

Tema

Klima og vejr i Grønland /Arktis





Klima og vejr i Arktis

Af Torben Røjle Christensen¹, Svend Erik Nielsen³,
Marie Frost Arndal¹ og Katrine Raundrup²

¹ Aarhus Universitet, Department of Ecoscience.

² Grønlands Naturinstitut, Nuuk.

³ Frederiksborg Gymnasium og HF

© Forfatterne. Aarhus Universitet.

Layout: Trine Sejthen

Omslagsfoto: Efrén López-Blanco

Alle rettigheder forbeholdes.

www.gem.dk

Bogen er udviklet med støtte fra:
Novo Nordisk Fonden, NNF20OC0062439.



Læs mere om Klima og vejr i Grønland her



Tema

Klima og vejr i Arktis

Indhold

1 Vejr og klima i Grønland	4
Vejr og klima	4
2 Drivhuseffekten	6
Jordens og atmosfærens strålingsbalance	7
Albedo	7
Energibalancen	8
Klimaændringer og global opvarmning	8
Grønlandspumpen	10
Feedback mekanismer	12
Forudsigelser om fremtiden	14

Vejr og klima

Vejr og klima er to måder at beskrive fænomener som fx lufttemperatur og nedbør, men på to meget forskellige tidsskalaer. Når man taler om "vejr", så handler det om, hvordan vejret varierer fra dag til dag eller i løbet af en sæson. Når man derimod taler om "klima", så er tidsskalaen en helt anden. Man taler ofte om, at eventuelle klimaændringer skal ses som gennemsnitlige vejrrparametre i løbet af 30 år. Der er nemlig tale om gennemsnitsvejr over en periode på 30 år.

Det er naturligt, at vejret ændrer sig fx mellem sommer og vinter, og i løbet af en eller to sæsoner, men det behøver ikke nødvendigvis at betyde, at klimaet ændrer sig. Det vil som nævnt kræve, at man ser på tendenser i ændringerne over rigtig mange år.

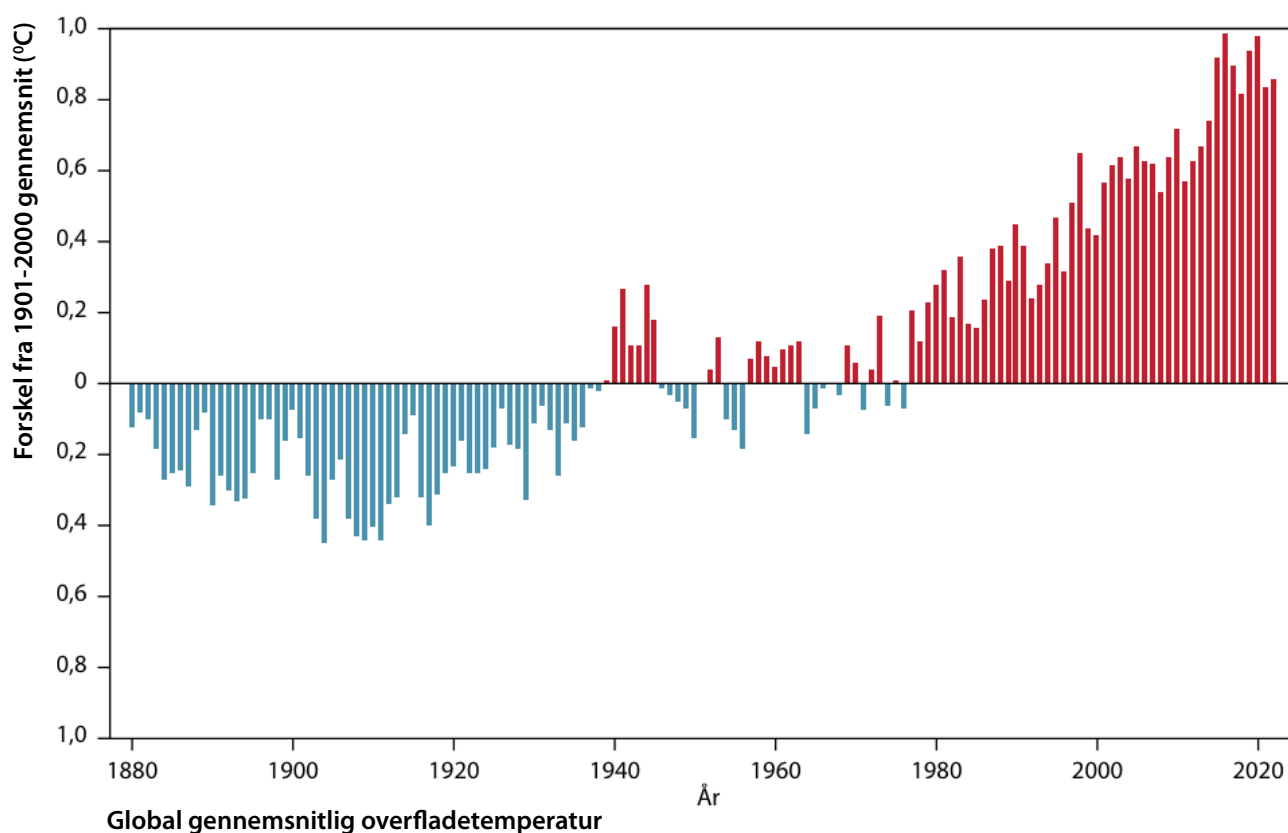
Hedebølger, langvarig tørke og oversvømmelser forårsaget af intensiv regn er udslag af, at klimaet er ved at ændre sig. Ingen enkeltstående vejsituationer uanset, hvor ekstrem den er, kan bruges til at konkludere, at klimaet har forandret sig. Det skyldes, at vejr og klima ikke hænger direkte sammen. Vejret er en beskrivelse af fx temperatur, lufttryk, skydække og andre egenskaber i atmosfæren et givet øjeblik. Vejret kan skifte fra time til time og fra minut til minut, men også i løbet af et år. Man kan også sammenligne vejret mellem sæsoner eller mellem år. Som regel vil vejret variere i forhold til et gennemsnit, men stadig falde indenfor klimanormalen, som er den variation, man må forvente, baseret på den observerede variation gennem mange årtier. Andre år kan vejret afvige så meget



