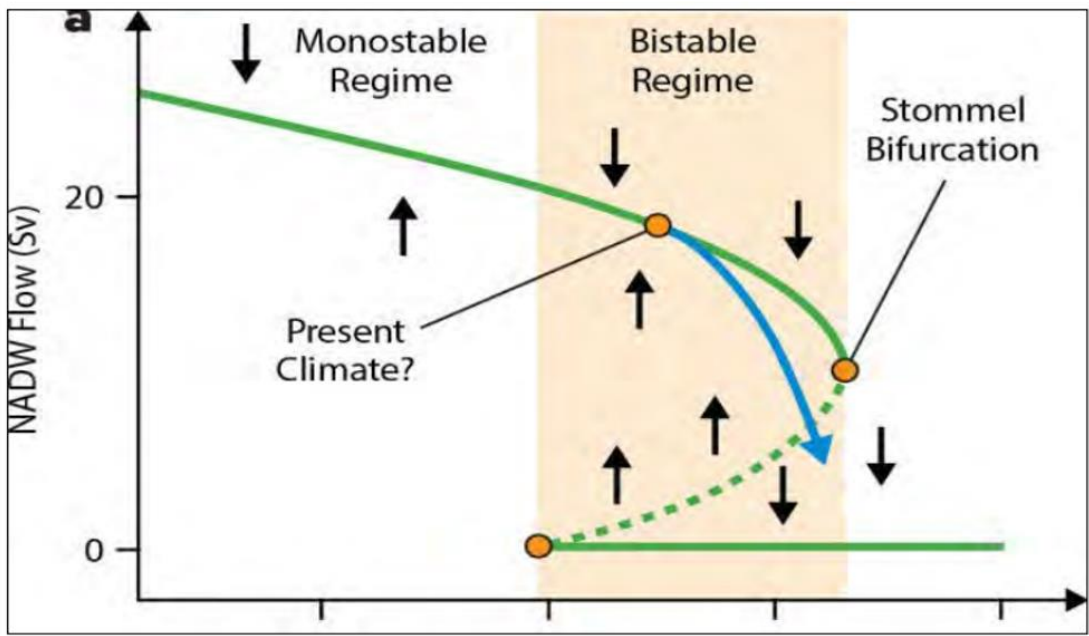
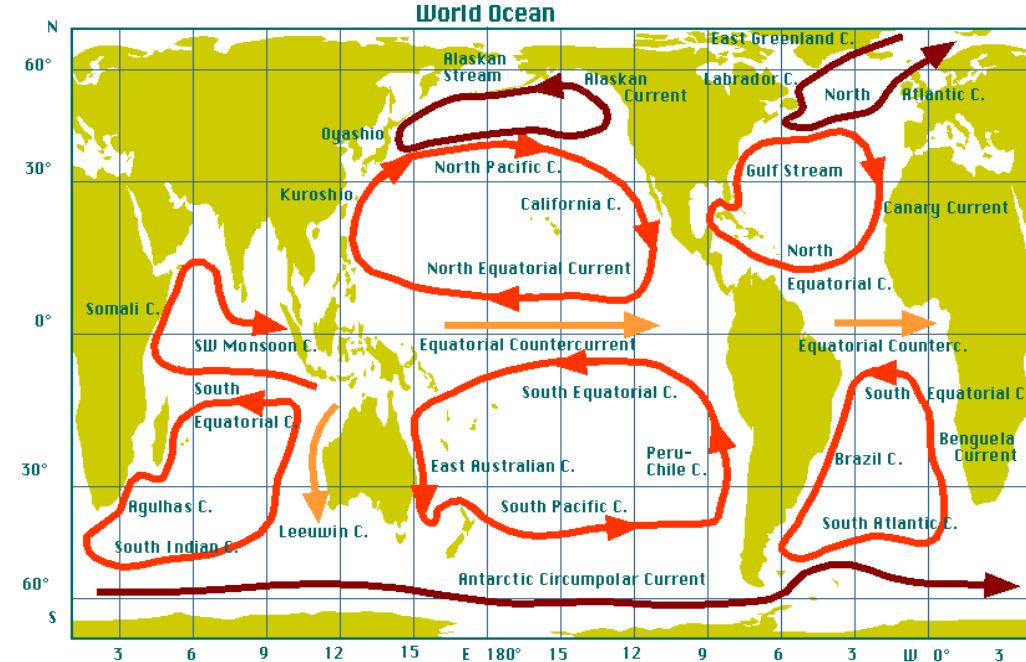


Het belang van Oceanen voor het klimaat

LWSK 16 September 2025

Door Rob Groenland (KNMI)





- Oceanen algemeen
- Typen stromingen
- Kantelpunten
- Wat gaat de AMOC doen?

DE OCEAAN IS DE BELANGRIJKSTE BUFFER VOOR CO₂ EN OPWARMING VAN DE AARDE



Oceanen fungeren als buffer voor CO₂ en opwarming van de aarde. (c) NIOZ

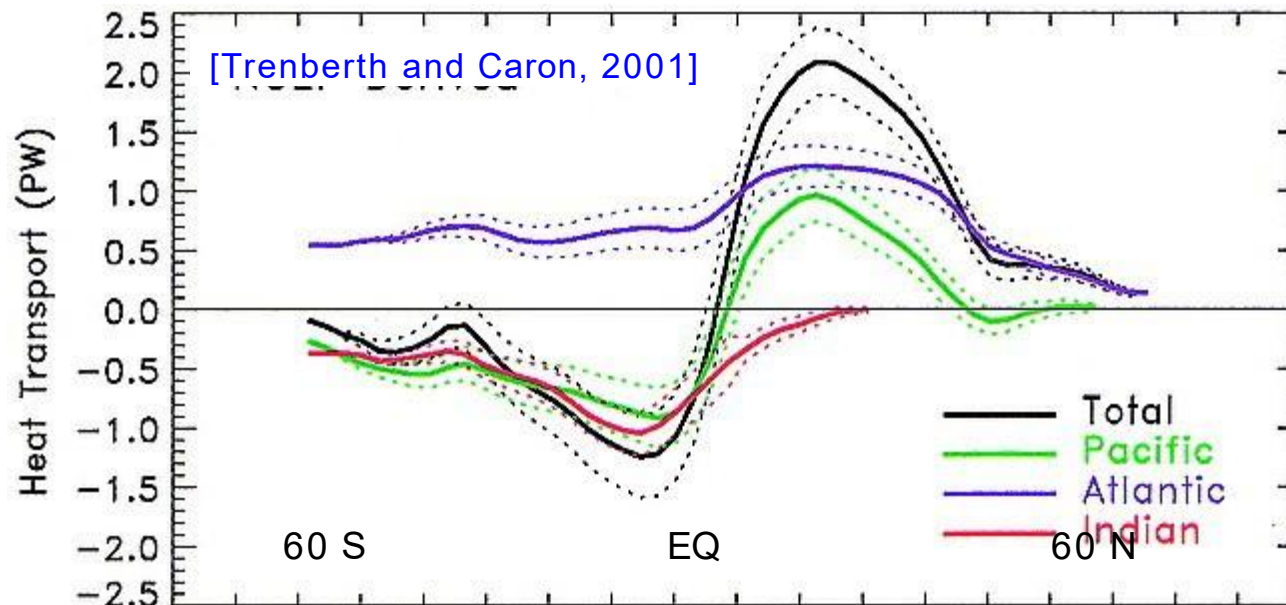
Oceanen spelen een cruciale rol in het wereldwijde klimaatstelsel. Ze reguleren de temperatuur op aarde door de opname en afgifte van warmte via oceaanstromingen en fungeren daarnaast als een belangrijke koolstofput, wat helpt bij het verminderen van koolstofdioxide in de atmosfeer.

- <https://www.windy.com/nl/-Stromingen-currents?currents,20.386,-68.730,3>

warmtetransport in de oceaan

50% van het totale warmtetransport vindt plaats in de oceaan

- thermohaliene circulatie ⇒ Atlantische Oceaan naar het noorden!
- windgedreven gyres ⇒ Stille Oceaan
- wervels ⇒ Zuidelijke Oceaan



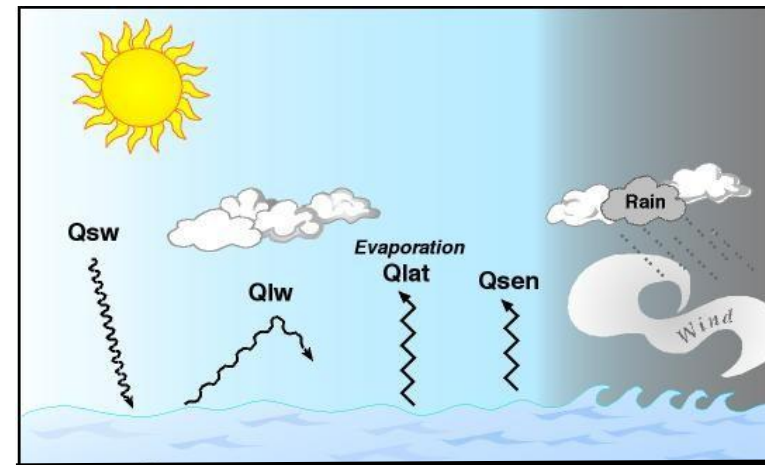


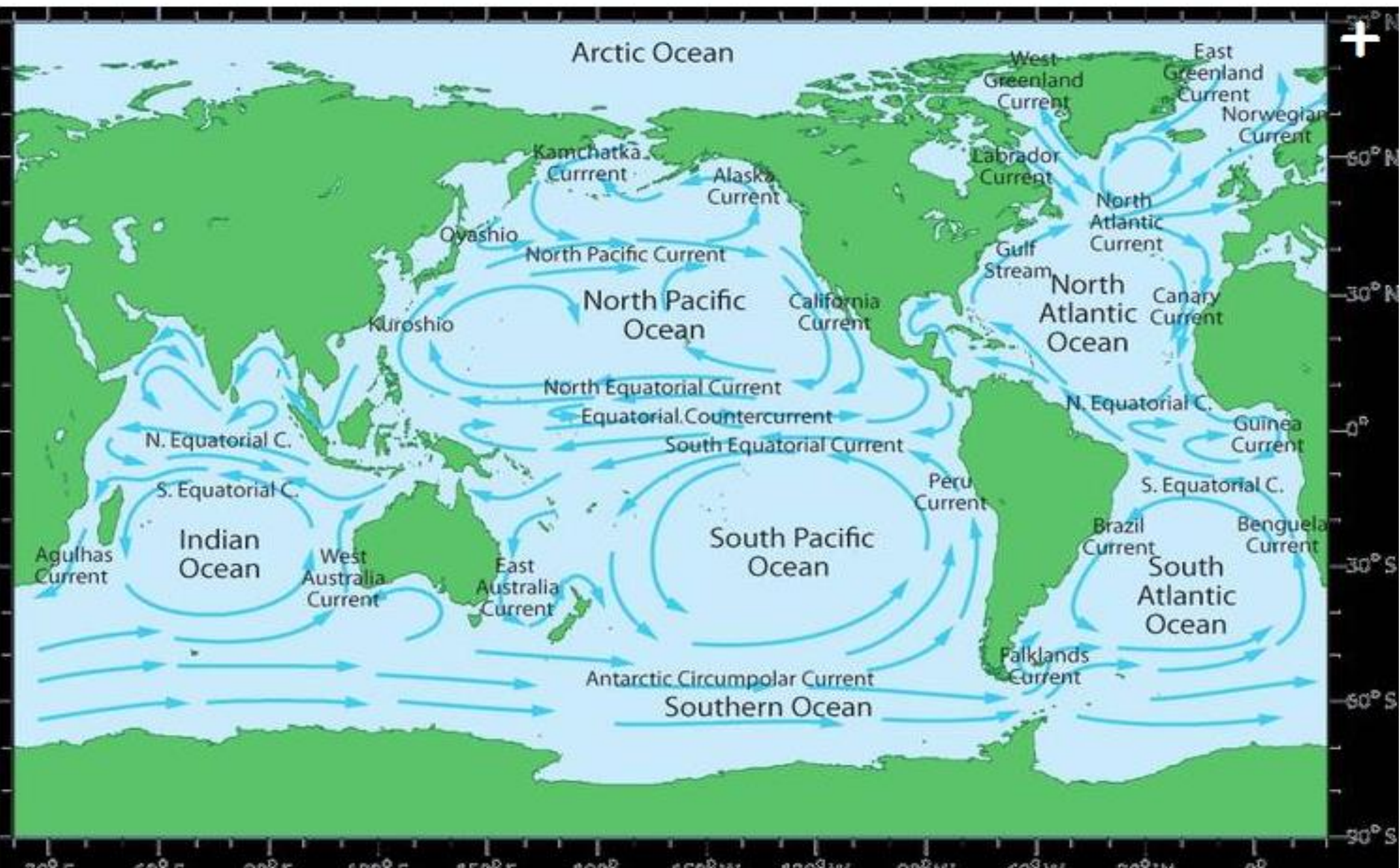
grootschalige oceaancirculatie

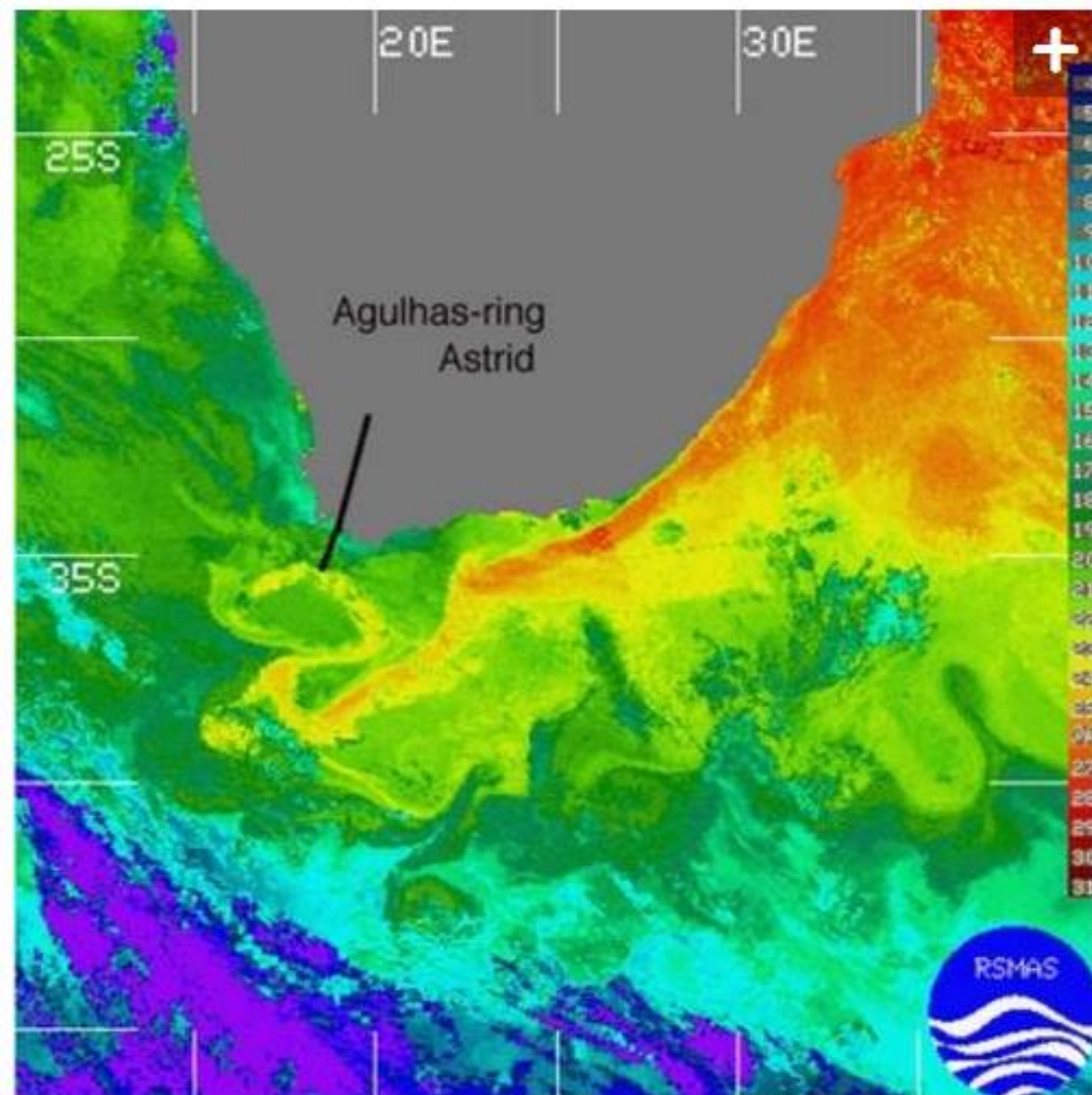
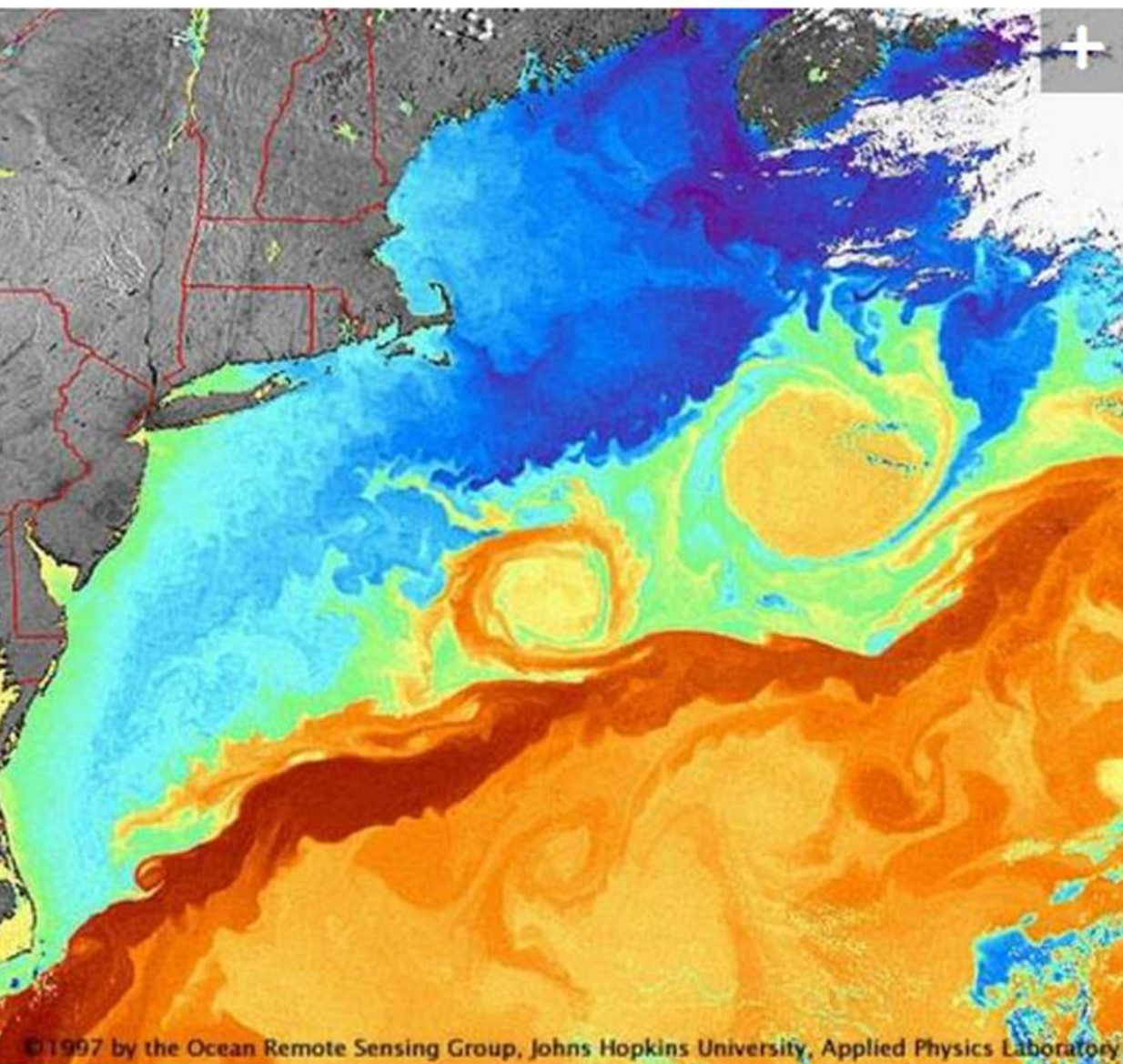
- aangedreven aan het oppervlak, door fluxen van
 - impuls (wind)
 - warmte (straling, verdamping, voelbare warmte)
 - zoet water (verdamping / neerslag)
- ⇒ dichtheid ρ = functie(T, S, p)

Oppervlak (~ 1000 m):
windgedreven circulatie

diepzee:
thermohaliene circulatie







Z.

N.



koude lucht

40° opname warmte 0° opname warmte 40°

afgifte warmte 70° vorming zeeijs 90°

warm

warmer Golfstroom

Atlantische Oceaan

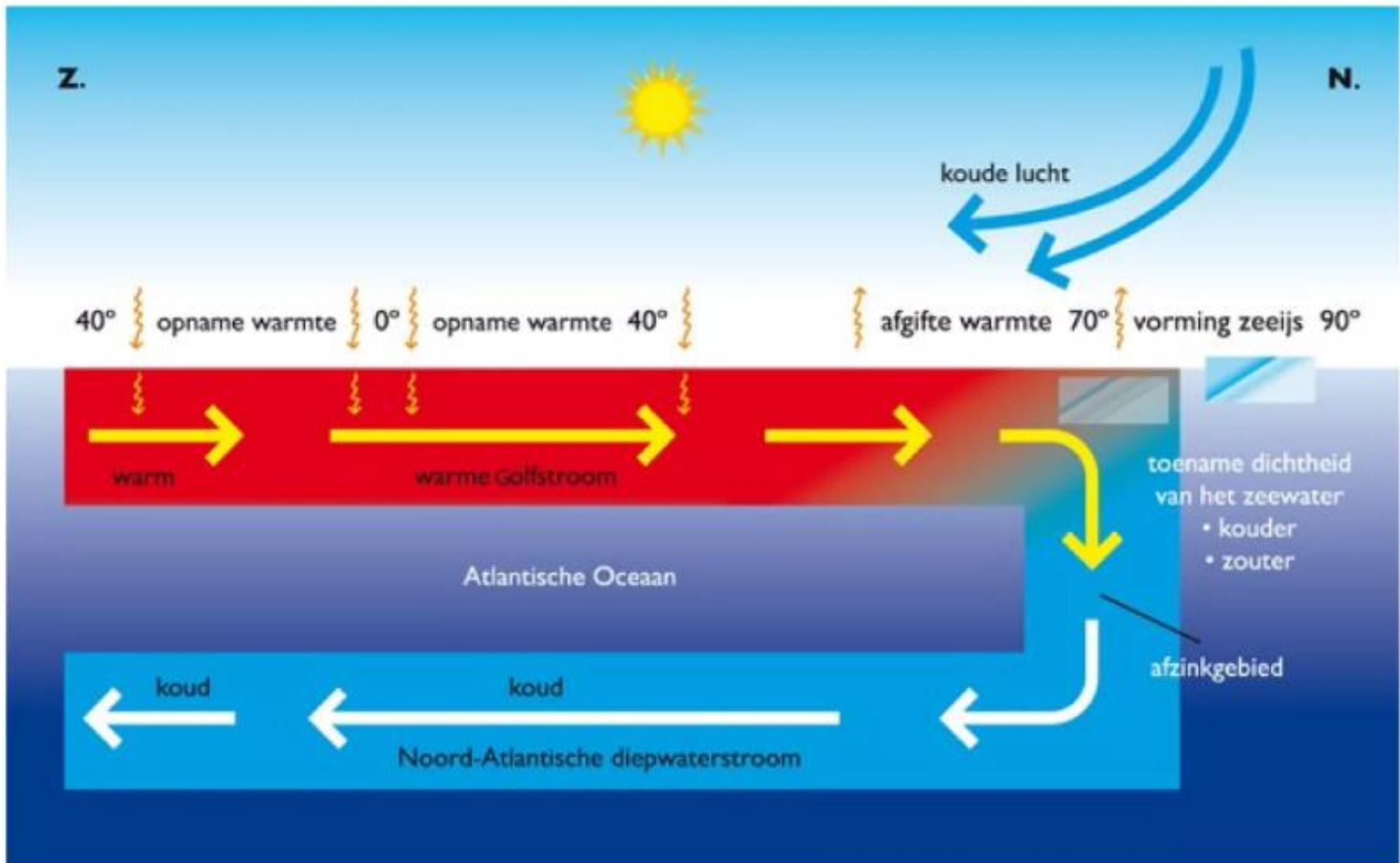
toename dichtheid van het zeewater
• kouder
• zouter

afzinkgebied

koud

koud

Noord-Atlantische diepwaterstroom



Belangrijke factoren/krachten

- Wind; wrijving/stress → Wavedrift of Driftstroming
- Verschillen dichtheid a.g.v. verschillen in temperatuur/zoutgehalte → Dichtheids- of Thermohaliene stroming
- Horizontale drukverschillen door opstuwing → Gradiëntstroming
- Corioliskracht
- Inwendige wrijving

