

# Kipppunkte des Golfstroms?

Einordnung der Studie von v. Westen et al, 2024

21.08.2024, 14:00-15:00, HLNUG-Kolloquium

Dr. Heike Hübener, Fachzentrum Klimawandel und Anpassung

## Was treibt den Golfstrom an?

Antrieb der Prozesse in der Atmosphäre ist die differentielle Einstrahlung



Solarkonstante =  $1361 \text{ W/m}^2$   
wurde 2015 nach neuesten  
Messungen aktualisiert.

In den Tropen kommt mehr Strahlungsenergie an, als an den Polen.

Dies führt zu Ausgleichsbewegungen, die die Temperaturunterschiede reduzieren.

Ca. 1/3 des Wärmetransports erfolgt über die Atmosphäre, 2/3 über die Ozeane.

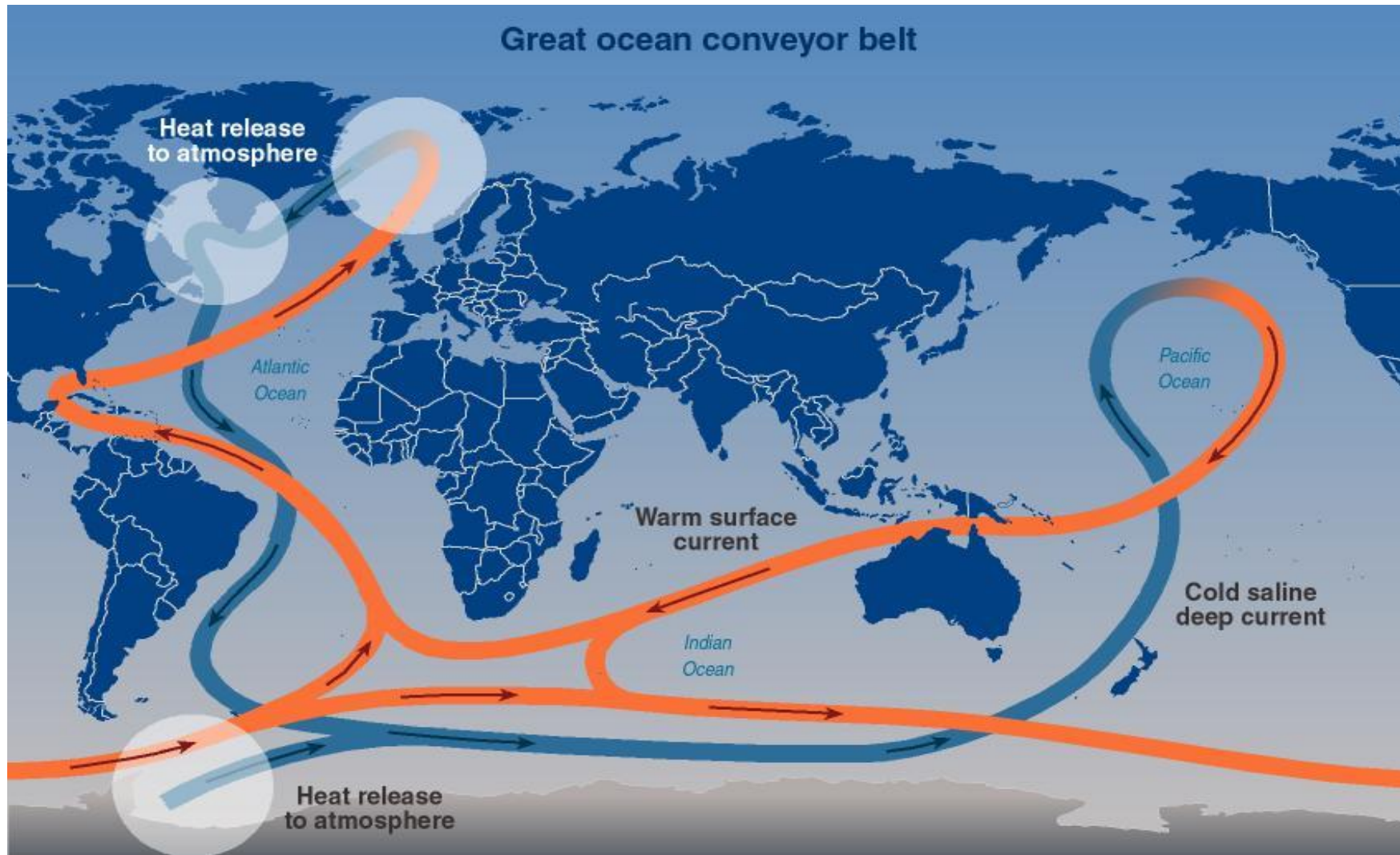
Kälteres Wasser ist dichter (= schwerer) als wärmeres Wasser.

Salzigeres Wasser ist dichter (= schwerer) als weniger salziges Wasser.

Starke Verdunstung (Subtropen) und Gefrieren von Meereis erhöhen den Salzgehalt.

Niederschlag, Eintrag von Flüssen und Schmelzwasser verringern den Salzgehalt.

