

NÅR FORSKELLEGE FAGLIGHEDER BRYDES

og ny forskning opstår

**Hvad er bedst: Indirekte målinger eller modelberegninger?
Svaret er ikke entydigt og forfatterne kigger her på den klassiske konflikt inden for videnskaben.**

Forfatterne



Mikkel Willum Johansen er lektor ved Sektionen for Videnskabsteori og Videnskabshistorie ved Institut for Naturfagernes Didaktik, Københavns Universitet. Hans forskning og undervisning ligger inden for videnskabsteori og etik med særligt fokus på matematikkens videnskabsteori. mwj@ind.ku.dk



Henrik Kragh Sørensen er professor MSO samme sted. Hans forskning ligger inden for matematikkens og datalogiens videnskabs-historie og videnskabsteori. henrik.kragh@ind.ku.dk

I april 2018 offentliggjorde det anerkendte tidsskrift *Nature* to bemærkelsesværdige artikler om den såkaldte Grønlandspumpe. Grønlandspumpen – også kaldet den termohaline cirkulation eller bare AMOC (Atlantic Meridional Overturning Circulation) – er en del af det system af havstrømme, som cirkulerer varmt og koldt vand rundt i verdenshavene. “Pumpen” virker ved, at varme overfladestrømme trækker op langs Europas vestvendte kyster fra Ækvator. I Nordatlanten afkøles vandet, og forskelle i vandets saltindhold tvinger det kolde vand dybere ned, hvor det flyder ned langs den amerikanske østkyst. Dermed er AMOC medvirkende til at sikre det tempererede kystklima i Vesteuropa og det forholdsvis kolde havvand langs USA’s østkyst. Cirkulationen strækker sig fra Atlanterhavet ud i det Indiske Ocean og videre til Stillehavet. På den vis er pumpen af afgørende betydning både for klimaet og for økonomien i landene omkring Nordatlanten, og der er tegn på, at den måske er ved at gå i stykker. Derfor er forskere

naturligvis interesseret i at vide mere om den langsigtede historiske udvikling i havstrømmen.

Model eller proxy?

Desværre er det først for nyligt, at man er begyndt at måle direkte på havstrømmen, så hvis man vil forstå, hvordan strømmen har opført sig længere tilbage i tiden, får man et interessant videnskabsteoretisk problem. Vi kan jo af gode grunde ikke rejse tilbage i tiden og måle, hvor kraftig strømmen var for to hundrede eller tusind år siden, så hvordan får vi viden om et fænomen, vi ikke har adgang til? Svaret er, at man er nødt til at undersøge strømmen ved hjælp af indirekte metoder. De kan gøres på forskellige vis, og i de to rapporter fra *Nature* har man brugt radikalt forskellige metoder.