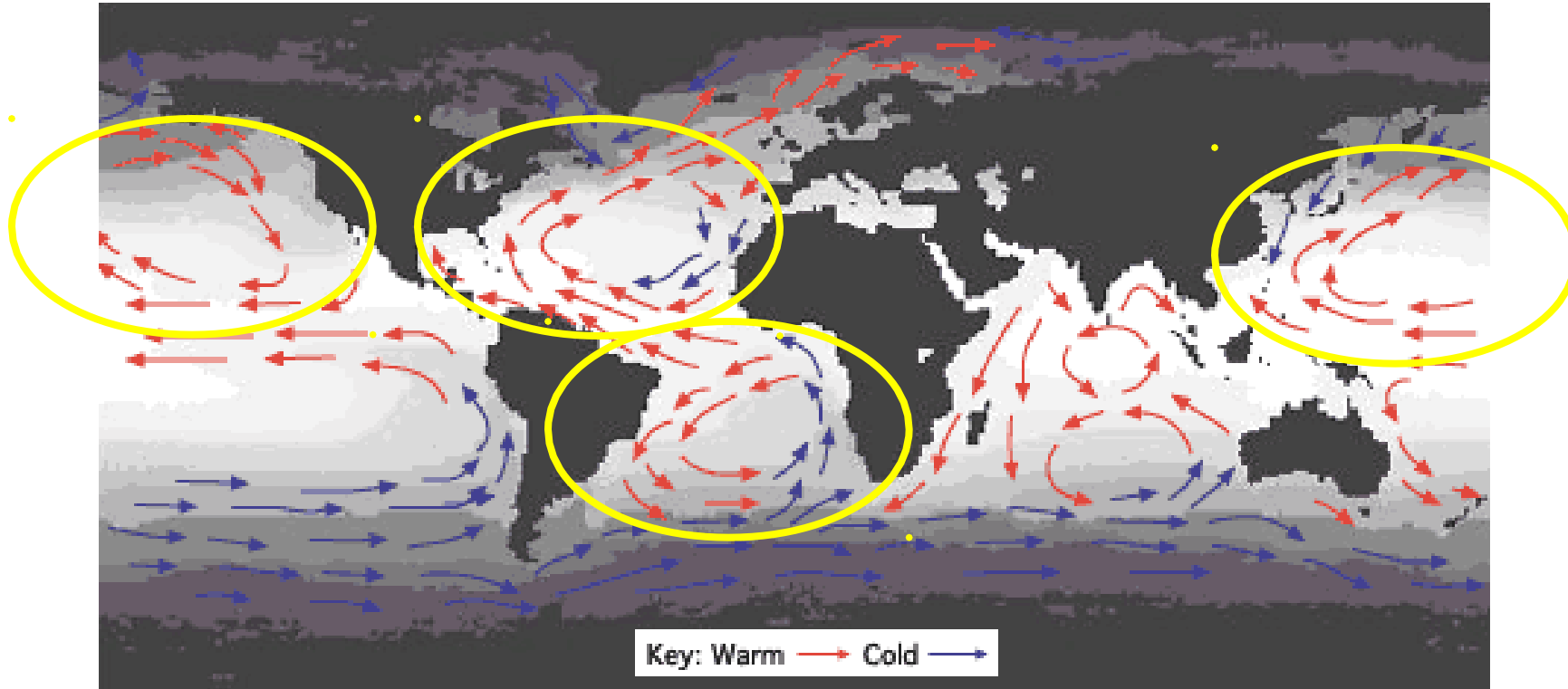
Brontermen
of
Drijvende Krachten

In de praktijk combinatie van krachten



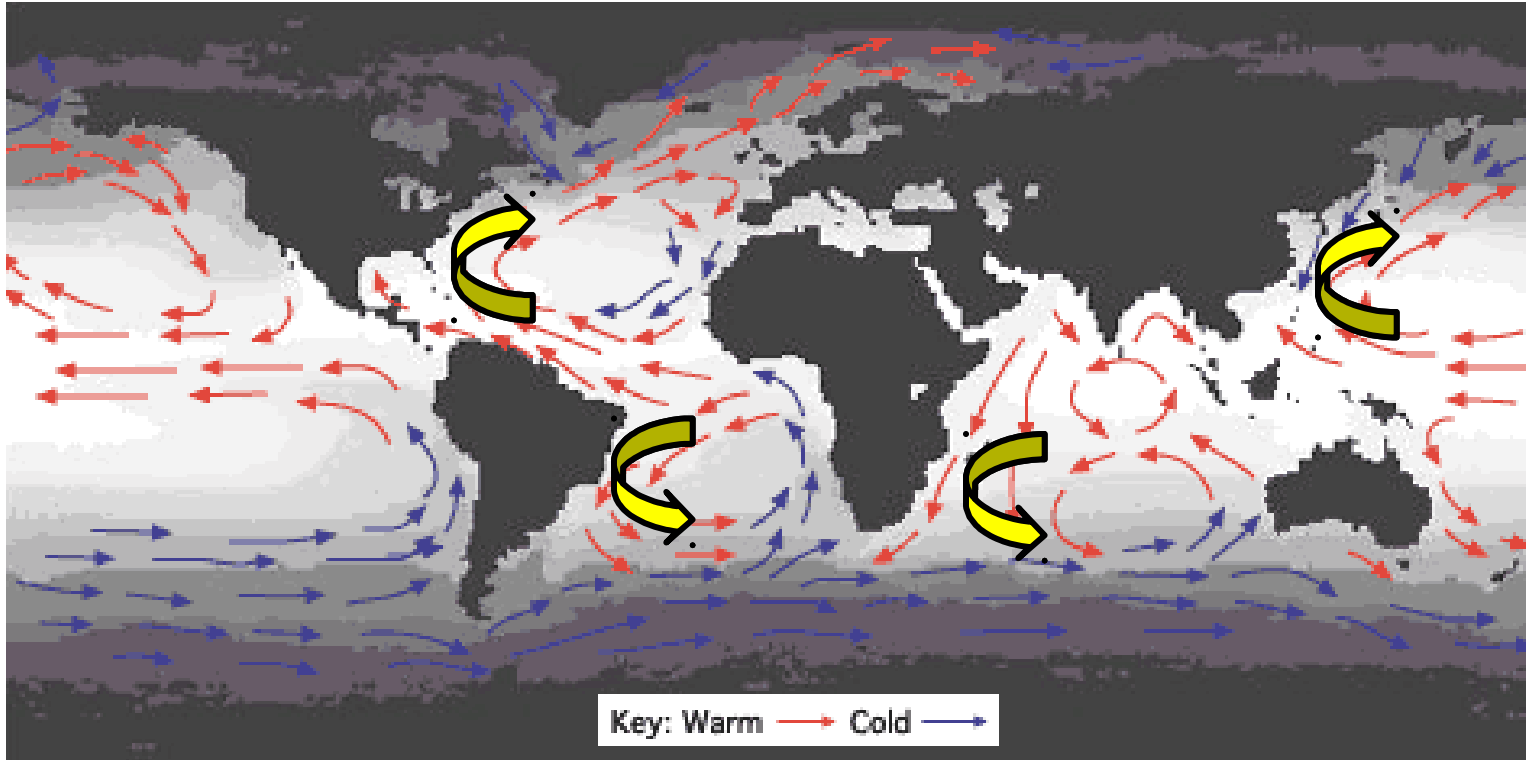
windgedreven circulatie

windgedreven circulatie



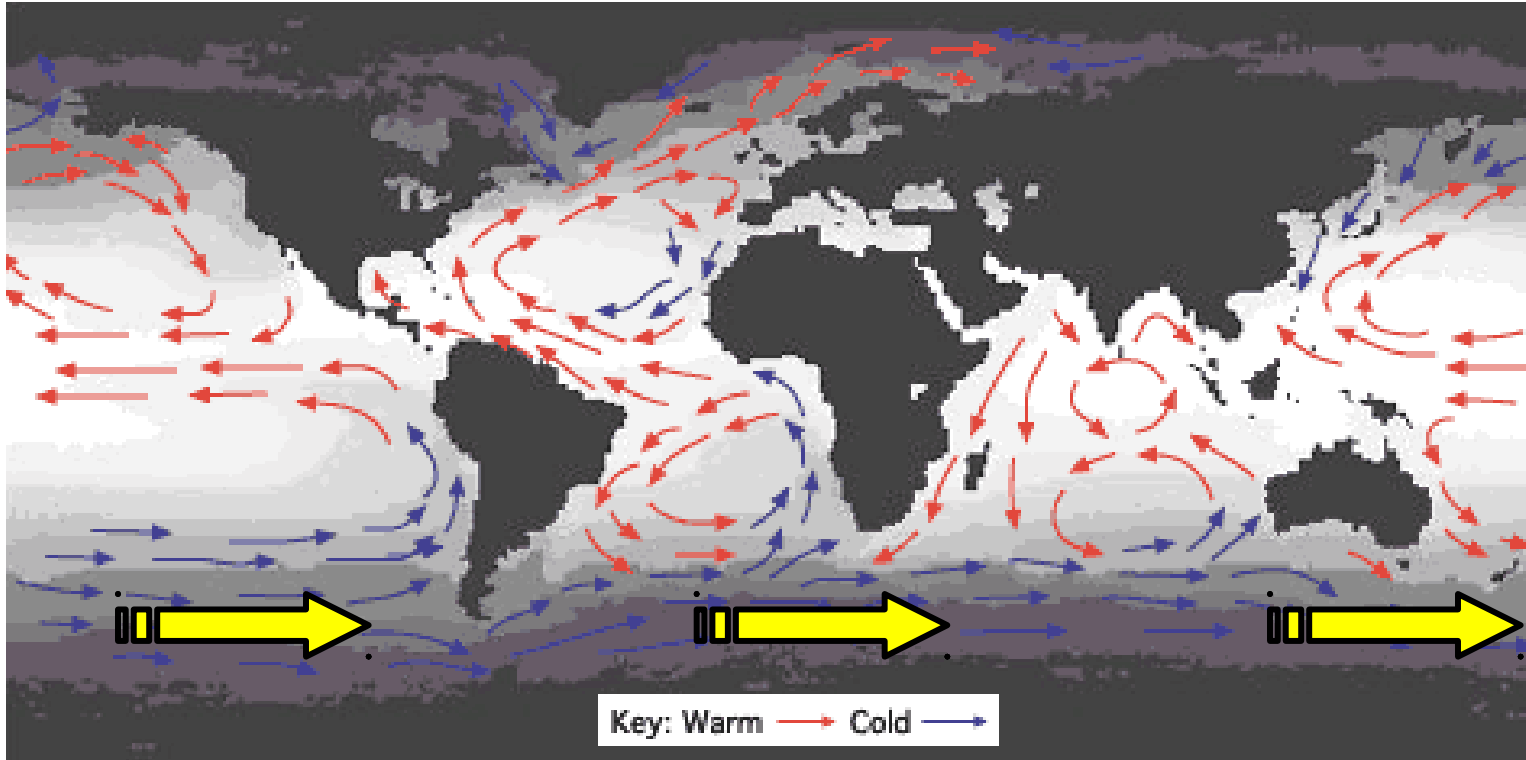
gyres (grootschalige wervels)

windgedreven circulatie



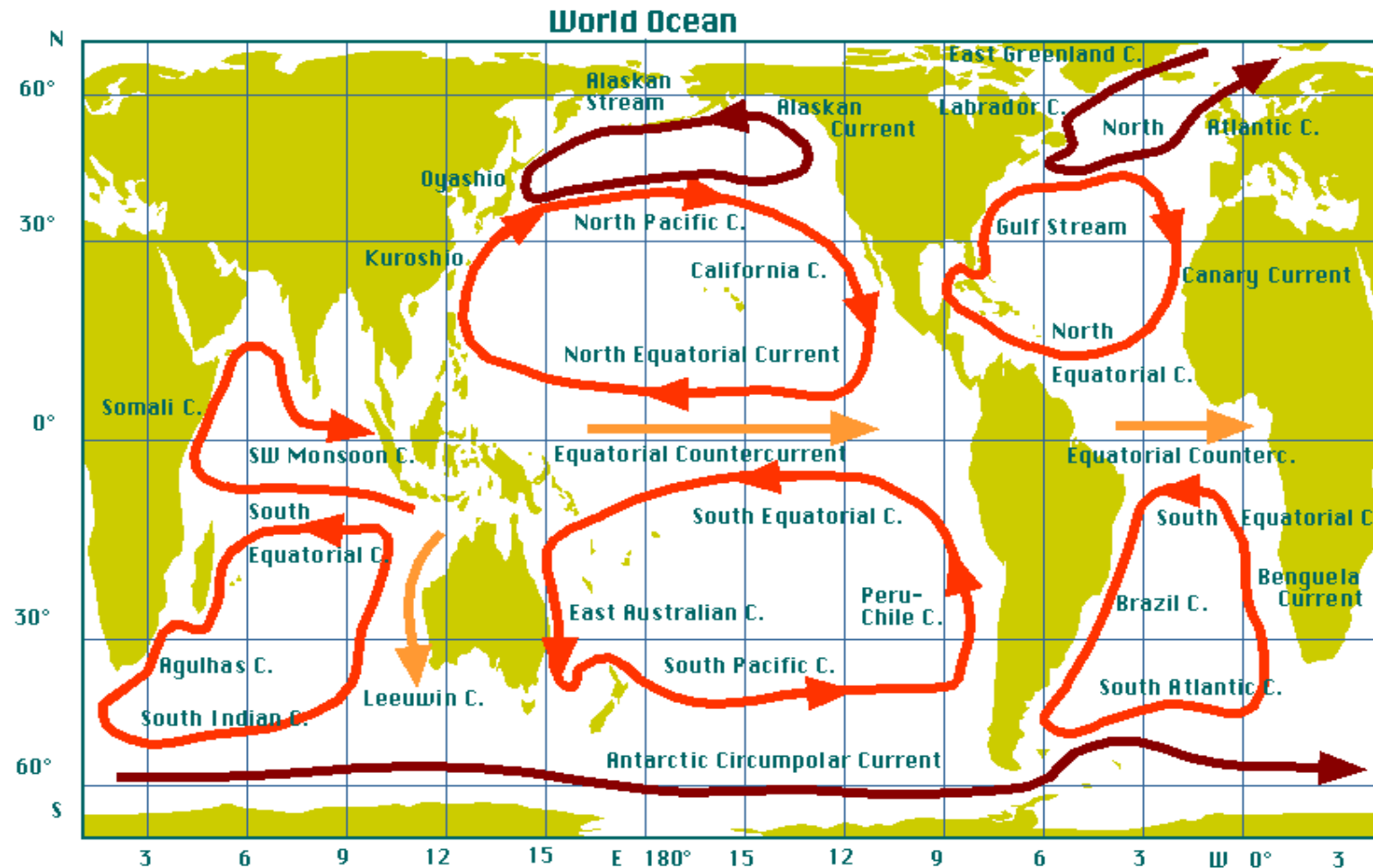
gyres (grootschalige wervels)
sterke stromingen aan de westkant van de bassins

windgedreven circulatie



gyres (grootschalige wervels)
sterke stromingen aan de westkant van de
bassins
sterke stroming helemaal rond Antarctica (ACC)

Belangrijke oppervlakte stromen



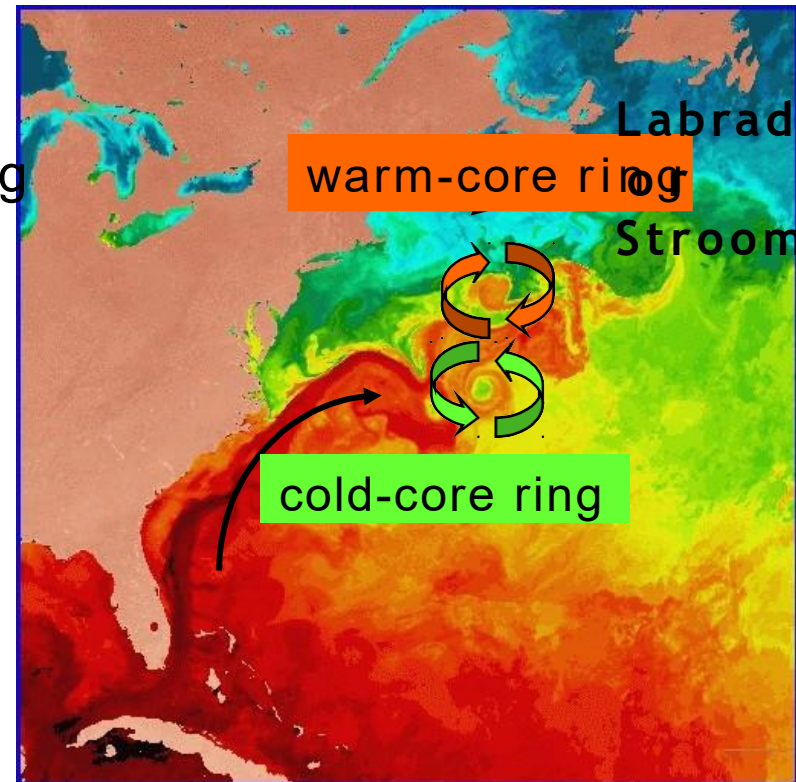
variabiliteit windgedreven circulatie

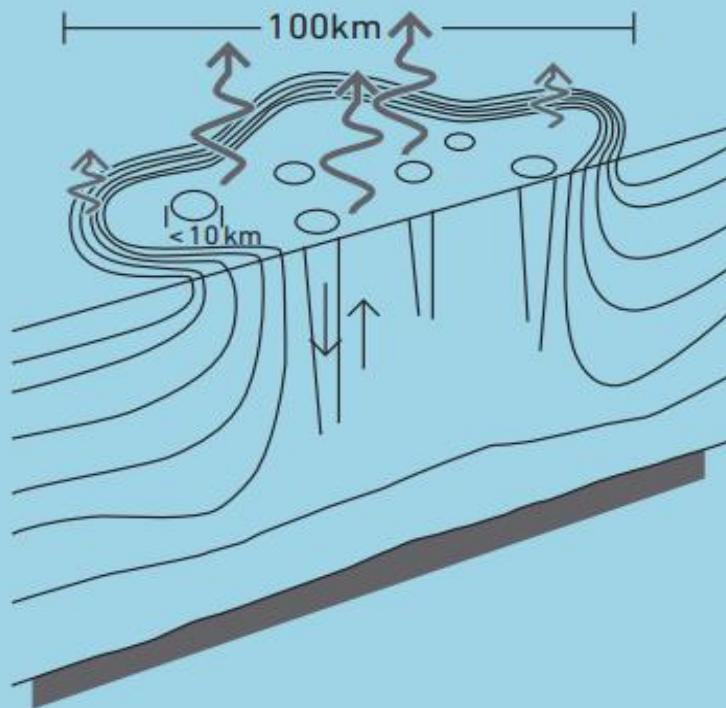
fluctuaties / wervels:

- ~ 100 km, tijdschaal: weken-jaren
- ▢ ontstaan door
 - ▢ variaties windforcering
 - ▢ instabiliteit oceaanstroming

van belang voor

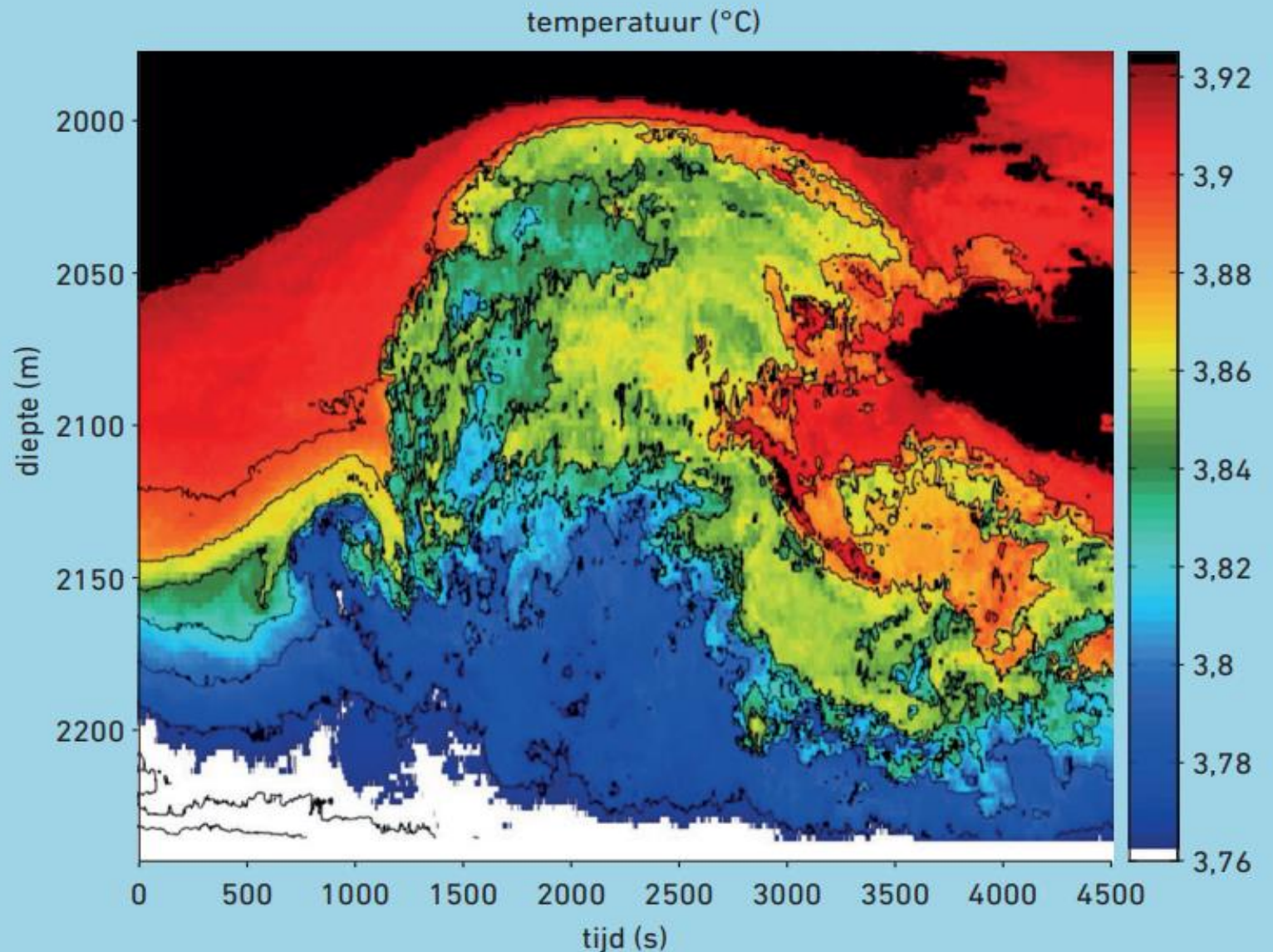
- ▢ warmtetransport
- ▢ menging
- ▢ dissipatie





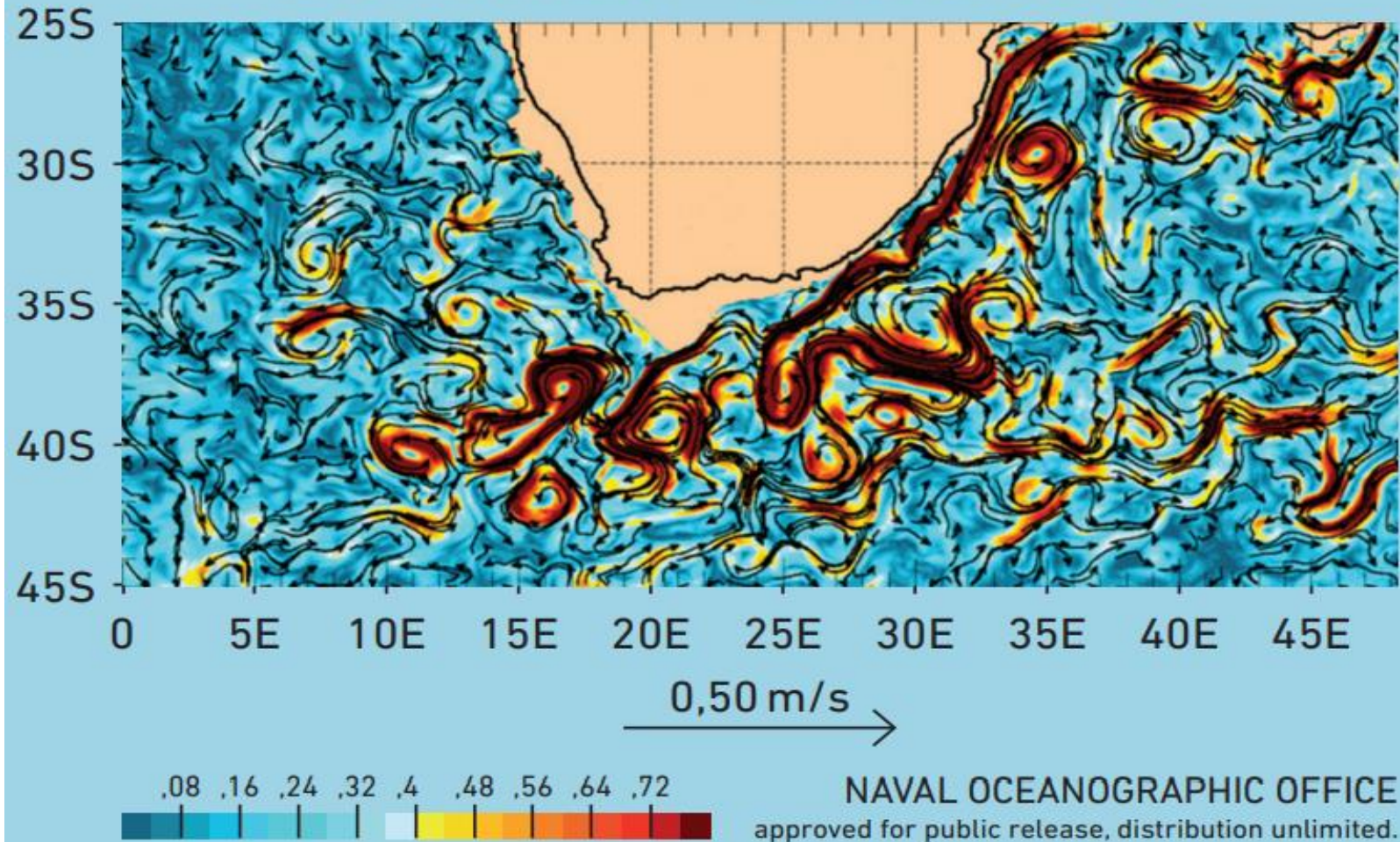
Figuur 3. Schets van de vorming van dicht water door afkoeling, juiste oppervlaktecondities en wervelingen van verschillende schalen. Naar [3].

