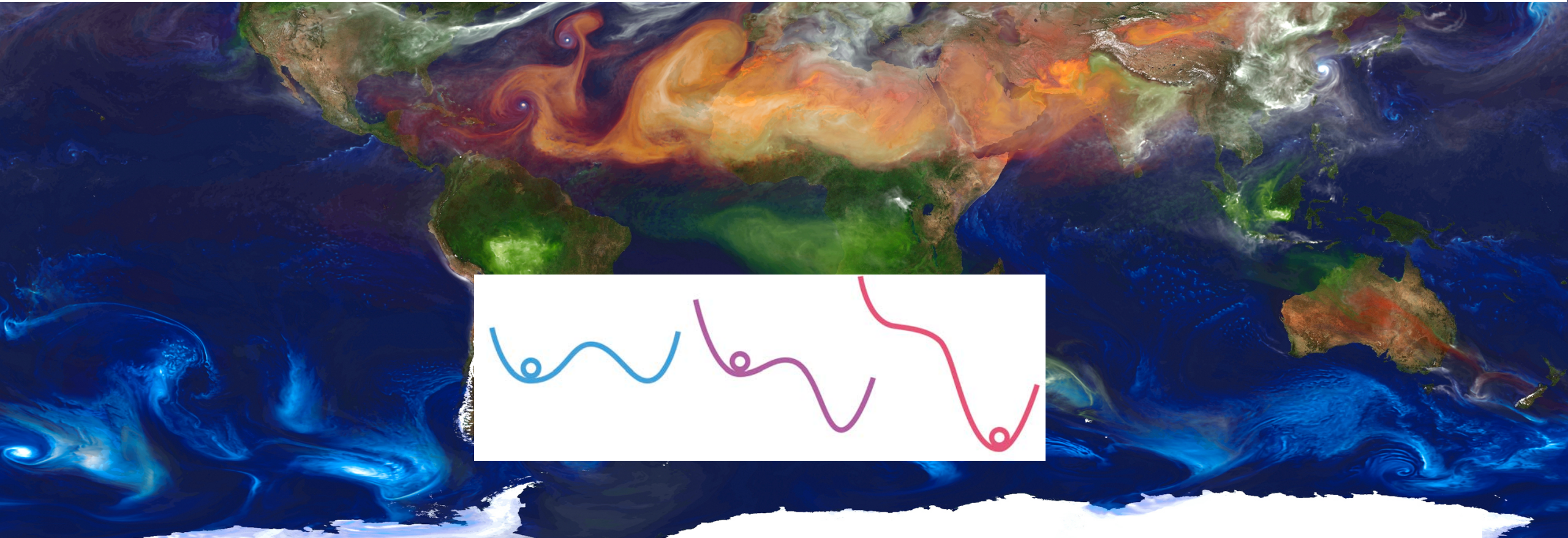
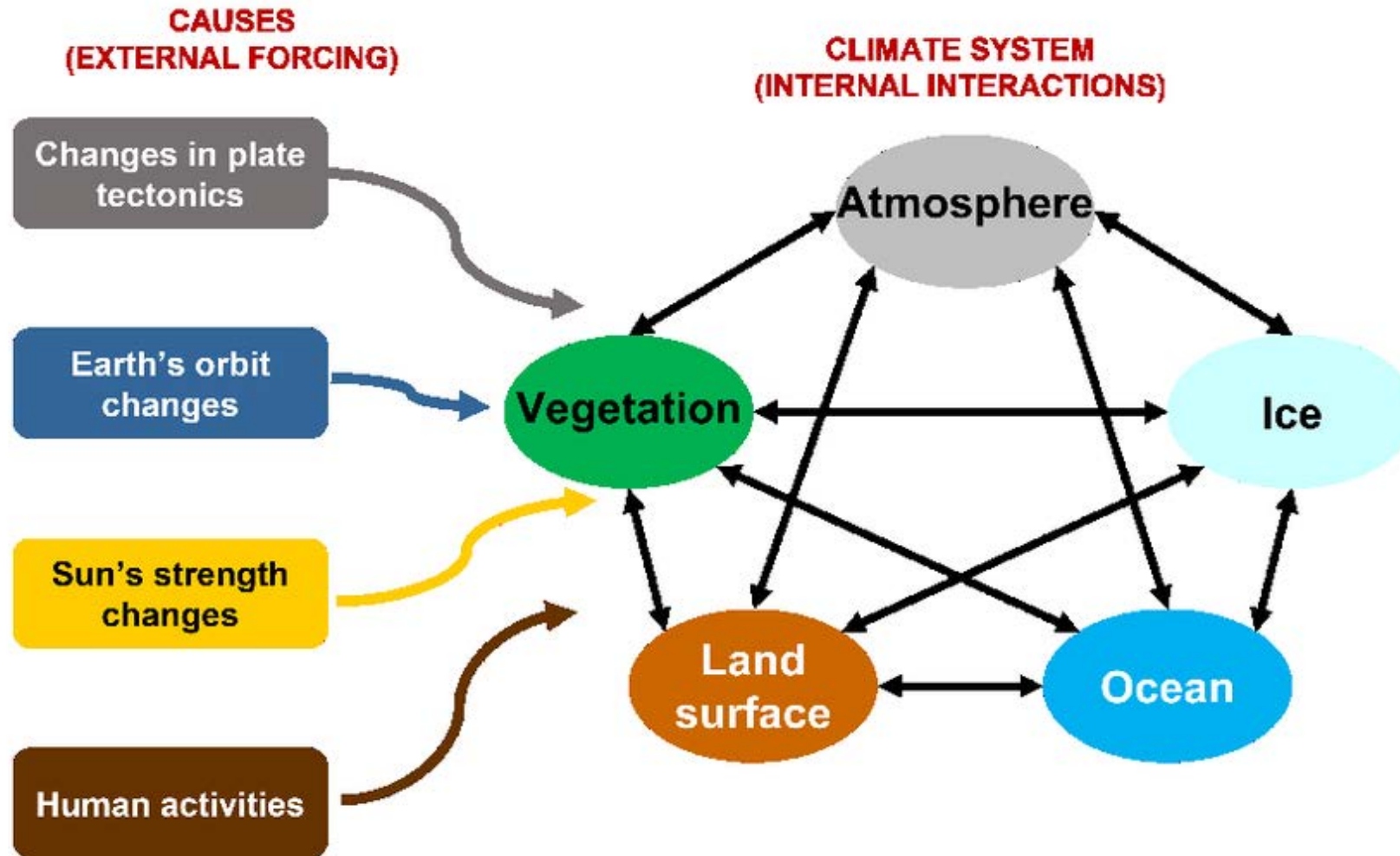


# *Kantelpunten in het Klimaatsysteem*



Henk Dijkstra, IMAU & CCSS  
Departement Natuurkunde,  
Universiteit Utrecht

# Klimaatsysteem



**Complex systeem:** Multischaal interacties tussen processen in verschillende componenten met emergent gedrag

# Observaties

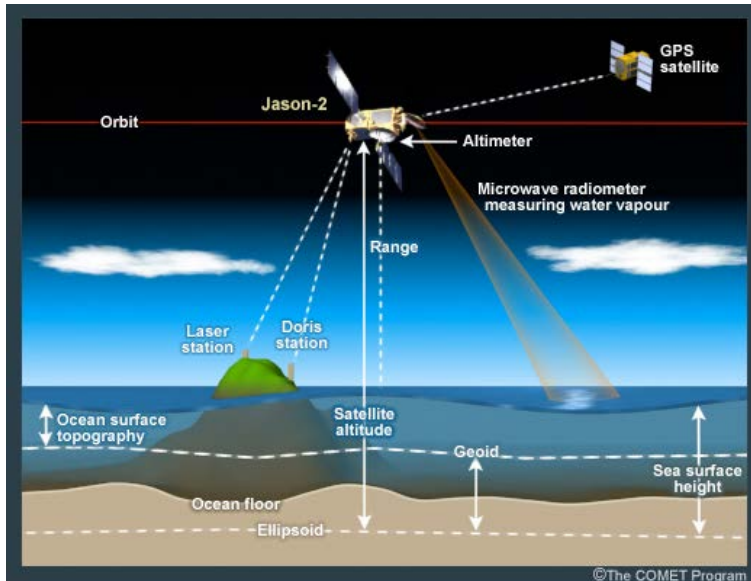
Instrumentele data

(In situ: ~ 1880 - )

(Remote: 1982 - )

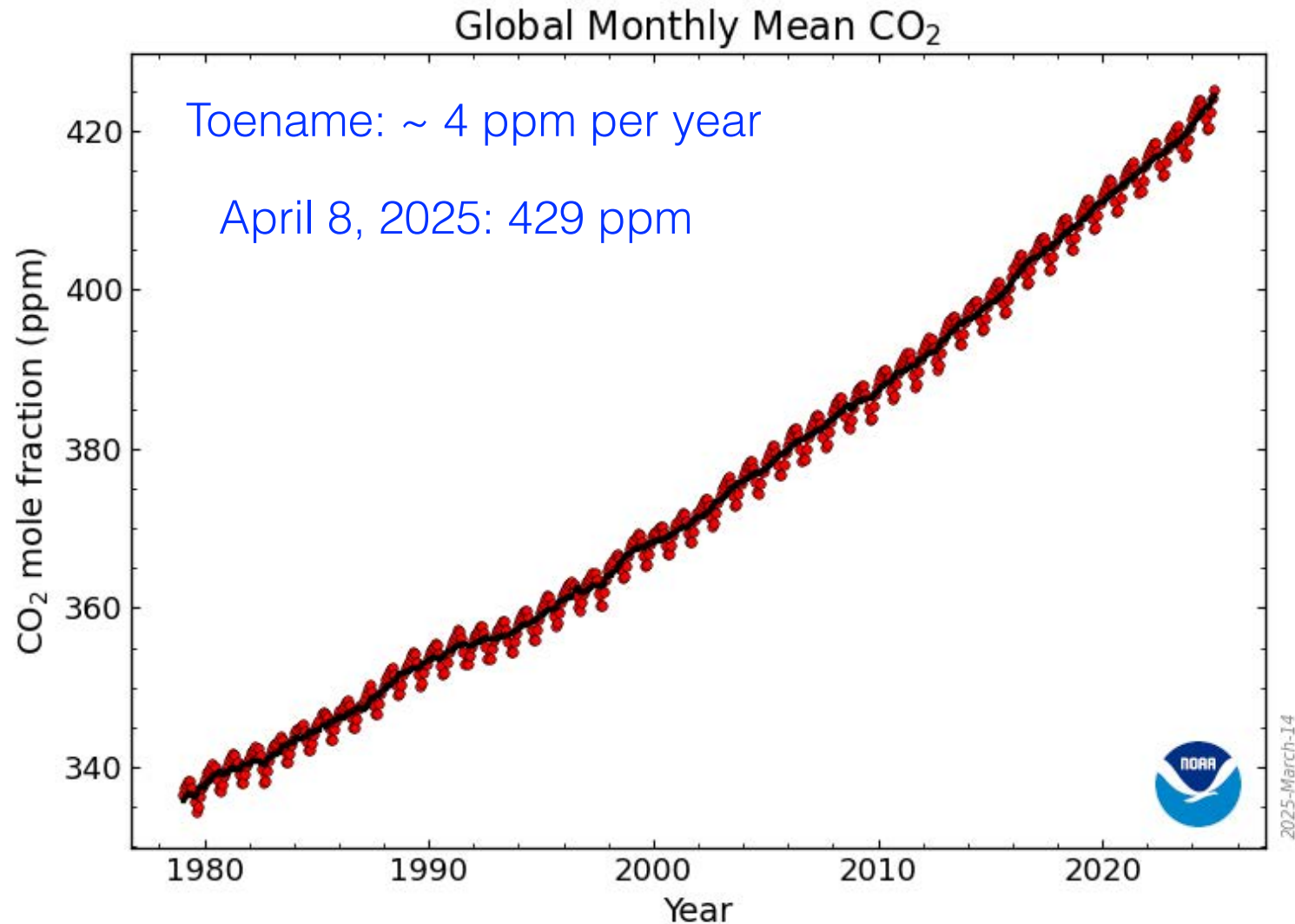


Proxy data  
(geologisch verleden)



Zeer beperkte dataset voor de falsificatie van hypothesen/theorieën

# *Veranderingen in atmosferisch CO<sub>2</sub>*

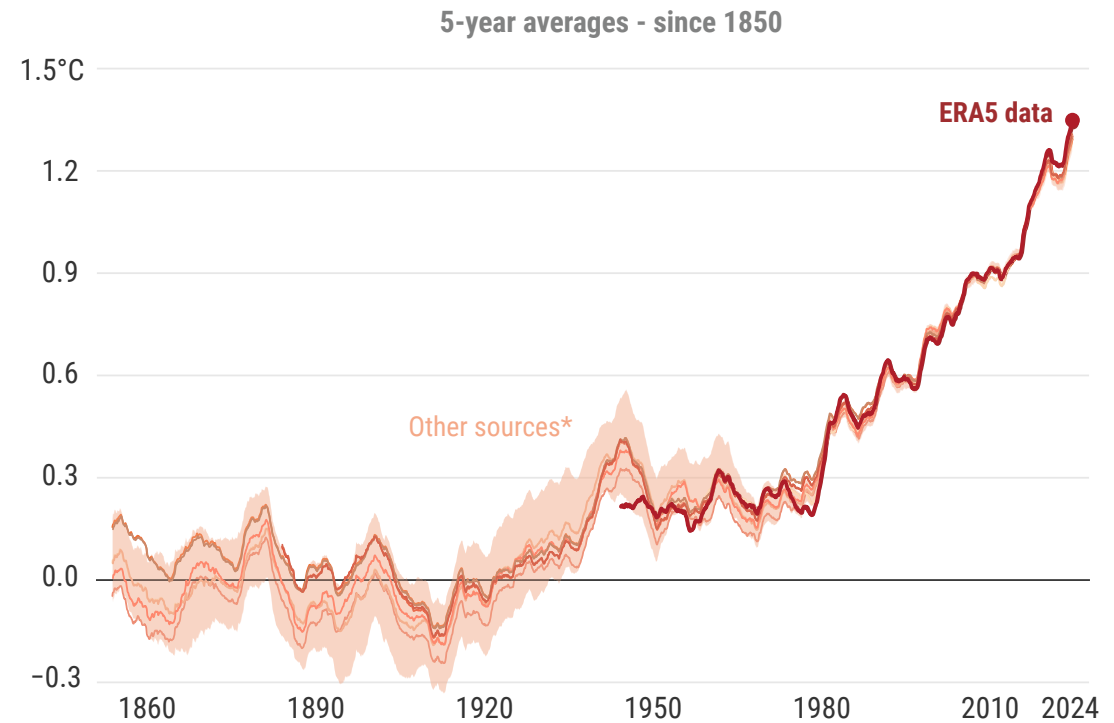
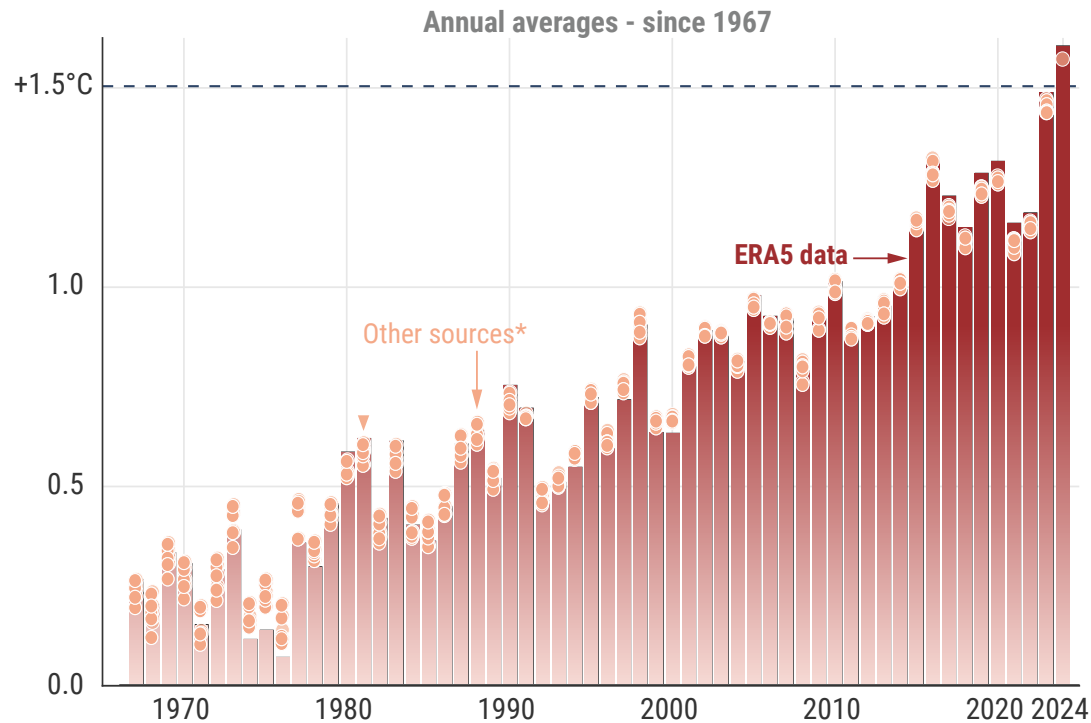


# Veranderingen in gemiddelde oppervlakte temperatuur



## Global surface temperature increase above pre-industrial

Reference period: pre-industrial (1850–1900) • Credit: C3S/ECMWF



\*Other sources include JRA-3Q, GISTEMPv4, NOAA GlobalTempv6, Berkeley Earth and the HadCRUT5 ensemble mean. Shading shows the range of the HadCRUT5 ensemble.

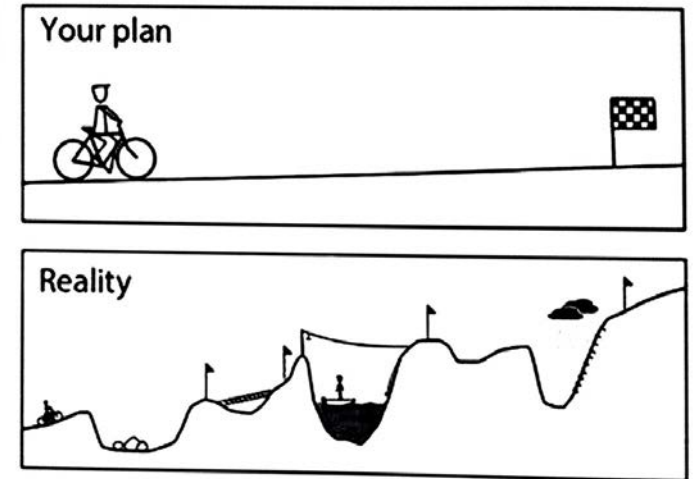


PROGRAMME OF  
THE EUROPEAN UNION

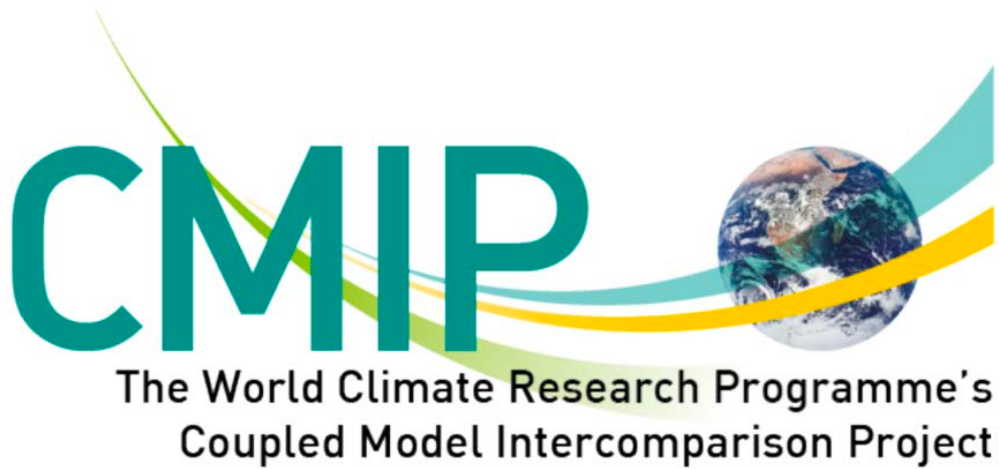


# Centrale vragen

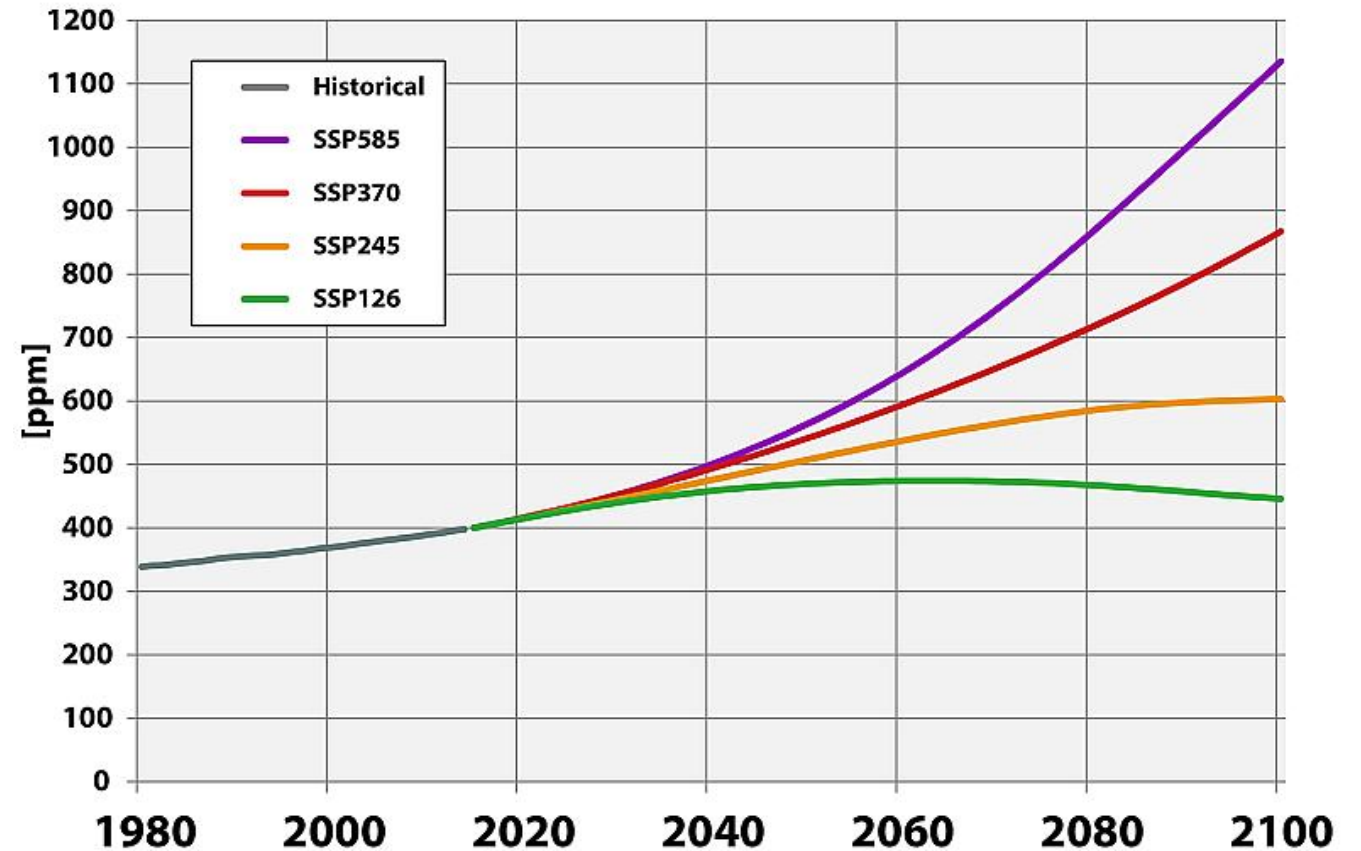
1. Hoe warm wordt het 2100 (en daarna)?
2. Zijn de veranderingen geleidelijk of abrupt ('bumpy')?



# Toekomstige Klimaatverandering



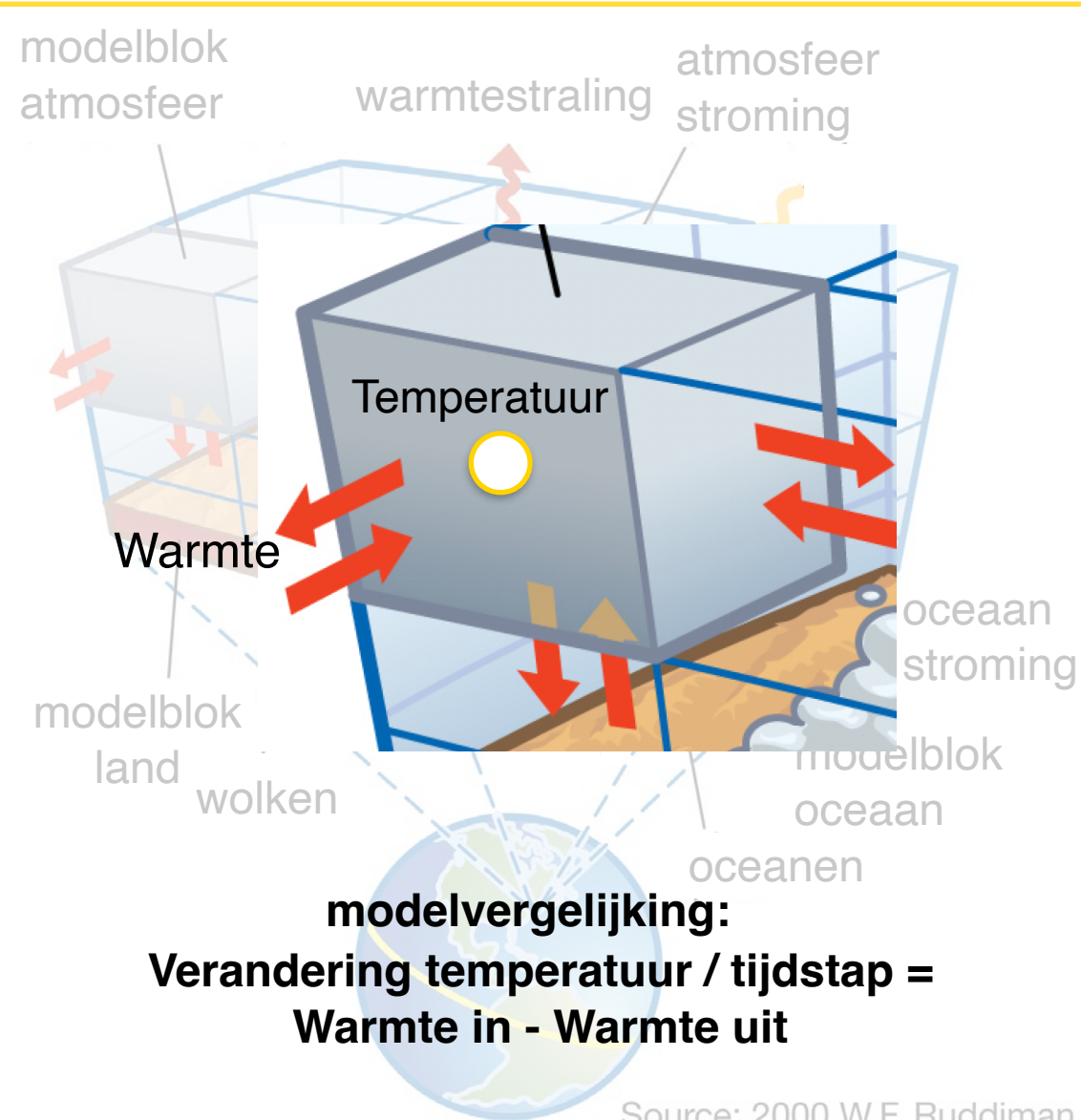
CMIP6 Scenarios - Global CO<sub>2</sub> Concentrations [ppm]



© DKRZ

*Resultaten van Emissie Scenarios*

# Anatomie van een klimaatmodel



Veel berekeningen per seconde (FLOP/s) + veel data opslag: een supercomputer is noodzakelijk

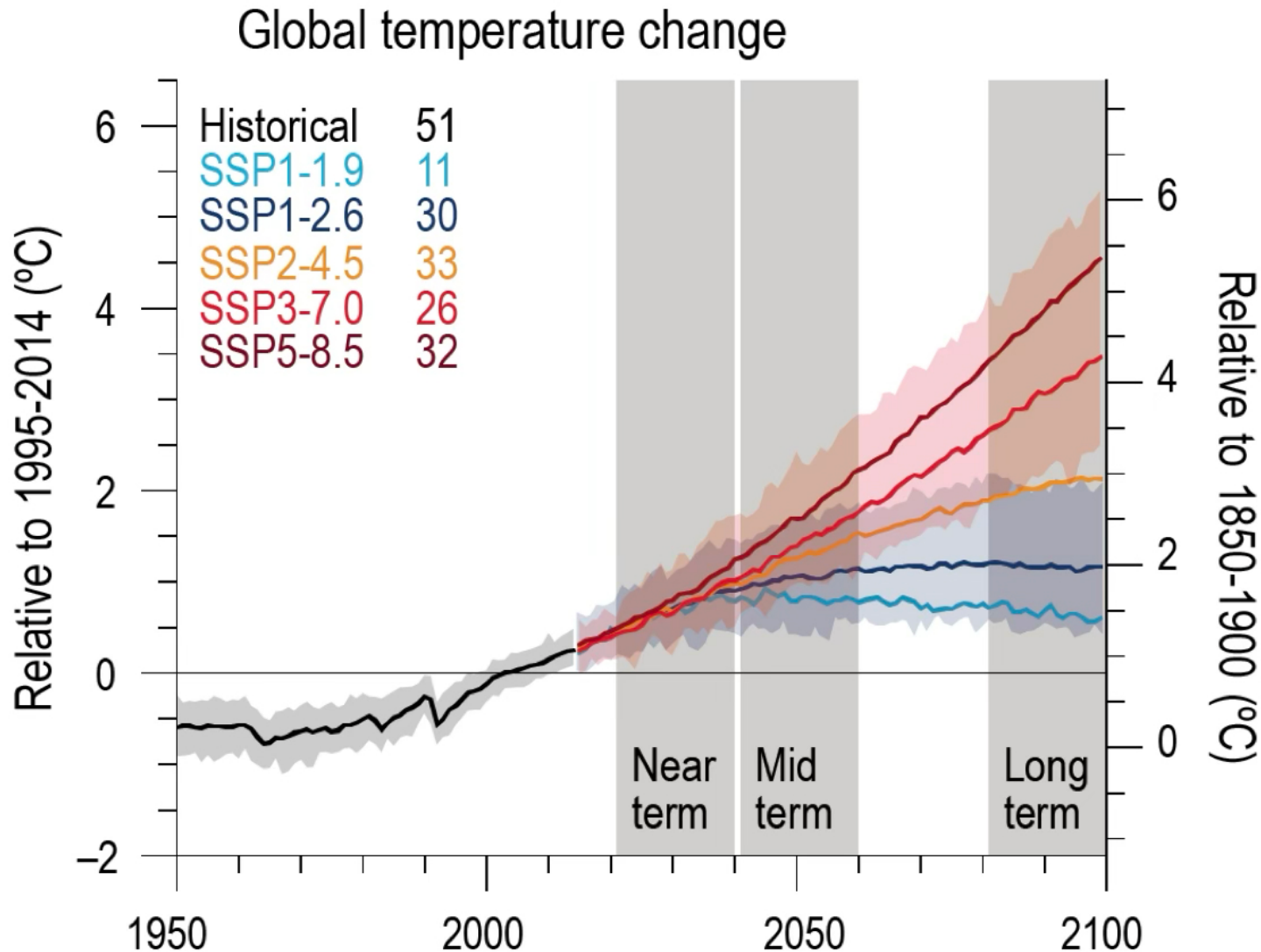


Snellius  
(SURF,  
Amsterdam)

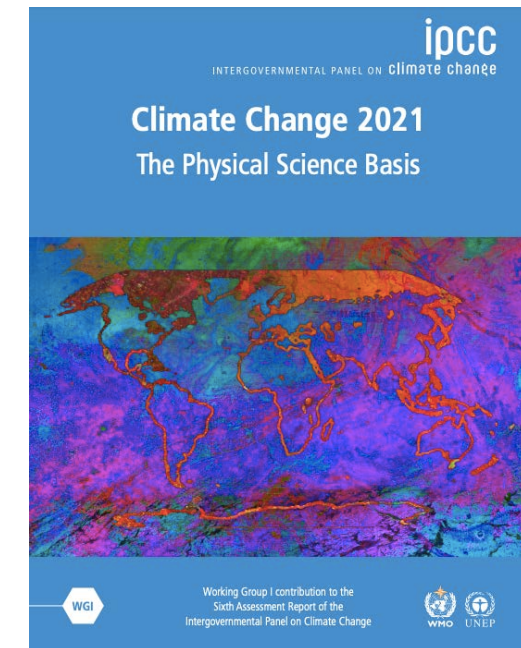
Typische horizontale resolutie:  
ocean, zeeijs: 0.5-1 graad  
atmosfeer, land: 1-2 graad

~ 20 model groepen  
~ 50 verschillende modellen

# Model Resultaten



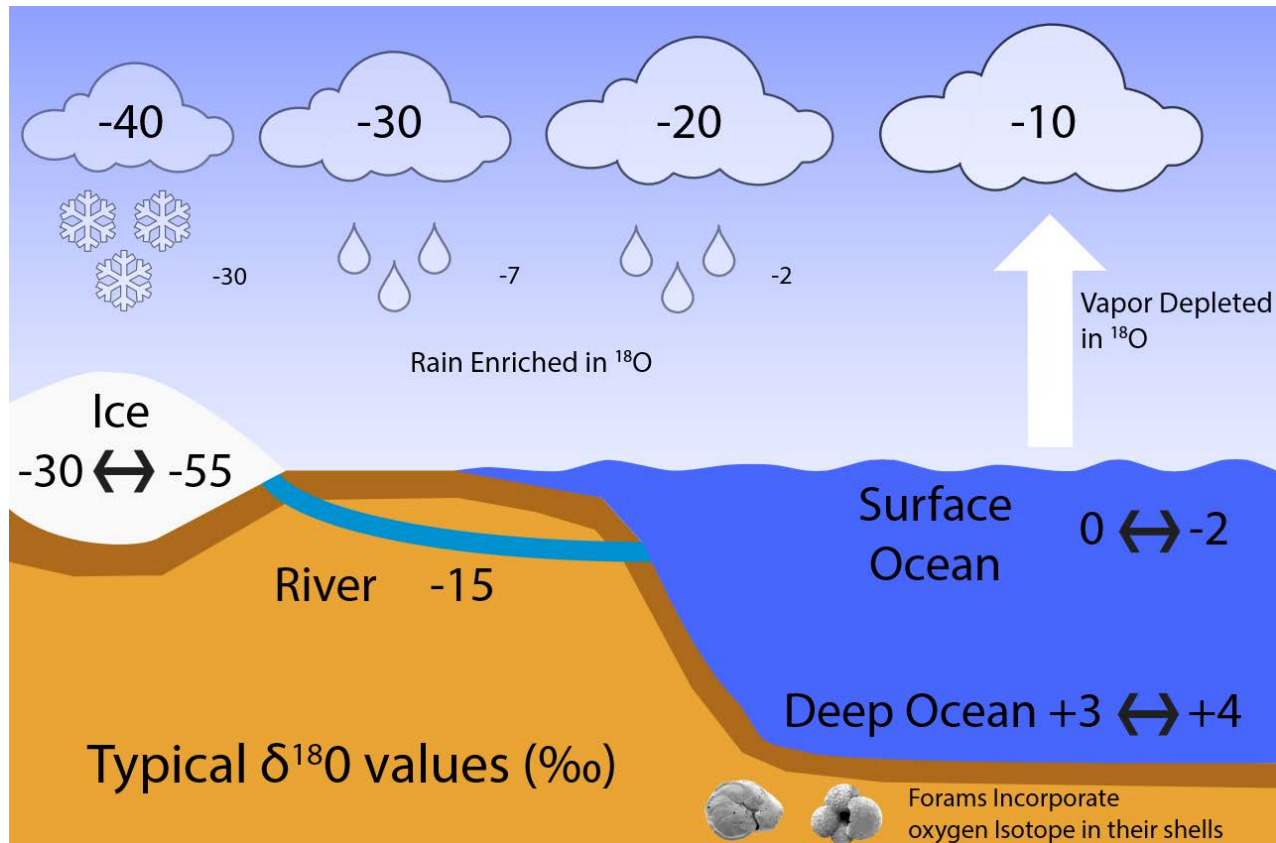
Hoe warm wordt het  
in 2100?



+1.5-5.5 °C  
Boven pre-industrieel

# Waarom zorgen over abrupte veranderingen?

## Klimaat verandering in het geologisch verleden

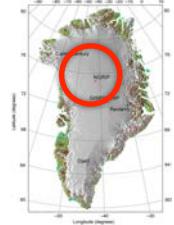


Proxy data:

$$\delta^{18}\text{O} = \left[ \frac{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{act}}{\left( \frac{^{18}\text{O}}{^{16}\text{O}} \right)_{ref}} - 1 \right] * 1000$$

Afhankelijk van temperatuur  
en landijs volume

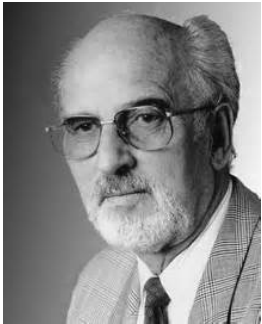
# Klimaatverandering op Groenland



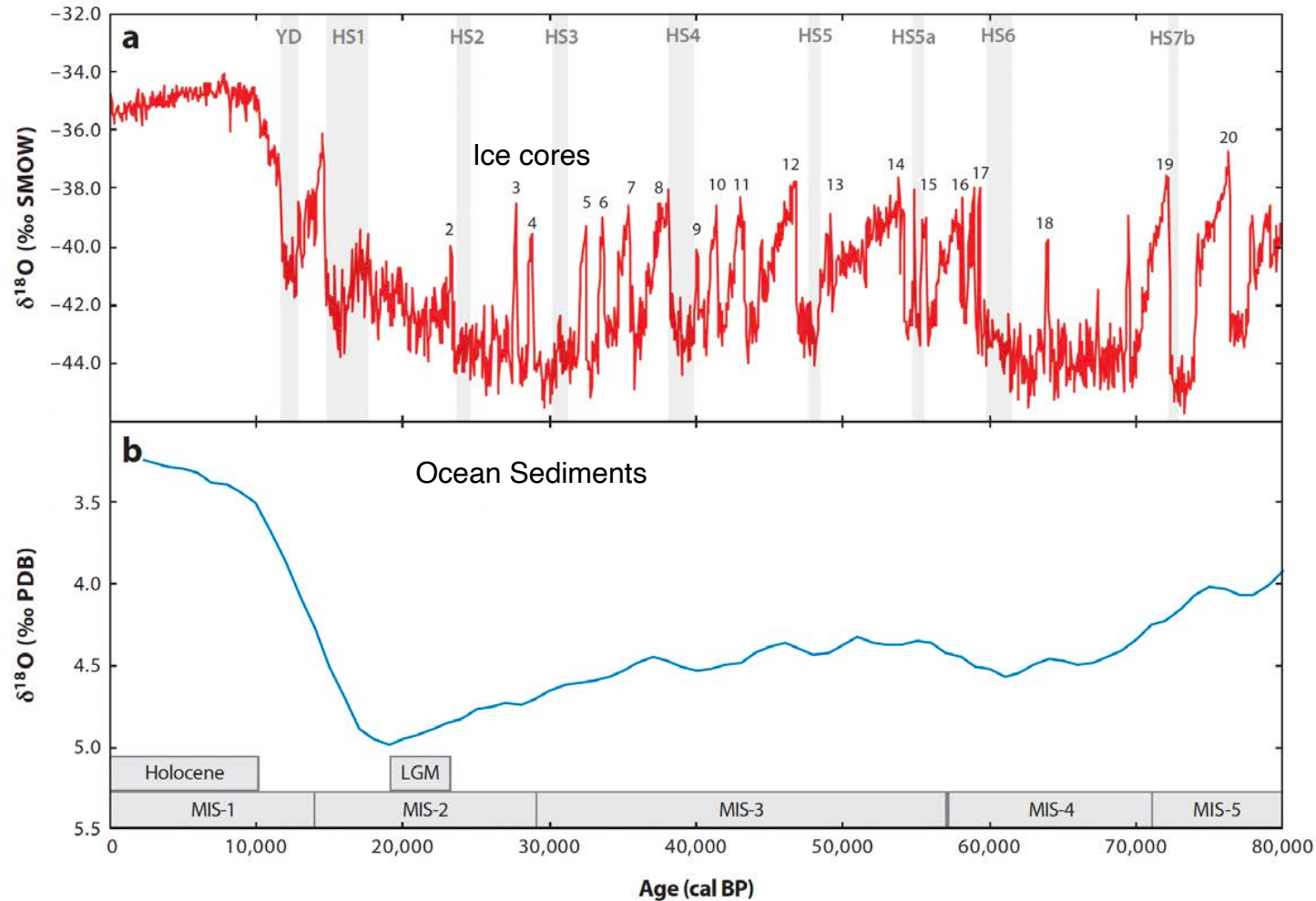
## Dansgaard-Oeschger events



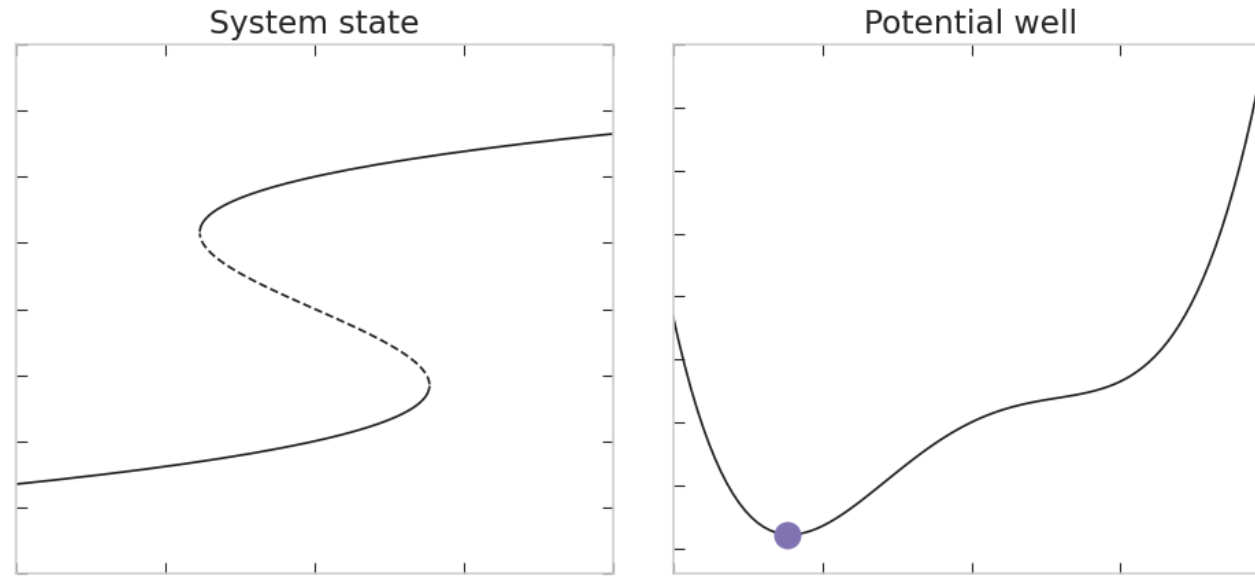
Dansgaard



Oeschger



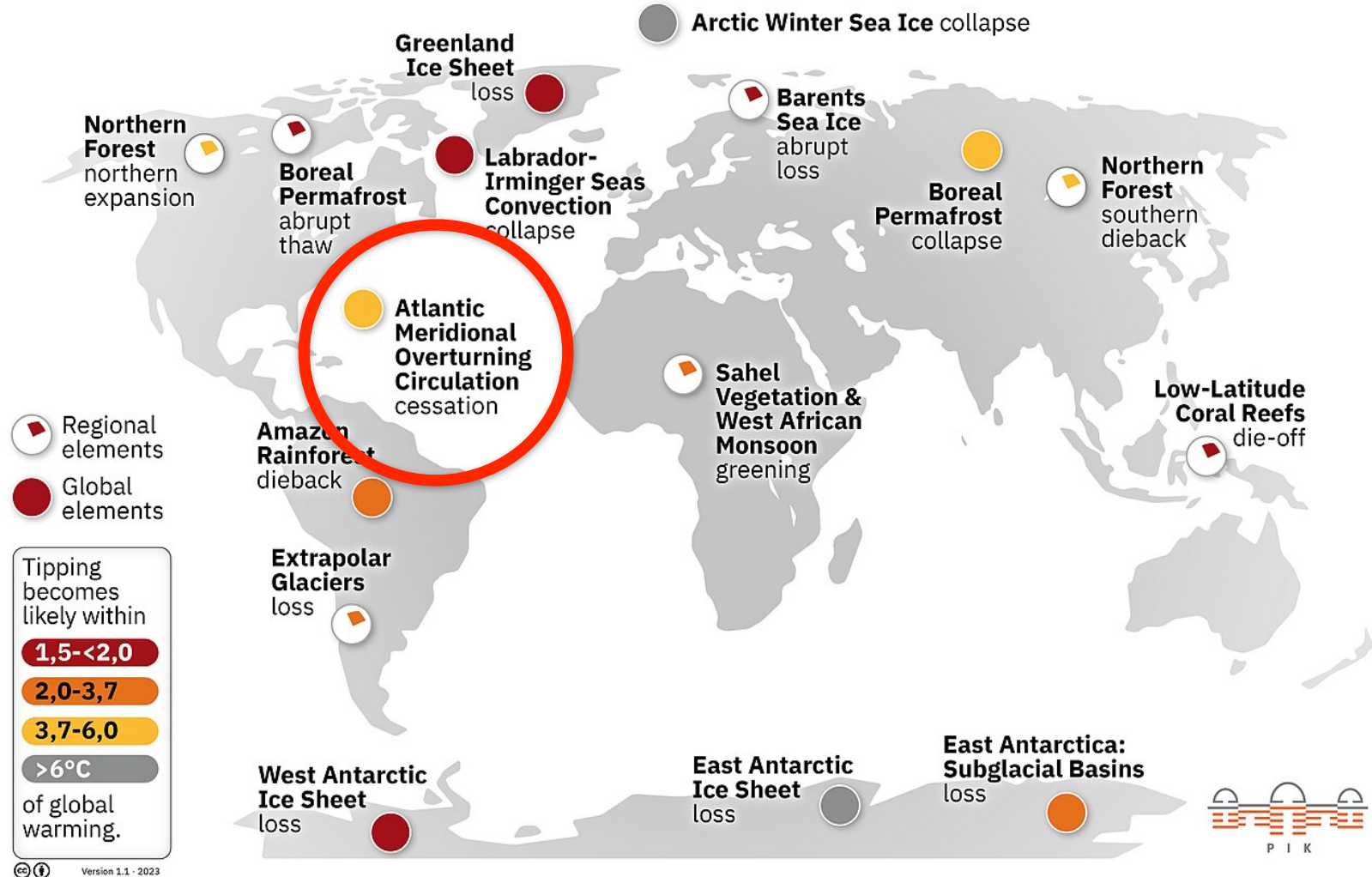
# *Abrupte verandering: kantelpunt*



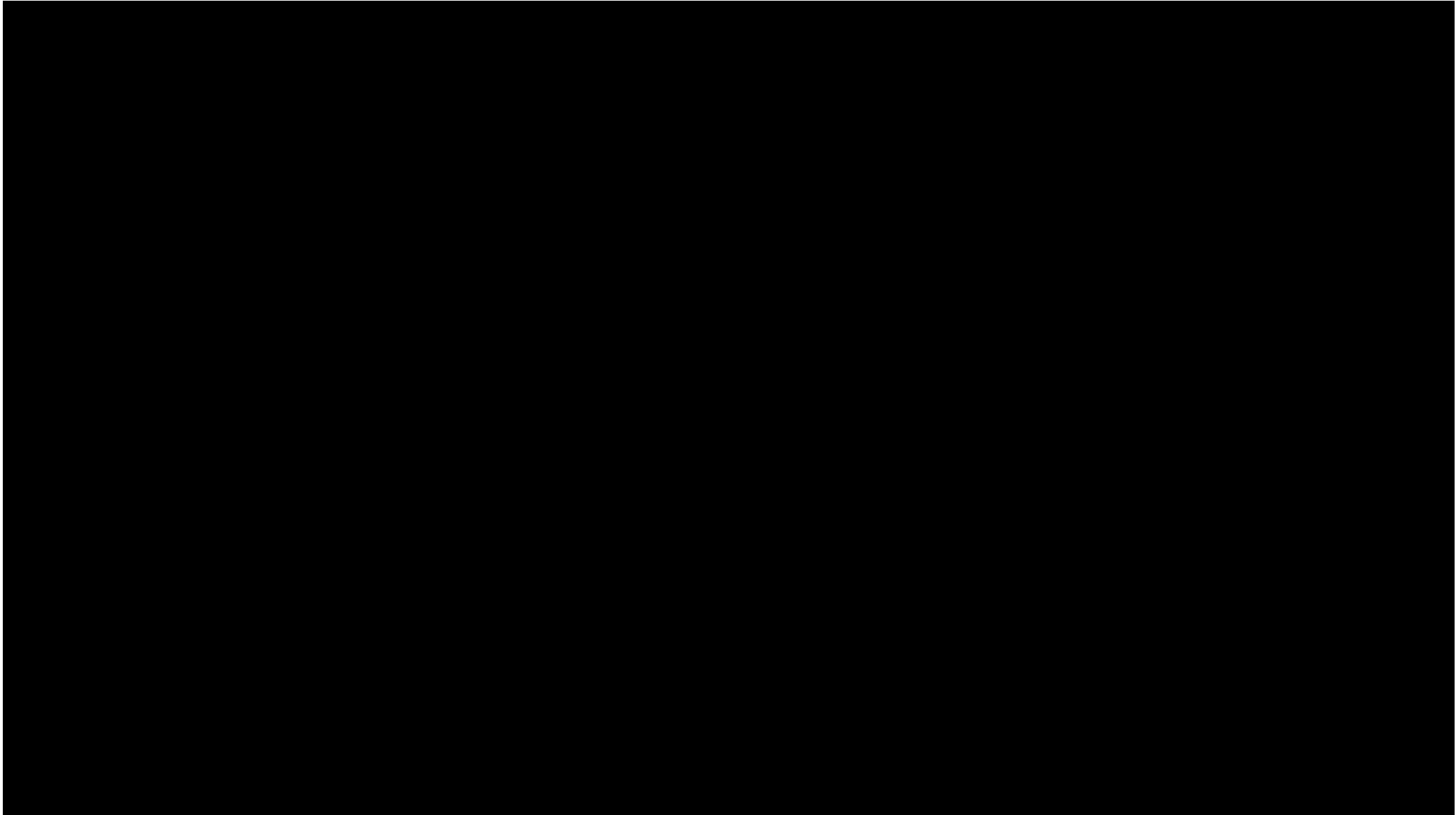
Parameter Verandering

Als een kantelpunt is bereikt dan kan er een transitie naar een andere toestand optreden door een positieve terugkoppeling

# Mogelijke kantelpunten in het Klimaatstelsel



# *Mondiale Oceaancirculatie*



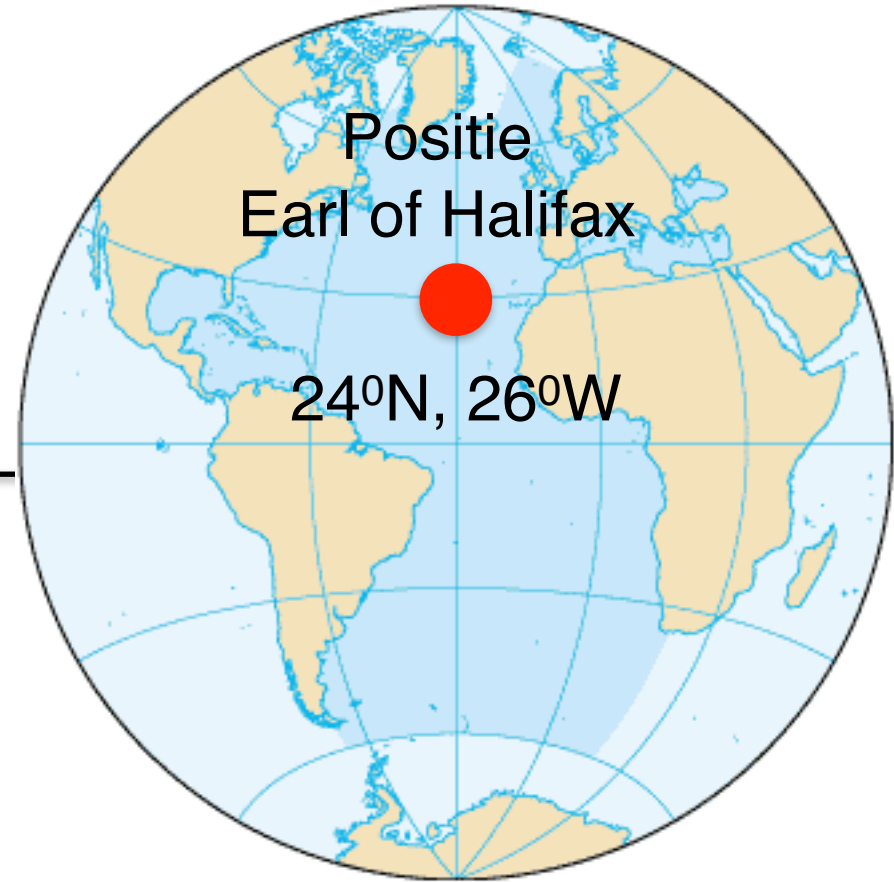
# *Een 'schokkende' observatie in het jaar 1751*



zee  
oppervlak

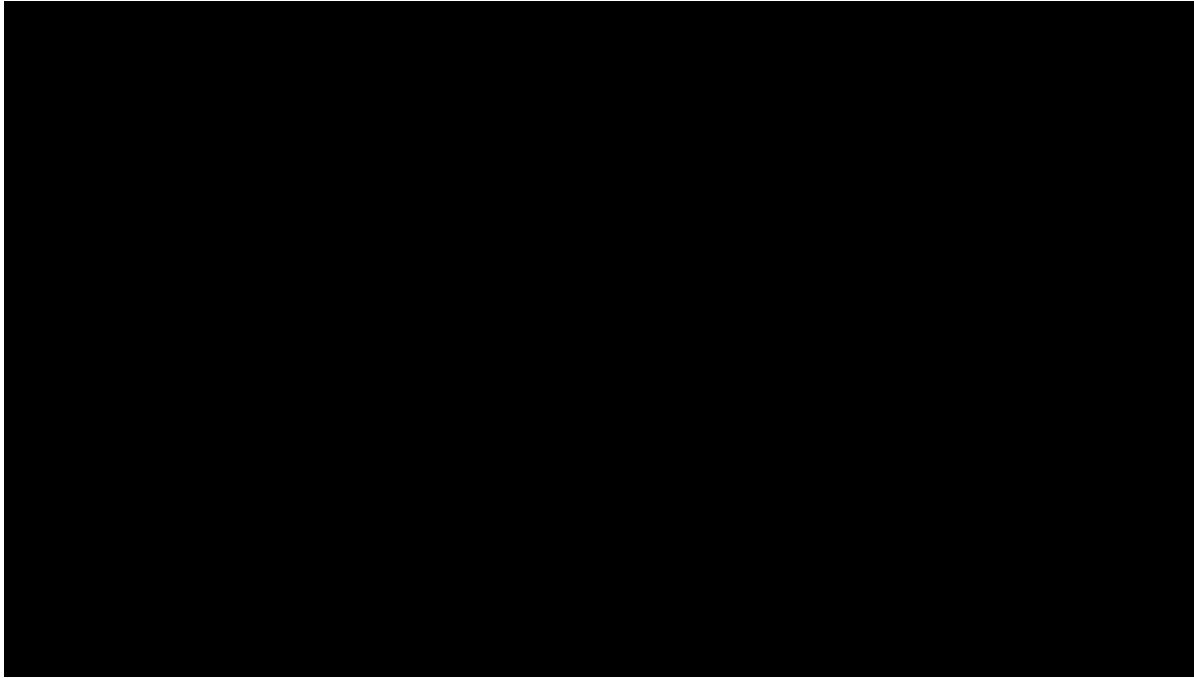


temperatuur ~ 11°C



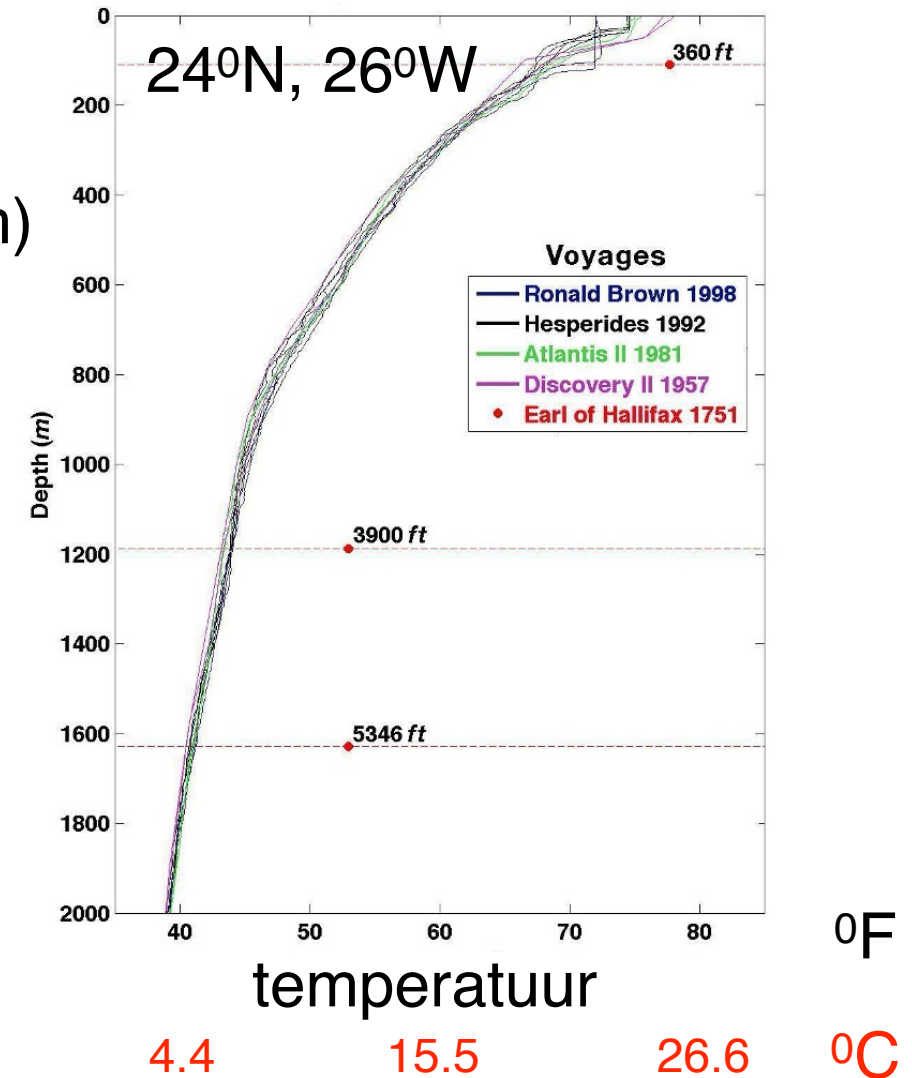
1200 m  
diepte

# *Het diepe oceaanwater is koud!*



Nauwkeurigheid:  
Temperatuur: 0.003 °C  
Zoutgehalte: 0.003 g/kg  
Diepte: 1 m

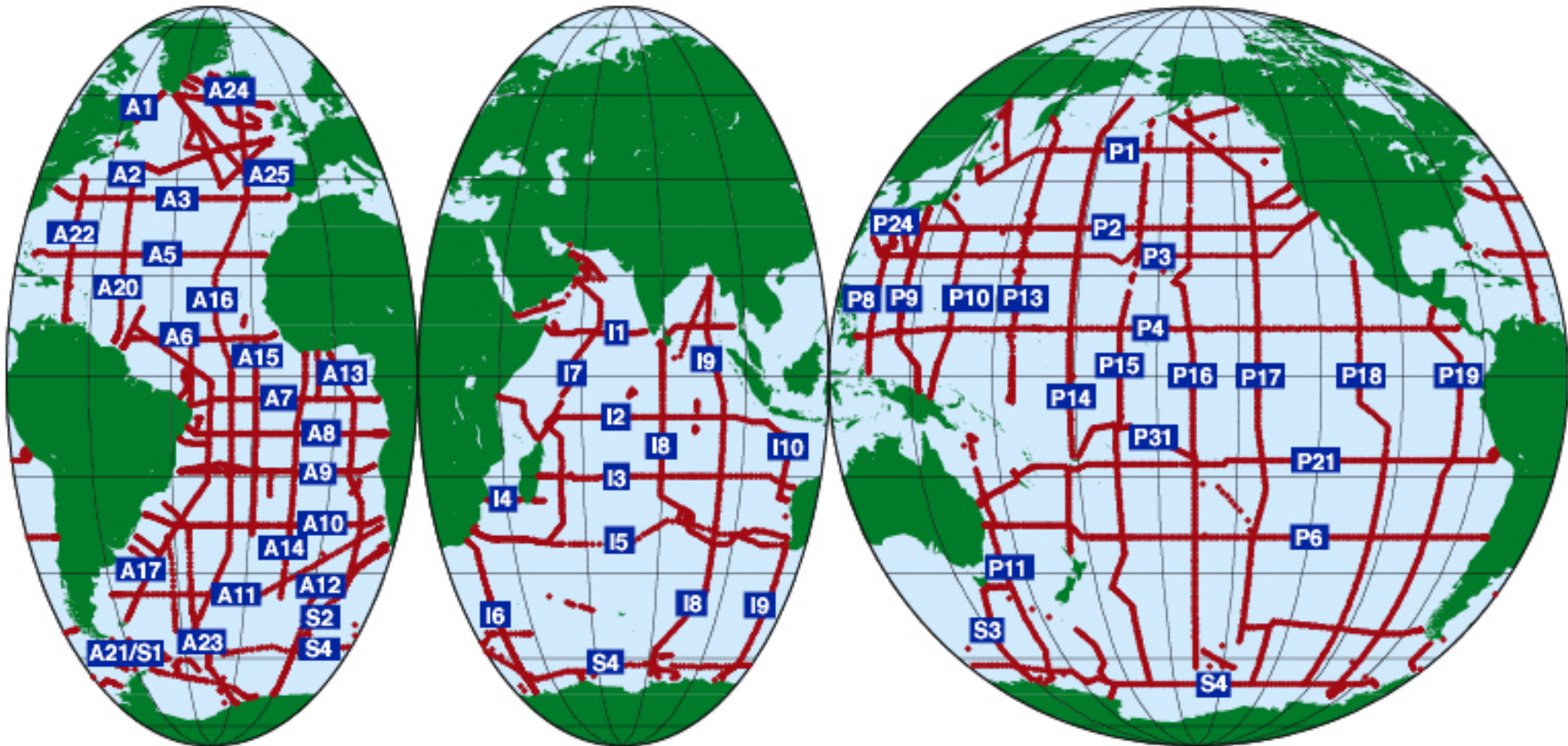
Diepte (m)



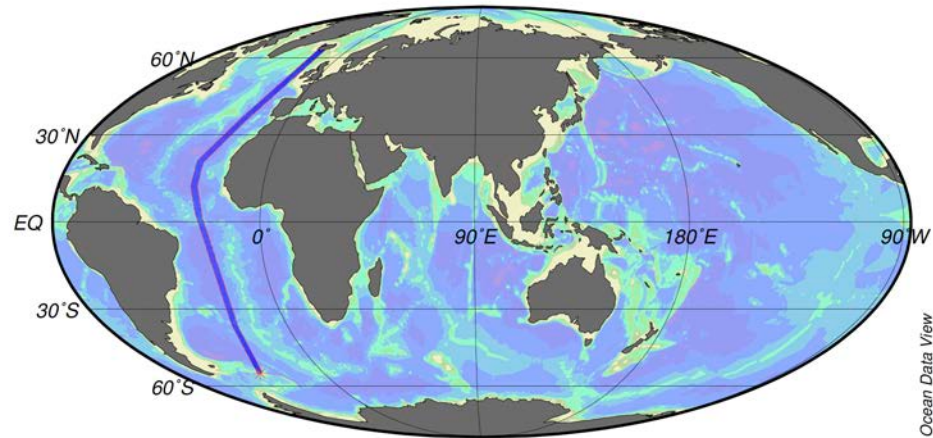


Utrecht  
University

# *World Ocean Circulation Experiment (1985-1995)*



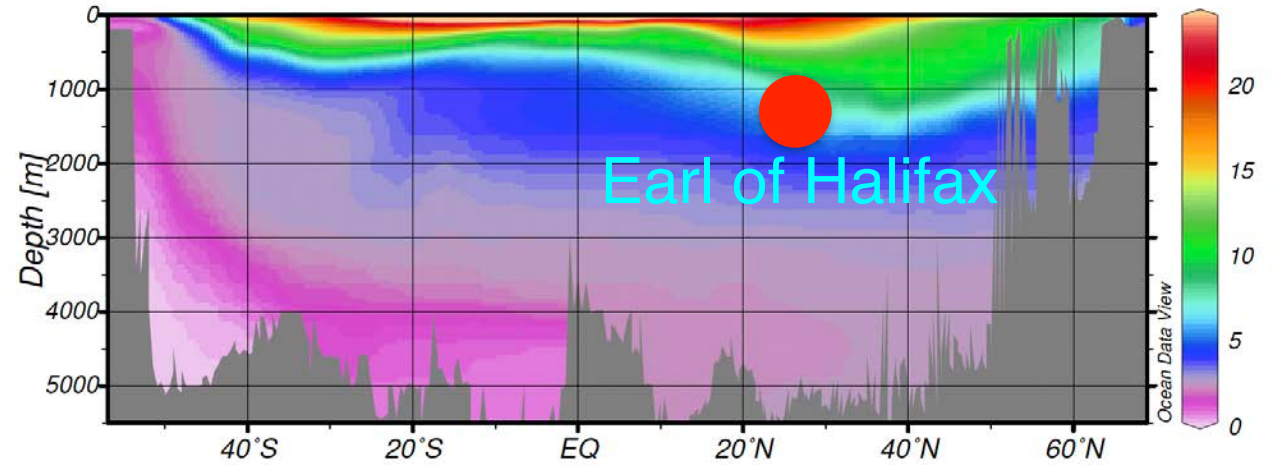
# Temperatuur en Zoutgehalte langs de A16 sectie