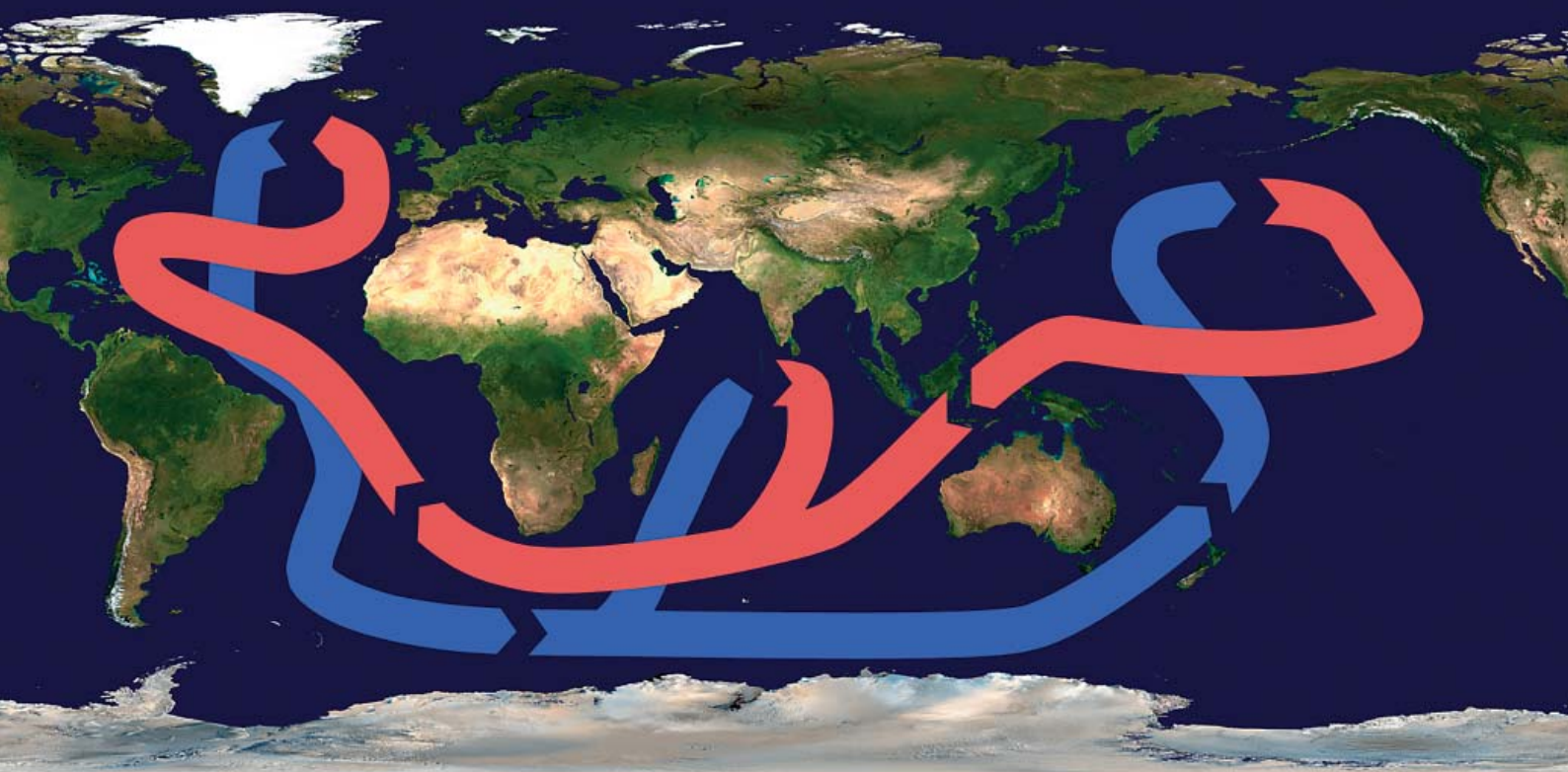
I den ene rapport, udarbejdet af geoforskere og oceanografer fra England, USA og Canada, bruger man en proxy, dvs. en form for stedfortræder. Man ved, at en havstrøms styrke og temperatur har betydning for, hvor forskellige sedi-

menter aflejres på havbunden. Forskerne bag rapporten undersøgte derfor sedimentprøver fra bunden af Labradorhavet og udledte heraf, hvordan AMOC har ændret sig de seneste 1600 år.

Den anden rapport, som er udarbejdet af et tværvideenskabeligt hold forskere – herunder fysikere og klimaforskere – fra Tyskland, Spanien, Grækenland og USA, tager udgangspunkt i de omfattende og komplekse matematiske modeller, der igennem de seneste årtier er opbygget af vores klima. Ved at kombinere modelkørsler med faktiske data fra klimaet og havtemperaturer udleder forskerne, hvordan AMOC har ændret sig de seneste 150 år.

Er vores klima ved at gå AMOC?

Hvis de to rapporter nu var nået frem til samme resultat, ville sagen næppe have vakt opmærksomhed, men interessant nok er der afgørende forskelle i rapporternes konklusioner. Rapporterne er enige om, at AMOC er blevet svækket de seneste 150 år, men hvor me-



Principskitse over den termohaline cirkulation. Kilde: WikimediaCommons

get havstrømmen er aftaget, og i hvilken grad ændringen skyldes menneskeskabte påvirkning, er de til gengæld langt fra enige om. Holder man sig til sedimentprøverne, gik AMOC amok tidligt i industrialiseringen, dvs. før udledningen af CO₂ for alvor tog fart, og derfor består den menneskelige indflydelse på havstrømmen (formentlig) primært i at fastholde den på et historisk lavt niveau. Tager man i stedet udgangspunkt i de matematiske modeller, falder ændringen i havstrømmene sammen med de øvrige klimaændringer, og er derfor (også formentlig) primært et menneskeskabt fænomen. Så hvad skal vi stole på, sedimentprøver eller numerisk simulation – jord eller matematik?