↑ En særlig effekt, der har stor betydning i Arktis, er albedoeffekten. Albedoeffekten handler om evnen til

fra gennemsnittet, at der er tale om anomalier [en undtagelse fra det normale]. Der kan i disse tilfælde både være tale om kortvarige udsving og om langvarige egentlige afvigelser. Eksempler på sådanne korte udsving kan i Arktis være voldsomt snefald om sommeren eller usædvanlige varmeperioder om vinteren. At tage højde for ekstreme og usædvanlige vejr-situationer er vigtigt for at forstå hele billedet af, hvordan klimaet er på en bestemt lokalitet.

Det er oplagt at bestemme en "global temperatur" som en slags gennemsnittemperatur for hele Jorden (Figur 1). Det der almindeligvis opfattes som den globale temperatur, er gennemsnitstemperaturen nær jordoverfladen og nær havoverfladen beregnet ud fra temperaturmålinger fra en række målestationer på landjorden og havoverfladetemperaturen målt fra bøger på havet og fra skibe.



Figur 1. Variationer i den globale gennemsnitlige overfladetemperatur (over både land og vand) i perioden 1880 til 2022. Nul-værdien angiver den gennemsnitlige temperatur i perioden 1901-2000 (den målte gennemsnitstemperatur var 13,9° C). De røde søjler viser, hvornår temperaturen var højere end gennemsnittet i perioden 1901-2000. De blå søjler viser tilsvarende, hvornår temperaturen var lavere end dette gennemsnit.

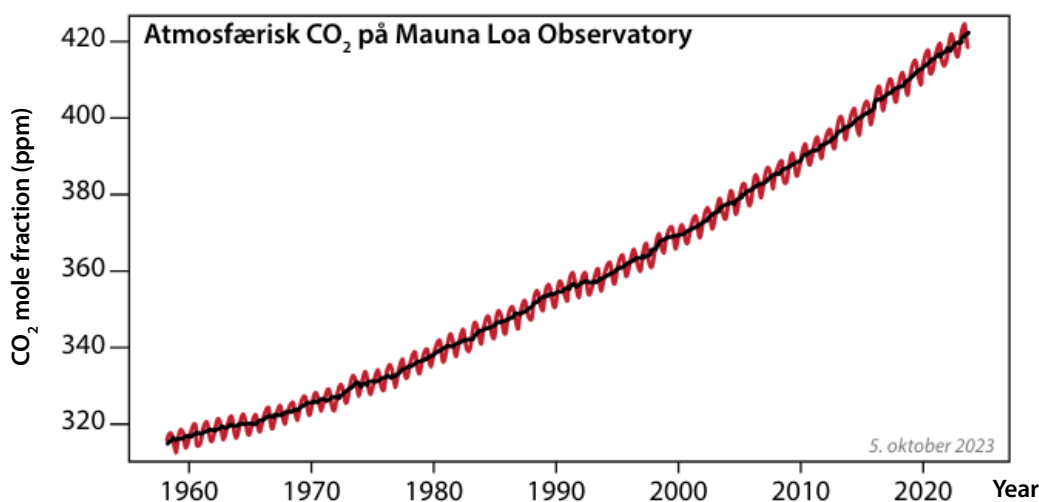
Drivhuseffekten

Der er forskellige gasser i atmosfæren. Nogle af disse gasser har lidt forsimplet forklaret samme virkning som glasset i et drivhus og varmer atmosfæren op – gasserne kaldes derfor drivhusgasser. Det synlige lys fra solen passerer næsten uhindret gennem laget af drivhusgasser og ind i atmosfæren. Når det synlige lys rammer Jorden, bliver en stor del af lyset absorberet og omdannet til varme. På den måde stiger Jordens temperatur til gavn for både planter og dyr. Jorden udsender varmestråling til atmosfæren. En del af denne varmestråling bliver absorberet af drivhusgasserne, og der bliver derfor varmere i atmosfæren – og dermed også varmere på Jorden.

Atmosfærens drivhuseffekt er summen af den naturlige drivhuseffekt og den menneskeskabte drivhuseffekt. Den naturlige drivhuseffekt er afgørende for opretholdelse af den nuværende temperatur på Jorden. Hvis den naturlige drivhuseffekt ikke fandtes, ville Jorden være mere end 30° C koldere. Uden drivhuseffekten ville det liv, vi kender i dag, slet ikke kunne eksistere. Det er altså ikke den naturlige drivhuseffekt, som skaber problemer. Derimod er det den menneskeskabte forøgelse af drivhuseffekten, som fører til en u hensigtsmæssig global opvarmning.

De vigtigste drivhusgasser er vanddamp (H_2O), kul-dioxid (CO_2) og metan (CH_4). Gassernes molekyler absorberer den langbølgede energi, som kommer fra den opvarmede Jord. Vanddamp er en drivhusgas, som forekommer naturligt, men i forbindelse med global opvarmning fokuseres der på CO_2 og metan, da det især er indholdet af disse drivhusgasser, der er forøget på grund af menneskelig aktivitet.

Som det fremgår af grafen (Figur 2), er atmosfærens indhold af CO_2 varierende hen over året (svingningerne i den røde kurve). Det kan forklares med, at planternes fotosyntese, hvor der optages CO_2 , primært foregår om sommeren. Derfor er CO_2 koncentrationen lavere i sommerhalvåret end om vinteren. Denne årlige cyklus er mere markant på den nordlige halvkugle, hvor størstedelen af landmasserne findes, og dermed foregår hovedparten af fotosyntesen her. Den sydlige halvkugle oplever også lignende variationer, men de er mindre tydelige på grund af mindre landareal. En forstærkende faktor for at CO_2 -indholdet er højere om vinteren er, at plantemateriale nedbrydes på trods af mørke og lave temperaturer, og den proces frigiver CO_2 . Samtidig er fotosynteseraten meget lavere om vinteren.