Lezing LWSK 16 september 2025



Figuur 4. De Japanse prentkunstenaar Hokusai-san had natuurlijk gelijk. Als hij in het binnenste van de oceaan had kunnen kijken zou het perspectief van graaiende vingers perfect zijn geweest. 75 minuten en 265 meter beeld van precieze temperatuurmetingen boven de Mid-Atlantische rug die een 200 meter hoge turbulente omwenteling door interne golfbreking laten zien. Aangepast uit [6].

UNCLASSIFIED: 1/32° Global NLOM
current/speed layer 1 analysis: 20130402



Figuur 2. De Agulhasstroom bij Zuid-Afrika, met zijn draaiing, kronkels en afsplitsende wervelingen uit assimilatie van satelliet-waarnemingen in modelberekening van de variaties in hoogte van het zeeoppervlak. Bron: Naval Oceanographic Office (NAVOCEANO).



Zeewater

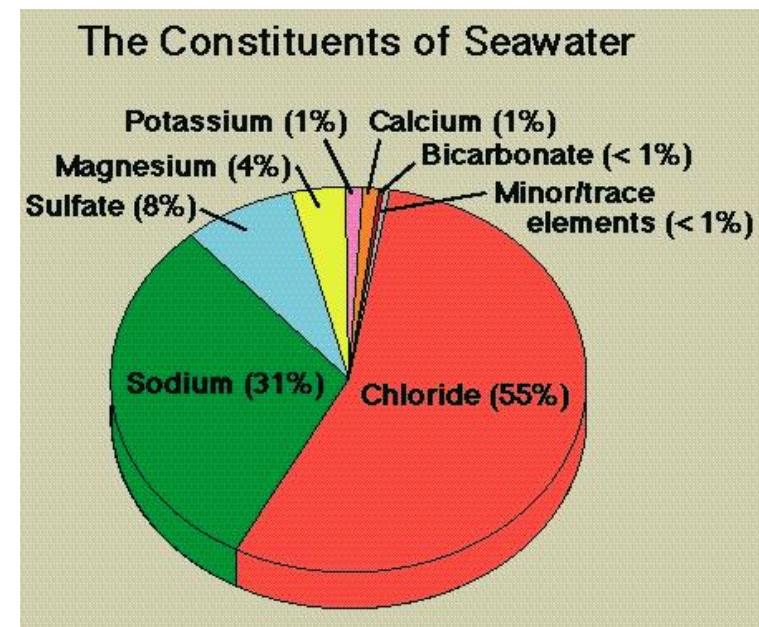
Kenmerkende eigenschappen (4)

1. Saliniteit (= zoutgehalte)
2. Temperatuur
3. Dichtheid
4. Vriespunt



Eigenschap 1: Saliniteit

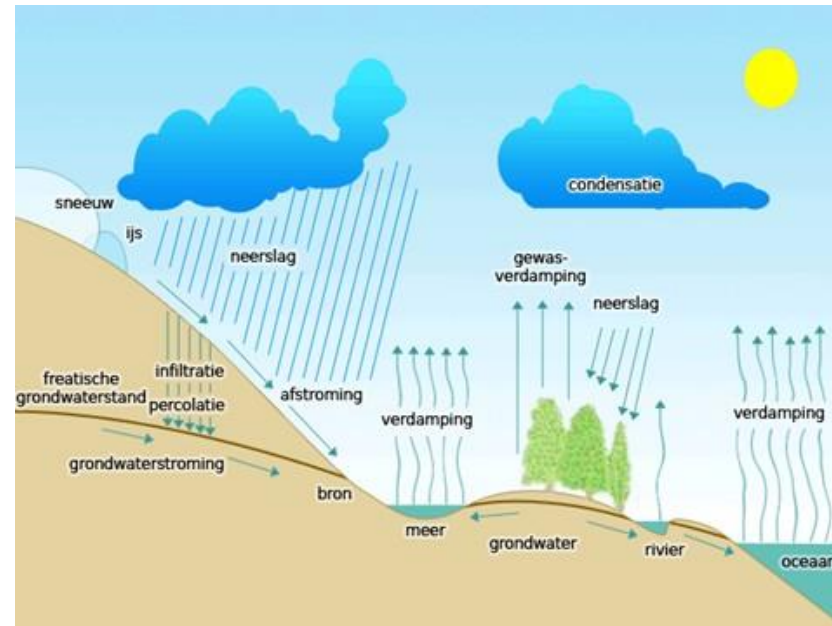
- = aantal gram zout per kilogram zeewater
- 33-37 gram per kg zeewater (uitzonderingen)
- Voornamelijk keukenzout
- sodium (=natrium) chloride



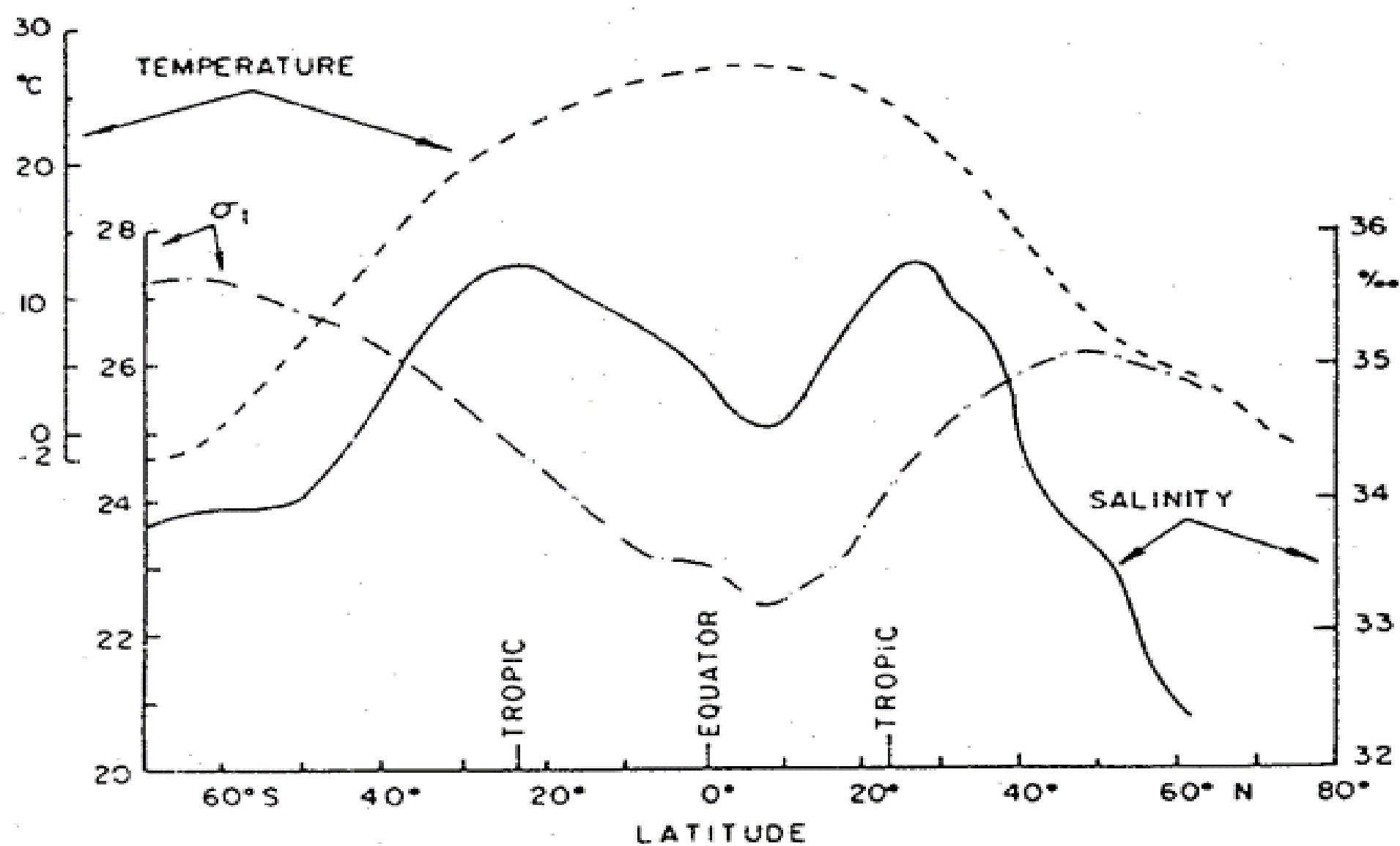


Saliniteit afhankelijk van

- Verdamping
- Neerslag
- Rivieraanvoer
- Ijsaangroei/smelt
- Up- en downwelling
- Doorstroming



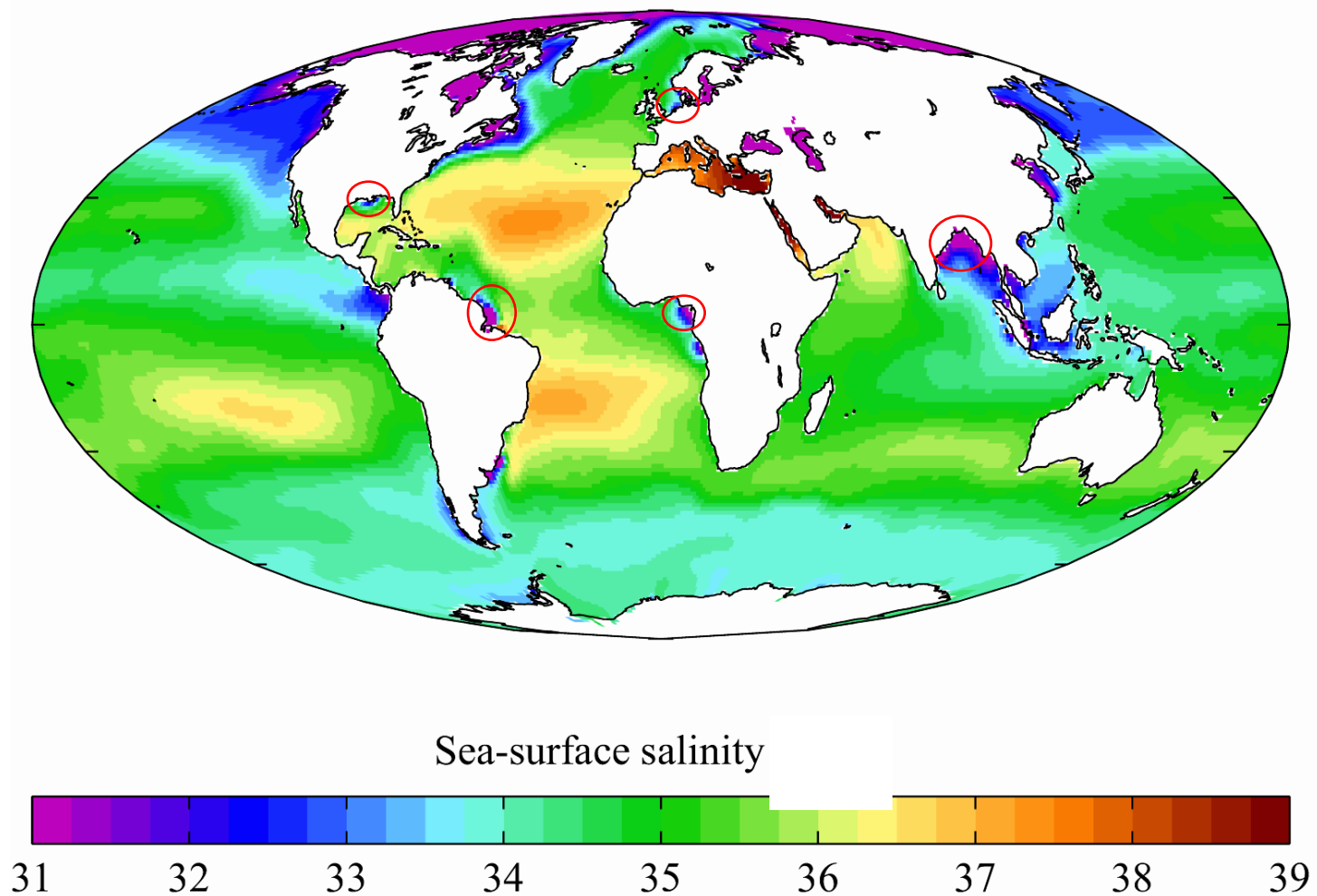
Hydrologische Cyclus



Variation with latitude of surface temperature, salinity and density (σ_t)—average for all oceans

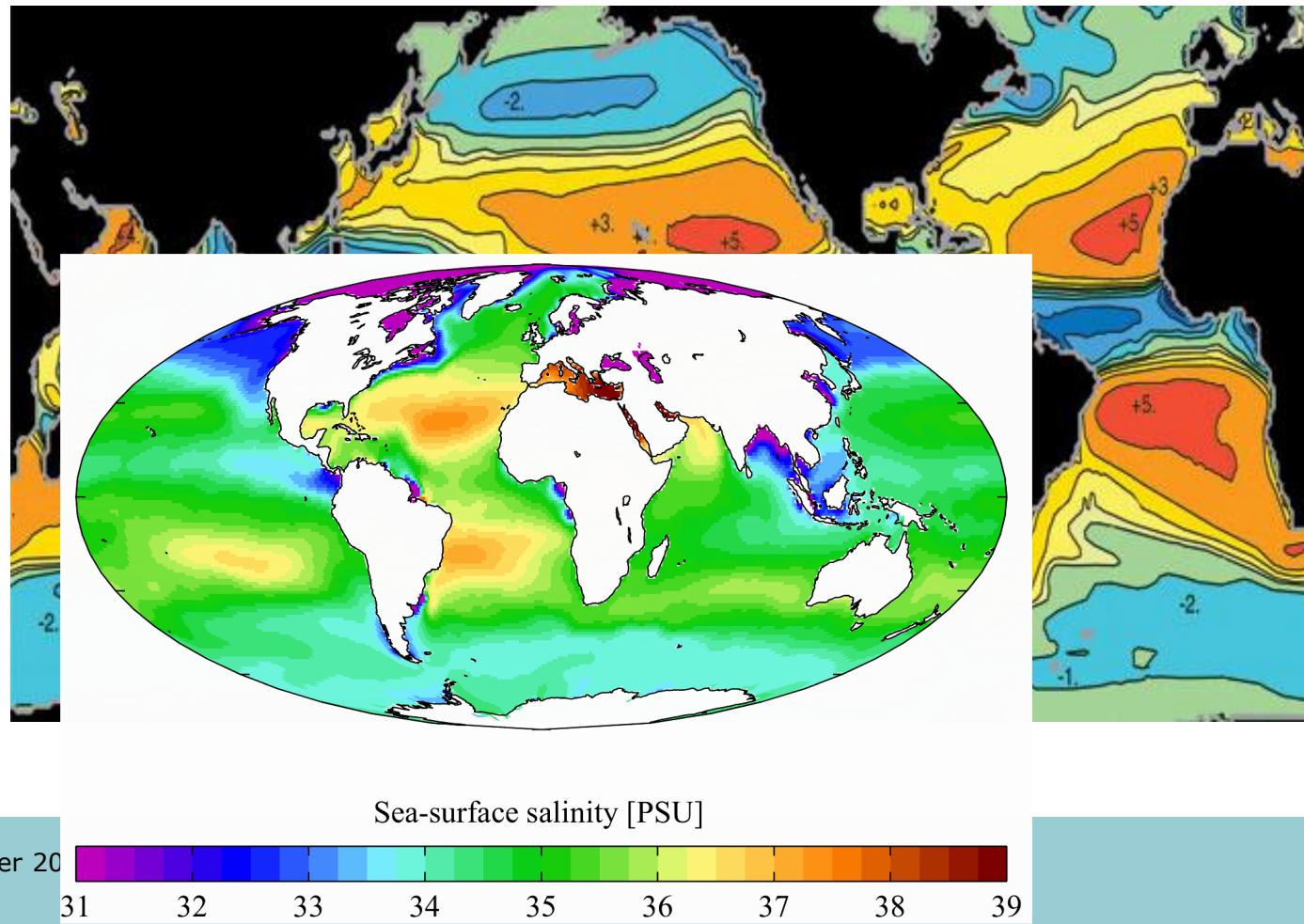


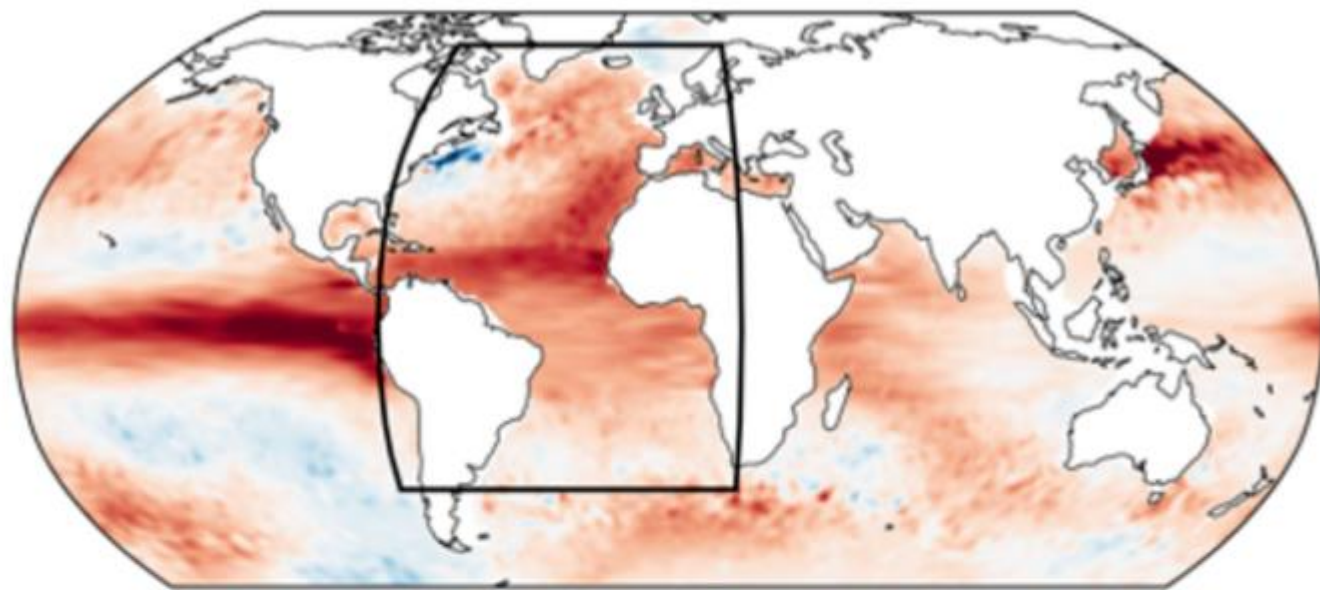
Jaargemiddelde saliniteit oppervlaktewater



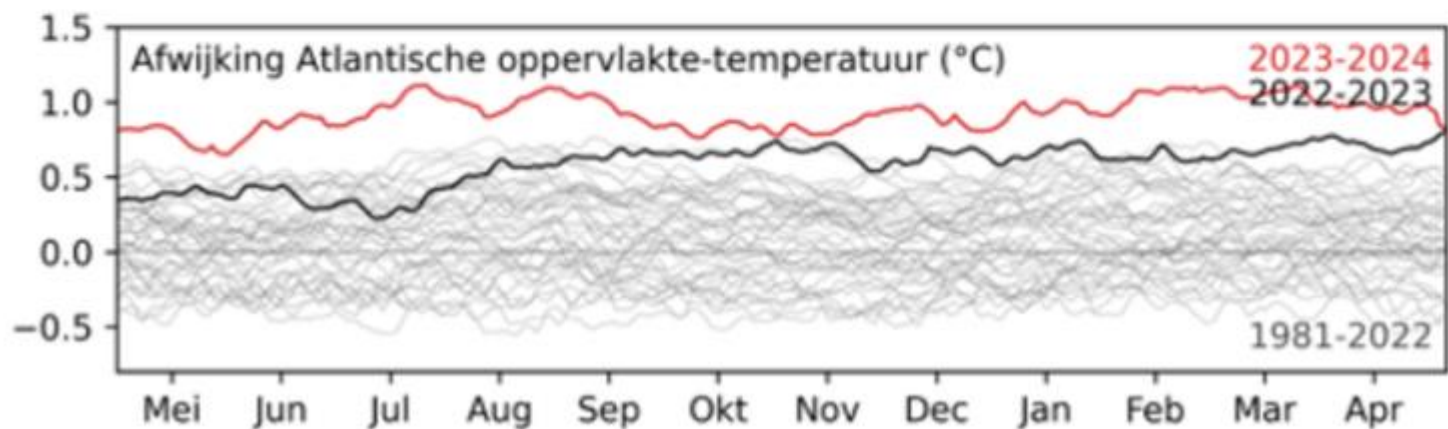


Jaar gemiddelde: Verdamping - Neerslag

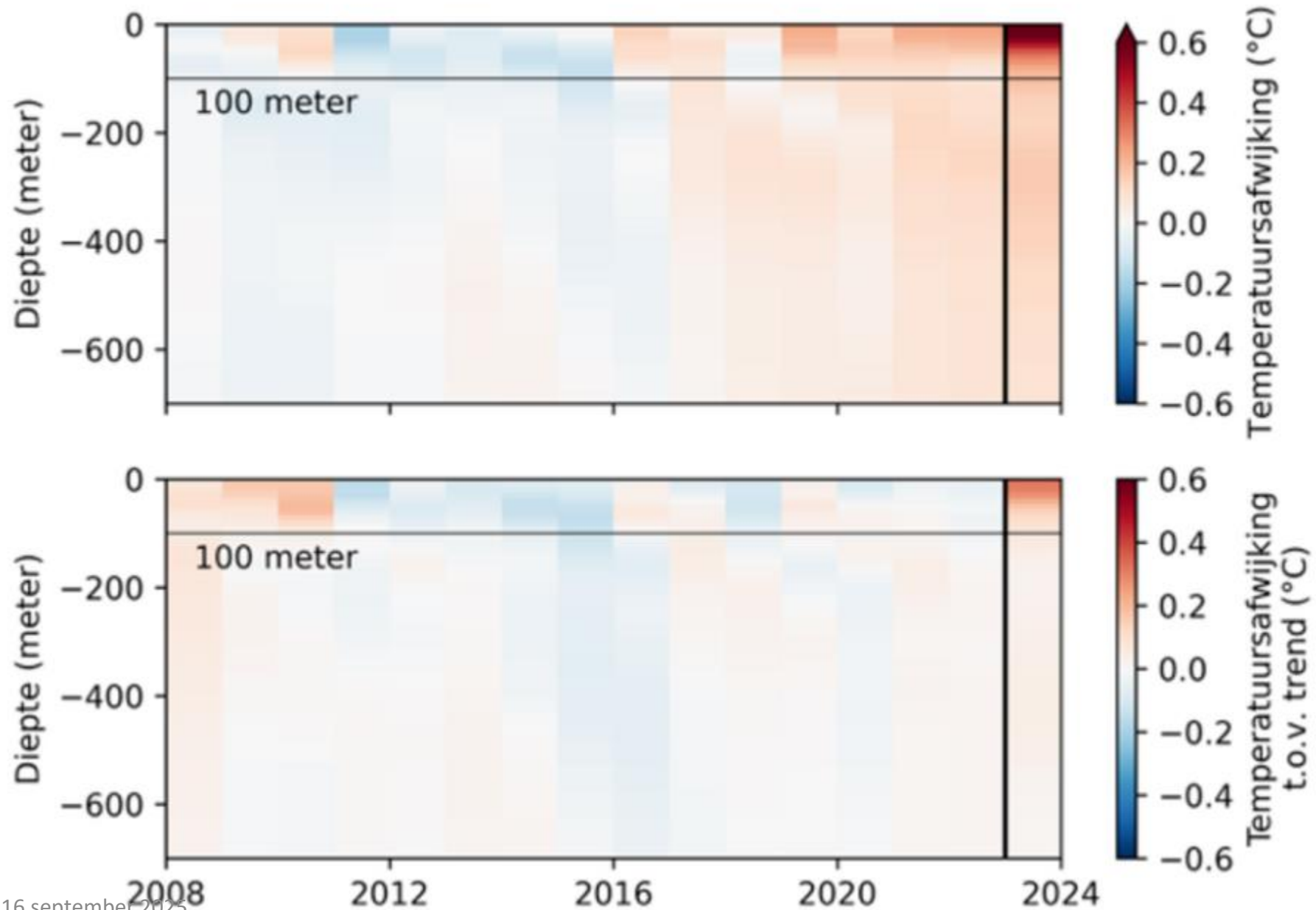


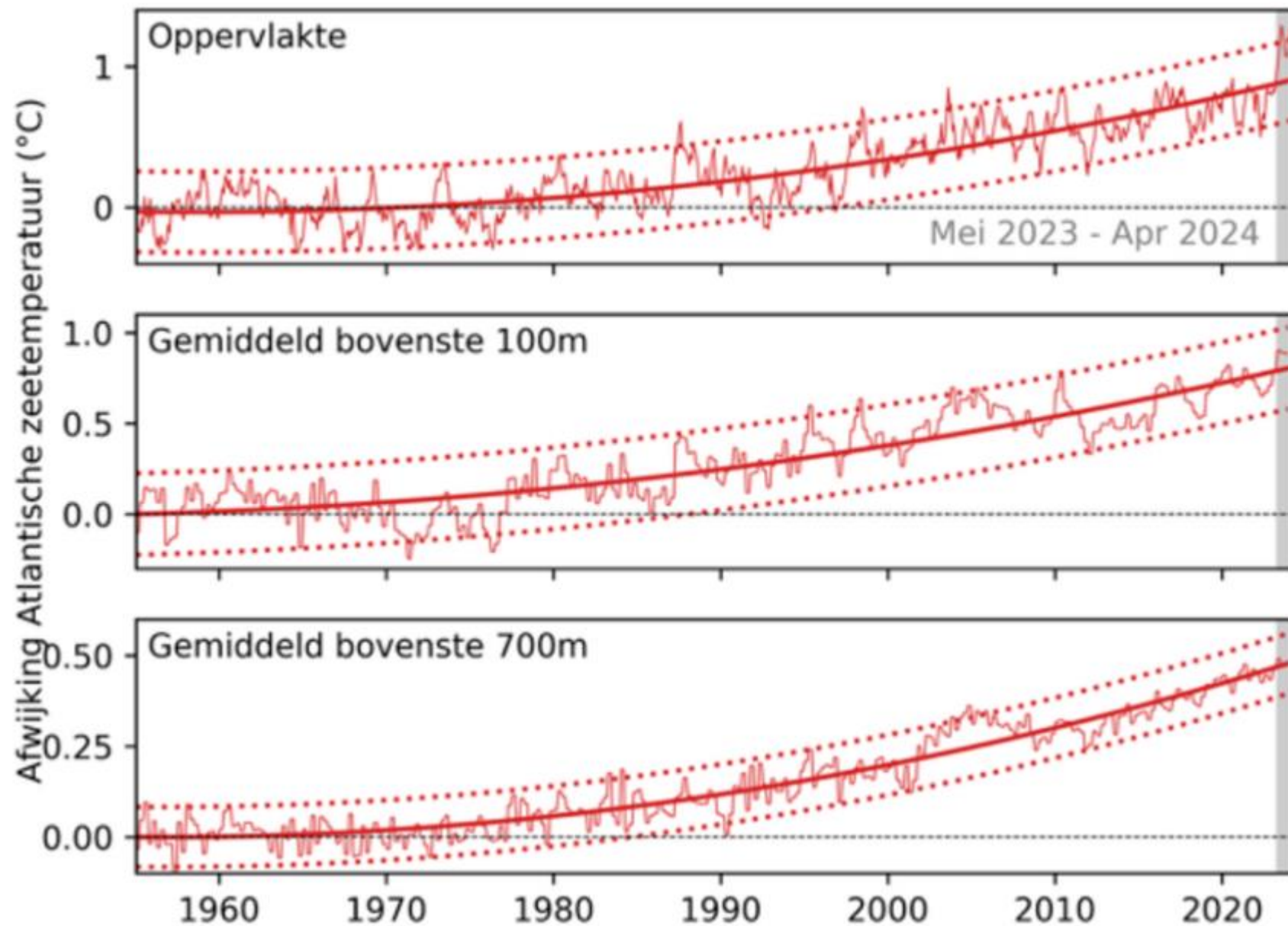


-2.0 -1.5 -1.0 -0.5 0.0 0.5 1.0 1.5 2.0
Afwijking oppervlakte-temperatuur (°C) Mei 2023 - Apr 2024



Sinds maart 2023 is het oppervlak van de Atlantische Oceaan ongekend warm voor de tijd van het jaar. Hoe uitzonderlijk zijn deze temperaturen? En is dit een teken van een versnelde opwarming of zelfs het overschrijden van een kantelpunt?





