

## Om forskeren

Susanne Ditlevsen er professor i matematik og statistik ved Institut for Matematiske Fag på Københavns Universitet. Desuden er hun præsident for Det Kongelige Danske Videnskabernes Selskab. Susanne Ditlevsen startede sin akademiske karriere relativt sent, idet hun startede med en uddannelse som skuespiller, hvorefter hun i 10 år arbejdede i Spanien i forskellige teaterkompagnier som skuespiller og instruktør. susanne@math.ku.dk  
Foto: Philippine Chambaut



# STATISTIK GIVER ET BUD PÅ FREMTIDENS KLIMA

Det vakte opsigt, da danske forskere i sommeren 2023 annoncerede, at en klimatisk set meget vigtig havstrøm i Atlanterhavet potentielt kan gå i stå i en nær fremtid. Resultatet bygger på en ny statistisk metode, som Susanne Ditlevsen har udviklet.

## Forfatteren

Henrik Bendix er videnskabsjournalist. bendix@vidmere.dk

## Foredrag:

Susanne Ditlevsen holder foredrag om *Tal, tilfældigheder og tipping points* i serien Offentlige Foredrag i Naturvidenskab den 5. november 2024. Se også ofn.au.dk

Som statistiker oplever man lidt af hvert. Det kan professor Susanne Ditlevsen fra Københavns Universitet skrive under på. I sin karriere som statistiker har hun blandt andet arbejdet med at beskrive blodgennemstrømningen i nyrerne hos rotter, den elektriske aktivitet i rygsøjlen hos skildpadder og menneskehjernens fortolkning af synsindtryk.

I de seneste 12 år har hun arbejdet sammen med en gruppe biologer

fra Grønlands Naturinstitut, som forsøger at blive klogere på havpattedyr i det arktiske område. Hun har endda selv været med til at forsyne hvaler med måleudstyr og satellitsendere, fortæller hun:

»Der stod jeg fem-ti meter fra en kæmpestor grønlandshval, som vi skulle tagge oppe ved Diskøen i Grønland. Det var vildt!«

I de forløbne par årtier har hun brugt de fleste af sine vågne timer på at analysere de data, som fysio-

loger, biologer og psykologer har forsynet hende med, og det har været en fornøjelse, siger hun:

»Jeg elsker, at jeg kan få lov til at rode med så mange forskellige ting! Jeg kan godt lide teoretisk udvikling af statistik, men jeg kan virkelig også godt lide anvendelsen. Det er guld værd at arbejde sammen med dem, der indsamler data, for de data har jeg brug for at forstå. Og rent matematisk er det nogle interessante og udfordrende problemer, der skal løses.«

Men på det seneste har det hverken været nerveceller eller hvaler, der har holdt hende beskæftiget. Siden 25. juli 2023 har hun og hendes storebror, klimaprofessor Peter Ditlevsen, nemlig været centrum for en sand mediestorm, efter de publicerede en videnskabelig artikel med overskriften "Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation" – en advarsel om, at en af de absolut vigtigste havstrømme står foran et kollaps.

Samme dag bragte den britiske avis *The Guardian* en artikel med overskriften "Gulf Stream could collapse as early as 2025, study suggests." Det var ikke just en overskrift, der var belæg for i den videnskabelige artikel, men den fik fyret godt op under kedlerne hos andre medier, som stadig – her mere end et år senere – skriver om søskendeparrets resultater.

