

ATLANTISCHE UMWÄLZZIRKULATION



EUROPAS WÄRMEPUMPE

Inhalt

1. Was ist AMOC?
2. Auswirkungen des Klimawandels
3. AMOC und Europa
4. Meine Forschung
5. Zusammenfassung und Ausblick

1. Was ist AMOC?

1. Was ist AMOC?

- **Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC)**
- Gekoppeltes System aus Ozeanströmungen im Atlantik
- Besteht aus **warmer nordwärts** gerichtet **Oberflächenströmung** (0 bis ~ 1000 m) und kompensierender **kalter südwärts** gerichteter **Tiefenströmung** (3000 bis ~ 5000 m) [1]
- Nordwärtsströmungen transportieren ~ **17 Sv** ($1 \text{ Sv} \triangleq 1.000.000 \text{ m}^3/\text{s}$) Wasser [2]
- Nordwärts gerichtete Oberflächenströmungen für ca. **25 % (!)** des globalen **Wärmetransports** zuständig [1]
- Das entspricht ~ **1,3 PW (!)** [3]



AMOC nordwärts



1.300.000
Atomkraftwerke

[1] Frajka-Williams, Eleanor (2015). „Estimating the Atlantic overturning at 26 N using satellite altimetry and cable measurements“. In: Geophysical Research Letters 42.9, pp. 3458–3464. DOI: 10.1002/2015GL063220

[2] Johannes Unegg (2024). „Estimating AMOC's variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data.“ Stand. 2024-04-18

[3] Bryden, HL, Brian A King, Gerard D McCarthy, and EL McDonagh (2014). „Impact of a 30% reduction in Atlantic meridional overturning during 2009–2010“. In: Ocean Science 10.4, pp. 683–691. DOI: 10.5194/os-10-683-2014

1. Was ist AMOC?

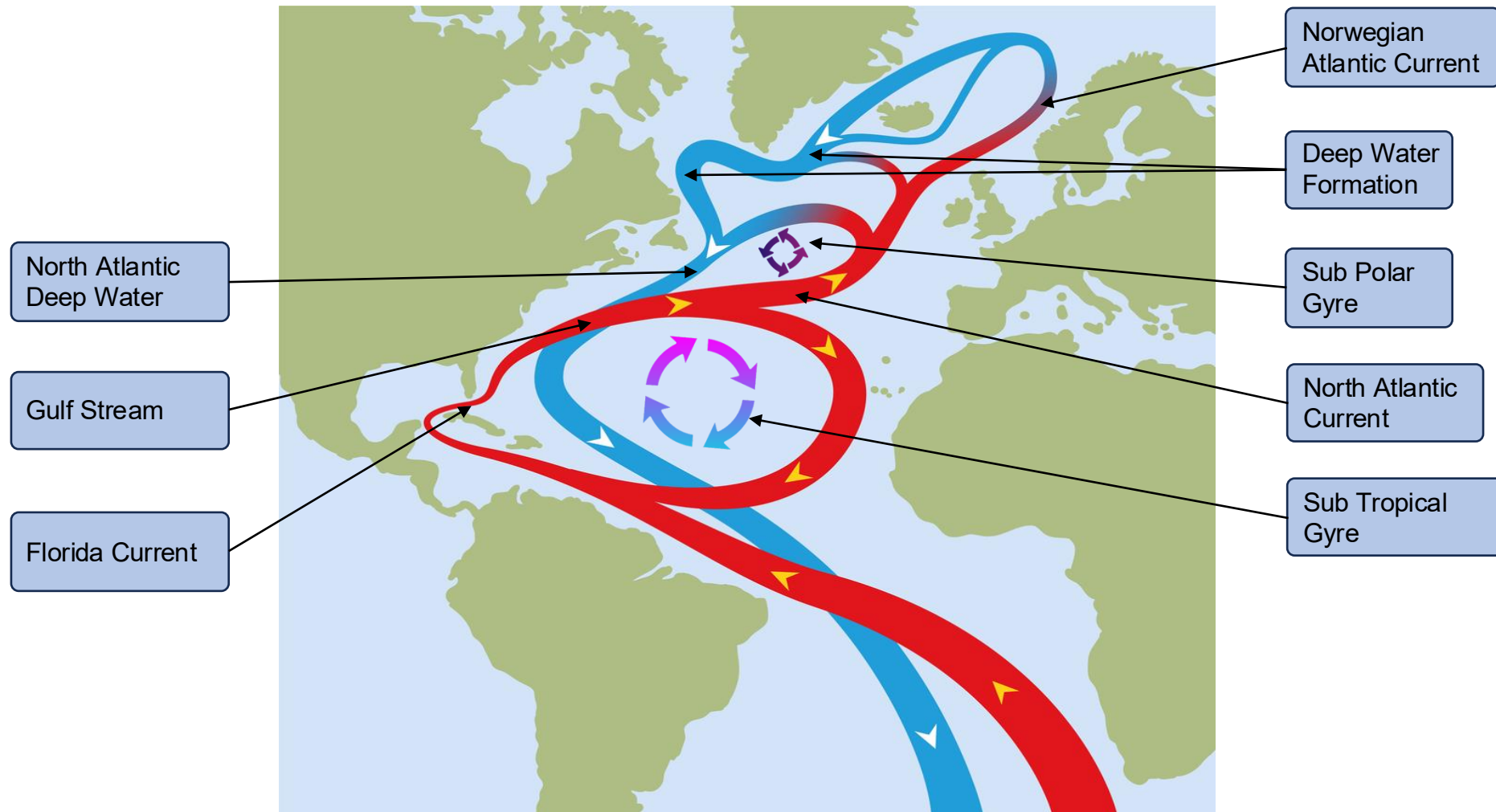


Abb. 1: Strömungssystem AMOC [4]

[4] <https://www.trendsderzukunft.de/wp-content/uploads/2021/02/Golfstrom.jpg>

1. Was ist AMOC?

AMOC wird angetrieben durch:

1) Windsystem

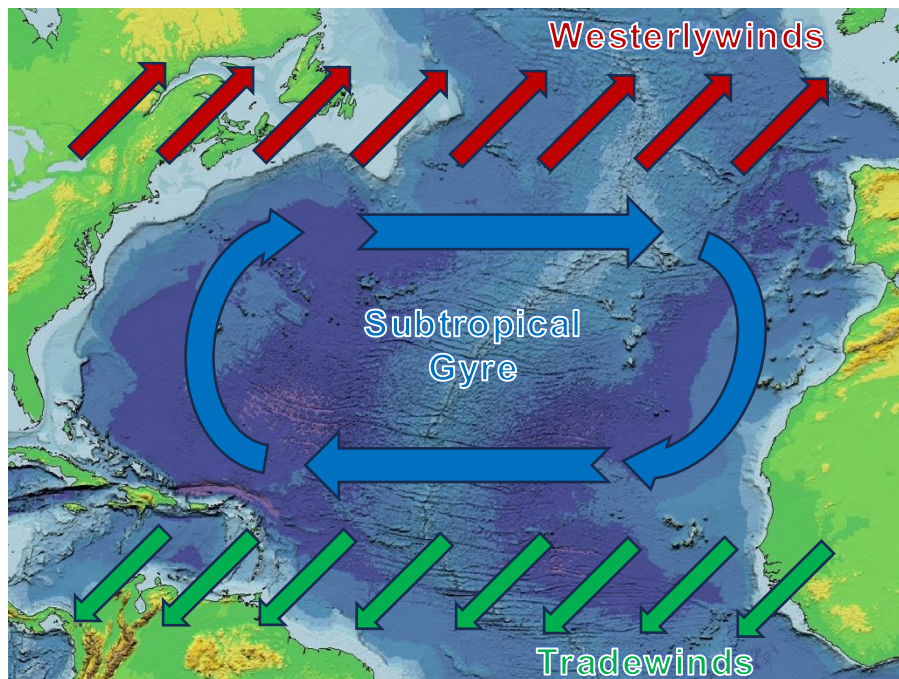


Abb. 2: Windsystem Nordatlantik [5]

→

Ekman-Transport (Wassertransport durch Windreibung)

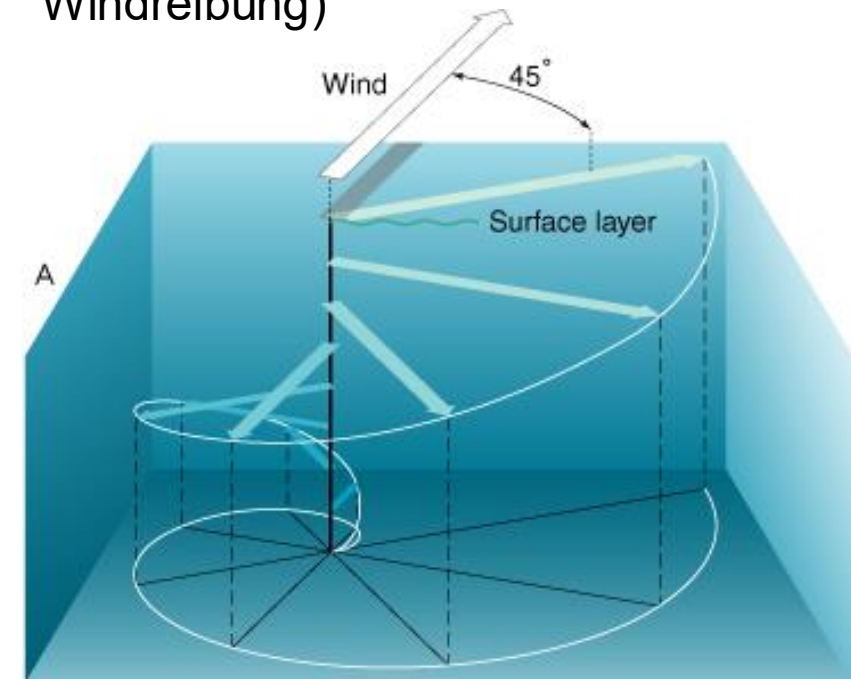


Abb. 3: Ekman-Spirale [6]

[5] <https://oceanmotion.org/html/background/ocean-in-motion.htm>

[6] <https://www.pinterest.com/pin/25192079146145623/>

1. Was ist AMOC?

AMOC wird angetrieben durch:

2) Temperaturunterschiede



Differenzielle Erwärmung der Erde

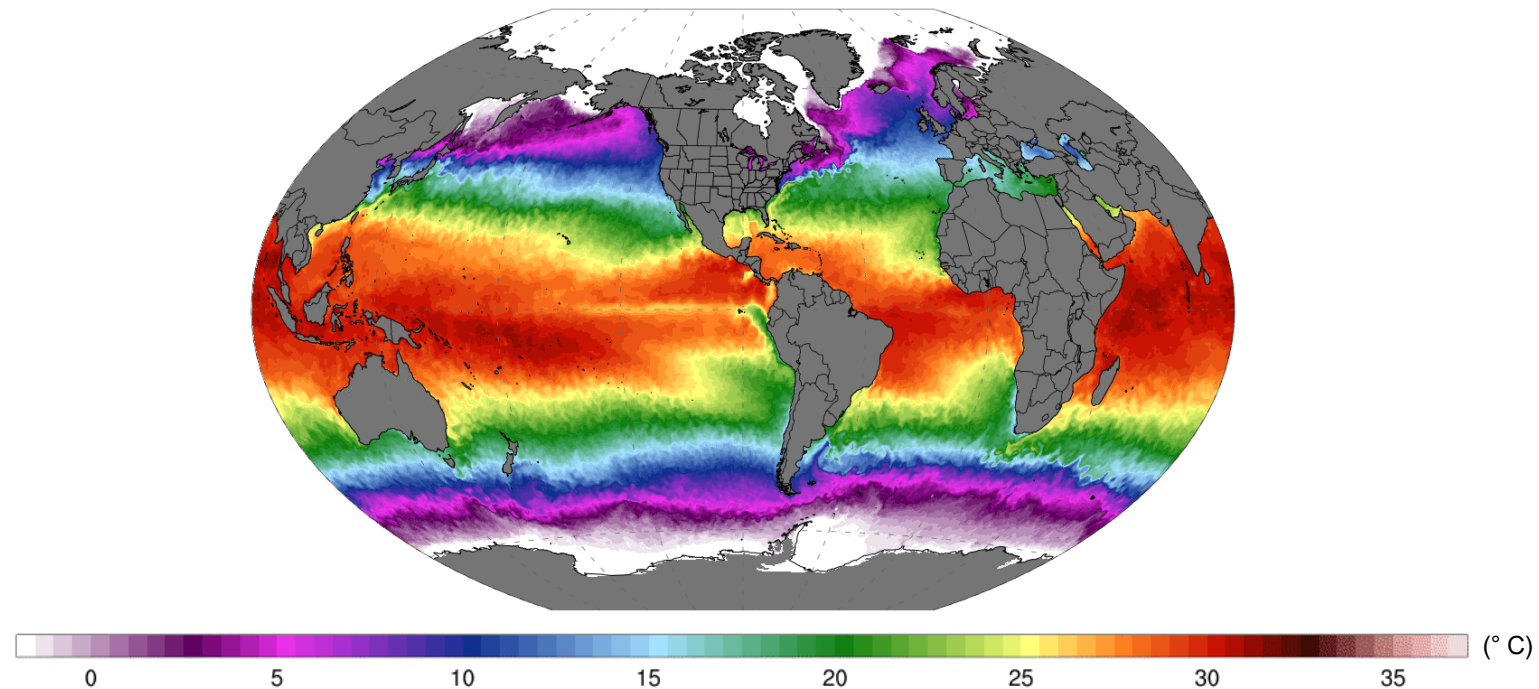


Abb. 4: Oberflächentemperatur Ozean global (16. April 2024) [7]

