

Forstærket arktisk opvarmning

- hvad betyder transport af vanddamp sydfra?

Klimaforandringer sker hurtigere i Arktis end i resten af verden. Denne arktiske forstærkning skyldes både feedback-mekanismer og atmosfærens transport af energi. Transport af vanddamp spiller en tredobbelt rolle, hvor energien, frigivet ved kondensation, sammen med drivhuseffekten af vanddamp og skyer virker opvarmende. Dette betyder, at over halvdelen af arktisk opvarmning alene skyldes påvirkninger fra lavere breddegrader.

Foto: Henrik Skov, Aarhus Universitet.



Samspillet mellem sol, is, sne, skyer og vanddamp er afgørende for opvarmningen i Arktis.

Af Peter L. Langen,
Institut for Miljøvidenskab,
iClimate, Aarhus Universitet

Mange er bekendt med is-albedo-feedbacken, hvor en opvarmning får is og sne til at smelte bort, og overfladens refleksion af sollys mindskes. Det giver yderligere tilførsel af energi til overfladen og yderligere opvarmning. Dette er en positiv feedback, som forstærker

den oprindelige opvarmning, og den er aktiv navnlig i Arktis i disse årtier. Ud over denne mekanisme findes der flere andre feedbacks, der virker forskelligt på lave og høje breddegrader og bidrager til arktisk forstærkning. Desuden spiller ændringer i havstrømmene en rolle.

Et mindre kendt bidrag til arktisk forstærkning er transporten af energi i atmosfæren fra lave breddegrader. At store mængder energi konstant transporteres

fra lave breddegrader op til Arktis, er ikke kontroversielt. Heller ikke den store betydning for Arktis af disse transporter. Det, der er vigtigt for arktisk forstærkning, er dog ikke selve transporten, men snarere *forandringer* i transporten, og her bliver det mere usikkert: *Bliver transporten ind i Arktis større eller mindre, når klimaet varmes op?*

Arktis tæt forbundet med lave breddegrader

Sammenligner man estimerede arktiske temperaturer gennem geologisk tid i forhold til resten af kloden, ses det, at udsving i Arktis har fulgt det globale gennemsnit, blot forstærket til omtrent en tredobling. Dette taler for, at mens lokale feedbackmekanismer forstærker det arktiske signal forskelligt fra model til model og fra geologisk periode til geologisk periode, så tillades arktiske temperaturer tilsyneladende ikke at afvige synderligt fra den tvungne faktor 3. Dette tyder igen på, at Arktis er så effektivt forbundet til lavere breddegrader, at arktiske forandringer langt hen ad vejen styres af de globale udsving.

Modsatte konklusioner om betydningen af varmetransport

Dette er i tråd med en række studier, der demonstrerer, at en stor andel af den ark-

tiske opvarmning skyldes opvarmningen uden for Arktis. Omvendt er det umiddelbart i kontrast til en anden række studier, der viser, at forandringer i den atmosfæriske netto-varmetransport ikke bidrager nævneværdigt til den arktiske opvarmning.

På den ene side har vi studier, hvor man med klimamodelsimuleringer på den ene eller anden måde isolerer den opvarmning, der alene skyldes forøgelse af CO₂ inden for Arktis, fra den der fremkommer inde i Arktis som følge af, at områderne uden for Arktis varmes op. Simuleringerne er lavet med forskellige klimamodeller på forskellige måder, og derfor kommer de også frem til forskellige resultater. Til fælles har de dog, at 50-85 procent af opvarmningen i Arktis skyldes de fjerne effekter. Dette er ret opsigtsvækkende: Mindst halvdelen af den arktiske opvarmning skyldes i første omgang udefrakommende påvirkning. Dermed begynder man at forstå, hvorfor arktiske temperaturudsving tilsyneladende er så tæt forbundet med de globale.

På den anden side har vi studier, hvor man på forskellige måder opgør, hvor meget netto-varmetransporten ind i

” Sammenligner man estimerede arktiske temperaturer gennem geologisk tid i forhold til resten af kloden, ses det, at udsving i Arktis har fulgt det globale gennemsnit, blot forstærket til omtrent en tredobling

Arktis forandrer sig i et varmere klima, og hvilken betydning disse forandringer har på de arktiske temperaturer. De finder ret enstemmigt, at atmosfærens netto-tilførsel af energi til Arktis syd fra forandrer sig minimalt. Derfor konkluderer

deres det, at atmosfærisk varmetransport ikke kan spille nogen afgørende rolle for den forstærkede arktiske opvarmning.

