



KØBENHAVNS
UNIVERSITET

JAGTEN PÅ KLIMAETS TIDSKAPSLESER

Niels Bohr Institutet står i spidsen for international forskning, der afdækker fortidens miljø og klima.



I mere end 50 år har forskere fra Niels Bohr Institutet gennemført kampagner, der skal skaffe viden om fortidens miljø og klima ved hjælp af prøver hentet fra den grønlandske indlandsis.

DERFOR ER FORTIDENS KLIMA VIGTIGT

Inden for de næste ti til tyve år skal vi træffe meget vidtrækkende beslutninger. De bør træffes på baggrund af fakta.

Klimaet står allerede højt på dagsordenen. For eksempel er politikernes holdninger til klimapolitik begyndt at få betydning for resultatet af valg handlinger i mange lande, også i Danmark. Alligevel har vi kun set begyndelsen. Skal man tro forskerne, vil der inden for de næste ti til tyve år optræde så dramatiske forandringer i klimaet, at det uomgængeligt vil få store konsekvenser for vores levevis.

Ligesom i mange andre sammenhænge vil det være mere effektivt, billigere og mindre belastende for den enkelte at indlede den nødvendige omstilling i god tid frem for først at handle, når det næsten er for sent, og panikken har indfundet sig.

Derfor er det en uhyre vigtig opgave, som klimaforskerne har påtaget sig. Jo tidligere, og jo mere præcist, man kan fastslå konsekvenserne af udviklingen, jo før vil det være muligt at skabe forståelse for, hvad det er nødvendigt at gøre. Både med hensyn til at mindske den

menneskeskabte påvirkning af klimaet og hvad angår foranstaltninger, der kan afbøde tab af menneskeliv og samfundsværdier på grund af de ændringer, som det allerede er for sent at stoppe.

Med dette skrift håber vi at give et indblik i de resultater, som klimaforskningen har skabt. Vi vil gerne vise bredden af instituttets forskning inden for klima. Samtidig også den fascinerende side af forskningen med det slet skjulte formål at få flere unge til at interessere sig for feltet. Der er brug for, at de skarpeste unge hjerner er med til at skabe den viden, der gør, at nogle af de vigtigste og mest vidtrækkende beslutninger, som skal træffes i de næste to årtier, er baseret på et solidt grundlag.

God læsning!

Jan W. Thomsen
Professor, Institutleder, Niels Bohr Institutet



*Gammel is kan give os ny viden.
Koordinator Iben Koldtoft, NBI,
undersøger en iskerne-prøve.*

EN VERDEN GRAVET NED I INDLANDSISEN

Dybe borer i Grønland skaffer forskerne indblik i klimaet for mere end 100.000 år siden.

Otte meter under overfladen af den grønlandske indlandsis gemmer der sig en anden verden. Gennem gange, der har vægge af sne, når man frem til noget, der minder om et produktionsmiljø i en virksomhed. Dog med den forskel, at her er meget koldt.

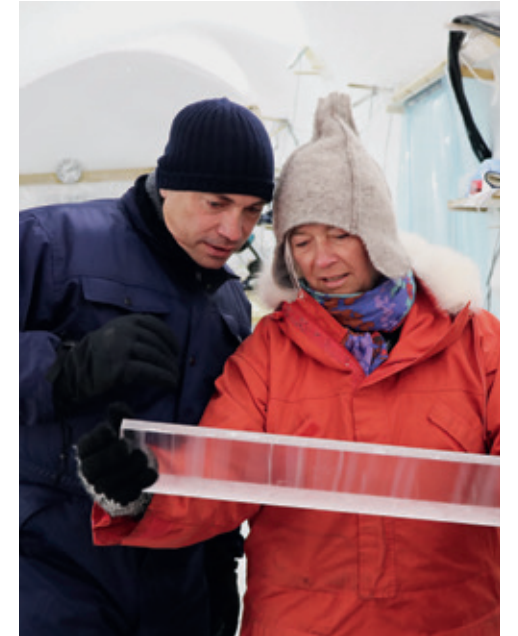
Produceret bliver her. Med et par timers mellemrum dukker en ny iskerne med en diameter på ca. 10 cm. og længde på 2,5 meter op fra dybet. Forskere i polarudstyr går straks i gang med at skære kernen op. Herefter laver de en indledende undersøgelse, som bestemmer indholdet af en række kemiske komponenter i iskernen. Senere bliver isstykkerne sendt til laboratorier, hvor andre forskere har mulighed for at udføre mere detaljerede målinger.

”Det vigtigste formål med arbejdet er at skaffe viden om tidligere tilstande og skift i Jordens klima, så vi kan blive i stand til at forudsige effekterne af de ændringer, som udfolder sig i nutiden,” siger Dorte Dahl Jensen, professor ved NBI. Hun har stået i spidset for en række iskerne-boringer i Grønland.

Forskernes værktøj til at forudsige fremtidige ændringer er computer-modeller.

”Modellerne virker kun, hvis de bygger på en korrekt forståelse af de underliggende sammenhænge. I dette tilfælde især forståelse af de mekanismer, som træder i kraft, når indholdet af drivhusgasser i atmosfæren stiger.

Samtidig er det helt afgørende, at man kan afprøve modellerne på rigtige data. Information om, hvordan klimaet har udviklet sig tidligere,



Professor Dorte Dahl-Jensen, NBI, har ledet en række borekampagner i Grønland. Billedet er fra 2018, hvor daværende uddannelses- og forskningsminister Tommy Ahlers var på besøg.

er den ”facitliste”, som vi kan gå ud fra, når vi beskæftiger os med nutidens klima,” forklarer Dorte Dahl Jensen.

På toppen af indlandsisen er der to til tre kilometer ned til underlaget. Det kan oversættes til, at den is, som ligger længst nede, er dannet for mere end 100.000 år siden. Med andre ord kan studierne af iskerner give information om klimaet meget længere tilbage end de ca. 150 år, hvor vi har haft meteorologiske målinger.

Is, der er hentet fra de dybeste lag af den grønlandske indlandsis, kan være dannet for mere end 100.000 år siden

PORTRÆT AF EN KOLD PLANET

De grønlandske iskerner fortæller, at der før er sket markante stigninger i temperaturen. Dog aldrig under varme perioder som den, vi lever i nu.