[7] https://climateresearcher.org/clim/sst_daily/

1. Was ist AMOC?

AMOC wird angetrieben durch:

3) Dichteunterschiede



Salzgehalt und Temperatur des Wassers

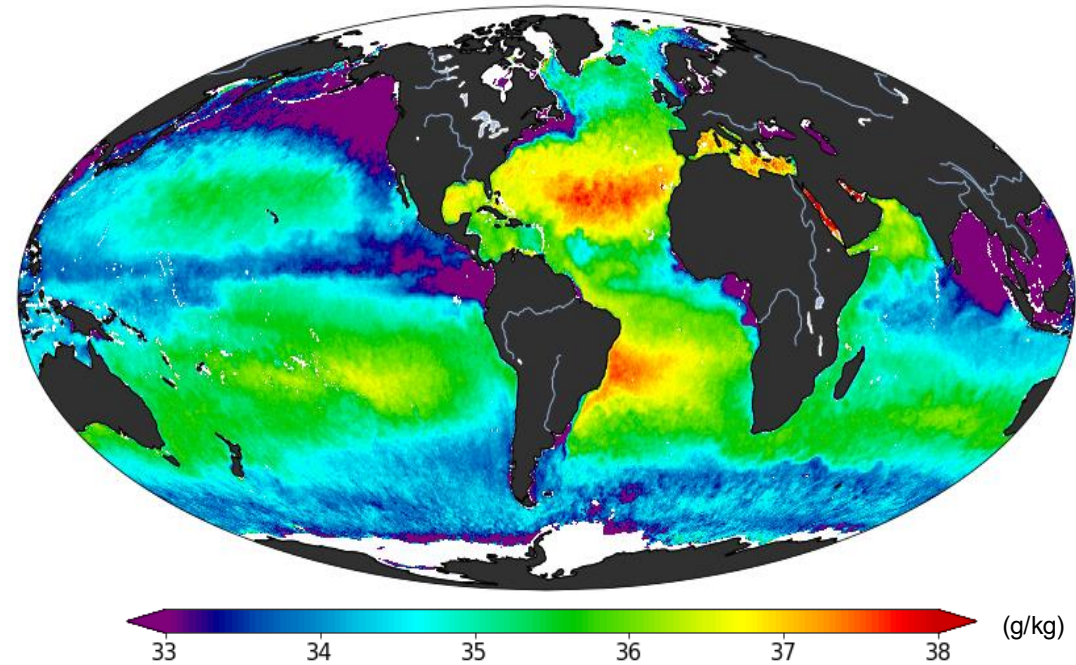


Abb. 5: Salzgehalt Ozean global (Dezember 2024) [8]

[8] <https://salinity.oceansciences.org/smap-salinity.htm>

2. Auswirkungen des Klimawandels

2. Auswirkungen des Klimawandels

Der Klimawandel schwächt AMOC durch:

- 1) Veränderung im Windsystem → Ekman Transport und zonale Windscheerung (τ_x)
- 2) Anstieg Wärmeinhalt Ozeane → Kleinere Temperaturunterschiede (N-S) (∇T)
- 3) Schmelzwasserinflux → Veränderung Salinität (∇S) und geringere Dichteunterschiede ($\nabla \rho$)

Haupttreiber des AMOC's wie τ_x , ∇T und ∇S (i.e. $\nabla \rho$) werden beeinflusst durch den vom Menschen gemachten Klimawandel [9] [10]

[9] Zanna, Laure, Samar Khatiwala, Jonathan M Gregory, Jonathan Ison und Patrick Heimbach (2019). „Global reconstruction of historical ocean heat storage and transport“. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 116.4, S. 1126–1131. DOI: 10.1073/pnas.1808838115

[10] Westen, René M van, Michael Kliphuis, and Henk A Dijkstra (2024). „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course“. In: Science advances 10.6, eadk1189. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189

3. AMOC und Europa

3. AMOC und Europa

- Vgl. Klima auf St.Pierre (Neufundland, Kanada) mit Klagenfurt (Kärnten, Österreich)
- Beide liegen am selben Breitengrad (**46 °N**) (!)
- Wärmetransport nach Europa essenziell für gemäßigtes Klima v.a. **Nordatlantikstrom** und **Norwegischer Strom** (!) [12]
- Seit 1950 Abschwächung des AMOC's von **3 ± 1 Sv** [13]
- Zwischen 2009 und 2010, abrupte Abschwächung des AMOC's um **30 %** [11][12]
- Stetig zunehmende **Abschwächung**, d.h. reduzierter Wärmetransport nach **Europa** [13]

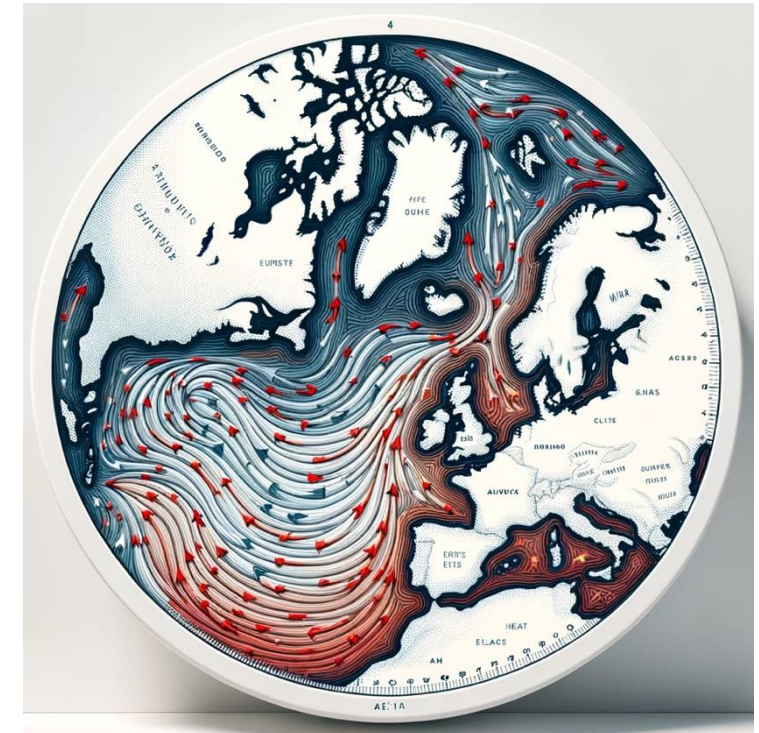


Abb. 6: Nordatlantik schematisch [11]