- https://climatereanalyzer.org/clim/sst_daily/?dm_id=natlan

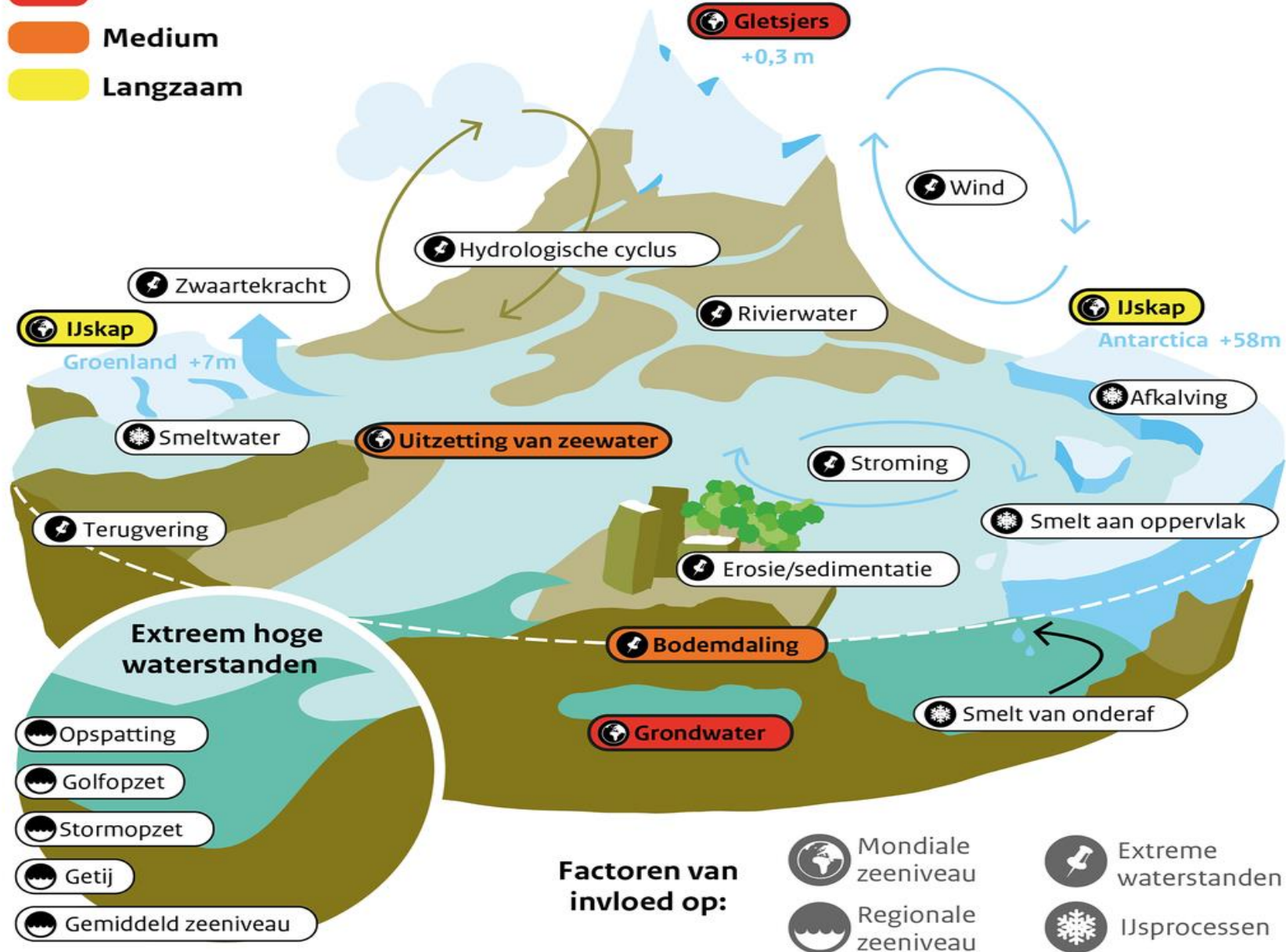
Belangrijkste factoren in zeespiegelstijging

De totale bijdrage bij volledige afsmelt en de tijdschaal waarop de processen reageren.

Snel

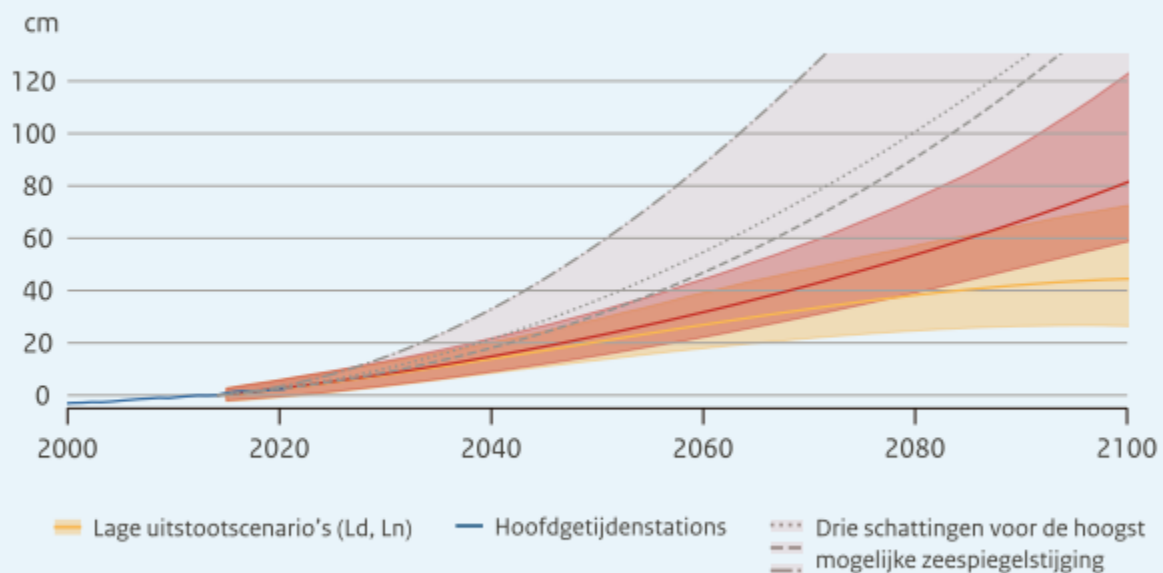
Medium

Langzaam

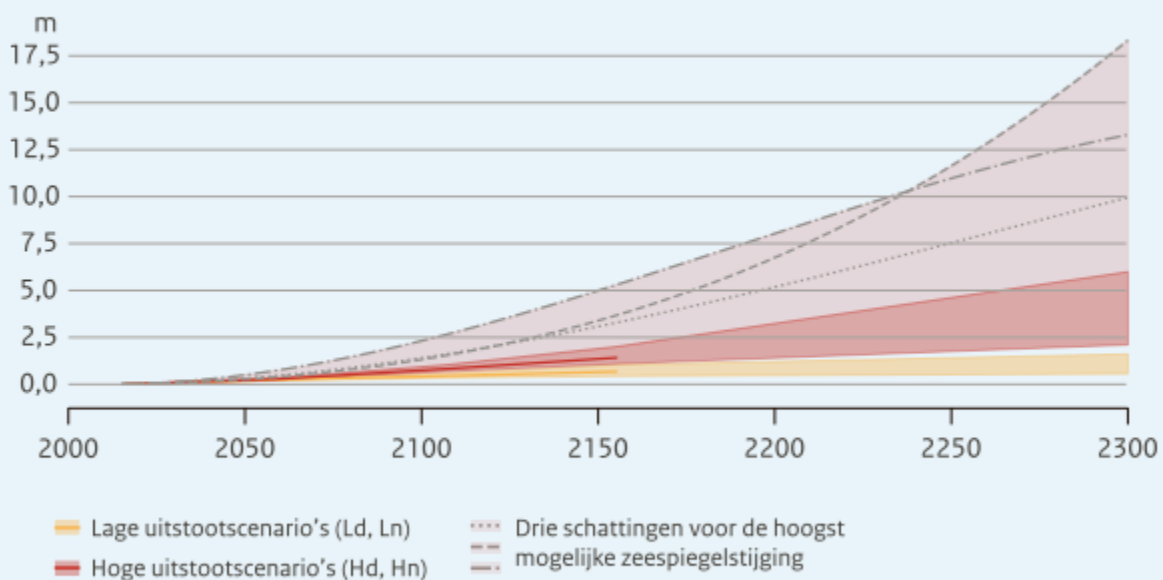


Zeespiegel bij Nederland

Scenario's tot 2100



Scenario's tot 2300



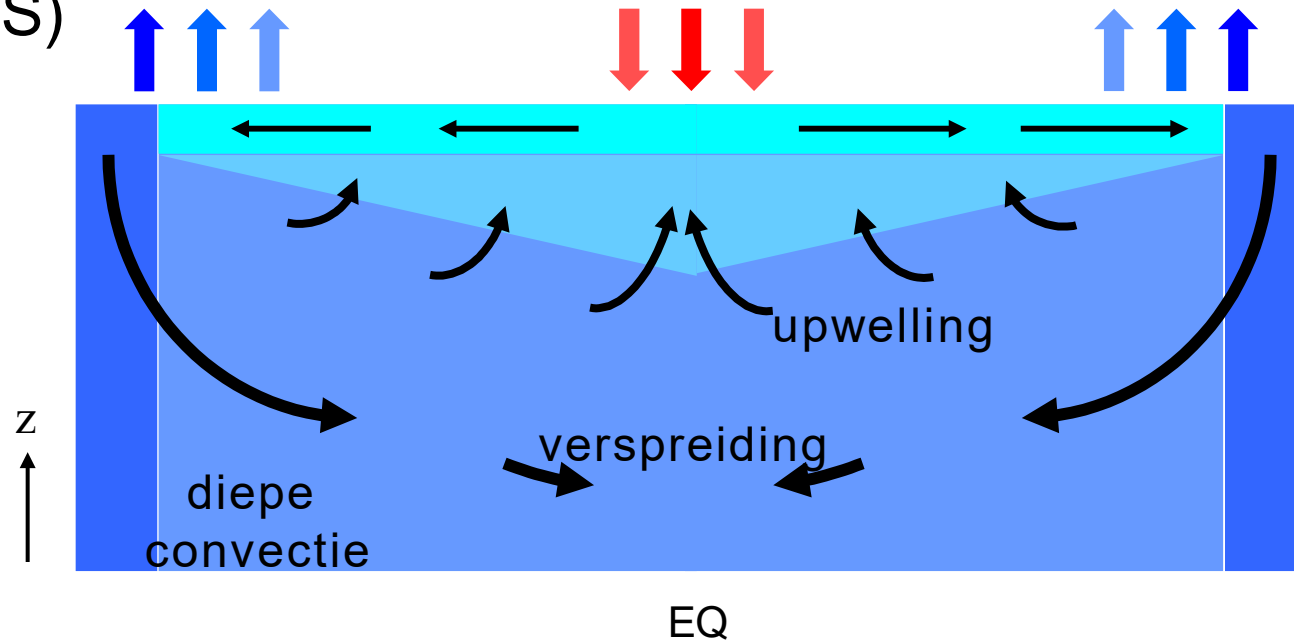
Figuur 25. Scenario's tot 2100 en 2300 van het zeeniveau bij Nederland t.o.v. het huidige niveau (mediaan en 90%-band), inclusief drie schattingen van de hoogst mogelijke zeespiegelstijging (stippellijnen in lichtroze band).

A world map showing the continents of North America, South America, Africa, Europe, Asia, and Australia. The map is centered on the Atlantic Ocean, with the Americas on the left and Europe/Africa in the center. The text "thermohaliene circulatie" is overlaid in the center of the map.

thermohaliene circulatie

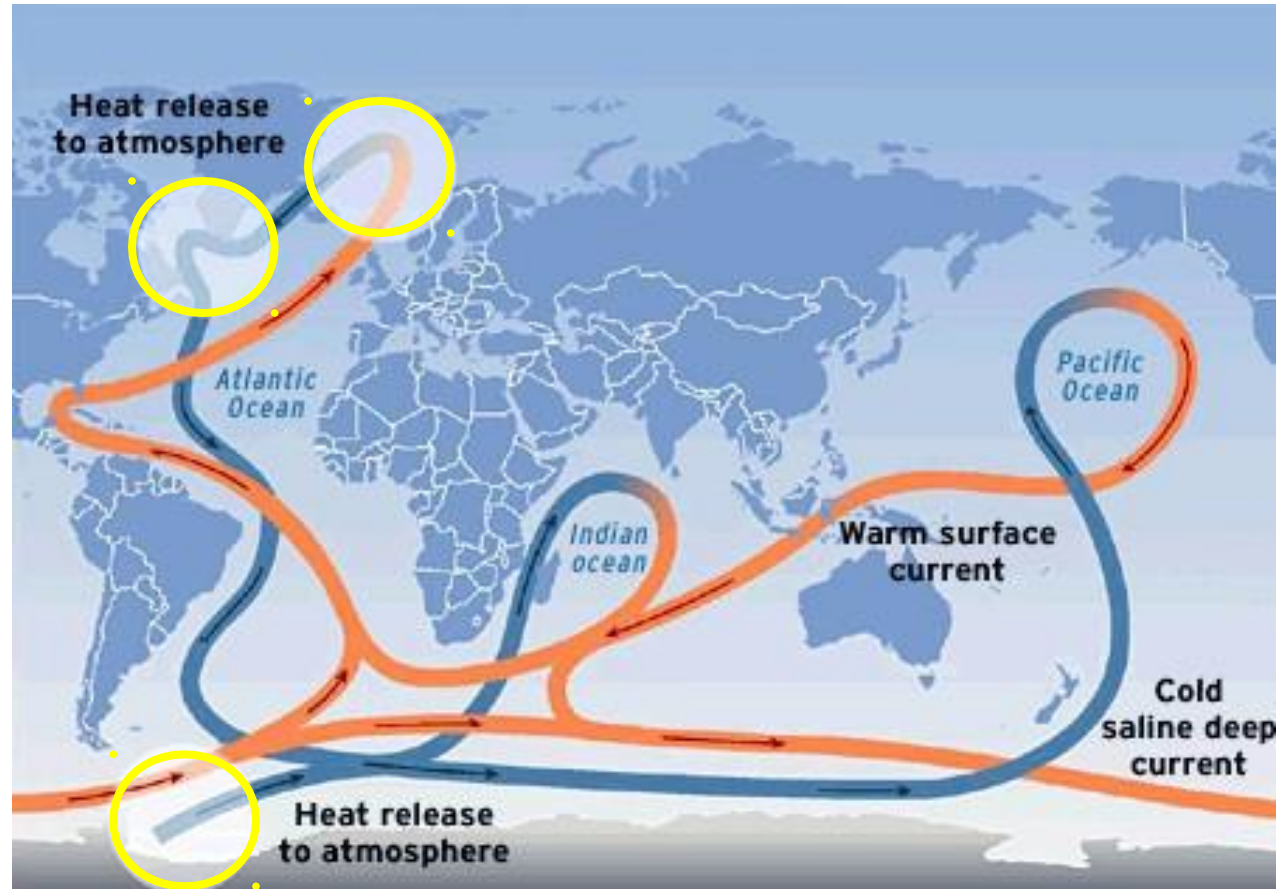
thermohaliene circulatie

stromingen gedreven door variaties in dichtheid
(T, S)



- geometrie bassins / forcing bepalen waar convectorie optreedt
- eigenschappen van het 'convectorieve eindproduct' verschillen
→ specifieke watermassa's op karakteristieke diepte

de transportband van de oceaan

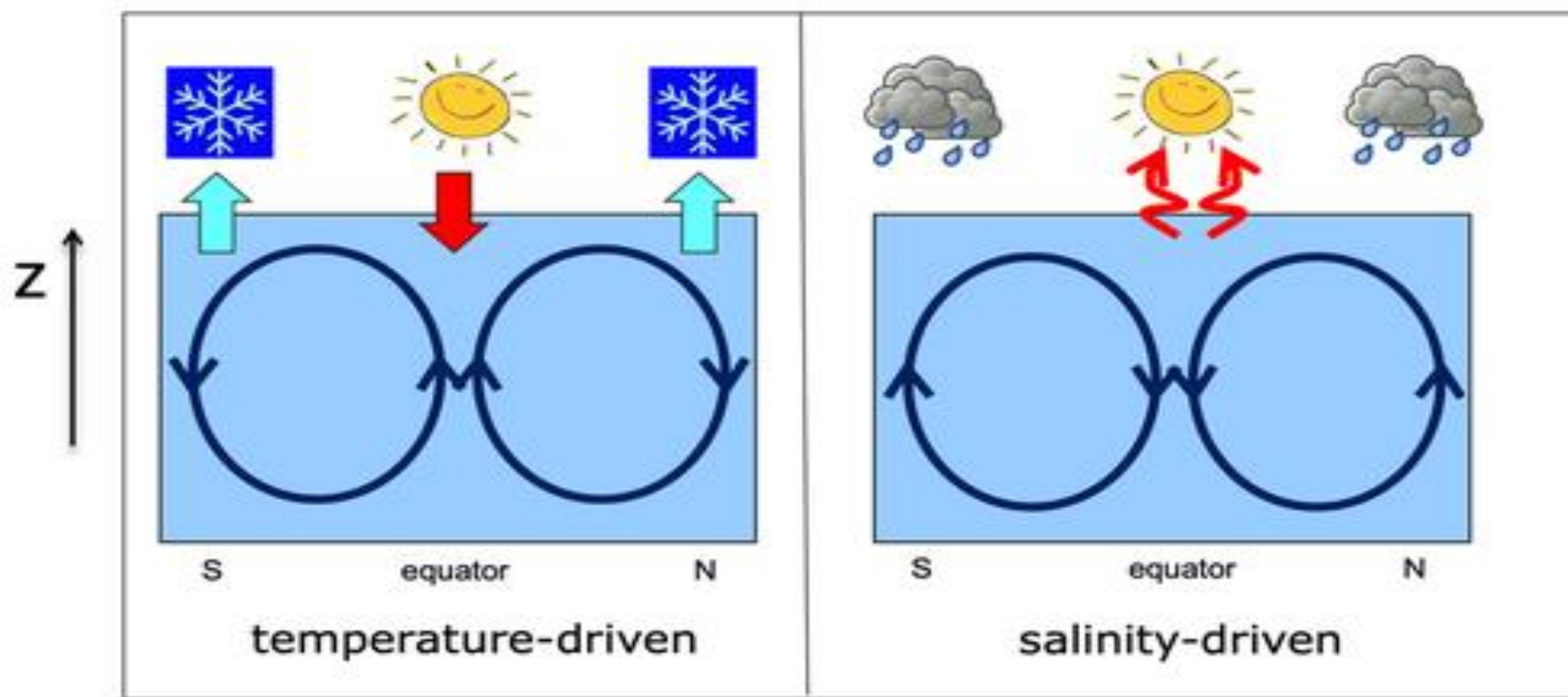


‘The great ocean conveyor’ [Broecker, 1991]

Hoe de golfstroom ons warmte brengt



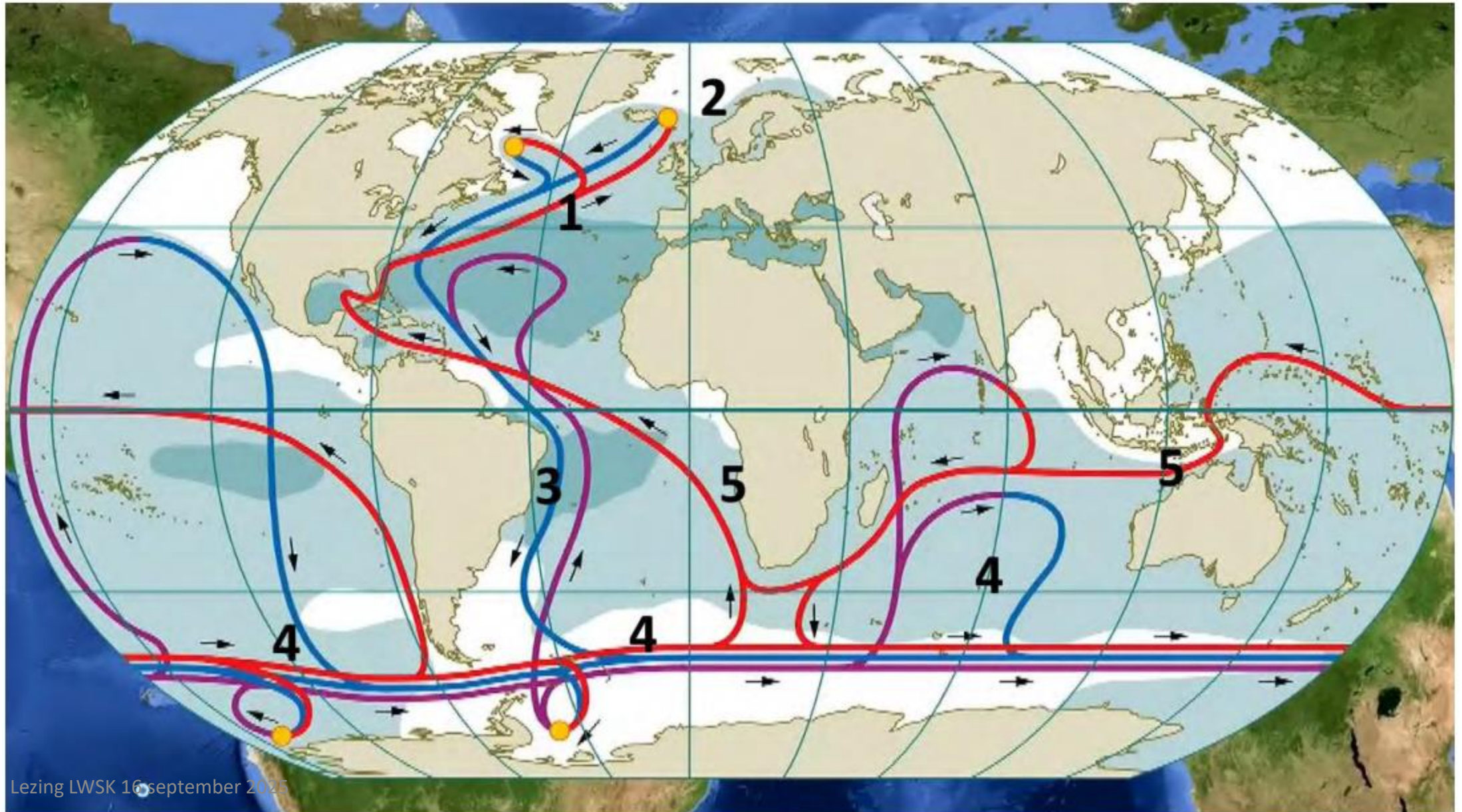
- 1 In de tropen wordt de toplaag opgewarmd en zouter, doordat er veel water verdampt
- 2 Opgewarmd, zout water vanaf de evenaar geeft warmte af en warmt de continenten op
- 3 Bij Groenland zinkt het afgekoelde water naar de bodem en stroomt terug
- 4 De 'subpolaire ring': overgangsgebied waar water lijkt af te koelen
- 5 De koude stroming gaat op sommige plekken onder de warme stroming door
- 6 Op diverse plekken aan de evenaar komt het teruggestroomde water weer boven



Temperatuurverschillen leiden tot een stroming van de tropen naar hoge breedtegraden aan het oppervlak (Figuur - links). Op hoge breedtes is het water kouder dan in de tropen. Koud water heeft een hogere dichtheid dan warm water, en dus zinkt het koude water bij de polen de diepe oceaan in. In de diepzee ontstaat een koude stroming van pool naar evenaar, en het tropisch warme water stroomt noordwaarts aan het oppervlak ter compensatie.