Hver metode, sine udfordringer

Spørgsmålet er, om det overhovedet giver mening at sætte problemet så simpelt op, for begge metoder har deres forskellige udfordringer. Fortolkningen af sedimentprøverne hviler på en lang række teoretisk tunge antagelser om sammenhængen mellem havstrømme og havbund, og det er desuden sin sag at udtale sig om et globalt fænomen som AMOC ud fra lokale observationer i Labradorhavet. Tilsvarende rummer matematiske modeller (som vi tidli-

gere har beskrevet det i *Aktuel Naturvidenskab* nr. 1 2018) en række begrænsninger: Man er nødt til at foretage idealiseringer og andre mere eller mindre velbegrundede valg i modelleringsprocessen, og selvom det lykkedes at lave en model, der passer med de kendte data, kan man pga. det såkaldte underbestemthedsproblem ikke være sikker på, at det er den eneste model, der passer på dem. Det er derfor mildt sagt udfordrende at afveje de observationelle resultater fra sedimentprøver med modelforudsigelser fra store og komplekse numeriske simuleringer.

Begge studier rummer altså en række usikkerheder, men derudover er de underliggende mål og metoder i de to studier, som oceanografen Marilena Oltmanns påpeger, så forskellige, at det ikke for alvor giver mening at sige, at de har undersøgt "den samme ting":

»I think by applying different methods and looking at different time scales, the two studies focused on different components of the ocean circulation. [...] Both of them had to use some kind of approximation or proxy, which inevitably results in limitations and cannot give a complete picture«. (Mooney, 2018)

Med andre ord er begge studier usikre, og vi kan ikke forvente, at det ene studie i en simpel forstand er rigtig, mens det andet er forkert. De forskellige metoder leder til forskellige former for vidensudsagn, og ingen af dem er direkte observationer af forhold i virkeligheden. De matematiske modeller, som bruges i geovidenskaberne, er i sig selv så komplekse, at de ikke har form af direkte udledninger fra veletablerede første-principper, men i stedet er kombinationer af forskellige mindre modeller, som efter bedste evne er parametriseret med historiske data. Kombineret med det forhold, at modellerne – udover at udtale sig om forhold i fortiden, vi ikke har målt på – bliver brugt til at give forudsigelser af fremtid, og at vi ikke har tid (og nerver) til at vente på at få modellerne bekræftet af nye data, er vi i en situation, hvor modellerne ikke så meget udtaler sig direkte om verden, som den er, men nærmere egner sig til at gennemregne forskellige scenarier og sammenligne modellernes forskellige forudsigelser. På den måde er den standard, som komplekse modeller måles efter, ikke så entydigt klar, og man bør ikke tale om, at modeller er sande eller beviste, men nærmere, at de er internt sammenhængende og eventuelt indbyrdes bestyrkede.

Videre læsning

Caesar, L. m.fl. (12. apr. 2018). "Observed fingerprint of a weakening Atlantic Ocean overturning circulation". *Nature*, bd. 556, nr. 7700, s. 191–196. doi: 10.1038/s41586-018-0006-5.

Mooney, Chris (11. apr. 2018). The oceans' circulation hasn't been this sluggish in 1,000 years. That's bad news. www.washingtonpost.com/news/energy-environment/wp/2018/04/11/the-oceans-circulation-hasnt-been-this-sluggish-in-1000-yearsthats-bad-news.

Stinner, Art og Jürgen Teichmann (2003). "Lord Kelvin and the Age-of-the-Earth Debate: A Dramatization". *Science & Education*, bd. 12, s. 213–228.

Sørensen, Henrik Kragh (2017). "Shaping Mathematics as a Tool: The Search for a Mathematical

Model for Quasi-crystals". I: *Mathematics as a Tool. Tracing New Roles of Mathematics in the Sciences*. Udg. af Johannes Lenhard og Martin Carrier. *Boston Studies in the Philosophy and History of Science* 327. Springer, s. 69–90. doi: 10.1007/978-3-319-54469-4_5.

Thornalley, David J. R. m.fl. (12. apr. 2018). "Anomalously weak Labrador Sea convection and Atlantic overturning during the past 150 years". *Nature*, bd. 556, nr. 7700, s. 227–230. doi: 10.1038/s41586-018-0007-4.