[11] Johannes Unegg (2024). "Estimating AMOC's variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data." Stand. 2024-04-18

[12] Bryden, HL, Brian A King, Gerard D McCarthy, and EL McDonagh (2014). „Impact of a 30% reduction in Atlantic meridional overturning during 2009–2010“. In: Ocean Science 10.4, pp. 683–691. DOI: 10.5194/os-10-683-2014

[13] Westen, René M van, Michael Kliphuis, and Henk A Dijkstra (2024). „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course“. In: Science advances 10.6, eadk1189. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189

3. AMOC und Europa

- **Van Westen et al. 2024** simulierte **AMOC** mit **stetig zunehmenden Schmelzwasserinflux** [14]
- Ausgangsbedingungen: **Preindustriell** (d.h. Treibhausgaskonzentration etc. bleiben konstant)
- Verlauf: **Stetig zunehmender Schmelzwasserinflux** → $5 * 10^{-4} \frac{Sv}{a^2} \triangleq 500 \frac{m^3/s}{a^2}$
- Verringerung der Dichte des Wassers, d.h. **Sinken** wird **erschwert**
- Ab Modelljahr **800** klarer **negativer Trend** zu sehen
- AMOC **Kollaps** im Modelljahr **1750**

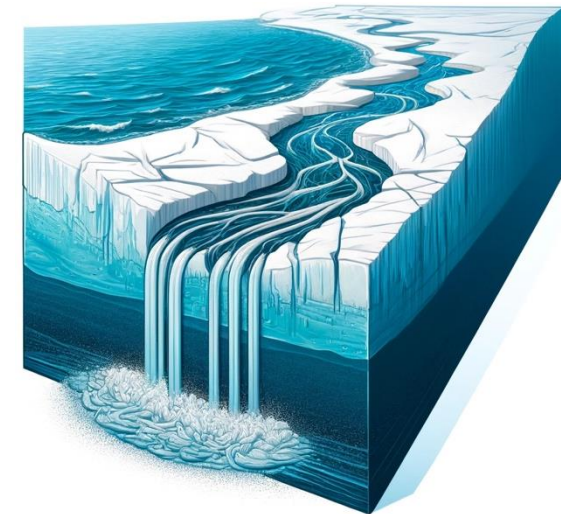


Abb. 7: Schmelzwasserinflux schematisch [15]

[14] Westen, René M van, Michael Kliphuis, and Henk A Dijkstra (2024). „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course“. In: Science advances 10.6, eadk1189. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189
 [15] Johannes Unegg (2024). „Estimating AMOC’s variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data.“ Stand. 2024-04-18

3. AMOC und Europa

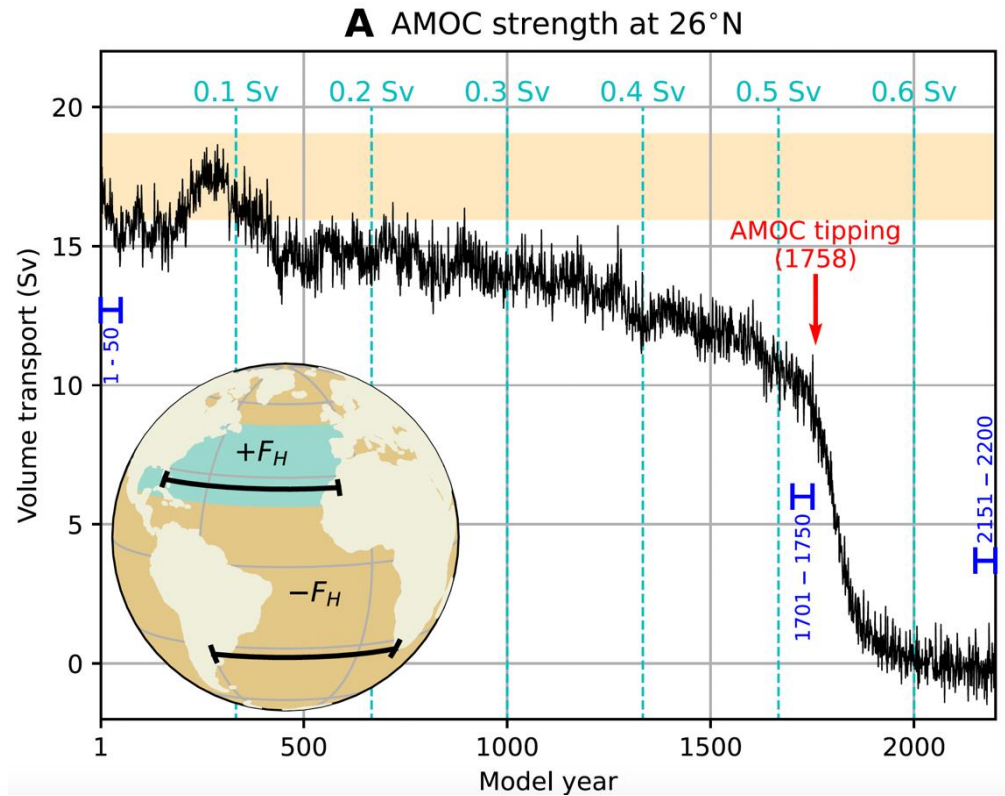


Abb. 8: Stärke AMOC [16]