Er de klimaændringer, som vi oplever nu, meget usædvanlige eller ligner de forandringer, der er indtruffet i fortiden, og som livet på Jorden har været i stand til at tilpasse sig?

Sådan lyder tusind-dollar spørgsmålet til forskningen i det forhistoriske klima. Selvom spørgsmålet er ret enkelt, er svaret komplekst.

”På den ene side fortæller de grønlandske iskerner, at der tidligere er indtruffet meget dramatiske ændringer i klimaet. Endda større end dem, vi ser nu. Men på den anden side er det helt usædvanligt at se temperaturen stige markant under en periode, som den vi befinder os i, ” siger Dorthe Dahl Jensen, professor ved NBI.

”Det er tankevækkende, at hele den menneskelige civilisations historie, dvs. alt hvad der har med agerbrug og bysamfund at gøre, er foregået i de seneste 8.000 år, hvor klimaet har været meget stabilt. Derfor har vi en tendens til at tænke, at sådan som klimaet er nu, har det altid været. Men det er slet ikke tilfældet!”

Fortidens klima har vekslet mellem istider, der varede ca. 100.000 år, og varme mellemistider på ca. 10.000 år. Indlandsisen er vokset under istiderne, hvor havet sank 130 meter. Alt det vand, der forsvandt fra havet, indgik i iskapper over for eksempel Grønland, Nordeuropa og Amerika. I varme perioder smeltede isen, og havet steg.



Lektor Bo Vinther, NBI, renses en iskerne overflade inden måling af isens syre-indhold. Indholdet af syre kan afsløre, om der er vulkanske lag i isen.

ANDRE PLANETER PÅVIRKER VORES KLIMA

Indlandsisen har været der den sidste million år. Men med den klimaopvarmning, vi får i fremtiden, vil isen skrumpes og havet stige. Hvor meget og hvor hurtigt er yderst vigtige spørgsmål at svare på.

Den vigtigste forklaring på forskellen mellem istider og mellemistider finder man i astronomien. Jorden er som bekendt ikke alene i Sol-systemet. Tyngdekraften fra de øvrige planeter og deres måner trækker i os. Det betyder, at Jordens bane om Solen ikke er konstant. Det er muligt at udregne den nøjagtige bane både frem og tilbage i tiden, fordi masse, hastighed og baner af de forskellige himmellegemer er kendte.

Jordens årstider skyldes, at Jordens akse er vippet, så polerne i løbet af et år skiftevis peger ind mod Solen og væk fra Solen. I løbet af mange tusinde år vipper Jordens akse lidt op og ned. Det er med til at give udsving i temperaturerne på de høje breddegrader og medføre store klimavariationer som eksempelvis istiderne.

Teorien om, at klimaet bestemmes af Jordens bane og rotation, kaldes Milankovitch-teorien efter den serbiske astronom Milutin Milankovitch og er i dag alment accepteret.

”Teorien passer fint med klimaændringerne langt tilbage i tiden. Imidlertid kan den ikke forklare den udvikling, som vi ser nu. Den mellemistid, som vi lever i, har allerede været 11.700 år, og temperaturen skulle ikke stige. Men det kan vi se, at den gør,” siger Dorthe Dahl Jensen. ”Teorien passer fint med klimaændringerne langt tilbage i tiden. Imidlertid kan den ikke forklare den udvikling, som vi ser nu. Den mellemistid, som vi lever i, har allerede været 11.700 år, og temperaturen skulle ikke stige. Men det kan vi se, at den gør,” siger Dorthe Dahl Jensen.

HOP I TEMPERATUREN UNDER ISTIDEN

Ud fra iskernerne kan klimaforskerne fastslå, at der var mange klimaskift i løbet af den seneste istid, der varede fra 115.000 år før nu til 11.700 år før nu. Skift, som ikke havde noget at gøre med ændringer i Jordens bane.

Under istiden var den globale temperatur ca. 5 grader °C koldere end nu. Over iskapperne var det betydeligt koldere - nærmere bestemt 25 °C koldere end nu. Imidlertid var der perioder af få tusind års varighed, hvor klimaet blev markant mildere end den rigtigt kolde istid. I alt kan man se 25 af den type stigninger i perioden. De har fået navnet Dansgaard-Oeschger begivenheder (forkortet D-O-begivenheder). De er opkaldt efter NBI-forskeren Willi Dansgaard og kollegaen Hans Oeschger fra Berns Universitet i Schweiz, som først påviste dem ud fra studierne af iskerner.

Takket være den meget store nøjagtighed, som målingerne af iskerner giver, er det muligt at sige, at de pludselige opvarmninger indtraf inden for ganske få årtier. D-O-begivenhedernes eksistens viser, at klimasystemet under istiden var overraskende ustabil, og at klimaforandringer kan ske meget hurtigere, end man hidtil havde antaget.

Forklaringen kom, da man også begyndte at undersøge iskerner fra Antarktis.

”Mens Grønland og Antarktis glider ind og ud af selve istiderne på samme tid, er de ude af takt med hensyn til D-O-begivenhederne. Det viste sig, at når Grønland blev koldere ved D-O-begivenheder, blev Antarktis varmere. Og omvendt. Det lader til, at når Grønland er i de varme faser under istiden, vil havstrømmene i Atlanterhavet føre varme fra den sydlige til den nordlige halvkugle,” siger Thomas Blunier, professor ved NBI.

Når Grønland er i en kold fase under istiden, bremses havstrømmene. Derved bliver

varmen i syd, så der sker opvarmning sydpå og afkøling nordpå. Efter en periode med meget kolde forhold mod nord sker der meget pludselige opvarmninger på 10-16 °C i det nordlige - en D-O-begivenhed. Havstrømmene starter igen, og der går et par tusinde år, før klimaet i nord atter bliver meget koldt.

MENNESKET HAR INDFLYDELSE PÅ KLIMAET

Det er ikke kun temperaturen, som kan observeres i istidens is. Mange andre af klimaets komponenter ændrer sig også voldsomt. I istids-isen er der et højt indhold af støv. En mulig forklaring kan være, at der har været større områder med ørken dengang. Det er også muligt, at arealet af Jordens landarealer har været større på grund af den lavere vandstand i havene under istiden. Også havisen ændrer sig med D-O-begivenheder. I iskernerne kan man se store ændringer i mængden af havis på den nordlige halvkugle.

”De store og pludselige stigninger og fald i temperaturen under D-O-begivenheder er dramatiske. Det ville formentlig være katastrofalt, hvis vi fik dem i den nuværende periode, hvor klimaet i forvejen er varmt. Men heldigvis ser det ud til, at D-O-begivenheder kun kan ske som en del af en istid,” siger Dorthe Dahl Jensen.

”Nu er vi i en mere stabil mellemistid, og målingerne fra iskernerne finder ikke D-O-begivenheder i fortidens varme mellemistider. Den opvarmning, vi har nu, er helt anderledes og hænger sammen med menneskets aktiviteter.”

Perioden fra for 8.000 år siden til for 5.000 år siden var varm. Her var temperaturen ca. som det, vi nu har fået på grund af den nuværende globale opvarmning. Men samlet set hen over de seneste 8.000 år er klimaet langsomt blevet køligere. Lige indtil for 50 år siden.

”På baggrund af, at temperaturen er faldet gennem de seneste 8.000 år er det meget påfaldende, at vi har set en markant stigning i temperaturen de seneste 50 år. Det kan kun forklares med, at menneskets aktiviteter for første gang har direkte indflydelse på klimaet,” siger Dorthe Dahl Jensen.

”Samtidig er den helt store forskel i forhold til tidligere klimaændringer, at vi nu er langt flere mennesker på planeten. Det giver i sig selv langt mindre sandsynlighed for, at der kan finde store forandringer i klimaet sted uden, at det vil gå voldsomt ud over mennesker.”

DA FORTIDENS KLIMA BLEV EN VIDENSKAB

For klimaforskerne ved Niels Bohr Institutet har det været fast arbejde gennem mere end 50 år at bore iskerner på forskellige steder i den grønlandske indlandsis. Det hele begyndte i 1952, da Willi Dansgaard, som dengang var en ung forsker på instituttet, fandt en metode til at undersøge regnvand. Et vandmolekyle består som bekendt af to brint-atomer og et ilt-atom. Men ikke alle ilt-atomer i vand er ens. Ganske vist er langt de fleste ilt-atomer af isotopen ^{16}O , men isotopen ^{18}O forekommer også. Dansgaards opdagelse var, at skyernes temperatur på det tidspunkt, hvor nedbøren faldt, har indflydelse på forholdet mellem ^{16}O og ^{18}O . Jo koldere vand, jo mindre ^{18}O .



Foto: Angela Blumen

Den grønlandske indlandsis består af sne, der er presset sammen til is gennem tusindvis af år.

I 1954 fandt Willi Dansgaard på, at man kunne bruge den samme metode til at analysere gamle prøver af is. Den grønlandske indlandsis består af sne, der er presset sammen til is gennem tusindvis af år. Med Dansgaards metode kan man se, hvad temperaturen var på stedet, dengang nedbøren faldt. Samtidig kan man bestemme isens alder. Lige som det er muligt at tælle årringene på et træ, vil vandisotoperne og urenhederne i isen vise årlige svingninger, der gør det muligt af se de enkelte år ned gennem isen. Ved at sammenholde de to oplysninger – isens alder og temperaturen på det tidspunkt – er det muligt at få viden om klimaets udvikling langt tilbage i tiden.

På den måde lagde Willi Dansgaard i sin tid grunden til et nyt forskningsområde, som fik navnet iskerne palæoklima – forhistorisk klima.



STOR USIKKERHED OM HAVETS VANDSTAND

Sammen med internationale partnere arbejder klimaforskerne på NBI intensivt på at forudsige klimaforandringernes effekter på havet med større nøjagtighed.

Ændringer i havets strømning havde stor betydning for fortidens klima. Det så forskerne tydeligt, da de skulle forklare de såkaldte D-O-begivenheder, hvor temperaturen hoppede i vejret under den seneste istid. Også i dag er det helt afgørende at forstå havenes rolle i klimasystemet. Det er et kerneområde for klimaforskerne på NBI.

”Der er en udvikling i gang, hvor isen smelter, og havet stiger. Det er alvorligt ikke mindst for et land som Danmark, der har hundredvis af øer og mange lavtliggende områder,” konstaterer lektor Aslak Grinsted, NBI.

Alle danske kommuner har en handlingsplan for oversvømmelser. I Danmark er prognosen, at havet i år 2100 vil være steget 60 cm med en usikkerhed på plus/minus 60 cm. Det vil altså sige en stigning mellem 0 og 120 cm.

”Det bliver tit kaldt verdens farligste usikkerhed, at vores bud på havvandsstigningen har så stort et spænd,” siger Aslak Grinsted.

Langt den største usikkerhed ligger i beregningen af, hvor meget is, der smelter fra de store iskapper på Grønland og Antarktis. De store iskapper afgiver is og vand til havet på især to måder. Dels sker der afsmeltning langs randen af iskapperne, dels flyder isen ud mod kysterne, hvor isen møder det varmere havvand, hvilket fører til, at nye isbjerge kælder fra gletsjerne. Begge processer har fået mere fart som følge af den globale opvarmning.

Is-modelleringsgruppen ved NBI arbejder med fysiske modeller for isens flydning og for, hvor meget isen smelter. Modellerne bliver forbedret gennem observationer fra isen.

”Iskapper og gletsjere overvåges fra satellitter året rundt. På den måde kan man følge isens flydning og se ændringer i isens areal. Imidlertid er der mange vigtige processer, som man ikke kan observere fra rummet,” siger Aslak Grinsted og fortsætter:

”Hvor meget sner det? Hvor hurtigt flyder isen? Hvordan flyder isen i en is-strøm? Alle de processer skal forstås for at forbedre modelleringen og bringe usikkerheden på havvandsstigningen ned. Stærk fysisk viden og et globalt samarbejde med andre forskningsgrupper skaber resultater, der er vigtige i beskyttelsen af Danmark fremadrettet”.

Han tilføjer, at selve vandstanden kun er et af aspekterne af klimaforandringernes betydning for havet:

”Vi forsker også intensivt i, hvilken betydning udviklingen vil få for eksempelvis risikoen for voldsomme oversvømmelser forårsaget af højvande, storme og store bølger.”

Hvor hurtigt smelter isen? Og hvor meget vil det få havene til at stige? Svarene har stor betydning for vores chancer for at tilpasse os klimaforandringerne.



VERDENSKENDT CENTER FOR KLIMAFORSKNING

Forskningen i fortidens klima er forankret i centeret PICE – Physics of Ice, Climate and Earth – ved Niels Bohr Institutet. Centerets forskere analyserer iskernerne i laboratoriet for indholdet af en række forureninger og naturligt forekommende stoffer. De ser også på isens fysiske egenskaber, isens flydning og udviklingen af iskapperne. De mange data bliver sammenholdt med computermodeller for klimasystemet. Forskningen involverer en række discipliner som meteorologi, oceanografi samt geofysik. Geofysik handler blandt andet om at studere Jordens indre ud fra seismiske data og målinger af tyngdekraft og magnetfelter fra satellitter. PICE er verdenskendt som et aktivt og spændende forskningscenter.

KLIMAUDDANNELSE

Københavns Universitet tilbyder en alsidig, forskningsbaseret uddannelse med mulighed for at fordybe sig i mange forskellige klimaspørgsmål:

- Hvad er vejr og klima, og hvordan beskriver man vejr og klima i modeller?
- Hvad betyder isen for Jordens klima, hvordan beskriver man isens flydning, og hvordan har iskapperne ændret sig gennem tiden?
- Hvad betyder havet for vores klima, og hvordan beskriver man havets dynamik?
- Hvordan ser Jordens indre ud? Og ser det indre af andre planeter og måner ligesådan ud?
- Hvad betyder drivhusgasserne for vores klima
– kan man bruge viden fra fortiden til at forstå mere?
- Hvordan spiller alle delene af klimasystemet sammen?

“På uddannelsen i klimaforandringer får man detaljeret viden om klimasystemet og lærer om de gennemgribende konsekvenser af klimaforandringerne. Den forståelse er afgørende for, at der bliver taget de rigtige samfundsmæssige beslutninger,” sammenfatter Anders Svensson, lektor ved NBI og studieleder for uddannelsen i klimaforandringer ved Københavns Universitet.

Næsten magisk. Det kræver et større detektivarbejde at se ud fra en flere tusinde år gammel iskerne, hvordan klimaet har været på det tidspunkt.



På vej mod dybet. Boret gøres klar.

VULKANUDBRUD ER PEJLEMÆRKER FOR KLIMAFORSKERNE

Vulkanske udbrud er lette at kende i isen. Derfor fungerer udbruddene som pejlemærker, der gør det muligt for forskerne at sammenligne forskellige datasæt. De store vulkanudbrud har spredt så meget svovl og andre karakteristiske kemiske stoffer i atmosfæren, at man både kan spore dem i grønlandsk og antarktisk is, ligesom de også kan genkendes i helt andre typer af prøver.

Desuden har vulkanudbrud faktisk en betydning for klimaet. Svovlpartiklerne fra vulkanudbrud skygger for indstrålingen fra Solen og bidrager på den måde til at sænke temperaturen.

”Ud fra iskernerne kan man både spore vulkanudbruddene og se, hvordan temperaturen har været på det tidspunkt. Det kan vi bruge til at undersøge, hvor meget et stort vulkanudbrud er i stand til at køle vores klima,” siger Helle Astrid Kjær, adjunkt ved NBI.



GRØNLAND SOM CENTRUM FOR IS-FORSKNING

Niels Bohr Institutets bore-kampagner på indlandsisen har kun været mulige i kraft af et langvarigt samarbejde med Grønlands Selvstyre og mange engagerede grønlandske enkeltpersoner. Samarbejdet har blandt andet omfattet repræsentation i en række internationale komiteer, studenterudveksling og foredrag. Et af højdepunkterne er forarbejdet til Ilulissat Icefjord Centre, hvor besøgende kan få indsigt i indlandsisen og isens sammenhæng med klimaet og samtidig en ekstraordinær naturoplevelse.

FORURENING KAN SPORES I ISEN

Ser man på den nyere tid, er svovl og nitrat ikke nødvendigvis tegn på vulkanudbrud. Siden industrialiseringen begyndte, er det mere sandsynligt, at stofferne er udledt fra fabrikker. I det hele taget er den kemiske sammensætning af sneen blevet markant anderledes. For eksempel er koncentrationen af ammoniak, der skyldes brugen af kunstgødning, klart forhøjet.

For langt de fleste forureninger i isen er mængden steget gradvis op gennem de seneste 150 år. Der er dog også markante undtagelser. En af dem er menneskeskabte ozonlags-nedbrydende stoffer, med freon som det mest kendte. Stofferne blev forbudt ved en international aftale, Montreal-protokollen, og iskernerne bevidner, at aftalen har været effektiv.

”Iskerne er geniale her, fordi vi kan lave tidsserier af kemiske komponenter, der rækker længere tilbage, end vi selv har målt. Derfor kan vi klart kortlægge den menneskeskabte forurening,” forklarer lektor Anders Svensson, NBI.



Boringerne på indlandsisen foregår altid som kampagner, hvor forskere fra mange lande deltager.



ER KLIMAET KAOTISK?

De pludselige og voldsomme forandringer i fortidens klima udfordrer forudsigelser af fremtidens klimaforandringer.

“Klimaet er det, du forventer, mens vejret er det, du får.”

Sådan lyder et gammelt mundheld. En anden måde at sige det på er, at klimaet er et gennemsnit af, hvordan vejret er over lang tid.

Det er muligt at beskrive matematisk, hvordan de luftmasser, som optræder på et givent tidspunkt, vil bevæge sig i de kommende par dage. Dermed er det også muligt at forudsige et par dage frem i tiden, hvordan vejret vil udvikle sig.

“Luftens bevægelse er i høj grad kaotisk. Derfor kan man vanskeligt forudsige vejret langt frem i tiden,” siger Peter Ditlevsen, professor på NBI.

“Men selvom vi ikke ved, om det vil regne til Sankt Hans eller sne til jul, kan vi angive sandsynligheden for det. Og vi kan med meget stor sandsynlighed sige, at det vil være koldere til jul end til Sankt Hans. Klimaforandringer er udtrykt ved, at disse sandsynligheder og gennemsnit ændrer sig.”

Grundlæggende minder klimamodeller om de modeller, der bruges som udgangspunkt for vejrudsigter. Når forskerne forsøger at forudsige, hvordan klimaet vil ændre sig som følge af øget CO₂-indhold i atmosfæren, fodrer de modellerne med de forventede data for CO₂. De sætter først computeren til at regne på, hvordan vejret vil udvikle sig eksempelvis 100 år frem i tiden. Derefter udregnes gennemsnittet af dette vejr – klimaet.

“Hvis påvirkningen af klimaet bliver så stor, at en bestemt tærskelværdi for et såkaldt tipping point overskrides, eller hvis summen af små tilfældige klimapåvirkninger bliver tilstrækkeligt stor, kan klimaet springe til en ny tilstand. Muligheden for forudsigelse af sådanne spring kan vi vurdere ved at undersøge nøje, hvordan der er sket spring i klimaet i fortiden. På NBI udvikler og anvender vi fundamentale teorier om dynamiske og komplekse systemer, der bruges til at forstå klimaet,” siger Peter Ditlevsen.

VARMEPUMPEN I ATLANTERHAVET

En havstrøm i Atlanterhavets overflade fører vand fra syd til nord, mens der i ca. en kilometers dybde strømmer vand retur. Denne cirkulation har to stabile tilstande, som man kan kalde “on” og “off”.

“Vi befinder os i “on” tilstanden. Kommer vi derimod over i “off”, vil det give et meget koldere europæisk klima svarende til det, der er på den amerikanske vestkyst ved Alaska, hvor der ikke er nogen varmepumpe i Stillehavet,” forklarer Peter Ditlevsen.

I et nyt studie har Peter Ditlevsen sammen med postdoc Johannes Lohmann påvist, at hurtige ændringer i forhold af betydning for klimaet kan have større konsekvenser i forhold til langsomme ændringer. Studiet ser på, hvordan mængden af smeltvand fra den grønlandske indlandsis og smeltende isbjerge påvirker styrken af havstrømmene i Atlanterhavet.

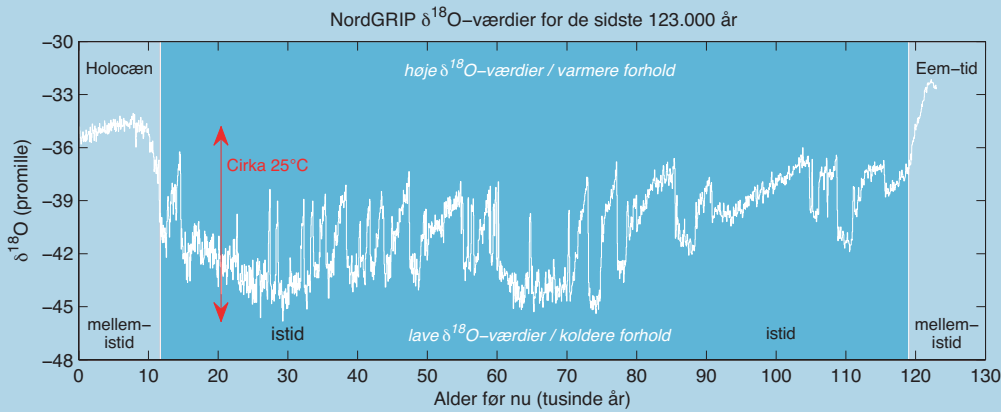
”Ifølge klimamodellerne eksisterer der et tipping point, hvor mængden af smeltevand bliver så stor, at den dominerende strømning i det nordlige Atlanterhav går i stå. I vores studie kunne vi se, at i situationer, hvor mængden af smeltevand stiger pludseligt, kan det få havstrømmen til at gå i stå, selvom den samlede mængde af smeltevand egentlig er lavere end det tipping point, som var forudsagt i klimamodellerne,” siger Peter Ditlevsen.

HURTIGE ÆNDRINGER RAMMER HÅRDERE
Med andre ord er det ikke kun størrelsen af en forandring, der betyder noget, det kan også være hastigheden.

”Tilsyneladende har vi altså desværre mindre spillerum end vi tidligere antog for at undvige tipping points, når der er tale om hurtige ændringer,” konkluderer Peter Ditlevsen.

Hurtige ændringer er netop, hvad vi ser i nutiden. Studierne af iskernerne viser, at siden industrialiseringen begyndte, har menneskeheden fået CO₂-indholdet i atmosfæren til at stige lige så meget, som det steg efter den seneste istid. Forskellen er bare, at dengang tog det 8.000 år- fra for 18.000 år siden til for 10.000 år siden. Denne gang har det blot taget 150 år.

”Vi er langt fra balance mellem temperatur og CO₂ indhold nu. Vi har lagt en varmepude over os med en levetid i atmosfæren på 100 år. Vi har derfor programmeret en opvarmning, vi ikke kan stoppe. Som i fortiden fører den selvforstærkende effekt til en ond cirkel, hvor mere CO₂ giver højere temperatur, som igen giver mere CO₂ og så videre,” siger Peter Ditlevsen.



Ændringer i sammensætningen af ilt-isotoper i vand-molekyler kan oversættes til udsving i temperaturen. I det centrale Grønland har temperaturen ved isens overflade i de koldeste perioder af den seneste istid været ca. 26 grader lavere end i dag. Det svarer til, at den globale middeltemperatur har været 3-5 grader lavere end i dag.

NYT CENTER FORSKER I TIPPING POINTS

Risikoen for, at de fremtidige klimaforandringer bliver voldsomme og umulige at standse, altså et ”point of no return”, er ikke velforstået. Dette er fokus for et stort internationalt forskningscenter, TiPES, som står for ”Tipping Points in the Earth System”. Centeret består af omkring 100 forskere i Europa og ledes fra NBI af professor Peter Ditlevsen.