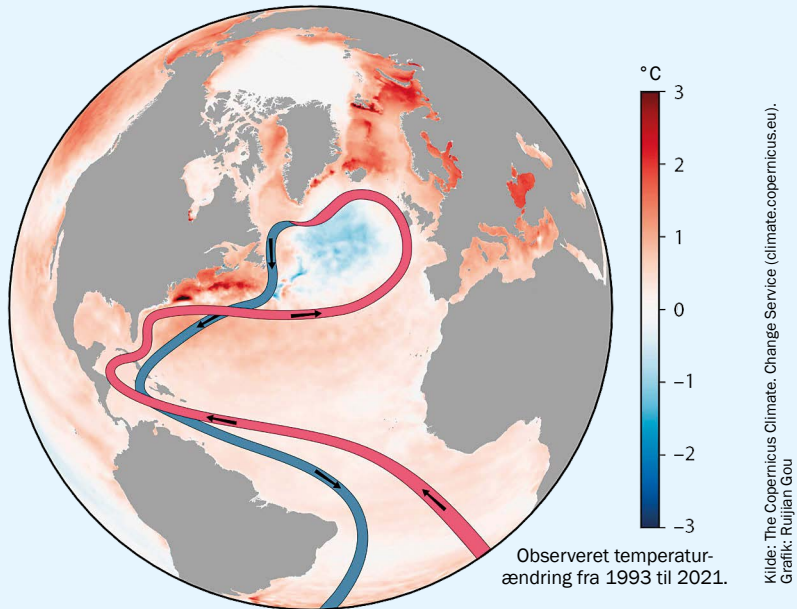
»Det har virkelig været voldsomt. Men det har også været en once-in-a-lifetime-oplevelse at publicere en artikel, der får så meget opmærksomhed,« lyder det fra Susanne Ditlevsen, der ærligt må indrømme, at hun efterhånden er godt træt af at snakke med journalister.

Men det er en del af jobbet som forsker, og budskabet er vigtigt: Hvis vi ikke meget snart nedbringer udledningen af CO<sub>2</sub>, går den vigtige havstrøm i Atlanterhavet sandsynligvis i stå. Det vil ske i løbet af dette århundrede, og det vil få dramatiske konsekvenser, både for os i Nordeuropa og længere sydpå.

### Gigantisk varmepumpe er truet

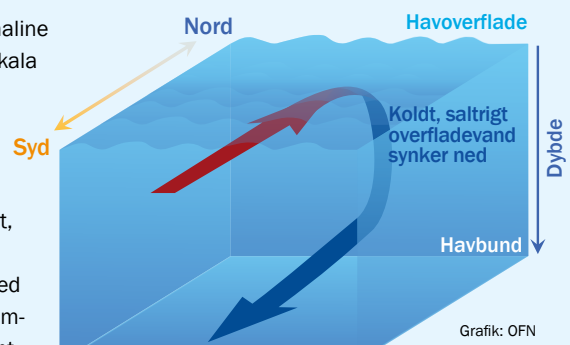
I videnskabelige kredse går havstrømmen under navnet Atlantic Meridional Overturning Circulation (AMOC), på dansk den atlantiske termohaline cirkulation. Den fungerer som en gigantiske pumpe, der transporterer varme fra syd til nord.

Nogle medier – som netop *The Guardian* med deres overskrift – har blandet AMOC og Golfstrømmen sammen. Det er problema-

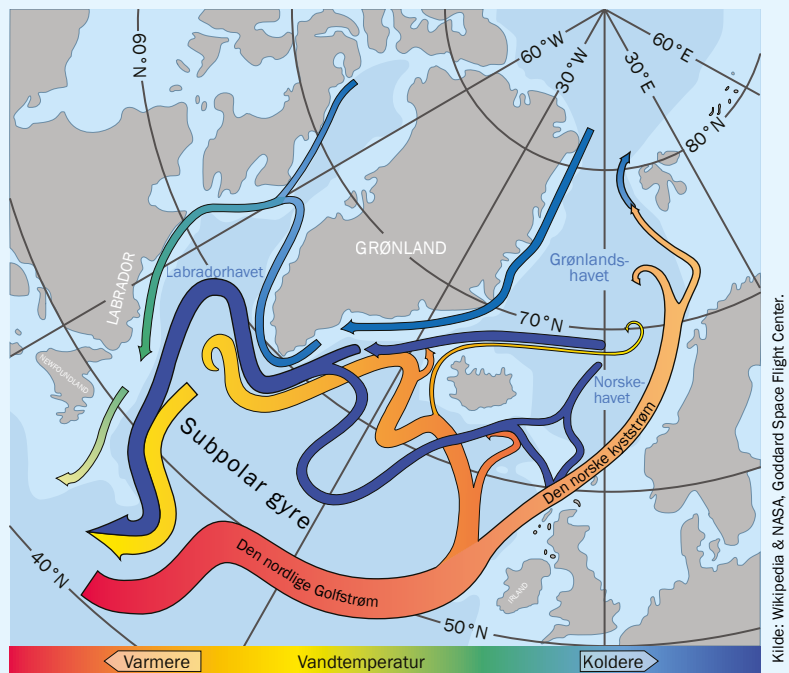


## AMOC

Den atlantiske termohaline cirkulation er en storskala bevægelse af hele Atlanterhavet, der er drevet af forskelle i vandets temperatur og salinitet. Koldt, saltrigt – og dermed tungt – vand synker ned i arktiske egne og strømmer sydpå, mens varmt overfladevand flyttes mod