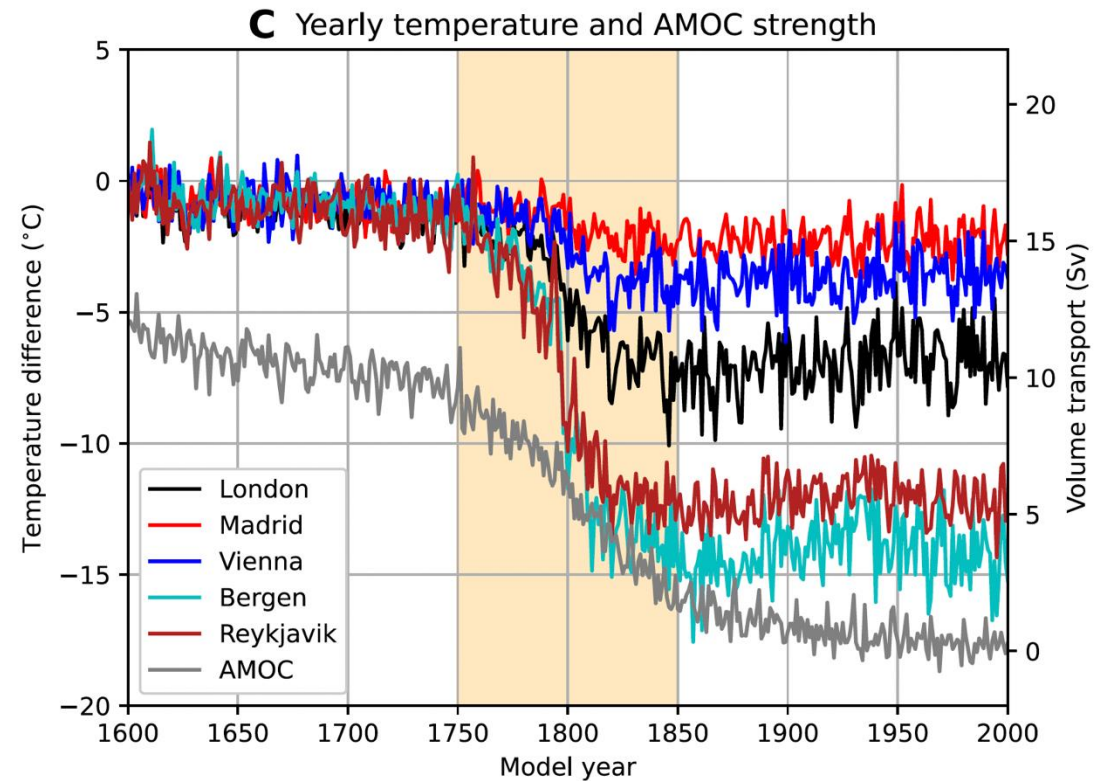


Abb. 9: Temperaturdifferenz europäischer Städte [16]

[16] Westen, René M van, Michael Kliphuis, and Henk A Dijkstra (2024). „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course“. In: Science advances 10.6, eadk1189. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189

3. AMOC und Europa

- Nur **ein Modell-Run (!)**
- **Schwerpunkt lag nur auf AMOC**, d.h. viele **andere wichtige Parameter** wie Zunahme der Treibhausgase, Aerosolkonzentration, etc. wurden **nicht berücksichtigt**
- **Szenario Kollaps sehr unwahrscheinlich im 21. Jahrhundert** und auch nicht im 22. Jahrhundert zu erwarten, da:

Schmelzwasserinflux müsste ~ 80-fachen Wert vom heutigen Stand annehmen

$(0,65 \text{ Sv} \triangleq 650.000 \text{ m}^3/\text{s})$ [17]

Wörthersee wäre in ~ 21 Minuten vollgelaufen



Abb. 10: Wörthersee ($V = 816 * 10^6 \text{ m}^3$) [18]

[17] Westen, René M van, Michael Kliphuis, and Henk A Dijkstra (2024). „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course“. In: Science advances 10.6, eadk1189. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189
[18] <https://www.woerthersee.info/>

4. Meine Forschung

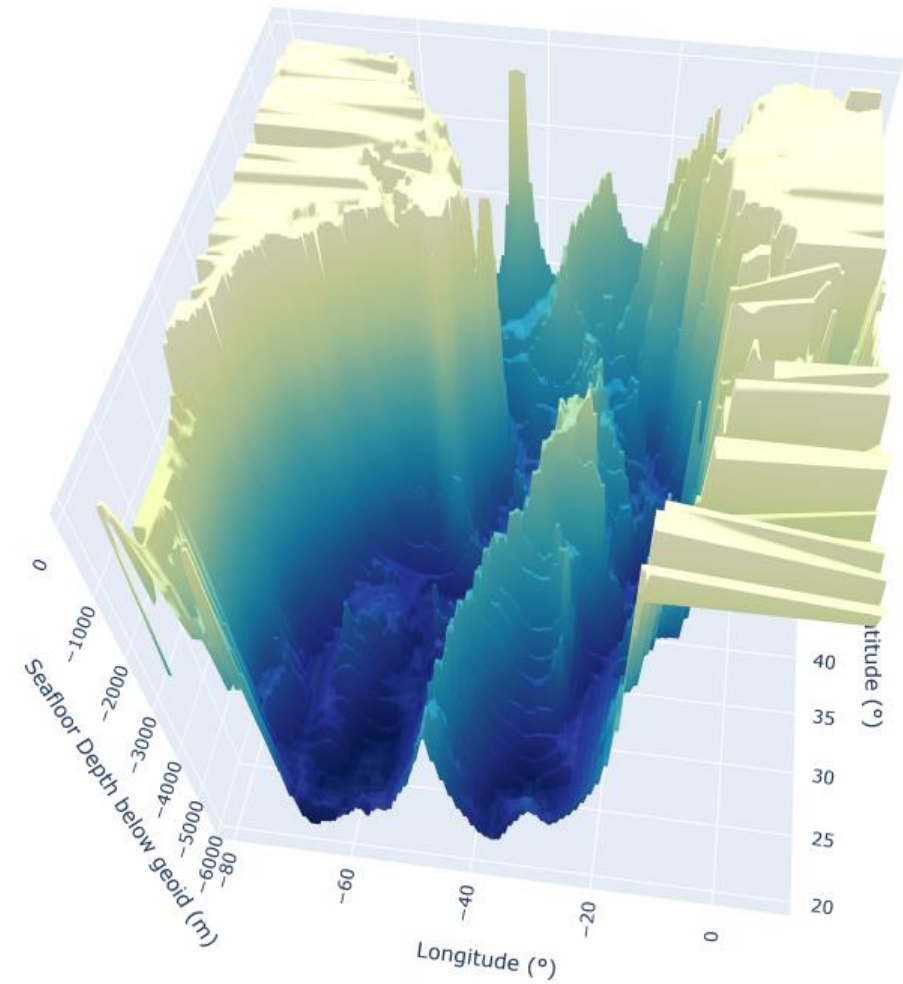


Abb. 11: Bathymetry des Nordatlantiks [19]

[19] Johannes Unegg (2024). "Estimating AMOC's variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data." Stand. 2024-04-18