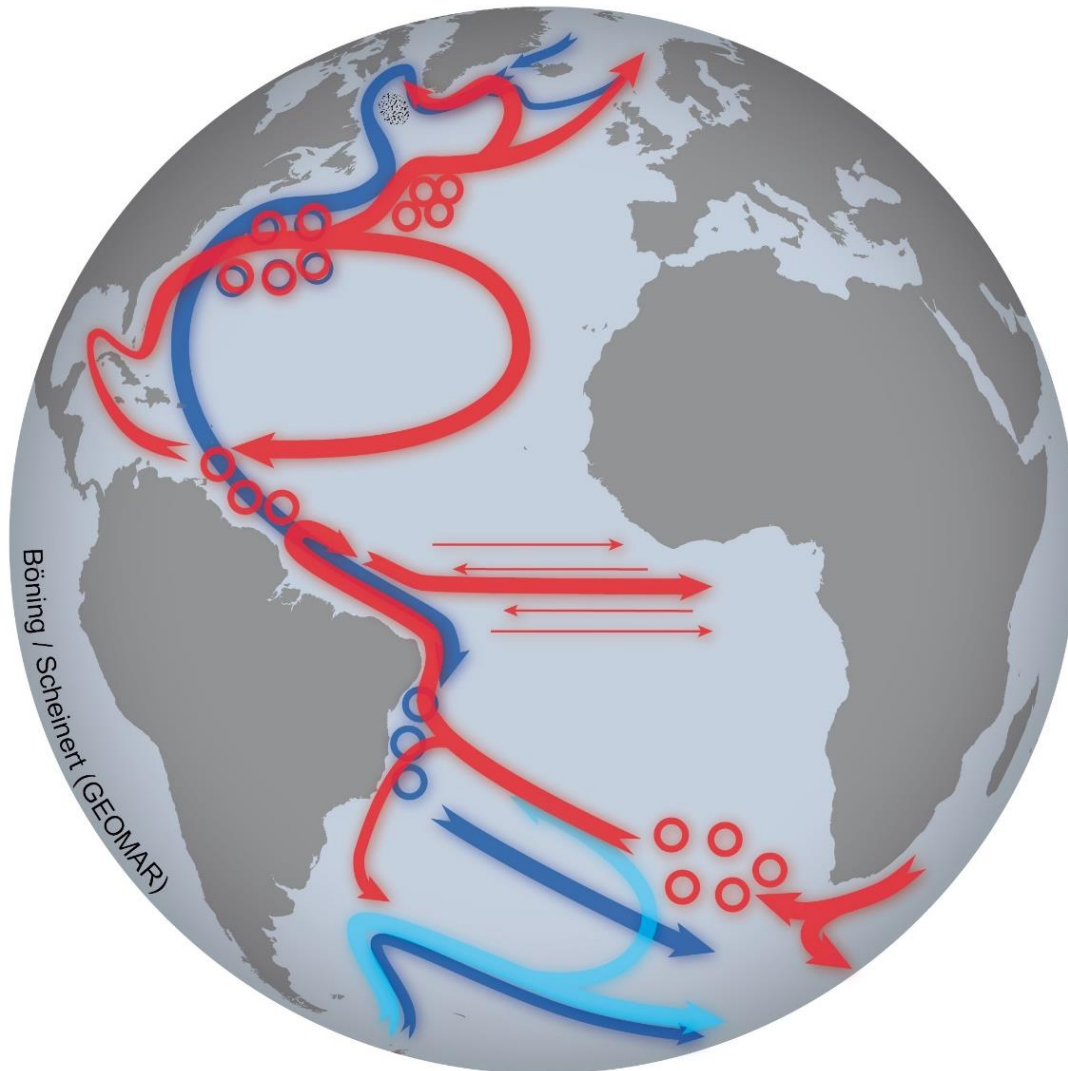
# Die Förderbandzirkulation im Ozean



Meereiskante:

Beim Gefrieren übrig bleibende kälteres und salzreicheres Wasser ist dichter / schwerer und sinkt ab

# AMOC



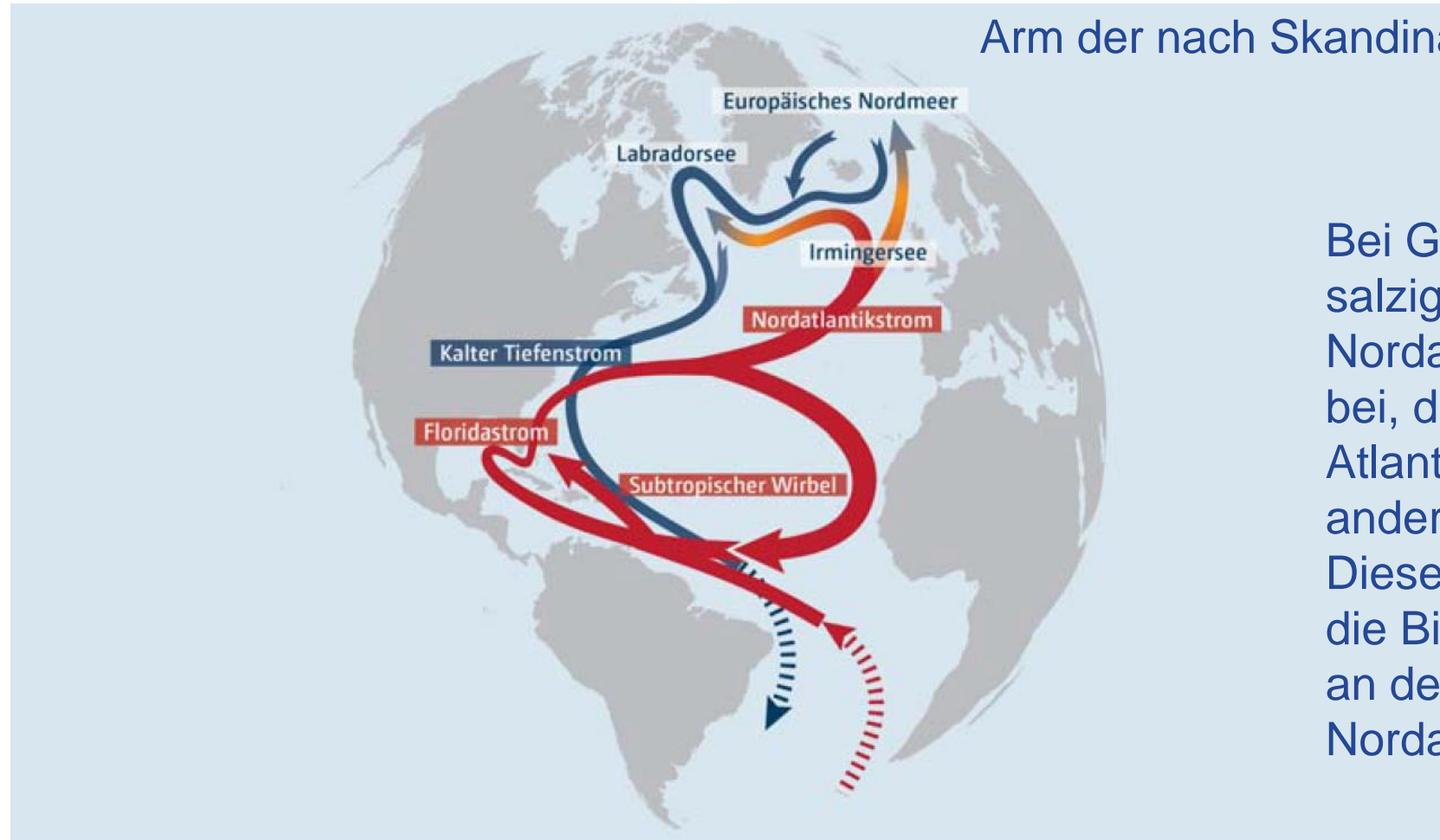
Die Atlantische Meridionalzirkulation (Atlantic Meridional Overturning Circulation, AMOC) umfasst den gesamten Atlantischen Ozean. Warme (oberflächennahe) Strömungen sind in rot dargestellt, kalte Tiefenströmungen in blau. Die kleinen Kreise zeigen Gebiete mit starker Wirbelaktivität. Die gepunktete Fläche in der Labradorsee zeigt das Gebiet mit Tiefenkonvektion, in dem abgekühlte Wassermassen in Tiefen von mehreren Kilometern absinken.