Udtrykket Tipping Points – eller vendepunkter – dækker over tærskelværdier, hvor en ellers jævn udvikling pludselig løber løbsk. En af centerets vigtigste metoder består i at afdække tipping points i fortidens klima, og bruge dem til at korrigere klimamodellerne, så vi får bedre forudsigelser af fremtidens klima.

Tipping points har at gøre med selvforstærkende forandringer. Et eksempel er sammenhængen mellem is og indstrålingen af sollys. Isen er hvid og reflekterer solstråling tilbage til rummet. Hvis det bliver varmere, smelter isen, så der bliver reflekteret mindre sollys. Dermed bliver det endnu varmere, og så smelter der endnu mere is – og så videre.

Et andet eksempel på et tipping point kan være, at en varm jord og højt CO₂-indhold i forening vil udløse markante forandringer i oceanernes cirkulation. Måske vil varmepumpen i Atlanterhavet stoppe, eller nogle af de store strømme i Sydhavet vil holde op med at pumpe varme til den nordlige halvkugle. Et tredje eksempel kunne være tørke i Sydamerika, der får regnskoven til at skrumpe, hvorved den holder på mindre fugtighed, så skoven skrumper endnu mere. Hvis verdens største regnskov i stedet for at optage store mængder CO₂ fra atmosfæren i stedet begynder at frigive CO₂, kan det føre til endnu større global opvarmning.

HER LIGGER FORTIDENS KLIMA PÅ KØL

Det kræver et større detektivarbejde at se ud fra en flere tusinde år gammel iskerne, hvordan klimaet har været på det tidspunkt. Undersøgelserne af iskernerne kræver høj naturvidenskabelig faglighed, stor vedholdenhed og indimellem indslag af genialitet.

I årene 1967-69 stod Willi Dansgaard, som på det tidspunkt var professor ved Niels Bohr Institutet, i spidsen for det første systematiske klimastudie af verdens første dybe iskerne boret af den amerikanske hær. Siden har instituttets forskere selv stået i spidsen for en række yderligere borer. Heraf er fem mere end 2 km dybe. Dermed har borerne i Grønland bragt knap halvdelen af de i alt 12 iskerner med en dybde over 2 km, som er boret i hele verden, til veje.

Iskerne har givet os mange informationer om fortidens klima og miljøforhold. Når forskerne har undersøgt en iskerne, bliver den imidlertid ikke smidt ud. For der er mange eksempler på, at man senere har fundet nye metoder, der er i stand til at vriste flere oplysninger ud af isen, end det var muligt dengang kernerne lige var hentet op.



Koordinator Iben Koldtoft med en af de mange iskerne-prøver i NBI's topmoderne iskerne-lager, som besøges flittigt af danske og internationale forskere.

”Uden tvivl gemmer isen stadig på informationer, som vi blot mangler at udtænke metoder til at trække ud. Det er en af de meget motiverende faktorer, som tiltrækker studerende og unge forskere til feltet,” siger Thomas Blunier, professor ved NBI.

Ud over de grønlandske iskerner har forskergruppen boret og modtaget stykker af iskerner fra en lang række borer i Antarktis og Canada.

Samlet set udgør de mange iskerner en national skat. I 2020 lykkedes det at etablere en topmoderne facilitet i Brøndby, som besøges flittigt af danske og internationale forskere.

DANMARKS AKTIE I ET FRUGTBART SAMARBEJDE

Grønland er ikke det eneste sted, hvor man kan finde iskerner med information om fortidens klima. På Antarktis findes der endnu ældre is. Her er det muligt at rejse hele 800.000 år tilbage i tiden med de samme teknikker, som Niels Bohr Institutets forskere anvender.

Andre steder i verden bruger man helt andre kilder. Blandt andet analyseres meget gamle drypsten i huler, havbundskerner, sedimenter fra søer og meget andet.

”Selvom forskning er konkurrencepræget, er der et omfattende samarbejde inden for studierne af det forhistoriske klima. Det har stor værdi, at de forskellige metoder kan holdes op mod hinanden. Et forskningsresultat har langt større vægt, hvis det kan bekræftes af andre forskere, som har brugt helt anderledes metoder,” siger Thomas Blunier, professor ved NBI.

I den sammenhæng er de grønlandske borer et stort aktiv for de danske forskere. Borerne på indlandsisen foregår altid som kampagner, hvor forskere fra mange lande deltager. Det har sammen med de videnskabelige resultater fra arbejdet betydet, at Niels Bohr Institutets klimaforskere konstant befinder sig i en frugtbar vekselvirkning med andre førende forskningshold, der også interesserer sig for fortidens klima.



Et sjældent syn. Typisk arbejder forskerne 10-12 timer om dagen under de intensive borekampagner.

KLIMAFORANDRINGER UDFORDRER SAMFUNDETS PLANLÆGNING

Arbejdet med at forstå konsekvenserne af klimaforandringer stiller forskerne over for en ny type af udfordringer.

”Samfundet har stort behov for viden om, hvilke tærskelværdier, vi skal holde os inden for, hvis vi skal forebygge ekstreme fænomener. Desuden for viden om, hvilke skadevirkninger, der vil opstå, hvis tærskelværdierne bliver overskredet. Og endelig viden om, hvilke ”tipping points”, der kan bringe os ud i situationer, hvor klimaet ikke længere kan vende tilbage til en tidligere tilstand. Ingen af disse spørgsmål kan besvares ud fra de klassiske statistik-baserede metoder, som er grundlaget for planlægningen i dag,” siger professor Jens Hesselbjerg Christensen, NBI.

”Derfor er vi nødt til at skabe nye gennemtestede platforme for vurdering af klimatilpasning, der samtidig ligger i tråd med planerne for grøn omstilling af samfundet.”