4. Forschungsgruppe ARSCliSys

- Wegener Center für Klima und Global Wandel, Graz
- Leitung: Gottfried Kirchengast, Andrea Steiner und Ulrich Foelsche
- ***Atmospheric Remote Sensing and Climate System Research Group***
(Atmosphären Fernerkundung und Klimasystem)
- **Satellitengestützte** Methoden zur **Fernerkundung** der **Atmosphäre** und des **Klimasystems** sowie neue bodengebundene Methoden mit sehr hoher Auflösung (**WegenerNet**)
- Erforscht werden **Klimavariabilität**, **Klimatrends** und **Wetter-/Klimaextremen**
- **Globaler Klimawandel** und eine **Brückenbildung** zum **regionalen/lokalen Klima-** und **Umweltwandel** in der Alpenregion werden fokussiert

4. Meine Forschung

- Gebiet: **Nordatlantik** → $[10.0, 66.5]^\circ\text{N}$ and $[10.0, 80.0]^\circ\text{W}$
- **Bestimmung des AMOC's** und dessen **Variabilität** mittels **Beobachtungs-, Modell- und Satellitendaten**
- Ausgangspunkt sind Beobachtungs- und Modelldaten

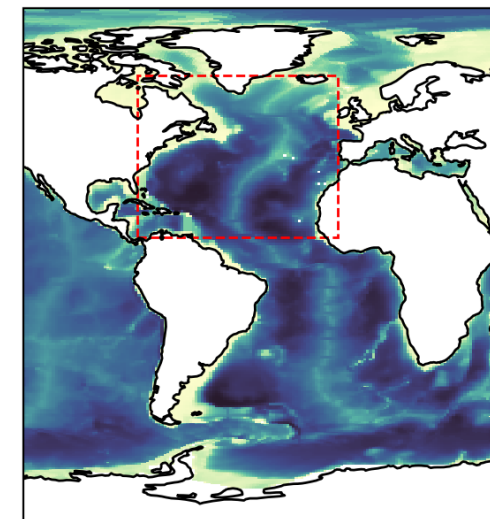


Abb. 12: Gebiet Nordatlantik [20]

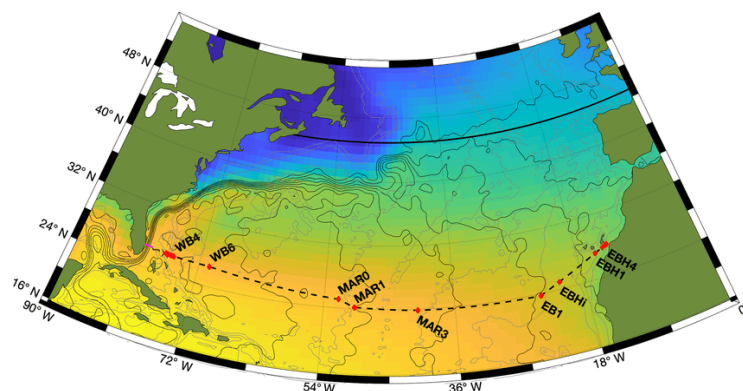


Abb. 13: RAPID Messleine (Beobachtung) [21]



Abb. 14: ECCO (Modell) [22]

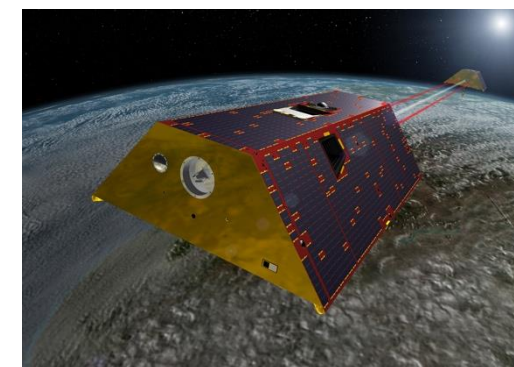


Abb. 15: GRACE (Satellit) [23]

[20] Johannes Unegg (2024). "Estimating AMOC's variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data." Stand. 2024-04-18

[21] <https://www.researchgate.net/profile/Ben-Moat/publication/343164990/figure/fig1/AS:916530011324417@1595529191237/The-RAPID-26-N-array-traverses-the-subtropical-gyre-of-the-North-Atlantic-The-magenta.ppm>

[22] <https://www.ecco-group.org/home.cgi>

[23] https://gracefo.jpl.nasa.gov/internal_resources/89/

4. Meine Forschung

- Bestimmung des **meridionalen Wassertransports** bei bestimmtem Breitengrad, durch eine Querschnittsfläche des Nordatlantiks

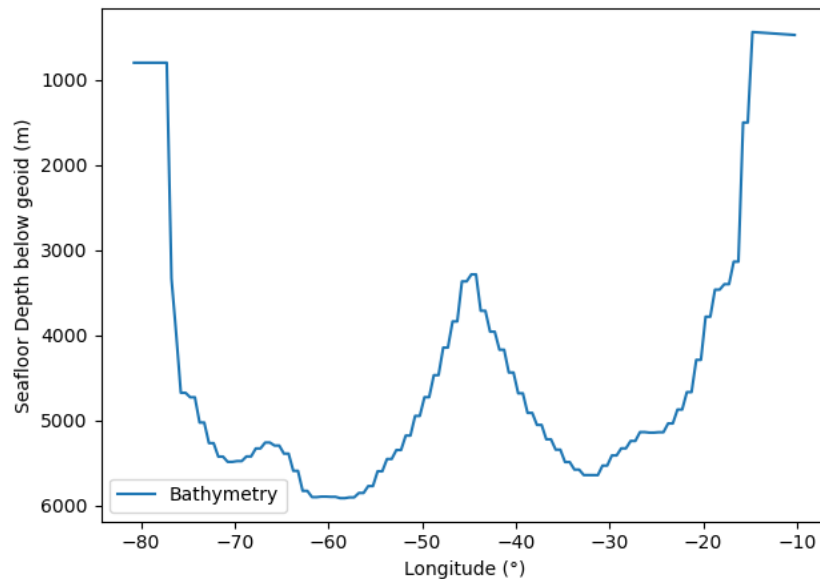


Abb. 16: Bathymetry des Nordatlantiks bei 26 °N [19]

$$\Psi_{\phi}(\lambda) = \frac{1}{\rho_0 f_{\phi}} \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} OBP_{\phi}(\lambda) \tilde{b}'_{\phi}(\lambda) d\lambda$$

(Gl. 1) [24]