nord. På den måde flyttes omkring 15 millioner kubikmeter vand per sekund. Havstrømmen fungerer som en gigantisk varmepumpe, der hvert sekund flytter en million milliard joule fra syd til nord. Effekten på en petawatt svarer omtrent til 50 gange energiforbruget for alle mennesker på kloden.



Havstrømme i Nordatlanten. Afkøling og nedsynkning af salt havvand er hovedmotoren for den termohaline cirkulation i verdens oceaner. Denne motor kan svækkes af store mængder fersk smeltevand fra Indlandsisen.





Foto: Shutterstock

tisk, fordi Golfstrømmen er en overfladestrøm drevet af vinden, og den bliver ved, så længe Jorden roterer. Anderledes er det med AMOC, der er drevet af forskelle i vandets temperatur og saltindhold. Begge dele påvirkes af den menneskabte, globale opvarmning.

Der er en sammenhæng, for Golfstrømmen bidrager til at bringe varmt vand fra syden op til det nordlige Atlanterhav omkring Island og det sydlige Grønland. Her afgiver vandet sin varmeenergi til atmosfæren. Saliniteten i vandet stiger lidt, fordi en del af havvandet fordamper, og fordi der dannes havis.

Når overfladevandet bliver salttere og koldere, bliver det også tungere. Densiteten stiger. Det får vandet til at synke til bunds i det dybe hav, og så er der plads til nyt, varmt vand fra det sydlige Atlanterhav.

Man kan forestille sig et enormt undersøisk vandfald, der driver den atlantiske termohaline cirkulation; en enorm pumpemekanisme, der kaldes Grønlandspumpen, og som flytter mange millioner kubikmeter vand hvert sekund.

Men den globale opvarmning kan stoppe pumpen. Varmen og en øget regnmængde får den grønlandske indlandsis til at smelte, og smeltet vandet er ferskvand, der er lettere end saltvand. Når ferskvandet blander sig med saltvandet, synker det langsommere til bunds, end det ellers ville gøre.

Så bremses hele cirkulationen, og det store spørgsmål er så, om der eksisterer en kritisk tærskelværdi – et tipping point – hvor pumpen pludselig går helt i stå, og hvornår det i så fald vil ske.

### Systemet kan tippe over

Data fra iskerneboringer og andre palæoklimatiske data peger på, at klimaet tidligere har ændret sig abrupt, oplagt i forbindelse med ændringer i den atlantiske termohaline cirkulation. Og siden 1960'erne har modeller af cirkulationen vist, at sådan et tipping point eksisterer.

I matematiske kredse kaldes et tipping point et bifurkationspunkt. Her kan en lille ændring i en af systemets parametre føre til en pludselig og voldsom ændring i systemets opførsel. Og det er noget, der tænder Susanne Ditlevsen:

»Fra et statistisk synspunkt er min store interesse ikke-lineære, stokastiske processer. Processer er noget, der udvikler sig over tid, og stokastisk betyder, at der er noget tilfældigt i det. Så det er altså en proces, hvor man ikke kan sige præcis, hvordan den udvikler sig, men man kan sige noget om fordelingen af, hvordan den udvikler sig. Og så interesserer det mig meget, når vi har noget ikke-lineært, som ikke bare udvikler sig stille og roligt.«

At den atlantiske termohaline cirkulation er et stærkt ikke-lineært system er udgangspunktet for den videnskabelige artikel, som Susanne og Peter Ditlevsen fik publiceret i 2023. Her antager forskerne, at havstrømmen har to forskellige såkaldt "kvasi-stationære" tilstande. Enten pumpes den rundt, eller også står den stort set stille.