Wanneer de stroming alleen door **Zoutverschillen** bepaald zou worden, zou er een stroming in omgekeerde richting ontstaan (Figuur -rechts). Het water bij de evenaar is relatief zout omdat daar veel water verdampt. Op hogere breedtes valt netto meer neerslag dan dat er water verdampt, en is de oceaan minder zout. Zout water heeft een hogere dichtheid dan zoet water, en dus zakt in dit voorbeeld het water juist in de tropen naar de diepte. Aan het oppervlak ontstaat een stroming van pool richting de tropen.

Figuur 1. De huidige thermohaliene circulatie, naar Rahmstorf (2016). Het zeewater stroomt meridionaal door de Atlantische Oceaan (1-4, AMOC) en veel meer zonaal langs Antarctica (4). Warmte wordt toegevoegd in de twee andere oceanen (4 en 5). Donkerblauw is het sterkst halien (zouthoudend).



Pause



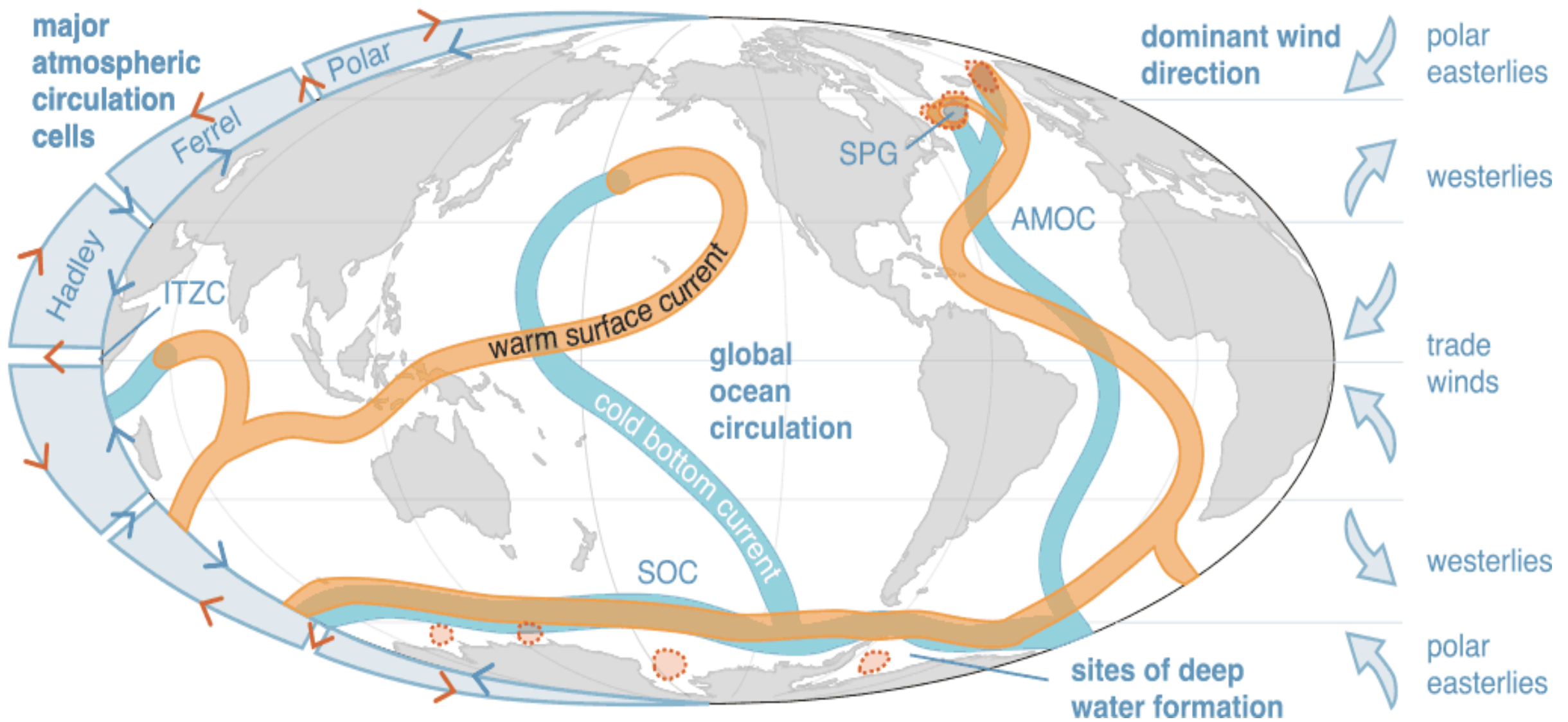


Figure: 1.4.1 Atmospheric circulation cells, dominant wind directions, key ocean basins, surface currents and deep water formation sites. AMOC: Atlantic Meridional Overturning Circulation; SPG: Subpolar Gyre; SOC: Southern Ocean Circulation; ITCZ: Intertropical Convergence Zon

Nu

De Golfstroom is deel van de subtropische wervel en de verticale, Atlantische Meridionale Overturning Circulatie (AMOC)

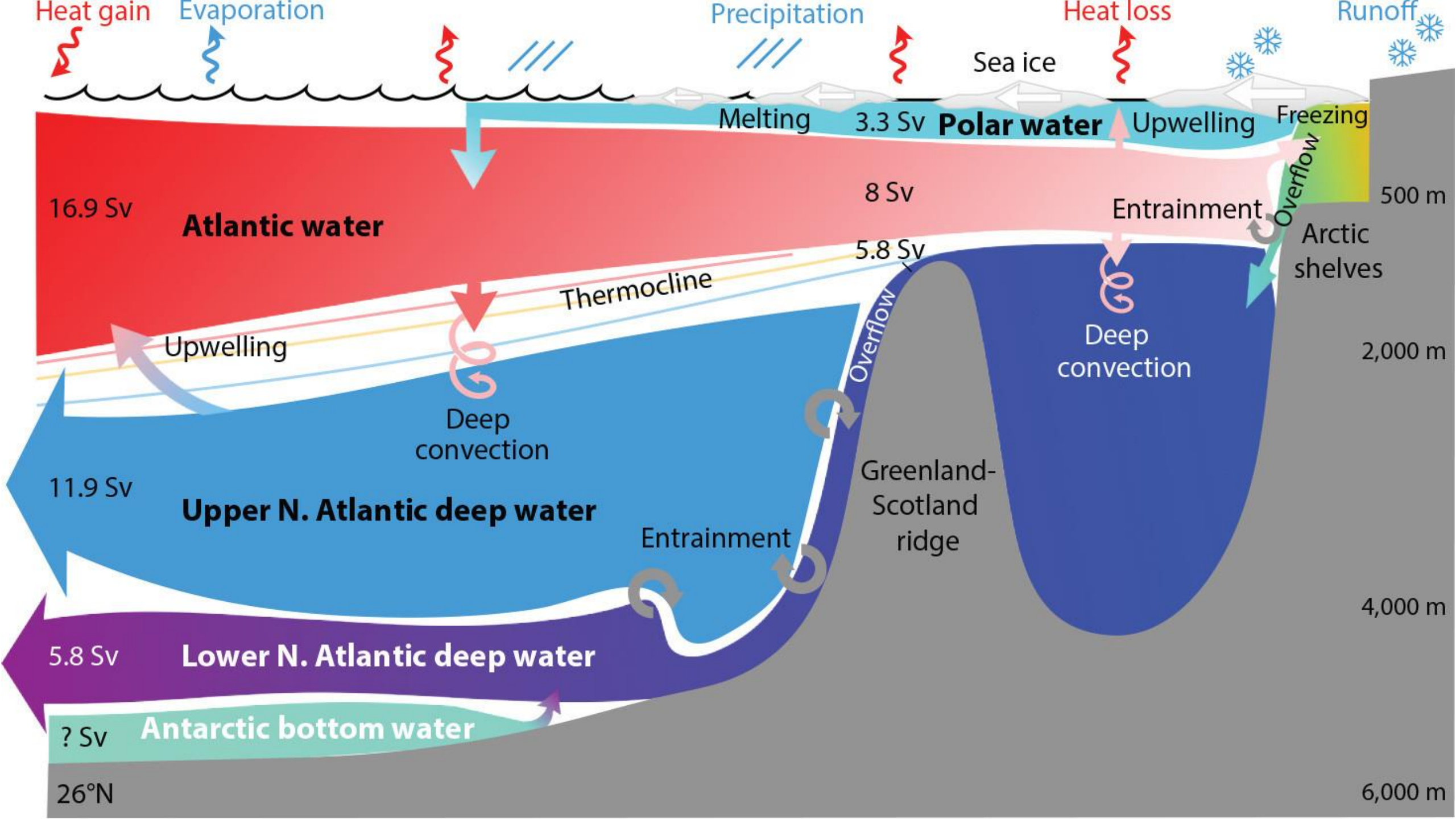


Lezing LWSK 16 september 2025

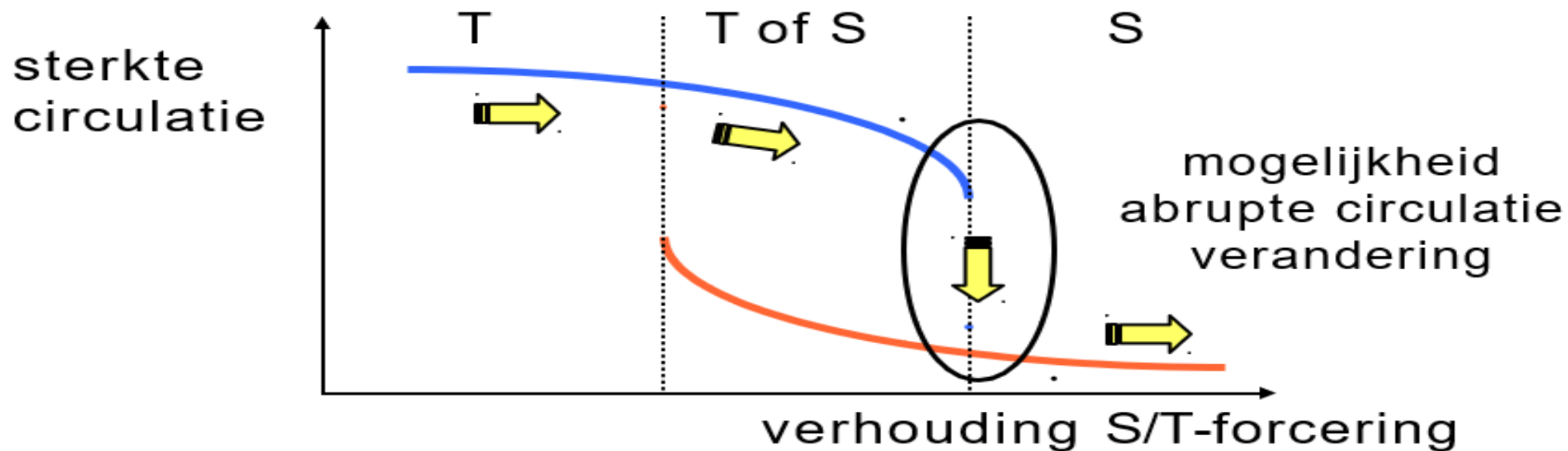
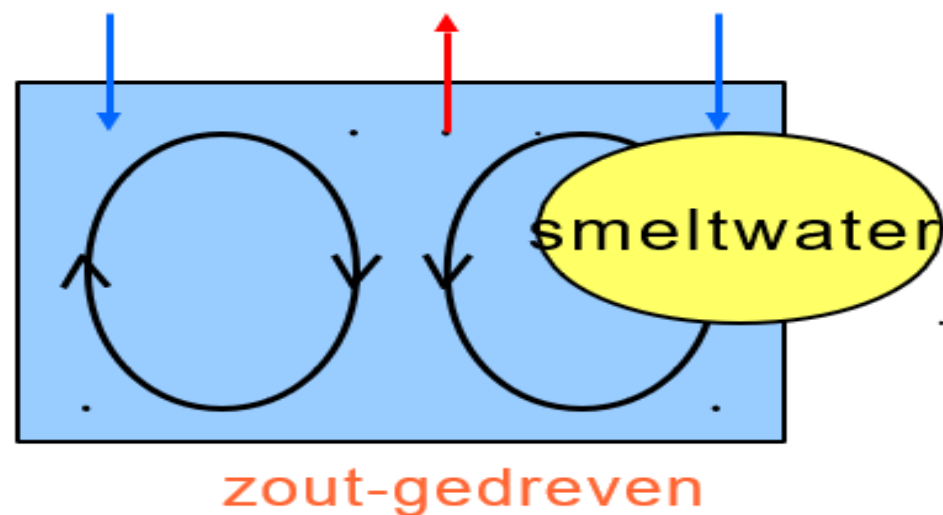
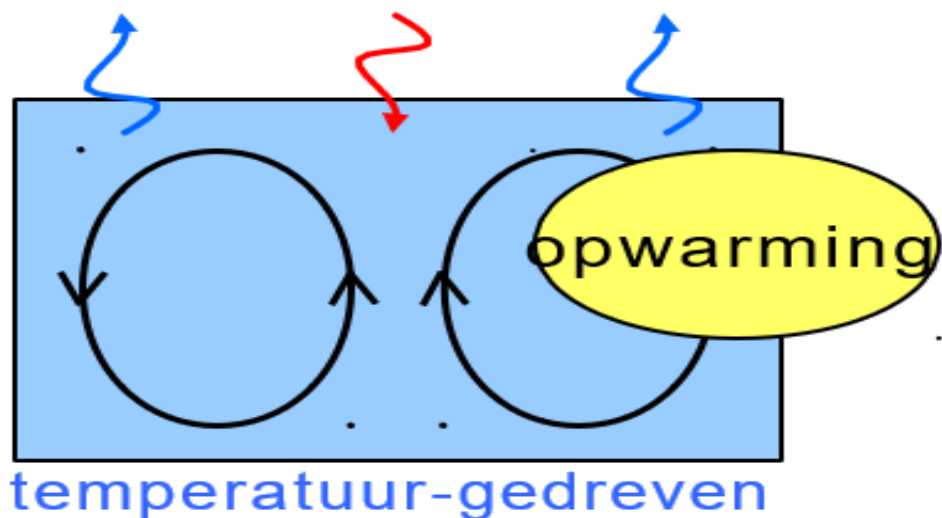
In een warmere wereld

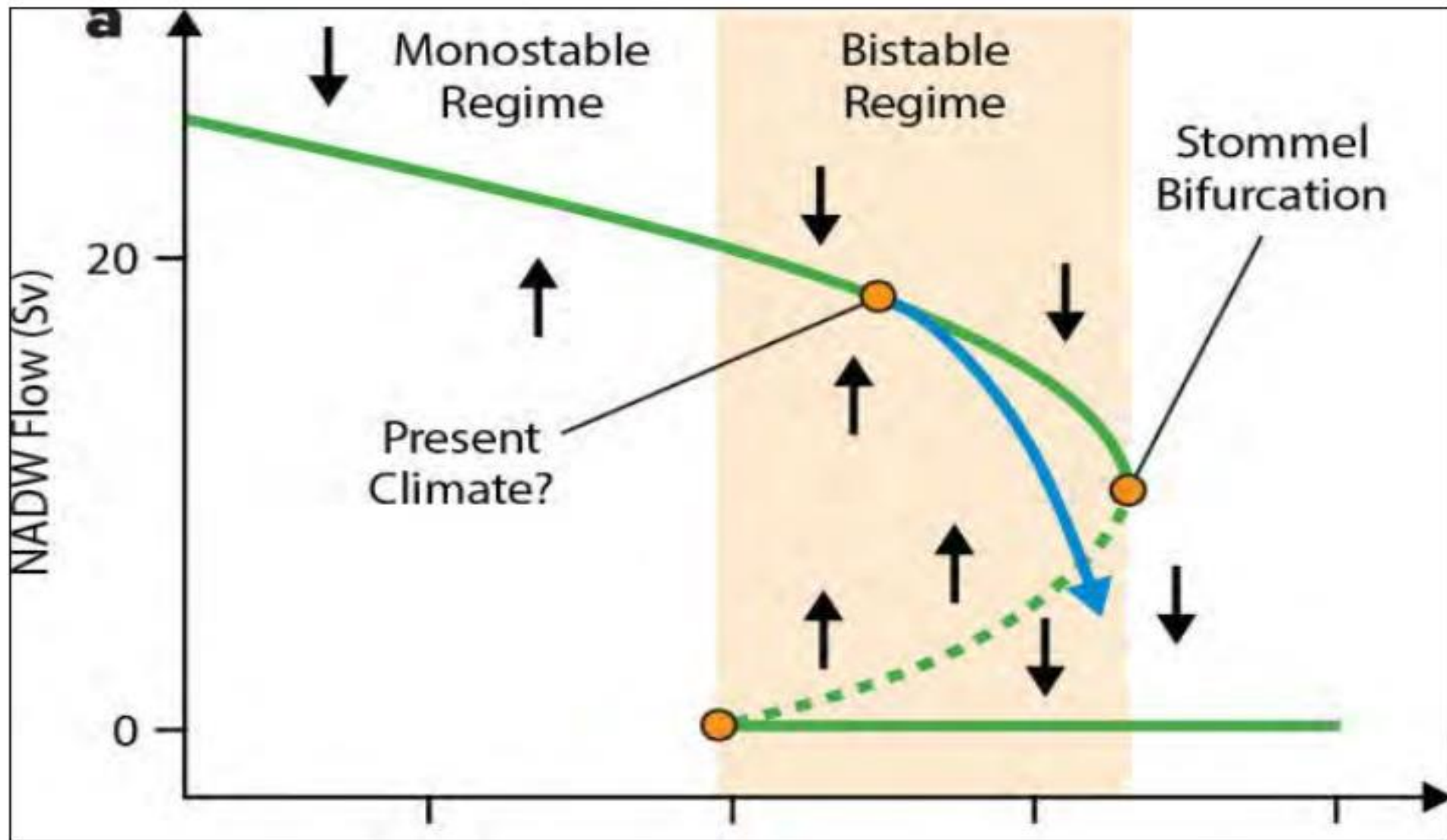
Klimaatverandering verzwakt de AMOC, waardoor de Golfstroom vertraagt





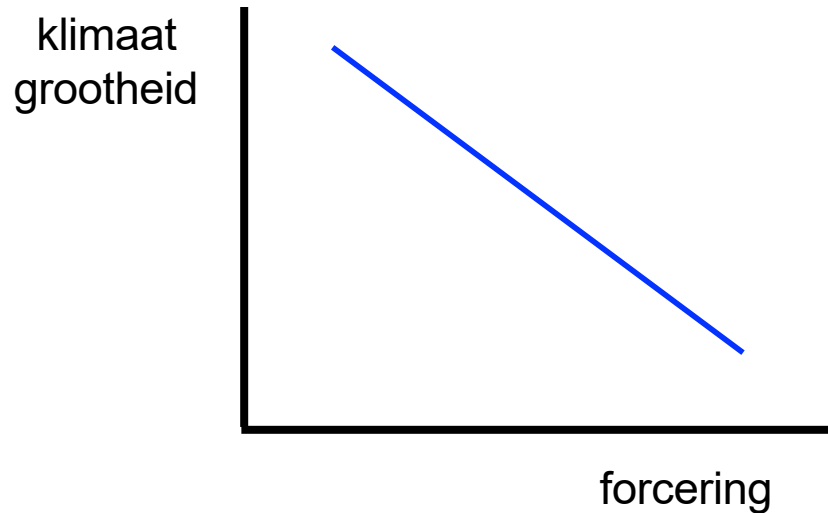
meervoudige evenwichten



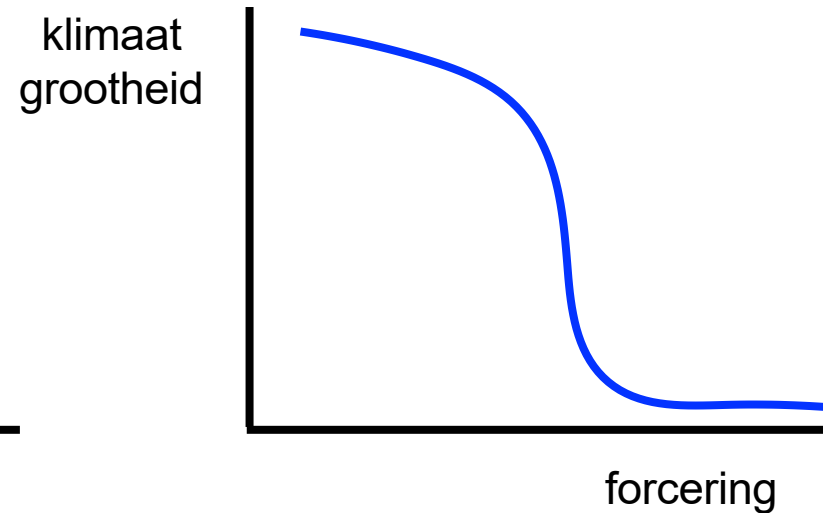


Figuur 2. Stabiliteitsdiagram van de AMOC (Rahmstorf), met verticaal de kracht van de AMOC in sverdrups (miljoen liter per seconde). In het bistabiele regime kan de AMOC stil komen te vallen, als het zoutgehalte van de oceaanstroming te sterk afgenomen is.