Grafik: C. Böning / M. Scheinert, GEOMAR



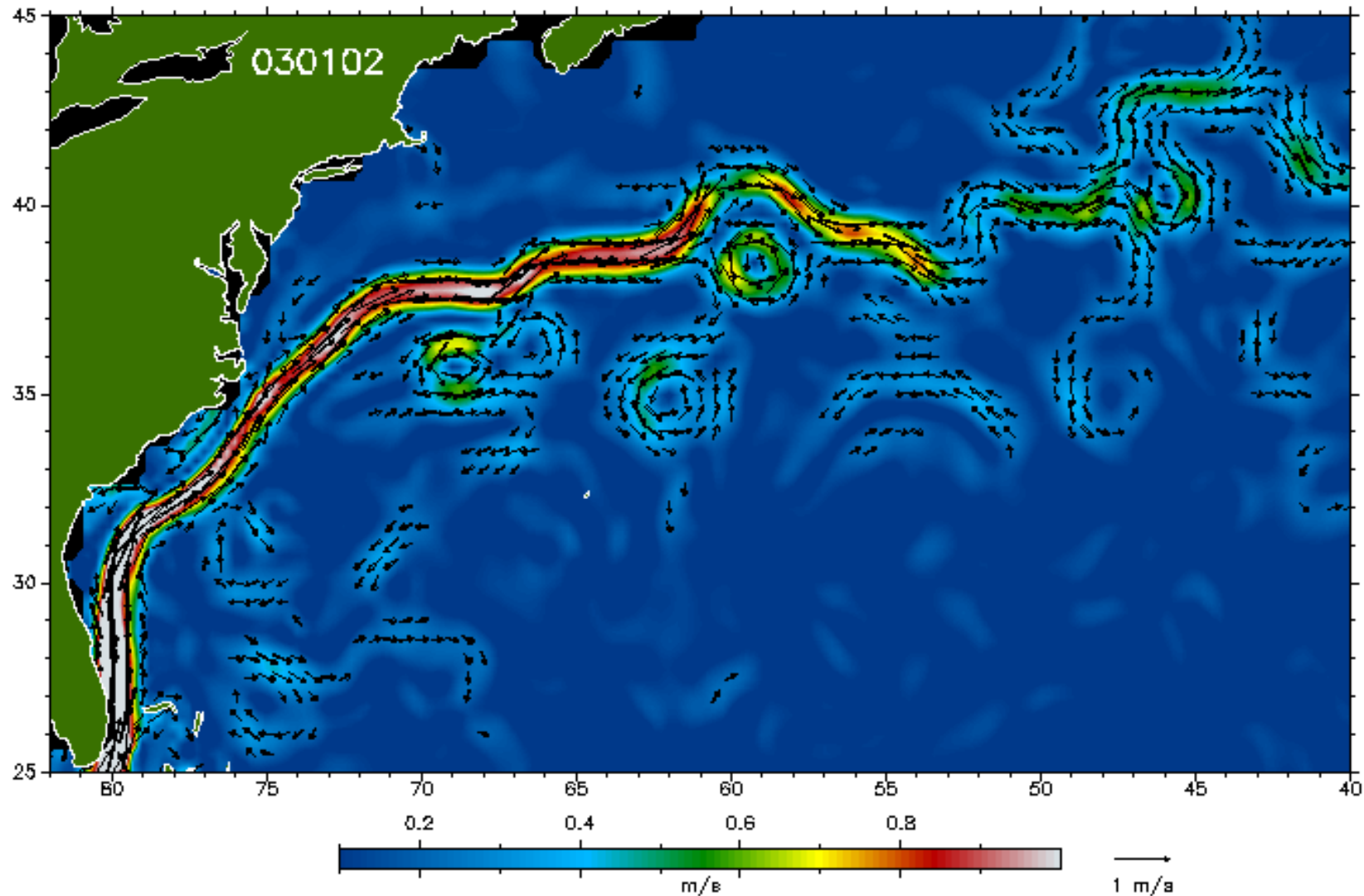
# Golfstrom-Zirkulation

**Golfstrom** ist der umgangssprachliche Name für einen Teil der AMOC: den Nordatlantikstrom insbesondere den Arm der nach Skandinavien gerichtet ist.



Bei Gibraltar strömt besonders salziges Wasser in den Nordatlantik und trägt dazu bei, dass das Wasser im Atlantik salziger ist als in den anderen Ozeanen. Dieser Effekt ist essentiell für die Bildung von Tiefenwasser an der Meereskante im Nordatlantik.