Indirekte målinger tyder på, at AMOC'en er blevet svækket i takt med den globale opvarmning igennem de seneste 100 år. Men her har den opført sig pænt og lineært, styrken af havstrømmen har kun ændret sig lidt ad gangen. Problemet er, at den pludselig kan nå et tipping point, hvor den ikke længere

## Statistikken bag tipping points

Begrebet tipping point bliver ofte brugt om en kritisk værdi, hvor en lille perturbation i systemet kan føre til en stor ændring i systemet. Rent matematisk – for tipping i AMOC'en – er det en såkaldt saddelepunktsbifurkation. Systemet har to stabile tilstande – en tilstand, hvor pumpen kører (on-state) og en tilstand, hvor den er slukket (off-state).

Den simpleste ligning for en saddelepunktsbifurkation er:

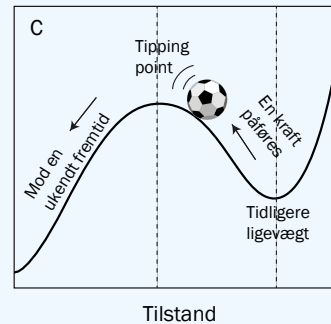
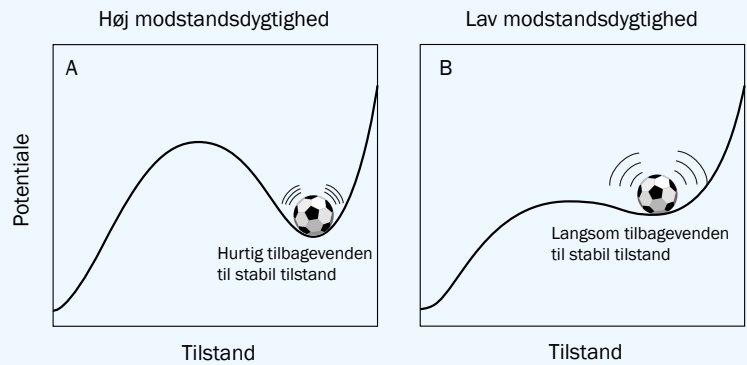
$$\frac{dx_t}{dt} = -(x_t^2 + \lambda)$$

Fixpunkter er de punkter, hvor højresiden er lig nul. Der er ingen fixpunkter for  $\lambda > 0$ . For  $\lambda < 0$  er der to fixpunkter:

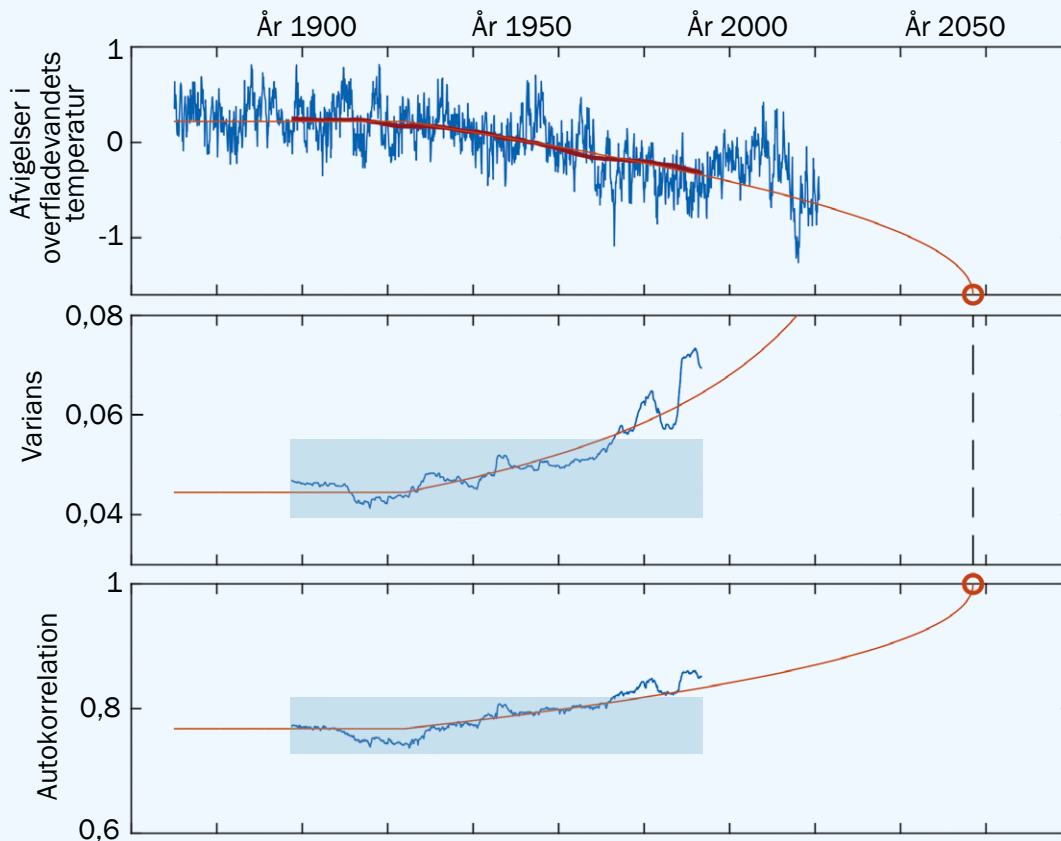
$$x^* = \sqrt{-\lambda} \text{ er stabilt og } x^* = -\sqrt{-\lambda} \text{ er ustabil.}$$