Her er klimaviden ikke tilstrækkeligt i sig selv, understreger Jens Hesselbjerg Christensen:

”Fysisk viden om klimasystemet skal kombineres med virkningerne på forskellige sektorer i samfundet – landbrug, vandforsyning, byer mv. Samtidig er man nødt til at inddrage forskelle i opfattelsen af risiko mellem forskellige grupper i befolkningen, og forskellige holdninger og interesser. Kun ved at favne de mange hensyn og knytte partnere fra forskningsmiljøer samt en lang række offentlige og private aktører sammen, vil det være muligt at udvikle de innovative løsninger, som der er behov for.”

”Vi indgår allerede i stærke partnerskaber med udenlandske forskere og aftagere af klimadata. Her er der tale om en opgave, som intet land kan løse alene.”

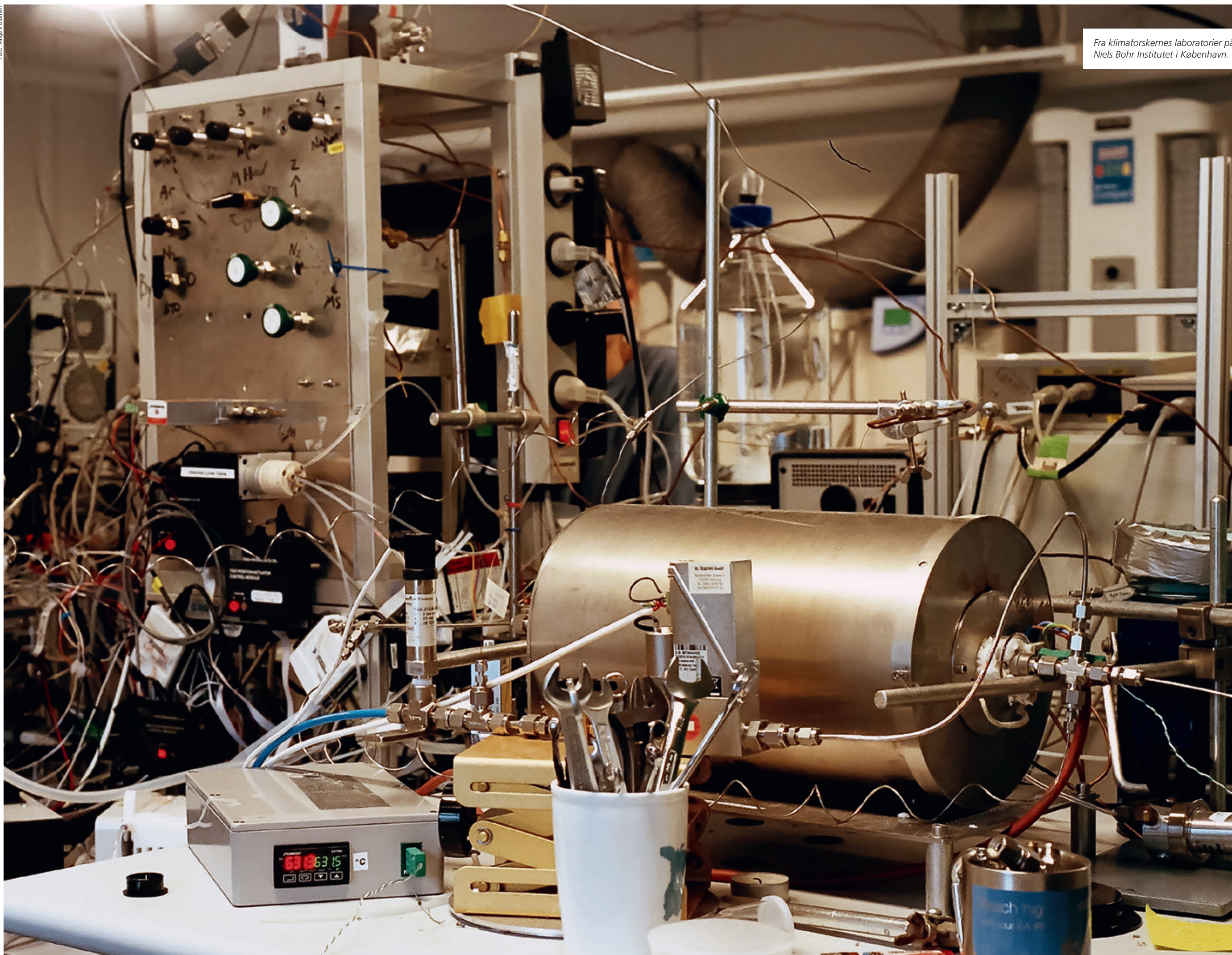
MATEMATIKKEN BAG MONSTERBØLGER

De fleste sømænd kan fortælle historier om meget store bølger, der uden varsel har ramt skibet i ellers roligt vejr. Det kan måske lyde som skipperskrøner, men er bestemt ikke uden hold i virkeligheden. Engang imellem sker det, at fænomener i vandet, der hver især ville have forårsaget en lille bølge, forstærker hinanden. Det kan skabe monsterbølger, som kan blive mere end 25 meter høje og være til fare for skibe og offshore-installationer. På engelsk bruger man udtrykket ”rogue” (på dansk uregerlig eller løbsk) om sådanne meget store bølger, der tilsyneladende opstår nærmest ud af ingenting. Nu har forskere ved Niels Bohr Institutet benyttet kunstig intelligens til at finde mønstre i meget store datasæt. På den måde er de kommet tættere på at kunne forudsige, hvornår rogue waves vil opstå.

”Vi kan ikke forudsige den enkelte monsterbølge, men vi kan sige, at bestemte tilstande i havet gør det 10-100 gange mere sandsynligt, at en rogue wave vil forekomme,” siger Markus Jochum, professor ved NBI.

Gennem tiden har mange forskere forsøgt at forklare teoretisk, hvordan monsterbølgerne opstår. Der er også udført utallige forsøg, hvor man har prøvet at genskabe bølgerne i tanke. Forskergruppen på NBI er gået en helt anden vej. Gruppen har udnyttet målinger foretaget af oceanografiske bølger for flere end en milliard bølger. En computer har analyseret de mange data ved hjælp af Machine Learning, som er en metode fra forskningsområdet kunstig intelligens. På den måde har computeren fundet mønstre i forholdene i havet, som virker befordrende for dannelse af meget høje bølger. Det drejer sig blandt andet om bølgenes hældning og stejlehed.