# Golfstrom-Simulation



# Langfristige Änderungen der Temperatur des Golfstroms

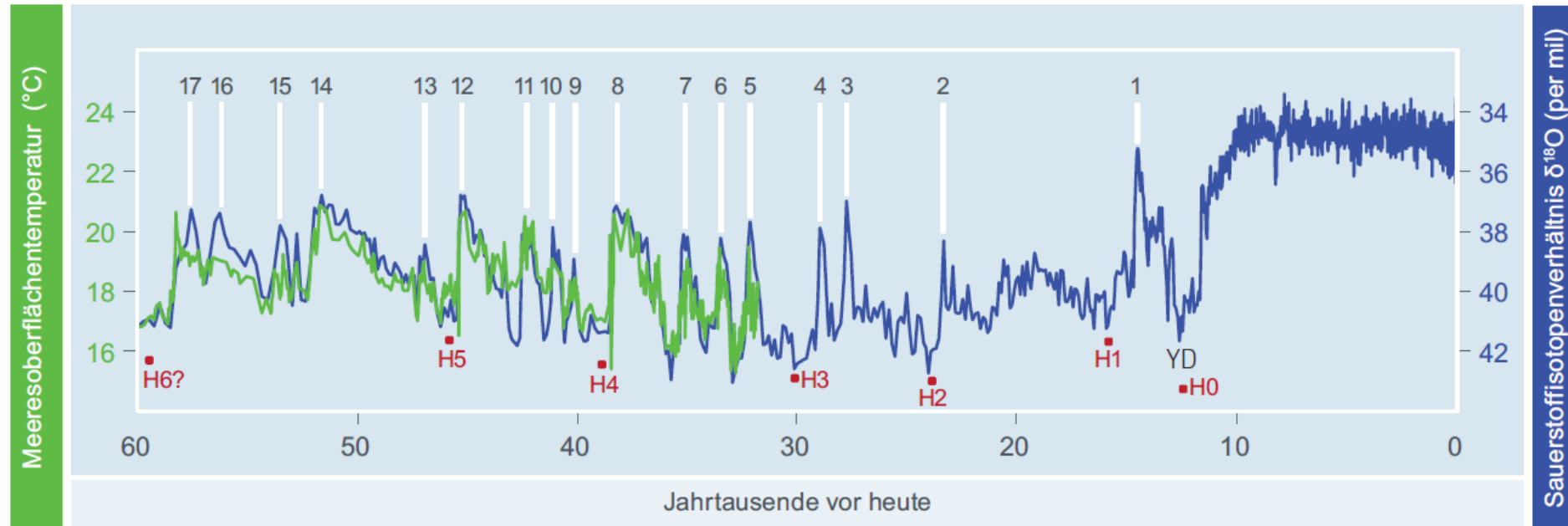


Abbildung 3: Das Sauerstoffisotopenverhältnis ( $\delta^{18}O$ ) im Grönlandeis (blaue Kurve) als Maß für die lokale Temperatur und die Rekonstruktion der Temperatur der Meeresoberfläche im subtropischen Atlantik aus Meeressedimenten (grüne Kurve) während der vergangenen 60.000 Jahre. Rote Punkte zeigen den Zeitpunkt von Kältephasen infolge massiver Eirsutschungen, den sogenannten Heinrich-Ereignissen (H). Man erkennt außerdem eine Reihe von abrupten Erwärmungsereignissen, die als Dansgaard-Oeschger-Ereignisse (DO) bekannt und mit Nummern gekennzeichnet sind. Diese werden auf abrupte Änderungen der Atlantikströmungen zurückgeführt. Die hohe Übereinstimmung der blauen und grünen Kurven, die auf unterschiedlichen Methoden und unabhängigen Datensätzen beruhen, belegt, dass die Erkenntnisse robust sind und die gezeigten Klimaänderungen weiträumig waren.

# Heinrich-Events und Dansgaard-Oeschger-Events

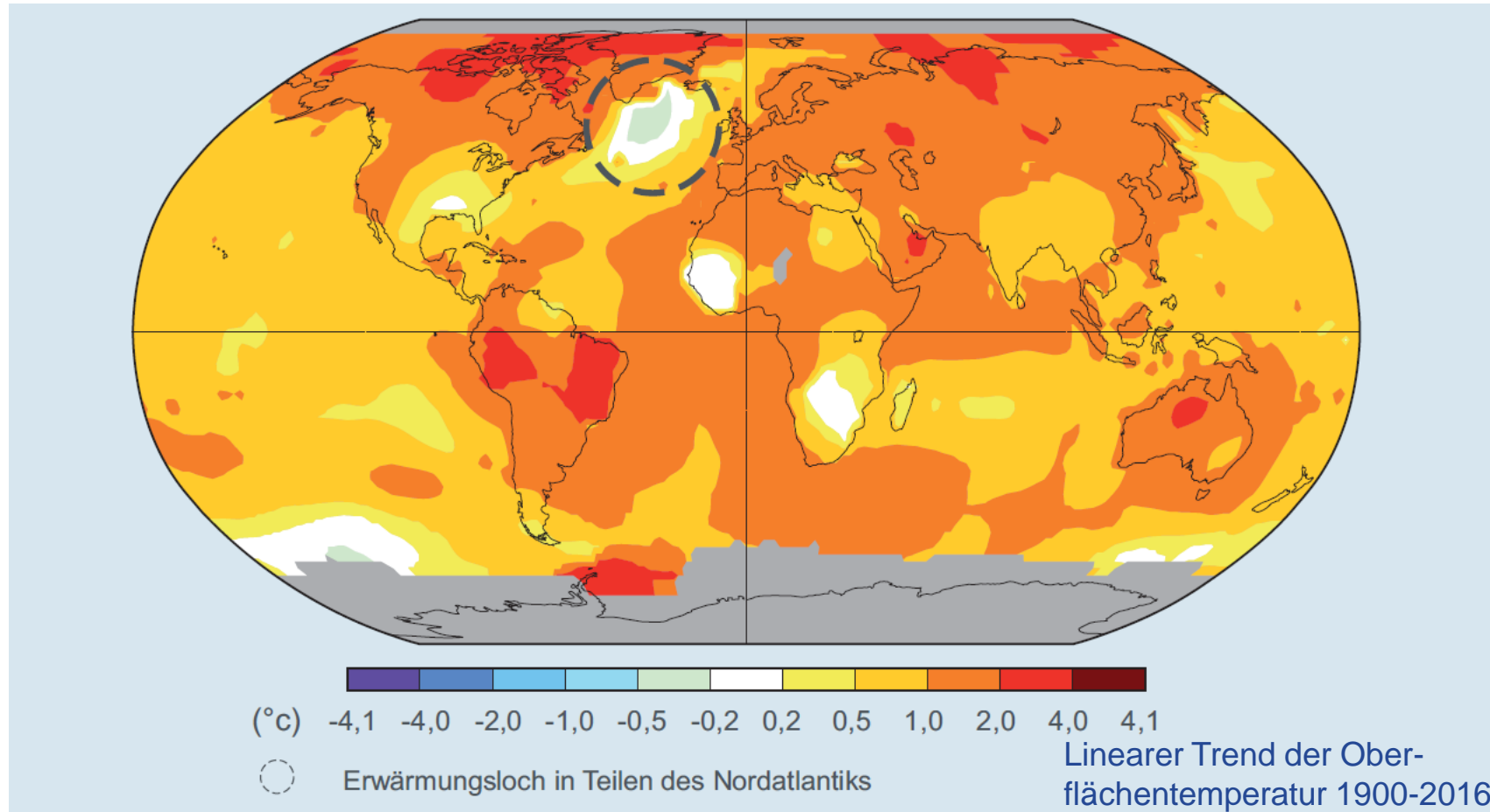
Der zugrundeliegende Prozess für das Auftreten und die Amplitude des Ereignisses sind noch immer ungeklärt.

Dansgaard-Oeschger-Ereignisse stehen in Beziehung zu Heinrich-Ereignissen. Heinrich-Ereignisse sind Unterbrechungen der thermohalinen Zirkulation, die eine Abkühlung in der nördlichen Hemisphäre verursachen. Ein kühleres Klima hat eine Vergrößerung der Eisflächen und damit eine höhere Albedo der Erdoberfläche zur Folge, die die Abkühlung noch verstärkt. Es gibt Hinweise darauf, dass Dansgaard-Oeschger-Ereignisse global synchronisiert auftreten.

Im Jahr 2003 identifizierte der Klimaforscher Stefan Rahmstorf einen 1470-Jahre-Zyklus, in welchem das Phänomen auftrat. Als Erklärung für die Ereignisse schlug man im Jahr 2004 Ozeanzirkulationsmodi vor. In einer Folgestudie, die 2005 durchgeführt wurde, konnte die Periodizität auf eine Überlagerung zweier bekannter Aktivitätszyklen der Sonne zurückgeführt werden. Nach 1470 Jahren ist demnach der 210er-Zyklus der Sonnenaktivität (Suess-de Vries-Zyklus) siebenmal und der 86,5er-Zyklus (Gleißberg-Zyklus) siebzehnmals abgelaufen.



# Schwächt sich die AMOC ab?



Das „Erwärmungsloch“ im Nordatlantik liegt dort, wo eine Abkühlung erwartet würde, wenn sich die AMOC abschwächt.

## Trends / Variabilität seit Mitte 1990er Jahre

Hessisches I

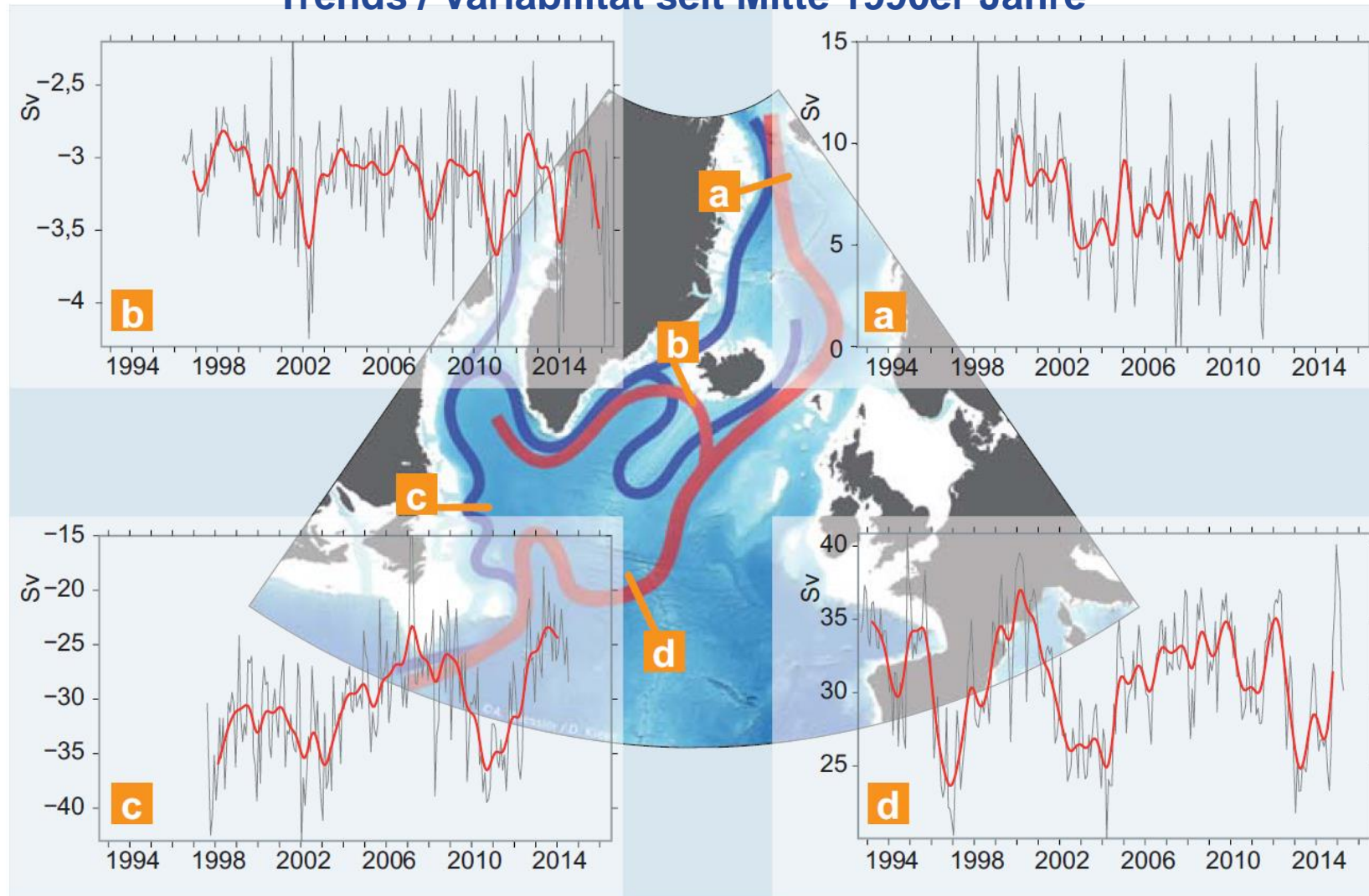
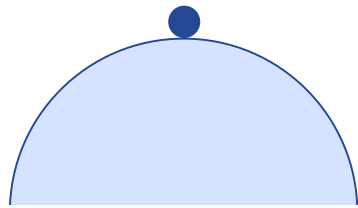


Abbildung 7: Vier Transport-Zeitreihen (Sv) von Schlüsselkomponenten der Umwälzzirkulation. a) Transport von warmem und salzreichem Atlantikwasser durch die Framstraße in den Arktischen Ozean; b) Transport von kaltem und dichtem Wasser aus dem Europäischen Nordmeer über die Schwelle zwischen Grönland und Island; c) Transport von kaltem Tiefenwasser aus der Labradorsee nach Süden; d) Transport von warmem, salzreichem Golfstromwasser und von kaltem Tiefenwasser von West in den Ostatlantik.

# Positive und negative Rückkopplungen

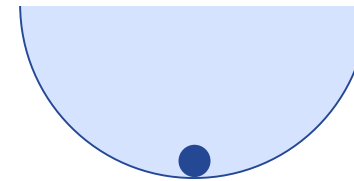
## Positive Rückkopplung (Labiles System)



Bei einer Auslenkung aus dem Ausgangszustand entfernt sich das System weiter von seinem Ausgangszustand

Beispiel: Schmelzendes Eis verringert die Albedo der Oberfläche, die sich dadurch stärker erwärmt, was zu weiterem Abschmelzen führt.

## Negative Rückkopplung (Stabiles System)

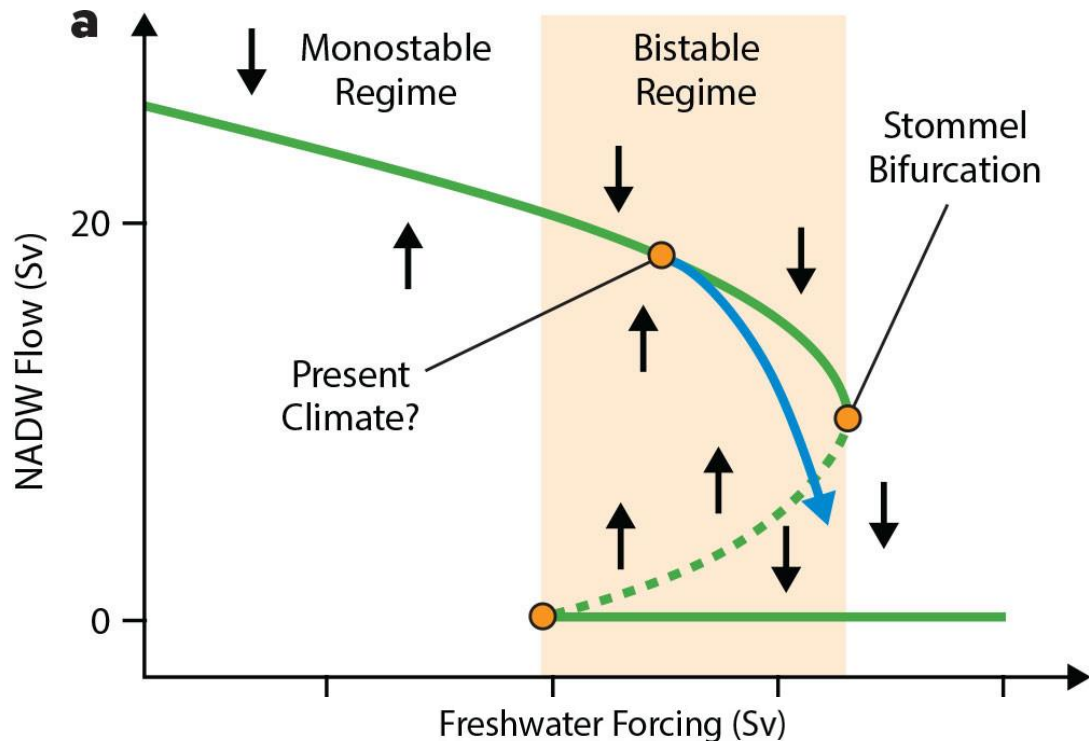


Bei einer Auslenkung aus dem Ausgangszustand schwingt das System in den Ausgangszustand zurück

Beispiel: Golfstromzirkulation zum Ausgleich des Temperaturgradienten (Achtung: nur im mono-stabilen Bereich, d.h. ohne Kippunkt)



# Das bi-stabile Regime



Der Ozeanograph Henry Stommel entwickelte 1961 ein einfaches 2-Box-Modell, das einen Kipppunkt der AMOC aufgrund von Änderungen des Salzgehaltes simulierte. Demnach zeigt die AMOC zwei verschiedene monostabile Zustände (AMOC „an“ und AMOC „aus“) und dazwischen ein bi-stabiles Regime, in dem das System aus einem in den anderen Zustand kippen kann.

Die meisten GCMs simulieren das aktuelle Klima im mono-stabilen Bereich AMOC „an“, dies ist aber evtl. falsch. Beobachtete Strömungen im Südatlantik lassen eher vermuten, dass die AMOC derzeit bereits im bi-stabilen Bereich ist.

Der blaue Pfeil zeigt, wie der anthropogene, sehr schnelle Klimawandel die Stabilitäts-Linie in Richtung des Zustandes AMOC „aus“ verschiebt. Überschreitet das Forcing (blauer Pfeil) die gestrichelte grüne Linie, wird das System zum neuen (AMOC „aus“) Zustand hin beschleunigt.



# Wird sich die AMOC abschwächen?

Klimaprojektionen zeigen, dass bis 2100 mit einer Abschwächung der AMOC zu rechnen ist. Eine aktuelle Studie (Van Westen et al., 2024) zeigt, dass ein Zusammenbruch der AMOC nicht mit Sicherheit auszuschließen ist.

Simulation mit einem Klimamodell, die mit konstant gehaltenen prä-industriellen Bedingungen (THG, Aerosole, solar forcing) untersucht, bei welchem Frischwasser-Zufluss (insbes. aus schmelzendem Grönlandeis) ein Tipping-Point (Abbruch der AMOC) erreicht werden könnte.

Die Stärke der AMOC liegt lokal (ca. 1000m Tiefe, ca. 40° N) bei 20 Sv (Sverdrup).

Bei einer kontinuierlichen Steigerung des Frischwasserzuflusses um  $3 \times 10^{-4}$  Sv pro Jahr wird nach 2200 Modelljahren ein jährlicher Input von 0,66 Sv erreicht.

# Abschwächung der AMOC durch zunehmenden Frischwasserzufluss

FH = Frischwasserzufluss

Modelljahre!

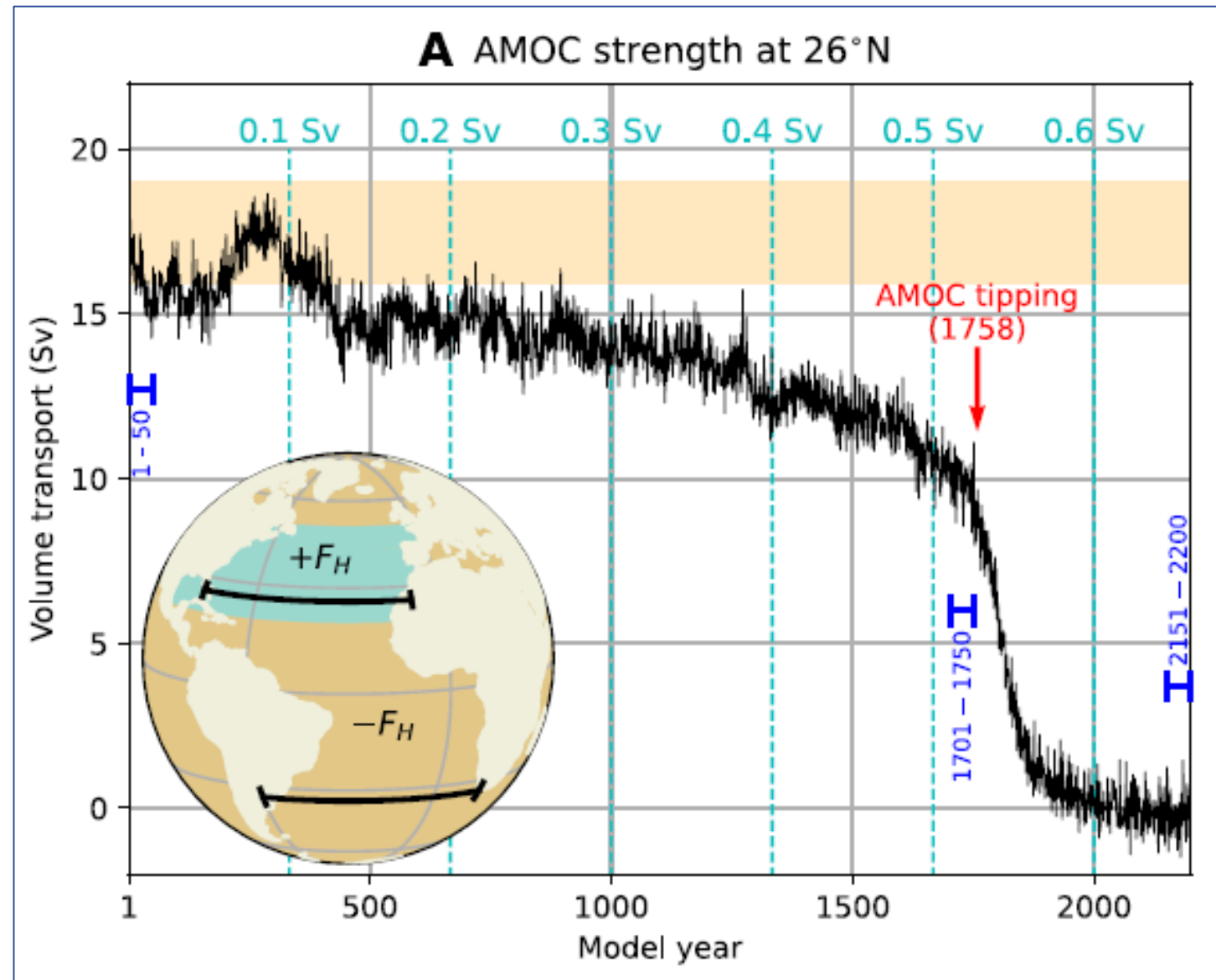
In Jahren 0-400 dominiert natürliche Variabilität

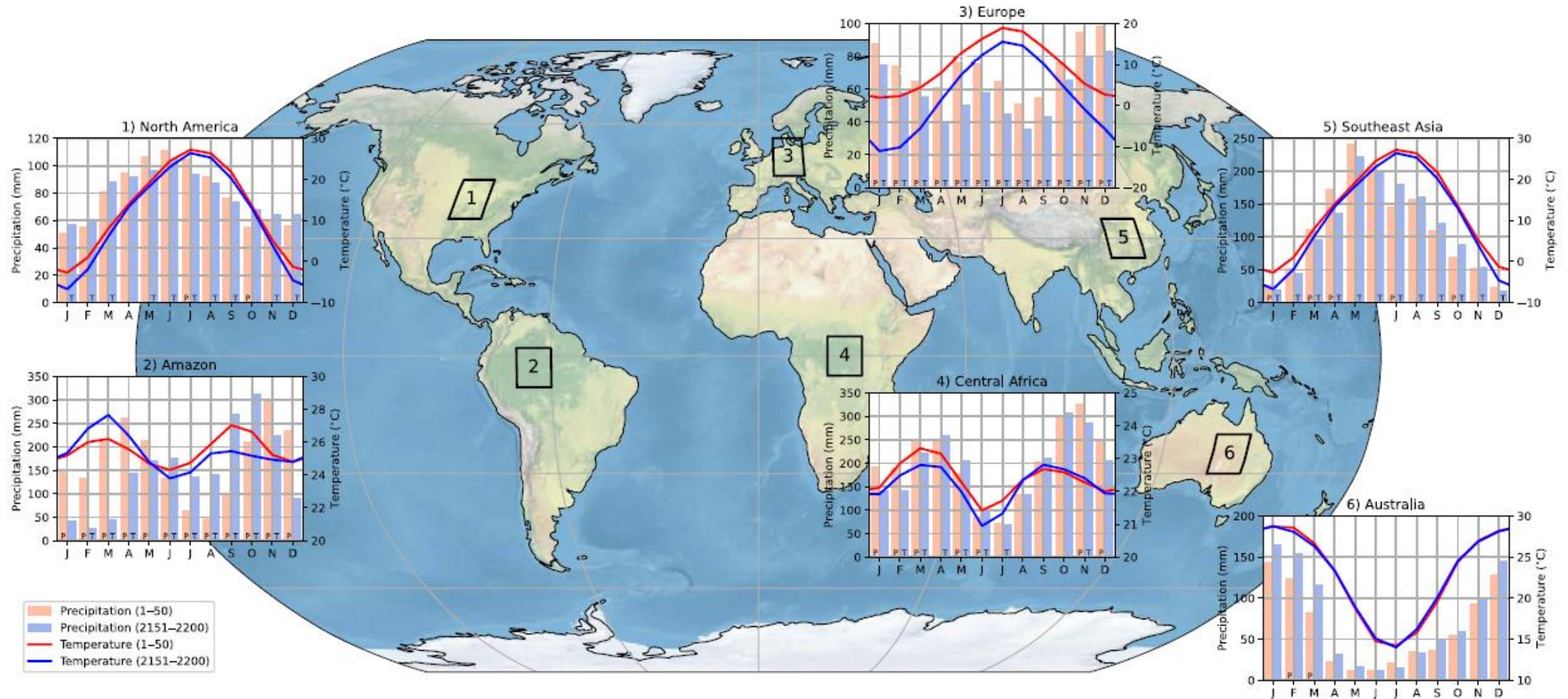
Ab Jahr 800: graduelle Abnahme

Nach Jahr 1758: Abbruch (Tipping Point)

Jahr 1850: AMOC ist nahe Null -> „Tipping“-Prozess dauert 100 Jahre

Quelle: van Westen et al., Science Advances, 2024





**Fig. 2. Climograph for different regions.** The climograph for six different regions (spatial average over the  $10^\circ \times 10^\circ$  boxes), where the bars indicate the monthly precipitation and the curves indicate the monthly temperatures. The climograph is determined over model years 1 to 50 (red bars and curves) and model years 2151 to 2200 (blue bars and curves). Note the different vertical ranges for each climograph. The letters P and T in the bars indicate significant ( $P < 0.05$ , two-sided Welch's  $t$  test) monthly differences for precipitation and temperature, respectively.



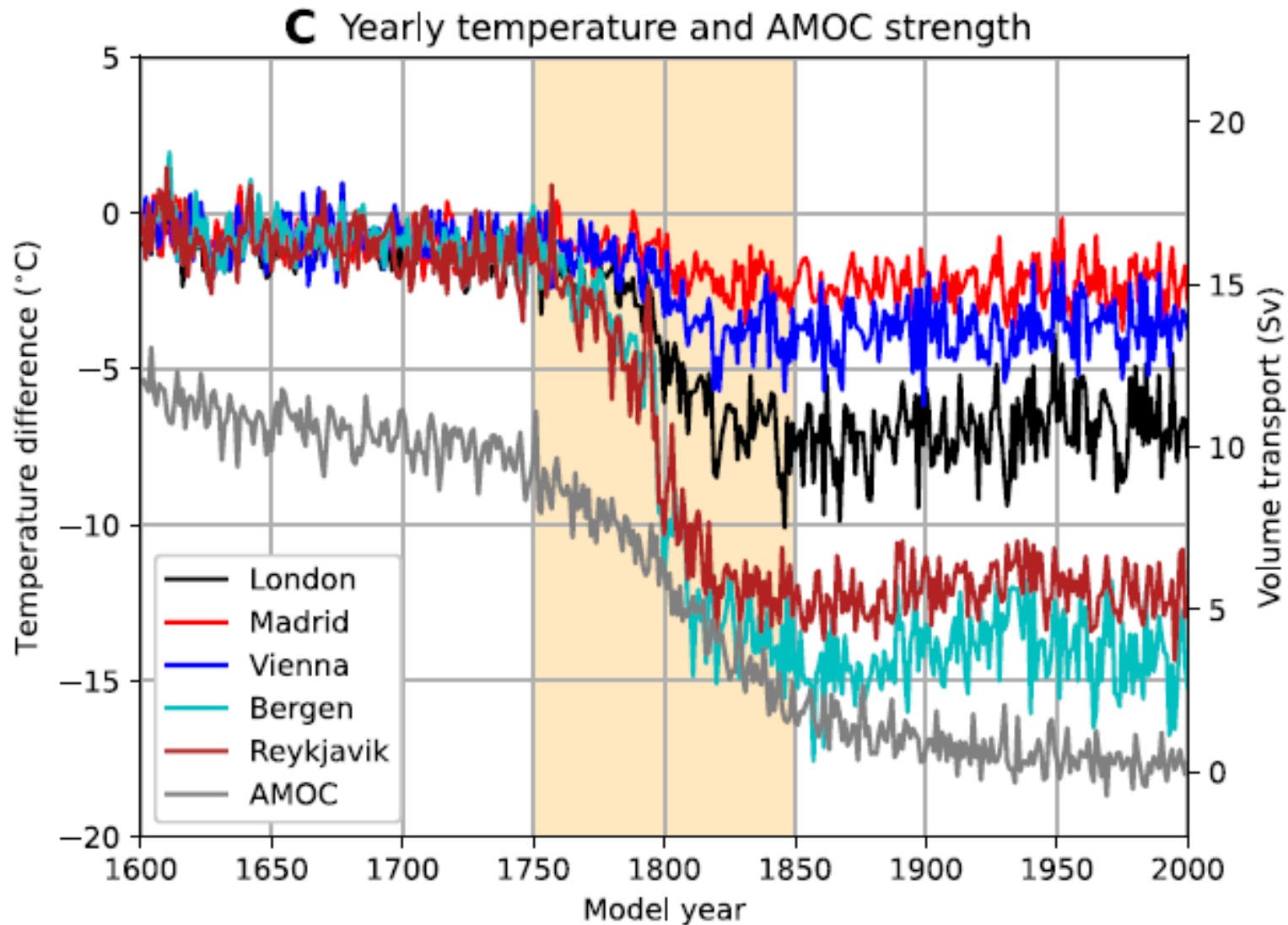


Fig. 3c:  
Temperature difference (with respect to model year 1600) for five different cities, including the AMOC strength. The trends are determined over model years 1750 to 1850 (yellow shading) during which the AMOC strength strongly decreases.

Heutige Jahresmitteltemperatur:  
Reykjavik = 4,4°C  
Bergen = 7,8°C  
London = 9,7°C



# Wird sich die AMOC abschwächen?

Die Studie beantwortet die wissenschaftliche Frage: Hat die Atlantische Meridionale Umwälzzirkulation (AMOC) einen Tipping-Point? Die Antwort ist: Ja!

Dies sind schlechte Neuigkeiten für das Klimasystem, denn bisher konnte immer argumentiert werden, dass die Simulationen, die einen Abbruch des Golfstroms zeigen, stark vereinfacht waren.

Andererseits sind die Ergebnisse konsistent mit paläoklimatischen Ereignissen, in denen der Golfstrom abbrach (sog. Heinrich-Ereignisse).

Ein Abbruch der AMOC würde die Umverteilung von Wärme (und Salz) im Ozean dramatisch verändern. Dies würde zu einer Abkühlung in der Nordhemisphäre und Erwärmung in der Südhemisphäre führen. Wechselwirkungen mit der Atmosphäre und Meereis verstärken die Prozesse.

In der Studie werden extreme Temperaturextremes von mehr als  $-3^{\circ}\text{C}$  pro Dekade für Europa simuliert.

Verglichen mit dem aktuellen Erwärmungstrend von  $+0,2^{\circ}\text{C}$  pro Dekade ist klar, dass es keine Anpassungsmaßnahmen gibt, die solche drastischen Veränderungen kompensieren können.

# Wird sich die AMOC abschwächen?

Im verwendeten Klimamodell (CESM) wird für das aktuelle Klima im Nordatlantik (vereinfacht ausgedrückt) ein zu starker Golfstrom simuliert. (Grund dafür sind Fehler in der Niederschlagssimulation vor allem im Indischen Ozean.)

Das simulierte Forcing, das zu einem Zusammenbruch der AMOC führt, ist mit 0,6 Sv ca. 80-mal stärker als heutige Schmelzwasserflüsse von Grönland.

Der Modellfehler impliziert, dass in der Realität ein Zusammenbruch der AMOC schon bei geringerem Frischwasserzufluss möglich ist, als im Modell (denn dort muss zusätzlich noch der stabilisierende Einfluss des Fehlers überwunden werden).

# Anmerkungen zur Studie van Westen et al., 2024

- Nur ein GCM verwendet
- Kein anthropogener Klimawandel (Erwärmung) berücksichtigt
- Weitere Studien zeigen ähnliche Ergebnisse, eine Überprüfung mit komplexen GCMs inkl. Klimawandel steht aber noch aus.
- Methode ist trotzdem wissenschaftlich solide
- Aktuelle Trends zeigen in Richtung Tipping Point, die AMOC (subpolar gyre) hat sich in den letzten 70 Jahren um ca. 13-15% abgeschwächt.
- Ob die aktuell beobachteten Trends noch multi-dekadische Variabilität zeigen oder bereits einen durch den anthropogenen Klimawandel bedingten Trend zum Tipping Point, ist allerdings unklar

# Mögliche Folgen einer AMOC-Abschwächung

- Zusammenbruch der landwirtschaftlichen Produktion in weiten Teilen der Nordhemisphäre, insbesondere Nord- und Mitteleuropa.
- Daraus resultierend Verteilungskämpfe und Hungersnöte insbes. in ärmeren Ländern.
- Verstärkung der Erwärmung in der Südhemisphäre
- Erwärmung insbes. des tropischen Atlantik und des Südatlantik
- Verlagerung der ITCZ nach Süden -> Absterben der nördlichen Bereiche der tropischen Regenwälder und Überschwemmungen in semi-ariden Subtropen südlich der Tropen
- Veränderungen der Hurricane-Aktivität, des Niederschlags in der Sahel-Zone, des Indischen Sommermonsuns
- Anstieg des Meeresspiegels im Nordatlantik, Verringerung im Südatlantik.



## Fazit

- Wenn wir den Tipping-Point sicher erkennen / terminieren können, ist es zu spät, ihn zu verhindern.
- Ein Zusammenbruch der AMOC würde weltweit dramatische Folgen haben
- Die klimatischen Änderungen würden dramatische soziale, wirtschaftliche und gesellschaftliche Folgen nach sich ziehen.
- **Ein Zusammenbruch der AMOC muss daher unbedingt vermieden werden!**
- Zur Vermeidung des Tipping Points ist ambitionierter Klimaschutz die einzige Option (Reduktion von THG-Emissionen, Entfernung von THG aus der Atmosphäre).
- Anpassung wird der Herausforderung nicht gerecht werden können.