Men hvordan hænger det nu sammen? Der er nemlig ikke noget metodologisk at udsætte på hverken den ene eller den anden række af studier. Ikke desto mindre kommer man alligevel til modstridende resultater: *Er det halvdelen eller mere af den arktiske opvarmning, der skyldes udefra kommende effekter, eller spiller varmetransporten kun en meget lille rolle?*

Vanddampens tredobbelte effekt

Forklaringen skal findes et lag dybere. Jeg har i det forrige talt om ”netto-varmetransporten”, da den atmosfæriske varmetransport består af flere dele. På den ene side har vi transport af varm luft; vi kender det herhjemme fra, når vinden slår om fra nord til syd, og temperaturen stiger drastisk. Dette kalder vi tørstatisk energi (på engelsk dry static energy, DSE). På den anden side har vi transporten af vanddamp. Vanddampen er jo i sin tid fordampet ved lavere breddegrader fra en hav- eller landoverflade, ►

COPENHAGEN

7 - 8 September

LabDays 2022

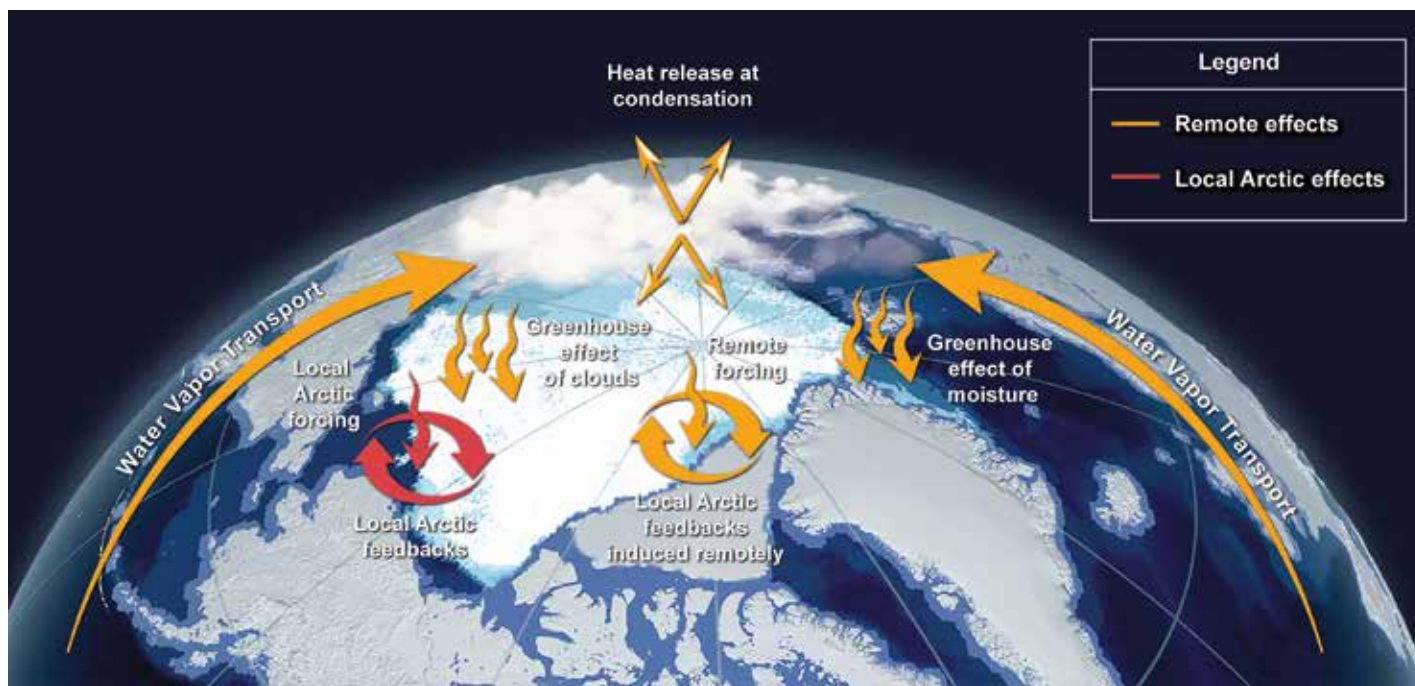
- international trade fair for laboratory technology

FREE TO ATTEND

- Trade fair
- Seminars
- Networking
- Annual meeting

Central in Copenhagen

labdays.dk



Arktisk opvarmning forstærkes af tilførslen af vanddamp fra lavere breddegrader. Kilde: Figur er gengivet fra P.C. Taylor *et al.*, "Process Drivers, Inter-Model Spread, and the Path Forward: A Review of Amplified Arctic Warming", *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 2022. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.758361> under Creative Commons CC-BY 4.0".

som blev afkølet i forbindelse med faseovergangen. Når vanddampen kondenserer i den arktiske atmosfære, frigives den tilsvarende energi igen. Energi er blevet flyttet fra lave breddegrader til Arktis, men indtil vanddampen kondenseres, er energien så at sige skjult, og man kalder det latent varme (på engelsk latent heat, LH).

Det viser sig, at når klimaet bliver varmere, ændres både DSE- og LH-komponenten af den totale varmetransport, men i modsat retning: Idet arktisk forstærkning mindsker temperaturforskellen mellem lave og høje breddegrader, bliver den direkte transport af varme, DSE, mindre effektiv, og denne mindskes. Omvendt stiger det generelle indhold af vanddamp, og LH-transporten forøges. Et bredt udsnit af klimamodeller kommer frem til, at de to ændringer ret nøje ophæver hinanden, og nettoændringen er ganske tæt på nul [3]. Dette forklarer rækken af studier, der, baseret på beregninger af ændringer i netto-transporten, konkluderer, at den atmosfæriske varmetransport næppe kan spille nogen større rolle.

På trods af at netto-transporten stort set er uændret i det varmere klima, er sammensætningen mellem DSE og LH dog forandret: Der transporteres mere vanddamp ind i Arktis, og dette bidrager til at forøge drivhuseffekten i Arktis. Desuden øger det skydækket, der i den kolde, mørke arktiske vinter også virker kraftigt opvarmende. Transport af vanddamp spiller dermed en tredobbelte

opvarmende rolle: 1) Drivhuseffekten af vanddampen inden kondensation, 2) den frigivne latente energi ved kondensation (det eneste bidrag, der medregnes i betragtninger af netto-transporten) samt 3) drivhuseffekten af skyer efter kondensation. Observationsbaserede studier og simuleringer med klimamodeller har vist, at den opvarmende effekt af vanddamp er væsentlig større, end man skulle forvente alene ud fra LH-transporten. Somme tider kan effekten være op til ti gange større. Således kommer man til at ignorere store opvarmningsbidrag, der hidrører fra ændringerne i vanddamptransport, hvis man kun ser på LH-delen.

Konklusion

På grund af den tredobbelte rolle af vanddamp ser vi to rækker af studier, der kommer til forskellige konklusioner. Den ene række medtager kun LH-delen og konkluderer, at vanddamptransport ikke spiller en større rolle for arktisk forstærkning. Den anden medtager, i kraft af designet af modelsimuleringerne, den tredobbelte effekt, og desuden de lokale arktiske feedback-forstærkninger af den opvarmning, som den ændrede vanddamptransport sætter i gang. Dermed konkluderer de, at uden effekten af opvarmningen sydpå og den dertil hørende ændring i varmetransporten, ville den arktiske opvarmning højst være halvt så stor.

E-mail:
Peter Langen: plangen@envs.au.dk

Referencer

1. G.H. Miller *et al.*, "Arctic amplification: can the past constrain the future?", *Quaternary Science Reviews*, vol. 29, no. 15, pp. 1779-1790, Jul. 2010, doi: 10.1016/j.quascirev.2010.02.008.
2. M. Yoshimori, A. Abe-Ouchi, and A. Lainé, "The role of atmospheric heat transport and regional feedbacks in the Arctic warming at equilibrium," *Climate Dynamics*, vol. 49, no. 9, pp. 3457-3472, Nov. 2017, doi: 10.1007/s00382-017-3523-2.
3. Y.-T. Hwang, D.M.W. Frierson, and J.E. Kay, "Coupling between Arctic feedbacks and changes in poleward energy transport," *Geophysical Research Letters*, vol. 38, no. 17, 2011, doi: 10.1029/2011GL048546.
4. R.G. Graversen and M. Burtu, "Arctic amplification enhanced by latent energy transport of atmospheric planetary waves," *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 142, no. 698, pp. 2046-2054, Jul. 2016, doi: 10.1002/qj.2802.
5. R.G. Graversen and P.L. Langen, "On the Role of the Atmospheric Energy Transport in 2 × CO₂-Induced Polar Amplification in CESM1," *J. Climate*, vol. 32, no. 13, pp. 3941-3956, Apr. 2019, doi: 10.1175/JCLI-D-18-0546.1.
6. P.C. Taylor *et al.*, "Process Drivers, Inter-Model Spread, and the Path Forward: A Review of Amplified Arctic Warming," *Frontiers in Earth Science*, vol. 9, 2022, <https://www.frontiersin.org/article/10.3389/feart.2021.758361>.