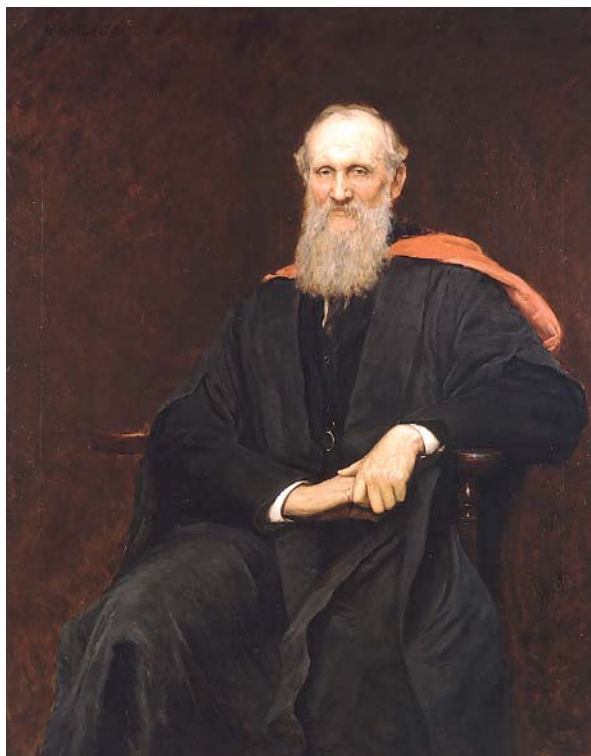
Tværfaglighed

Sagen om AMOC's opbremsning er akut og vigtig. Men spørgsmålet om, hvordan man vægter viden, der er indhøstet med forskellige metoder, stikker dybere og danner grundlag for en lang række af videnskabshistoriens største kontroverser. For mange af de vigtigste problemer, som videnskaben undersøger, er så komplekse, at de bedst studeres fra mange forskellige vinkler, og når forskere samarbejder på tværs af videnskaberne, brydes de forskellige faglighedens standarder for gode metoder, forudsigelser og forklaringer. Det kan på den ene side være forvirrende, når tingene

ikke passer sammen, og når forskerne kommer med modstridende påstande, men omvendt kan det være nødvendigt og sundt at bringe forskellige metodologiske principper i spil, når man forsøger at forstå en kompleks virkelighed.

Jordens alder

De seneste årtier har der været øget fokus på tværfaglig og interdisciplinær forskning, men fænomenet med disciplinære kontroverser om metoder er ikke nyt. For at undersøge et eksempel, der til dels minder om AMOC-sagen, men samtidig er på passende historisk afstand, kan vi se på de første forsøg på naturvidenskabeligt at bestemme Jordens alder. I midten af 1800-tallet undergik geovidenskaberne en rivende udvikling, og spørgsmålet om Jordens alder var gradvist blevet indlemmet i de naturvidenskabelige domæner (fra dets tidligere placering som et bibelkronologiske studie i et teologisk vidensparadigme). Men selvom spørgsmålet var åbnet for naturvidenskabelige studier, var der ikke enighed om, hvilke metoder, der kunne bringes i spil.



Den berømte skotsk-irske videnskabsmand William Thomson (Lord Kelvin, 1824–1907)

Geologien var på dette tidspunkt, hvad man kan kalde en naturhistorisk disciplin, der benyttede indsamling og observation af naturligt forekommende fænomener som fossiler og aflejringer som sin primære metode. Den berømte skotsk-irske videnskabsmand William Thomson (Lord Kelvin, 1824–1907) udfordrede imidlertid den traditionelle geologiske videnskab ved at præsentere en matematisk-fysik model for Jordens afkøling, og ud fra kendte modelleringsteknikker fra fysikken, simple antagelser og etableret teori om varmeledning bestemte han Jordens alder til at være et sted mellem 20 og 40 millioner år (efter i første omgang at have givet et lidt vagere bud på mellem 20 og 400 millioner år). Tallet afveg fra den geologiske visdom, men det var især Kelvins brug af matematisk modellering, der fik datidens geologer til at protestere.

Matematisk modellering, hvor man på baggrund af forsimplinger og idealiseringer når frem til en enkel matematiske beskrivelser af et fænomen, havde fungeret

med enorm succes i den matematiske fysik. Ved at se bort fra luft- og gnidningsmodstand og andre former for "støj" var det i de forudgående århundreder lykkedes fysikere at formulere en række grundlæggende naturlove som simple matematiske udtryk. Særligt havde franskmændene Joseph Fourier givet en matematisk beskrivelse af varmeledning, som både var udgangspunkt for frugtbar fysik og matematik. Basalt set forsøgte Kelvin at overføre denne metode fra fysikken til geologien, men spørgsmålet var, om det gav mening. Geologerne

i Kelvins samtid mente klart nej. De pointerede, at de antagelser og idealiseringer, Kelvin byggede sin model på, var rene gætteri, og påpegede, at man ikke kan udlede noget sikkert fra et grundlag af usikre formodninger. Mere venligt indstillede kommentatorer pegede på den anden side på, at Kelvin på en afgørende måde havde videnskabeliggjort problemet. Selv om geologien egentlig søgte et kvantitativt svar – et præcist tal for Jordens alder – så var dens antagelser og metoder så vage, at det egentlig ikke kunne lade sig gøre. Modellen derimod gav både et forholdsvist klart svar, og pegede desuden på en metode for videre forskning, idet man med en model kan gennemregne forskellige scenarier og sammenligne modellens forudsigelser med observerede data og på den måde udvikle stadig bedre modeller.