Forcing- respons relaties



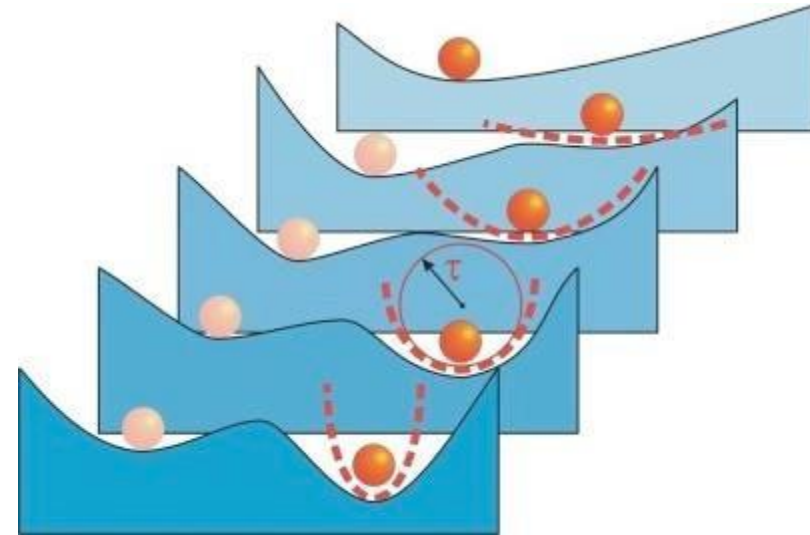
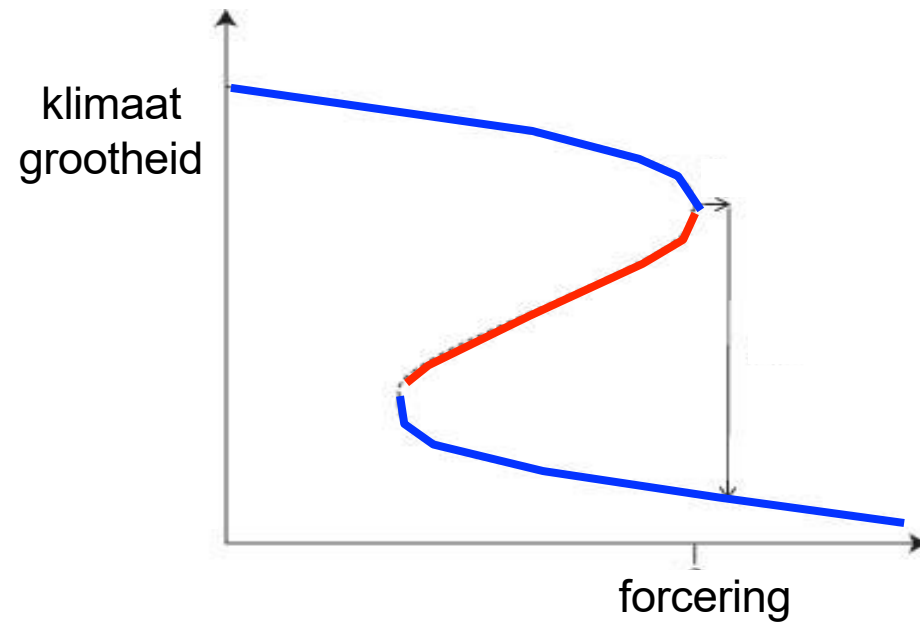
Voorbeeld: diffusie



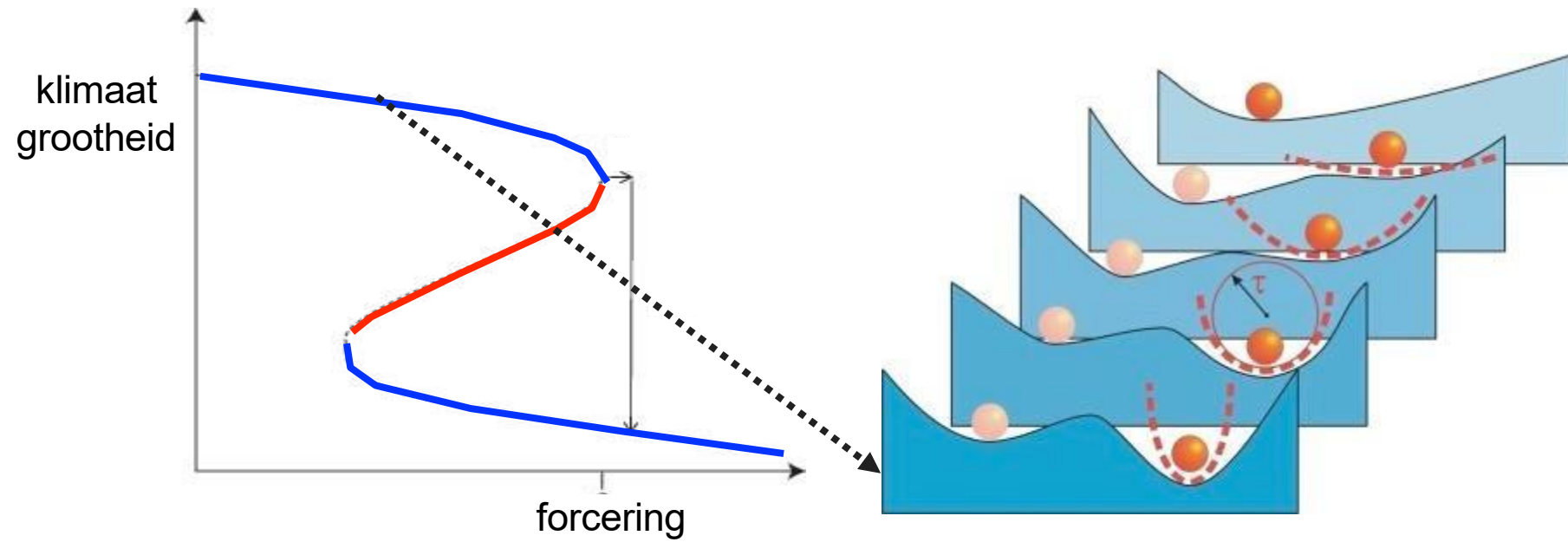
Voorbeeld: straling

Afhankelijk van niet-lineaire processen
(advectie, straling) en terugkoppelingen

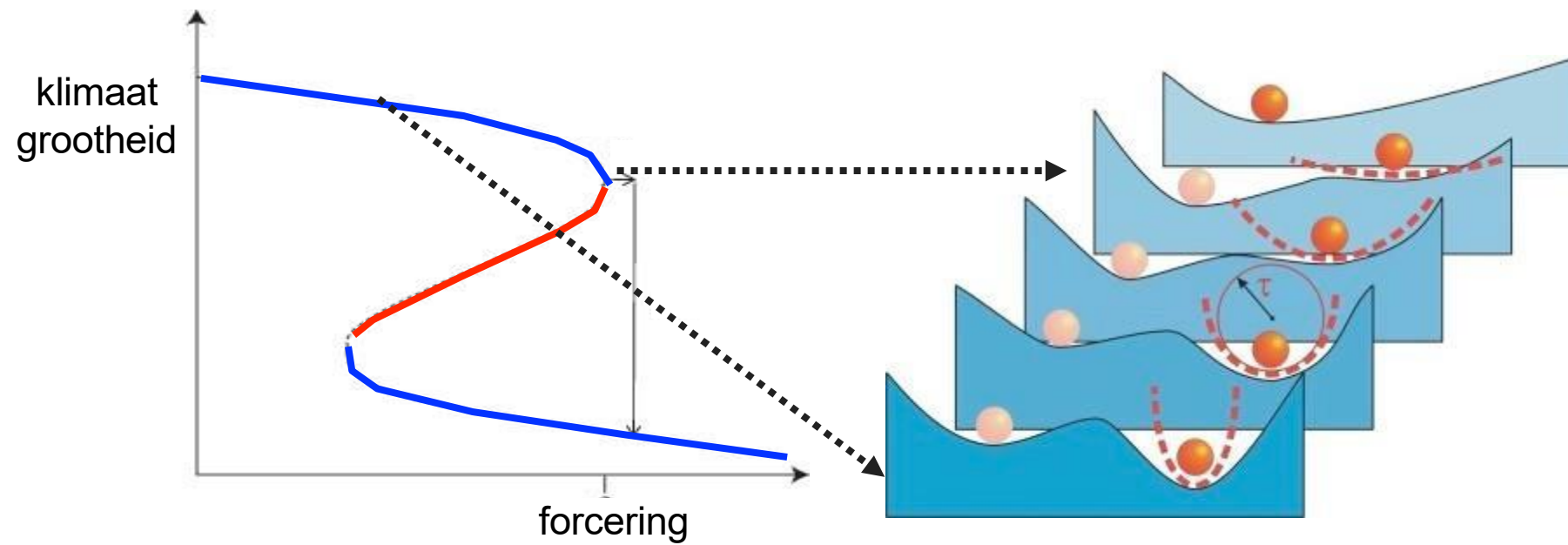
Kritische condities



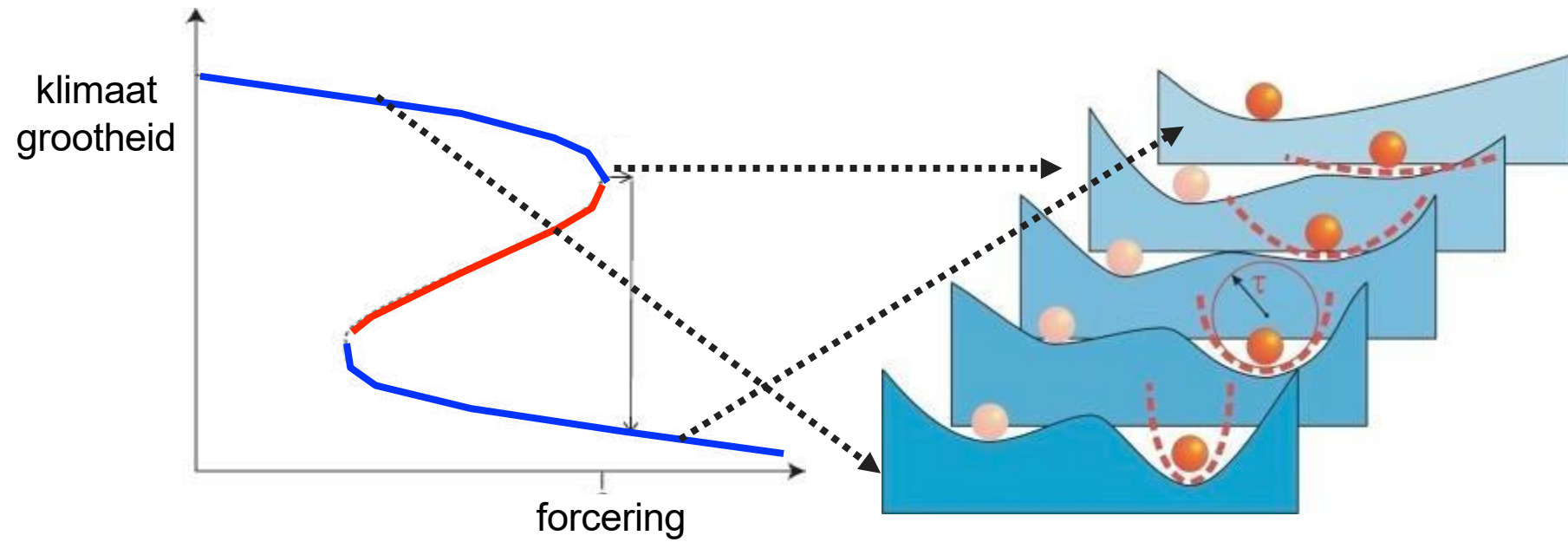
Kritische condities



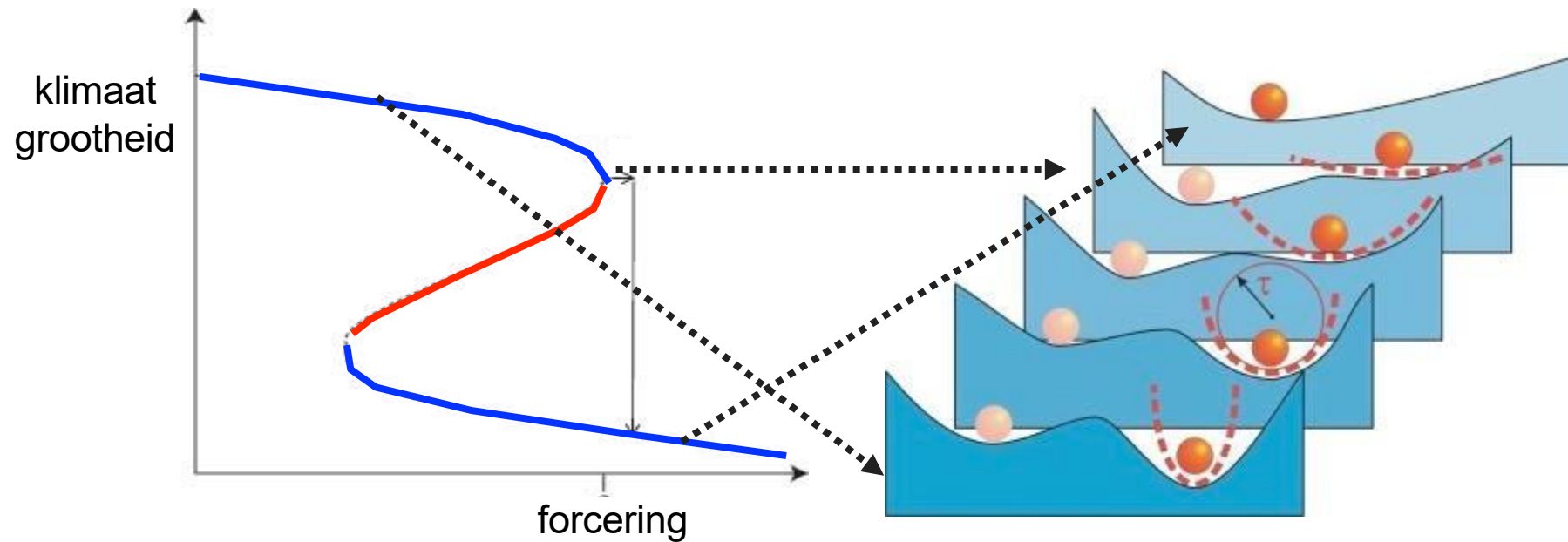
Kritische condities



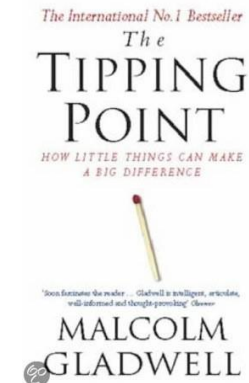
Kritische condities



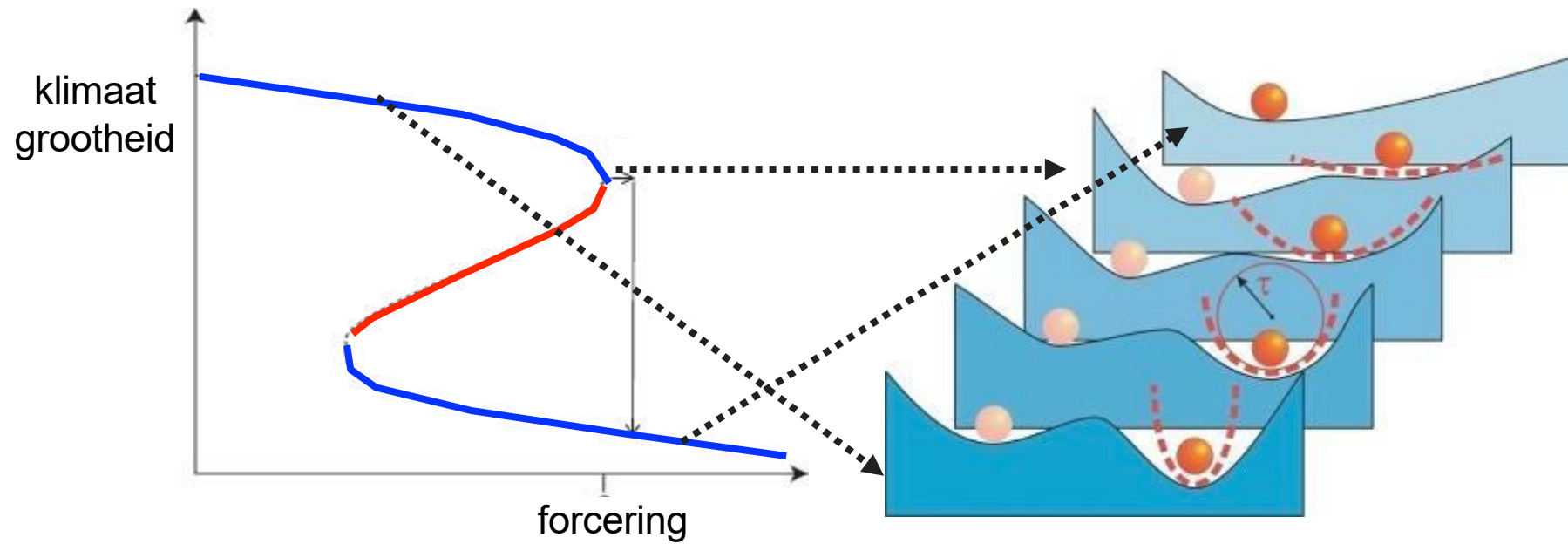
Kritische condities



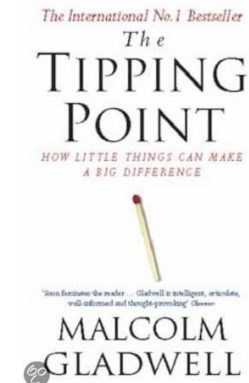
Kantelpunt (Tipping point):
De condities waarbij de toekomstige
toestand kwalitatief verandert.



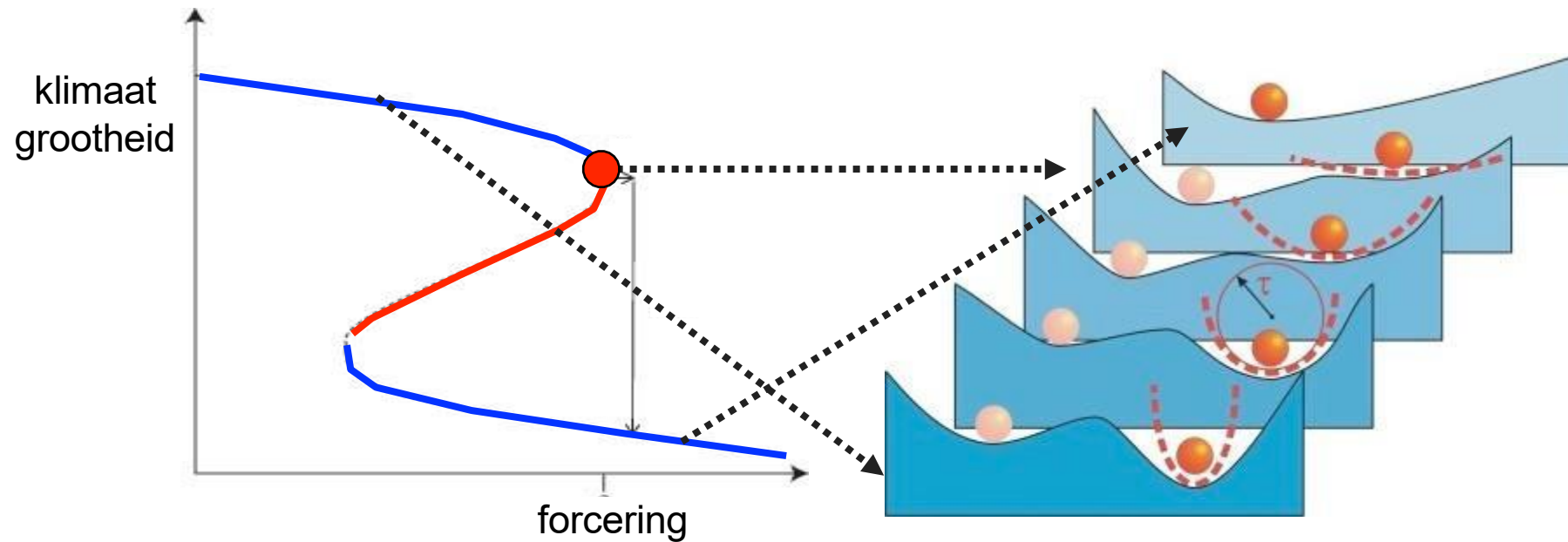
Kritische condities



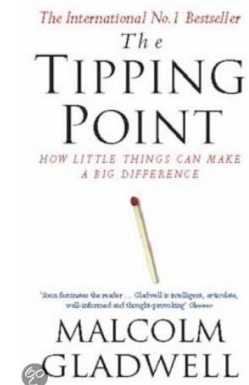
Kantelpunt (Tipping point):
De condities waarbij de toekomstige
toestand kwalitatief verandert.



Kritische condities



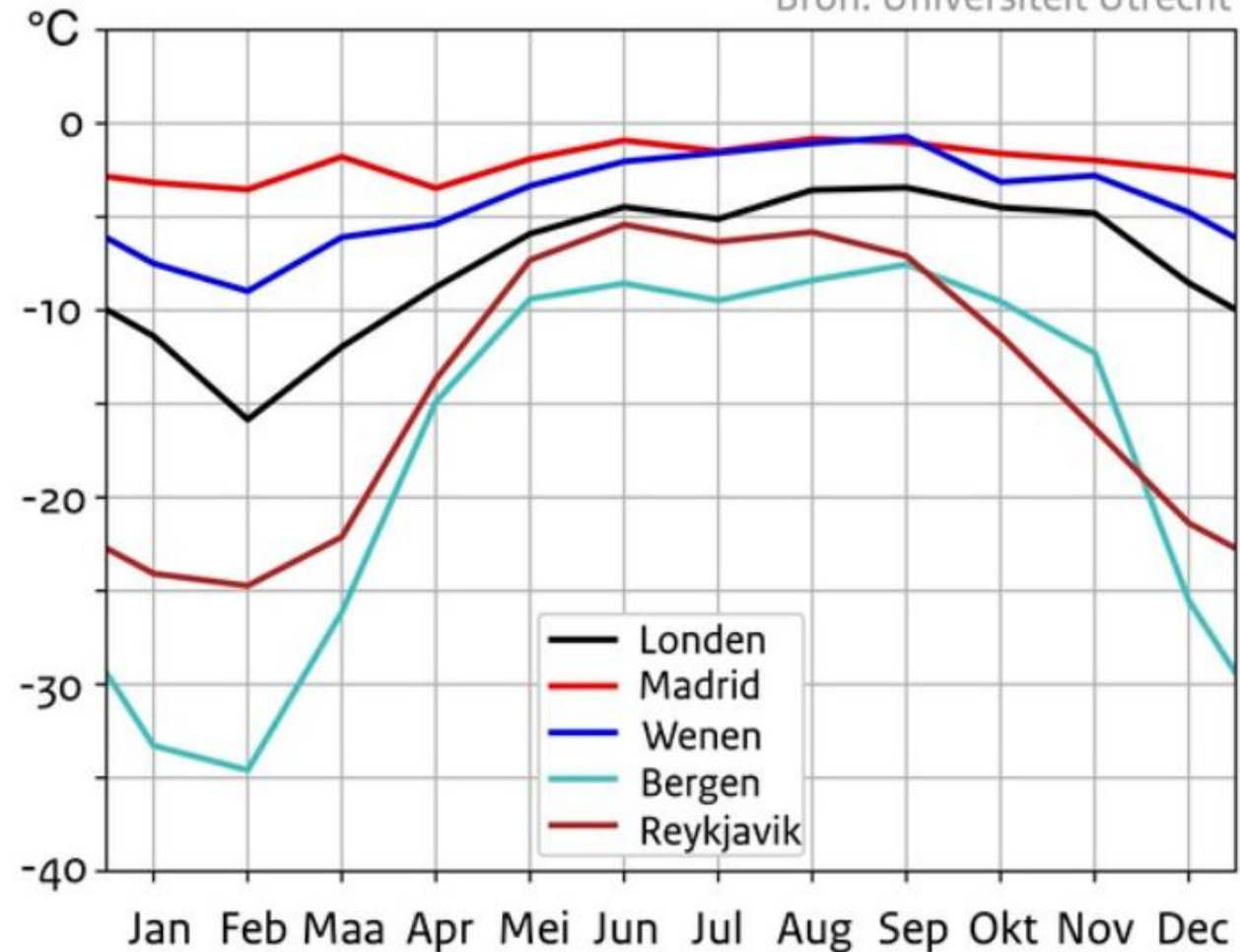
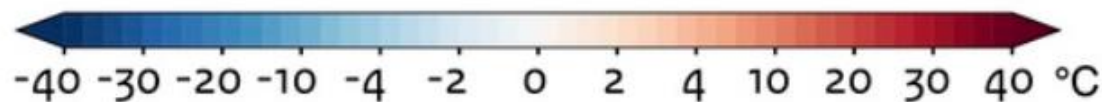
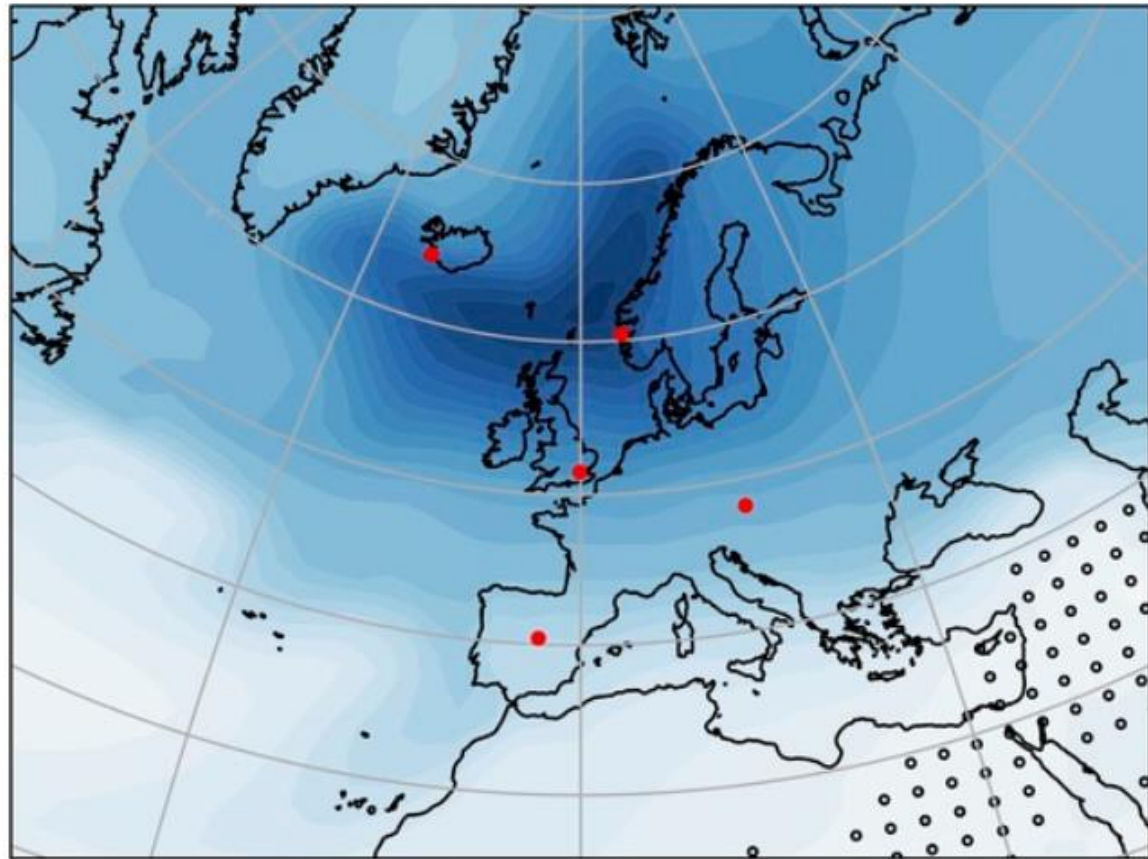
Kantelpunt (Tipping point):
De condities waarbij de toekomstige
toestand kwalitatief verandert.



