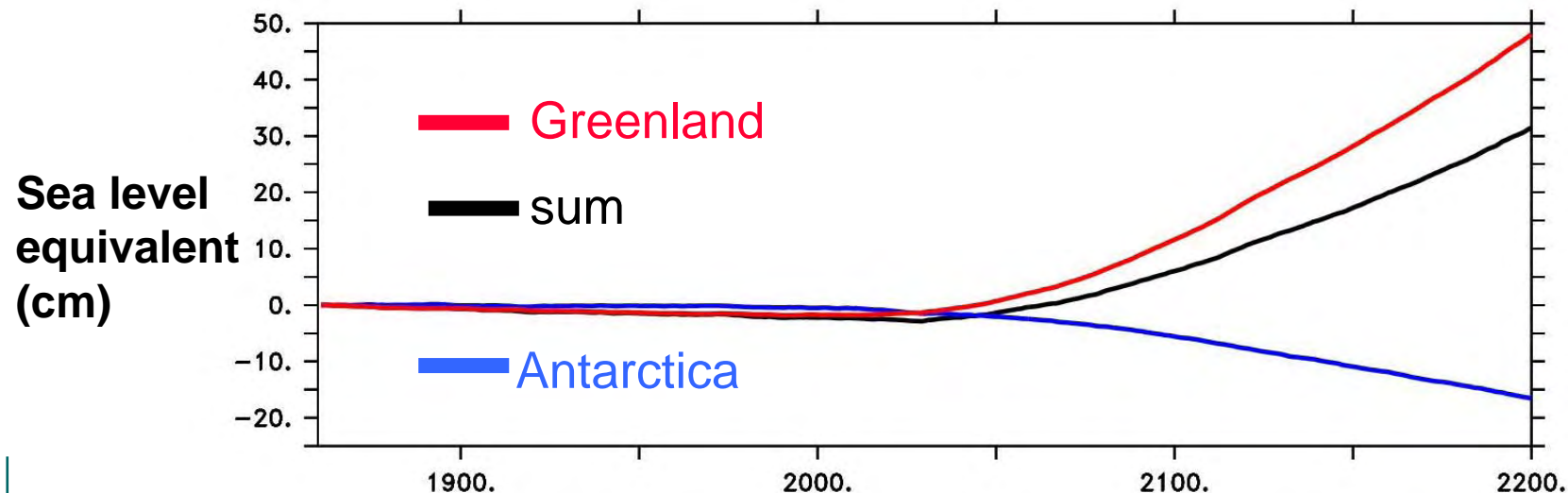
Die THZ in den Klimaänderungsrechnungen

- ◆ **Die THZ Reduktion in den AR4 Simulationen verschiedener Modelle stimmen wesentlich besser überein als 2001 (Schmittner et al., GRL)**
- ◆ **Allerdings ist das Abschmelzen vom grönländischen Festlandeis nicht berücksichtigt.**
- ◆ **Wie würde dies das Ergebnis verändern?**





Aus der Erwärmung über Grönland lässt sich das Abschmelzen im Nachinein abschätzen:



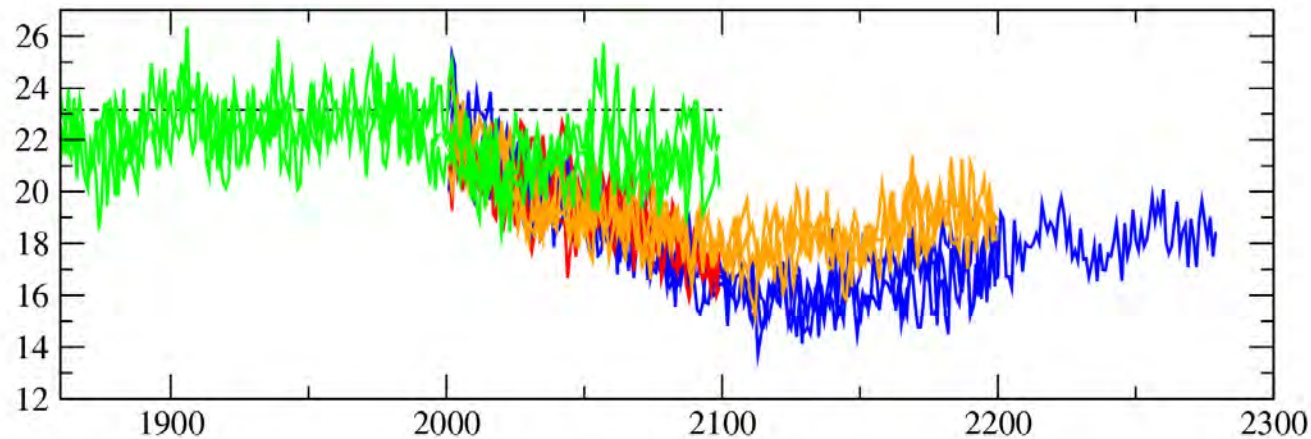
Dies entspricht einer Abflußrate, die langsam ansteigt, und im Jahre 2100 etwa 0.03 Sv erreicht.

2 zusätzliche Experimente: Wiederholung des A1B Szenarios mit zusätzlichem Eintrag von 0.03 und 0.09 Sv (als worst case szenario)

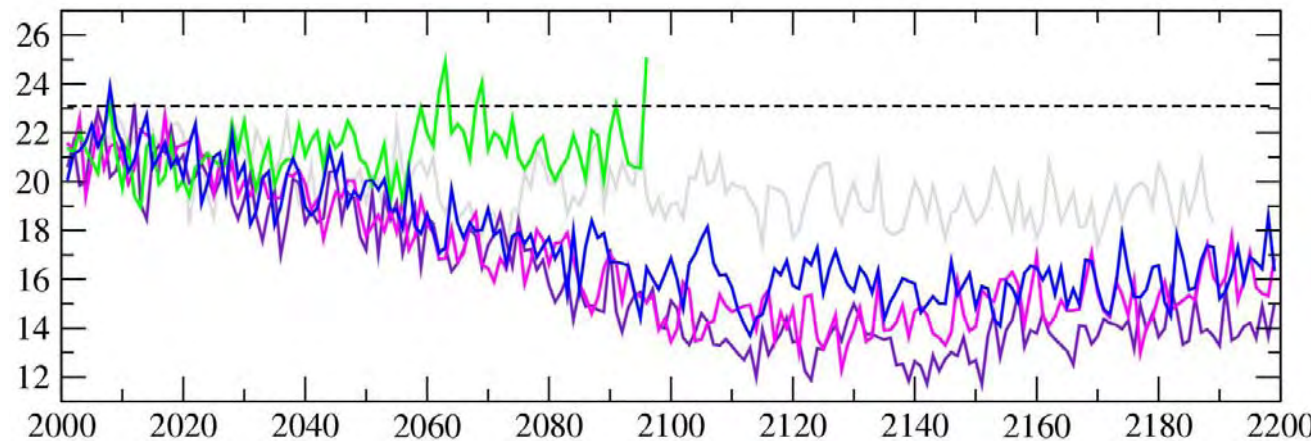




THZ in den "normalen" IPCC und in den Abschmelzexperimenten



— A1B



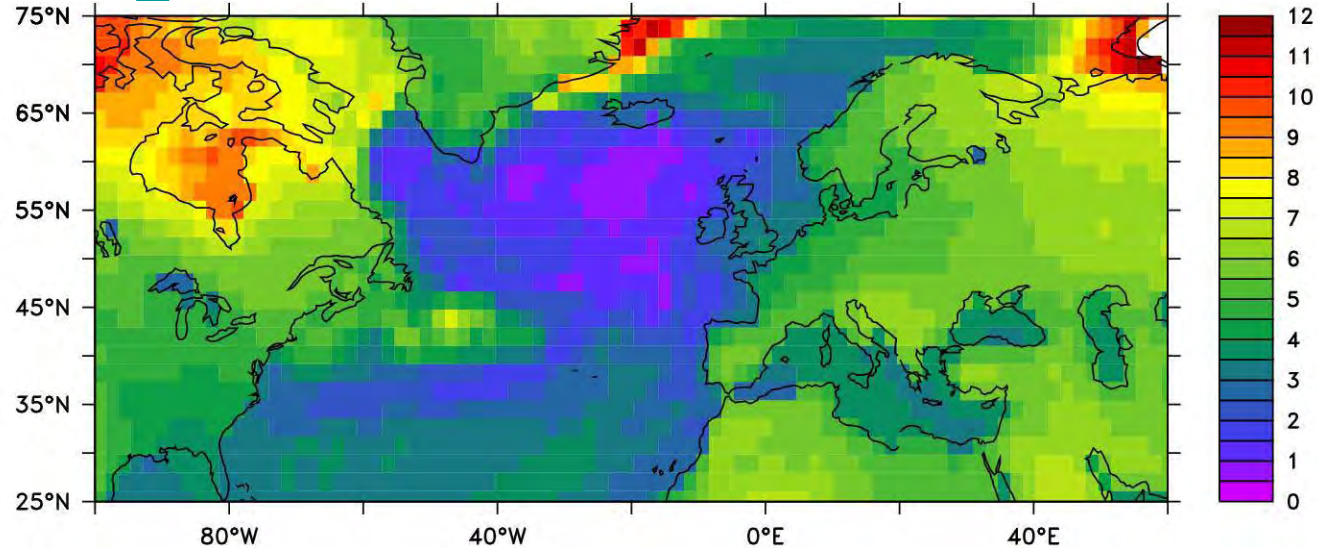
— A1B+0.09

— A1B+0.03

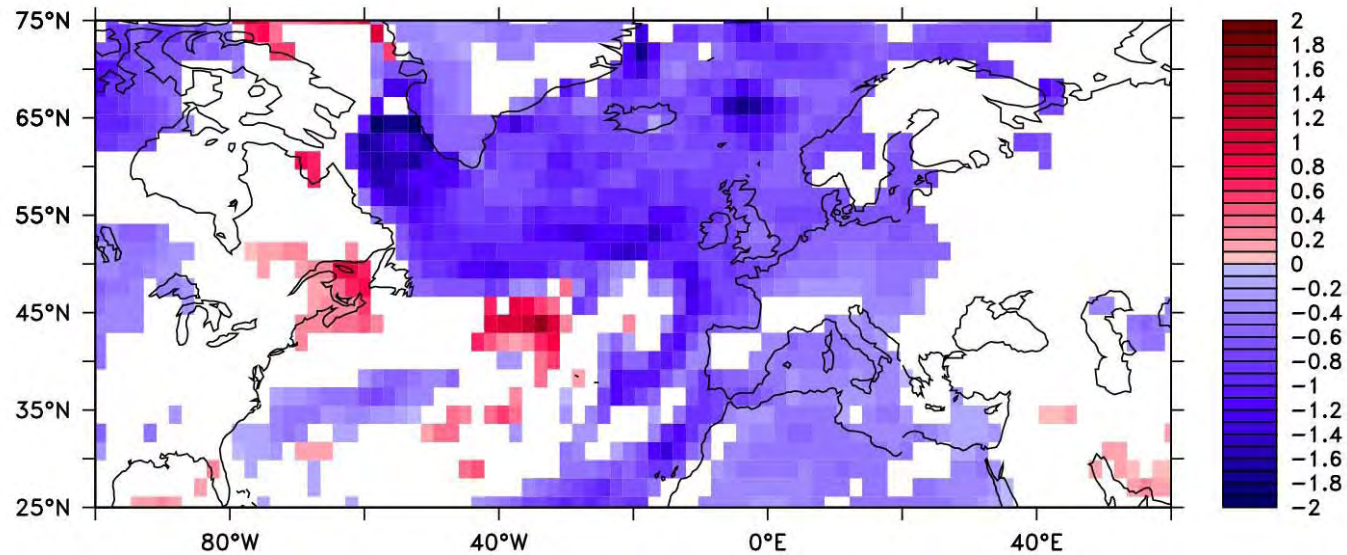




Folgen einer zusätzlichen THZ Verringerung



**A1B: 2120-
2130 mean –
20c mean**

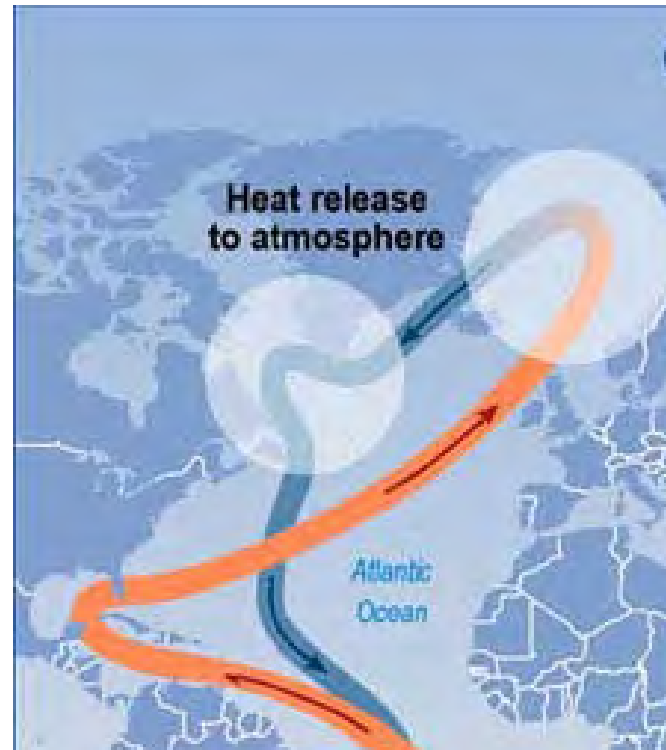


**A1B+009 –
A1B
2120-2130
means**





Tiefenwasserbildungsgebiete

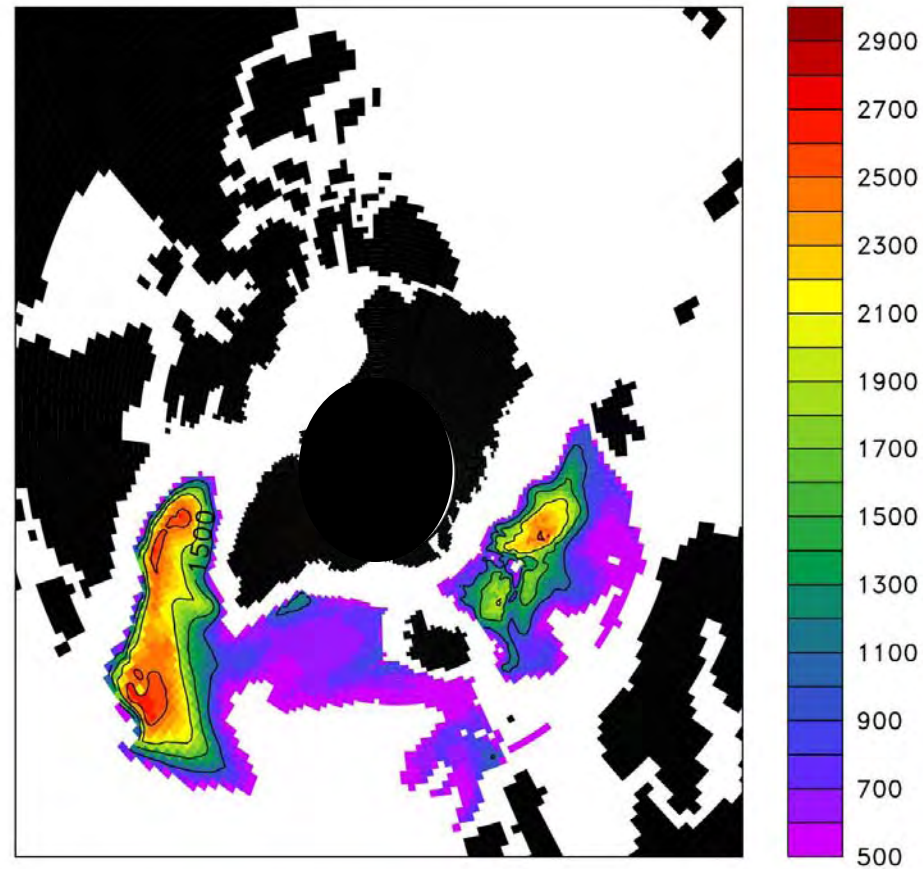


Durch winterliche Konvektion sinkt schweres Wasser ab



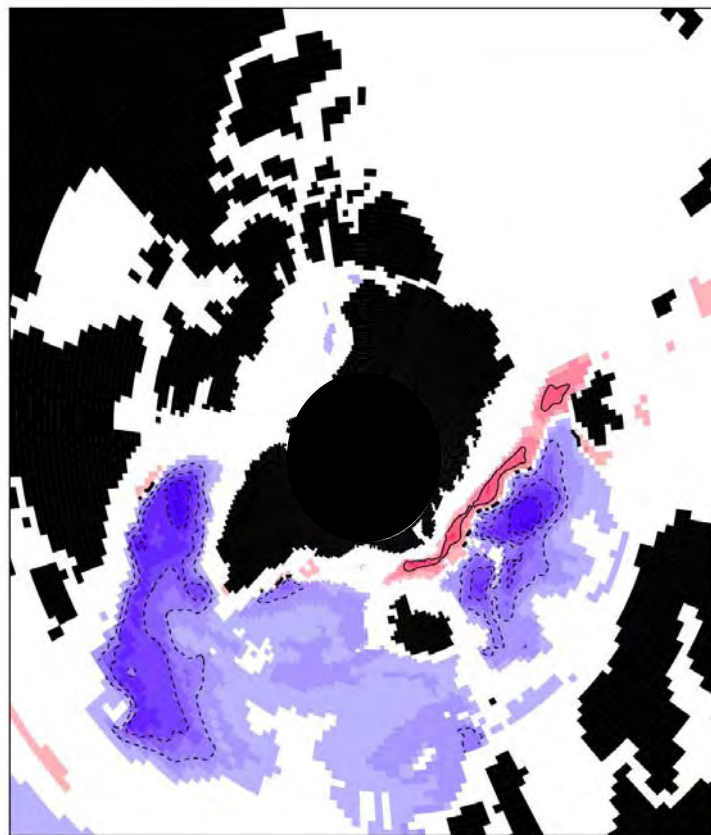


Typische Tiefe der durchmischten Schicht (Simulation des 20. Jh)

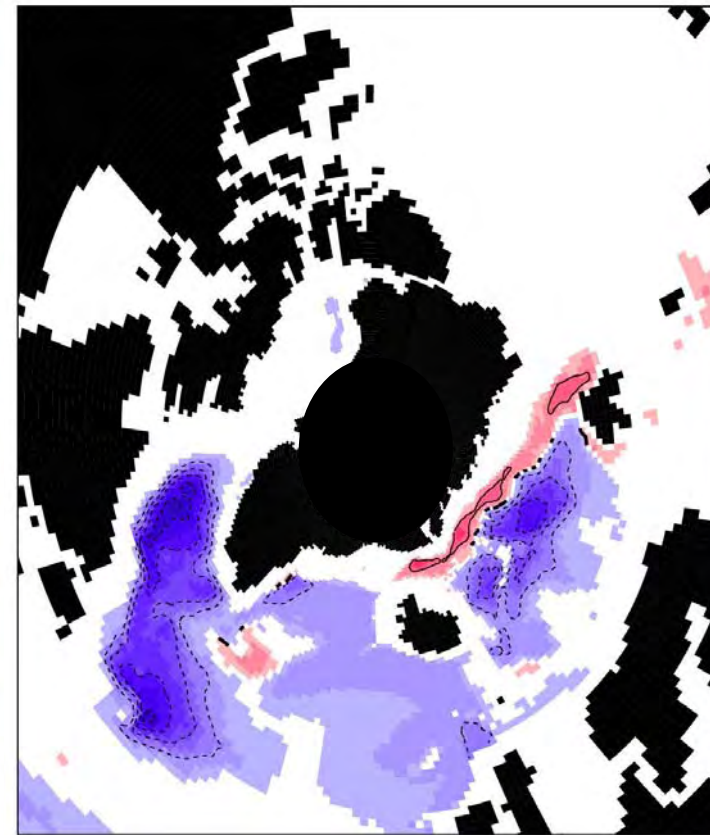




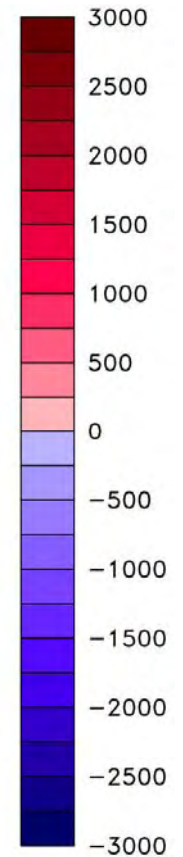
Änderung in der Tiefe der durchmischten Schicht im Klimawandel (Ende 21. Jh. – 20. Jh)



A1B

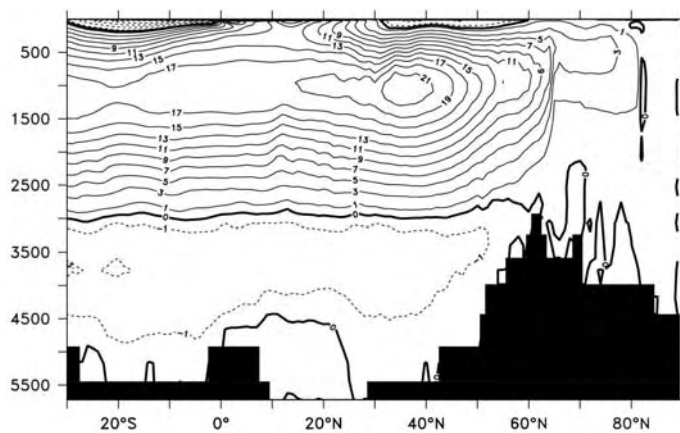


A1B+0.09

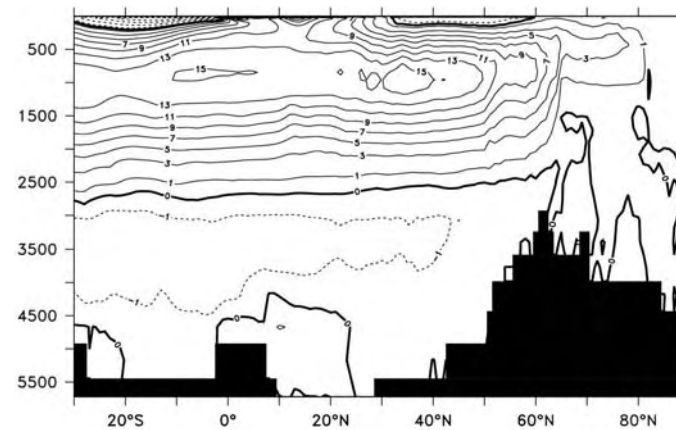




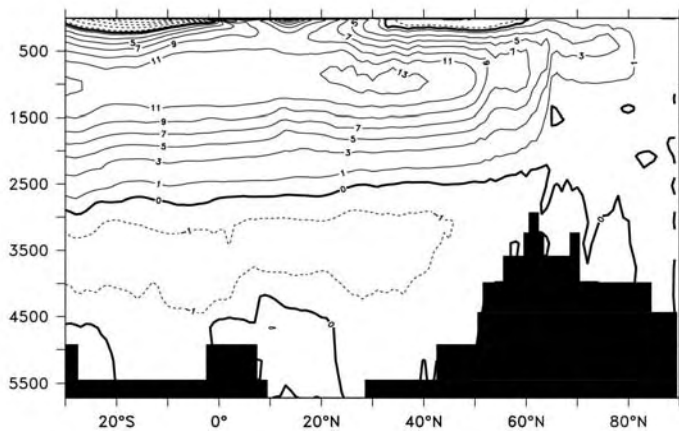
Meridionale Stromfunktion



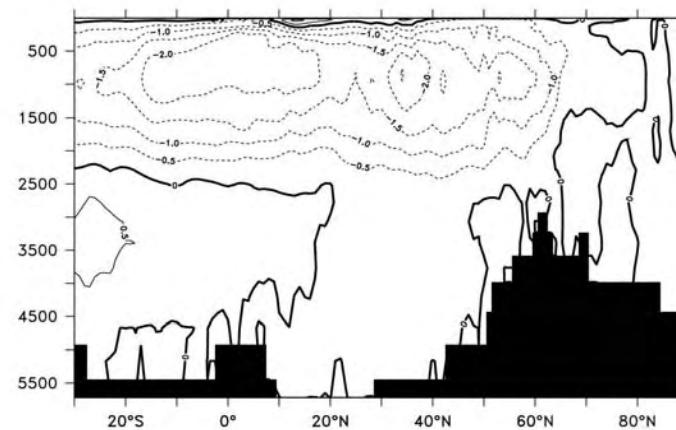
20c mean



A1B@ 2200



A1B+0.09 @
2200



Diff. A1B+0.09 - A1B





Ein Abschmelzen von Grönland führt zu einem erheblichen Eintrag von Süßwasser in den Atlantik

Im MPI Modell führt das zwar zu einer weiteren Abschwächung der THZ; der Effekt ist allerdings selbst bei einem „worst case“ Szenario gering.

Das zusätzliche Süßwasser bewirkt eine weitere Salzgehaltsabnahme in der Irminger- und Labradorsee, wo die Tiefenwasserbildung sowieso schon stark vermindert wird. Konvektion in der Grönlandsee findet weiterhin statt und die „overflows“ bilden weiterhin das Rückgrat der THZ





Wie läßt sich die THZ messen und langfristig monitoren?

Komponenten der THZ, z.B. die Stärke des Golfstroms in der Floridastrasse oder der tiefe restliche Randstrom lassen sich direkt mit Strömungsmessern beobachten.

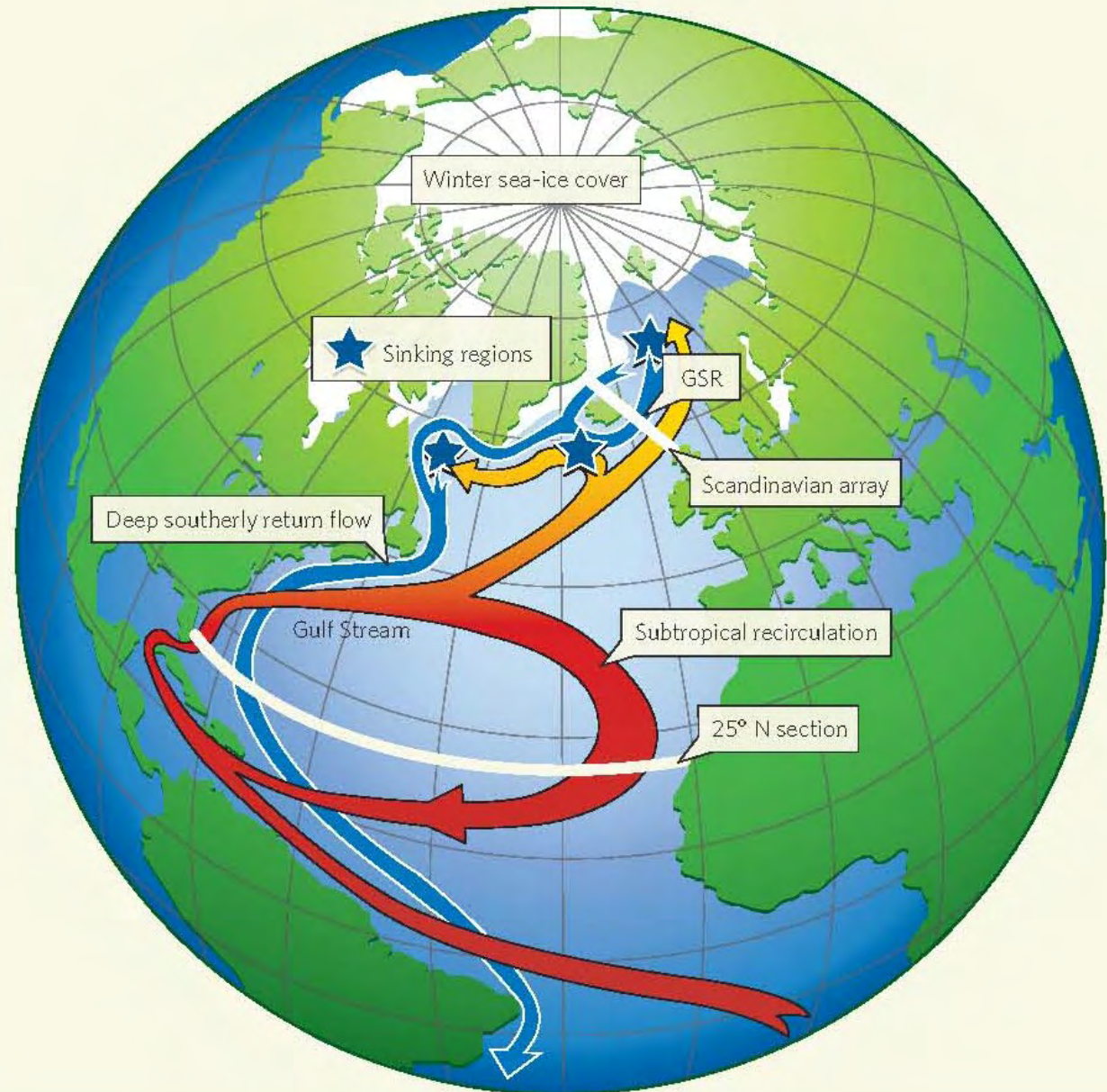
Die gesamte THZ allerdings nur indirekt aus der Massen- und Druckverteilung. Dazu muss man auf einem Schnitt quer über den Atlantik Temperatur und Salzgehalt messen und den Wind darüber kennen.





Nord- atlantische Zirkulation

Quadfasel
(2005)





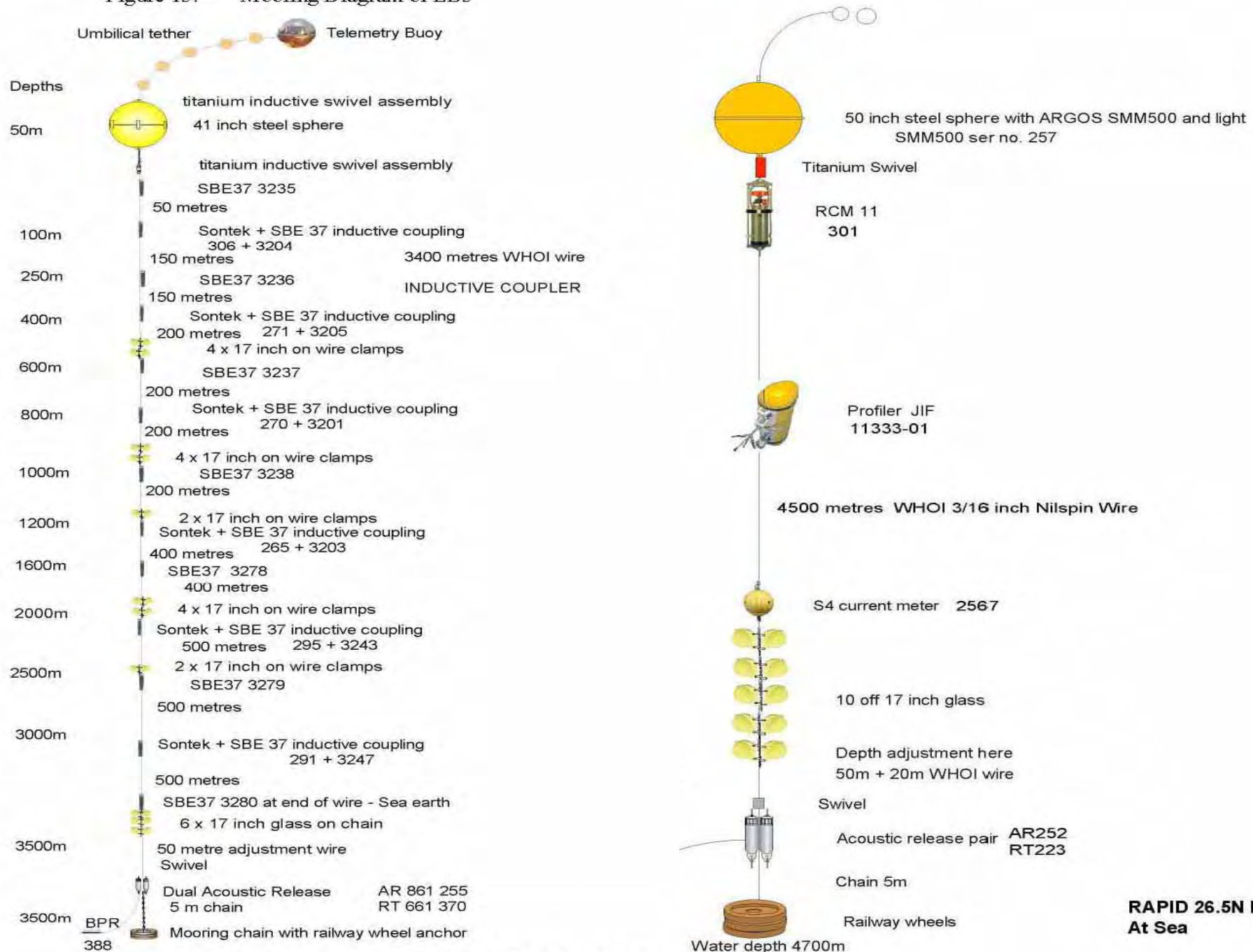
Sense of urgency: scientists on the *Discovery* deploy moorings that carry sensors to the ocean floor.