Forskellighed på den gode måde

Der er nogle klare paralleller mellem de to eksempler: De involverer begge en modstrid mellem modellering og indirekte observa-

tion, og de viser begge, hvordan videnskabsfolk kan komme frem til uforenelige svar, når de forfølger forskellige videnskabelige mål og bruger forskellige metoder til at undersøge "det samme".

I eksemplet med Jordens alder stod det hurtigt klart, at Lord Kelvin faktisk havde været for uforsigtig i sit forsøg på at overføre metodik fra matematisk fysik til geologi. Der var for meget, han ikke forstod om det system, han forsøgte at modellere, og derfor var hans model ikke bare unøjagtig, men grundlæggende forkert. Specielt tog Kelvins model ikke højde for, at radioaktivt henfald konstant skaber varme i Jordens indre, hvorfor de teorier for afkøling, modellen byggede på, giver en fundamentalt forfejlet beskrivelse af Jordens varmedynamik. Til gengæld gav netop opdagelsen af radioaktivitet en mulighed for at kombinere geologi og matematik. Ved hjælp af matematisk modellering bestemte man halveringstiden for de forskellige radioaktive isotoper, og ved at kombinere denne viden med geo-

logisk indsigt i den relative alder af forskellige klippestykker, kunne man i midten af den 20. århundrede bestemme Jordens alder med stor præcision.

Dette viser, at undersøgelsen af Jordens alder i sidste ende ikke blev et spørgsmål om et skarpt valg mellem jord eller matematik, men snarere førte til en hybrid, et både-og, og man kan fortælle lignende historier fra andre videnskabelige felter. Der er meget at vinde ved at få forskellige fagligheder til at snakke sammen, men det er ikke altid let, idet forskellige videnskabelige discipliner kan have meget forskellige opfattelser af, hvad det vil sige at give en videnskabelig forklaring, hvilke metoder, man skal bruge for at give den, og hvornår en forudsigelse har tilstrækkelig præcision (for blot at nævne nogle faktorer). Derfor er der brug for kvalificeret tværfaglig kommunikation og for at alle parter har en grundlæggende respekt for hinanden og forståelse for de muligheder og begrænsninger, der ligger i de fagligheder, der mødes.

Vi kan ikke vide, om AMOC-sagen finder en lige så frugtbar integreret løsning som sagen om Jordens alder, men ser man nærmere efter, er konflikten mellem de to rapporter ikke afgrundsdyb.

Klimaforskning er så komplekst et videnskabeligt felt, at man ikke kan klare sig uden at integrere matematiske modellering og data fra både direkte og indirekte målinger. Så det er mere et spørgsmål om, hvordan de forskellige vidensformer vægtes og integreres, og det vil formentlig falde på plads over tid. Det egentlige problem i AMOC-sagen er måske snarere, at vi ikke har tid: Hvis den ene rapport har ret, er der en fare for, at Grønlandspumpen – og dermed klimaet i hele Nordatlanten – vil gå amok, men har den anden rapport ret, er Grønlandspumpen formentlig mere robust.

Vi skal med andre ord tage et vigtigt og svært valg på baggrund af usikre data, og hvordan man gør det, vil vi se på i den næste og sidste artikel i denne serie. ■

Cases til videnskabsteori

I en serie af artikler vil undervisere i Fagets Videnskabsteori præsentere læserne for videnskabsteoretiske aspekter af alle de naturvidenskabelige gymnasiefag. Vi tager udgangspunkt i cases, som vi på Institut for Naturfagernes Didaktik bruger i vores undervisning i videnskabsteori på bacheloruddannelser ved SCIENCE på Københavns Universitet.

Bliv **STUDERENDE** **FOR EN DAG** på SDU

Tilmeld dig Anvendt matematik, Biokemi og molekylær biologi, Biologi, Biomedicin, Datalogi, Farmaci, Fysik, Kemi, Matematik eller Matematik-Økonomi på sdu.dk/studerendeforendag