På figuren er modellen tegnet for to forskellige værdier af  $\lambda$ . Til venstre (A) er  $\lambda$  meget negativ, systemet er modstandsdygtigt (lav varians) og vender hurtigt tilbage til en stabil tilstand. Til højre (B) er  $\lambda$  tættere på nul, systemet er mindre modstandsdygtigt, variansen er større, og systemet er lang tid om at vende tilbage til den stabile tilstand.

Hvis  $\lambda$  repræsenterer global opvarmning, svarer A i figuren til situationen før industrialiseringen, og B svarer til, hvor vi er på vej imod. Når  $\lambda$  bliver lig 0, sker bifurkationen, og systemet vil uvægerligt skifte til den anden tilstand.



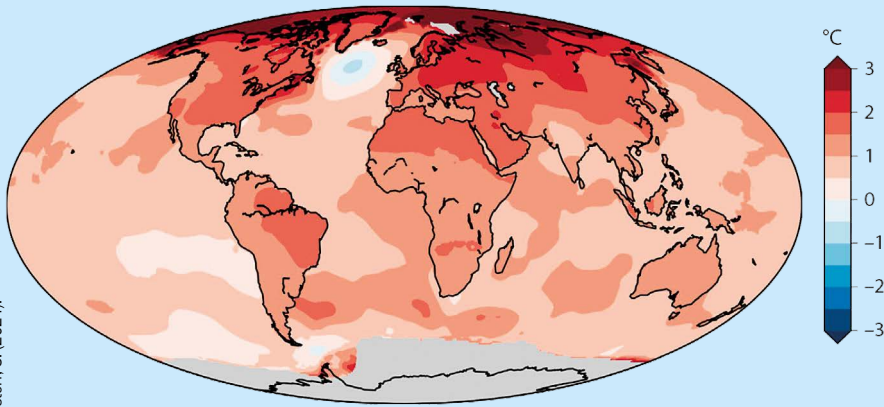
Systemet kan også tippe inden bifurkationen (C). Her tipper systemet over barrieren grundet tilfældige påvirkninger (såkaldt noise-induced tipping, modsat bifurcation-induced tipping).



Når systemet langsomt ændrer sig, efterhånden som  $\lambda$  vokser mod nul, vil der være advarselssignaler. Man siger, at data vil have stigende varians og stigende autokorrelation (stigende "hukommelse"). Det er statistiske signaler, som man kan bestemme ud fra data. På figuren øverst ses data fra de seneste 150 år for havoverfladetemperaturen i den Subpolare Gyre. Nedenfor er løbende estimater af de to statistiske størrelser, og man ser, hvordan de stiger – og stigningen bliver statistisk signifikant, når de forlader det mørkere blå område. Når man statistisk tilpasser data til modellen for en saddelepunktsbifurkation, fås de røde estimater – man kan se, at modellen (rød) passer til data (blå).

Tekst og grafer:  
Susanne Ditlevsen





Figuren viser et kort over temperaturændringer i luften nær havoverfladen siden slutningen af 1800-tallet. De grå områder angiver mangel på data.