A16 sectie

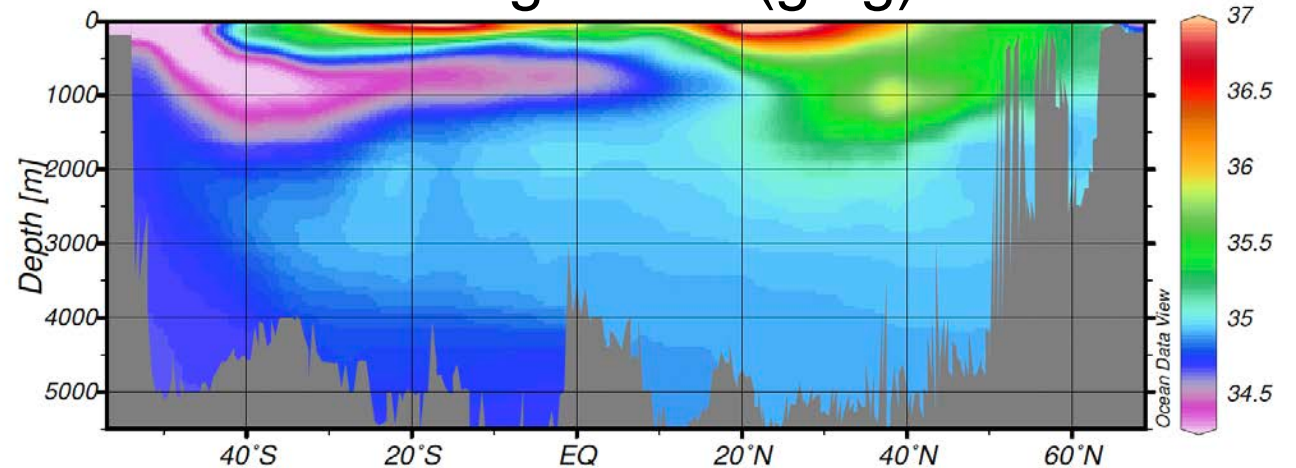
World Ocean Circulation Experiment

Temperatuur (°C)



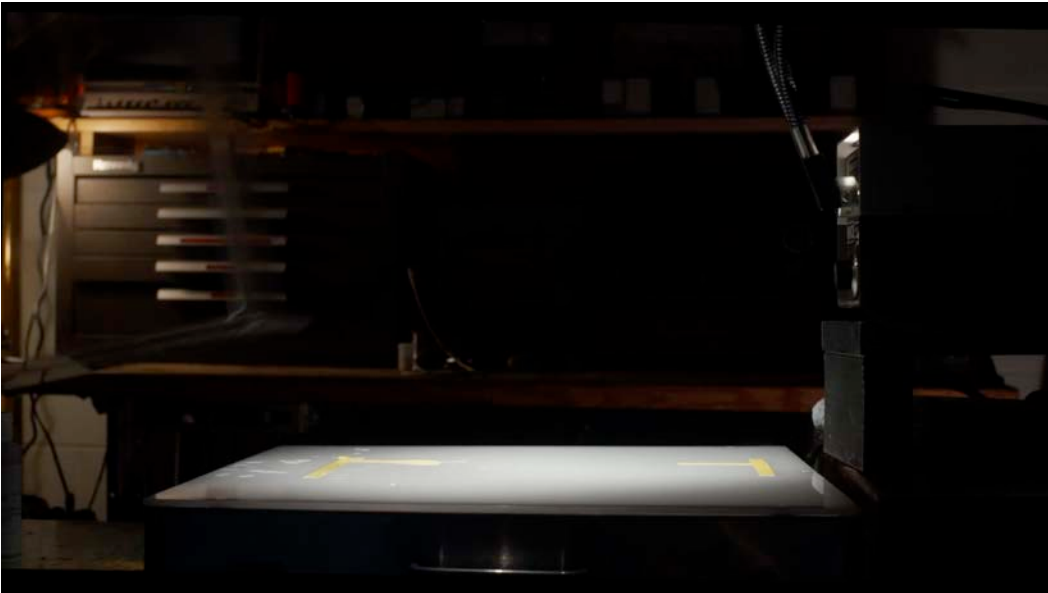
(a)

Zoutgehalte (g/kg)

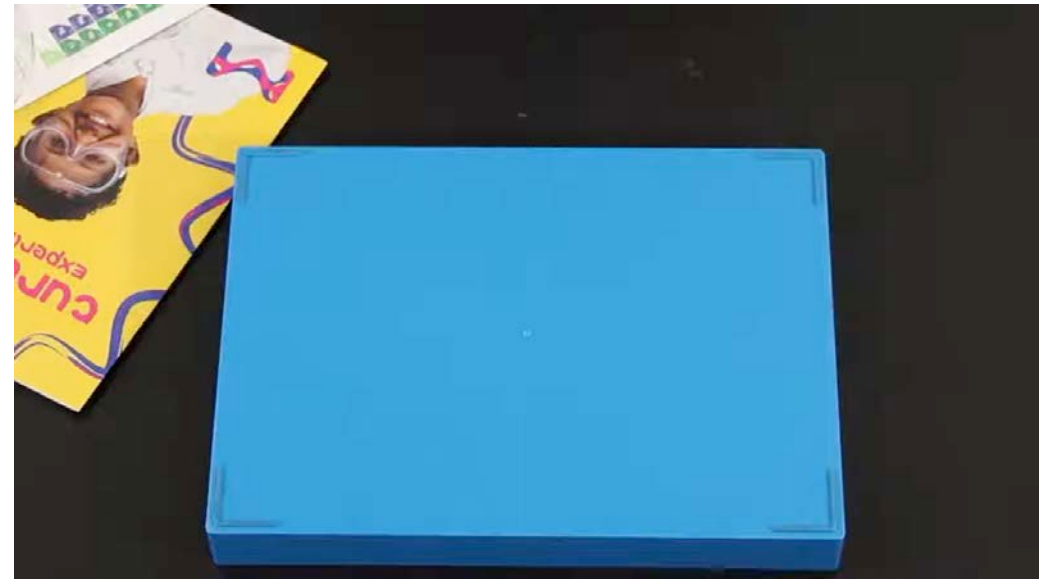


(b)

# *Temperatuur en Zoutgehalte bepalen de dichtheid van het water*



Koud water is  
zwaarder dan warm water

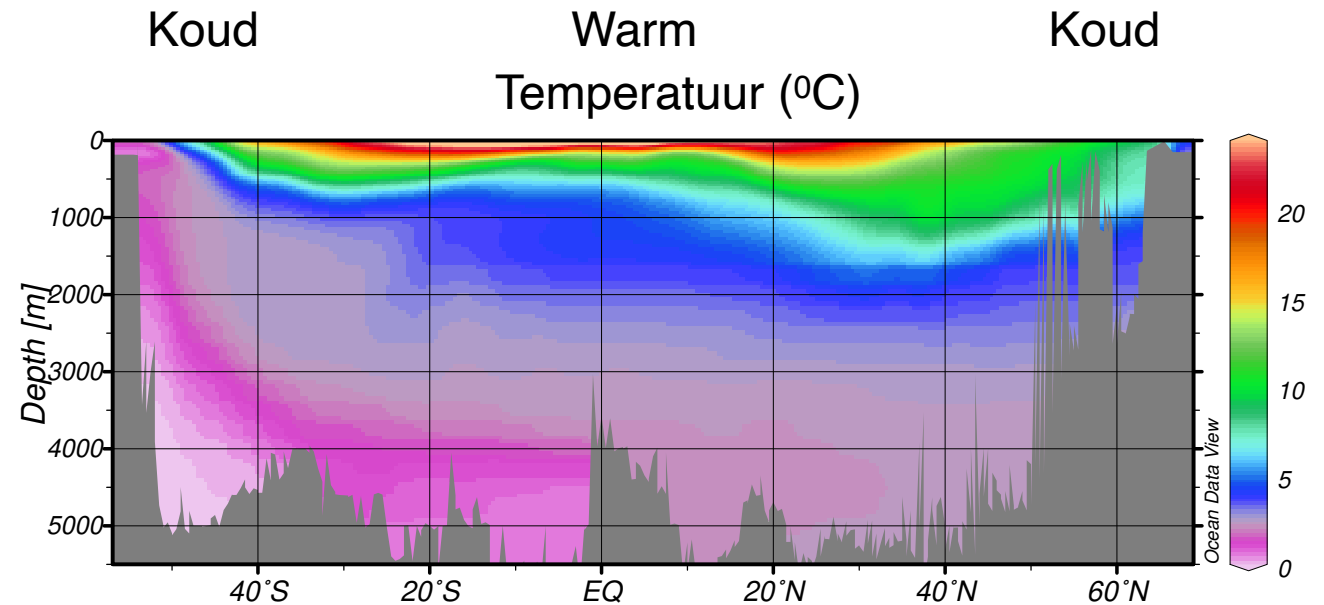
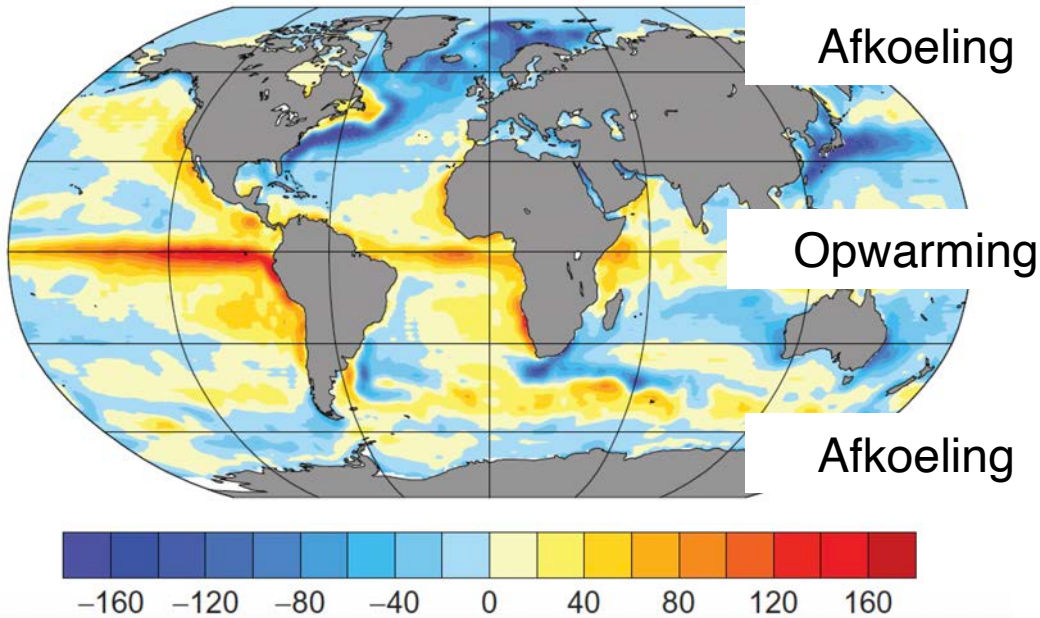


Zout water is  
zwaarder dan zoet water

# Invloed atmosfeer op de dichtheid van oceanwater: warmte

(b)

Mean heat flux 1984–2006 ( $\text{W/m}^2$ )



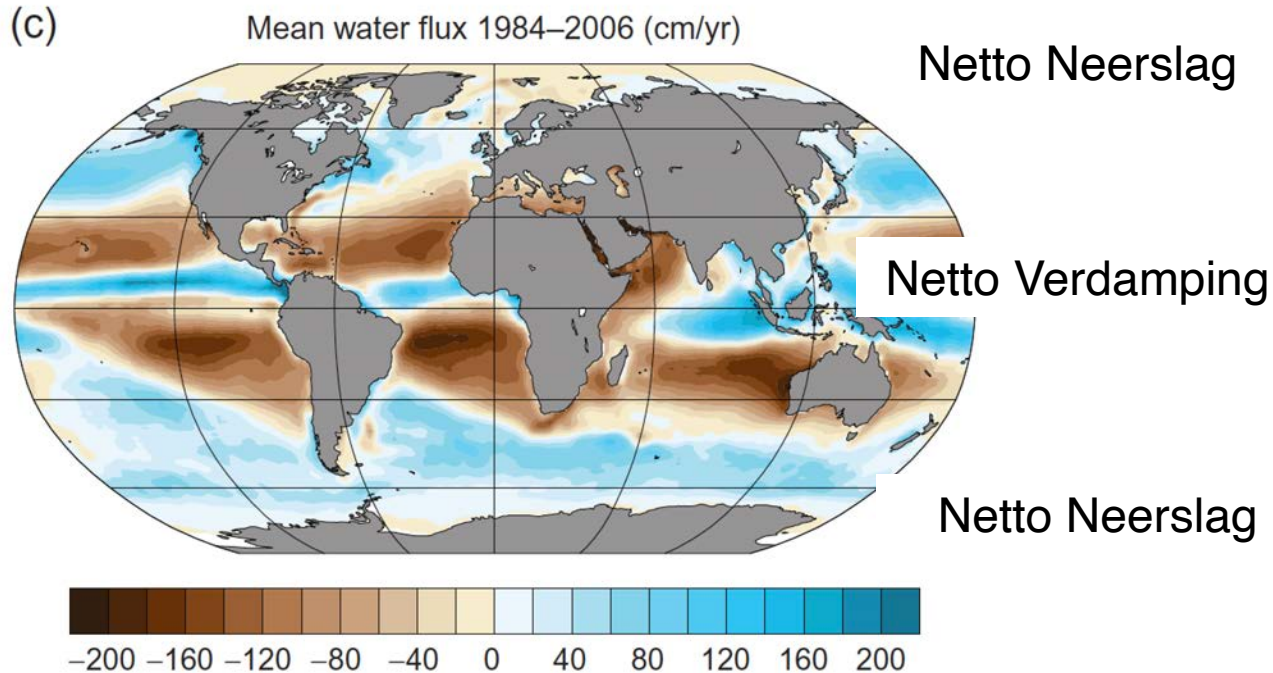
A16 sectie

World Ocean Circulation Experiment

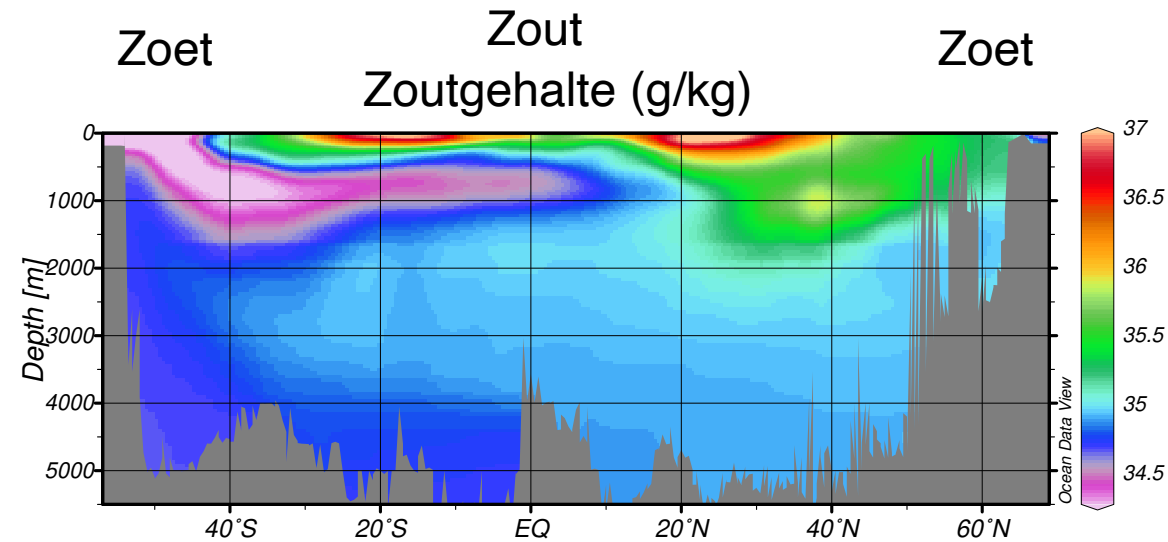


Utrecht  
University

# *Invloed atmosfeer op de dichtheid van oceanwater: verdamping/regenval*



Netto Verdamping - Neerslag (cm/jaar)  
gemiddelde 1984-2006



A16 sectie  
World Ocean Circulation Experiment

# *Dichtheidsverschillen leiden tot Oceaanstromingen*

Netto  
warmte opname

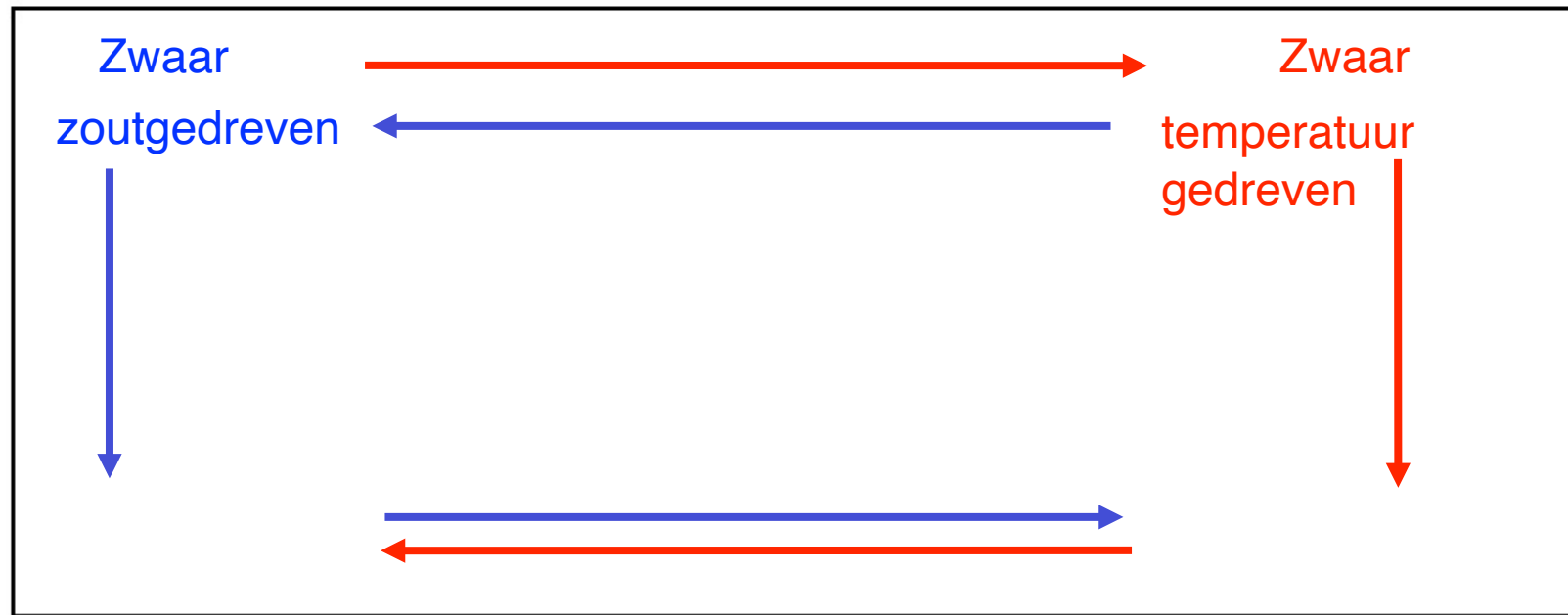
Netto  
zoetwater afvoer

Netto  
warmte afgifte

Netto  
zoetwater toevoer

T: temperatuur

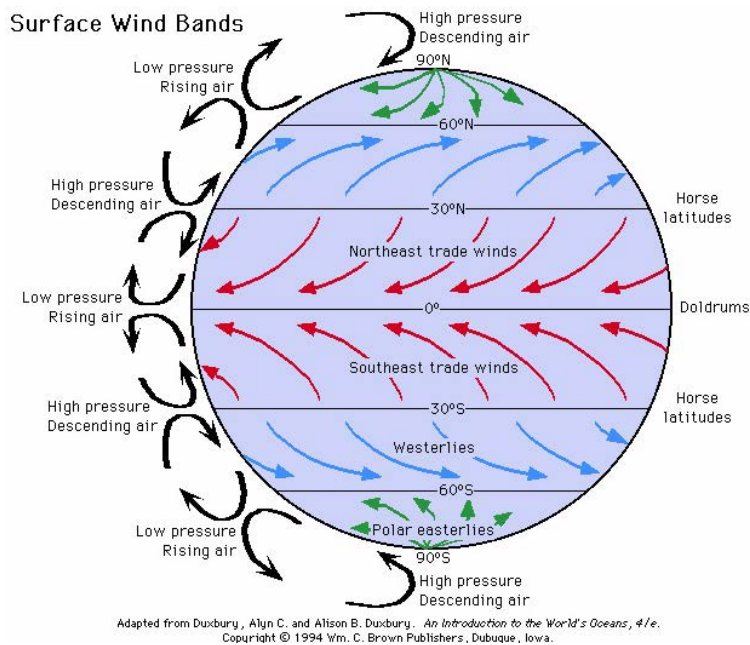
S: zoutgehalte



Equator

Noord

# Atlantische Oceaancirculatie: Wind- en dichtheidsgedreven



Oppervlakte  
winden



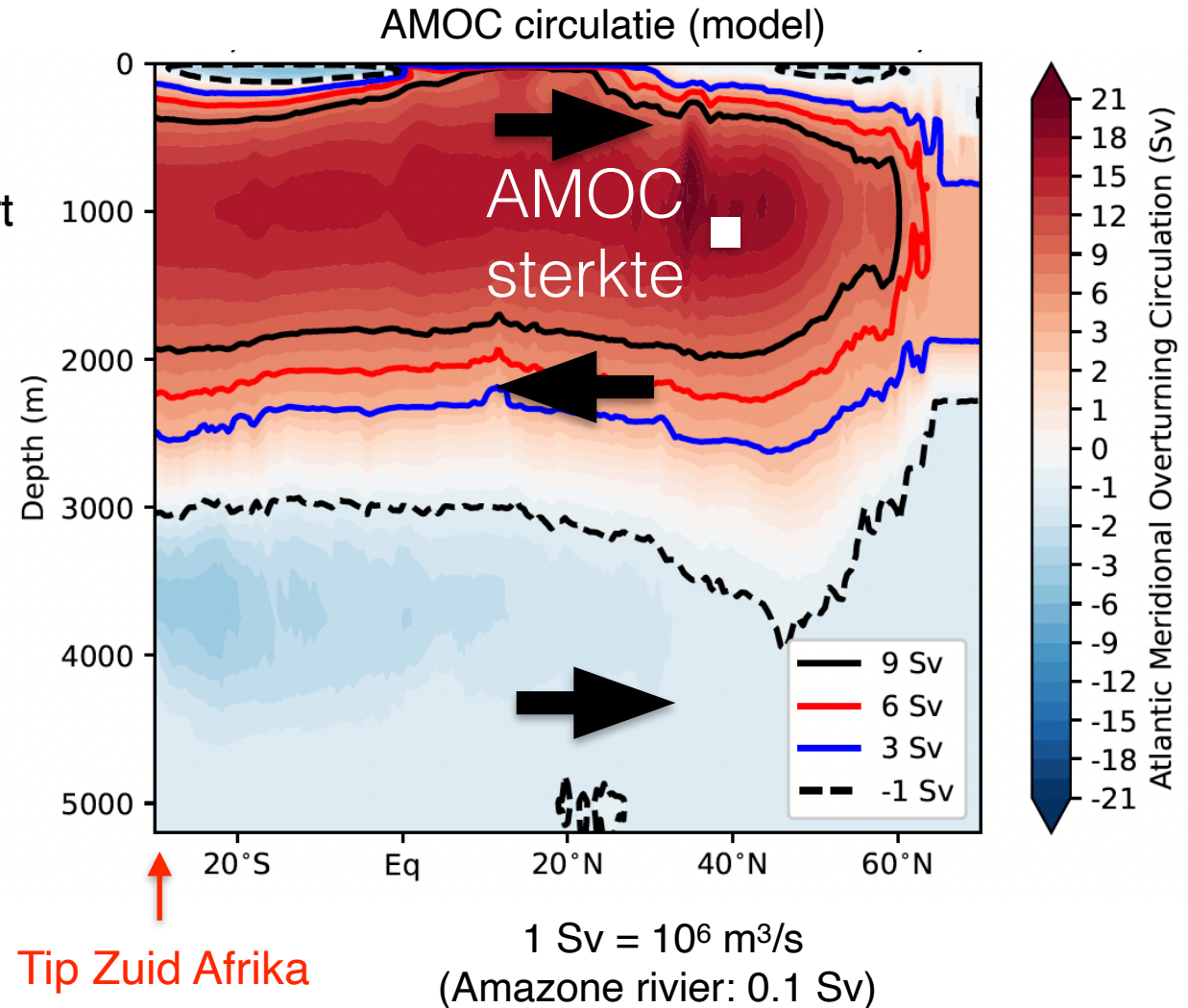
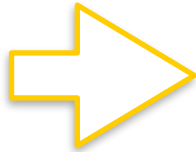
courtesy: WHOI

# De Warme Golfstroom

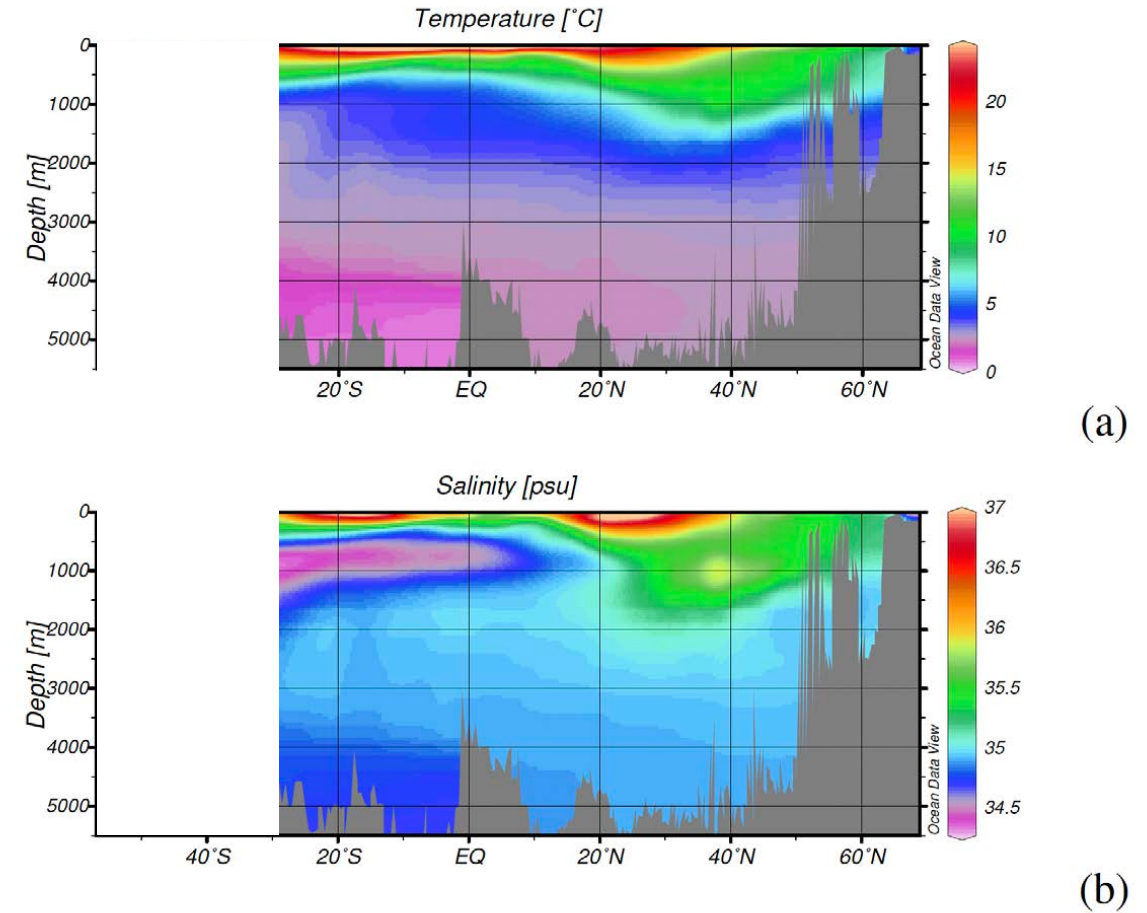
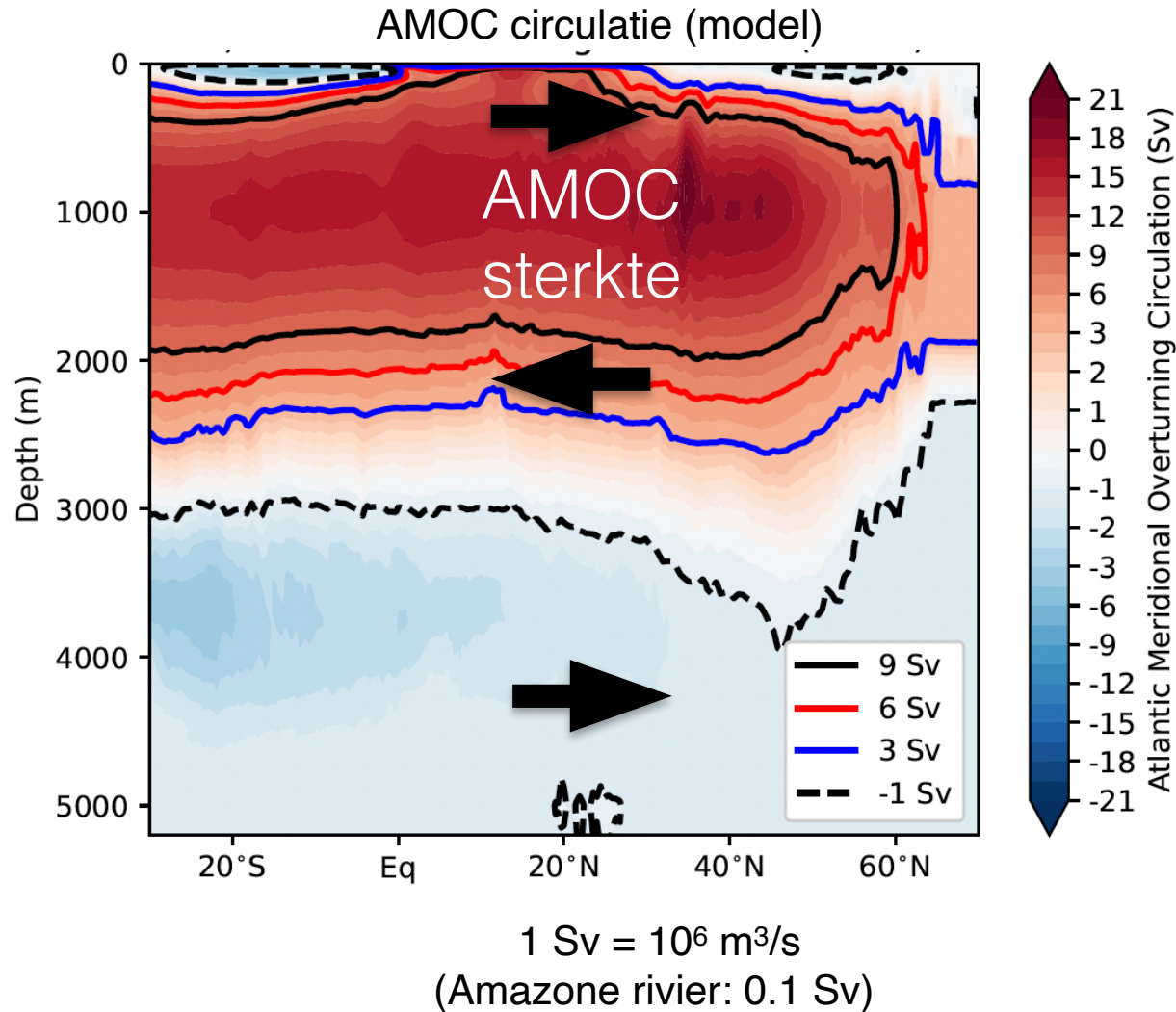
## Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)



Volume transport  
door oost-west  
sectie

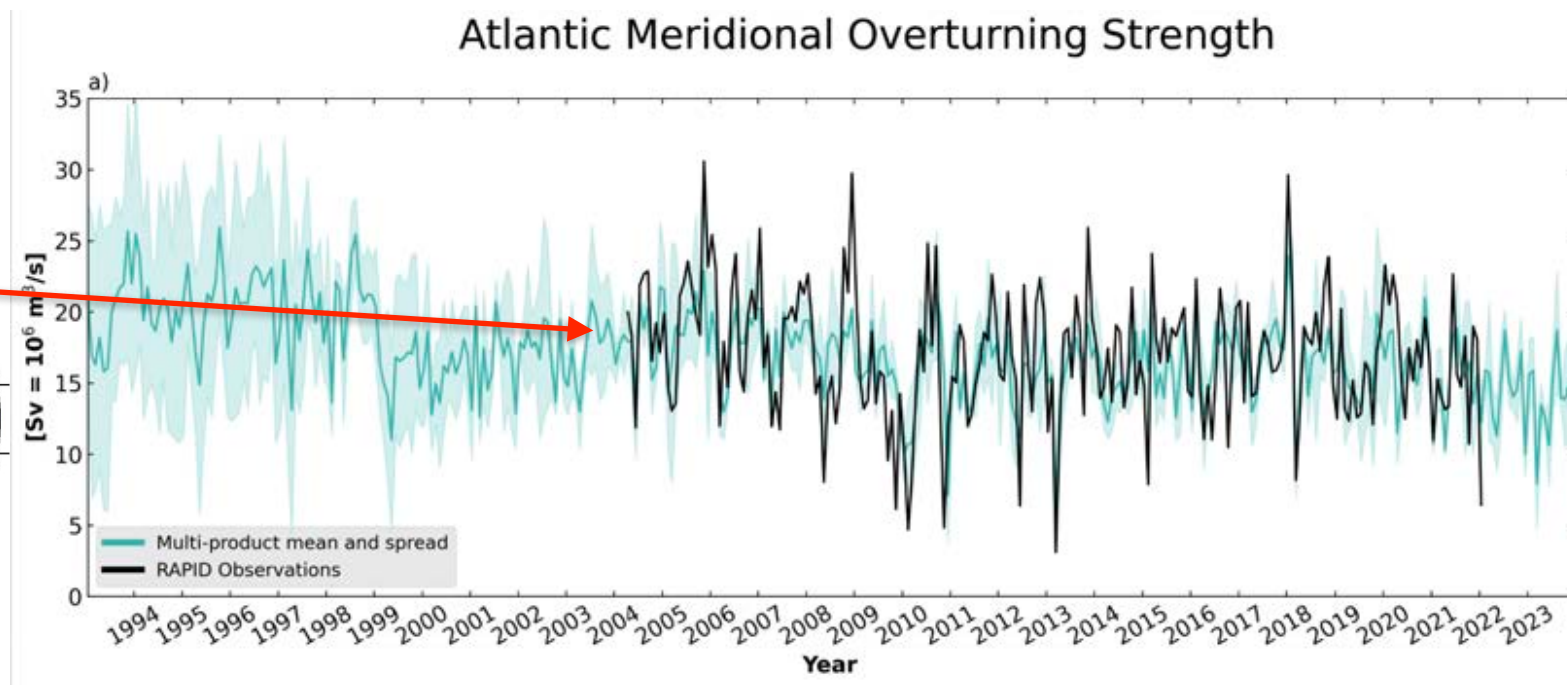
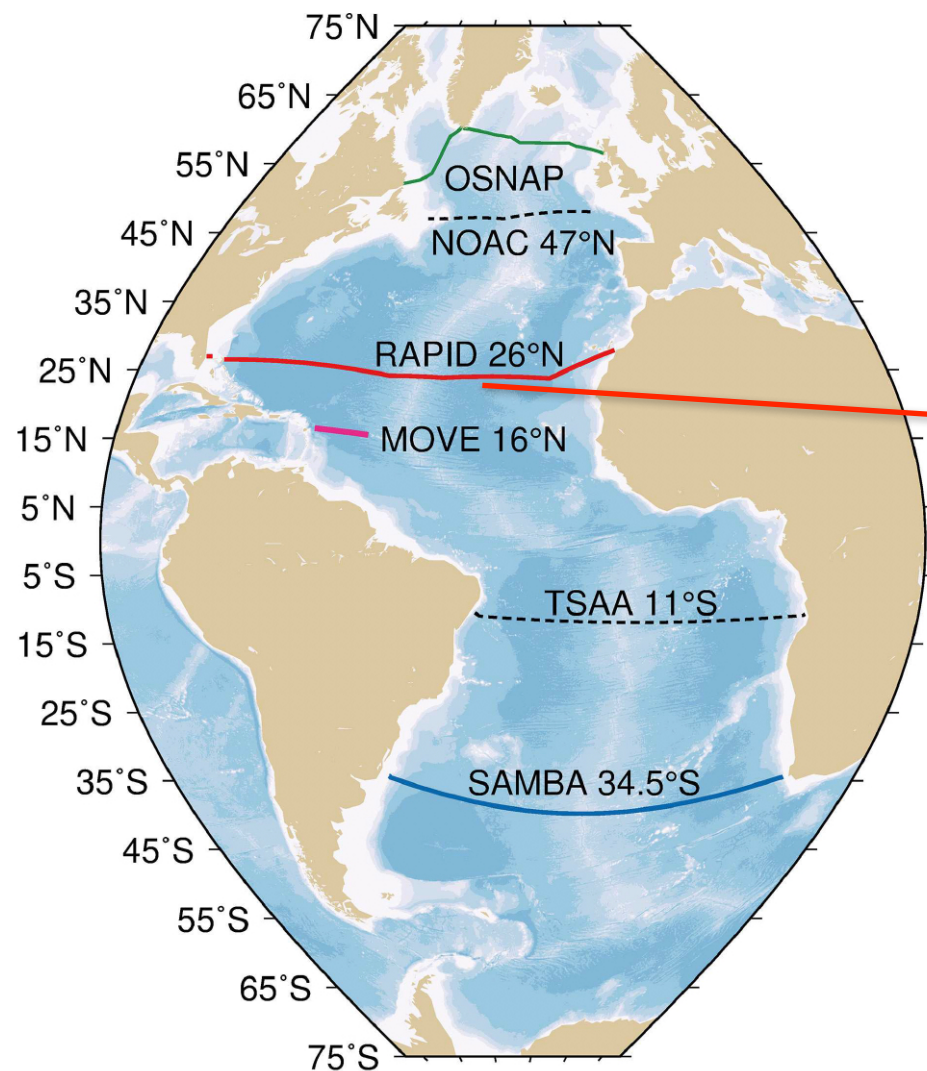


# *De AMOC en temperatuur/zout observaties*



A16 sectie  
World Ocean Circulation Experiment

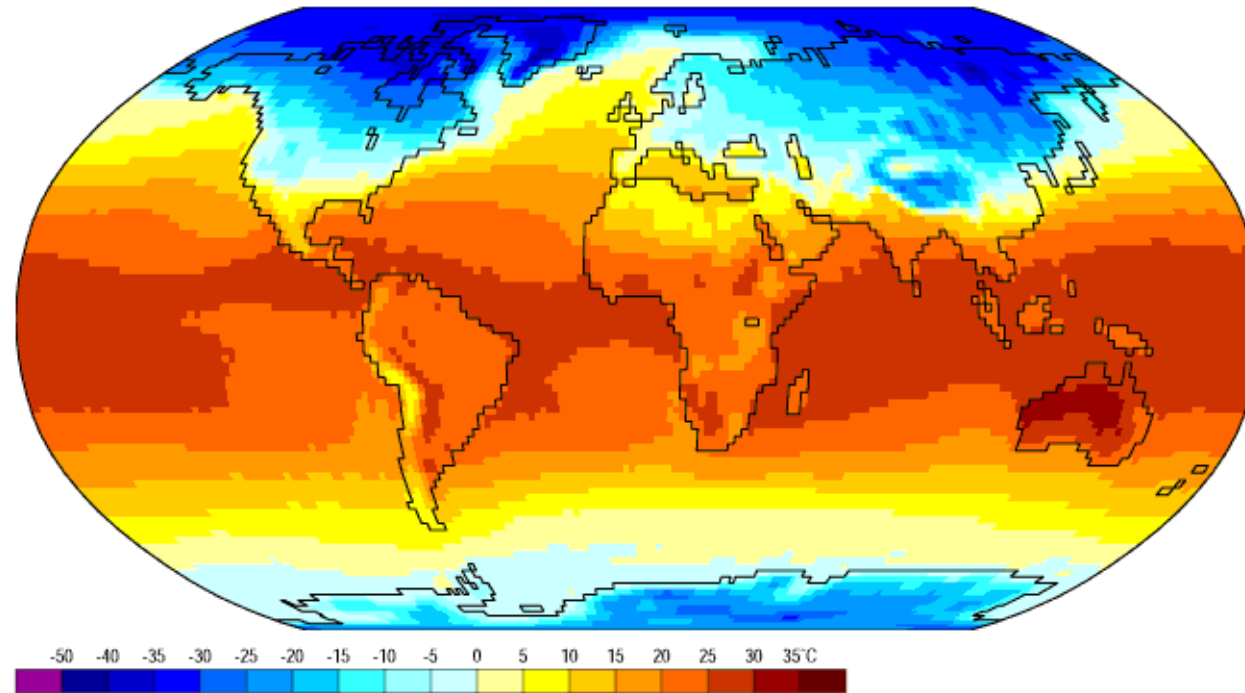
# AMOC observations



Gemiddeld:  $\sim 16.9 \pm 1.2 \text{ Sv}$

# *De AMOC transporteert warmte naar het noorden*

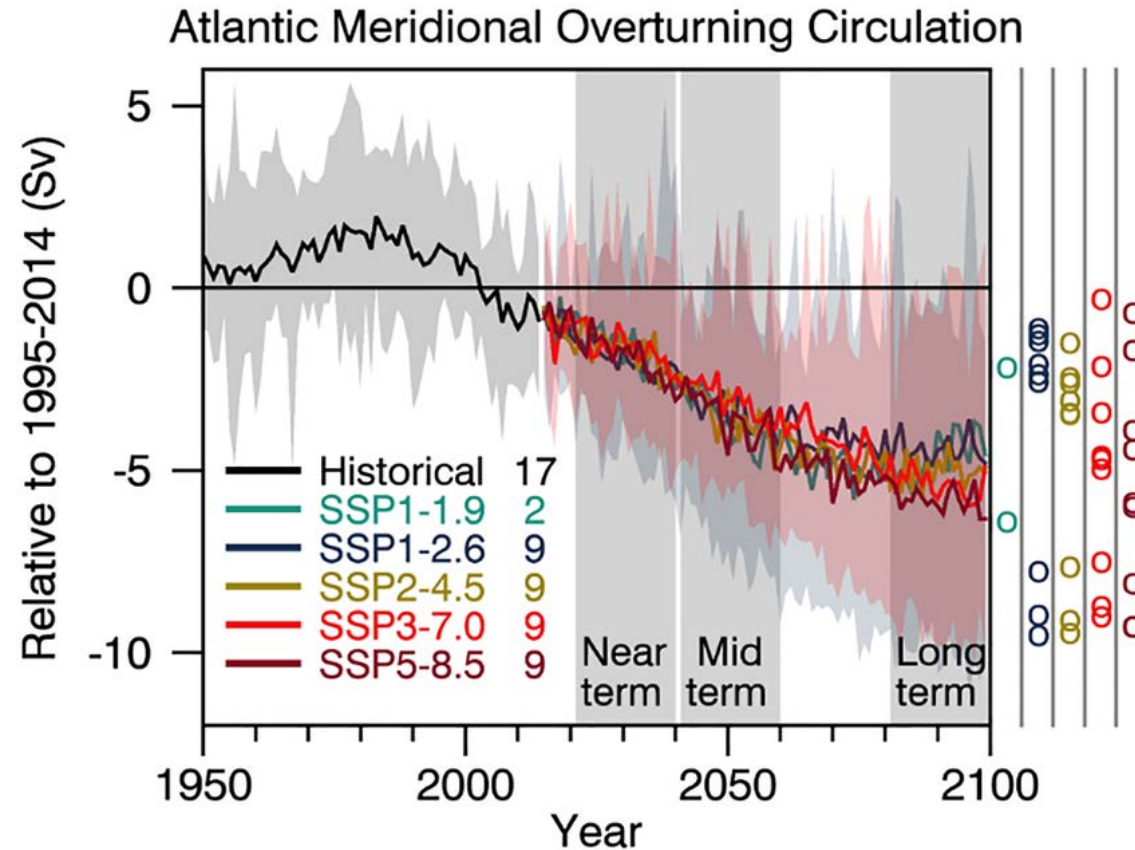
Gemiddelde Januari Oppervlakte Temperatuur



Data: NCEP/NCAR Reanalysis Project, 1959-1997 Climatologies

Het Noordelijk Halfrond is (jaarlijks gemiddeld) ongeveer 1.4 °C warmer dan het Zuidelijk Halfrond

# AMOC Projecties (CMIP6)



IPCC (AR6): The Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC) will very likely decline over the 21st century for all SSP scenarios. [There is medium confidence that the decline will not involve an abrupt collapse before 2100.](#)

# Recente (alarmerende) artikelen

## ARTICLES

<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>

nature  
climate change

Check for updates

### Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation

Niklas Boers<sup>1,2,3</sup> ✉

Juni 2021

nature communications



Article

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>

### Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation

Received: 3 March 2023

Peter Ditlevsen<sup>1,3</sup> ✉ & Susanne Ditlevsen<sup>2,3</sup> ✉

Accepted: 29 June 2023

Juli 2023

SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

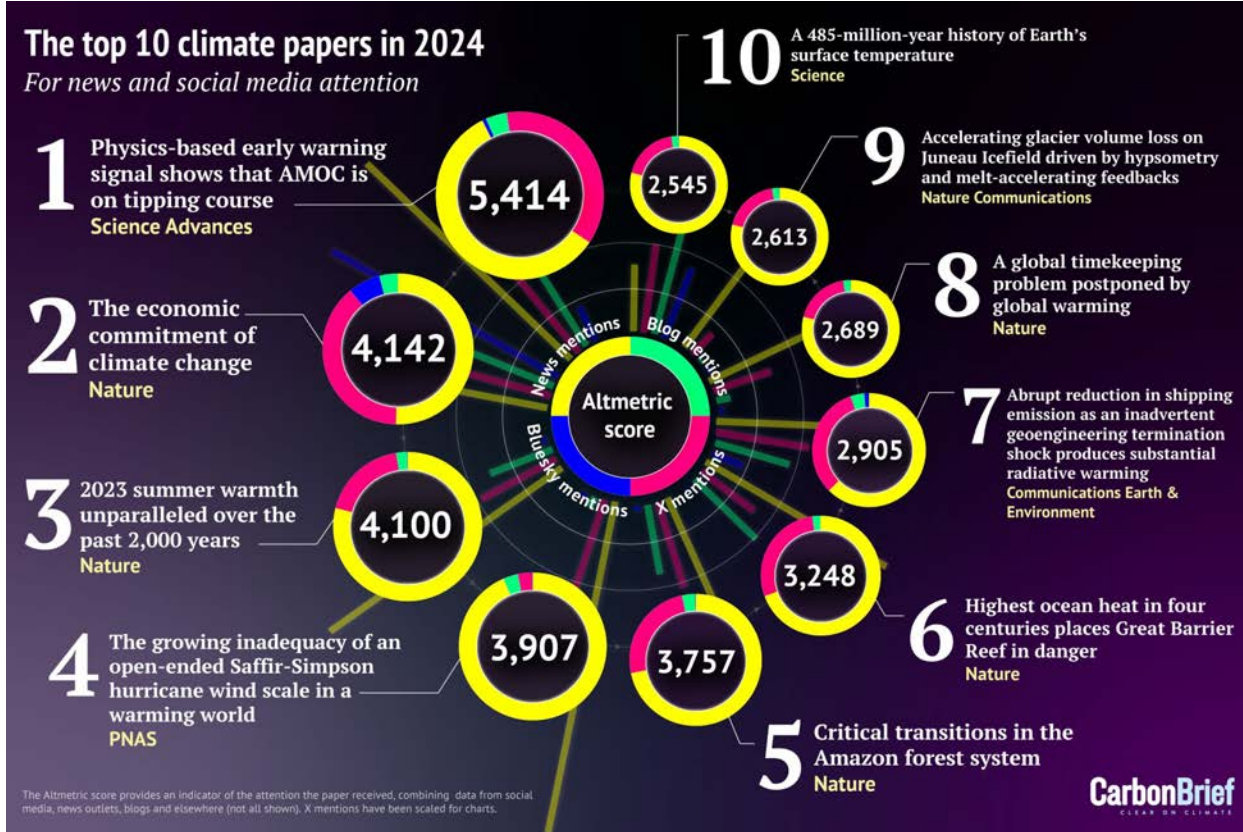
OCEANOGRAPHY

### Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course

René M. van Westen\*, Michael Kliphuis, Henk A. Dijkstra

Februari 2024

# AMOC stabiliteit: een 'hot topic'



## The Washington Post

### Why this is one of the planetary shifts scientists are most worried about



By Sarah Kaplan

Updated February 9, 2024 at 3:10 p.m. EST | Published February 9, 2024 at 2:00 p.m. EST

Altmetric  
Ranking: 9-4-2025

ALL RESEARCH OUTPUTS

#727

of 28,065,375 outputs

OUTPUTS FROM SCIENCE ADVANCES

#6

of 14,963 outputs

OUTPUTS OF SIMILAR AGE

#12

of 415,428 outputs

OUTPUTS OF SIMILAR AGE FROM SCIENCE ADVANCES

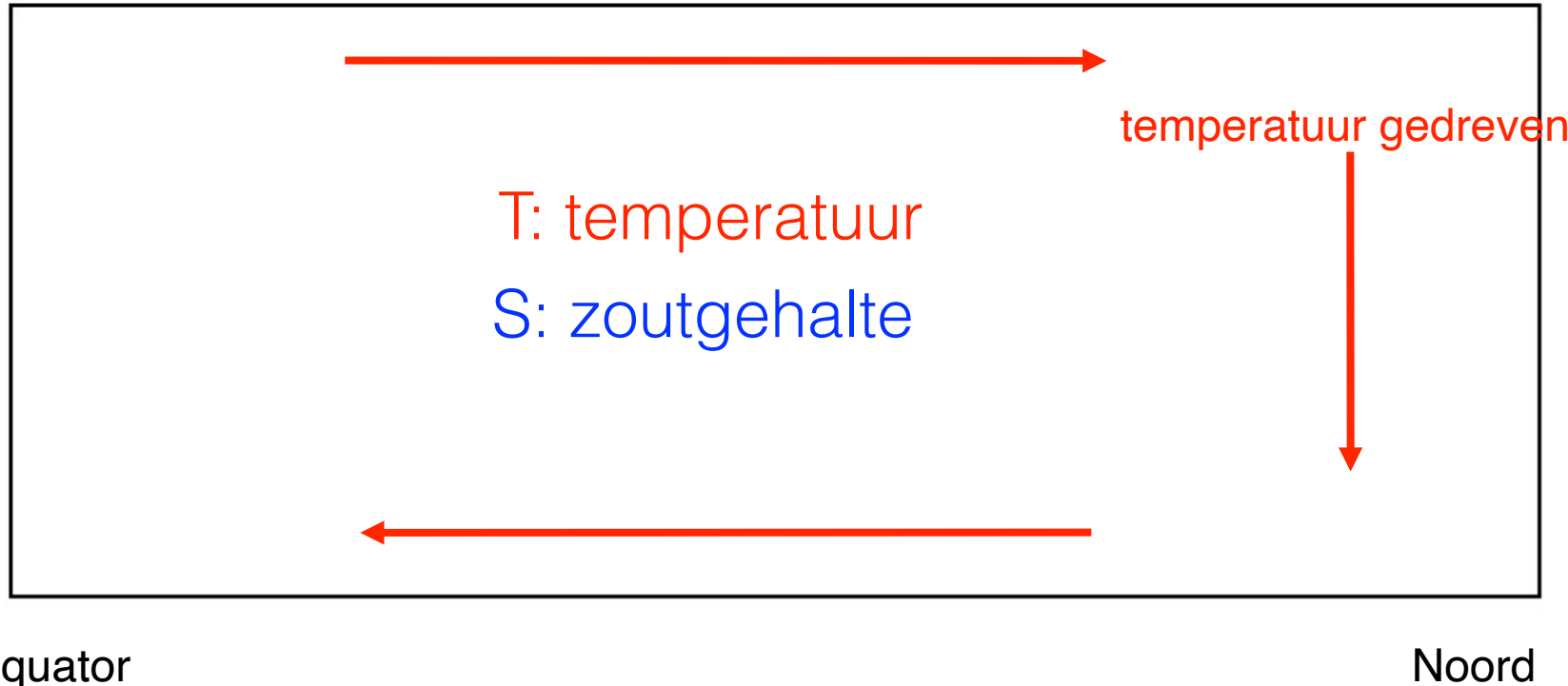
#1

of 504 outputs

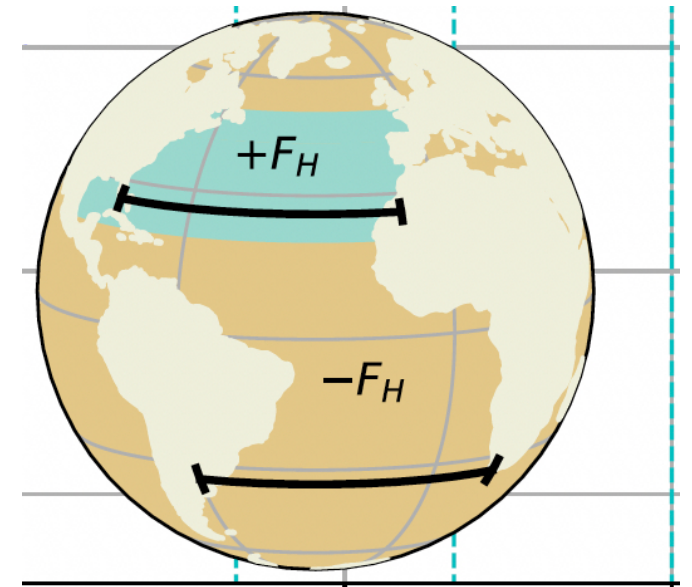
Altmetric has tracked 28,065,375 research outputs across all sources so far. Compared to these this one has done particularly well and is in the 99th percentile: it's in the top 5% of all research outputs ever tracked by Altmetric.

# *Experiment klimaatmodel*

Extra  
zoetwater toevoer



Extra  
zoetwater toevoer



Compensatie voor totaal  
zoutgehalte

# *Stilvallen van de AMOC in een modern klimaatmodel (pre-industriële condities)*

**Resolutie:**

1<sup>o</sup> oceaan/ijs

2<sup>o</sup> atmosfeer/land

**Forcing:**

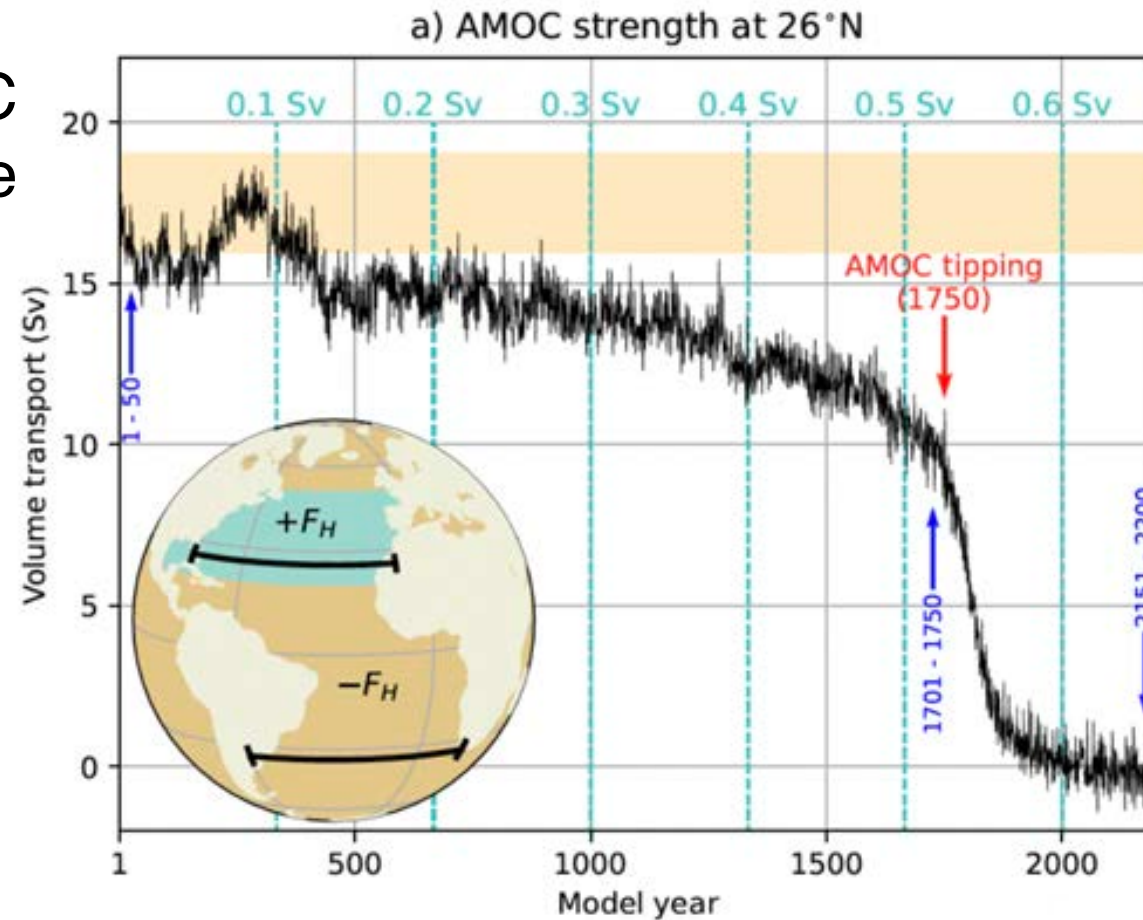
Zon + CO<sub>2</sub>

pre-industriëel

**Toevoer zoetwater:**

0.0003 Sv/jaar

AMOC  
sterkte



← Sterkte extra  
zoetwater toevoer

Geen kalenderjaren!

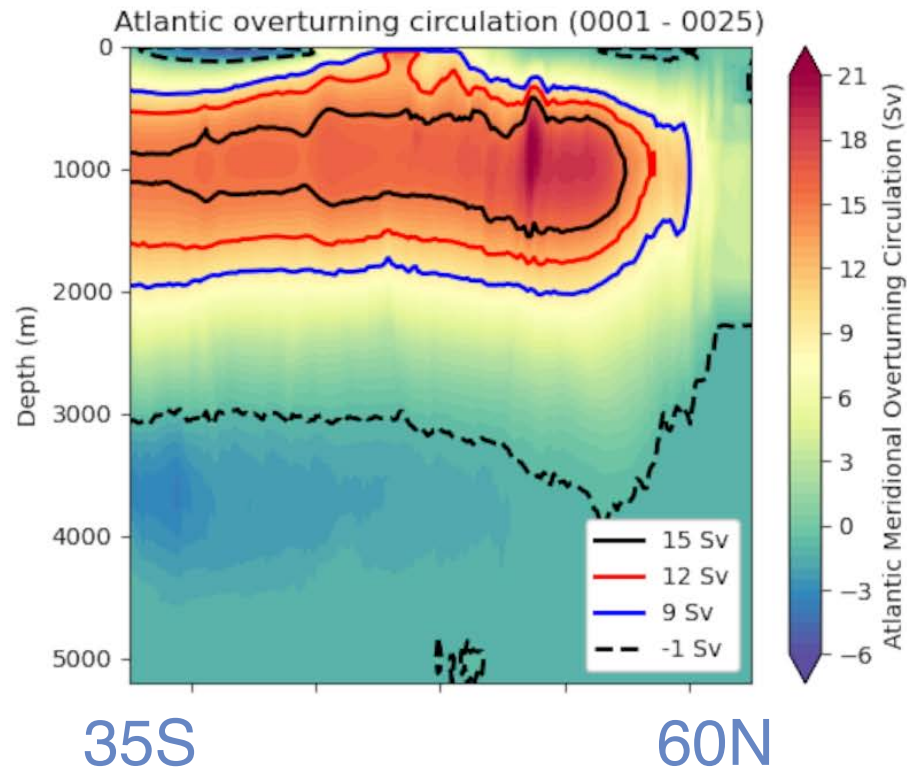
SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

OCEANOGRAPHY

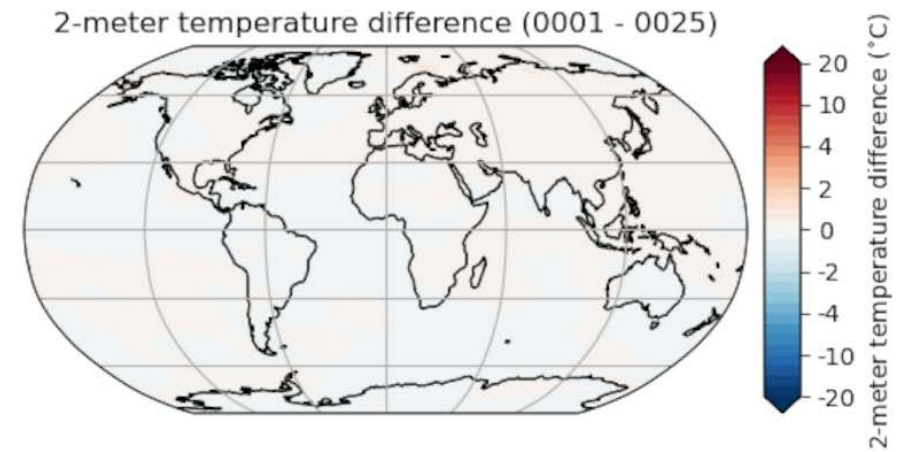
Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course

René M. van Westen<sup>\*</sup>, Michael Kliphuis, Henk A. Dijkstra

# *Gevolgen oppervlakte temperatuur (pre-industriële condities)*



AMOC afzwakking  
Ineenstorting model jaar ~1750

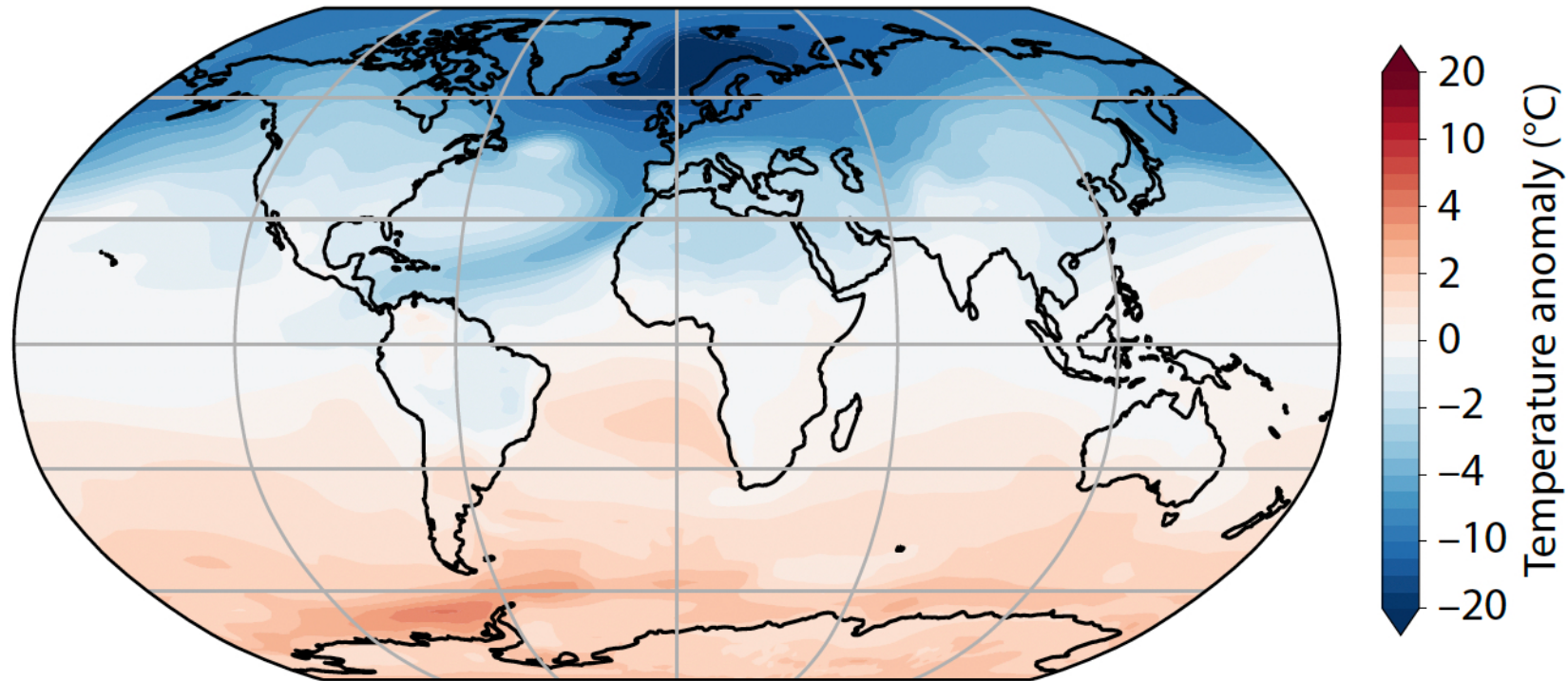


Oppervlakte temperatuur atmosfeer:  
Verschil met begin condities



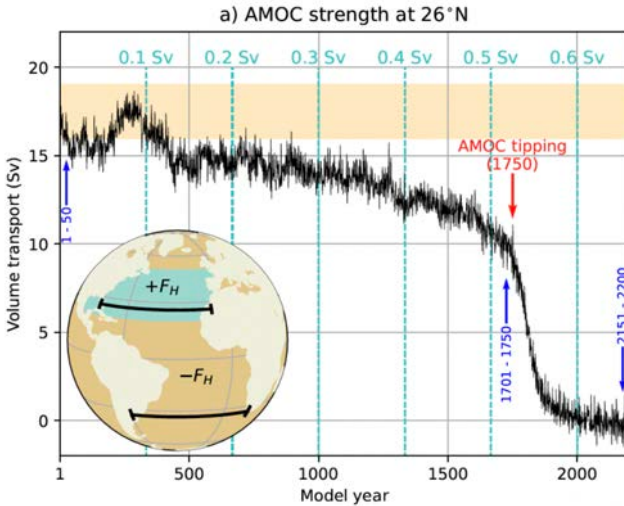
Utrecht  
University

# *Pre-industriële atmosferische oppervlakte temperatuur verandering door AMOC ineenstorting*



Jaargemiddelde

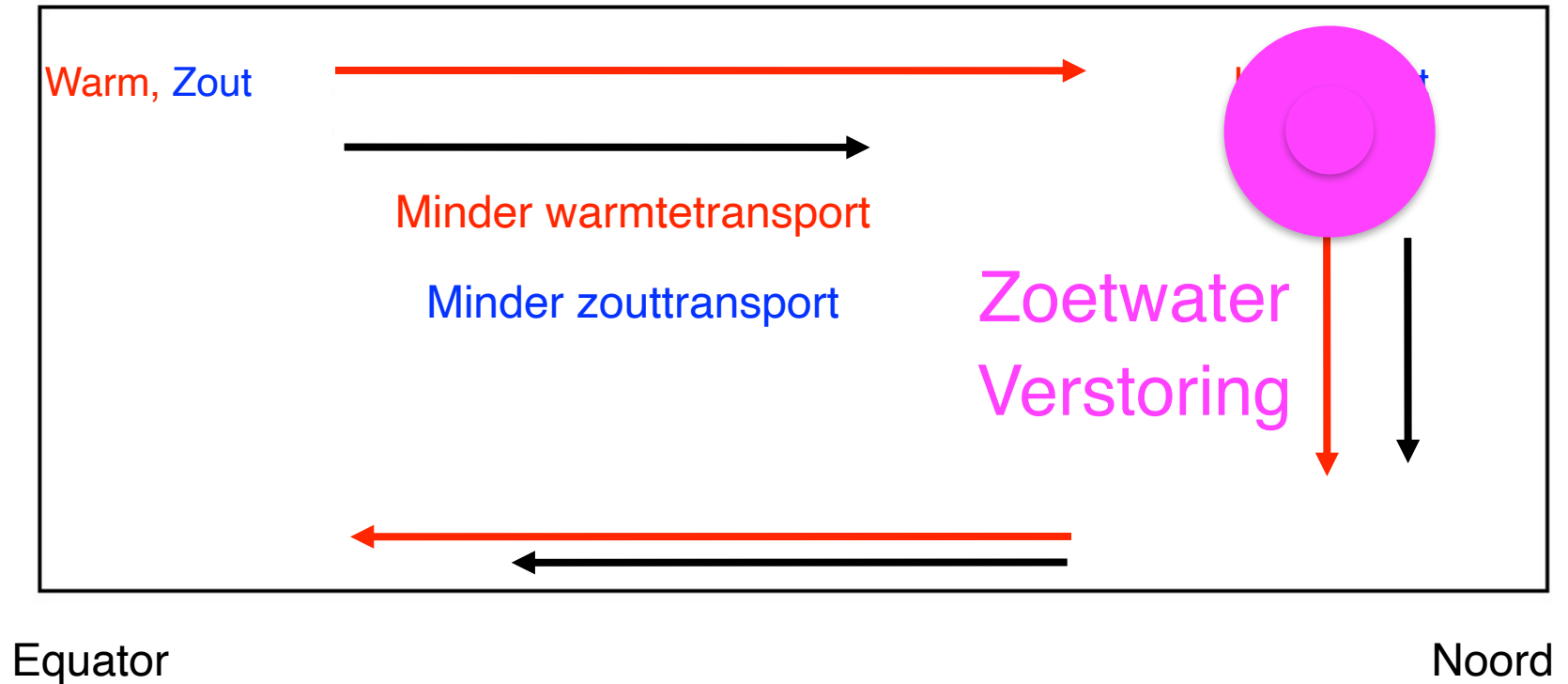
# Waarom is er een abrupte ineenstorting?



Zout-transport  
(positieve) terugkoppeling

Geen damping zout anomalie

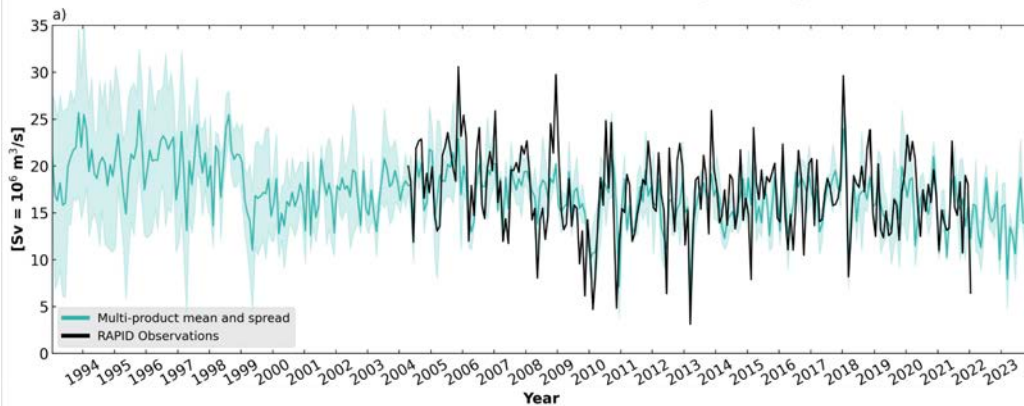
Sterke damping warmte anomalie



# *Redenen voor zorgen over de toekomst van de AMOC*

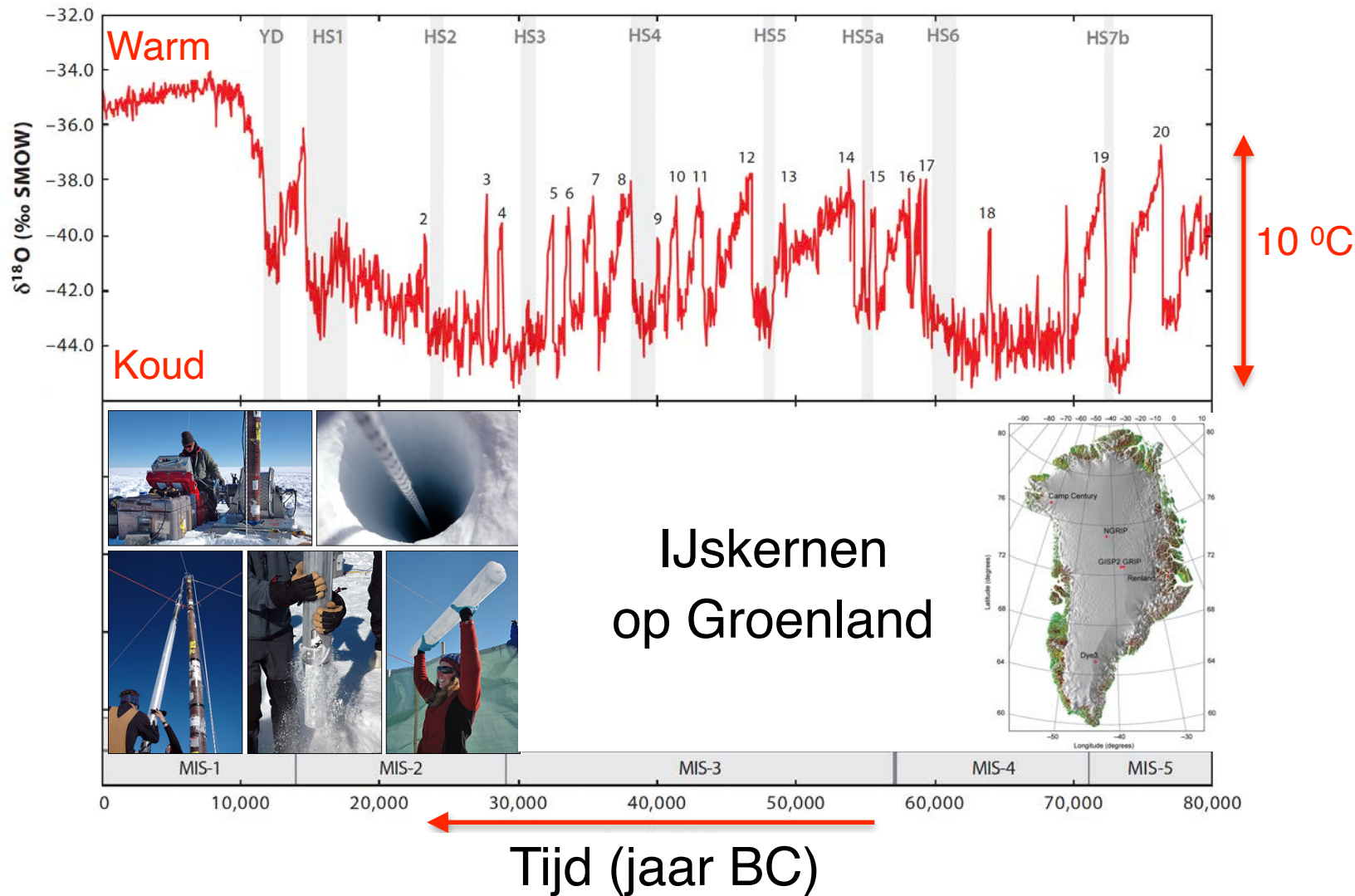
## RAPID AMOC sterkte (26°N)

Atlantic Meridional Overturning Strength

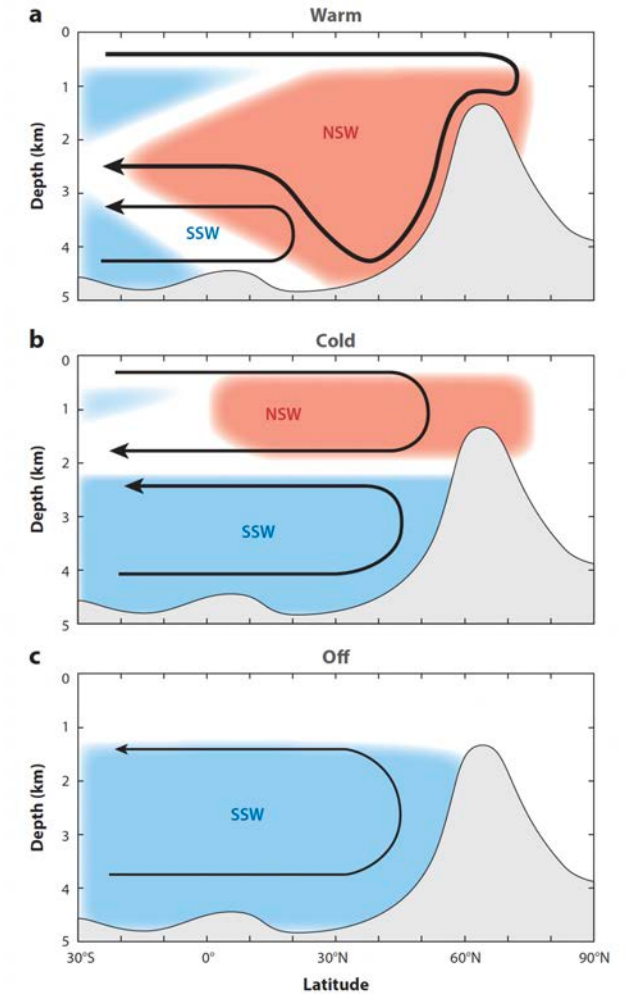


1. Ineenstorting van de AMOC hebben plaatsgevonden in het (recente) geologisch verleden
2. Er zijn waarschuwingssignalen in de Atlantische Oceaan voor een naderende ineenstorting van de AMOC
3. Huidige observaties laten zien dat de zouttransport terugkoppeling de AMOC destabiliseert

# 1. Klimaatvariabiliteit over de laatste 80 duizend jaar

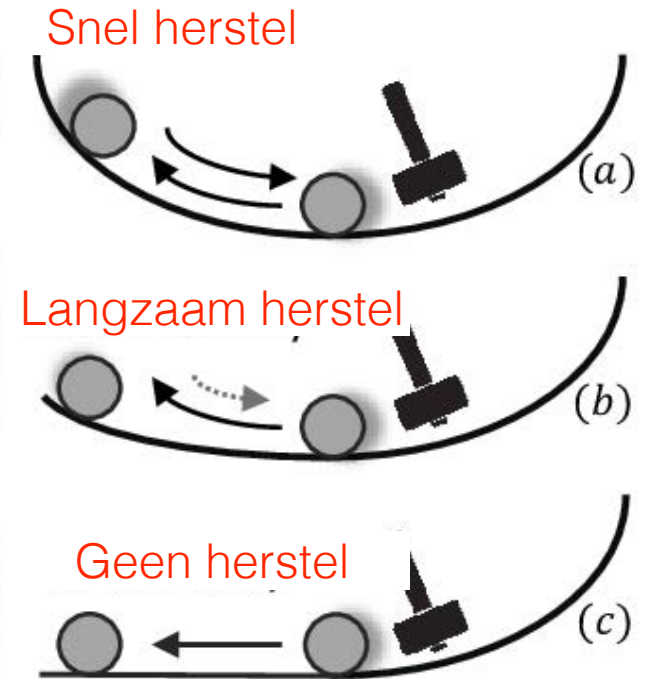
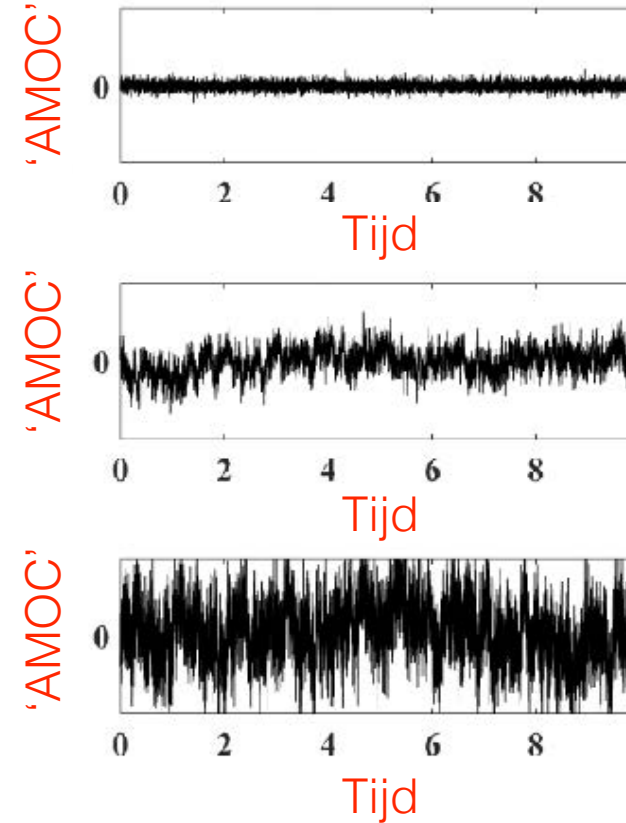
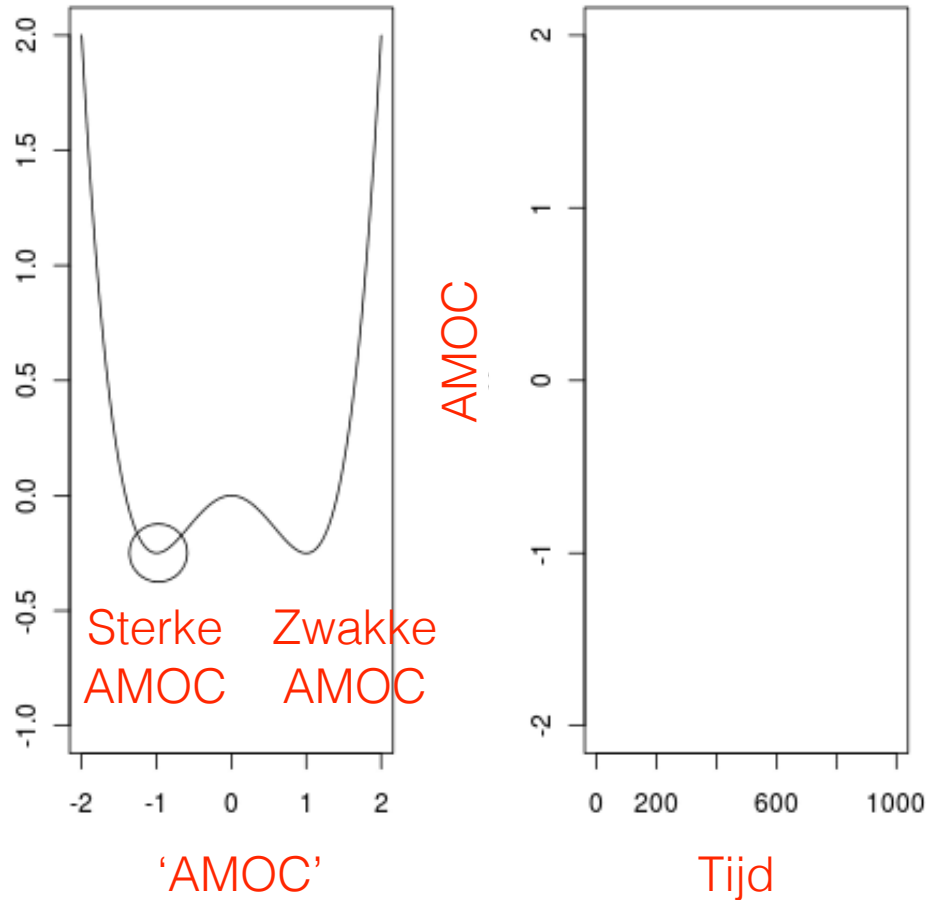


## AMOC patronen





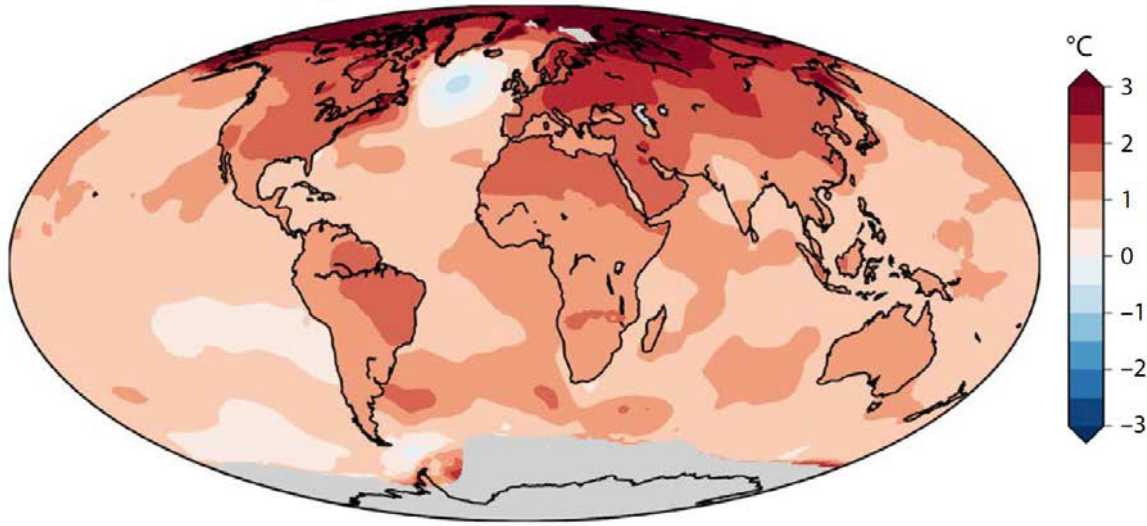
## 2. Waarschuwingssignalen van kritische condities



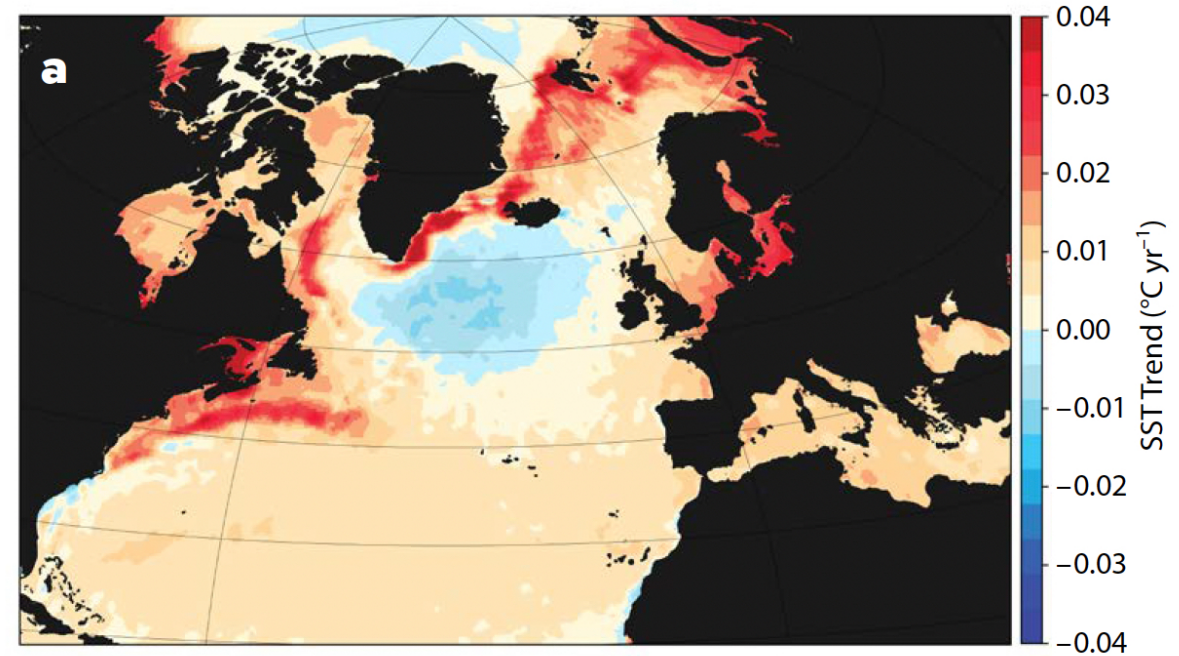
Toename in variabiliteit  
en afname van 'weerbaarheid'