← Figur 2. Indholdet af CO_2 i atmosfæren målt på Øen Mauna Loa, Hawaii. Den røde kurve viser den årlige variation i CO_2 -indholdet, og den sorte kurve viser et løbende gennemsnit af CO_2 -målingerne. Scripps Institution of Oceanography NOAA Global Monitoring Laboratory.

Jordens og atmosfærens strålingsbalance

Jordens og atmosfærens strålingsbalance fremgår af Figur 3. Det sollys, som rammer Jordens overflade, kaldes for solindstråling, og omtales K_i (gul pil til venstre i Figur 3). En del af denne stråling sendes tilbage til atmosfæren, fordi strålerne tilbagereflekteres fra overfladen. Denne udgående stråling kaldes udgående solindstråling, og omtales K_u (gul opadgående pil i Figur 3). K_i er positiv (Jorden modtager indstrålingen og dermed energi), mens K_u er negativ (Jorden mister energi ved reflektionen af indstrålingen). Når stråling udveksles mellem atmosfæren og overfladen sker der en overførsel af energi som betegnes en flux. Denne energiflux måles i enheden W/m^2 .

Jorden og dens atmosfære modtager i gennemsnit $340 \text{ Watt per } m^2$ (W/m^2) fra solen. Af den gennemsnitlige indstråling reflekteres i gennemsnit ca. halvdelen og kun 163 W/m^2 absorberes altså ved Jordens overflade. Denne energi omsættes til varmestråling, og Jorden udsender næsten 400 W/m^2 som infrarød stråling (brune pile i Figur 3). Den infrarøde varmestråling fanges imidlertid af drivhusgasserne i den nære atmosfære (brun nedadgående pil i Figur 3). Det betyder, at energien forbliver ved jordoverfladen og varmer kloden op.

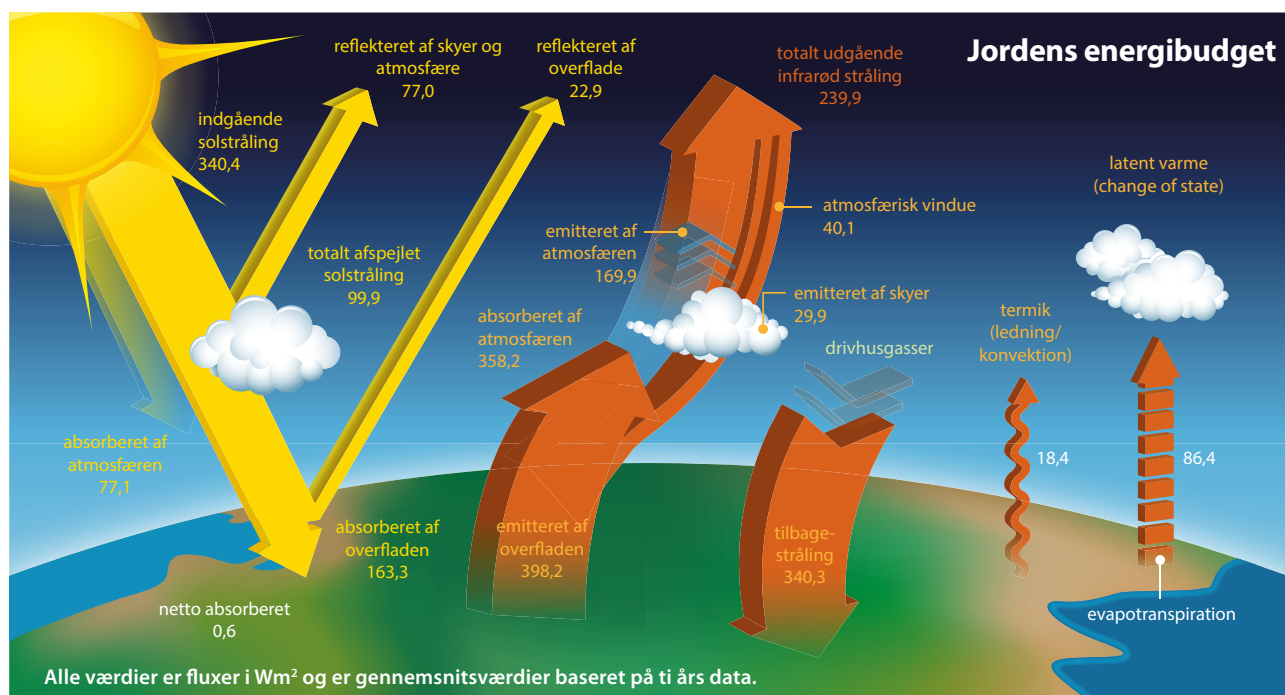
Albedo

Jordens overflade og skyerne reflekterer en del af solens stråling, og det sker, uden at denne stråling bidrager til jordens opvarmning. Denne refleksion kaldes albedo, og ordet anvendes i forbindelse med refleksion af solens stråling. Albedo kommer af det latinske ord, alba, som betyder hvid. Hvide overflader reflekterer mest stråling, mens sorte overflader optager mere stråling end de reflekterer. For en kridhvid overflade, der reflekterer alt lys, er albedoen 1 (indstråling = udstråling, dvs. 100 %) og intet af den kortbølgede indstråling bliver absorberet af overfladen. En overflades albedo udregnes ved:

$$a = \frac{K_u}{K_i}$$

Når jorden er snedækket, bliver størstedelen af den kortbølgede indstråling reflekteret, hvorimod en isfri havoverflade og bar/våd jord absorberer en meget stor del (dvs. albedoen bliver lav og tæt på 0). Vi mennesker påvirker Jordens albedo ved f.eks. at bygge huse med mørke overflader/tage og anlægge veje. Fx har asfalt en mørk overflade, og da der kun tilbagereflekteres lidt af den indkomne stråling, så absorberes meget af strålingsenergien. Dette kan man tydeligt mærke om sommeren, hvor asfalt bliver meget varm.

↓ Figur 3. Jordens energibudget, der viser den globale balance mellem solenergi, der når Jorden, og den energi, der forlader Jorden.



Energibalancen

Energibalancen består af nettostrålingen (R_n), latent varme, sensibel varme og varme i jorden. Latent varme er varme, der frigives, når en fase ændres. Dette kan fx være når vand i jorden fordampes, men temperaturen forbliver den samme. Sensibel varme er, når der sker en temperaturændring. Dette kan fx være, når jorden opvarmes, fordi en masse energi fra solen absorberes, men ikke nok energi modtages til at fordampe vandet væk fra jorden, og derfor i stedet kun varme jorden op.

Det bruges til at forstå, hvor solens overskudenergi bliver benyttet.

Energibalancen ved jordoverfladen opstilles ud fra følgende:

$$R_n + E + H + B = 0$$

hvor R_n er nettostrålingen, E er den latente varme-transport ved fordampning/kondensation, H er den frie varmetransport til og fra atmosfæren (sensibel varme), og B er jordvarmetransport. Energi, der strømmer mod overfladen, vil være positiv, mens energien, der forlader overfladen, betragtes som negativ.

2.4 Klimaændringer og global opvarmning

Global opvarmning er en del af klimaforandringerne, men klimaforandringer inkluderer også andre aspekter af klimasystemet, såsom ændringer i hav-

niveauer, isdække, ekstremt vejr, og havstrømme. Klimaforandringer kan enten have naturlige årsager eller være skabt af menneskelig aktivitet. Naturlige årsager kan være varierende solaktivitet og vulkanudbrud, som kan føre til store temperaturudsving i atmosfæren. Sådanne temperaturudsving betegnes som naturlige klimavariationer.

Global opvarmning refererer primært til stigningen i den gennemsnitlige overfladetemperatur på Jorden, som er resultatet af en ændring i strålingsbalancen og er primært forbundet med øget koncentration af drivhusgasser i atmosfæren som følge af menneskelige aktiviteter. En stigning i atmosfærens indhold af drivhusgasser forøger optagelsen af infrarød stråling fra Jorden. Derfor stiger den globale temperatur.

Den største del af de temperaturstigninger, der er målt de seneste 100 år, er et resultat af stigende udledning af drivhusgasserne CO_2 , metan og lattergas (N_2O). Stigningerne er forårsaget af forskellige former for menneskelig aktivitet, de mest markante er afbrænding af fossile brændstoffer, skovrydning og en intensiveret landbrugsdrift.

Temperaturstigninger betyder at sne og is smelter. Der bliver derfor fritlagt nye områder med lav albedo (brun jord, isfrit hav), og klodens samlede overfladealbedo falder. Dette kaldes for isalbedo-feedback og er en proces som forstærker opvarmningen i Arktis.

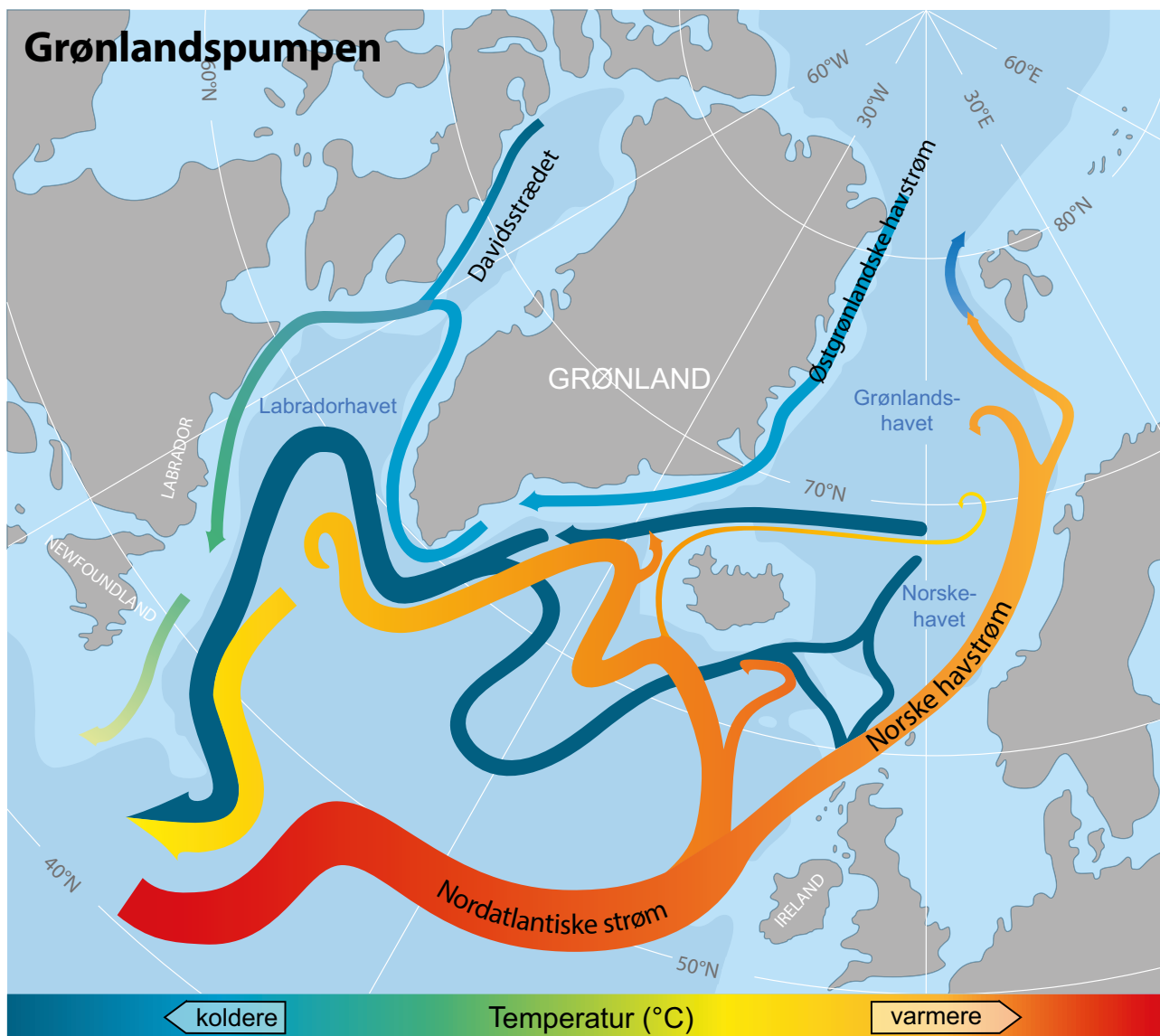


Siden 1850 har mennesket udledt en stigende mængde CO_2 til atmosfæren fra afbrænding af fossile brændstoffer, cementproduktion og ændringer i arealanvendelsen (fx afbrænding af skove, dræning og opdyrkning). Det har resulteret i en tilførsel af CO_2 til atmosfæren og dermed en yderligere opvarmning af Jorden. På 150 år er CO_2 indholdet i atmosfæren steget lige så meget, som det steg i løbet af 8.000 år under overgangen fra sidste istid til den nuværende mellemistid.

Mens temperaturen i de sidste 50 år i gennemsnit er steget med omkring 1°C globalt set (Figur 1), er den i Arktis steget hele 3°C . Som det desuden kan ses på Figur 6, så oplever Arktis også større temperaturafvigelser fra den normale temperatur i forhold til

↑ Når permafrosten smelter i Arktis, frigives drivhusgasser som metan fra jorden, der tidligere var permanent frossen. Dette øger den globale opvarmning yderligere, da metan er en effektiv drivhusgas.

den globale skala. Disse afvigelser stiger mere og mere, som tiden går. I løbet af de sidste årtier har den globale opvarmning ført til øget afsmeltning fra iskapper og gletsjere, kortere periode med snedække og mindre tykkelse af snelaget, mindre havis samt varmere permafrosttemperaturer i Arktis. Ændringer i det arktiske klima er vigtige, fordi Arktis sammen med polare områder fungerer som et køleskab for resten af verden - det hjælper med at afkøle planeten. Derfor kan ændringer i det arktiske klima påvirke klimaet i resten af verden.



Grønlandspumpen

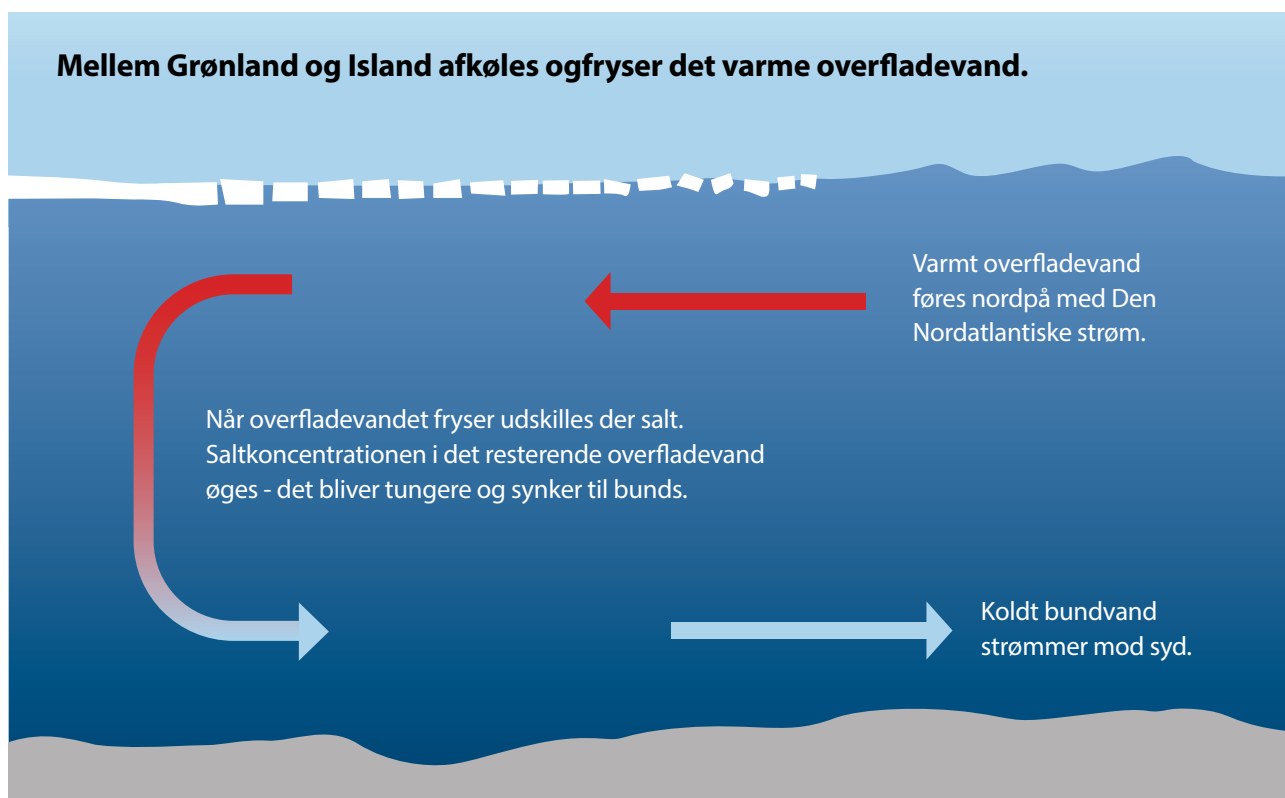
Fluktuationer[?] i klimaet hænger sammen med forandringer i bevægelserne af havstrømmene i Nordatlanten (Figur 4). Cirkulationsmønstret kan se ud på flere forskellige måder. Varmt overfladevand transporteres fra Atlanterhavets tropiske områder op til Nordeuropa af Golfstrømmens nordlige gren, kaldet den Nordatlantiske Strøm.

Vinde og densitetsforskelle er med til at drive oceanernes havstrømme. Mens vindene påvirker og bevæger overfladevandet, er densitetsforskellene mellem fx salt- og ferskvand og mellem koldt og varmt vand med til at føre vand fra havoverfladen ned mod havbunden. Disse lodrette og vandrette vandbevægelser er fremtrædende i Atlanterhavet.

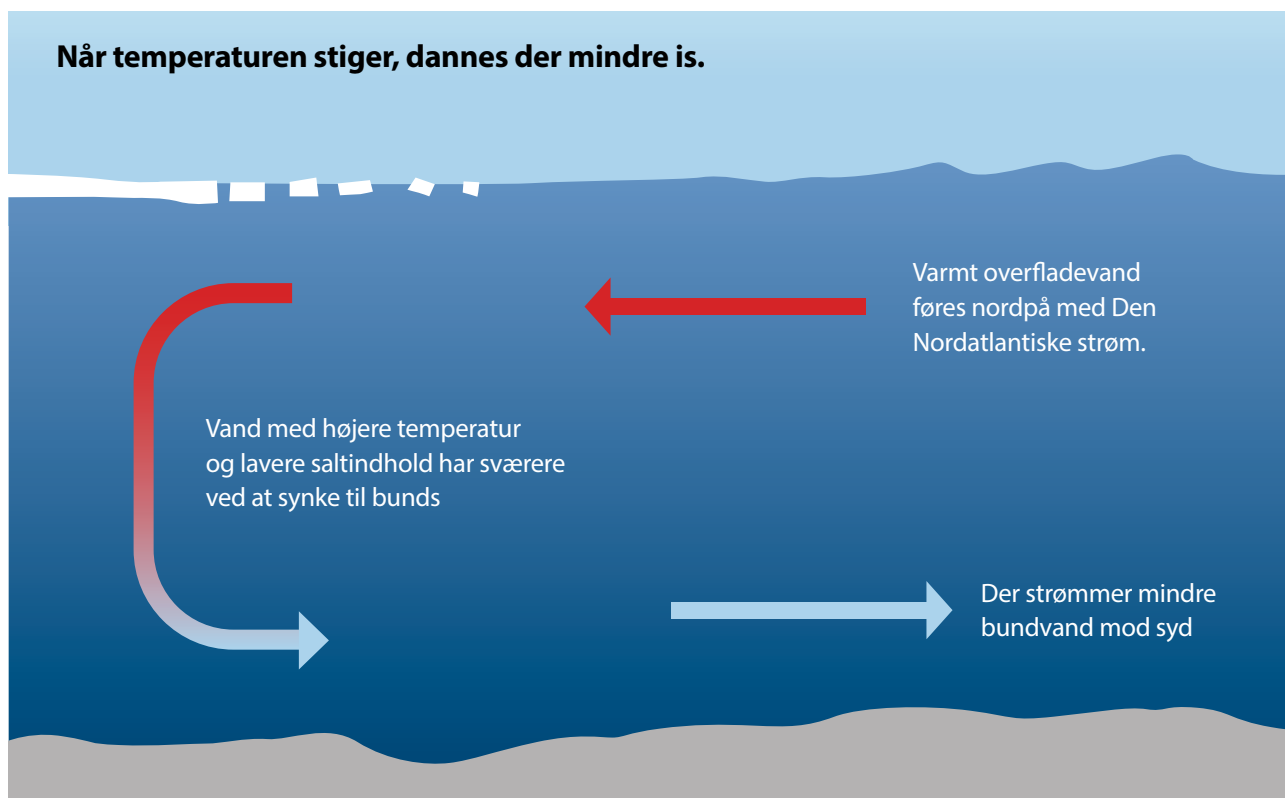
Men i området mellem Østgrønland og Island sker en dannelse af dybvand, som sker på grund af havvand sydfra med højt saltindhold, afkøles og synker derfor dybt (Figur 5). Efter nedsynkningen mod bunden returnerer havvandet sydover i stor dybde som en kold vandmasse. Der følger dermed det som kaldes en termohalin cirkulation. Dette omtales som den termohaline cirkulation, fordi temperatur og saltindhold sammen bestemmer massefylden for havvandet, som derfra giver mulighed for bevægelse både lodret i en vandsøjle[?] og vandret i havet med havstrømmene. Det er altså denne nedsynkning af vand mellem Østgrønland og Island, som omtales som Grønlandspumpen.

A

Mellem Grønland og Island afkøles og fryser det varme overfladevand.