$\Psi_{\phi}(\lambda)$	<i>Wassertransport</i>	(Sv)
ρ_0	<i>Dichte des Wassers</i>	(m ³ /kg)
f_{ϕ}	<i>Coriolis parameter</i>	(1/s)
$OBP_{\phi}(\lambda)$	<i>Ozeanbodendruck anomaly</i>	(Pa)
$\tilde{b}'_{\phi}(\lambda)$	<i>Steigung/Abfall des Ozeabodens</i>	(m/°)

[24] Johannes Unegg (2024). "Estimating AMOC's variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data." Stand. 2024-04-18

4. Meine Forschung

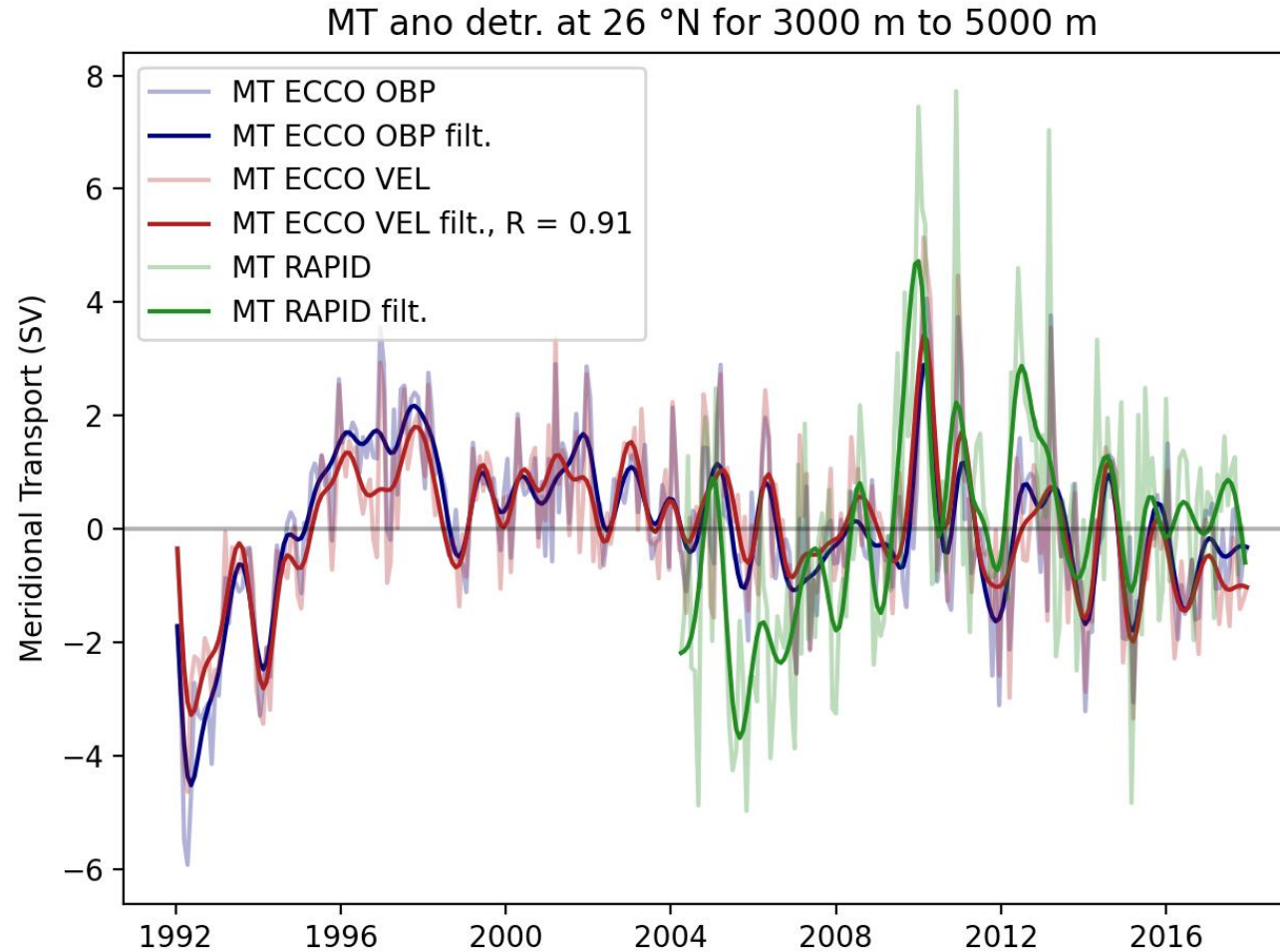
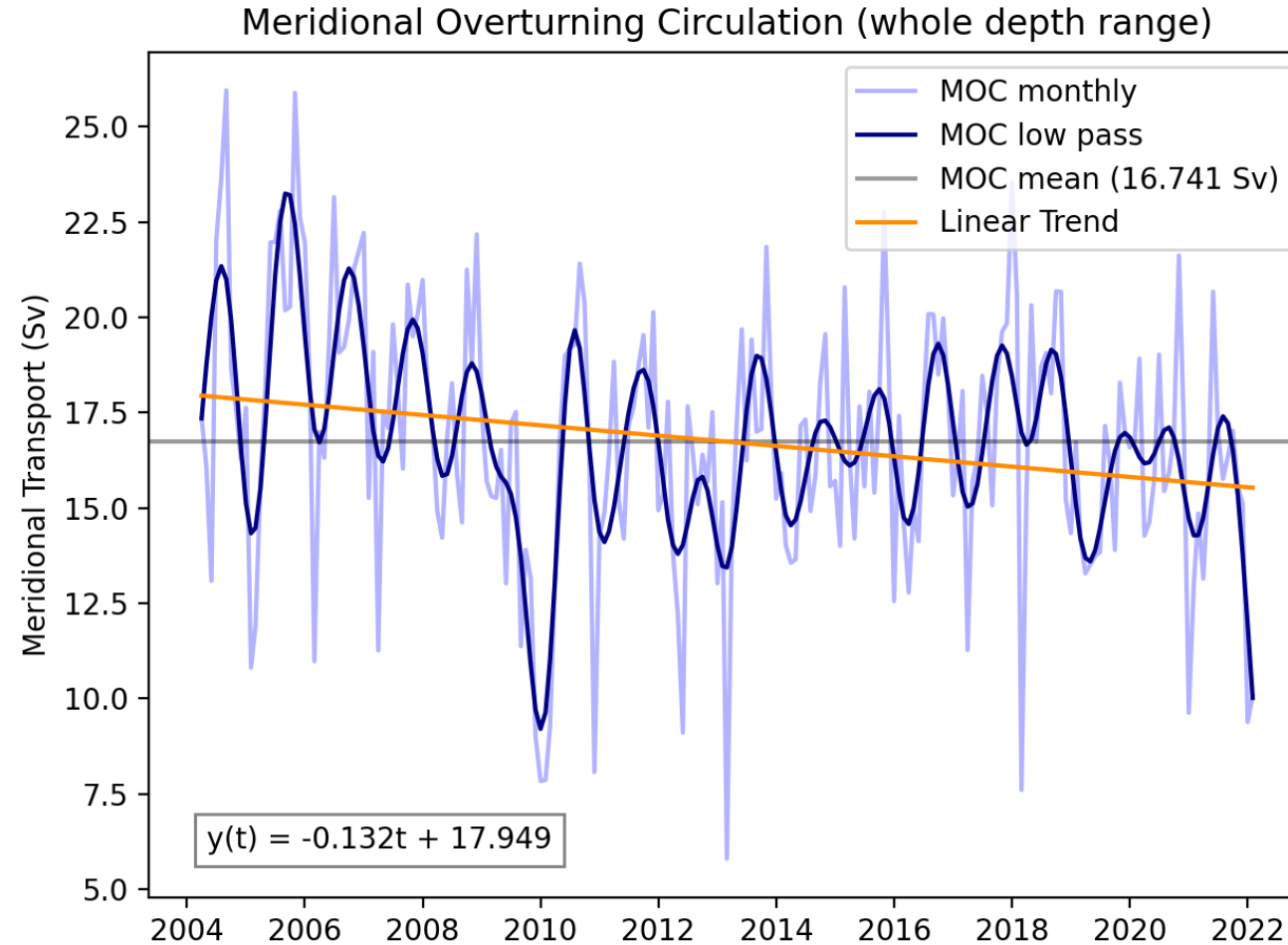