Gulf Stream probed for early warnings of system failure

Schiermeier (Nature,
26. Februar 2004)



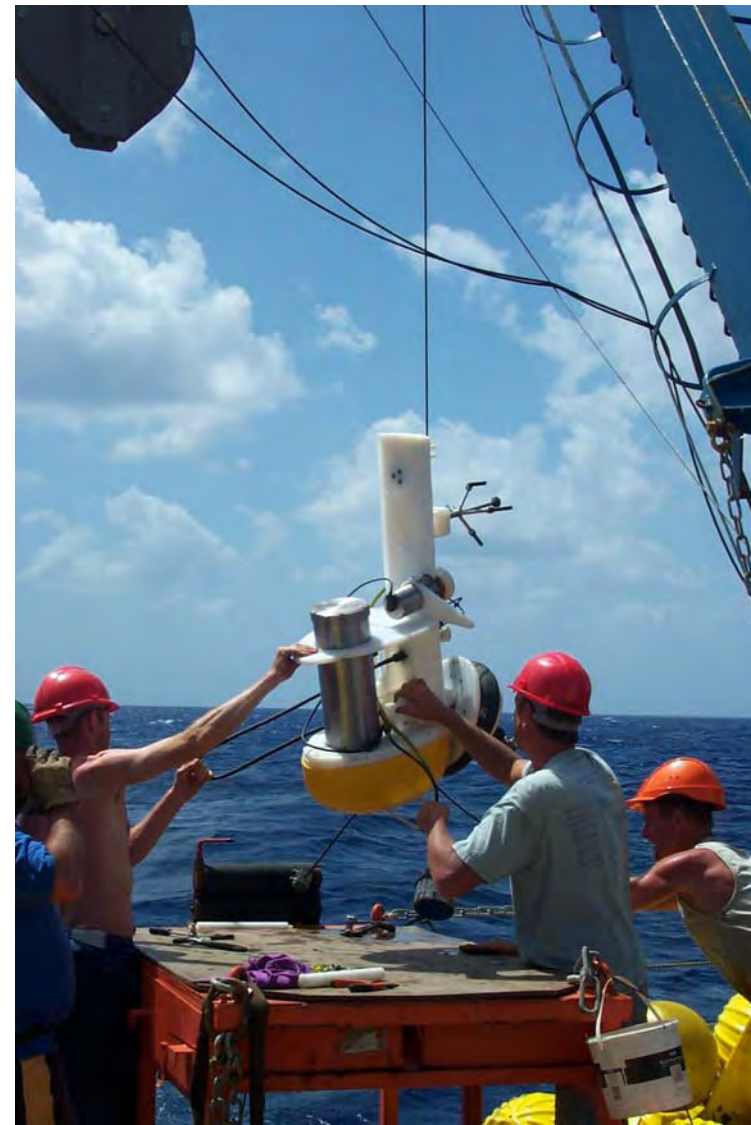
Figure 13: Mooring Diagram of EB3



RAPID 26.5N EB3 - At Sea

RAPID 26.5N MAR4
At Sea

Messung der Atlantischen Zirkulation bei 26°N

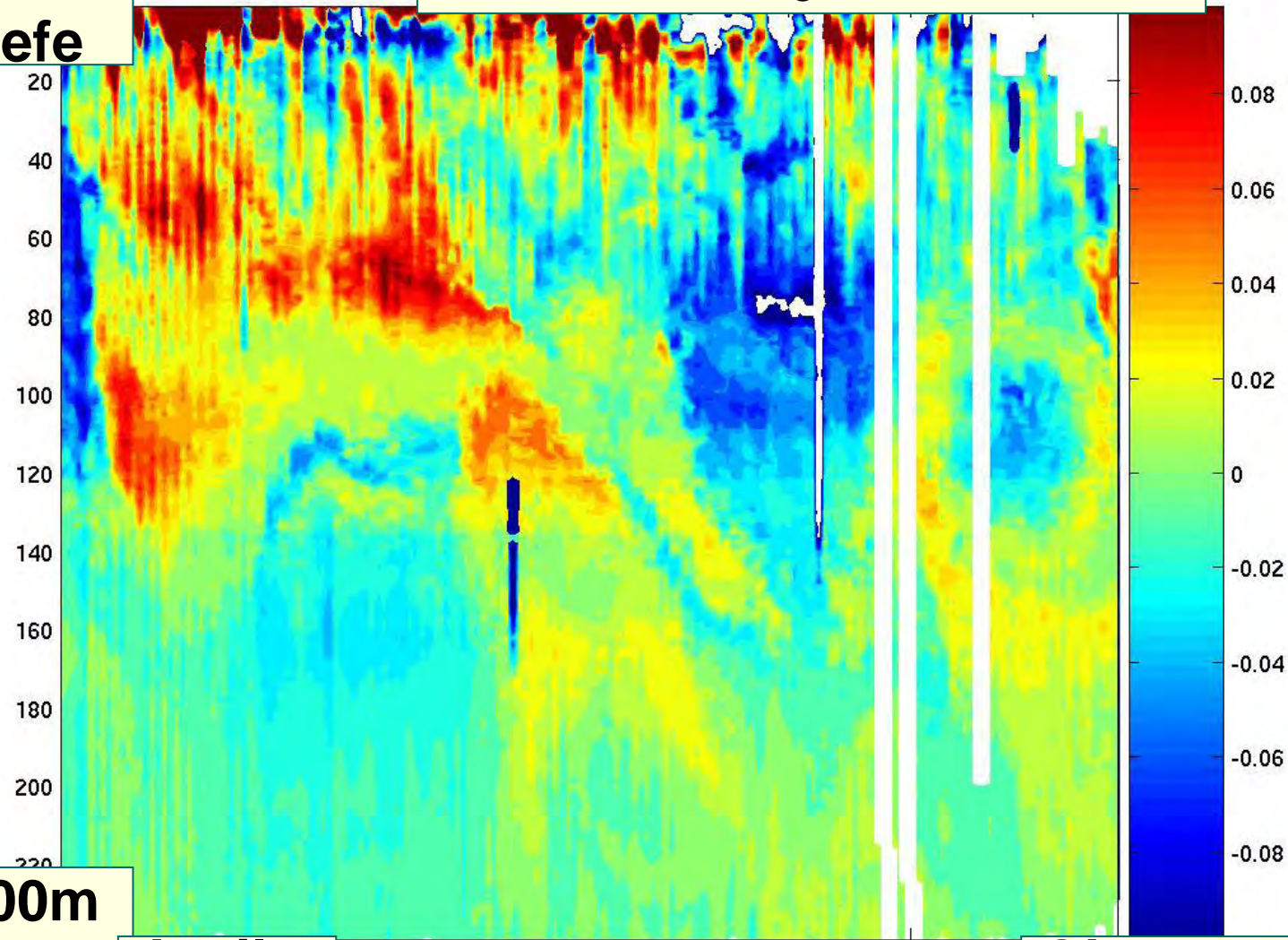


Messung der Atlantischen Zirkulation bei 26°N



100m
Tiefe

Anomalie des Salzgehalts



2500m
Tiefe

April
2005

Okt.
2005

Ein
Ein

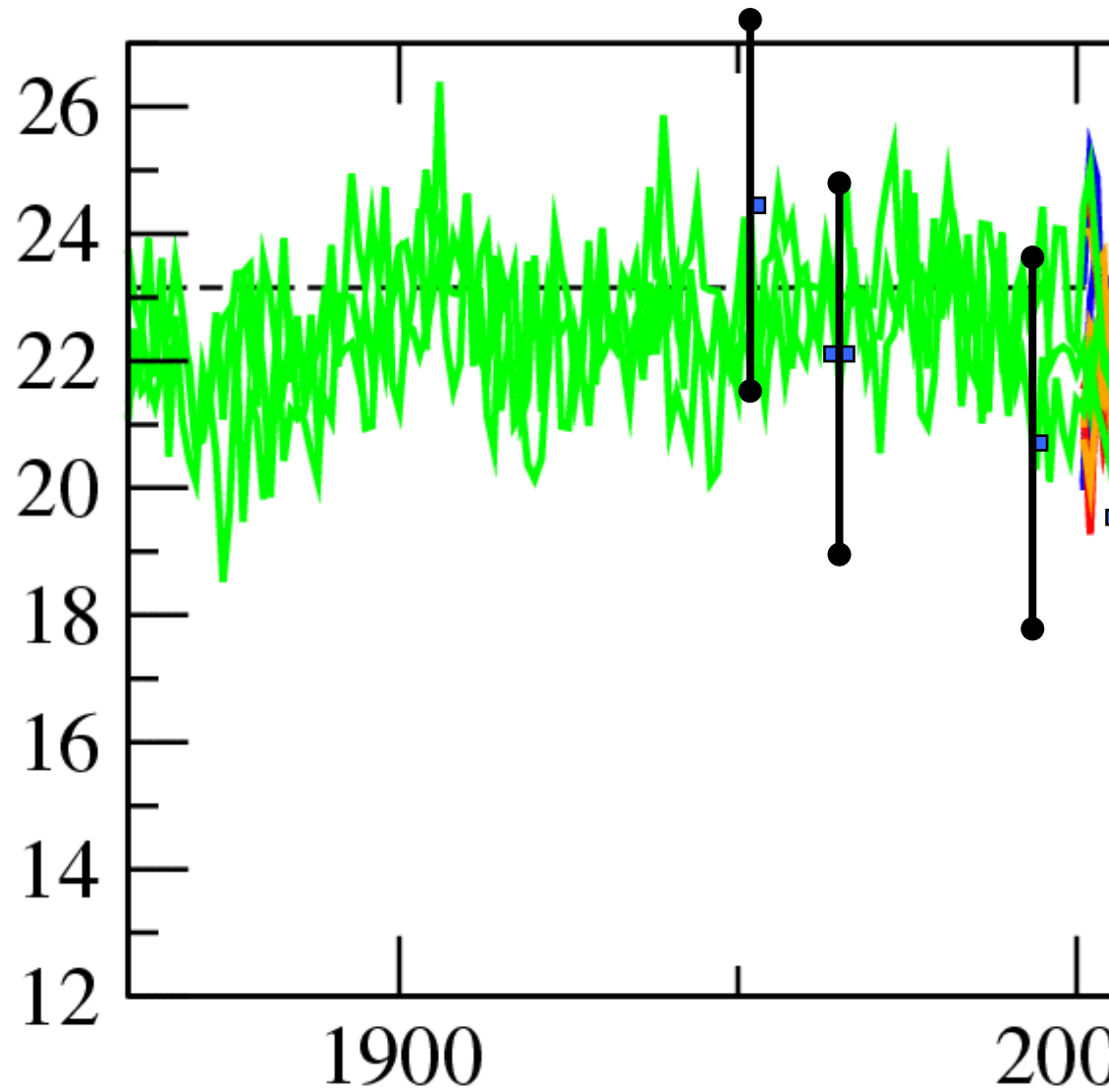


„Failing ocean current raises fears of mini ice age“ (The New Scientist, Nov. 05)

- ◆ Im November 2005 machten Meldungen, basierend auf einem Nature Artikel von Bryden et al. Schlagzeilen
- ◆ Das Team aus Southampton hatte historische Daten von 5 Schiffsexpeditionen von 1957 bis 2004 bei 25N ausgewertet und fanden eine etwa 30%-tige Verringerung der tiefen, südwärtsströmenden THZ Komponente.
- ◆ Neben methodischen Problemen bleibt die Möglichkeit bestehen, dass hier hauptsächlich natürliche Variabilität, nicht aber ein (durch anthropogene Klimaänderung hervorgerufener) Trend beschrieben wird

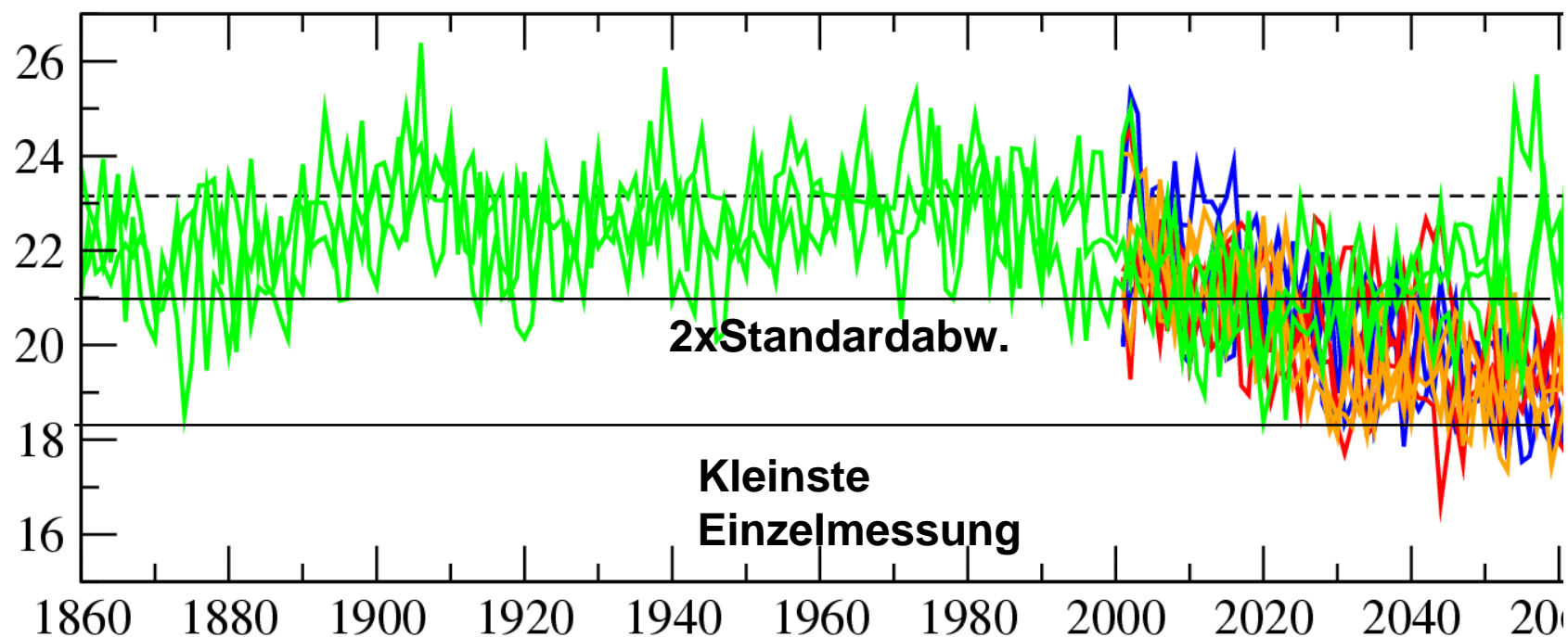


Vergleich Messung/Modell





Die THZ in den IPCC Szenarien des MPI-M bis 2100



Atlantic MOC

[Sv, 1Sv=10⁶m³s⁻¹]





Zusammenfassung

- ◆ **Der mit der THZ verbundene Wärmetransport beeinflusst entscheidend das Europäische Klima**
- ◆ **Eine Schwächung oder ein Abbruch der THZ würde gravierende Folgen für das nordatlantische Klima haben und solche Ereignisse sind in der Erdgeschichte vorgekommen**
- ◆ **Nach Auswertung der neuesten Klimamodellrechnungen scheint die THZ allerdings relativ stabil zu sein; eine Abschwächung im Zuge der globalen Erwärmung würde in einem Teil Westeuropas gerade die Erwärmung ausgleichen**
- ◆ **Dies gilt auch unter Einbeziehung des Abschmelzens des grönländischen Eisschildes**
- ◆ **Kontinuierliche Beobachtung der THZ über einen langen Zeitraum ist notwendig, um langfristige Trends von natürlicher Variabilität zu trennen.**





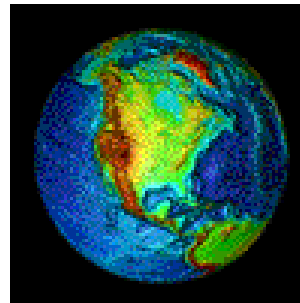
Offene Fragen

- ◆ **Was unterscheidet das heutige Klima vom Vor-Holozaen, in dem die THZ wesentlich instabiler war?**
- ◆ **Was sind die Ursachen der beobachteten Variabilität auf Zeitskalen von Jahren und Jahrzehnten? Sind diese selbst im Klimawandel einer Veränderung unterworfen?**
- ◆ **Wie zuverlässig sind die Modelle?**
- ◆ **Wie kann man die umfangreichen (und teuren) Messprogramme über Jahrzehnte aufrechterhalten oder durch neue (autonome) Messmethoden ersetzen?**





Vielen Dank....



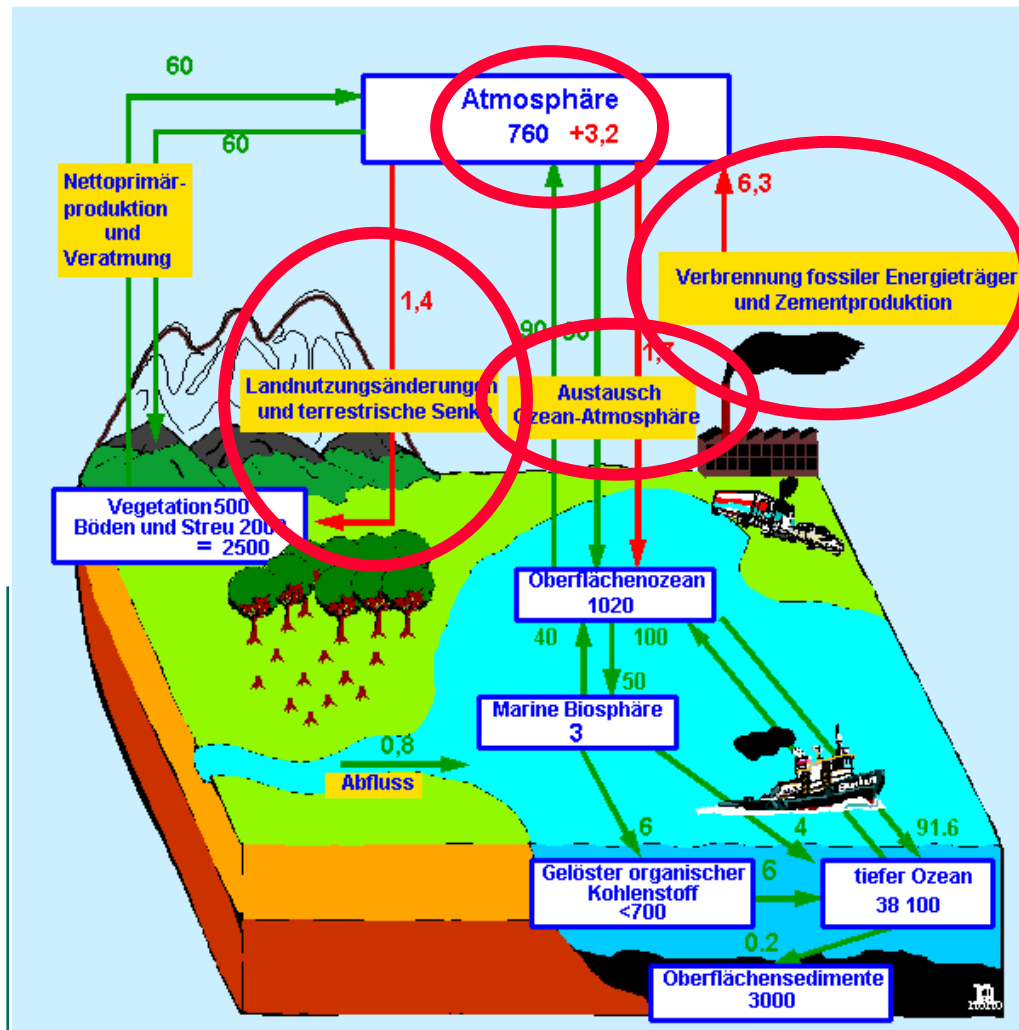




...der Klimabösewicht...