**B**

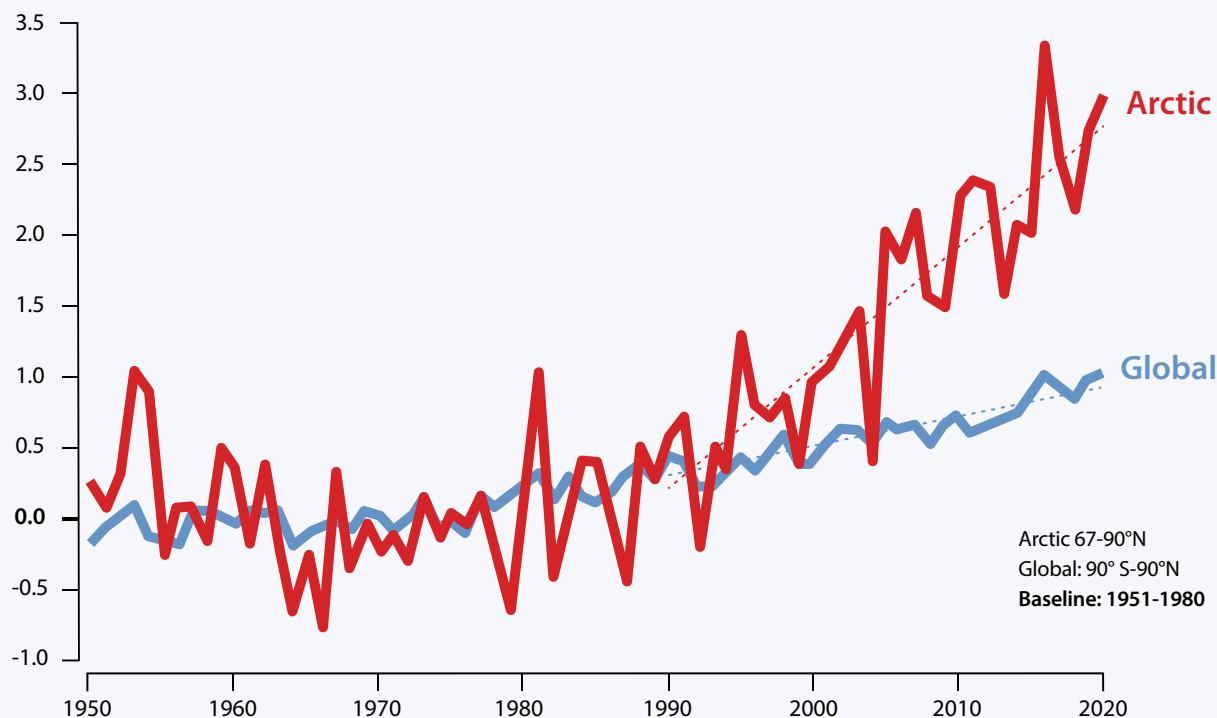
Når temperaturen stiger, dannes der mindre is.



↑ Figur 5: Grønlandspumpen drives af densitetsforskelle der skyldes forskelle i temperatur og saltholdighed. Top (A): Den normale tilstand. Bund (B): svækket tilstand som følge af stigende havtemperaturer.

Arktisk amplifikation

Årlige ændringer i gennemsnitlig overfladetemperatur (°C)



↑ Figur 6: Arktisk amplifikation betyder, at temperaturen stiger hurtigere i Arktis, end den gør i områder længere sydpå. Dette kan forstærke klimaopvarmningen i resten af verden. Årlige gennemsnitlige overfladelufttemperaturanomalier for Arktis (rød linje) og det globale gennemsnit (blå) fra 1950 til 2020. Lineære trendlinjer (stiplet) er også vist over perioden 1990 til 2020. Zachary Labe (@ZLabe).

Den globale opvarmning fører større mængder fersk smeltevand til havet i takt med, at is smelter, og mere ferskvand i det arktiske område forstyrrer den atlantiske havcirkulation^②. Det skyldes til dels, at densitetsforskellen bliver formindsket, og dels at ferskvand kan lægge sig som et lag med lav densitet i havoverfladen. Resultatet bliver, at havstrømmene aftager i styrke, og Grønlandspumpen svækkes.

Feedback mekanismer

Den globale opvarmning er som nævnt ovenfor ikke ligeligt fordelt på kloden. I Arktis er opvarmningen op mod fire gange så kraftig som på kloden som helhed (Figur 6). Dette skyldes et fænomen som hedder arktisk amplifikation^②. I klimasystemet skyldes dette fænomen frem for alt effekten af, at sne og havis mindskes i udbredelse, og dermed absorberer jordoverfladen mere af den energi, som kommer fra solen

i stedet for at sende den tilbage fra de hvide overflader med en høj albedo (se ovenfor og Figur 3).

Når isen smelter medfører det, at mere solstråling absorberes, hvilket øger temperaturen på jorden eller i havet. Dette resulterer i, at endnu mere sne og is smelter. Dette fænomen kaldes en feedbackmekanisme i klimasystemet. Man taler om en "positiv" feedbackmekanisme, fordi den forstærker den proces, den er en del af – nemlig at det bliver varmere og varmere.

Der findes andre feedbackmekanismer, som kan have speciel betydning i Arktis. Drivhusgasser frigives fra tøende økosystemer og specielt metanudslip kan forstærke opvarmningen, fordi metan er en meget effektiv drivhusgas. Når opvarmningen resulterer i, at fugtig jord med organisk indhold (dødt plantemateriale), som før var frossen året rundt, begynder



↑ En særlig effekt, der har stor betydning i Arktis, er albedoeffekten. Albedoeffekten handler om evnen til at reflektere Solens stråler. Lyse overflader med sne og is reflekterer meget lys og solenergi og har en høj albedo.

at tøj, så frigives metan. Dette kan øge opvarmningen yderligere, og vil derfor være en positiv feedback-mekanisme, fordi opvarmningen stiger.

På grund af forskellige positive feedback-mekanismer er Arktis ekstremt sårbart over for de forventede klimaændringer. Det er sandsynligt, at de arktiske økosystemer vil reagere hurtigere og mere alvorligt på ændringerne end andre steder på Jorden.

Der findes også negative feedbackmekanismer, som fungerer som en stabiliserende kraft i systemet, og derfor formindsker omfanget af en ændring. Fx fordampes der mere vand til atmosfæren ved den globale opvarmning. Denne større mængde vanddamp i atmosfæren forstærker den globale opvarmning mere, fordi drivhuseffekten eksisterer. Denne proces er en positiv tilbagekoblingsmekanisme, MEN den kan også starte en negativ feedbackmekanisme. Hvis vanddampen øger antallet af skyer, så kan disse afbøje sollyset, så strålingen kommer direkte tilbage til atmosfæren, før den rammer Jorden, og dermed formindsker temperaturstigningen.