# *'The Warming Hole'*

Warming Between 1850–1900 and 2011–2021



Opwarming oppervlakte  
temperatuur atmosfeer



1940–2020 trend  
oppervlakte temperatuur oceaan

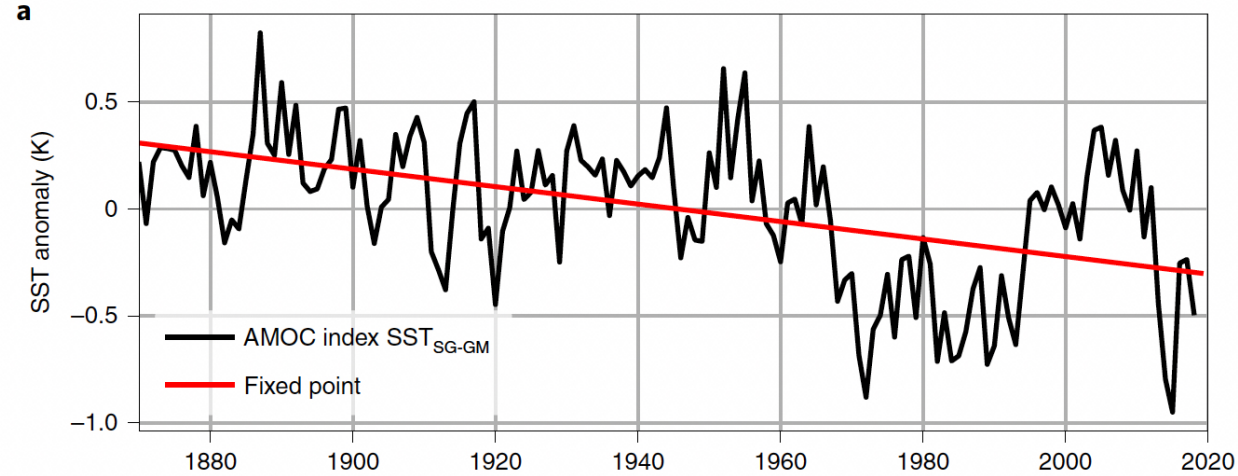
Connectie: AMOC sterkte en 'warming hole' temperatuur  
via warmte transport



Utrecht  
University

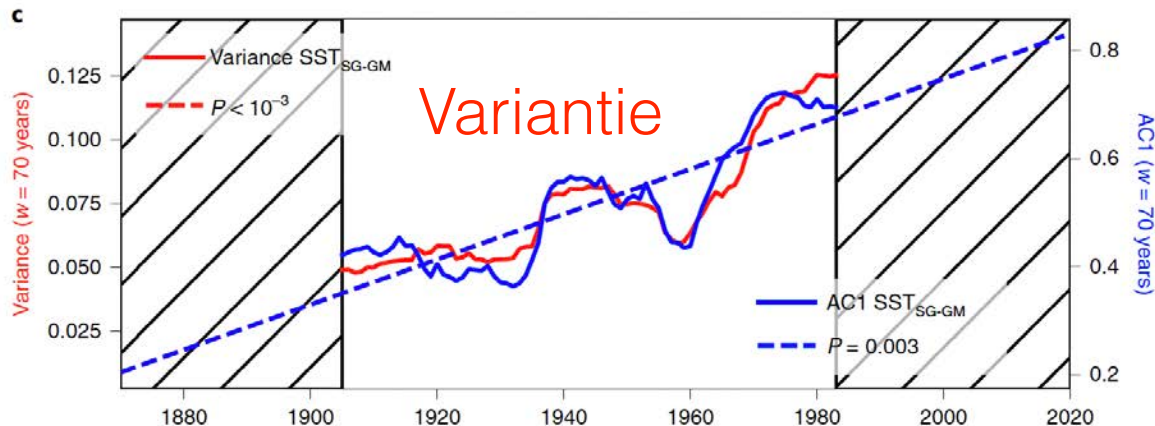
# Signalen van naderende ineenstorting

AMOC  
reconstructie  
uit 'warming hole'  
temperatuur

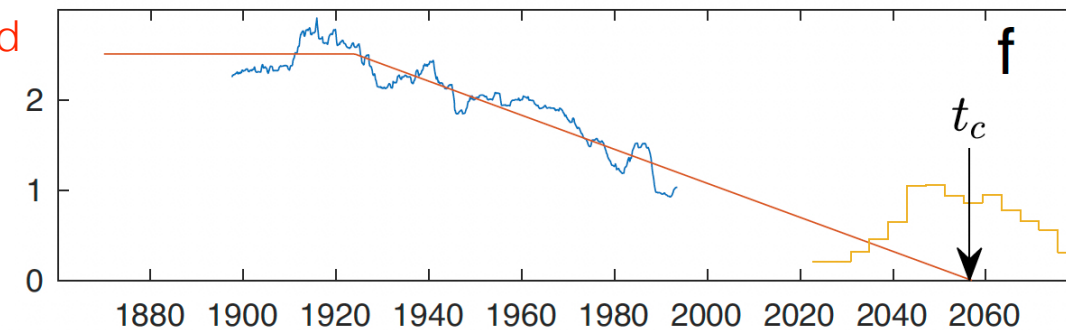


Afname weerbaarheid

Tijd tot initiatie



Herstel  
snelheid



ARTICLES  
<https://doi.org/10.1038/s41558-021-01097-4>  
nature  
climate change

Observation-based early-warning signals for a collapse of the Atlantic Meridional Overturning Circulation

Niklas Boers<sup>1,2,3</sup>

nature communications

Article

<https://doi.org/10.1038/s41467-023-39810-w>

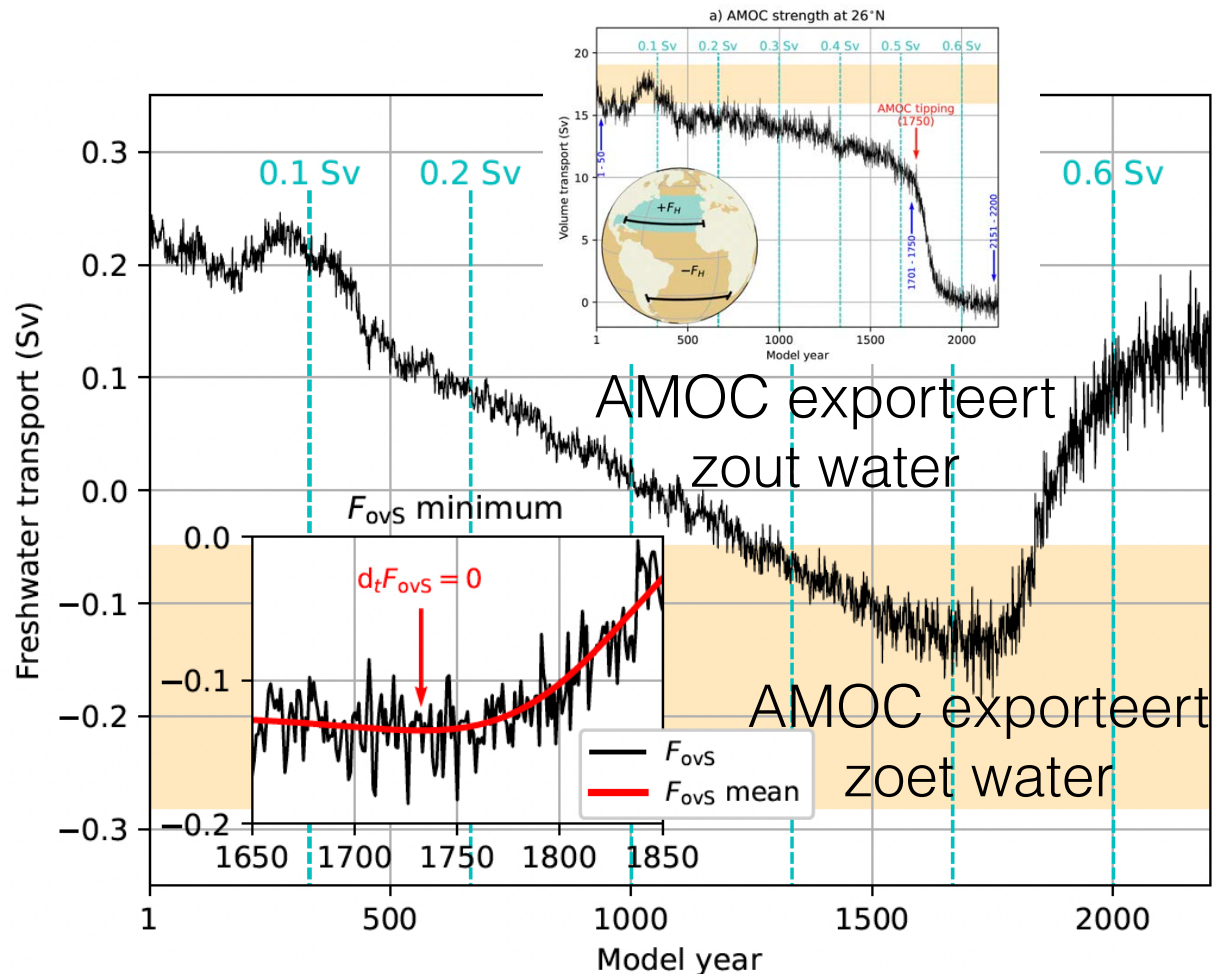
**Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation**

Received: 3 March 2023

Peter Ditlevsen<sup>1,2</sup> & Susanne Ditlevsen<sup>1,2</sup>

Accepted: 29 June 2023

# 3. De zouttransport terugkoppeling



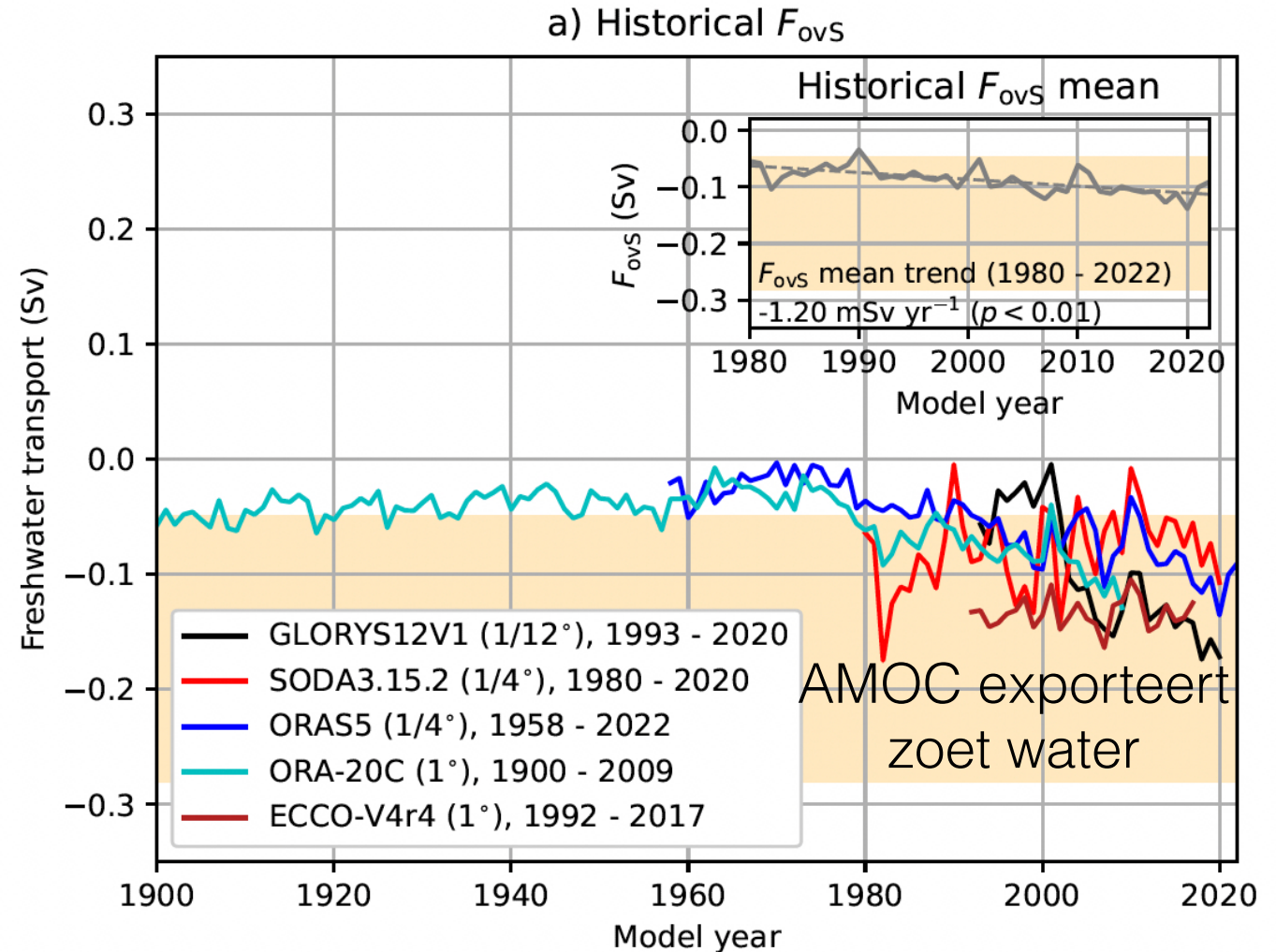
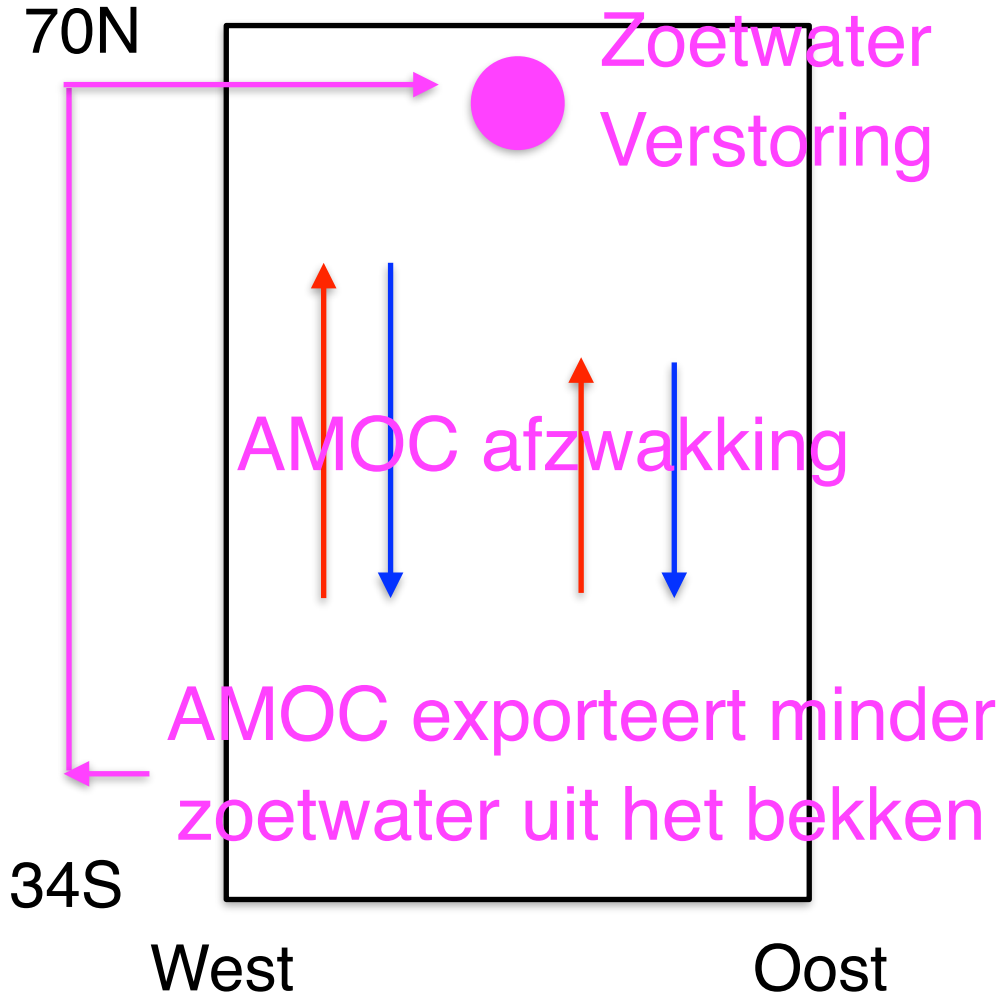
Geen kalenderjaren!

AMOC transport van zoetwater over de zuidelijke grens ( $34^{\circ}\text{S}$ ) is een maat voor sterkte en het teken van de zouttransport terugkoppeling

Als de AMOC zoetwater exporteert is de terugkoppeling positief

# Observaties zoetwater transport 34°S

AMOC exporteert zoet water

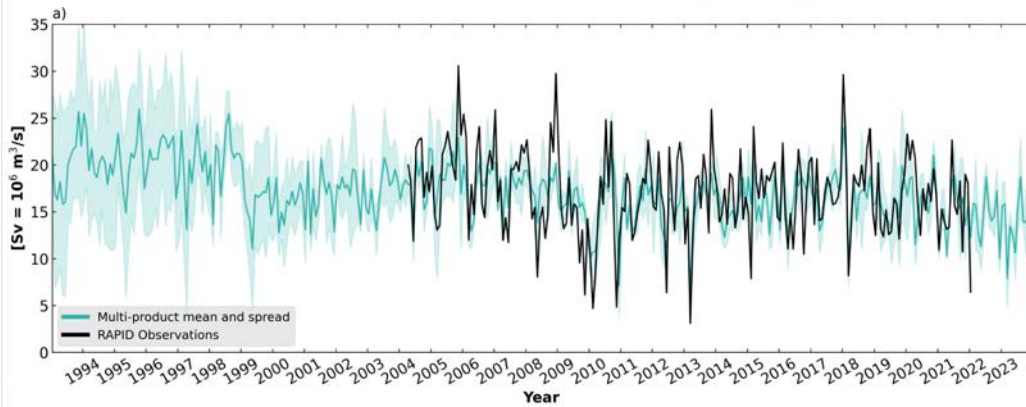


AMOC on route to tipping!

# Onzekerheden

## RAPID AMOC sterkte (26°N)

Atlantic Meridional Overturning Strength



1. Ineenstortingen van de AMOC in het geologisch verleden waren onder glaciële condities
2. Andere processen naast de AMOC kunnen de 'warming hole' temperaturen beïnvloeden; data erg beperkt
3. Er zijn naast de zouttransport terugkoppeling ook stabiliserende terugkoppelingen die in de huidige klimaatmodellen niet allemaal goed zijn meegenomen

# *Centrale vragen in het onderzoek in mijn groep op het IMAU*

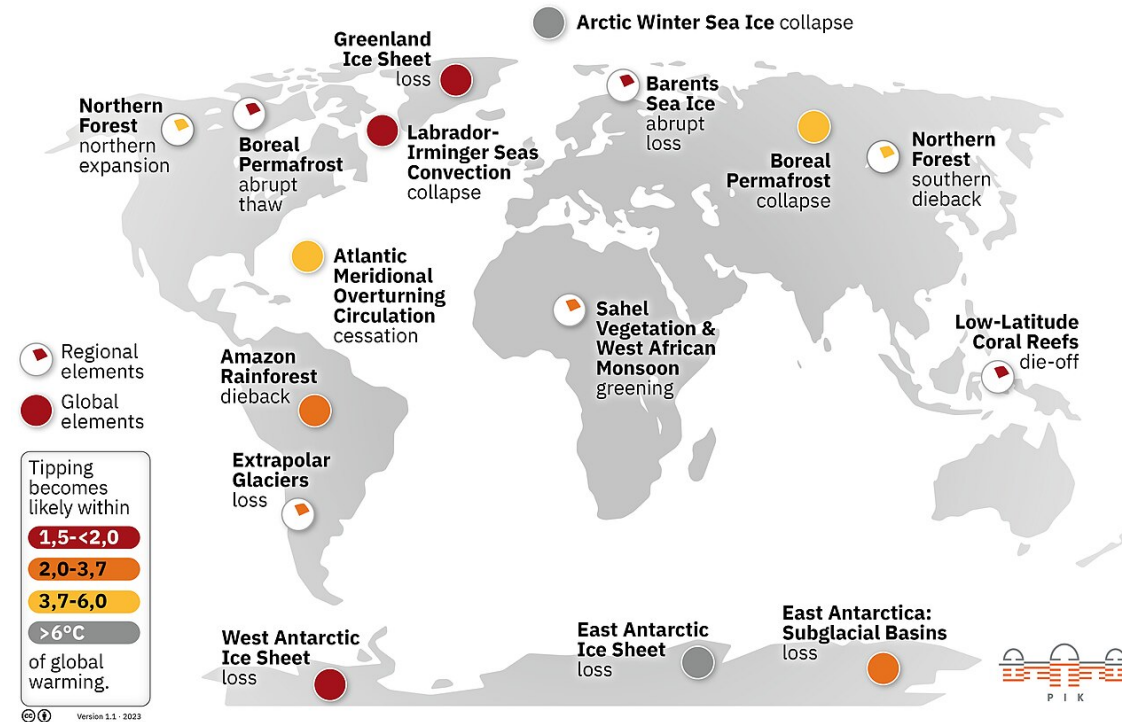


Wat is de kans op een begin van de AMOC ineenstorting voor het jaar 2100?

Hoe kunnen we een AMOC ineenstorting vertragen of voorkomen?

# Samenvatting

Onder een toename van emissies van broeikasgassen kunnen kantelpunten worden overschreden die tot abrupte klimaatverandering kunnen leiden.



Belangrijk voor lange termijn planning (ook in Nederland)