Der Kohlenstoffkreislauf

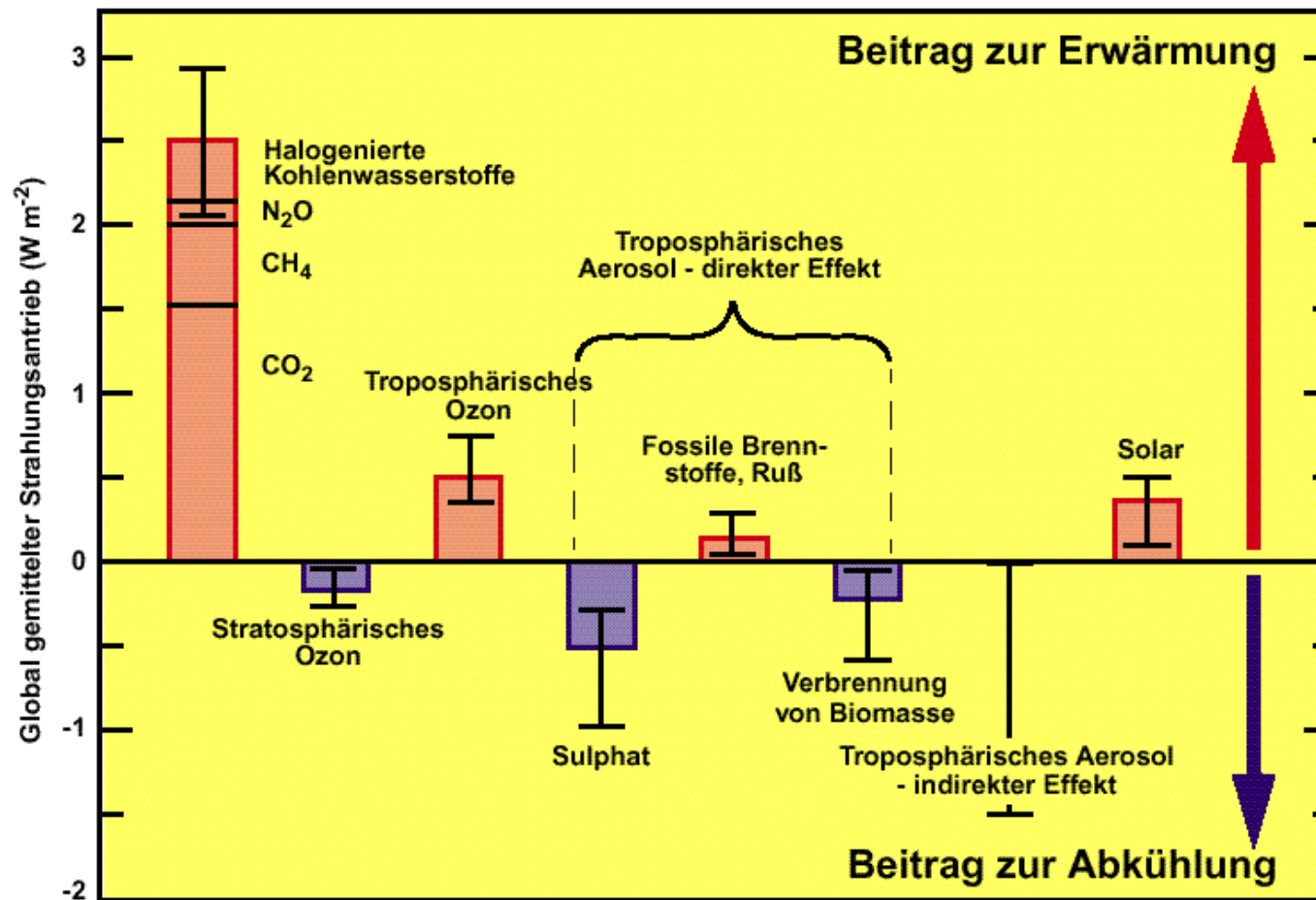


Von den jährlich ca. 6 GT Kohlenstoff aus Verbrennung und Industrie verbleibt ca. die Hälfte in der Atmosphäre, der Ozean nimmt ca. 30% auf:

Der Ozean spielt damit eine bedeutende Rolle als Puffer und Speichermedium



Beiträge einzelner Komponenten zum anthropogenen Treibhauseffekt





...ist nicht allein...

Treibhaus-Sünder

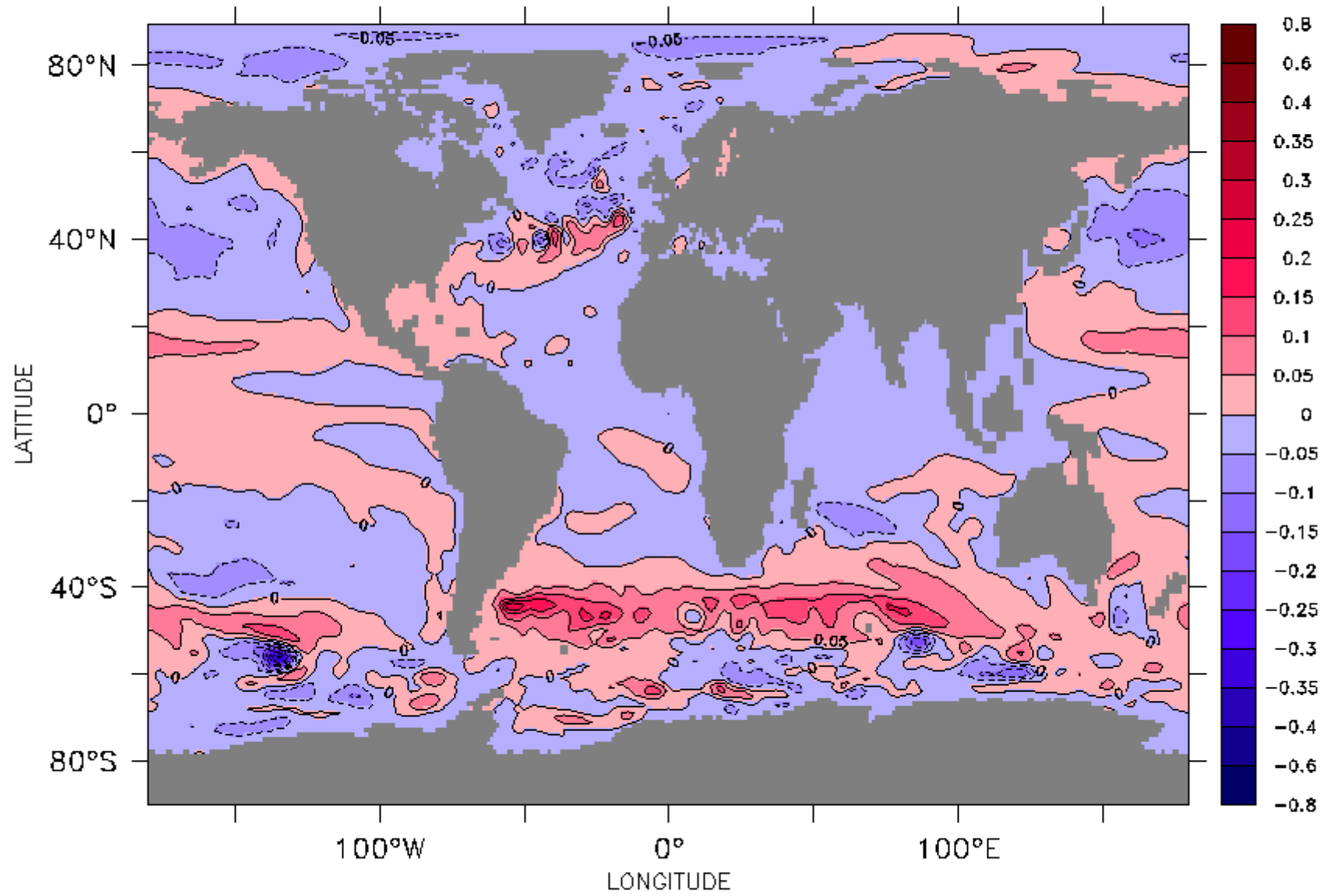
Energiebedingte CO₂-Emissionen
2002 in Mio. Tonnen
(ausgewählte Länder)



Quelle: DWI, UN

epi-Graphik



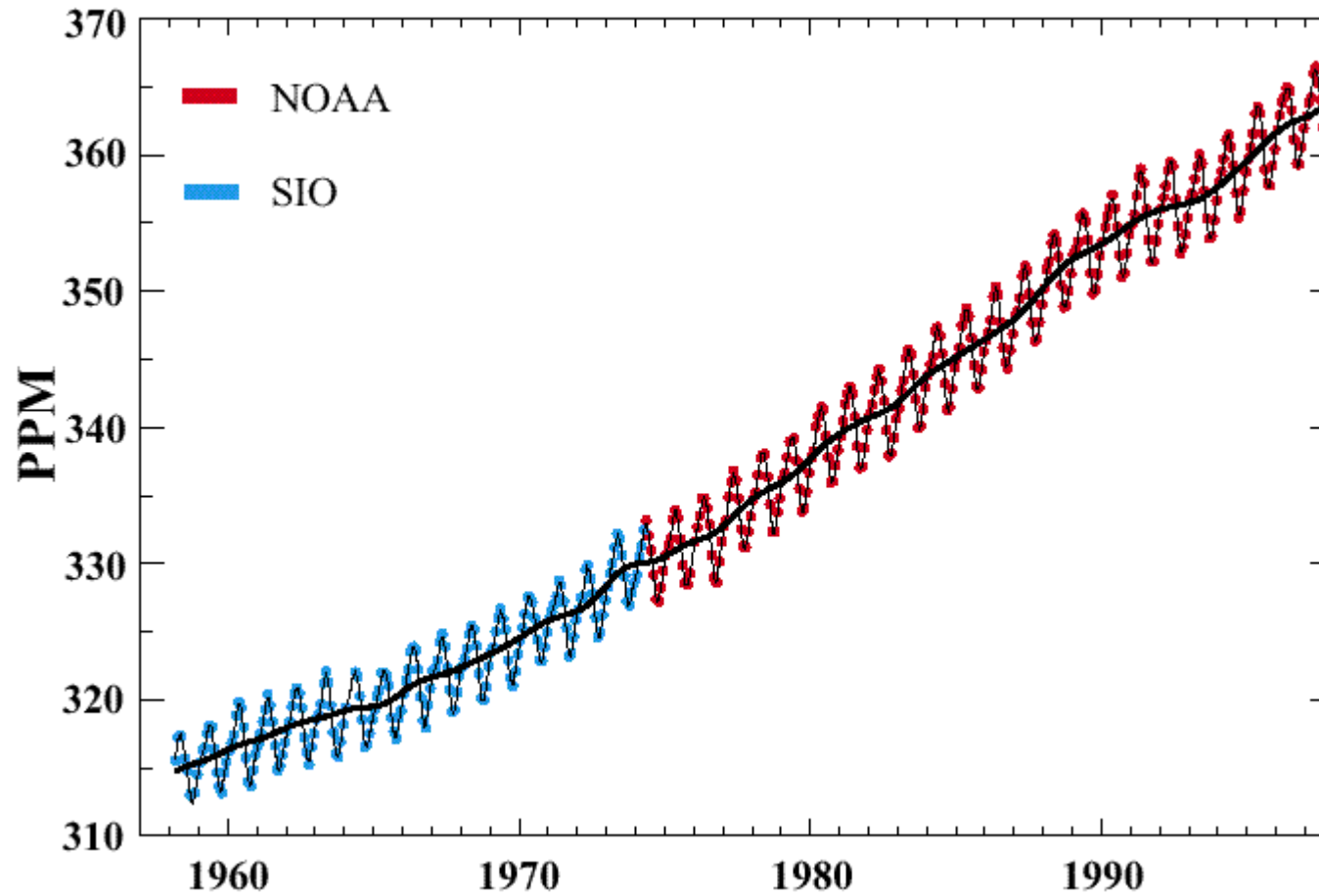


Ein
Ein

2003

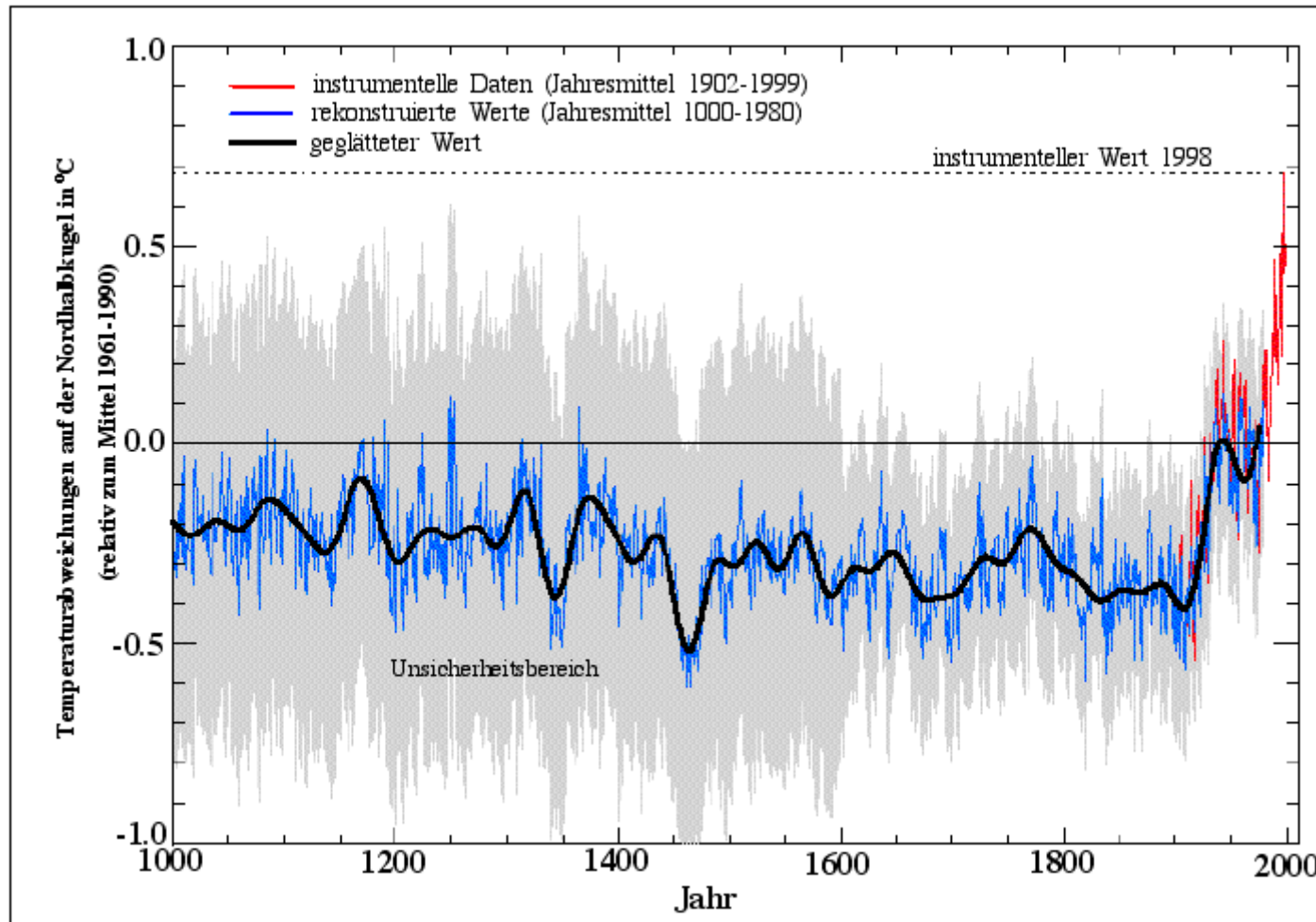


Kohlendioxid (CO₂) (Hawaii)



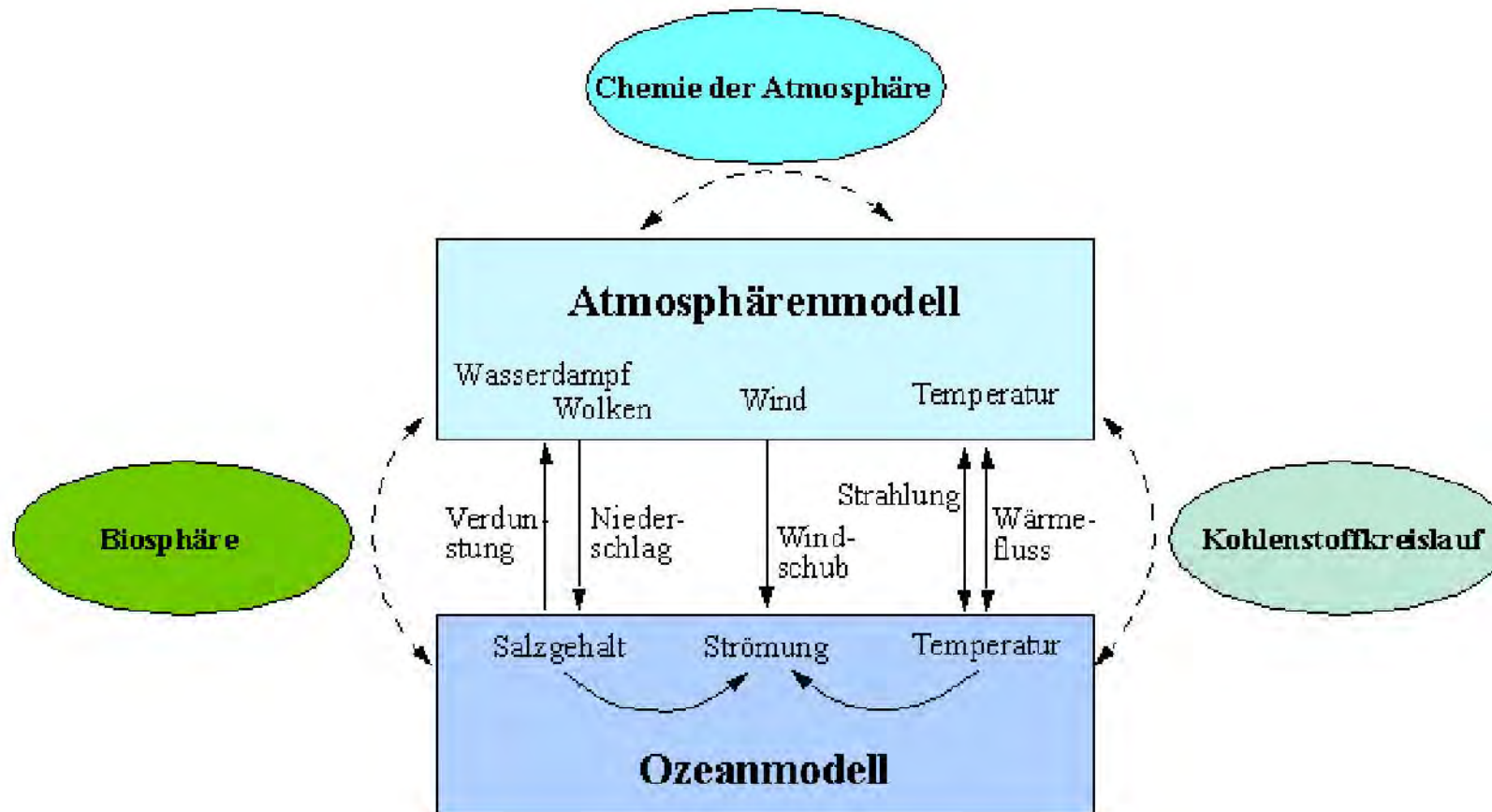


Temperaturveränderung der letzten 1000 Jahre





Das Klimamodell

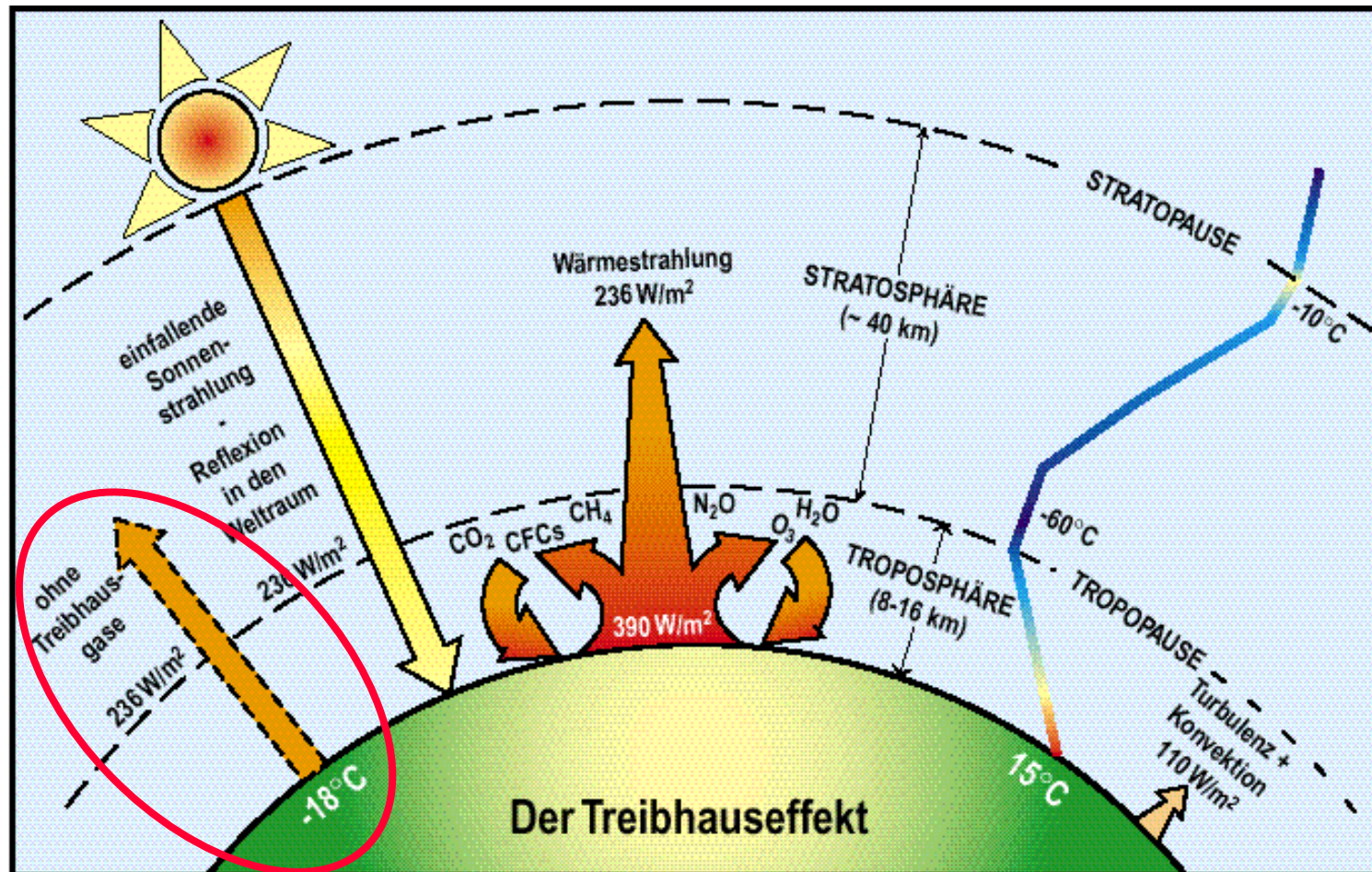


Die Gleichungen werden auf ein Gitter abgebildet und mit Hilfe eines Hochleistungsrechners gelöst.



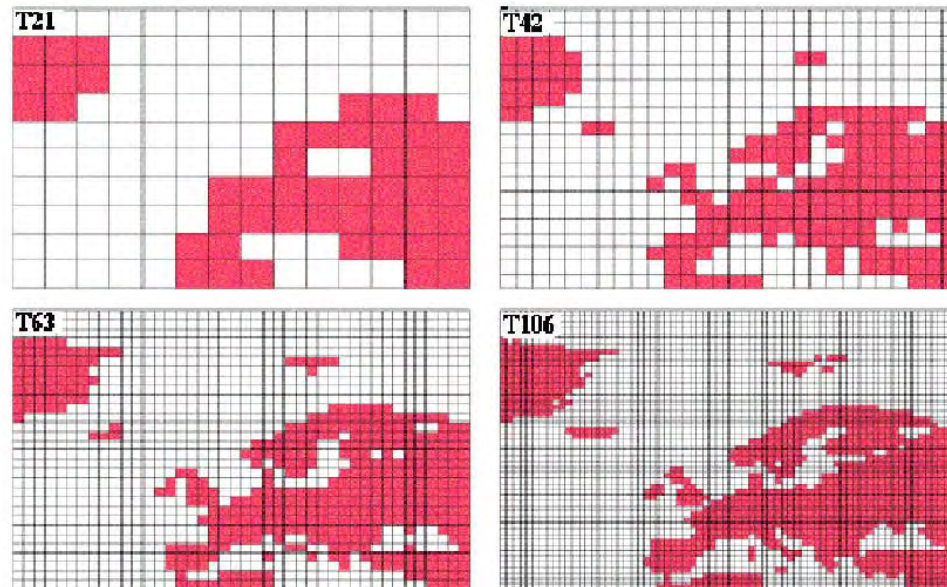


Der Strahlungshaushalt der Atmosphäre und der natürliche Treibhauseffekt





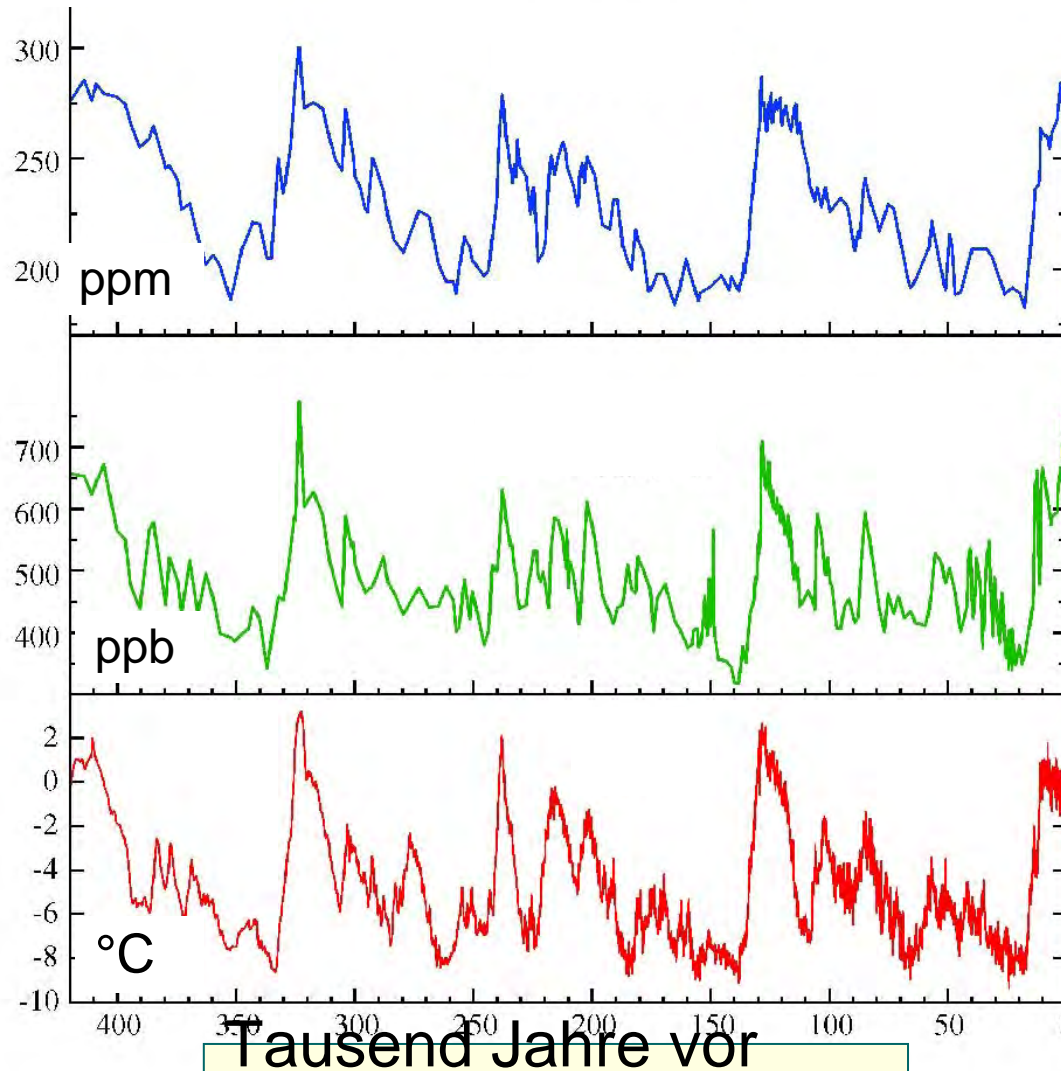
Beispiel für unterschiedlicher Auflösung von Klimamodellen



Europa



„Aufzeichnungen“ aus antarktischen Eisbohrkernen



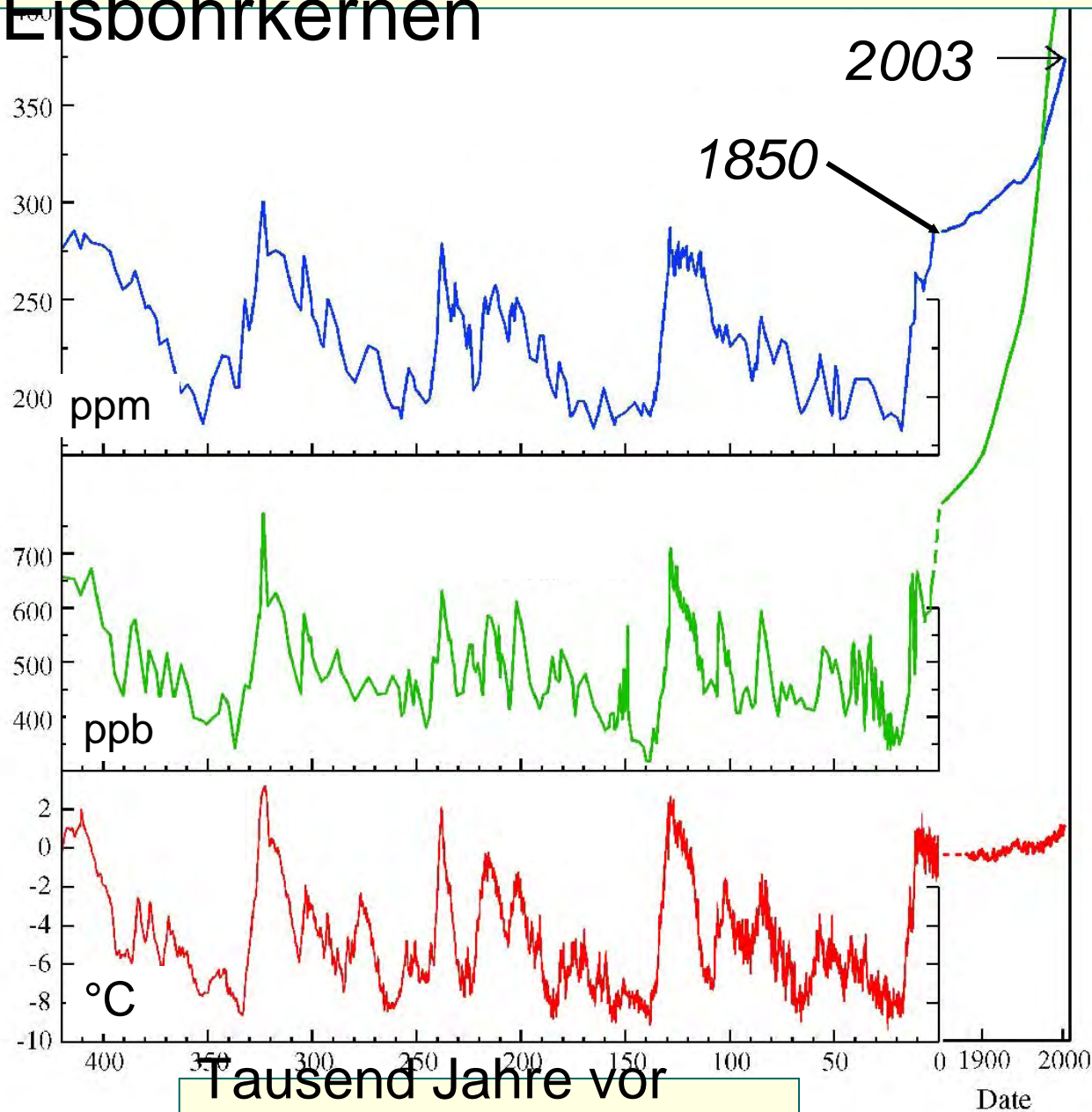
Konzentration
von
Kohlendioxid in
der Atmosphäre

Konzentration
von Methan in
der Atmosphäre

Bodennahe
Lufttemperatur,
Antarktis

Hansen (2005)
Petit et al. (1999)

„Aufzeichnungen“ aus antarktischen Eisbohrkernen



Konzentration
von
Kohlendioxid in
der Atmosphäre

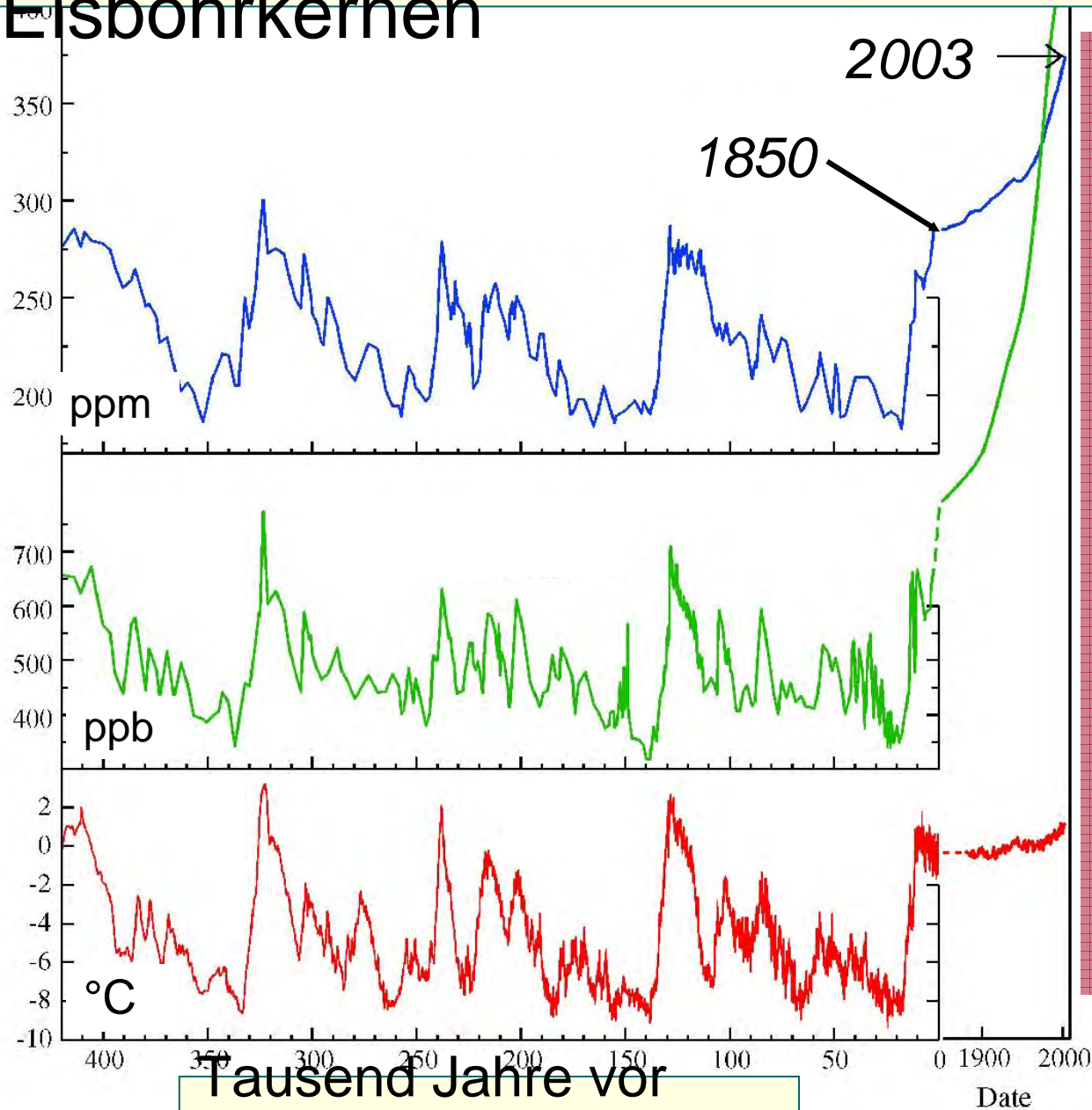
Konzentration
von Methan in
der Atmosphäre

Bodennahe
Lufttemperatur,
Antarktis

Hansen (2005)
Petit et al. (1999)

„Aufzeichnungen“ aus antarktischen

Eisbohrkernen



Der Mensch hat in den letzten 150 Jahren die Konzentration von Treibhausgasen stärker verändert als natürliche Schwankungen während der gesamten Eiszeit!

Wie wird das System reagieren???

Hansen (2005)
Petit et al. (1999)

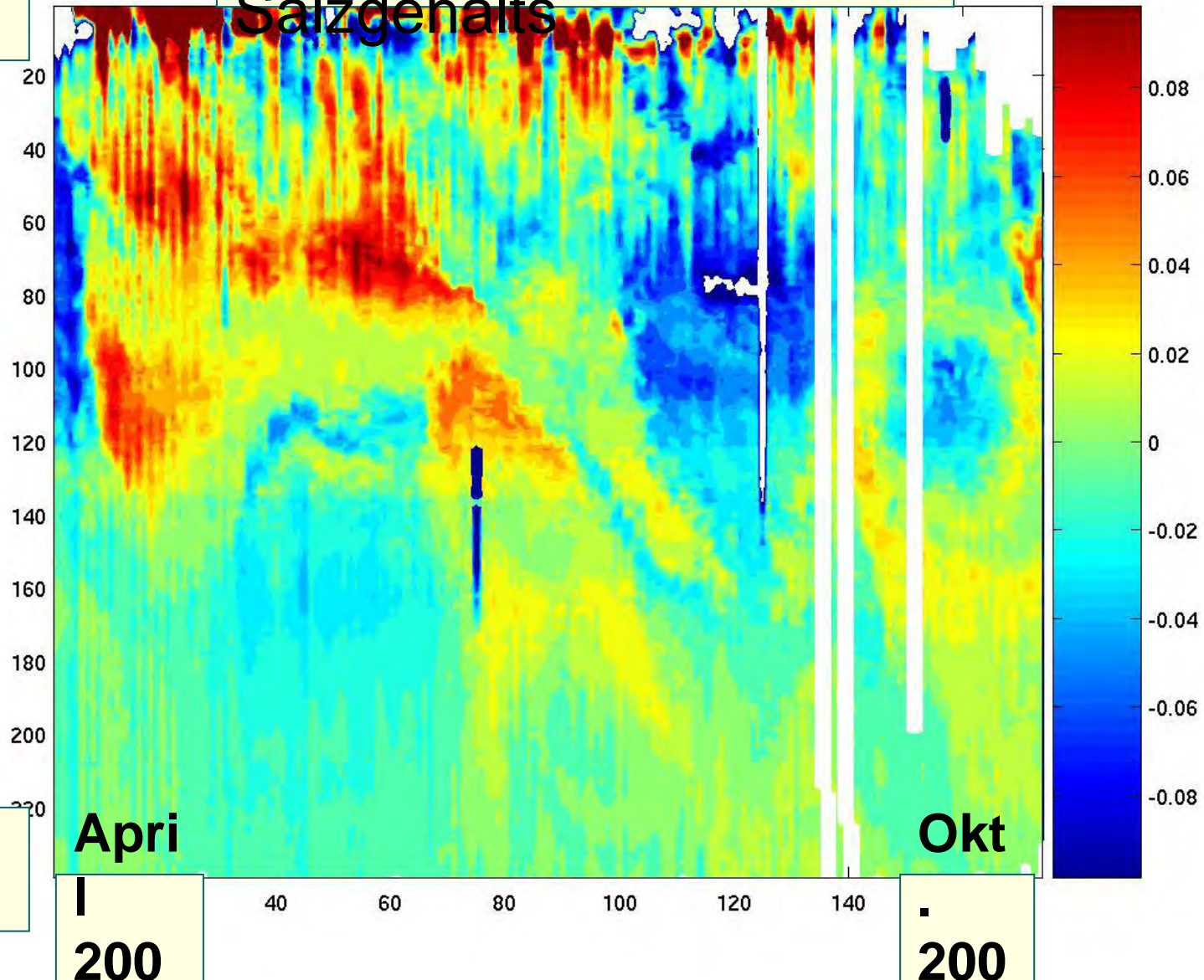
Messung der Atlantischen Zirkulation bei

26°N 100

(Maro
Barin
Tief

e

Anomalie des Salzgehalts



2500
m
Tiefe

200

200

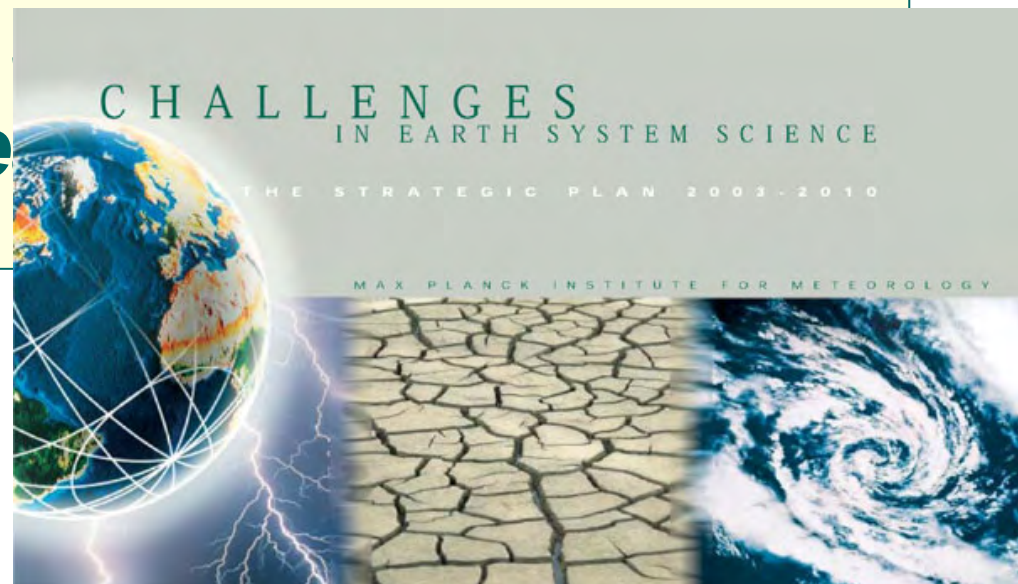




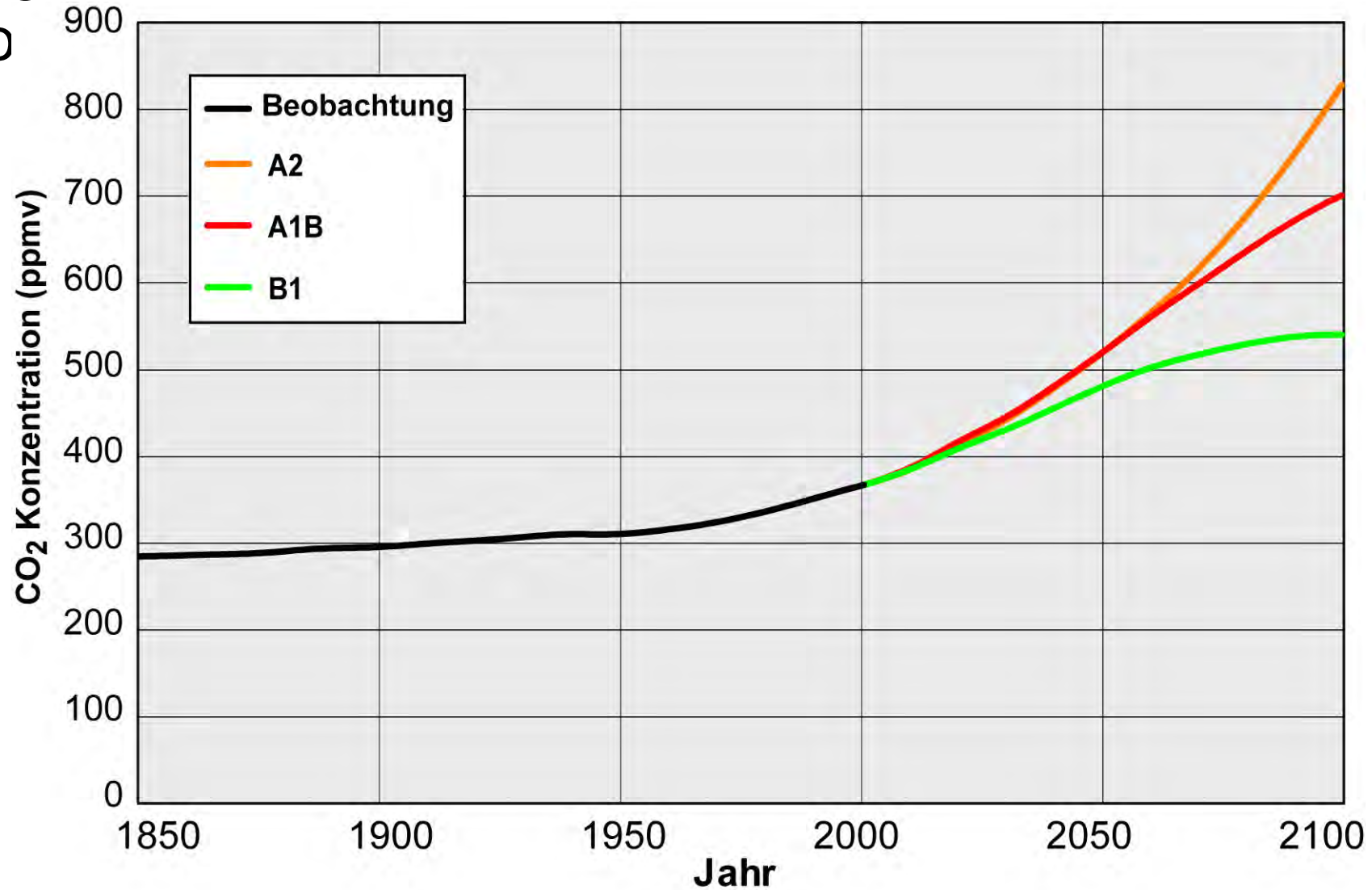
*„Viele Wissenschaftler
verdanken ihre Größe nicht ihrer
Fähigkeit, Probleme zu lösen,
sondern ihrer
Weisheit, sie auszuwählen.“*

*(E. Bright Wilson
to Scientific Research
N.Y., 1952).*

(Motto des Strategie-
plans MPI-M)



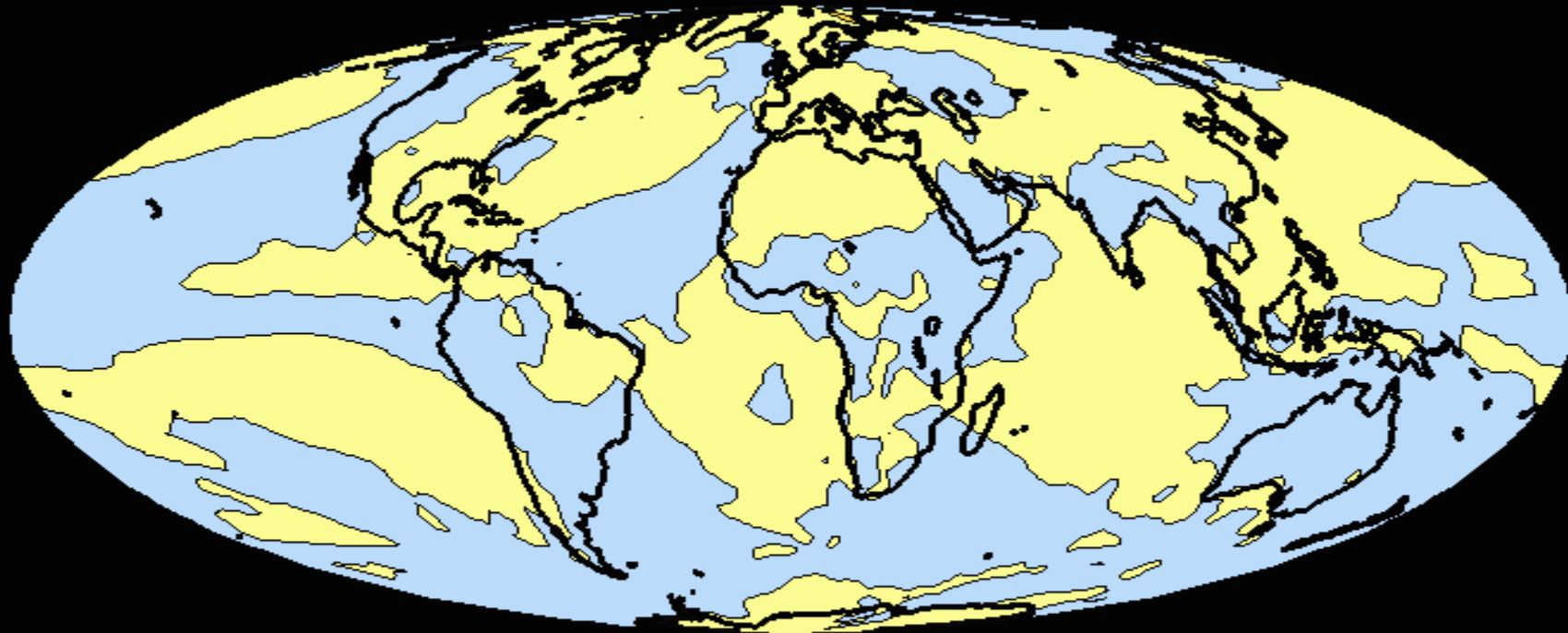
Gemessene (schwarz) und angenommene Konzentration von CO_2