Forudsigelser om fremtiden

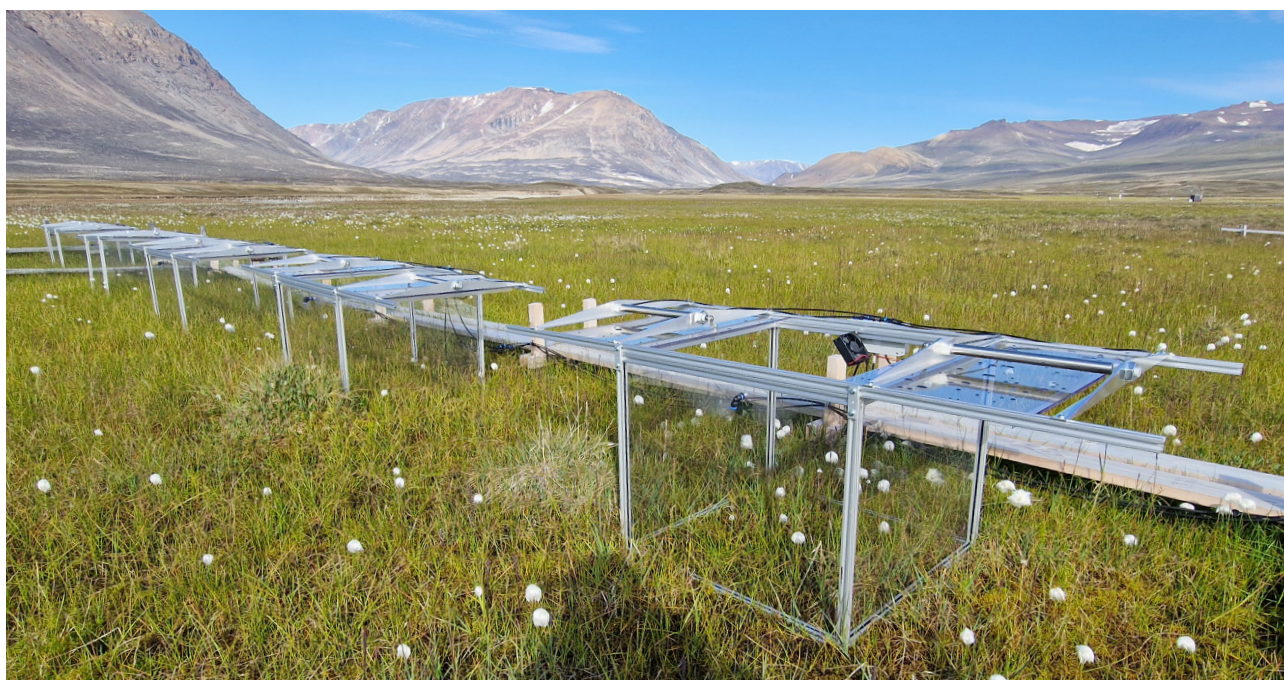
Ifølge klimamodellerne fortsætter klimaændringerne med at forvandle Arktis til en varmere, mindre frossen og mere usikker fremtid. Ifølge de fleste forudsigelser vil Arktis være isfri i sommermånederne inden 2050,

også selvom den menneskeskabte udledning af drivhusgasser formindskes. Der har været store forhåbninger til, at man kunne begrænse den globale opvarmning til 1,5°C blandt andet gennem at efterleve internationale klimaaftaler. Forskningen siger, at der er behov for drastiske udledningsreduktioner i dette årti for at holde den globale opvarmning på maksimalt 1,5°C, men dette er formentlig ikke længere realistisk.

I Arktis forventes opvarmningen at blive endnu stærkere, og der er ingen tvivl om, at alle dele af de nordlige økosystemer kommer til at forandres i de kommende årtier.

Vejret i Grønland er en funktion af det arktiske klima og er derfor under forandring. Som en konsekvens af klimaets forandring vil de vejrforhold, vi kender i dag se anderledes ud om nogle årtier. Grønland er derfor centralt placeret i mange studier af klimaets udvikling, blandt andet på grund af de globale opvarmningskonsekvenser for snedækket, indlandsisen, og havisudbredelsen i havene, som omgiver Grønland. Men Grønland rummer også økosystemer, som konstant tilpasser sig de ændrede klimaforhold. Dette handler de kommende kapitler om.

↓ Automatiske kamre måler på udledningen og optaget af drivhusgasserne CO_2 og CH_4 (metan) i de Grønlandske økosystemer.





TAG MED I RYGSÆKKEN:



1. Mængden af kuldioxid i atmosfæren er steget betragteligt gennem de sidste 60 år.
2. Atmosfærens drivhuseffekt er summen af den naturlige drivhuseffekt og den menneskeskabte drivhuseffekt.
3. Jordens overflade og skyerne reflekterer en del af solens stråler, og det sker uden, at denne stråling bidrager til Jordens opvarmning – denne refleksion kaldes albedo.
4. Den globale opvarmning er resultatet af en forandring i strålingsbalancen. En stigning i atmosfærens indhold af drivhusgasser øger optaget af infrarød stråling fra Jorden.
5. Den største del af de temperaturstigninger, der er målt de seneste 100 år, er et resultat af stigende udledning af drivhusgasserne kuldioxid, metan og lattergas.
6. Den stadig stigende temperatur vil svække Grønlandspumpen.
7. Arktis opvarmes op mod fire gange så hurtigt som klodens gennemsnit, hvilket skyldes en forstærkning på grund af ændringer i albedo, når sne og is smelter.
8. De stigende temperaturer i Arktis forventes også at resultere i isfrie forhold i det Arktiske Hav om sommeren allerede i 2050.