### Kold plet er et dårligt varsel

Der foregår noget mystisk i Nordatlanten lige syd for Grønland og Island. Mens verden generelt bliver varmere, er dette område koldere end normalt. Her er vandtemperaturen i overfladen faldet igennem mere end 100 år, mens den er steget andre steder. Forskerne forsøger selvfølgelig at finde ud af baggrunden for denne kolde plet, som de kalder "the cold blob" eller "the North Atlantic warming hole". Forskellige modeller giver forskellige forklaringer, men et bud er, at anomaliteten har at gøre med en svækket atlantisk cirkulation.

Mindre varme bringes fra syd til nord, og samtidig kommer der mere smeltevand fra de grønlandske gletsjere, for den globale opvarmning går hårdt ud over Grønland. Derfor bliver vandet koldere end sædvanlig syd for Grønland.

bare svækkes, men kollapser i løbet af et par årtier. Og når den først er kollapsede, er det rigtig svært at få den i sving igen.

»Så ændrer den sig fundamentalt til den anden tilstand, og ændringen er irreversibel. AMOC'en kan ikke umiddelbart vende tilbage til sin oprindelige tilstand. Er havstrømmen først tippet over, er det meget, meget svært at få den i gang igen, og det sker ikke inden for et par generationer,« siger Susanne Ditlevsen.

Spørgsmålet er så, hvornår den atlantiske termohaline cirkulation når sit tipping point. Ifølge FN's klimapanel (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC) er det meget usandsynligt, at AMOC'en kollapser i dette århundrede. Men en del forskere, heriblandt Susanne og Peter Ditlevsen fra Københavns

Universitet samt oceanografen og klimaforskeren Stefan Rahmstorf fra Universität Potsdam i Tyskland, er overbeviste om, at IPCC underestimerer risikoen.

»De store klimamodeller, som IPCC bygger deres rapporter på, er typisk for lineære og for konservative,« som Susanne Ditlevsen siger det.

### Fortiden fortæller om fremtiden

Skal man give et bud på, hvordan AMOC'en udvikler sig fremover, skal man vide noget om, hvordan den historisk har opført sig. Her er udfordringen, at der er ret begrænsede data om den store havstrøm, og netop derfor er der brug for en statistiker, fortæller Susanne Ditlevsen:

»For mig er statistik at hive viden ud af data. Statistik bruger vi, når vi gerne vil vide noget om et fænomen, som vi ikke nødvendigvis

kan se eller måle direkte. Så må vi indhente indirekte data og så bruge statistik til at finde den information, der ligger gemt i de data.«

Vil man måle styrken af den atlantiske termohaline cirkulation, skal man helst måle vandstrømmen direkte. Det har oceanografer gjort siden 2004, og målingerne har vist, at strømmen er aftagende, og at den varierer mere, end forskerne havde troet.

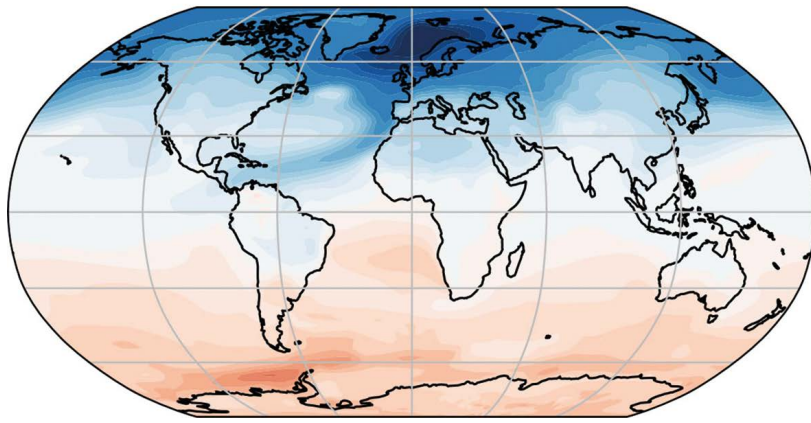
Men disse målinger rækker ikke langt nok tilbage til, at man kan bruge dem statistisk. Her må man ty til mere indirekte målinger – såkaldte fingeraftryk – der kan fortælle om havstrømmens historiske udvikling. For eksempel målinger af vandets temperatur i et bestemt område.

Susanne og Peter Ditlevsen har brugt overfladetemperaturen af havvandet i den subpolare gyre, en stor strømhvirvel i det nordlige Atlanterhav. Her har søens folk indsamlet data, der rækker helt tilbage til 1870, og siden 1970'erne er der også målinger fra satellitter.