Abb. 17: Vergleich der geschätzten Transporte bei 26 °N im Nordatlantik [25]

[25] Johannes Unegg (2024). "Estimating AMOC's variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data." Stand. 2024-04-18

4. Meine Forschung



Abschwächung des AMOC's:

- 1,32 Sv / Dekade (!)

Abb. 18: Nordwärtsströme des AMOC's geschätzt mit RAPID Daten [26]

[26] Johannes Unegg (2024). "Estimating AMOC's variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data." Stand. 2024-04-18

5. Zusammenfassung und Ausblick

5. Zusammenfassung und Ausblick

- Nordwärtströmungen v.a **Nordatlantik Strom** und **Golf Strom** essenziell für **Europas Klima** [27]
- **AMOC** befindet sich in einem Zustand der **zunehmenden Abschwächung** [28]
- Grund dafür → der **Klimawandel**, vor allem das **Abschmelzen des Grönländischen Eisschildes** [28]
- Tritt Kipppunkt ein → **Kollaps** der **Strömungen nördlich des Sub-Tropischen Wirbels** [28]
- **Golf Strom** kann **nicht kollabieren** wegen Coriolis Kraft (!)
- Dies hätte globale Konsequenzen zur Folge:
 - **Abkühlung** der Nordhalbkugel, speziell **Europa** [28]
 - **Erwärmung** der **Südhalbkugel** (Energie bleibt erhalten, wird nur umverteilt) [28]

[27] McCarthy, Gerard D, Peter J Brown, Charles N Flagg, et al. (2020). „Sustainable observations of the AMOC: methodology and technology“. In: Reviews of Geophysics 58.1, e2019RG000654. DOI: 10.1029/2019RG000654
[28] Westen, René M van, Michael Kliphuis, and Henk A Dijkstra (2024). „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course“. In: Science advances 10.6, eadk1189. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189

5. Zusammenfassung und Ausblick

ABER (!) → Szenario AMOC-Kollaps im 21. Jahrhundert quasi unmöglich

Auch wenn ein Kollaps zu einer Abkühlung der nördlichen Hemisphäre, im Besonderen Europas führen KÖNNTE, ändert dies nichts am vom Menschen gemachten Klimawandel.

*Wärme die nicht nach Europa geht, wird einfach umverteilt und es folgt eine **zusätzliche Erwärmung der Südhalbkugel.***

Bibliografie

- [1] Frajka-Williams, Eleanor (2015). „Estimating the Atlantic overturning at 26 N using satellite altimetry and cable measurements“. In: Geophysical Research Letters 42.9, pp. 3458–3464. DOI: 10.1002/2015GL063220
- [2] [11] [15] [19] [20] [24] [25] [26] Johannes Unegg (2024). “Estimating AMOC’s variability via In-Situ, Remote-Sensing and Model Data.” Stand. 2024-04-18
- [3] [12] Bryden, HL, Brian A King, Gerard D McCarthy, and EL McDonagh (2014). „Impact of a 30% reduction in Atlantic meridional overturning during 2009–2010“. In: Ocean Science 10.4, pp. 683–691. DOI: 10.5194/os-10-683-2014
- [4] <https://www.trendsderzukunft.de/wp-content/uploads/2021/02/Golfstrom.jpg>
- [5] <https://oceanmotion.org/html/background/ocean-in-motion.htm>
- [6] <https://www.pinterest.com/pin/25192079146145623/>
- [7] https://climateranalyzer.org/clim/sst_daily/
- [8] <https://salinity.oceansciences.org/smap-salinity.htm>
- [9] Zanna, Laure, Samar Khatiwala, Jonathan M Gregory, Jonathan Ison und Patrick Heimbach (2019). „Global reconstruction of historical ocean heat storage and transport“. In: Proceedings of the National Academy of Sciences 116.4, S. 1126–1131. DOI: 10.1073/pnas.1808838115
- [10] [13] [14] [16] [17] [28] Westen, René M van, Michael Kliphuis, and Henk A Dijkstra (2024). „Physics-based early warning signal shows that AMOC is on tipping course“. In: Science advances 10.6, eadk1189. DOI: 10.1126/sciadv.adk1189
- [18] <https://www.woerthersee.info/>
- [21] <https://www.researchgate.net/profile/BenMoat/publication/343164990/figure/fig1/AS:916530011324417@1595529191237/The-RAPID-26-N-array-traverses-the-subtropical-gyre-of-the-North-Atlantic-The-magenta.ppm>
- [22] <https://www.ecco-group.org/home.cgi>
- [23] https://gracefo.jpl.nasa.gov/internal_resources/89/
- [27] McCarthy, Gerard D, Peter J Brown, Charles N Flagg, et al. (2020). „Sustainable observations of the AMOC: methodology and technology“. In: Reviews of Geophysics 58.1, e2019RG000654. DOI: 10.1029/2019RG000654

Danke für Ihre Aufmerksamkeit!