Simulation der Lufttemperatur nahe der



SRES A1B -- 5ym Temp Change [Deg C] 1980



© MPIMet/DKRZ/MaD





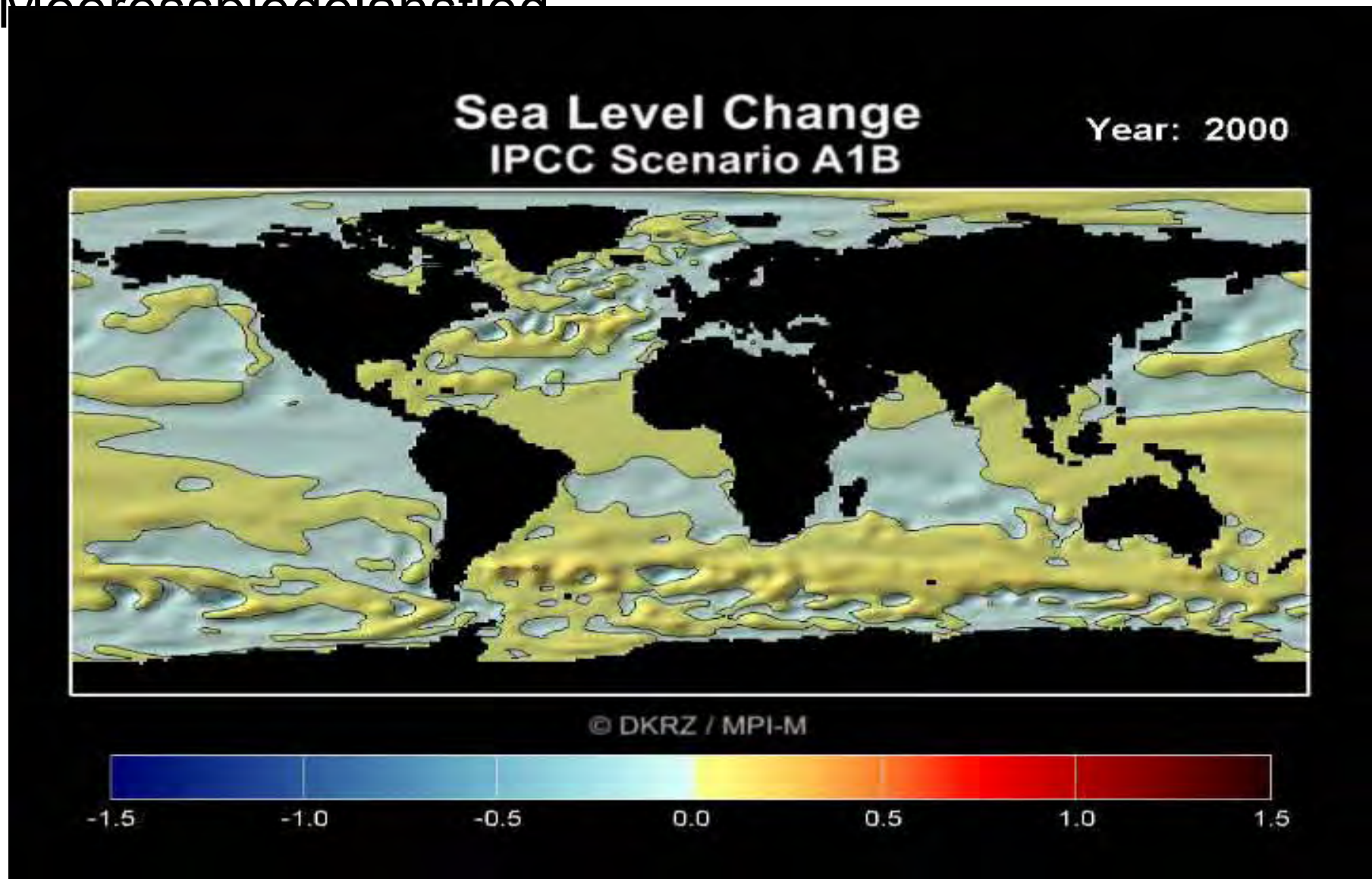
Simulation der Meereis- und

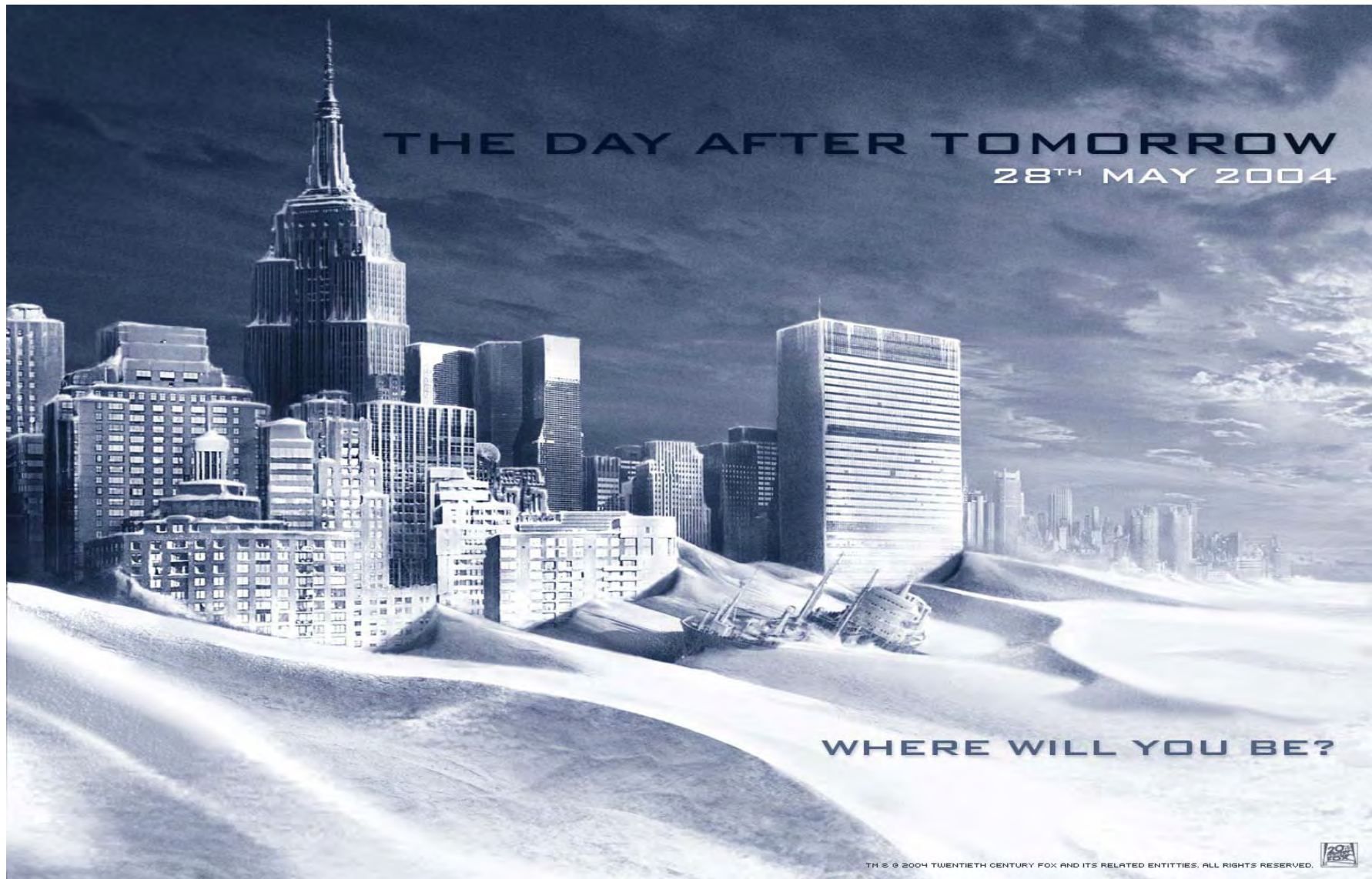


**SRES Scenario A1B
Sea Ice Coverage > 15%
Snow Depth > 1cm
in September
(5 year running ensemble mean)**

Simulierter

Meeresspiegelanstieg





Eiszeit oder Treibhaus?



Beginn der Beobachtungen im Februar 2004



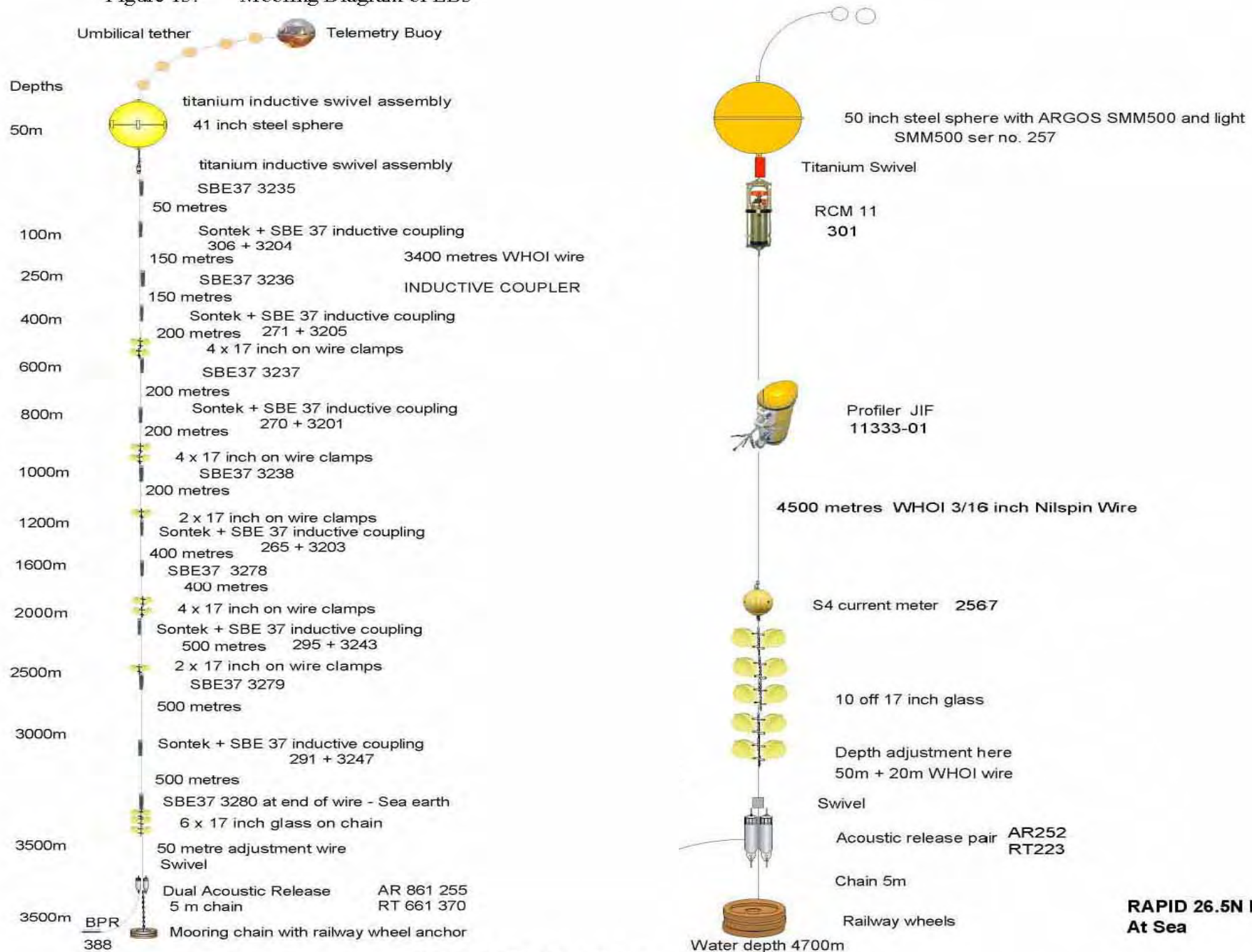
Sense of urgency: scientists on the *Discovery* deploy moorings that carry sensors to the ocean floor.

Gulf Stream probed for early warnings of system failure

Schiermeier (Nature,
26. Februar 2004)



Figure 13: Mooring Diagram of EB3



RAPID 26.5N EB3 - At Sea

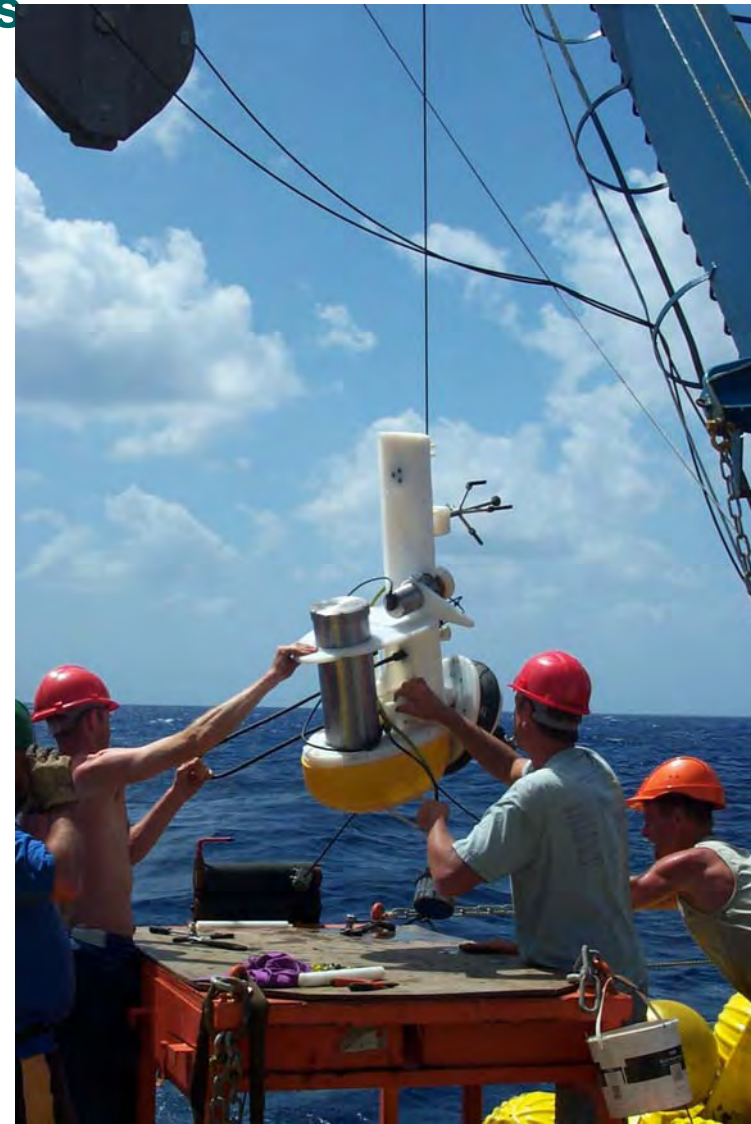
RAPID 26.5N MAR4
At Sea

Messung der Atlantischen Zirkulation bei 26°N

Max-Planck-Institut für Meteorologie
Max Planck Institute for Meteorology



(Marcelo Gouveia, Braden Johns,
Barin)



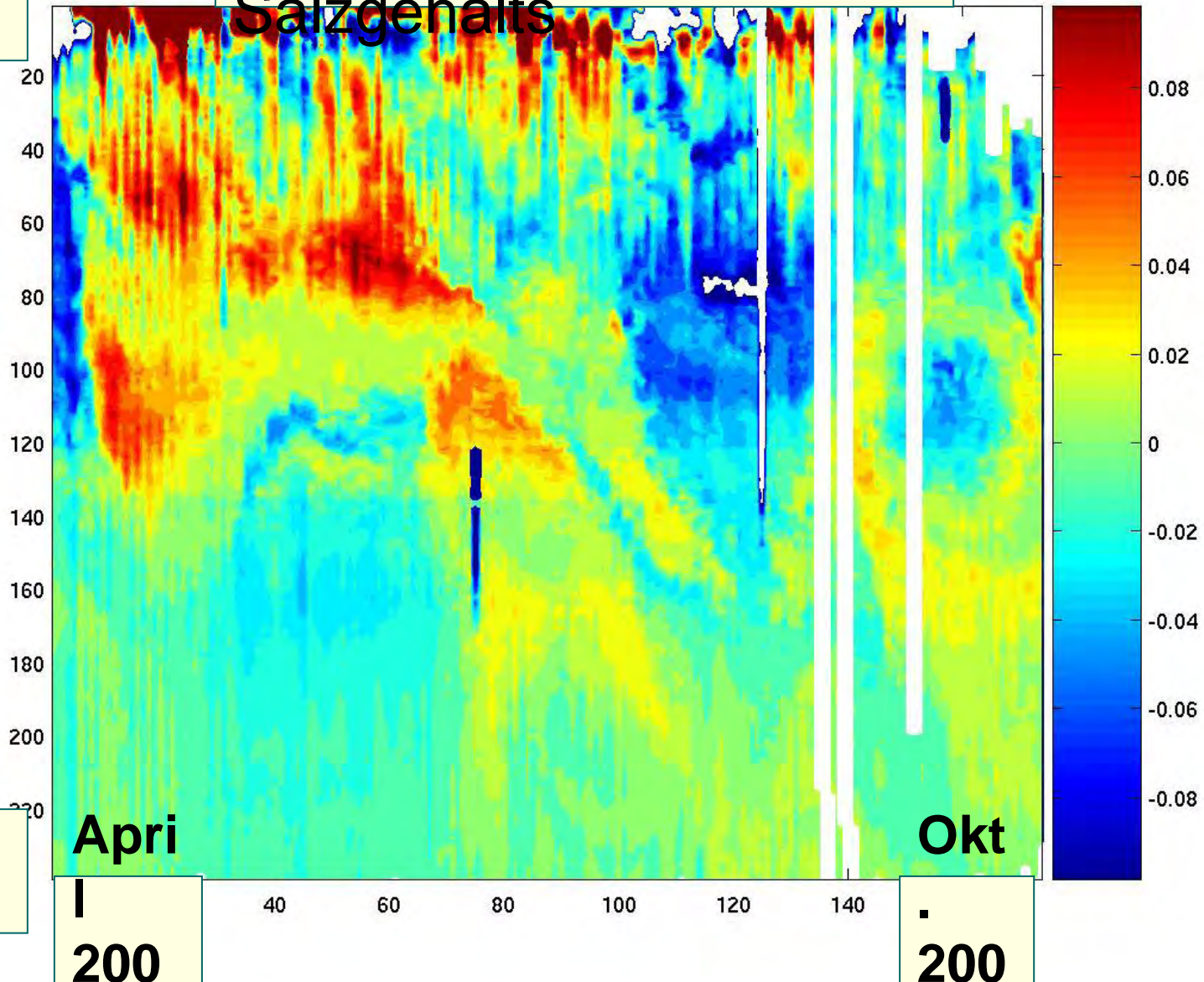
Messung der Atlantischen Zirkulation bei

26°N 100

(Maro
Barin
m
Tief

e

Anomalie des Salzgehalts

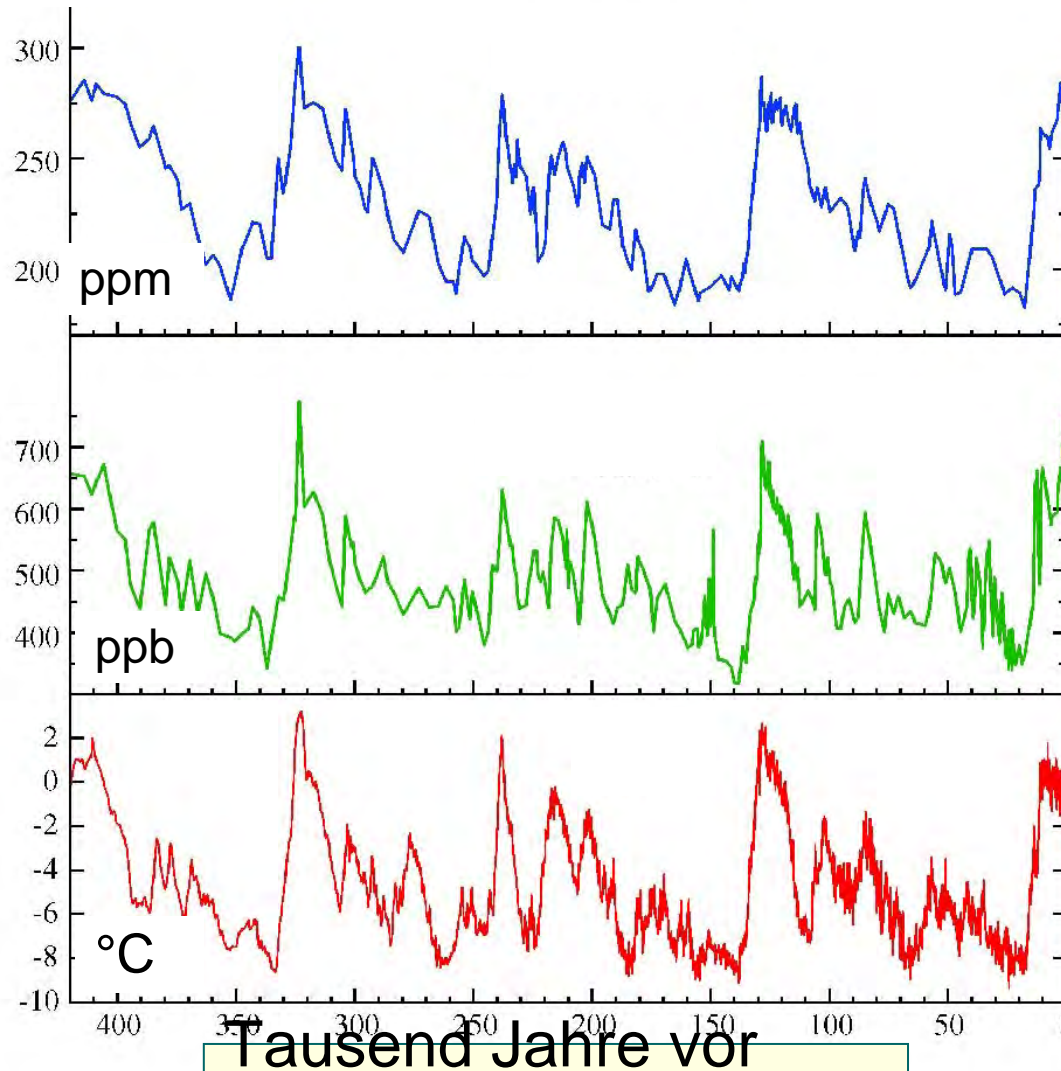


2500
m
Tiefe

Ein Inst.
Ein Instit



„Aufzeichnungen“ aus antarktischen Eisbohrkernen



Konzentration
von
Kohlendioxid in
der Atmosphäre

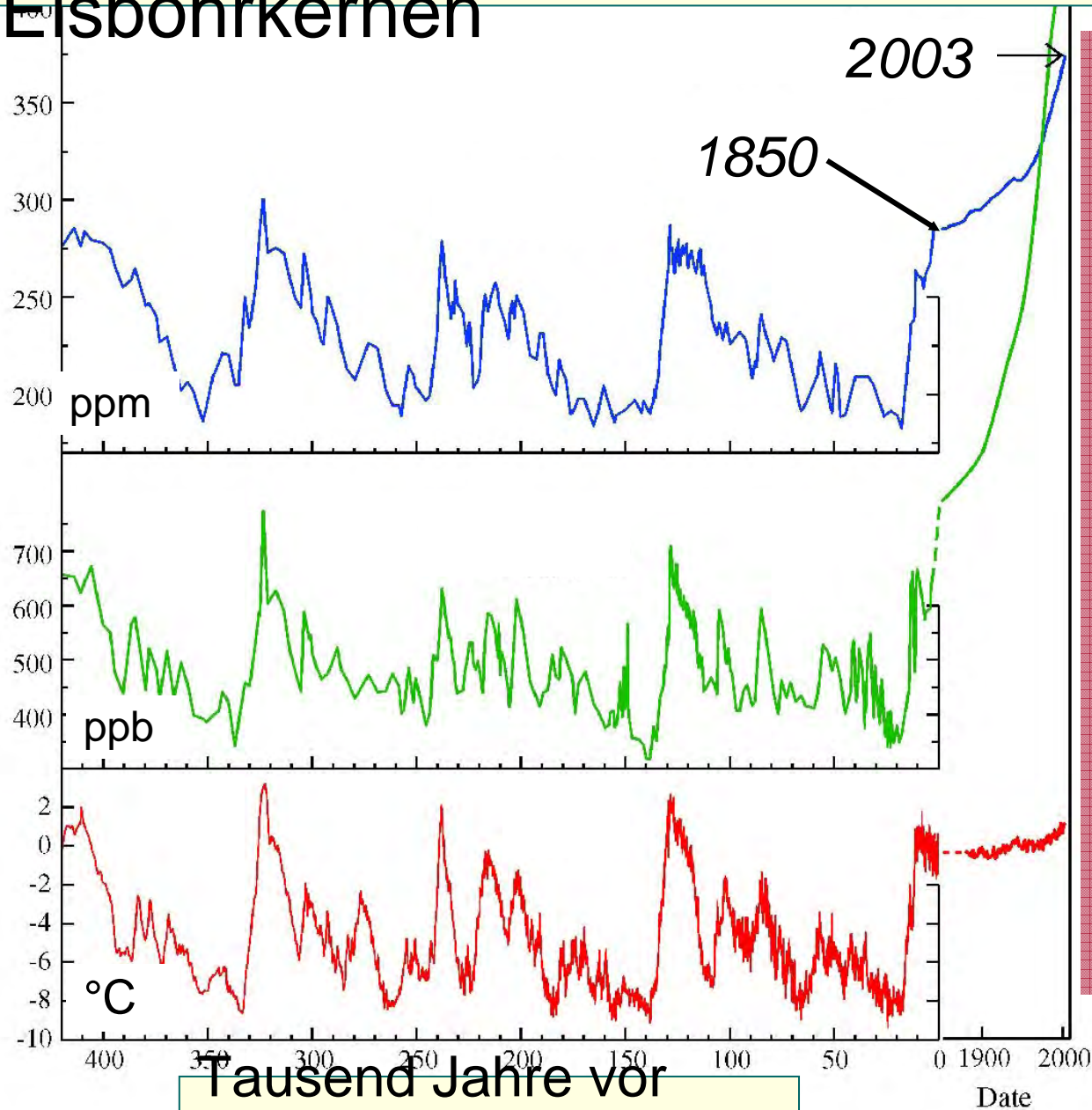
Konzentration
von Methan in
der Atmosphäre

Bodennahe
Lufttemperatur,
Antarktis

Hansen (2005)
Petit et al. (1999)

„Aufzeichnungen“ aus antarktischen

Eisbohrkernen

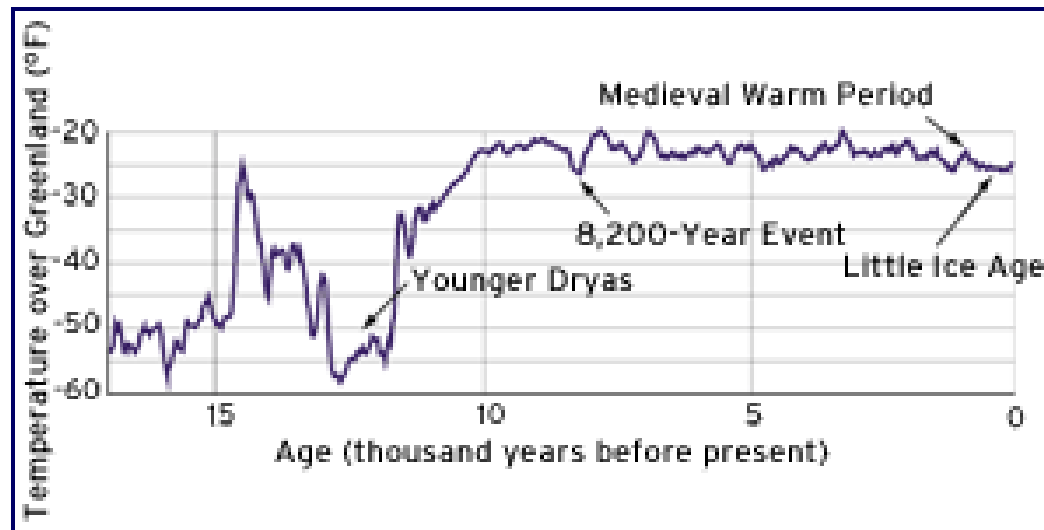


Der Mensch hat in den letzten 150 Jahren die Konzentration von Treibhausgasen stärker verändert als natürliche Schwankungen während der gesamten Eiszeit!

Wie wird das System reagieren???

Hansen (2005)
Petit et al. (1999)

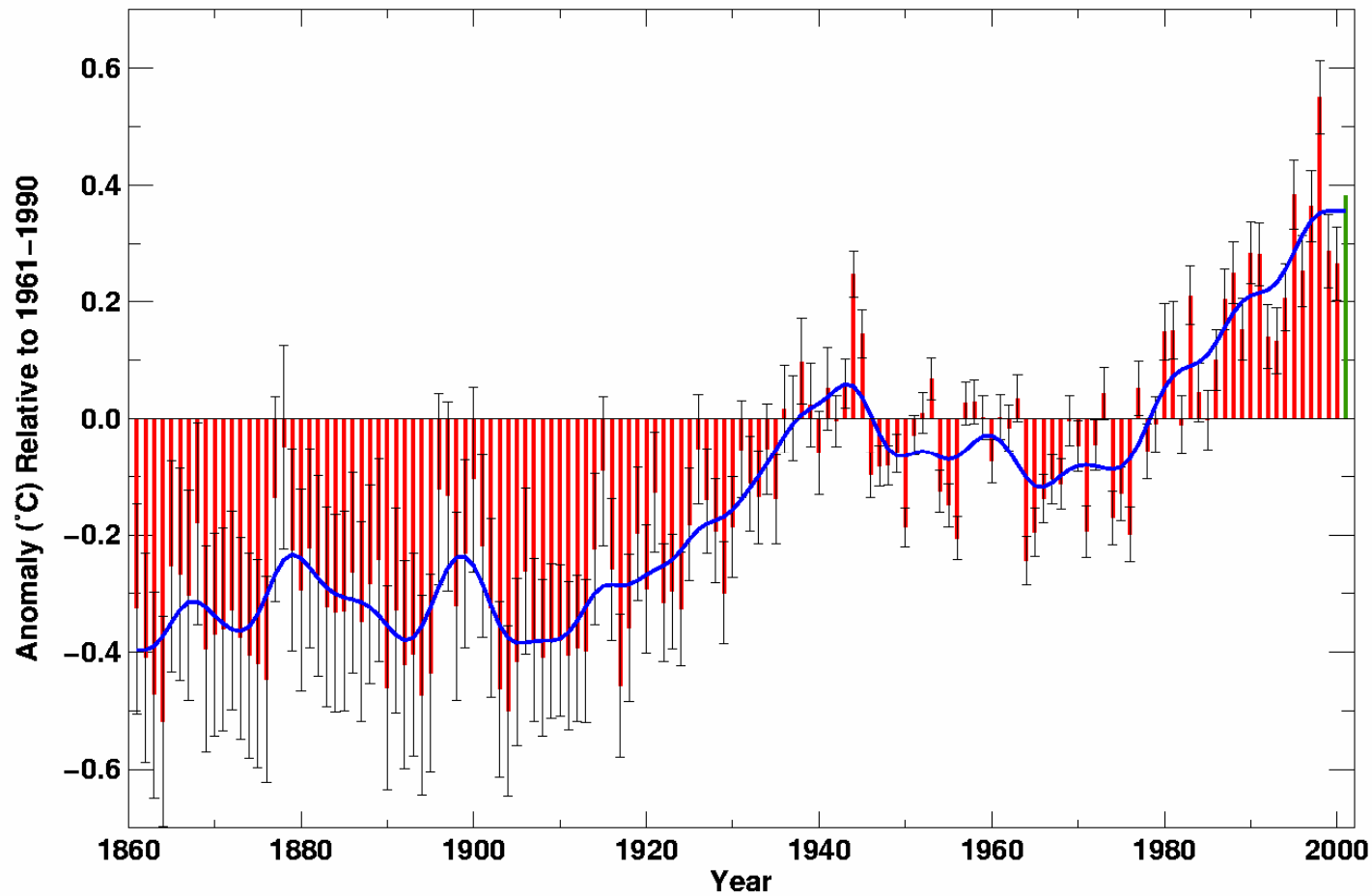
Temperaturverlauf vom Ende der letzten Eiszeit bis heute



Auch ohne menschlichen Eingriff unterliegt das Klimasystem z.T. erheblichen Schwankungen; selbst geringe Änderungen (Mittelalterliches Klimaoptimum und Kleine Eiszeit) hatten erhebliche Folgen für die Menschheit:



Globale Mitteltemperatur 1861 – 2001



Klima in Kulturdokumenten

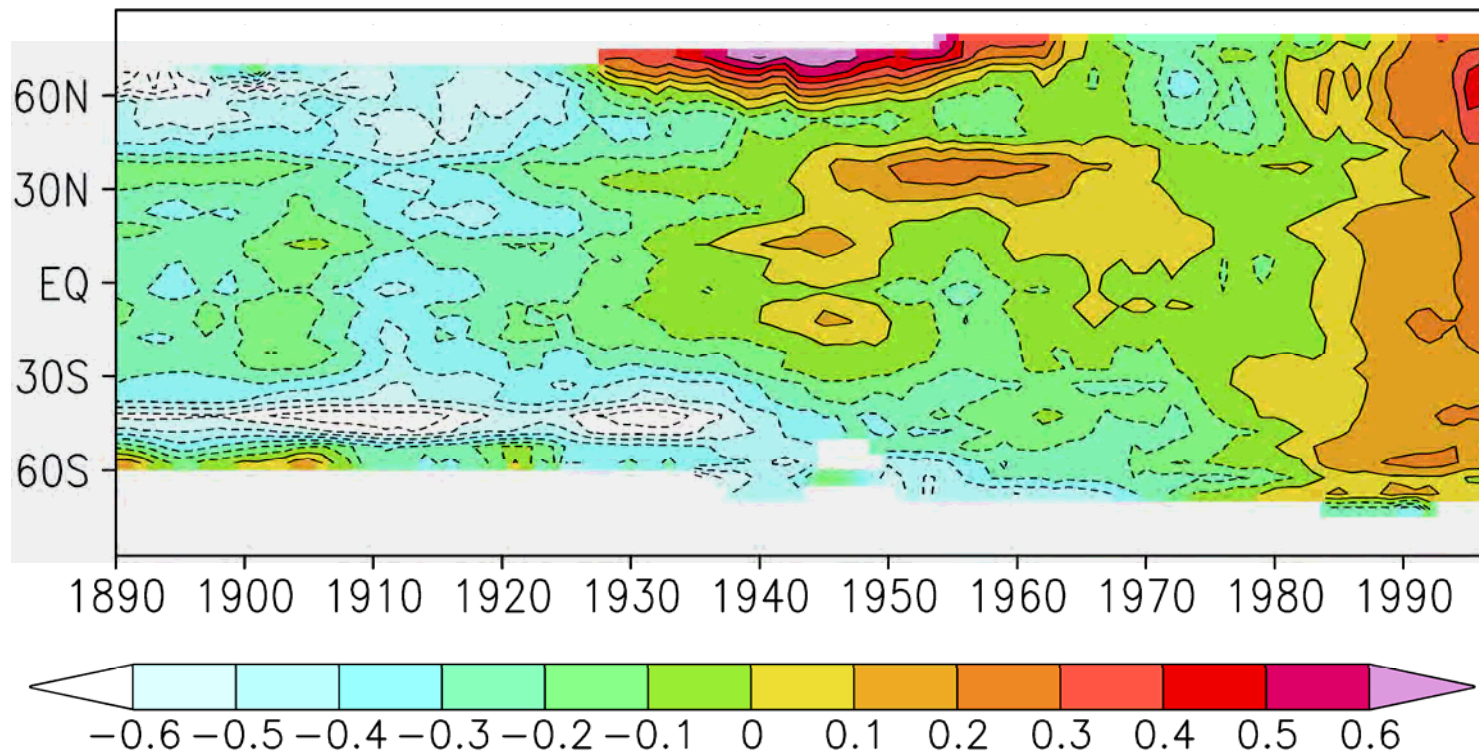


P. Breughel, Rückkehr von der Jagd, 1565



Geographische Verteilung der Temperaturveränderungen

Observed



Zusammenfassung

Der anthropogene Klimawandel geschieht bereits.

Klimamodell des MPI-M:

Bis 2080 wird das Meereis im arktischen Sommer vollständig verschwunden sein.

Bis 2100 steigt der Meeresspiegel in der Nordsee um 50 cm an.

Bis 2100 wird die Nordatlantische Zirkulation (“Europas Warmwasserheizung”) um 30% schwächer sein.

Für die Nordatlantische Zirkulation wurde ein kontinuierliches **Beobachtung**ssystem installiert.