Disse data blev fodret til en model baseret på en ny statistisk metode udviklet af Susanne Ditlevsen. I første omgang blev resultatet, at AMOC'en højst sandsynligt kollapser i dette århundrede, nærmere bestemt imellem 2025 og 2095, hvis udledningen af CO<sub>2</sub> og andre klimagasser fortsætter ufortrødent.

Siden publiceringen af den videnskabelige artikel har Susanne Ditlevsen fundet en fejl i sin computerkode, og kollapset er rykket otte år længere ud i fremtiden. I stedet for, at sandsynligheden for et kollaps topper omkring 2057, er det nu omkring 2065.

Men statistikken fortæller stadig, at vi står foran en klimakatastrofe af dimensioner, hvis vi ikke hurtigt får styr på vores udledningen af klimagasser. Går den store, atlantiske varmepumpe i stå, skal vi forvente,



Temperaturafvigelse (°C)

Illustration: R. van Westen, fra van Westen et al. (2024).  
Som i Rahmstorf, S. 2024.

Jordens klimatiske system transporterer store mængder af varmeenergi til Nordeuropa. Kortet viser et kvalificeret bud på forholdene helt uden AMOC. Næsten hele den nordlige halvkugle ville være betydelig koldere – især Island, Skandinavien og Storbritannien.

at Europa bliver 5-15 grader koldere på mindre end 100 år. Måske tager det kun få årtier.

For os nordpå vil et kollaps forårsaget af den globale opvarmning ironisk nok betyde en betydelig afkøling, som for eksempel vil ændre hvilke afgrøder, vi kan dyrke. Omvendt bliver de tropiske egne endnu varmere, og nedbørsmønstrene ændrer sig.

De fleste klimaforskere er med på,

at AMOC'en svækkes af den globale opvarmning. Men der er akademisk uenighed om, hvor tæt havstrømmen er på et kollaps, og om det overhovedet er muligt at forudsige ud fra de data, der er til rådighed.

Det sidste ord er ikke sagt om den atlantiske termohaline cirkulation, og det er Susanne Ditlevsen da også klar over:

»Det største kritikpunkt er det datasæt, vi bruger. Og man kan jo godt

menne, at man kun skal bruge målingerne fra 2004 og frem. Men så er der simpelthen ikke data nok,« siger hun og fortsætter:

»Der er ingen tvivl om, at vores metode kan forbedres. Man kan sagtens bygge flere detaljer ind, inddrage andre datasæt og tage højde for støj. Peter og jeg har da også en liste over ting, vi gerne vil lave. Vi skal bare finde tiden og have nogle bevillinger til nogle ph.d.-studerende.«

**Videnskabelig artikel:**  
Peter & Susanne Ditlevsen: "Warning of a forthcoming collapse of the Atlantic meridional overturning circulation". Nature Communications, 25/7 2023, DOI: 10.1038/s41467-023-39810-w  
[www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w](http://www.nature.com/articles/s41467-023-39810-w)

Rahmstorf, S. 2024. Is the Atlantic overturning circulation approaching a tipping point? Oceanography, doi.org/10.5670/oceanog.2024.501.

**Kritik af artiklen fra 2023:**

M. Ben-Yami et al.: "Uncertainties too large to predict tipping times of major Earth system components from historical data", Science Advances, 2. august 2024, DOI: 0.1126/sciadv.adl4841  
[www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adl4841](http://www.science.org/doi/10.1126/sciadv.adl4841)

## Læs Naturvidenskabelig Bachelor

Fordyb dig i **medicinal biologi, molekylær biologi, matematik, fysik, kemi eller miljøbiologi**. Du kan f.eks. arbejde med at undersøge miljøskadelige stoffer i havet, bedre diagnosticering og behandling af sygdomme, antibiotikaresistente bakterier, plastforurening eller måske er du bare nysgerrig på hvordan man udvikler nye naturvidenskabelige metoder og teorier?

**RUC**  
Roskilde Universitet

Arbejd på tværs af naturvidenskabelige felter.

Arbejd med topforskere i moderne laboratorier.

Uddannelsen kan tages på både dansk og på engelsk, hvor studiemiljøet er mere internationalt.

Læs mere her:

