

# NATURVIDENSKAB FOR ALLE



## ISKERNER – VINDUE TIL FORTIDENS KLIMA

Gennem flere hundrede tusinde år er snelag efter snelag faldet på de store iskapper på Grønland og Antarktis. Lagene smelter ikke, men skubbes ned i iskappen, mens de gradvist bliver tyndere. Sneens sammensætning samt urenheder og luftbobler i isen indeholder oplysninger om klimaet, og forskere borer derfor gennem iskapperne for at skaffe isprøver, der kan give oplysninger om fortidens klimaudvikling og hjælpe os med at forstå, hvordan klimaet vil udvikle sig i fremtiden.

## ISARKIV – et netsted, der supplerer dette hæfte

ISARKIV – [www.isarkiv.dk](http://www.isarkiv.dk) – er et netsted om iskerne- og klimaforskning, der i indhold og fagligt niveau passer godt sammen med materialet i dette hæfte.

Indholdet på ISARKIV er opdelt i

- **2 Cases**, der er lange, strukturrede forløb. Case 1 handler om datering, dvs. hvordan man kan bestemme alderen af lagene i iskernen og dermed finde ud af, hvordan klimaet var i en given tidsperiode. Case 2 leder dig igennem et halvt århundredes historie om iskerneforskningen, og fortæller hvordan iskerneerne gradvist har øget vores viden om fortidens klima.
- **Temaer**, der omhandler enkelt-emner struktureret i selvstændige og afrundede forløb. Et af temaerne omhandler fx istidernes kommen og gåen.
- **Inforummet**, der er et slags minileksikon med korte forklaringer og henvisninger til andre kilder.

I de tilfælde, hvor emnerne i dette hæfte er uddybet på ISARKIV eller illustreret med animationer eller interaktive modeller, er det markeret med

en lille boks i marginen.

ISARKIV er åbent for alle med eller uden login. Hvis du logger ind, husker ISARKIV hvor du er kommet til, så du kan fortsætte senere, evt. fra en anden computer. Den eneste tekniske forudsætning er en computer med netadgang, en browser med Flash-afspiller installeret, og en skærmopløsning på mindst 1024 · 768 pixel. Højtalere er en fordel, men ikke et krav.

ISARKIV er udviklet i et samarbejde mellem Dansk Polarcenter (under Forsknings- og Innovationsstyrelsen) og Center for Is og Klima ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet.

### Læs mere hos

Center for Is og Klima er et grundforskningscenter ved Niels Bohr Institutet på Københavns Universitet.

Forskere herfra har i mere end 40 år udgjort en af verdens ledende forskningsgrupper inden for boring og analyse af iskerner.

Centerets hjemmeside går mere i dybden med mange af de emner, der præsenteres i dette hæfte.



Der er også mulighed for at stille spørgsmål om is- og klimarelaterede emner.

Besøg [www.isogklima.dk](http://www.isogklima.dk)

# Iskerner og klimaændringer

At menneskeheden kan have afgørende indflydelse på Jordens klima, er en erkendelse, der har fået fodfæste i løbet af de sidste årtier. I samme periode er forskere over hele verden for alvor begyndt at indsamle vejr- og klimadata fra alle dele af Jorden. Disse data har været til stor hjælp for forståelsen af nutidens klima, men de rækker ofte kun årtier eller få århundreder tilbage i tiden og stammer fra vores nuværende ret stabile klimaperiode, hvor menneskeheden påvirkning af klimaet gradvist er vokset. Studier af iskerner har ikke den samme begrænsning – iskerner, hentet fra de kilometer-tykkede iskapper på Grønland og Antarktis, indeholder information om klimaet flere hundrede tusinder år tilbage i tiden, og gør det derfor muligt at studere Jordens variable klima gennem fortidens istider og mellemistider i perioder garanteret uden menneskelig indflydelse.

Ideen med at bruge iskerner som et arkiv over fortidens klima opstod i midten af 1960'erne, da amerikanske ingeniørtropper som de første borede gennem en iskappe ved Camp Century-lejren i Nordvestgrønland. Iskernen, der var 1372 meter lang, indeholdt lag af nedbør fra de foregående årtusinder. Den blev ikke boret for at lave undersøgelser af klimaet, men for at undersøge egenskaberne af isen i Indlandsisens indre.

Den danske professor Willi Dansgaard havde allerede i 1950'erne fået den idé, at man ud fra målinger af isotop-sammensætningen af gamle islag kunne bestemme fortidens temperaturer omkring Grønland. Willi Dansgaard fik lov til at prøve sin metode på lagene i Camp Century-iskernen, og kunne snart efter fremvise en detaljeret kurve over de sidste 100.000 års temperaturvariationer. Siden da har metoderne til både boring og analyse af iskerner udviklet sig voldsomt, men grundlaget er stadig det samme: en kilometerlang cylinderformet stang bestående af årtusinders sne udbores fra en iskappe og aftvinges informationer om, hvordan klimaet har skiftet på både kort og lang skala. I iskernerne kan vi nemlig både se, hvordan bratte klimaændringer tidligere er slået igennem på få år, og hvordan istider og mellemistider har vekslet over årtusinder.

Dette hæfte beskriver hvordan iskerner bores, hvilke målinger forskerne foretager på iskernerne, og nogle af de vigtigste konklusioner, forskerne har draget fra undersøgelserne af iskerner fra både Grønland og Antarktis. Og historien slutter ikke her: danske forskere er den dag i dag i front både når det gælder udvikling af teknologi til boring af iskerner, og når det gælder om at afkode den klimahistorie, iskernerne gemmer på.



Willi Dansgaard i gang med at pakke en iskerne.

## Lær mere

Historien om de første årtiers danske iskerneforskning kan læses på

[isogklima.dk/nfa-historie](http://isogklima.dk/nfa-historie)

ISARKIV-casen "Klimaanalyser" fortæller om den historiske udvikling fra Camp Century-boringen og frem til NEEM-boreprojektet, der startede i 2007.



Nordvestgrønland og placeringen af Camp Century-basen, Thule-basen og andre lokaliteter.



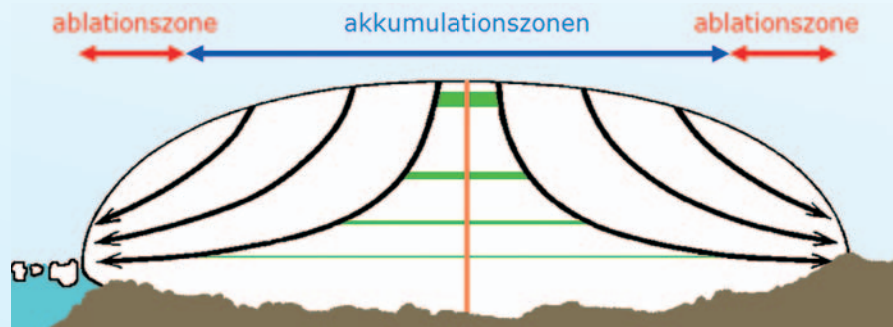
Iskerneboredstyret monteret i en ishule i Camp Century-lejren.

# De dynamiske iskapper

Temperaturen kommer aldrig over frysepunktet på de indre dele af Grønlands og Antarktisk' iskapper, så sneen smelter aldrig. Ved iskanten mister iskappen derimod meget mere is, end der tilføres som nedbør, men alligevel er iskappens form nogenlunde konstant. Dette skyldes at is flyder, så is-overskuddet fra iskappens indre dele – *akkumulationszonen* – langsomt flyder mod isranden hvor det brækker af som isbjerge eller smelter væk – *ablationszonerne*.

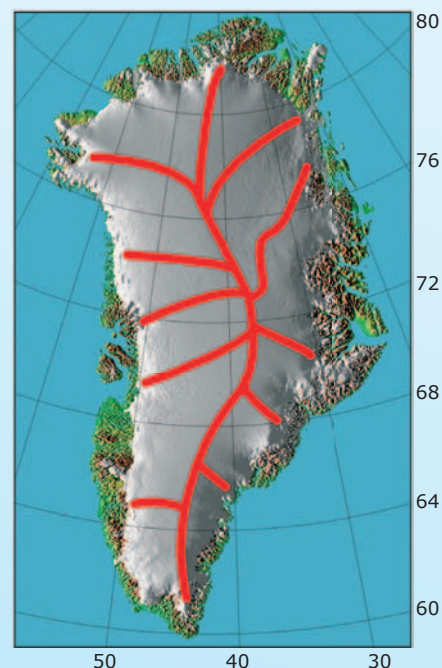
De enkelte snelag dækkes af de efterfølgende års sne og omformes til is i løbet af nogle hundrede år. I cirka 80 meters dybde er sneen presset sammen til is, der ikke kan sammenpresses yderligere, men under trykket fra de overliggende ismasser flyder isen, så de oprindelige lag bliver tyndere og flyder mod isranden, hvor isen smelter eller brækker af som isbjerge.

Når forskere borer iskerner, er de interesserede i at få islag, der går så langt tilbage i tiden som muligt og samtidig islag, der oprindeligt faldt som sne så tæt på borestedet som muligt. Det er nemmere at fortolke

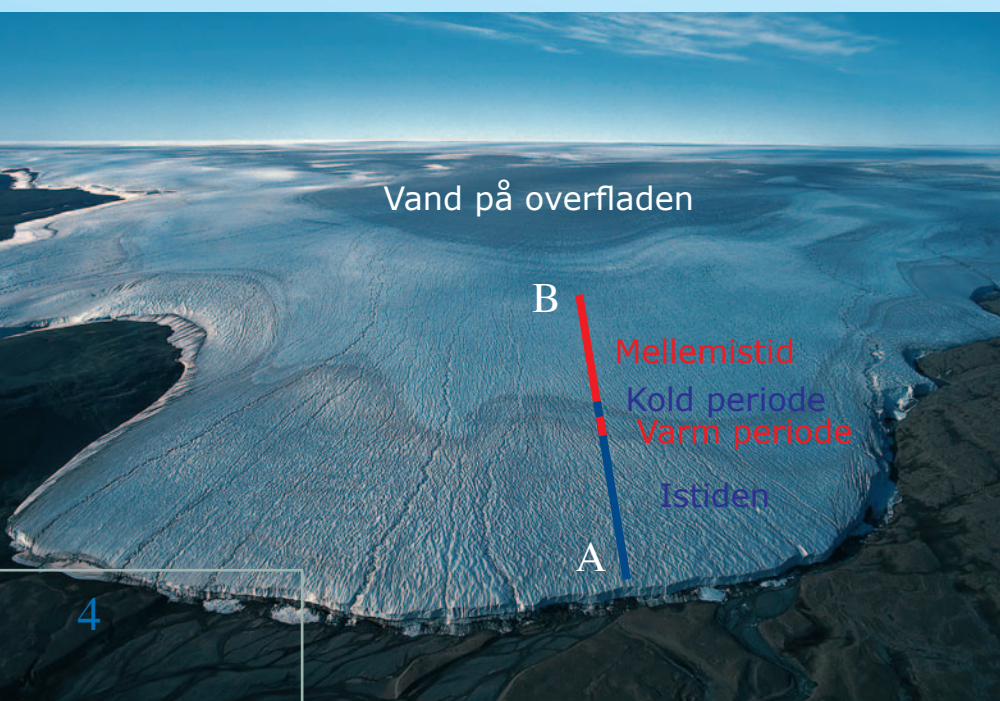


resultaterne, hvis alle lagene i iskernen er dannet på cirka samme geografiske sted. Af denne grund er det bedst at bore iskerner på midten af iskappen, nær den linje der markerer grænsen mellem de dele, der flyder mod henholdsvis højre og venstre på tegningen. Denne linje hedder isdeleren og opdeler iskappen i områder, der dræner i hvert sit havområde. Kortet viser isdelerne på Grønlands Indlandsis. Da isen er tykkest midt på Grønland, er der her også flere islag, så de bedste boresteder ligger langs den centrale isdeler.

Den is, der har flydt fra midten af isen og kommer ud tættest på isranden, har været længe undervejs, og er derfor meget gammel ("A" på figuren). Når man bevæger sig ind over isranden mod "B", bliver isen



yngre. Dette kan observeres direkte særlige steder langs randen af Indlandsisen, fx på billedet til venstre af isranden i Nordøstgrønland, ca. 80°N. Isens farveforskelle nær randen skyldes, at atmosfæren var tørrere og mere beskidt under istiden, og at der derfor er flere urenheder i istidsis end i is fra en mellemistid. Man kan på isens farveskift se, at istiden sluttede med en svingning, hvor det først blev varmt (lys, ren is), så blev det koldt igen (mørk, beskidt is), før vores nuværende mellemistid startede. Farveskiftet længere inde på isen skyldes i øvrigt ikke klimaforskelle, men at der er smeltevand på overfladen.



# Isens struktur og flydeegenskaber

En iskappe består af polykrystallinsk is, hvilket betyder at isen er opbygget af mange iskrystaller, der ligger tæt sammen. I hver iskrystal ligger vandmolekylerne ordnet i sekskanter i lag, der kaldes basalplaner. Det er den regelmæssige sekskantstruktur i basalplanerne, der er årsag til at iskrystaller i snefnug har seks "arme".

Billederne til højre viser iskrystallens gitterstruktur. I basalplanet (set ovenfra på øverste billede) er iltatomerne (sorte og blå kugler) bundet i sekskanter med hydrogenbindinger. Vinklen mellem de to H–O bindinger i hvert vandmolekyle er mindre end de  $120^\circ$ , der er hjørnevinklen i en plan sekskant, og et basalplan er derfor ikke helt fladt, men består af to lidt forskudte lag (hhv. blå og sorte kugler). Lagene er forskudt knap 0,1 nm, mens afstanden mellem to basalplaner, der ligeledes holdes sammen af hydrogenbindinger, er ca. 0,28 nm. Det nederste billede viser to basalplaner set fra siden.

## Krystallerne vokser

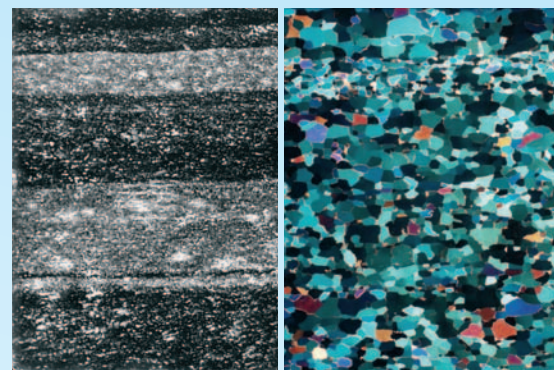
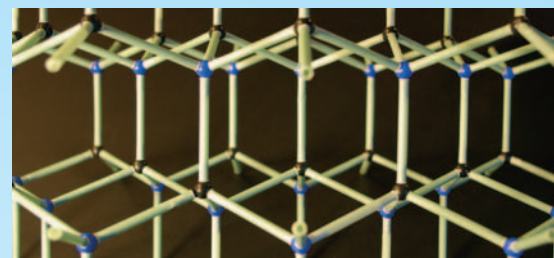
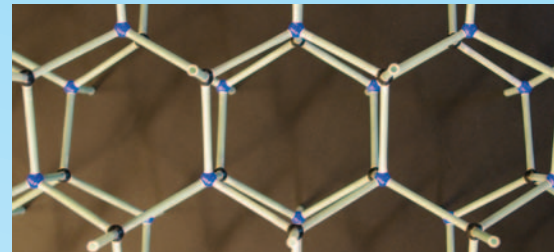
I iskappens øvre lag vokser iskrystallerne gradvist ved at store krystaller opsuger mindre krystaller. Dette modvirkes af isens deformation, der får store krystaller til at bryde op i mindre krystaller. I iskappens øvre lag i de områder, hvor der ikke er smeltning, er krystallerne i millimeterstørrelsen, mens krystaller kan blive op til en meter store i de dybeste dele af den antarktiske iskappe, hvor varme fra undergrunden gør krystalvæksten hurtigere. Isens indhold af urenheder har også indvirkning på krystalstørrelsen, da urenhederne forstyrrer den velordnede gitterstruktur.

Når isen deformeres i iskappens indre, glider basalplanerne i forhold til hinanden ligesom kortene i en bunke spillekort. En iskrystal er derfor meget hård (dvs. svær at deformere) hvis man trykker vinkelret på basalplanerne, mens den er nem at deformere hvis basalplanerne får lov til at glide i forhold til hinanden.

Forskerne bruger computermodeller til at beskrive, hvordan isen bevæger sig og deformeres i iskappens indre. Det er små trykforskelle, skabt af iskappens overfladehældning, der driver isens deformation og bevægelse mod isranden. Men fordi isens hårdhed afhænger af både størrelsen af de enkelte krystaller og retningen af basalplanerne, er det en stor og vanskelig opgave at beskrive isens indre dynamik præcist.

## Læs mere

om krystalanalyse på [isogklima.dk/nfa-krystal](http://isogklima.dk/nfa-krystal)



Til venstre vises de synlige lag i en isprøve, der er ca. 6 x 8 cm stor. De mørke områder er klar is (med bobler), mens de lysere lag er hvidlige bånd, der skyldes øget støvindhold. Til højre ses den tilsvarende prøve placeret mellem to krydsede polarisationsfiltre. Herved får de enkelte iskrystaller en farve, afhængig af basalplanernes retning, der på denne måde kan bestemmes. Det kan ses, at krystallerne er mindre i de områder, hvor der er mest støv i isen. Undersøgelser som denne hjælper iskerneforskere med at forstå, hvordan iskappeis er opbygget, og hvordan isen deformeres.

# Iskerneforskning i Grønland

Iskerneboringerne skal som beskrevet helst ske inde på midten af Indlandsisen, hvor isen er tykkest og de ældste islag findes. Men vejrforholdene kan være barske på toppen af isen, og selvom de fleste iskerneprojekter kun foregår om sommeren, stiller forholdene store krav til udrustning og planlægning.



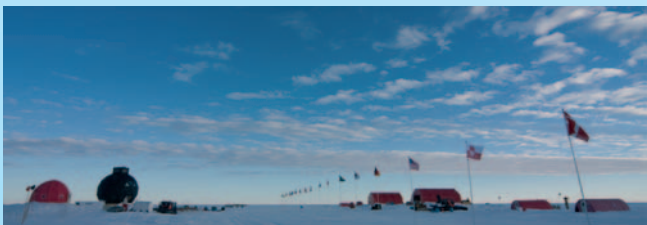
## Logistik

Udstyr og feltdeltagere flyver med SAS eller Air Greenland til Kangerlussuaq på Grønlands vestkyst. Her ligger projektets feltkontor, der er bindeled mellem lejren og resten af verden. Her findes også et lager af feltudstyr, men den virkelige attraktion er luft-havnen, der er Grønlands bedste rent vejrmæssigt.



## Transport til lejren

Fra Kangerlussuaq flyves med chartrede amerikanske Hercules-flyvemaskiner til lejren. De er som noget helt særligt udstyret med ski og hjælperaketter, der gør det muligt at lande og lette på sneen. Et fly kan medbringe op til 12 ton nyttelast pr. flyvning, og passagerne sidder i netsæder langs flyets side, mens lasten står i midten.



## Lejren

Efter landing åbnes lastrampen, og pallerne med gods skubbes ud, mens flyet stadig er i bevægelse. Man går ud af flyet og blændes efter at have siddet et par timer i flyets tussmørke. Flyet lastes og tager af sted igen så hurtigt som muligt. Feltdeltagerne bor i kraftige telte (til højre), og hovedbygningen er den kugleformede main dome, der indeholder køkken, stue, toiletter, bad og kontor. Desuden er der telte til garage, lager og værksteder.



## Arbejdet

Iskerner skal helst opbevares ved  $-20^{\circ}\text{C}$  eller koldere, så både boring og målearbejde foregår under sneen i haller, der laves med en sneblæser. Her er temperaturen konstant lav, og det er også en økonomisk måde at bygge på, da man kun skal medbringe materialer til tagkonstruktionen.



## Fest og farver

Alle i lejren arbejder  $6\frac{1}{2}$  dage om ugen, nogle gange i 2- eller 3-holdsskift, men lørdag eftermiddag stopper arbejdet kl. 16, og alle går i bad og begynder at forberede den store lørdagsmiddag, der ofte starter med en fælles aktivitet udenfor. Lørdagsfesten er vigtig, fordi alle i lejren uanset arbejdsområde og nationalitet fester sammen, og fordi markeringen af ugens afslutning hjælper på tidsfølelsen, der er påvirket af, at Solen aldrig går ned i løbet af de 3-4 måneder, feltsæsonen varer.

Der er boret gennem Grønlands Indlandsis 5 gange, og dertil kommer et stort antal iskerner, der kun er trængt gennem Indlandsisens øvre lag, samt iskerner gennem mindre iskapper på Grønland.

### 1966: Camp Century

1391 m, US Army. Den første iskerneboring gennem Indlandsisen. Selve iskernen er af begrænset værdi, da den er boret for tæt på randen og blev beskadiget under boring og opbevaring.

### ca. 2011, NEEM

North Greenland Eemian Ice Drilling (NEEM), 2500–2600 m, international. Bores ligesom NGRIP for at skaffe is fra Eem-tiden, og nye radarmålinger har vist at stedet er velegnet hertil. Lejren blev anlagt i 2007–8, boringen starter for alvor i 2009 og forventes afsluttet ca. 2011.

### 2003: NGRIP

North Greenland Ice Core Project (NGRIP, NorthGRIP eller NordGRIP) 3090 m, international. Stedet blev valgt for at skaffe is fra sidste mellemistid, Eem-tiden, der er særlig interessant fordi klimaet i Eem-tiden minder en del om fremtidens forventede klima. Dette lykkedes kun delvist, da isen i dette område smelter nedefra på grund af usædvanlig megen geotermisk varme. Undersøgelse af NGRIP-iskernen har givet mange detaljerede oplysninger om klimaet, især om istidens afslutning.

### Kangerlussuaq

Logistisk base og knudepunkt for Hercules-flyvningerne.

### 1981: DYE-3

2037 m, Danmark, USA og Schweiz. Boret tæt på isdeleren, men i Sydgrønland, hvor isen kun er 2 km tyk. Stedet blev valgt, fordi der var en amerikansk radarstation på stedet (DYE-3-stationen), der gav nemme transportmuligheder og praktisk støtte.

### 1992: GRIP, 1993: GISP2

Greenland Ice Core Project (GRIP) 3029 m (europæisk) og Greenland Ice Sheet Project 2 (GISP2) 3053 m (amerikansk). Kernerne er boret nær Indlandsisens højeste punkt, Summit, ca. 30 km fra hinanden. Iskernernes længde gav mulighed for at studere istidens klima i meget højere detaljegrad end i tidligere kerner. De to iskerners nederste tiendedel er forstyrret af isens flydning over den bakkede undergrund, og kun de sidste ca. 100.000 års klimadata er derfor anvendelige.

### Læs mere

Flere billeder og dagbøger fra feltarbejdet:

- Det danske ledede internationale NEEM boreprojekt på Grønland [www.neem.ku.dk](http://www.neem.ku.dk).
- Det amerikanske WAIS Divide boreprojekt på Antarktis [www.waisdivide.unh.edu](http://www.waisdivide.unh.edu)

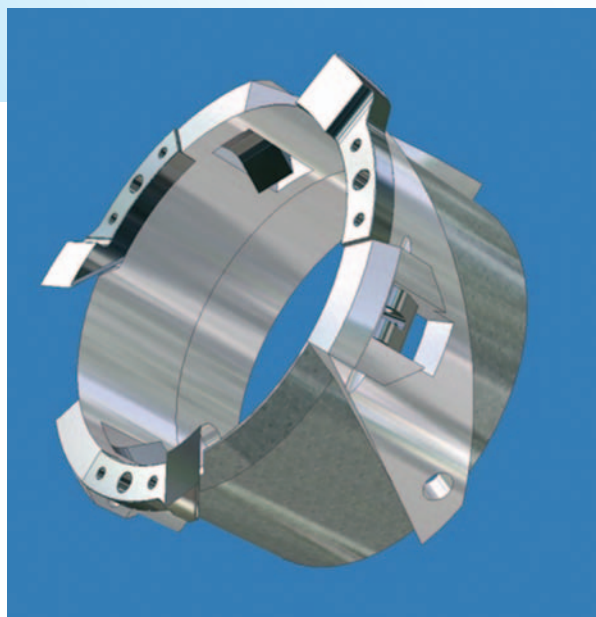
# Iskerneboring

At bore en iskerne kræver helt specielt udstyr, som kun findes i ganske få eksemplarer i verden. Danske forskere har siden 1970'erne udviklet et iskernebor, der har været brugt ved over halvdelen af alle dybdeboringer på Grønland og Antarktis. I modsætning til klippebor, der oftest drives rundt fra overfladen ved hjælp af et langt (og tungt) skaft, hænger et iskernebor i et tyndt kabel og indeholder selv motor og styringselektronik. Kablet kan ikke forhindre rotation af boret, der derfor selv skal være i stand til at bide sig fast i borehullets sider. Dette gøres ved hjælp af tre skarpe metalblade, der af fjedre presses ind i borehullets sider.

## Borevæske

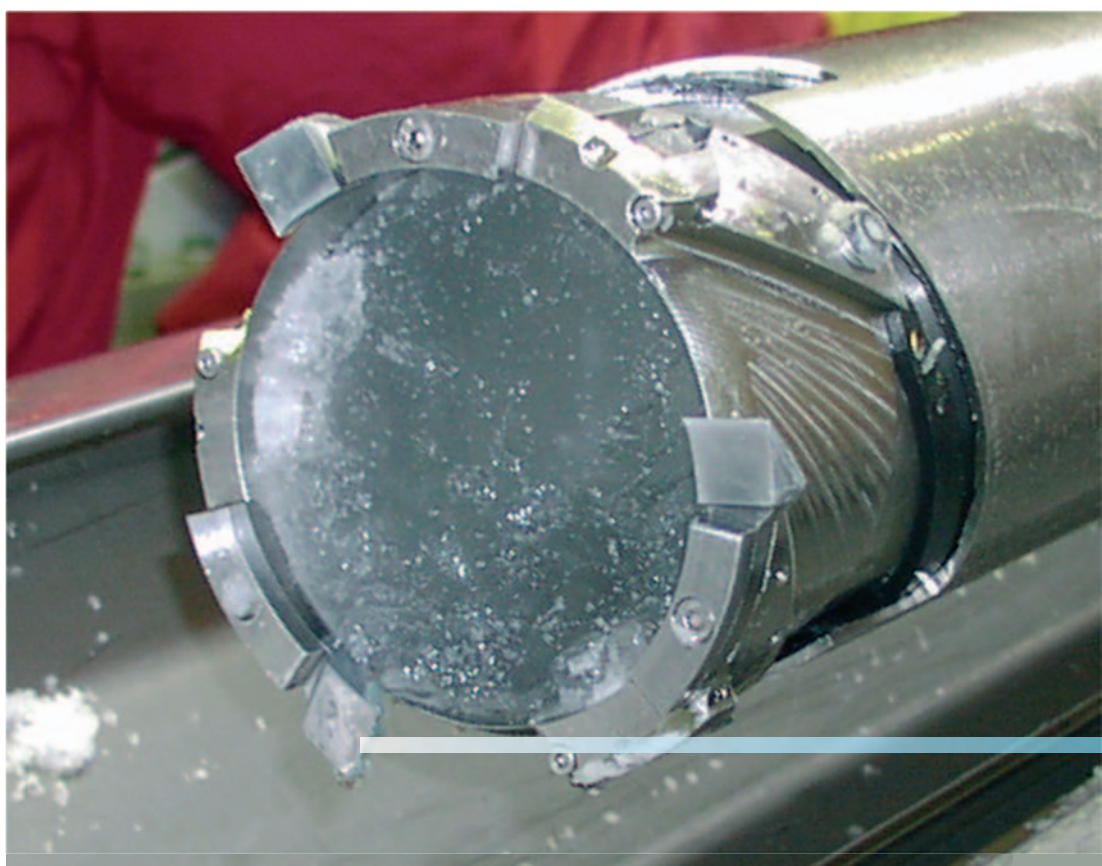
Ved bunden af Indlandsisen er trykket i isen ca. 280 atmosfære på grund af vægten af den overliggende is. Et luftfyldt borehul i denne dybde vil lukkes ved, at isen i hullets sider flyder sammen på grund af den store trykforskel. For at balancere trykforskellen fylder man en borevæske i hullet, der har cirka samme massefylde som gletscheris ( $917 \text{ kg/m}^3$ ).

Væsken må naturligvis ikke fryse ved de temperaturer, der er i iskappen (ned til  $-35^\circ\text{C}$  på Grønland og endnu koldere på Antarktis). Den skal heller ikke forstyrre iskernemålingerne, og så skal den helst være rimelig ufarlig og ikke alt for dyr, for der skal bruges cirka 40 ton til en boring gennem Indlandsisen. Mange forskellige borevæsker har været forsøgt, og i dag bruges til de dansk ledede boringer en borevæske, der er udvundet af kokos.

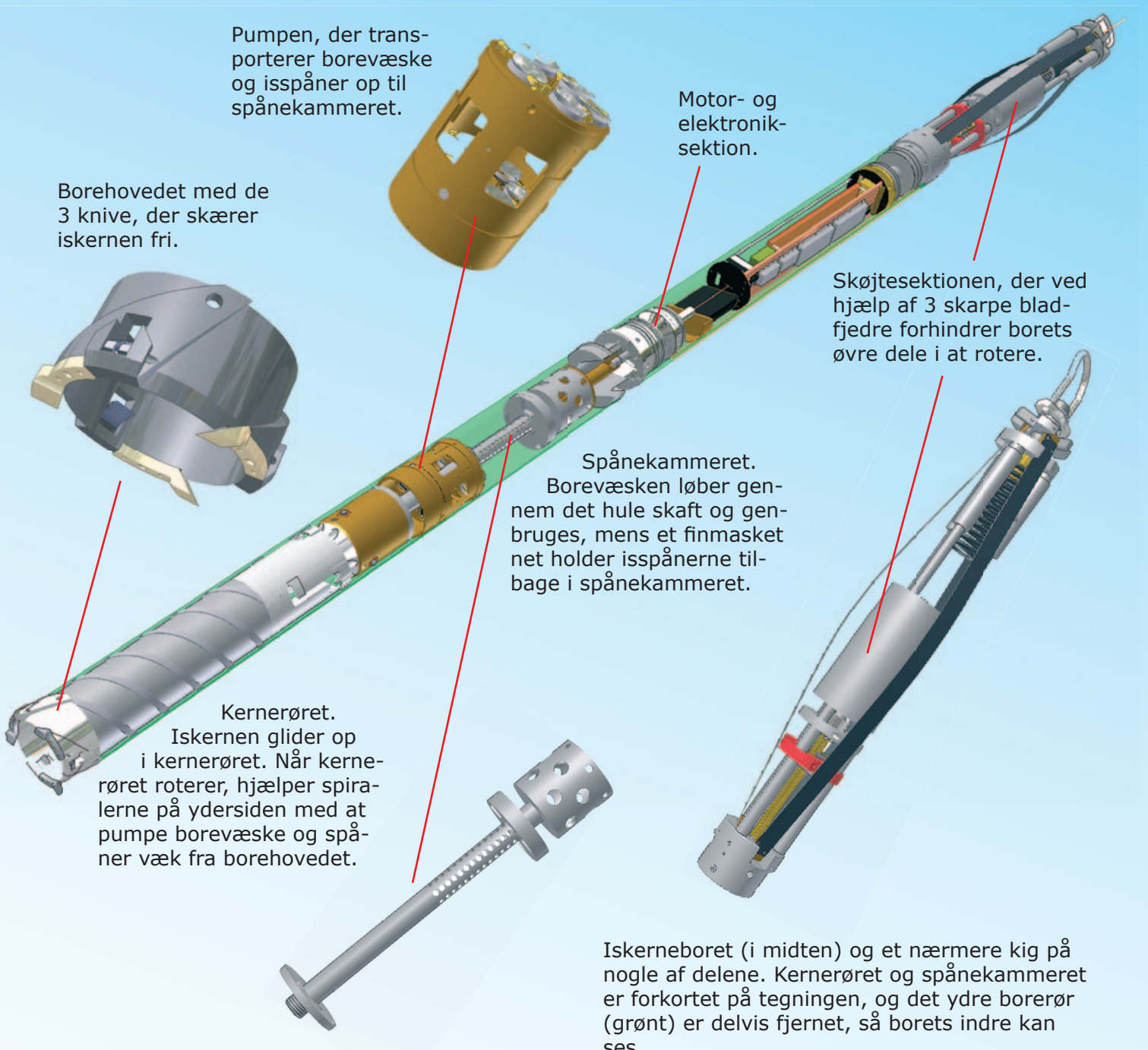


## Borehovedet

Borehovedet skærer ved hjælp af 3 knive en 18 mm bred ring af is væk rundt om selve iskernen, der har en diameter på 98 mm. Hver gang knivene roterer, skærer de 1–2 mm is væk. Boret kan indeholde op til 3,7 meter iskerne, og når boret er fyldt, stoppes rotationen. 2–3 fjederbelastede modhager–knive gør det muligt at holde fast på iskernen, når kablet strammes. Der trækkes med en kraft på op til 10 kN (svarende til løft af et ton) indtil iskernen knækker, der hvor modhagerne har skåret sig ind. Herefter trækkes boret op til overfladen.







Pumpen, der transporterer borevæske og isspåner op til spånekammeret.

Borehovedet med de 3 knive, der skærer iskernen fri.

Motor- og elektroniksektion.

Skøjtesektionen, der ved hjælp af 3 skarpe blad-fjedre forhindrer borets øvre dele i at rotere.

Spånekammeret. Borevæsken løber gennem det hule skaft og genbruges, mens et finmasket net holder isspånerne tilbage i spånekammeret.

Kernerøret. Iskernen glider op i kernerøret. Når kernerøret roterer, hjælper spiralerne på ydersiden med at pumpe borevæske og spåner væk fra borehovedet.

Iskerneboret (i midten) og et nærmere kig på nogle af delene. Kernerøret og spånekammeret er forkortet på tegningen, og det ydre borerør (grønt) er delvis fjernet, så borets indre kan ses.

## Spåner

En meter iskerne vejer ca. 7 kg, og undervejs produceres der ca. 6 kg spåner. Spåner og borevæske transporteres op mellem det ydre borerør og kernerøret, der er udstyret med spiraler, der hjælper med at pumpe når kernerøret roterer. Pumpen driver væske og spåner op i spånekammeret, hvorfra væsken løber gennem et filter og retur gennem et hult skaft.

### Læs mere

om iskerneboringer på [isogklima.dk/nfa-boring](http://isogklima.dk/nfa-boring)

## 1000 gange op og ned på 3 somre

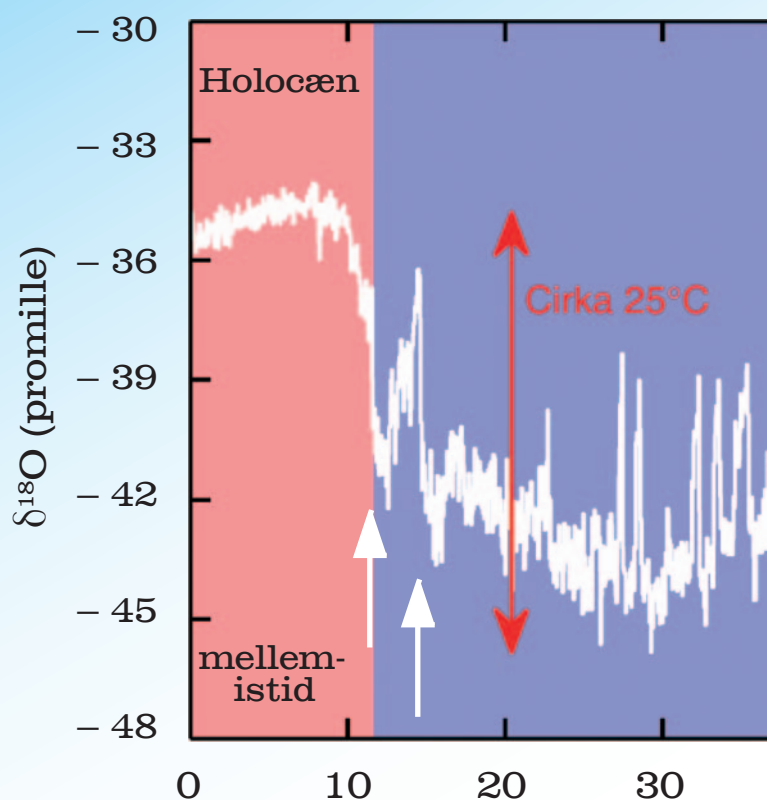
Der boret i gennemsnit omkring 3 meter iskerne pr. gang, og selve boringen tager kun ca. 15 minutter. Men fordi boret skal falde ned til bunden gennem borevæsken og skal trækkes op igen, og fordi boret skal tømmes for is og spåner, inden det sendes ned i dybet igen, tager det – alt efter dybden – i alt fra ½ til 3 timer at boret et stykke iskerne. Derfor går der omkring 3 somres arbejde med at gennemføre de ca. 1000 boringer, der skal til, før hele den kilometerlange iskerne er hentet op fra dybet.

# Fortidens variable klima

Teorien om, at store dele af Jorden med mellemrum har været dækket af is, har været diskuteret siden midten af 1800-tallet, men det var først med analysen af Camp Century-iskernen i slutningen af 1960'erne, at man for første gang fik et detaljeret billede af klimaet gennem den sidste istid. Fra de allerførste resultater stod det klart, at klimaet i istiden var meget variabelt i forhold til nutidens klima, og det var især en særlig type savtak-opvarmninger, der overraskede. Det viste sig nemlig, at istiden mere end 20 gange blev afbrudt af mildere perioder med en varighed fra få hundrede til mange tusinder år. På trods af den store spredning i varighed, havde de milde perioder alle omtrent det samme forløb: som begyndelse en brat opvarmning, dernæst en langsom afkøling, og til sidst endnu et brat skift, denne gang i form af en afkøling tilbage til det kolde istidsniveau.

For at forstå klimakurven fra iskerne, er det nødvendigt først at se på, hvordan iskerneboringer kan bruges til at bestemme fortidens temperaturer. Den mest anvendte metode er at bruge Willi Dansgaards opdagelse af, at isens sammensætning afspejler temperaturen på det tidspunkt, hvor sneen faldt over Grønland. Mere specifikt er der tale om isens isotopsammensætning, idet forholdet mellem antallet af de lette og de tunge isotoper af brint og ilt i vandmolekylerne er en indikator for fortidens temperaturer. Den fysiske baggrund er forklaret på side 13, men hovedresultatet er, at mængden af den tunge iltisotop  $^{18}\text{O}$  i isprøverne angives ved den såkaldte delta-O-18-værdi, der som symbol har  $\delta^{18}\text{O}$ , og at lave  $\delta^{18}\text{O}$ -værdier svarer til lave temperaturer og vice versa.

Man bestemmer  $\delta^{18}\text{O}$  med et såkaldt massespektrometer, der kan måle mængden af de forskellige isotoper i et stof. Grafen ovenfor viser  $\delta^{18}\text{O}$ -værdierne gennem hele NordGRIP-iskernen, der rækker ca. 123.000 år tilbage i tiden. For at producere kurven er der skåret mere end 60.000 prøver i hver lidt



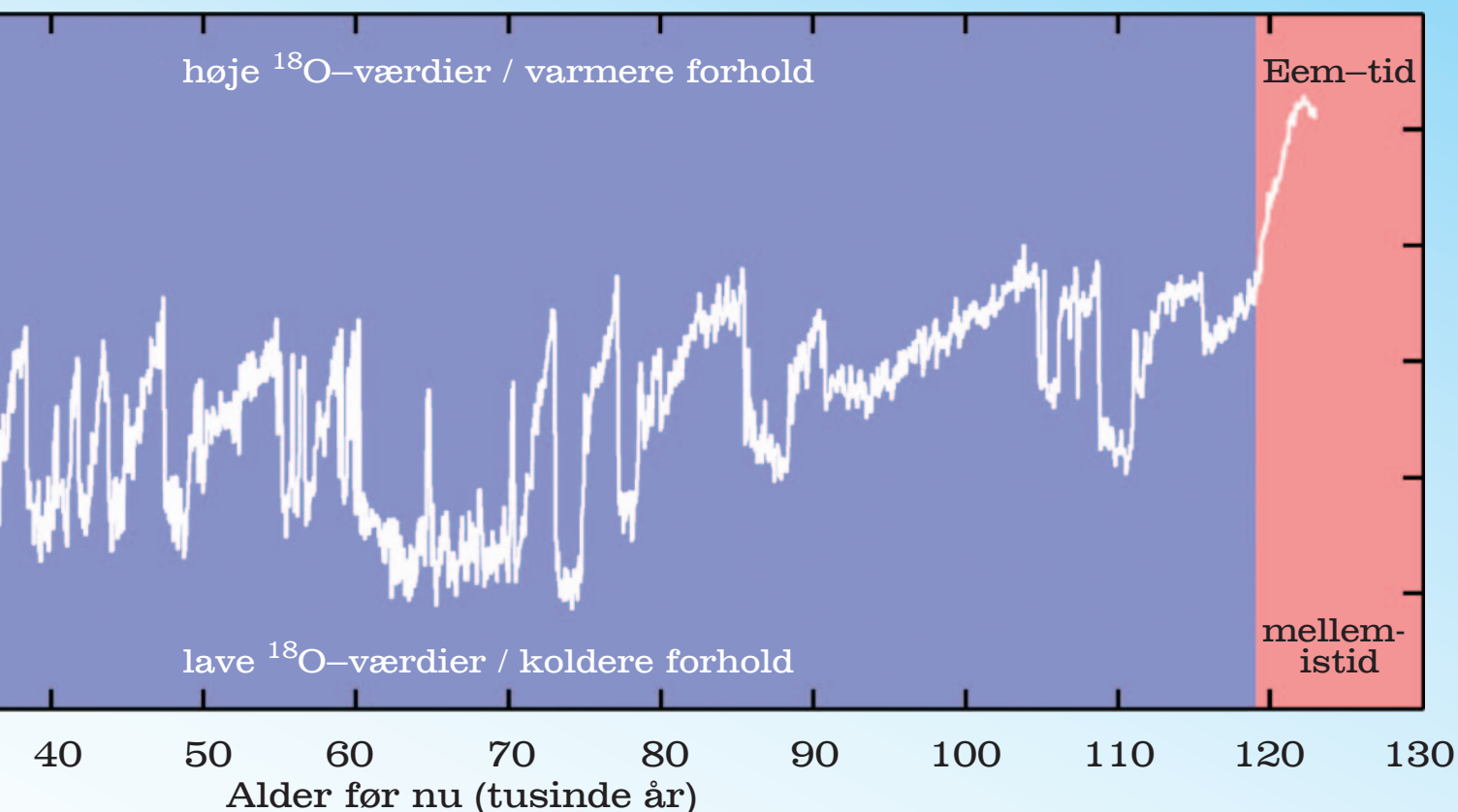
mindre end tændstikæskestørrelse fra den mere end 3 km lange iskerne.

Tidsaksen er vendt sådan, at venstre del er vores nuværende mellemistid Holocæn, der har været 11.700 år, mens højre del er den forrige mellemistid, Eem-tiden, der sluttede for ca. 119.000 år siden. Selvom der ikke er nogen tvivl om, at høje  $\delta^{18}\text{O}$ -værdier (øverst på akse) svarer til varme forhold, og lave  $\delta^{18}\text{O}$ -værdier (nederst på akse) repræsenterer koldere forhold, er det svært at omregne  $\delta^{18}\text{O}$ -værdierne til præcise temperaturangivelser. Her kan man bruge, at istidens is stadig "husker" istidens temperaturer, fordi de overliggende islag isolerer godt. Ved at måle temperaturen i borehullet kan man derved bestemme forskellen mellem den koldeste istid og vores mellemistids-temperaturer. Resultaterne viser at forskellen er ca. 25°C.

## D-O-begivenheder

Det blå område i midten er istiden, og det er de store udsving i istidstemperaturen, der kom som en overraskelse for forskerne, der undersøgte Camp

## NordGRIP $\delta^{18}\text{O}$ -værdier for de sidste 123.000 år



Century-iskernen. Da udsvingene blev fundet i den næste iskerne, DYE-3 iskerne, begyndte forskerne for alvor at tro på eksistensen af disse bratte klimaudsving, men det var først ved analysen af GRIP og GISP2-iskernerne, at de fulde detaljer om udsvingene blev kortlagt. Man har navngivet dem Dansgaard-Oeschger-begivenheder, eller blot D-O-begivenheder, efter to af iskerneforskningens pionerer, danske Willi Dansgaard og hans schweiziske kollega Hans Oeschger.

Ved begyndelsen af en D-O-begivenhed sker der en brat overgang til milde forhold, svarende til en opvarmning i Grønland på mere end  $10^{\circ}\text{C}$  på mindre end et århundrede, og selvom afkølingen sker mere gradvist, er også afslutningen på de savtakformede udsving bratte. Analyse af iskerner fra Antarktis og klimadata fra andre dele af verden viser, at de bratte overgange i D-O-begivenhederne kun for alvor kan observeres i det nordatlantiske område, og det er derfor nærliggende at tro at årsagen til D-O-begivenhederne skal findes i samme område. Selv efter årtiers forskning er der ikke

præsenteret en god forklaring på, hvad der udløser disse ændringer, men den bedste kandidat til en mekanisme, der forklarer ændringerne, er pludselige ændringer i Nordatlantens havstrømme.

I vores nuværende mellemistid bringer Den Nordatlantiske Strøm (den nordlige forlængelse af Golfstrømmen) lunt vand fra sydligere himmelstrøg til Nordeuropa og det arktiske område, hvor vandet ved afkøling bliver tungere og synker i dybet. Under istiden var denne del af havstrømmene stoppet eller svækket, men man kan forstille sig, at denne transport af lunt vand er startet delvis under D-O-begivenhederne, hvilket har medført hurtige og store temperaturforskelle i Nordatlanten, men kun små og gradvise ændringer i fjernere egne.

### Læs mere

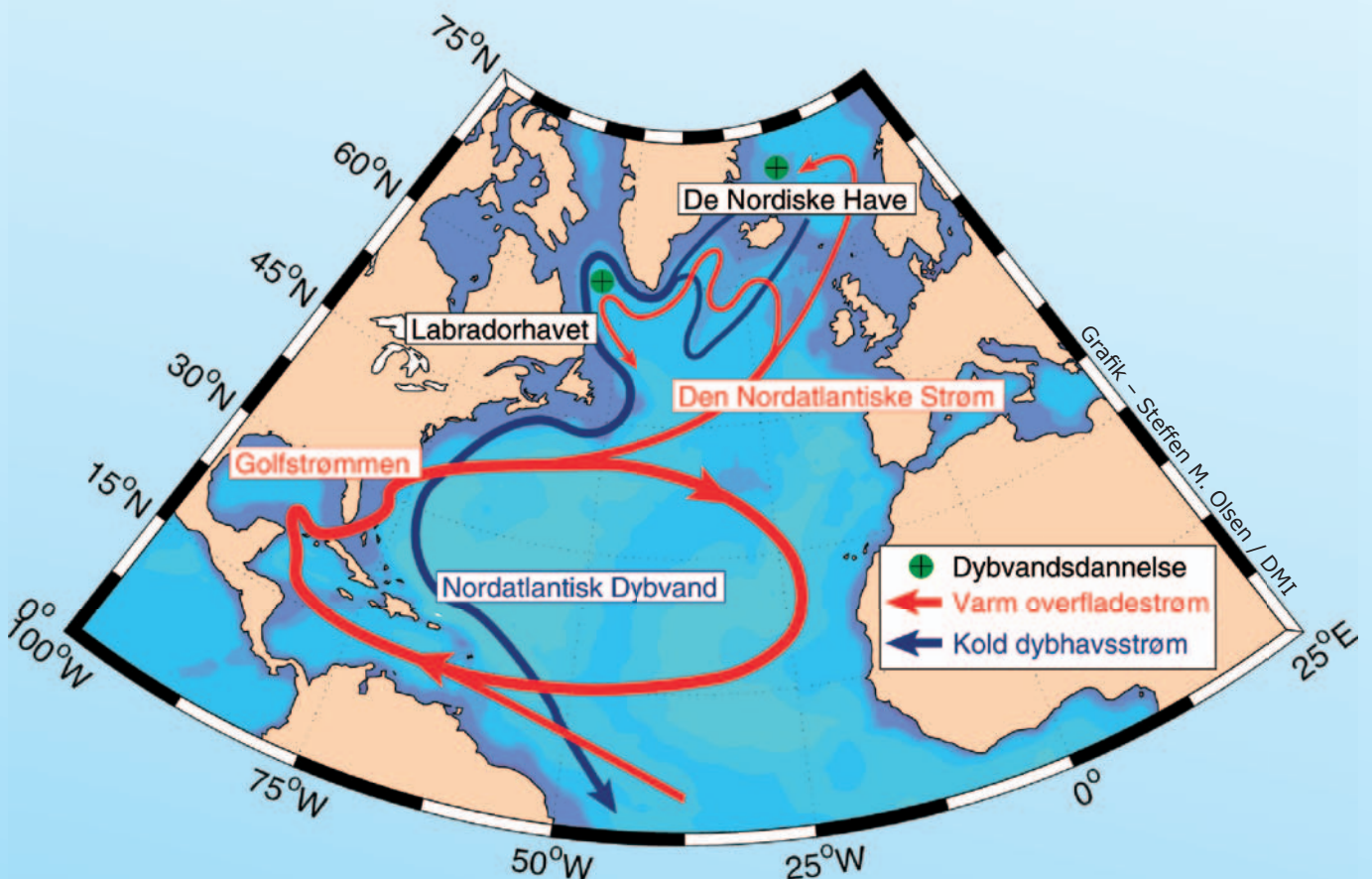
- om havstrømmenes dynamik i NFA-hæftet *Jordens klima – fortid og fremtid*, side 5 – 6.
- om istidens klima på [isogklima.dk/nfa-istidsklima](http://isogklima.dk/nfa-istidsklima)

## Istider og mellemistider

Hermed adskiller klimaskiftene under D-O-begivenhederne sig fra klimaets skiften mellem istider og mellemistider. Vi ved fra geologiske data, at mængden af is på Jorden i flere millioner år har varieret voldsomt, og fra Antarktiske iskerner – der rækker 800.000 år tilbage i tiden – kan vi se svingninger mellem istider og mellemistider med en periode på omtrent 100.000 år, se side 20. I modsætning til D-O-begivenhederne, der som beskrevet primært er en omfordeling af varme til fordel for det nordatlantiske område, er istids-mellemistidsvariationerne i langt højere grad globale svingninger, hvor hele Jorden enten afkøles eller opvarmes på en gang.

Årsagen til istidssvingningerne menes at være variationer i, hvor meget sol-

stråling Jorden modtager og variationer i, hvordan strålingen fordeles på høje og lave breddegrader. Variationerne i, hvor meget energi, Jorden modtager fra Solen, skyldes, at Jordens bane om Solen skifter form fra næsten rund til mere elliptisk med en periode på 100.000 år. Variationerne i, hvordan energien fordeles på forskellige breddegrader, sker med perioder på 21.000 og 41.000 år og skyldes ændringer i hældningen og orienteringen af Jordens rotationsakse. Den kombinerede effekt af disse variationer kaldes Milankovitch-effekten. Et af paradokserne ved denne forklaring er, at selvom sol-indstrålingen som beskrevet ændrede sig gradvist over mange tusinder af år, skete omslaget fra istid til mellemistid meget brat i Grønland. Hvordan skiftet skete, er emnet for afsnittet på side 15–16.



### Læs mere

om Milankovitch-effekten og istids-mellemistids-svingningerne i Temaet *Hvorfor kommer der istider?* på [isarkiv.dk](http://isarkiv.dk) eller i NFA-hæftet *Jordens klima – fortid og fremtid*, side 2 – 4.

# $\delta^{18}\text{O}$ : Fortidens termometer

Alle vandmolekyler består af et iltatom O og to brintatomer H, men disse atomer findes i naturen i varianter med forskelligt antal neutroner:

$^{16}\text{O}$	$^{17}\text{O}$	$^{18}\text{O}$
99,759%	0,037%	0,204%
$^1\text{H}$	$^2\text{H}$	$^3\text{H}$
99,985%	0,015%	radioaktiv – indholdet varierer

$^2\text{H}$  kaldes også D for Deuterium og  $^3\text{H}$  kaldes Tritium.

Blandt vandmolekyler i naturen er der langt flest molekyler af varianten  $\text{H}_2^{16}\text{O}$ , mens der er ca. 0,2% af varianten  $\text{H}_2^{18}\text{O}$  og ca. 0,015% af varianten  $\text{DH}^{16}\text{O}$ , dvs. molekyler med en enkelt tungere  $^{18}\text{O}$ - eller deuterium-isotop. De andre varianter findes naturligvis også, men anvendes ikke særlig ofte til klimaanalyser.

Man måler indholdet af de tunge isotoper i et såkaldt massespektrometer, og i praksis måles forholdet mellem antallet af de tunge og lette isotoper, dvs.  $R = (\text{antal } ^{18}\text{O})/(\text{antal } ^{16}\text{O})$  for oxygen. Dette forhold er et ret lille tal, og man har derfor vedtaget at opgive resultater af isotopmålinger som såkaldte  $\delta$ -værdier, der er den målte  $R$ -værdis afvigelse (i promille) fra  $R$ -værdien for en standard. For oxygen er definitionen således:

$$R = \frac{\text{antal } ^{18}\text{O}}{\text{antal } ^{16}\text{O}}, \quad \delta^{18}\text{O} = \frac{R_{\text{prøve}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \cdot 1000 \text{ ‰}$$

og tilsvarende for hydrogen:

$$R = \frac{\text{antal D}}{\text{antal H}}, \quad \delta\text{D} = \frac{R_{\text{prøve}} - R_{\text{standard}}}{R_{\text{standard}}} \cdot 1000 \text{ ‰}$$

Som standard anvendes oftest det såkaldte *Vienna Standard Mean Ocean*

*Water*, der er en internationalt accepteret vandstandard.

De vandmolekyler, der indeholder en  $^{18}\text{O}$ - eller deuterium-isotop, har lidt sværere ved at fordampe på grund af deres lidt højere masse. Tilsvarende vil de have lidt nemmere ved at kondensere, fx når der dannes skyer. I praksis betyder det, at der er lidt færre tunge isotoper i damp end i havvand, og at denne forskel forstærkes når dampen bliver til nedbør fx undervejs til Grønlands Indlandsis. Det var Willi Dansgaards opdagelse, at den mængde tunge isotoper, der mangler i forhold til indholdet i havvand, afhænger af temperaturen på nedbørstidspunktet, og at  $\delta^{18}\text{O}$  og  $\delta\text{D}$  fra isprøver derfor kan bruges til at bestemme fortidens klima.

I store træk viser målinger af  $\delta^{18}\text{O}$  og  $\delta\text{D}$  det samme, blot er variationerne i  $\delta\text{D}$  otte gange større end de tilsvarende variationer i  $\delta^{18}\text{O}$ , da den relative masseforskel for brint er otte gange større end for ilt. Men forskerne har opdaget, at der er en lille forskel, der kan give endnu flere informationer om klimaet.

Når man kender både  $\delta\text{D}$  og  $\delta^{18}\text{O}$ , kan man beregne det såkaldte deuteriumoverskud,  $d = \delta\text{D} - 8 \cdot \delta^{18}\text{O}$ . Forskerne har opdaget, at deuteriumoverskuddet i en isprøve giver oplysninger om temperaturen i de områder, hvor vanddampen, der senere faldt som sne i Grønland, stammede fra. På den måde kan isotoperne både fortælle om de lokale temperaturer og klimaforholdene i egne længere fra Grønland.

## Læs mere

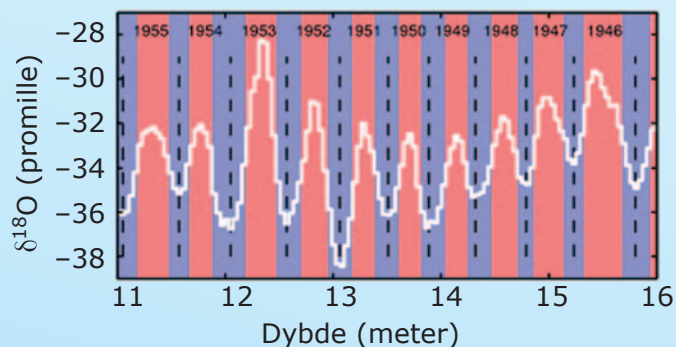
Case 1 på [isarkiv.dk](http://isarkiv.dk) fortæller historien om Willi Dansgaards opdagelse og går i dybden med, hvorfor  $\delta^{18}\text{O}$  viser fortidens temperaturer.

På [isogklima.dk/nfa-isotoper](http://isogklima.dk/nfa-isotoper) er det beskrevet, hvordan  $\delta^{18}\text{O}$  måles.

# Datering af is

En af iskernernes største fordele som klimaarkiv er, at det er relativt nemt at datere isen i iskernerne. Det er derfor muligt nøjagtigt at tidsfæste fortidens klimaændringer, hvilket gør data fra iskernerne meget mere værdifulde for klimaforskere. Det er nemlig ofte når forskerne sammenligner veldaterede klimadata fra flere forskellige kilder (fx iskerner, havsedimentkerner, træringe osv.), at de kan identificere nye sammenhænge og forklaringer.

Den simpleste, men også den mest arbejdskrævende, måde at datere iskerner på er at tælle årlag. Til dette formål kan man bruge  $\delta^{18}\text{O}$  eller  $\delta^{18}\text{O}$ -målinger, da isotopforholdet som beskrevet på side 13 afhænger af temperaturen da sneen faldt.



Grafen her viser  $\delta^{18}\text{O}$ -værdier fra 5 meters iskerne boret på det centrale Grønland. De enkelte somre og vintre er tydelige, og vi kan se, at 1953 var en usædvanlig varm sommer, mens vinteren 1951–52 var usædvanlig kold. Man kan tælle årlag på denne måde ca. 8000 år tilbage i tiden, hvorefter årlagene bliver for

tynde til, at den tydelige sommer–vinter-svingning i isotopforholdene er bevaret.

Når man vil datere ældre is, må man derfor bruge, at mængden af urenhederne i isen også varierer i løbet af året. Grafen nedenfor viser målinger af urenheder i en meter af NordGRIP-iskernen. Enheden ppbw står for parts per billion by weight, dvs. milliardtedele af den samlede masse. Der er flest  $\text{Na}^+$ -ioner om vinteren, mere støv og  $\text{Ca}^{2+}$ -ioner om foråret og mest  $\text{NH}_4^+$  og  $\text{NO}_3^-$  om sommeren. Eksemplet viser, hvordan ca. 11.000 gamle årlag i NordGRIP-iskernen identificeres ved hjælp af målinger af urenhederne i isen (de grå bjælker markerer hvert forår), men med den samme metode er der talt årlag helt ned til 60.000 år før nu.

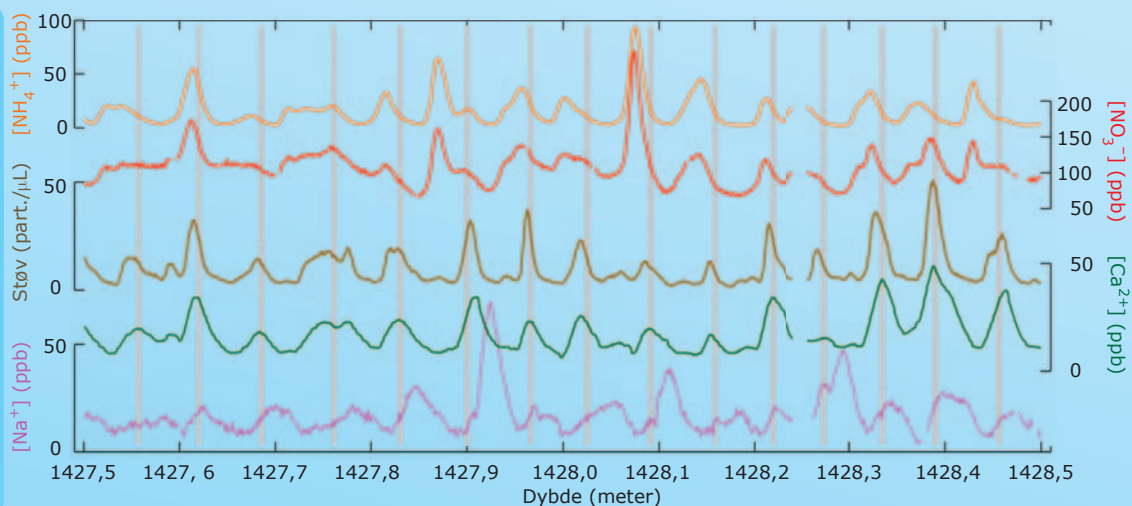
Endelig kan man også regne sig frem til isens alder ved hjælp af en matematisk model. For at bruge de simpleste modeller behøver man kun at kende istykkelsen og den årlige nedbør, mens de mest avancerede modeller beregner isens flydemønster, og dermed også hvor gammel isen er i forskellige dybder, med høj præcision. De avancerede modeller kræver både mange oplysninger om borestedet og isens beskaffenhed samt store computerressourcer.

## Lær mere

om datering både ved hjælp af årlagstælling og modellering i Case 1 *Datering* på [isarkiv.dk](http://isarkiv.dk) og på [isogklima.dk/nfa-datering](http://isogklima.dk/nfa-datering).

## Læs mere

Læs mere om klimaanalyser ved hjælp af træringe, koral og sedimentkerner i NFA-hæftet *Jordens klima – fortid og fremtid*, side 9 – 13.



# Bratte klimaændringer

– et eksempel på, hvad iskernerne kan fortælle

Når isen er dateret, og forskerne har lavet målinger af isotopforhold og mængden af urenheder, begynder forskerne at fortolke resultaterne for at prøve at forstå dynamikken i fortidens klima. Forskerne er særligt interesserede i istidens afslutning, for iskernerne viser, at klimaet skiftede meget brat i det nordatlantiske område, og ingen ved, hvordan klimaet kunne skifte så brat. Klimaets omslag kan undersøges år for år ved at analysere årlagene i NordGRIP-isker-

nen. Det særlige ved NordGRIP-iskernen i denne forbindelse er, at lagene af årligt snefald er relativt tykke, og at der er udført en lang række meget detaljerede målinger på iskernen, der fortæller om mange forskellige dele af fortidens klima. På grafen nedenfor vises seks forskellige måleserier, der alle viser klimaets opførsel hen over istidens sidste to bratte opvarmninger, der ifølge iskeredateringen skete for henholdsvis 11,7 og 14,7 tusinde år siden. Perioderne er vist med hvide pile på grafen på side 10.

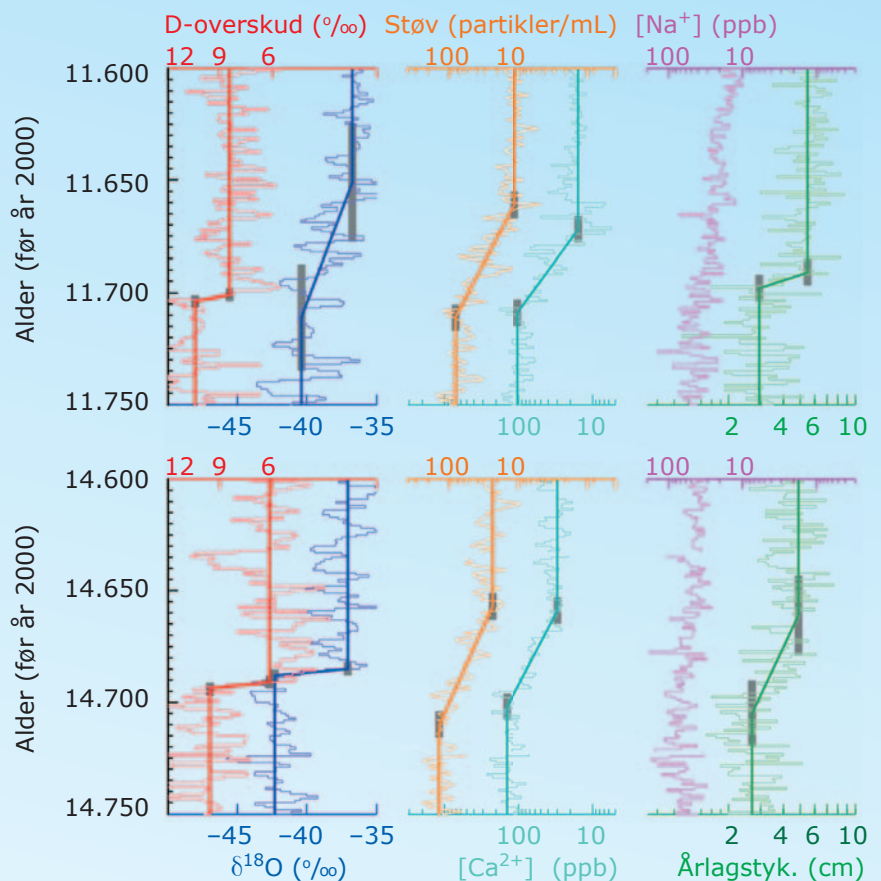
Deuterium-overskuddet giver oplysninger om temperaturen i de områder, der leverer vanddampen, der senere falder som sne i Grønland. Bemærk at klimaskiftet sker på kun 1–3 år. Værdierne skifter med 2–3 ‰, hvilket svarer til, at temperaturerne i kildeområdet i gennemsnit falder med 2–4 °C.

$\delta^{18}\text{O}$ -værdierne viser, at temperaturen på borestedet steg med over 10°C. For 14.700 år siden skete dette pludseligt, mens opvarmningen tog ca. 50 år ved temperaturstigningen 11.700 år før nu.

Støv-indholdet og  $\text{Ca}^{2+}$ -koncentrationen faldt med en faktor 10 i løbet af 30–50 år. De to kurver er to sider af samme sag, da  $\text{Ca}^{2+}$  kommer fra den del af støvet, der er vandopløseligt, mens det målte støvindhold er den uopløselige del.

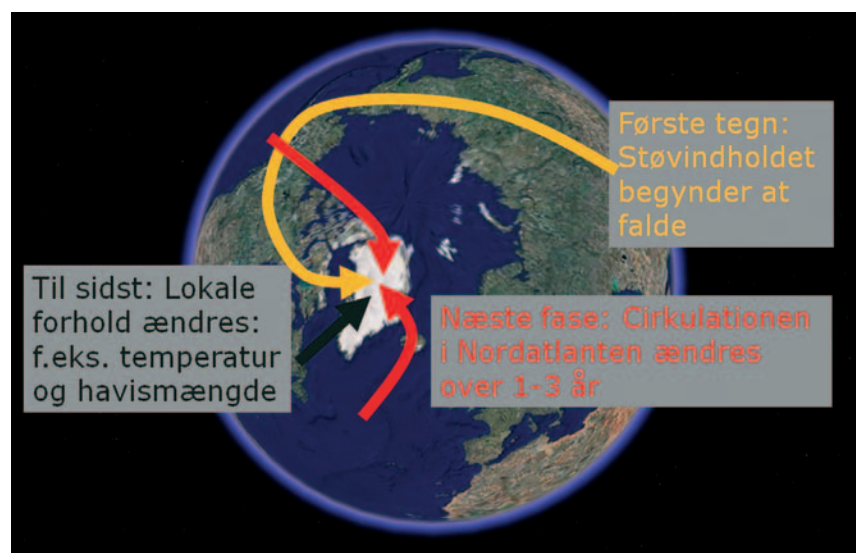
$\text{Na}^+$ -koncentrationen skifter kun langsomt, og derfor kan den valgte statistiske model ikke bruges til at beskrive skiftet.

Årlagstykkelsen, dvs. mængden af et enkelt års snefald efter sammenpresning, ændrer sig til det dobbelte i løbet af 1–4 årtier. Det er helt normalt, at nedbøren er mindre under kolde klimatiske forhold, da kold luft kan indeholde mindre vanddamp, og dermed ikke kan danne så meget nedbør. På grund af flydning er årlagene i denne dybde kun ca. 30% af tykkelsen ved overfladen.



På figuren "går tiden opad", da den lodrette akse er alderen af isen. De tynde linjer viser de målte dataværdier år for år, mens de tykkere linjer viser resultatet af en statistisk model, baseret på antagelsen, at hver af parametrene skifter lineært fra et niveau til en andet. De grå rektangler angiver 2 $\sigma$ -usikkerhederne for de punkter, hvor de tykke linjer "knækker". Enheden ppbw betyder parts per billion by weight, dvs. milliardtedele ( $10^{-9}$ ) af den samlede vægt.

En af de store udfordringer i klimaforskning er at finde ud af, hvad der er årsag, og hvad der er virkning, når klimaet ændrer sig. Med andre ord er udfordringen at identificere hvilken proces, der er ansvarlig for at starte klimaændringerne, og hvilke processer, der ændrer sig som konsekvens af klimaændringerne. En af de måder, man kan finde årsagerne på, er at finde den del af klimasystemet, der begynder at ændre sig først. I dette tilfælde viser modelkurverne på grafen, at det under begge opvarmninger er støvindholdet, der ændrer sig først. Til gengæld er det deuterium-overskuddet, der ændrer sig mest brat, idet det kun tager 3 år at gå fra istidsniveauet til mellemistidsniveauet. Når man samler oplysningerne fra de forskellige kurver, oplysningerne fra tilsvarende kurver fra andre iskerner og ikke mindst oplysningerne om, hvornår de enkelte kurver begynder at ændre sig, får man et samlet billede af, hvordan klimaet ændrede sig:



1. Det første tegn på istidens afslutning er, at støvindholdet (og  $\text{Ca}^{2+}$ -koncentrationen) begynder at falde. Målinger af støvets sammensætning viser, at støvet primært kommer fra Asiens ørken. Når støvindholdet i Grønland falder, skyldes det mest sandsynligt, at der bliver løftet mindre støv op i atmosfæren i Asien, eller at mere af støvet vaskes ud af atmosfæren af nedbør på vej til Grønland. Havde det været ændringer i de

lokale nedbørsforhold, der havde forårsaget faldet i støvindhold, ville det have været synligt samtidigt både i årlagstykkelsen i alle de målte koncentrationer af urenheder, hvilket ikke er tilfældet. Vi konkluderer derfor, at istidens afslutning udløses af ændringer langt fra Grønland.

2. Næste fase er, at deuterium-overskuddet ændrer sig på få år. Fordi temperaturen i de områder, der er kilder til fugtigheden, bliver lavere i en periode hvor klimaet generelt opvarmes, og fordi skiftet sker så hurtigt, er den mest sandsynlige forklaring, at kildeområderne skifter geografisk. Det er således ikke et bestemt kildeområde, der afkøles, men den atmosfæriske cirkulation der bringer fugtighed til Grønland fra andre, koldere områder. Skiftets hurtighed og voldsomhed tyder på, at hele cirkulationssystemet i Nordatlanten ændrede sig helt fundamentalt.

3. Som en konsekvens af cirkulationsændringerne ændres den lokale temperatur, og koncentrationen af en lang række andre urenheder (der måles flere typer urenheder, end der er vist på grafen). Fx ændres natriumindholdet over en længere periode. Det er derfor næppe blandt de processer, der udskiller  $\text{Na}^+$  til atmosfæren, at vi skal lede efter de afgørende årsager til de bratte klimaskift.

Det skal retfærdigvis siges, at ovenstående fortolkning kun er et muligt bud. Denne forklaring blev publiceret i det ansete videnskabelige tidsskrift Science i 2008 (vol. 321, side 680–683), men andre forskere har fremført andre fortolkninger, der bruger andre statistiske modeller, eller hvor især havets cirkulation og mængden af havis tillægges en større rolle.



# Drivhuseffekten

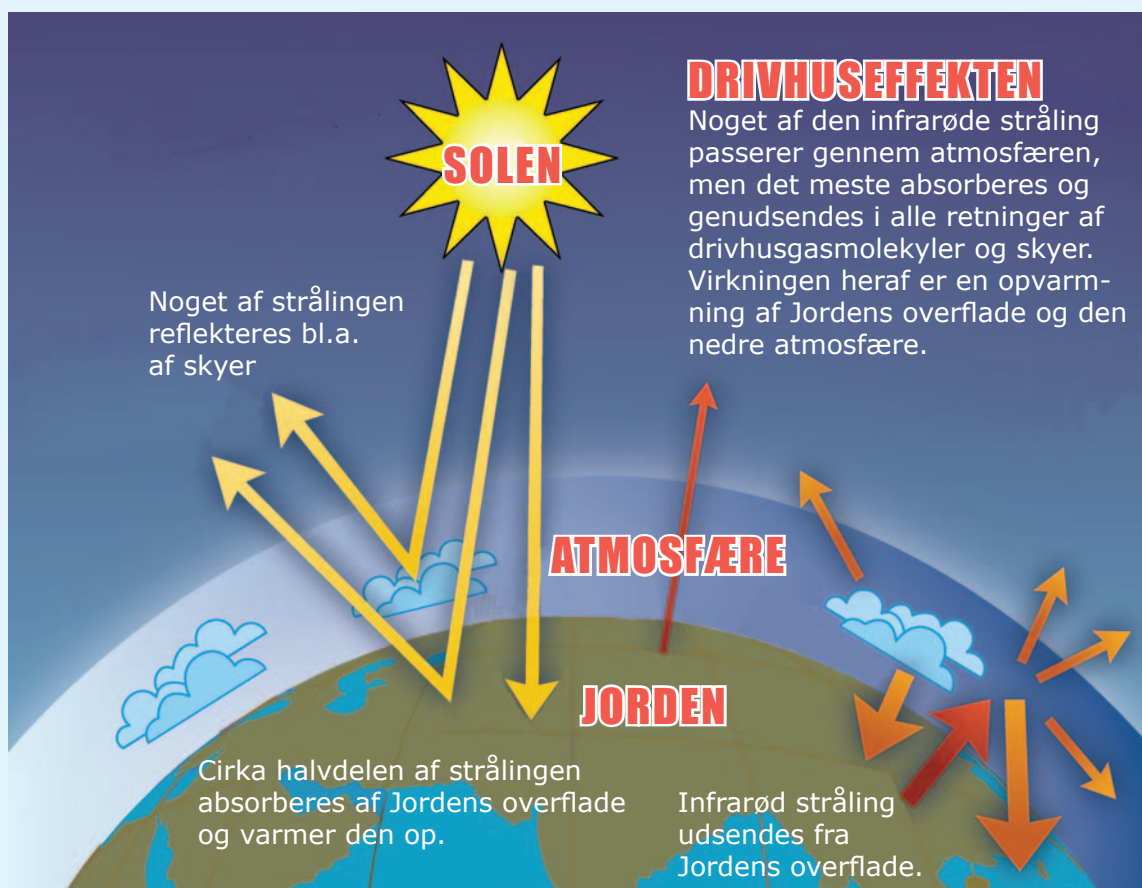
Alle legemer udsender elektromagnetisk stråling, såkaldt sortlegemestråling. Mængden af sortlegemestråling ved forskellige bølgelængder afhænger af legemets temperatur. Solens overflade er ca.  $5.500^{\circ}\text{C}$ , og Solen udsender mest stråling i det synlige område med bølgelængderne 400 – 700 nm, mens Jorden primært udsender varmestråling (infrarød stråling) med bølgelængder omkring 5 – 20  $\mu\text{m}$ .

Jordens atmosfære indeholder en række gasser, der er i stand til at absorbere (optage) varmestrålingen fra Jorden, men som lader sollyset slippe næsten uhindret igennem.

En stor del af solstrålingen passerer derfor gennem atmosfæren og opvarmer jordoverfladen. Når jordoverfladen udsender varmestråling, slipper kun lidt af denne stråling gennem atmosfæren. Resten absorberes og opvarmer især den nedre del af atmo-

sfæren. Atmosfæren udsender varmestrålingen igen i alle retninger, også i retning mod jordoverfladen. På denne måde sendes en del af varmestrålingen frem og tilbage mellem jordoverflade og atmosfære nogle gange, inden den udsendes til verdensrummet. Total set er der dog stadig balance: der udsendes den samme mængde stråling (som reflekteret solstråling og varmestråling fra atmosfæren og jordoverfladen), som Jorden modtager fra Solen.

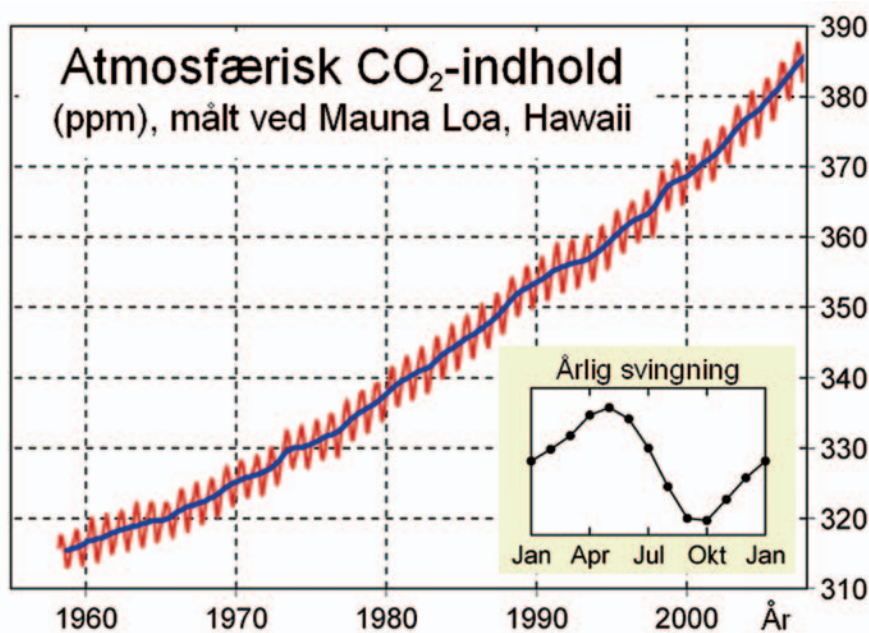
Denne opvarmende effekt kaldes drivhuseffekten og betyder at Jordens overflade er ca.  $32^{\circ}\text{C}$  varmere end den ville have været, hvis atmosfæren ikke indeholdt gasarter, der absorberede infrarød stråling. De vigtigste gasser for drivhuseffekten er kuldi-oxid ( $\text{CO}_2$ ), metan ( $\text{CH}_4$ ) og vanddamp ( $\text{H}_2\text{O}$ ), der sammen med en række mindre vigtige gasser samlet betegnes drivhusgasser.



# Små bobler af fortid

Forskere har i århundreder overvejet hvilken rolle  $\text{CO}_2$  og andre drivhusgasser spiller for Jordens klima. Den franske matematiker og fysiker Joseph Fourier beskrev allerede i første halvdel af 1800-tallet i grove træk, hvordan atmosfæren holder Jordan varm, mens den svenske fysiker Svante Arrhenius omkring år 1900 var den første til at indse, at ændringer i atmosfærens  $\text{CO}_2$ -indhold vil kunne ændre Jordens overfladetemperatur.

Det var dog først i 1958, at den amerikanske atmosfærefysiker Charles Keeling bestemte sig for systematisk at måle atmosfærens  $\text{CO}_2$ -indhold, og siden 1958 kender vi derfor atmosfærens  $\text{CO}_2$ -indhold målt på Mauna Loa-vulkanen på Hawaii, langt ude i Stillehavet fjernt fra store  $\text{CO}_2$ -kilder.



Målingerne viser, at  $\text{CO}_2$ -indholdet svinger regelmæssigt i løbet af året (rød kurve), og at det årlige gennemsnit (blå kurve) fra 1958 til 2008 er steget fra ca. 315 til 386 ppm (parts per million, dvs. milliontedele).

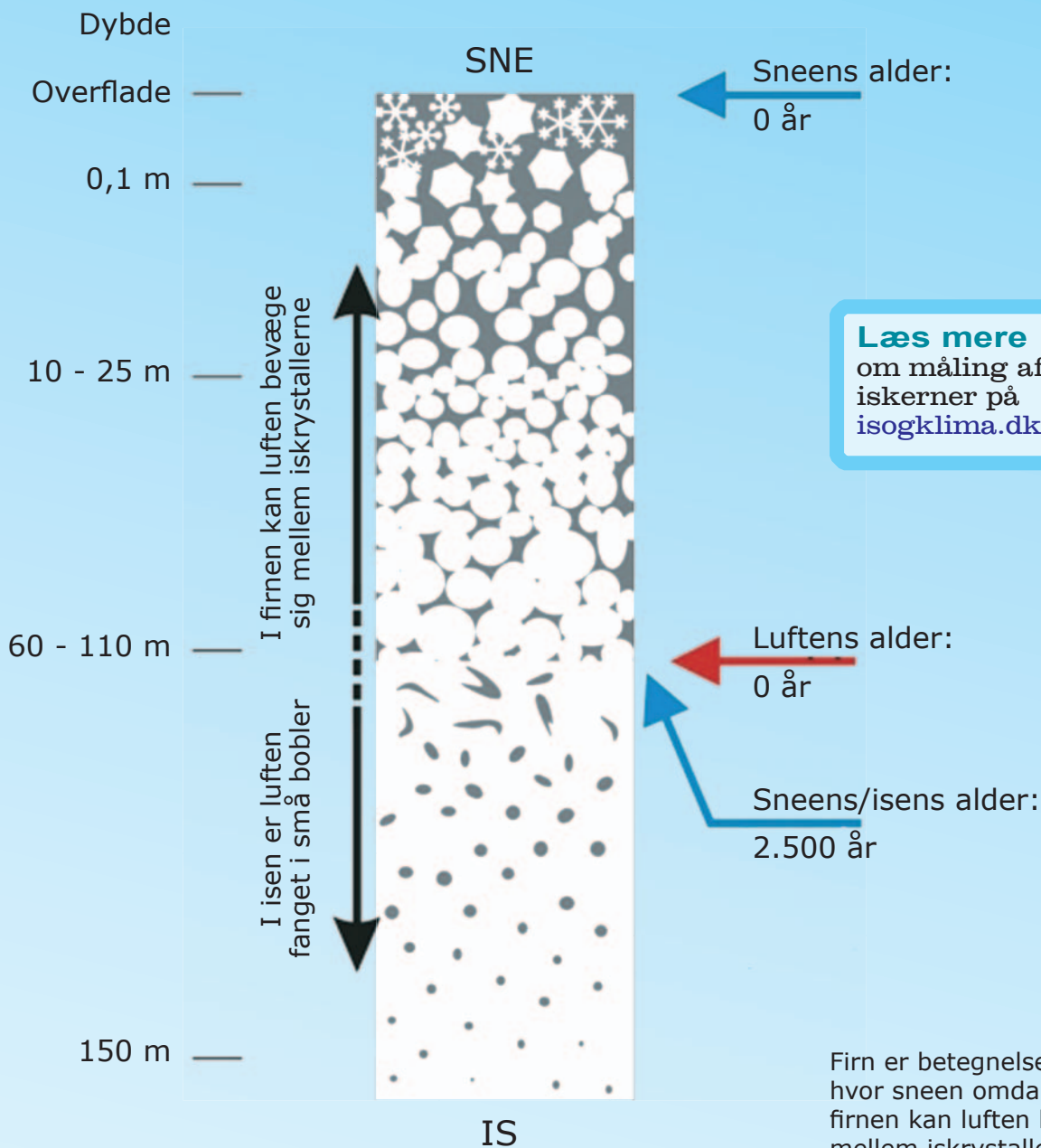
Men hvad var  $\text{CO}_2$ -indholdet i atmosfæren inden 1958? Her kan iskernerne hjælpe, for i den proces hvor sne bliver presset sammen til gletscheris, bliver små portioner atmosfærisk luft fanget mellem iskrystallerne og ender som små bobler, fanget i isen.

Iskerner indeholder et rumfang luft svarende til ca. 10% af iskernens rumfang (ved atmosfærisk tryk), og denne



Målingerne fra Mauna Loa er siden blevet sammenlignet med målinger andre steder i Verden, og det viser sig, at  $\text{CO}_2$ -indholdet på Mauna Loa er tæt på at være repræsentativt for det gennemsnitlige  $\text{CO}_2$ -indhold i atmosfæren.



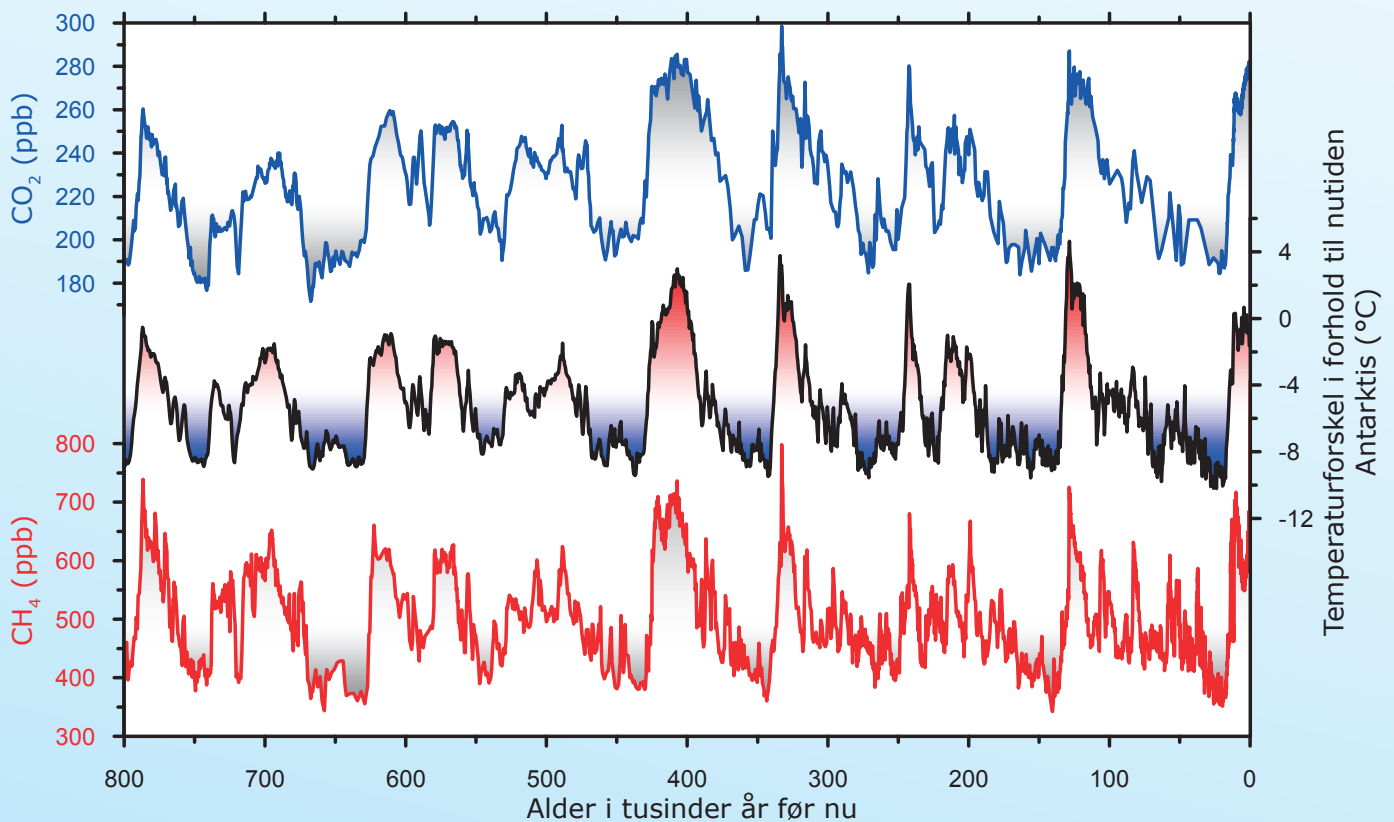


Luft kan forskerne bruge til at bestemme sammensætningen af fortidens atmosfære. En isprøve til dette formål består af omkring et halvt kilo is, der knuses, så de små bobler kommer ud uden at komme i kontakt med flydende vand.  $\text{CO}_2$  er nemlig opløselig i vand, så hvis man smeltede isprøven for at få boblerne ud, ville  $\text{CO}_2$ -indholdet blive ændret. Et højt indhold af urenheder i isen kan også forstyrre målingerne ved at urenhederne reagerer kemisk med  $\text{CO}_2$ . Der er lavere koncentrationer af urenheder i antarktiske end i grønlandske iskerner, da Antarktis vejræssigt er meget isoleret fra resten af verden, og det er derfor de Antarktiske iskerner, der hidtil et blevet brugt til  $\text{CO}_2$ -målinger.

Iskernemålingerne viser, at koncentrationen af  $\text{CO}_2$  naturligt har svinget mellem 180 og 300 ppm gennem de sidste 800.000 år. Koncentrationen, som Keeling i 1958 målte som 315 ppm, var således den højeste værdi i mindst 800.000 år, og siden da er indholdet steget med yderligere 23%. Hvad disse resultater betyder for vores forståelse af Jordens klima, er emnet for næste afsnit.

Firn er betegnelsen for det lag, hvor sneen omdannes til is. I firnen kan luften bevæge sig mellem iskrystallerne. Først ved 60–110 meters dybde er sneen blevet trykket så meget sammen, at luften mellem krystallerne bliver fanget i små bobler, der ikke længere er i forbindelse med atmosfæren. I denne dybde kan alderen af isen være op til mange tusinde år. Der er derfor en forskel på alderen af isen og alderen af luften i boblerne. Den præcise aldersforskel afhænger af mængden af snefald og af temperaturen, og kan være alt fra nogle få hundrede år (ved høj nedbør og høje temperaturer) til mange tusinde år (kolde og tørre områder, fx det centrale Antarktis). På figuren er værdien 2.500 år anvendt, hvilket er værdien for EPICA Dome C-iskernen (se side 21).

# Drivhusgasser og istider



De ældste uforstyrrede islag, der er fundet i en iskappe, stammer fra den såkaldte EPICA Dome C-iskerne og er 800.000 år gamle. Forskerne har i de små bobler i isen målt fortidens atmosfæres indhold af bl.a. CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>, og fra isotopmålinger har forskerne også kunnet rekonstruere temperaturen på Antarktis i denne periode.

Grafen ovenfor viser disse målinger, der rækker tilbage gennem de sidste mange istider og mellemistider. Den blå og den røde kurve viser atmosfærens indhold af de to vigtige drivhusgasser CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>. Den sorte kurve i midten viser temperaturen beregnet fra målte δD-værdier, der ligesom δ<sup>18</sup>O-værdierne afhænger af temperaturen, se side 13.

Det ses klart, at der er store naturlige variationer i mængden af drivhusgasser. For CO<sub>2</sub>s vedkommende svinger indholdet mellem 180 og 300 ppm, mens CH<sub>4</sub>-indholdet gennem de sidste istider har

svinget mellem 340 og 800 ppb. Til sammenligning er CO<sub>2</sub>-indholdet i 2008 386 ppm, mens CH<sub>4</sub>-indholdet er 1790 ppb. Konklusionen er, at menneskeskabte udledninger har bragt atmosfærens tilstand i en situation langt fra de naturlige svingninger, der har domineret de sidste mange istider og mellemistider.

Det er tydeligt på grafen, at indholdet af drivhusgasser følger temperaturændringerne gennem istidssvingningerne. Når man undersøger iskernerne detaljeret (se grafen nederst side 21), ser man, at både temperatur og CO<sub>2</sub>-indhold hver gang bruger ca. 5000 år på at ændre sig fra istidsværdier til mellemistidsværdier, men man opdager også, at temperaturen ved istidernes afslutninger begyndte at stige mange hundrede år før CO<sub>2</sub>-indholdet.

Konklusionen er, at det ikke er stigende CO<sub>2</sub>-indhold, der i Jordens fortid har startet opvarmningerne ved mellemisti-

## Iskerneboringer på Antarktis

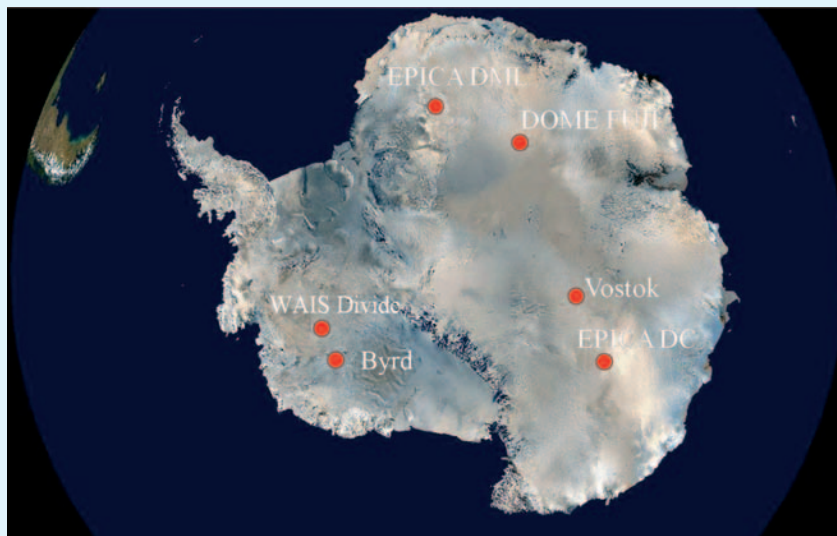
EPICA (*European Project for Ice Coring in Antarctica*) er et fælleseuropæisk iskerneprojekt, der har gennemført iskerneboringer to steder på Antarktis: ved Dome C (DC) og i Dronning Maud Land (DML).

EPICA Dome C-iskernen er boret på et højdedrag, hvor isen er meget tyk, og den årlige nedbør samtidig er meget lav (2–3 centimeter pr. år under dagens forhold). Dette betyder, at islagene er meget tynde og derfor er

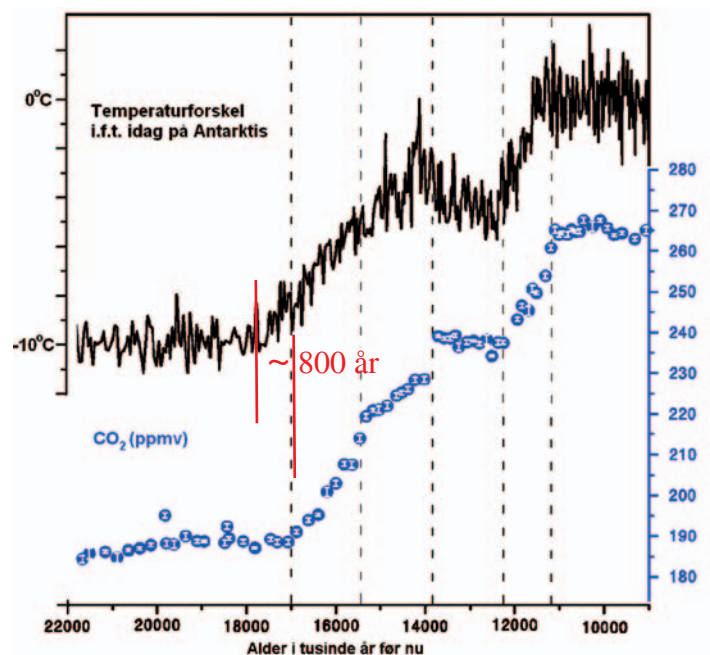
meget gamle nær bunden. Iskernen indeholder 800.000 år gammel is, hvilket er det ældste uforstyrrede is, der hidtil er fundet noget sted i verdens iskapper.

Kortet viser desuden placeringen af udvalgte andre boreprojekter:

- Byrd (amerikansk, 1968)
- Vostok (russisk, 1996)
- Dome Fuji (japansk, 2007)
- WAIS Divide projekt, USA
- startet i 2007



dernes begyndelse, men det betyder på ingen måde at  $\text{CO}_2$  er uvæsentlig. Som beskrevet på side 12 mener klimaforskerne, at det er ændringer i mængden og fordelingen af solstråling på Jorden – Milankovitch-effekten – der starter skiftet mellem istid og mellemistid, men ændringerne er for små til i sig selv at forklare temperaturforskellen mellem en istid og en mellemistid. Her kommer  $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$  ind i billedet, for når temperaturen begynder at stige på grund af øget solstråling, begynder  $\text{CO}_2$ - og  $\text{CH}_4$ -indholdet i atmosfæren at stige, hvilket medfører en forstærket opvarmning, der igen medfører et øget  $\text{CO}_2$ - og  $\text{CH}_4$ -indhold i atmosfæren og så videre. Denne slags forstærkende mekanismer kaldes *tilbagekoblings-* eller *feedback-mekanismer*, og er afgørende for forståelsen af klimasystemets dynamik.



Detaljerede undersøgelser viser, at temperaturen begynder at ændre sig ca. 800 år før  $\text{CO}_2$ -indholdet ved overgangen mellem istid og mellemistid.

# Når klimaet går i selvsving

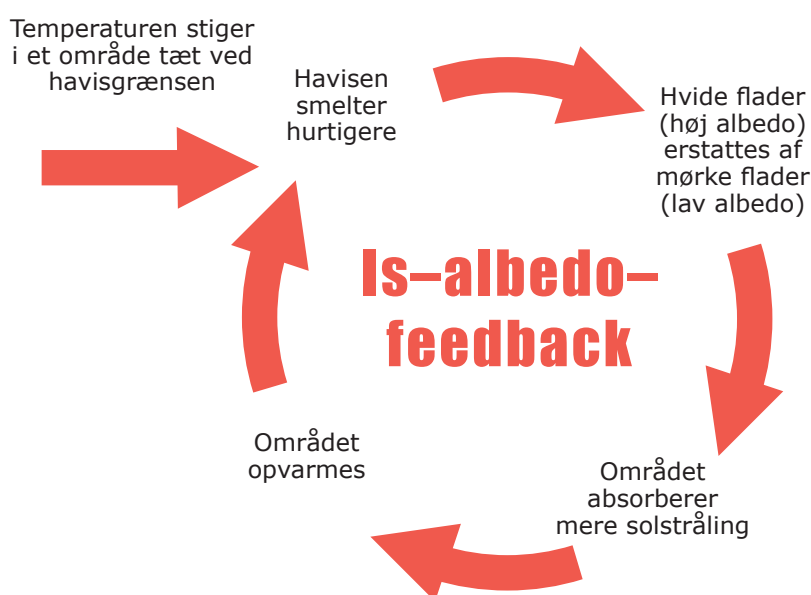
I iskernerne kan forskerne se, at fortidens klimæændringer ofte har været meget bratte og meget voldsomme i forhold til de mekanismer, forskerne mener har forårsaget dem. Fx er temperaturforskellen mellem istider og mellemistider stor i forhold til de ændringer i solindstråling, der sandsynligvis er årsag til ændringerne. I andre tilfælde kan forskerne se, at nogle klimæændringer slår meget kraftigt igennem i nogle særlige områder på Jorden. Fx har det vist sig, at den opvarmning, Jorden har oplevet de sidste hundrede år, slår kraftigst igennem i de polare områder.

For at forstå hvordan klimaet fungerer, er det vigtigt at forstå, at klimaets udvikling afhænger af såkaldte tilbagekoblingsmekanismer eller feedback-mekanismer, som man populært kan kalde lavine-effekter. Når først en lille mængde sne begynder at glide, starter lavinen og forstærker sig selv. Og ændringen er ikke-reversibel, hvilket i lavine-sprog betyder, at vi ikke kan skubbe lidt sne tilbage på plads og derved få lavinen til at løbe tilbage op ad bjerget.

Når klimaet har ændret sig dramatisk i løbet af ganske få år i fortiden, er det fordi, der er feedbacks i klimasystemet, der forstærker små ændringer. Da sidste istid sluttede, var det ret små ændringer i mængden af solstråling på nordlige breddegrader, der startede en opvarmning, der startede lavinen. Disse små ændringer blev blandt andet forstærket af det såkaldte is-albedo-feedback og af et CO<sub>2</sub>-feedback.

## Is-albedo-feedback

Hvis et område nær snegrænsen eller nær kanten af havisen opvarmes en smule, smelter sneen eller isen. Sne og is reflekterer over halvdelen af den solstråling, der falder på overfladen (det er overflader med høj såkaldt albedo), mens hav eller fx våd jord absorberer det meste af strålingen (lav albedo). Når de hvide flader erstattes af mørke flader, bliver albedoen således lavere, og den øgede absorption af solstråling medfører en opvarmning. Opvarmningen vil medføre øget afsmeltning ... og så ruller lavinen.



## Har vi set det før?

Forskerne har godt styr på mange af klimaets vigtigste feedbacks, men hvis fremtidens klima bliver markant anderledes, kan andre processer og feedbacks end i dag meget vel blive vigtige. Forskerne er derfor interesserede i at studere de tidsperioder i fortiden, der minder mest om det klima, vi forventer at få i fremtiden.

Der er to gode kandidater til sådanne perioder:

- Under den forrige mellemistid, Eem-tiden, var Grønland nogle grader varmere end i dag, og havniveauet var mindst et par meter højere end i dag. Den grønlandske NEEM-boring (se side 7) går målrettet efter at skaffe en iskerne, der kan bruges til at undersøge Eem-tidens klima år for år.

- Mellemistiden for 420.000 år siden (se side 20) var lang og varm, og solstrålingens mængde og fordeling på Jorden minder meget om den situation, vi har på Jorden i dag. Denne mellemistid kan på grund af alderen kun studeres i de antarktiske iskerne, hvor lagene er meget tynde, men kan alligevel give forskerne information om hvordan fremtidens klima kan komme til at se ud.

Fortidens klima kan give os vigtig viden om klimaets dynamik, men man skal være opmærksom på at menneskeheden gennem sine påvirkninger af klimaet har ændret på forudsætnin-gerne for, hvordan klimaet varierer. Derfor kan studier af fortidens klima ikke stå alene, når vi vil prøve at forudsige, hvordan fremtidens klima bliver.

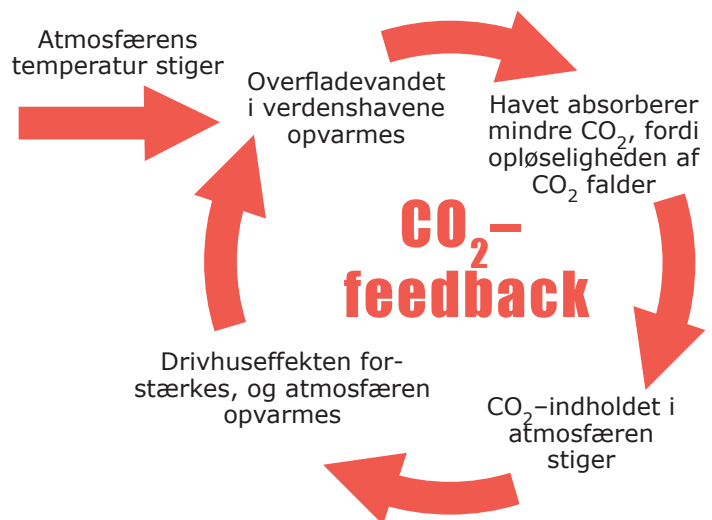
Læs mere om NEEM-projektet på [www.neem.ku.dk](http://www.neem.ku.dk)

## CO<sub>2</sub>-feedback

CO<sub>2</sub> kan opløses i havvand, men opløseligheden (dvs. mængden der kan opløses), afhænger af temperaturen. Når temperaturen i atmosfæren stiger, opvarmes havet, og opløseligheden af CO<sub>2</sub> i oceanerne falder. Oceanet optager derfor mindre CO<sub>2</sub>, og derved stiger CO<sub>2</sub>-koncentrationen i atmosfæren, hvilket igen medfører øget opvarmning.

Metan (CH<sub>4</sub>) indgår i en tilsvarende feedback-mekanisme, hvor opvarmningen betyder, at områder med permafrost begynder at tø og frigiver CH<sub>4</sub>, der forstærker opvarmningen.

I alle tre tilfælde er resultatet, at en lille opvarmning starter en kæde af ændringer, der forstærker opvarmningen. Fordi små ændringer forstærkes, kaldes mekanismerne positive feedbacks, men der findes også negative feedbacks, der bremser eller modvirker ændringer. Et eksempel herpå er skydannelse: En overfladeopvarmning medfører øget fordampning, der giver øget skydannelse. Da skyer reflekterer solstrålingen, vil øget skydække medføre en reduktion i mængden af modtaget solstråling, hvilket giver en afkøling, der altså modvirker den oprindelige opvarmning.



Feedbacks kan altså både være med til at accelerere klimaændringer og til at stabilisere klimaet. Klimasystemet indeholder en overvældende mængde feedbacks, der kobler forskellige dele af klimaet sammen. Det er også derfor klimamodeller er vigtige for at kunne forstå klimaet: intet menneske kan overskue alle de samtidigt virkende mekanismer og feedbacks i klimasystemet, men ved at formulere sammenhængene matematisk-fysisk kan forskerne bruge computermodeller til at finde ud af, hvilke mekanismer og feedbacks, der er de vigtigste.

## Naturvidenskab for alle

er udgivet af Fysikforlaget med støtte fra Hovedstadens Udviklingsråd og Undervisningsministeriets tips/lotto midler.

Redaktion, illustrationer og layout:  
Niels Elbrønd Hansen

Forfatter:  
Sune Olander Rasmussen

Produktionsgruppe:  
Ole Ahlgren  
Mikkel Rønne

Tryk:  
Zeuner Grafisk as, Odder

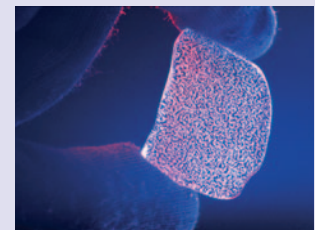
Oplag: 10.000

### Billedleverandører:

Center for Is og Klima  
– 2, 5, 6, 8, 20, 24  
Hans Oerter, Alfred Wegener  
Institute, Tyskland – 1, 4  
Langway, The history of early  
polar ice cores, US army – 3  
NASA – 18  
SnowCrystals.com – 5  
Steffen M. Olsen / DMI – 12  
Willi Dansgaard,  
Frozen Annals – 3

Forlaget har søgt at finde frem til alle rettighedshavere i forbindelse med brug af billeder. Skulle enkelte mangle, vil der ved henvendelse til forlaget blive betalt, som om aftale var indgået.

Salg: Lmfk-Sekretariatet  
Slotsgade 2, 3. sal  
2200 København N  
[www.lmfk.dk](http://www.lmfk.dk)  
Tlf. 35 39 00 64



[www.nfa.fys.dk](http://www.nfa.fys.dk)

*Iskerner – vindue til fortidens klima* er et ud af en række hæfter med undervisningsmateriale udarbejdet til Naturvidenskabeligt grundforløb. Hæftet er udformet, så det også kan anvendes i Almen studieforberedelse og i individuelle fag. Hæftets afsnit lægger i høj grad op til et samarbejde med andre fag.

Hæftet introducerer nogle grundlæggende naturvidenskabelige begreber og metoder og giver mulighed for samarbejde mellem alle de fire naturvidenskabelige fag, men der kan også laves forskellige undervisningsforløb, som vægter fagene forskelligt. Til hæftet er knyttet en hjemmeside, [www.nfa.fys.dk](http://www.nfa.fys.dk), hvor det er muligt at finde yderligere datamateriale, forslag til undervisningsforløb, eksperimentelle undersøgelser, opgaver og uddybninger.



NGRIP-lejren på Grønlands indlandsis



Iskerne på vej ud af boret

Iskerne skæres til prøver, der analyseres i laboratorierne

Boret er lige kommet op fra dybet med en friskboret iskerne

ISSN 1901-869X



9 771901 869003