Temperatuurverandering in 100 jaar door verandering in oceaancirculatie

Simulatie met klimaatmodel: AMOC bereikt kantelpunt en stopt in 100 jaar tijd

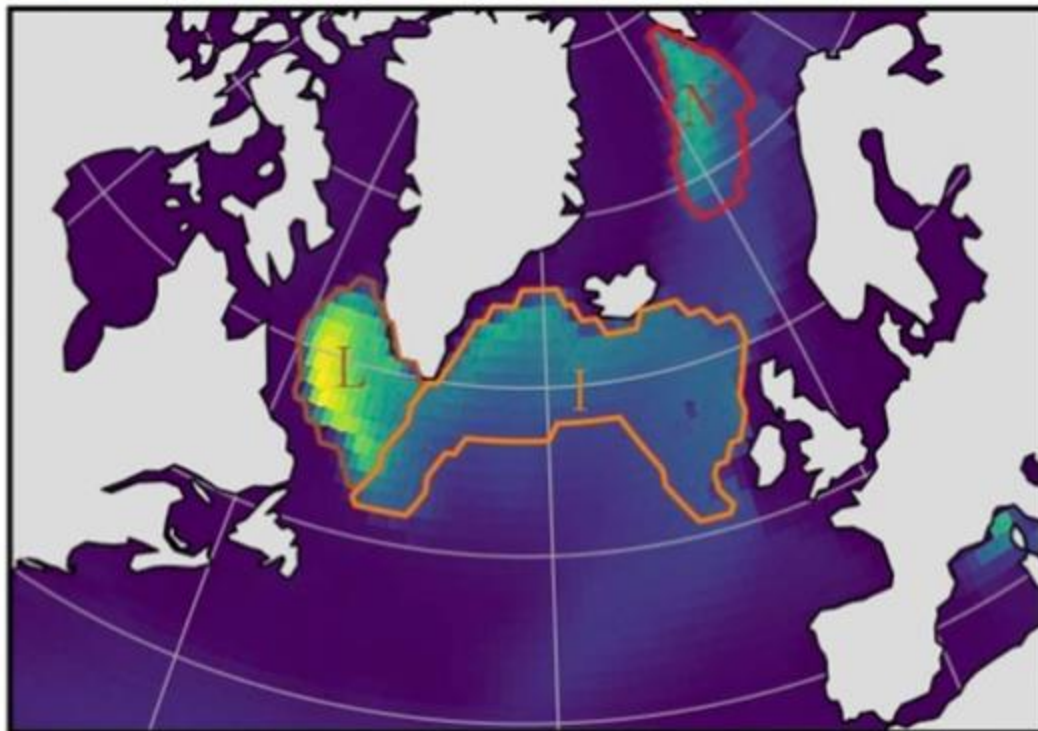
Bron: Universiteit Utrecht



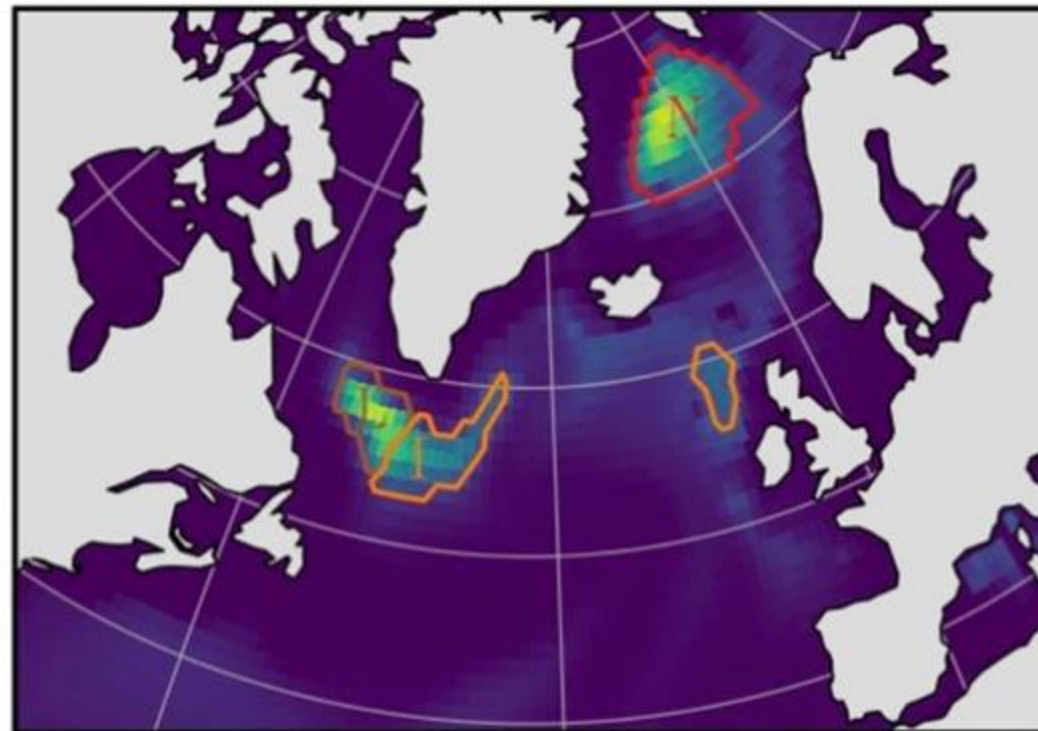
Gebieden waar diep water wordt gevormd in de winter

Kleur geeft aan tot op welke diepte oppervlakte water wordt doorgemengd in maart in de periode 1965-1995

Japans klimaatmodel (MRI-ESM 2.0)



Engels klimaatmodel (UKESM1-o-LL)



©KNMI



Diepte (meter)

L: Labradorzee

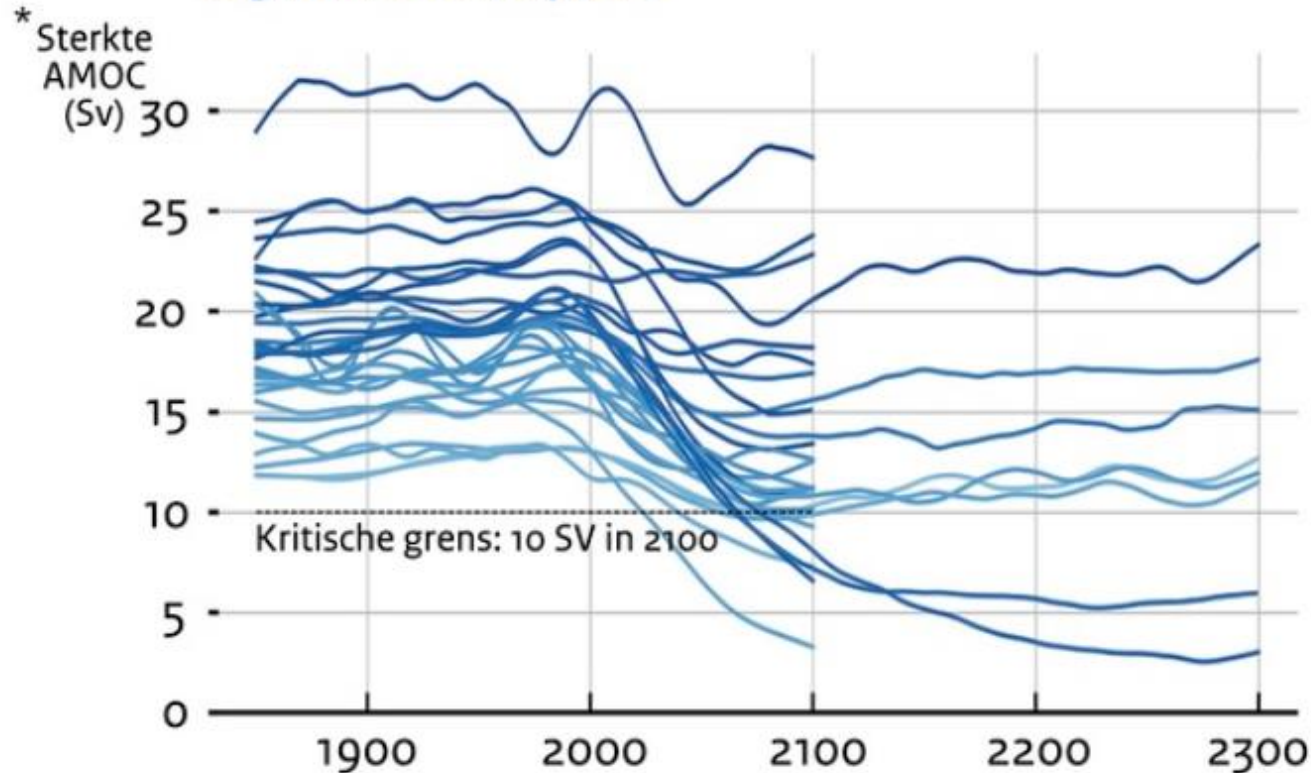
I: Irmingerzee

N: Noorse Zee

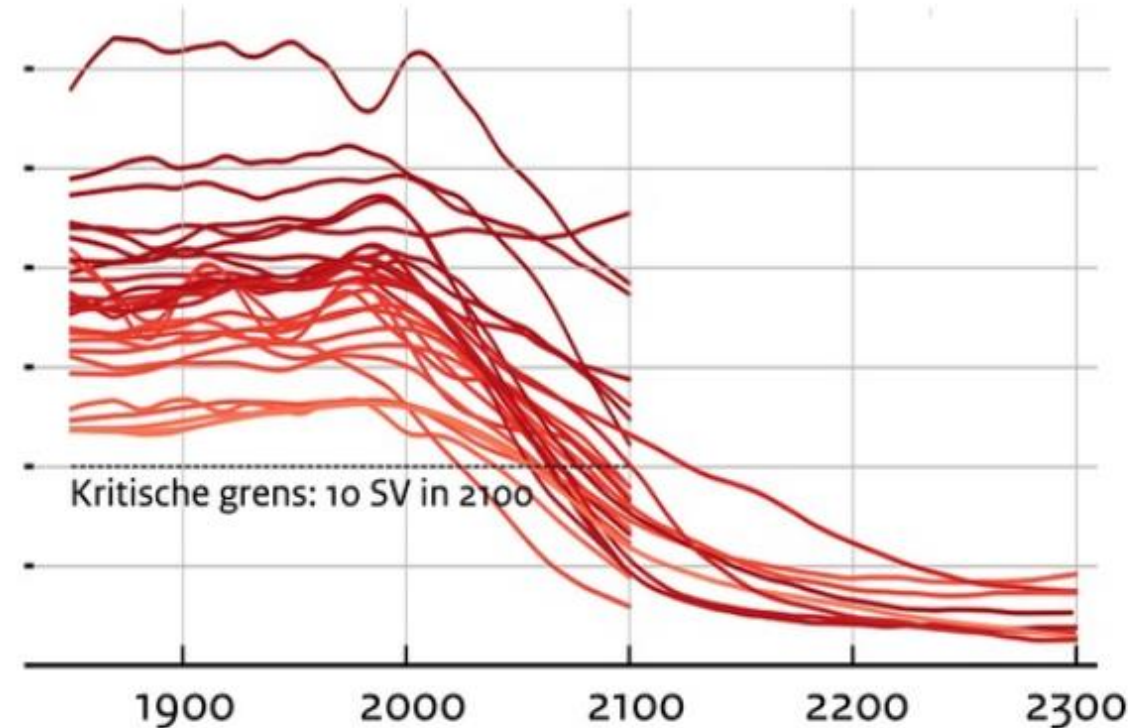
AMOC valt stil na 2100 in een groot deel van de klimaatmodellen

Hoe hoger de toekomstige uitstoot van broeikasgassen, hoe groter de kans op stilvallen

Lage uitstoot (ssp126)



Hoge uitstoot (ssp585)



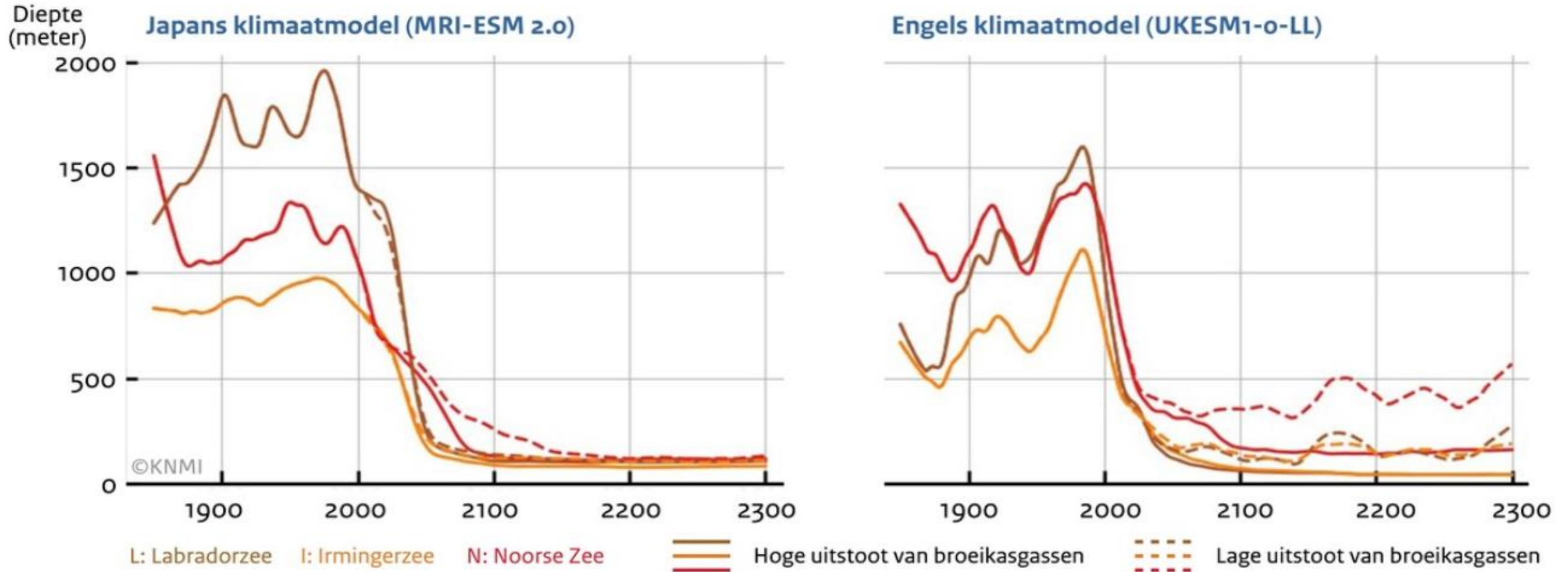
De AMOC valt stil na 2100 in alle CMIP6 klimaatsimulaties met een AMOC-sterkte minder dan 10 Sv in 2100

©KNMI

* Sterkte van de AMOC: de hoeveelheid water die op 26 °N in de bovenste circa 1 kilometer van de Atlantische oceaan naar het noorden stroomt en in de diepere oceaan naar het zuiden stroomt, gemeten in Sverdrup (Sv). 1 Sv is 1 miljoen kubieke meter per seconde.

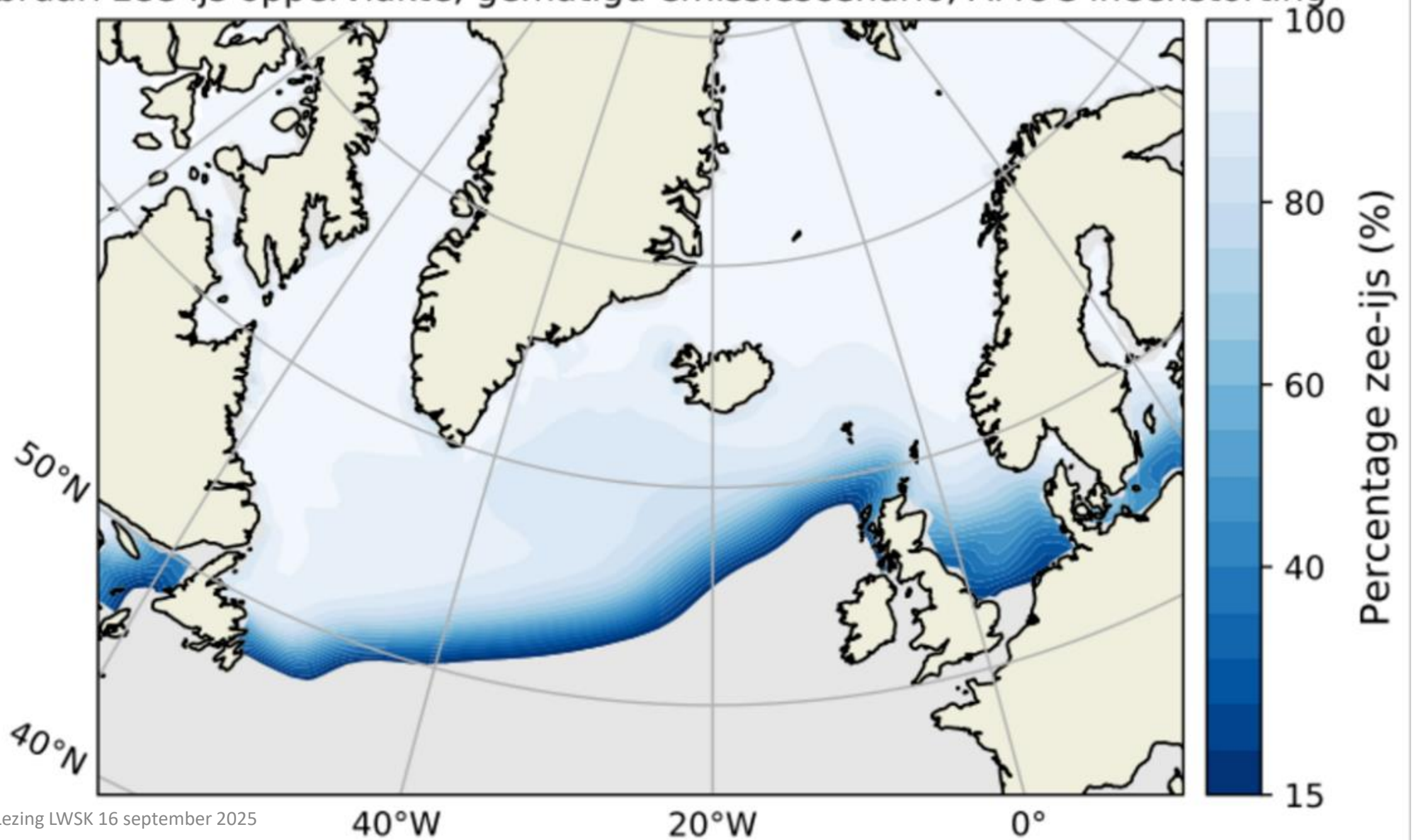
Afname door klimaatverandering in de vorming van diep water

Een snelle afname in hoe diep oppervlakte water wordt doorgemengd gaat vooraf aan het instorten van de AMOC

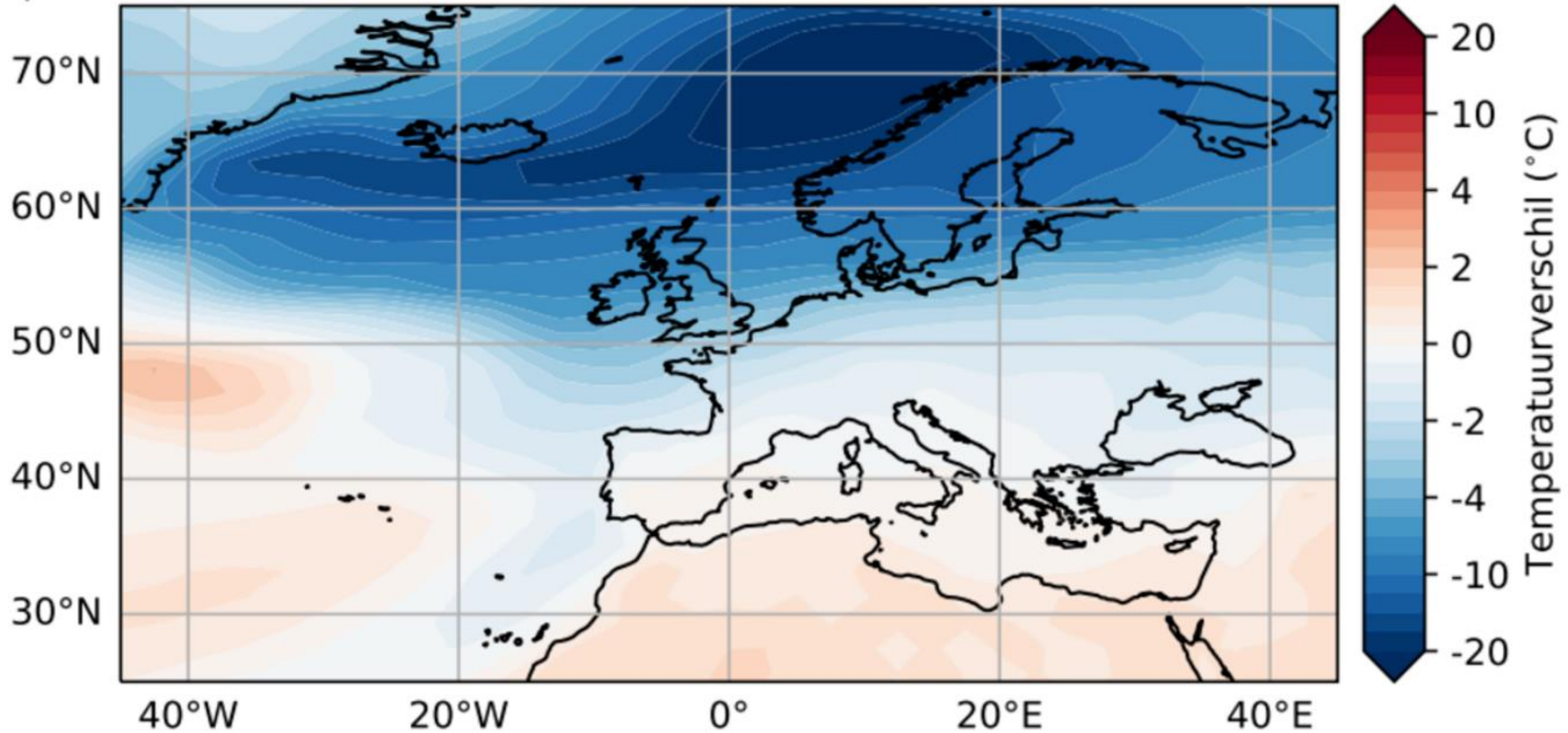


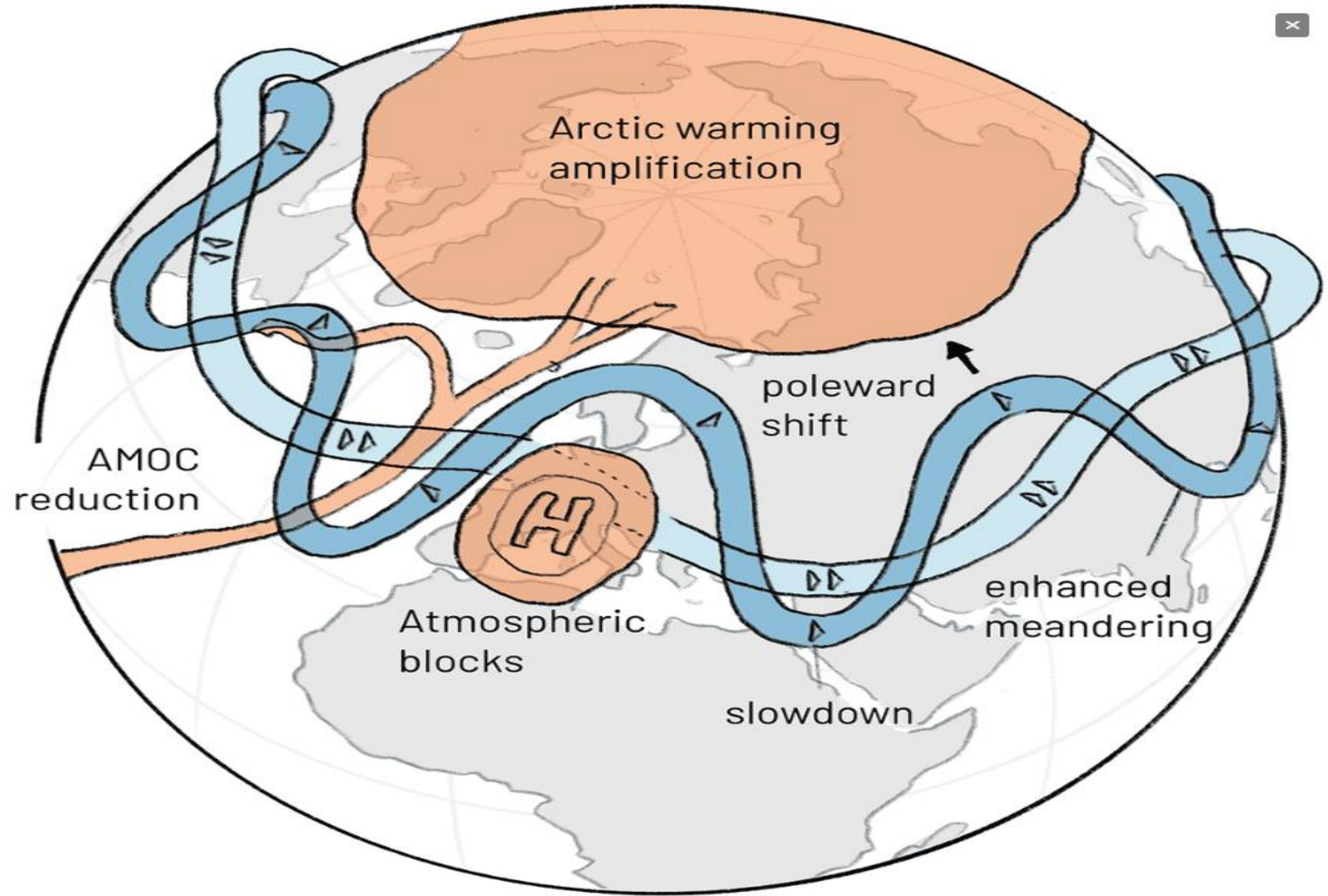
Modelsimulaties van de AMOC-sterkte op 26° noorderbreedte voor een laag (ssp126), midden (ssp245) en hoog (ssp585) emissiescenario. De meeste simulaties stoppen in 2100, maar de verder doorlopende runs laten zien dat 10 Sv in 2100 een kritieke grens is: in alle simulaties die daaronder zitten valt de AMOC uiteindelijk stil. ©KNMI/Drijfhout et al., (2025)

Februari zee-ijs oppervlakte, gematigd emissiescenario, AMOC ineenstorting

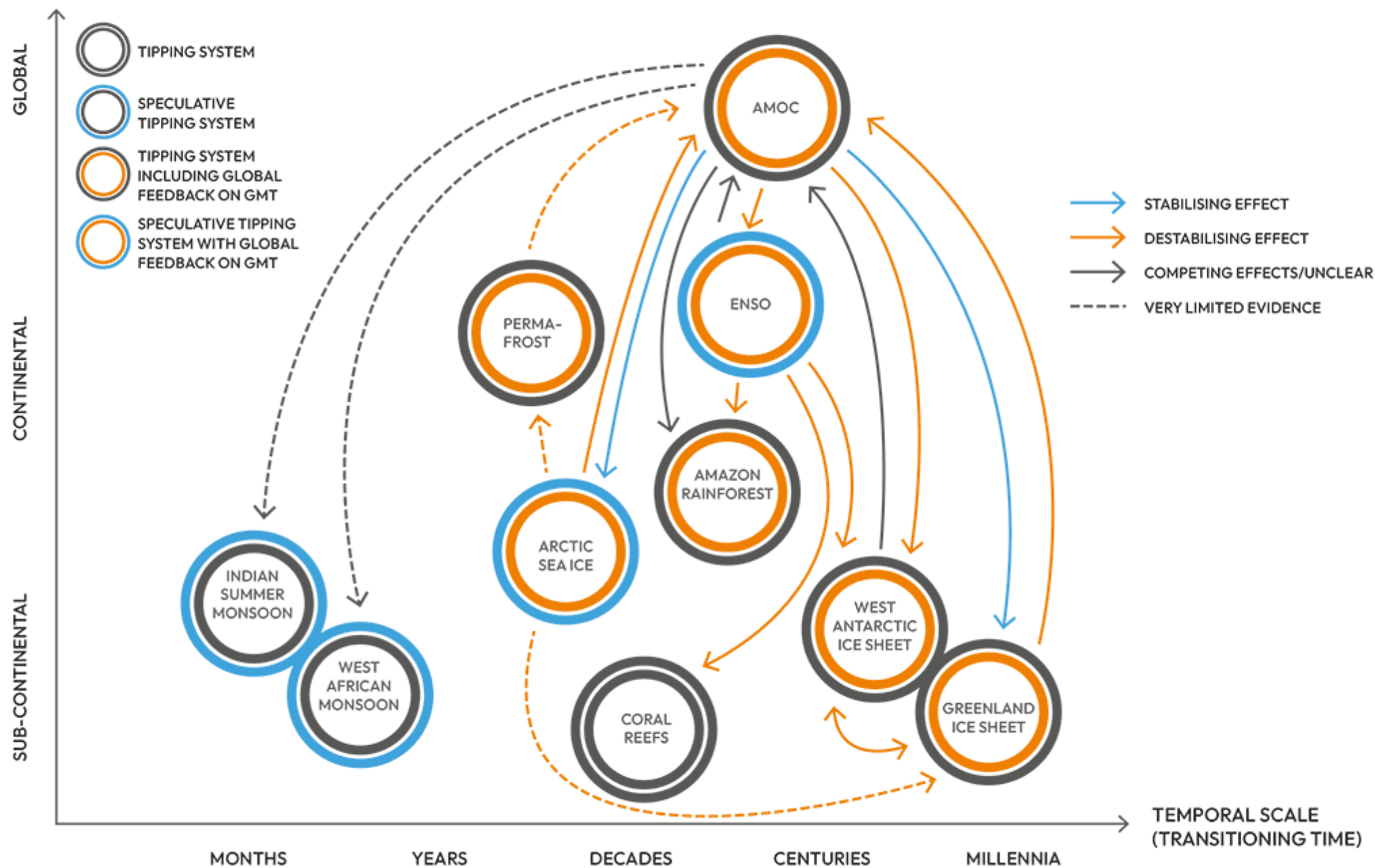


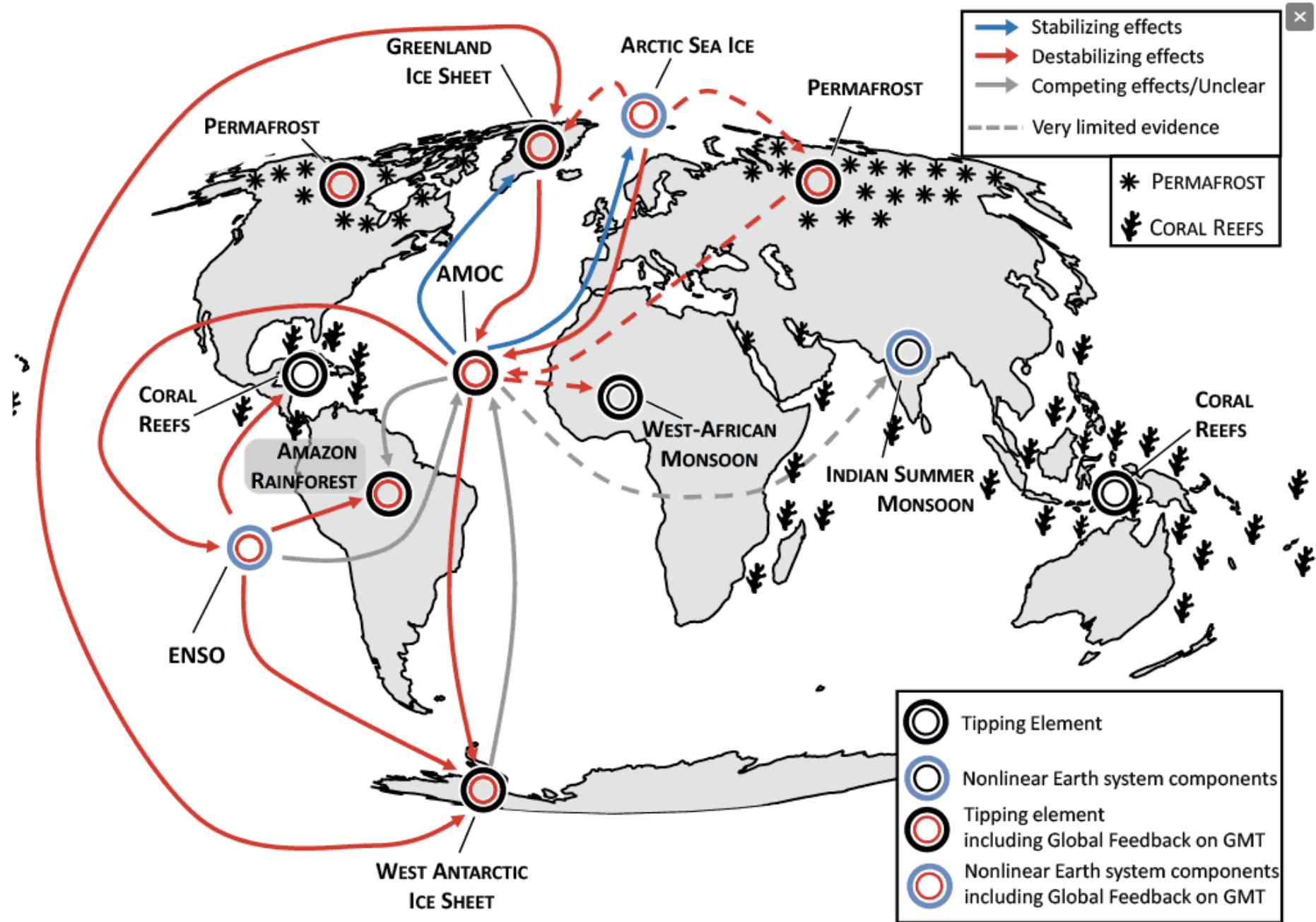
Januari temperatuurverschil, gematigd emissiescenario, AMOC ineenstorting





SPATIAL SCALE
(SYSTEM SIZE)





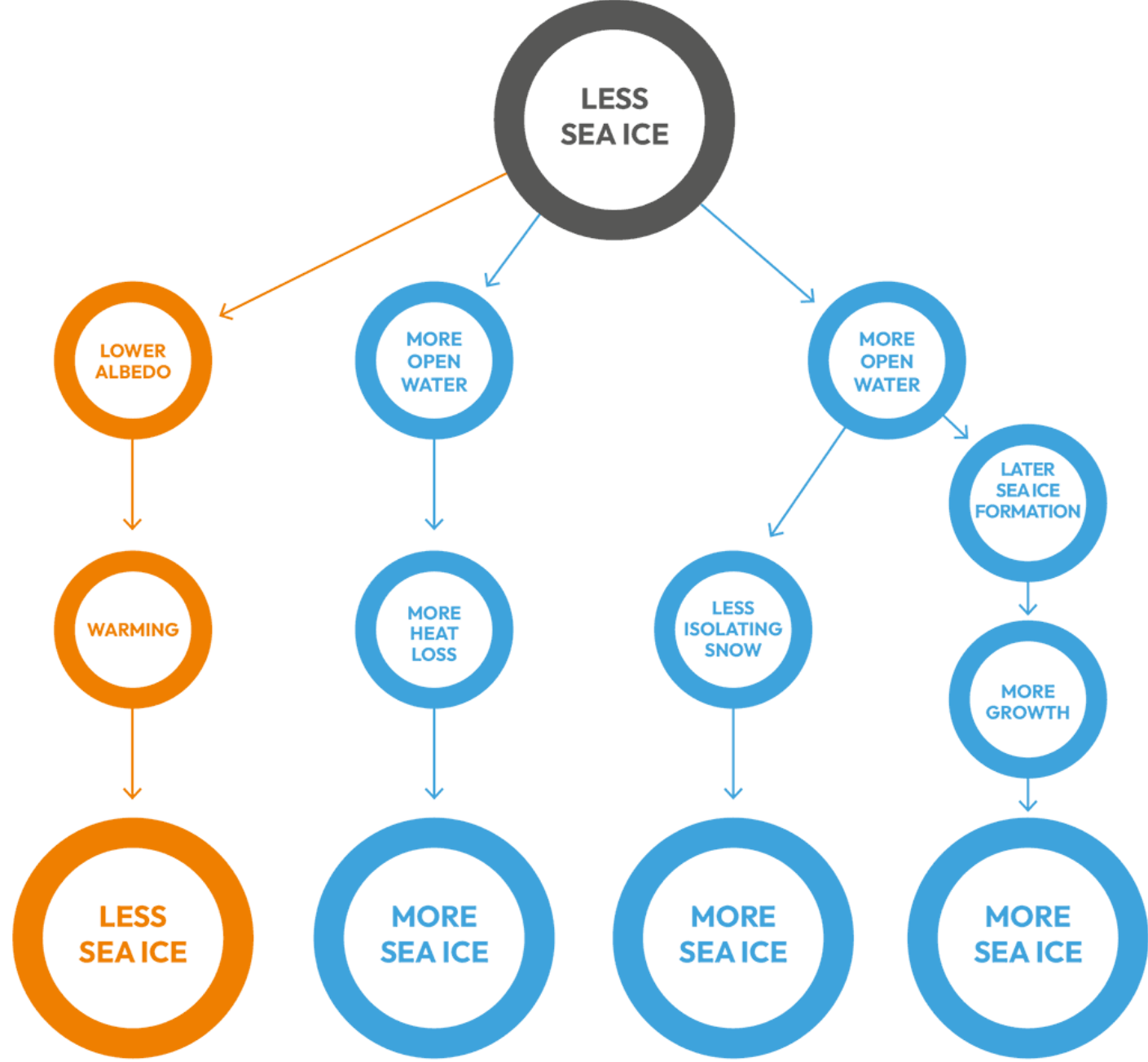
Bedankt voor uw aandacht !

Vragen?





<https://myoceanlearn.marine.copernicus.eu/>



ICE-ALBEDO FEEDBACK

+

RADIATION FEEDBACK

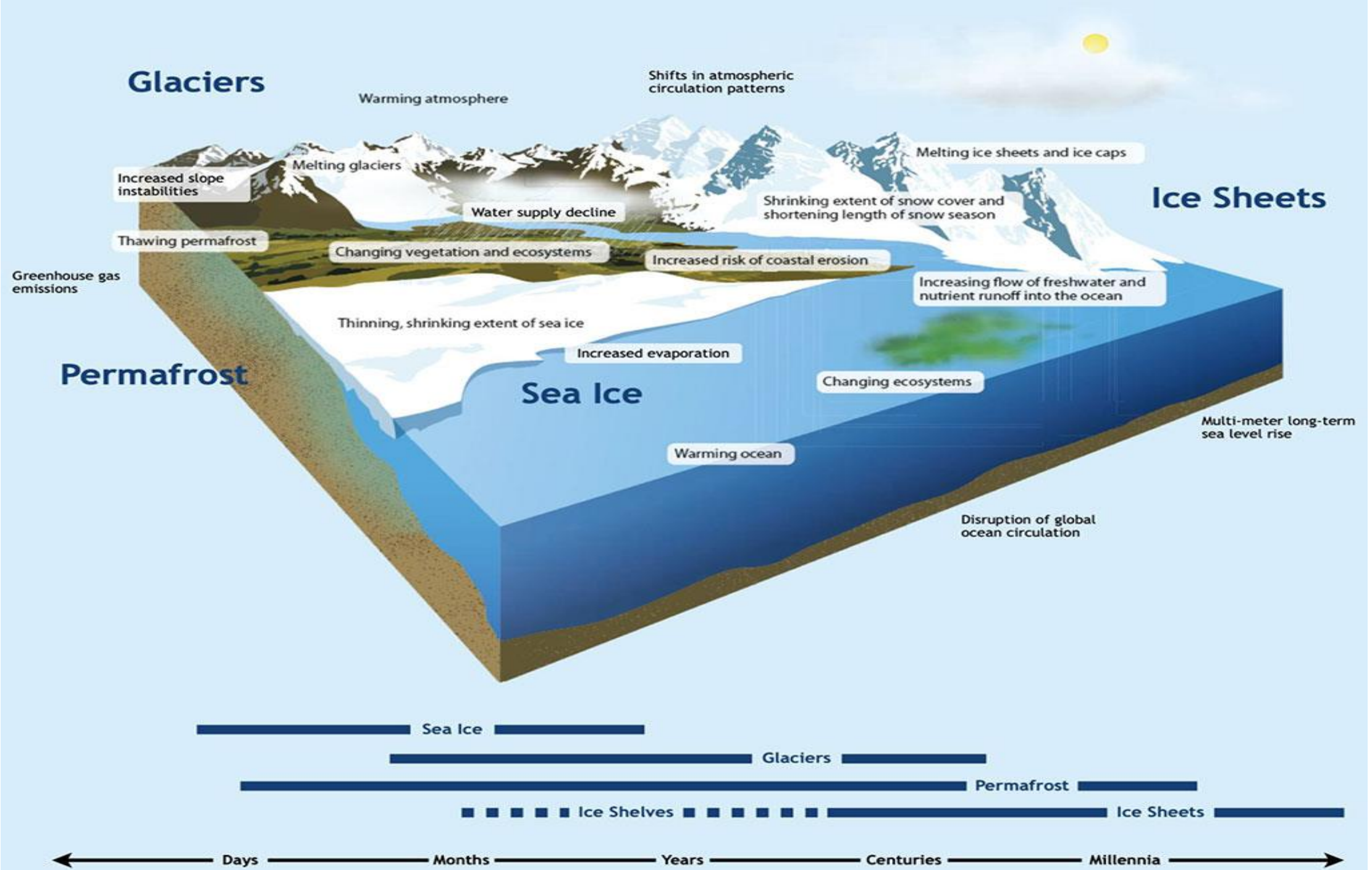
-

SNOW FEEDBACK

-

GROWTH FEEDBACK

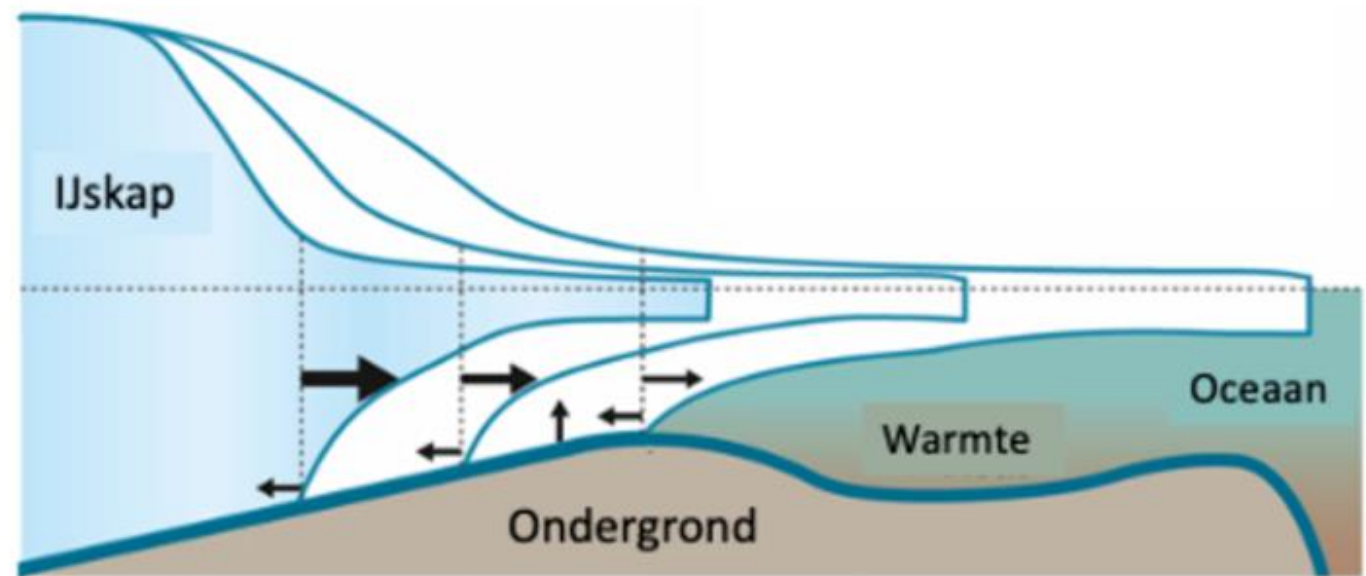
-



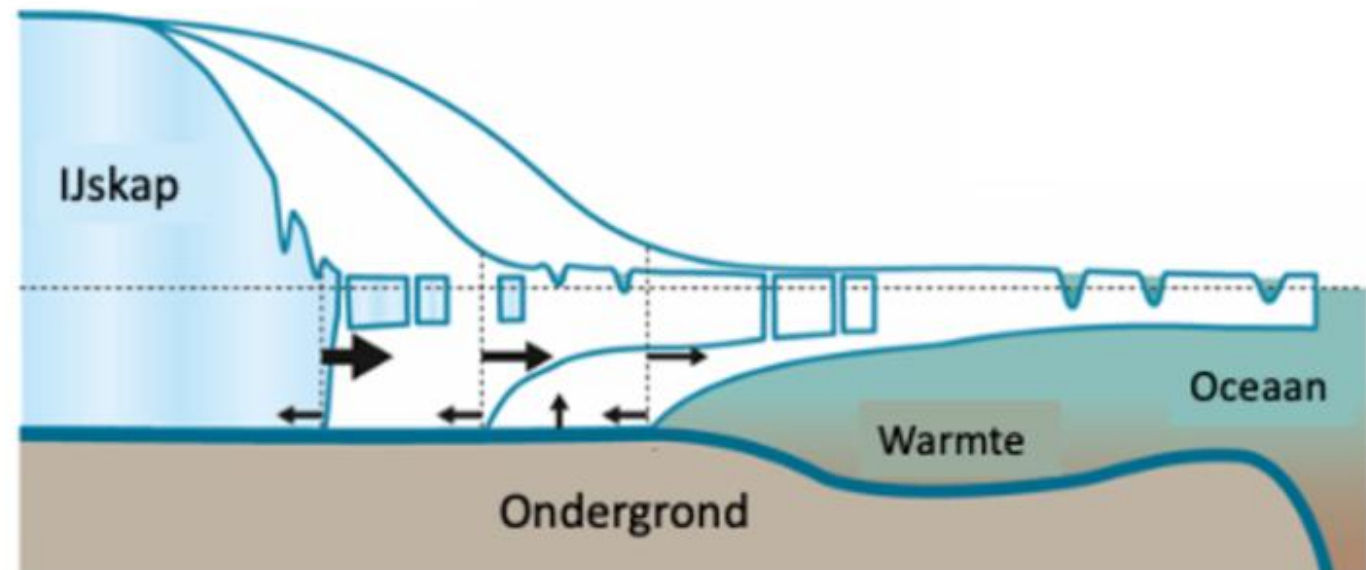
De ijskap op de Zuidpool kan instabiel worden door: verdunnen of opbreken van ijsplaten plus (a) een ondergrond die landinwaarts lager ligt dan aan de kust waardoor ijs versneld in de oceaan stroomt en (b) ijskliffen die afbreken.

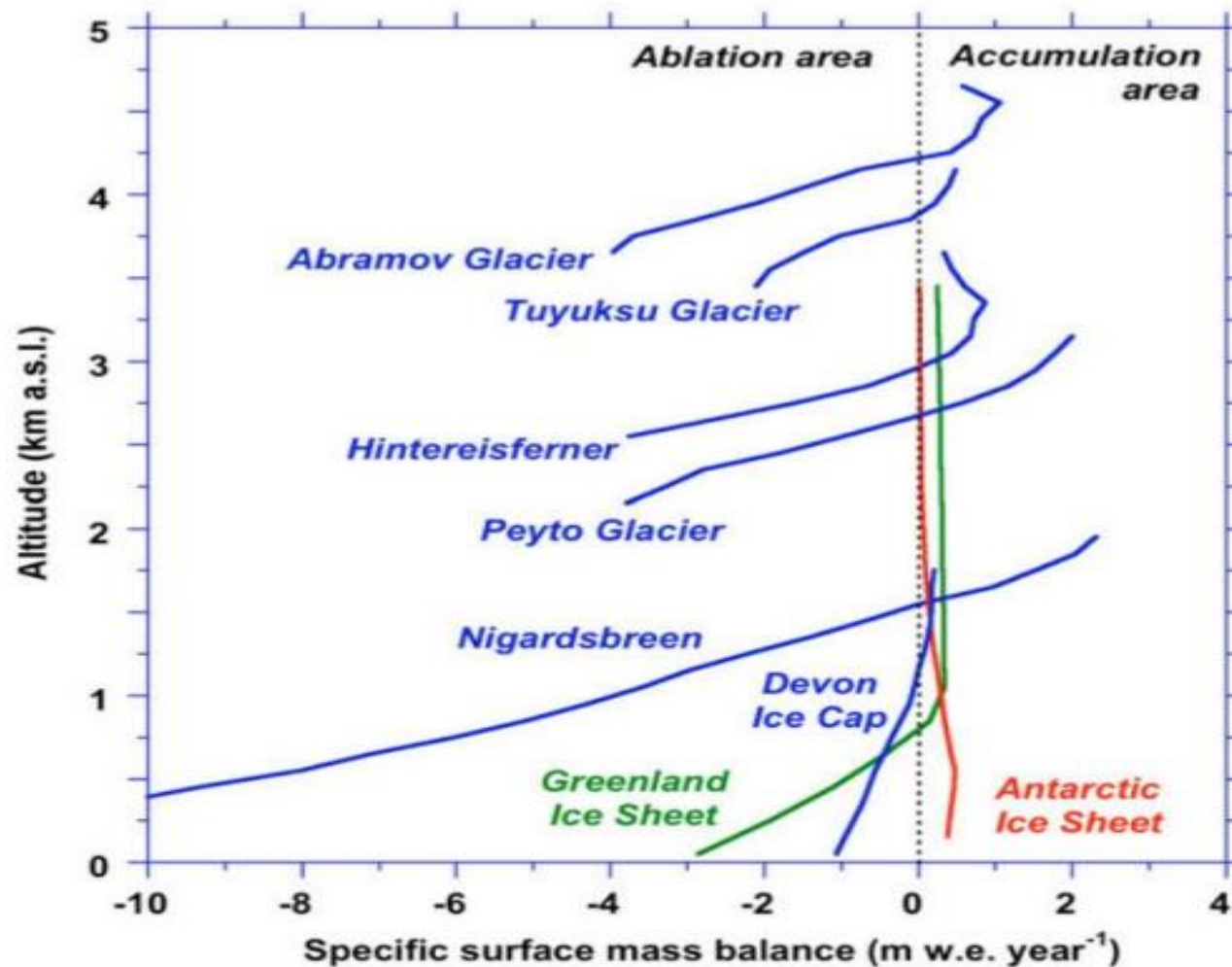
Bron: IPCC

(a) **Instabiele ijsplaten:** ondergrond landinwaarts lager dan aan kust



(b) **Instabiele ijskliffen:** ijs breekt af onder eigen gewicht





Bron 6: Accumulatie- en ablatiezone van gletsjers en ijskappen naar hoogte. Abramov gletsjer en Tuyuksa gletsjer (Centraal-Azië), Hintereisferner (Oostenrijk), Peyto gletsjer (Canada), Nigardbreen (Noorwegen), Devond ijskap (Canada). In deze bron is de invloed van de breedteligging te zien. De evenwichtslijn ligt lager in gebieden die verder van de evenaar verwijderd liggen (bijvoorbeeld Noorwegen) dan in gebieden die dicht bij de evenaar liggen (bijvoorbeeld Centraal-Azië). De gestippelde lijn (oppervlakte massabalans = 0) is de evenwichtslijn.