ARBEJDE MED KLIMAET GIVER KOMPETENCER

En uddannelse inden for klimaforskning er også relevant inden for områder som vedvarende energi og beskyttelse af drikkevandet.

En uddannelse inden for klimaforskning på Københavns Universitet kan bruges til at gøre en forskel på mange områder. For eksempel omfatter klimaforskning geofysik – altså forskning i Jordens indre.

”Fagområdet klima og geofysik har været igennem noget, der minder om en revolution i løbet af de sidste 40 år. Satellitter overvåger konstant Jorden fra rummet, og vi får bedre måleudstyr til at se ned i iskapper og ind i jordens indre, samtidig med at store supercomputere giver os nye muligheder for at analysere data og udvikle bedre klimamodeller,” siger Christine Hvidberg, professor ved NBI.

”Alle disse nye data og metoder har gjort, at vi bedre forstår, at Jorden er et komplekst og koblet system, bestående af Jorden selv, klimasystemet, vegetation og biosfæren. Når klimaet forandrer sig, kan man se, at det får uventede og voldsomme konsekvenser over hele Jorden, og der har aldrig før været så hårdt brug for at kunne forstå og forudsige konsekvenserne af klimaforandringer.”

DEN GRØNNE ENERGIKILDE I UNDERGRUNDEN

Christine Hvidberg er også studieleder for fysikuddannelsen ved Københavns Universitet.

”Fysikuddannelsen på NBI giver vigtige kompetencer, som kan bruges til at lave bedre og automatiserede målinger, forstå de

enormt store mængder af data, og udvikle nye modeller til at fortolke målinger og forudsige fremtiden. Det er en uddannelse, der giver et væld af muligheder for at være med til at udvikle vores samfund i en bæredygtig retning,” forklarer hun.

Klimaet har stor betydning for vedvarende energikilder som vindkraft, vandkraft og solenergi. Derfor kan en klimauddannelse bruges til at arbejde med bæredygtig produktion af energi.

Mange mener, at dyb jordvarme – også kaldet geotermi – bliver en af fremtidens store, bæredygtige energikilder. Grundlæggende bygger geotermi på, at undergrunden bliver varmere, jo længere man bevæger sig ind mod Jordens kerne. Imidlertid er der også en række andre faktorer, som afgør, hvor man finder de bedste betingelser for at udnytte geotermi.

”Data fra seismiske, elektriske og magnetiske målinger sætter os i stand til at udpege de strukturer i undergrunden, som rummer de bedste muligheder for geotermi. Særlig hvis man med en baggrund i fysik og matematik kan udnytte modeller og kunstig intelligens,” forklarer Klaus Mosegaard, professor ved NBI.

ET BÆREDYGTIGT ENERGISYSTEM KRÆVER NYTÆNKNING

Et spændende element i fremtidens bæredygtige energisystem kan meget vel blive at lagre

overskydende vedvarende energi i jorden som geotermi. For eksempel vil det være godt at kunne lagre solenergi, som høstes om sommeren, og bruge den om vinteren. Det samme gælder overskydende energi fra vindmøllerne i perioder, hvor det blæser meget.

”Danmark har meget høje mål om omstilling til grøn energi. Det stiller krav om nytænkning på mange områder. Et af dem er at bruge undergrunden som energilager,” siger Klaus Mosegaard.

En beslægtet disciplin er forebyggelse af klimaforandringer ved at lagre CO₂ i undergrunden i stedet for at slippe den op i atmosfæren. Endelig er kompetencer inden for geofysik i høj grad vigtige, hvis man ønsker at arbejde med at beskytte drikkevandet mod forureninger fra industri og landbrug.



Forskningsbaseret uddannelse inden for klima giver mulighed for at være med til at udvikle vores samfund i en bæredygtig retning.

AFKODER IS OG JORDSKÆLV PÅ MARS

Klimaforskningen på NBI er i anvendelse uden for vores egen planet.

Jorden er ikke den eneste planet med iskapper. Niels Bohr Institutets klimaforskere deltager blandt andet i udforskning af Mars ledet af de amerikanske og europæiske rumfartsorganisationer NASA og ESA.

”På Mars er der iskapper på både nord- og syd-polen, og der er mange små gletsjere i bjergrige områder nær Mars’ ækvator. Isen flyder meget langsommere på Mars, end den gør på Jorden, fordi der er meget koldere på Mars, og flere steder er gletsjerne helt dækket af Mars’ røde støv”, forklarer Christine Hvidberg, professor ved NBI.

Allerede i 1960’erne, da NASAs første rumsonder sendte billeder tilbage fra Mars, opdagede man, at de polare iskapper har en lagdeling med støvfylde lag, som strækker sig over flere hundrede kilometer. Sammen med forskere fra USA har NBI-forskerne kunnet bruge deres viden om istider og klima til at fortolke lagene i iskappen og koble dem til Mars’ bane og rotation ligesom på Jorden.

FORSKNING, HVOR FANTASIEN FLYVER

Klimaet på Mars har ændret sig drastisk i fortiden. Der er ikke længere flydende vand på Mars’ overflade.

”Hvis man vil finde flydende vand på Mars i dag, ville et godt sted at søge være under isen. Er der liv her? Kan man bore en iskerne gennem iskapperne på Mars? Her er et forskningsfelt, hvor vores viden om is og klima kan komme i spil, og fantasien kan flyve!”, siger Christine Hvidberg.

”Der er i disse år en meget stor interesse fra NASA og ESA for at få kortlagt isen på Mars, fordi vand er en vigtig ressource ved fremtidige bemandede missioner til Mars. Ved at bruge satellitmålinger og beregninger, som

vi har udviklet til Jordens gletsjere, har vores forskning været med til at udpege et lovende område med mange gletsjere, hvor der både er direkte adgang til isen i gletsjerne, og samtidig ligger gletsjerne i et gammelt geologisk område med spor fra flydende vand tidligere i Mars’ historie,” fortæller Christine Hvidberg.

I 2019 landede NASAs rumfartøj InSight på Mars. Fartøjet opstillede et særdeles følsomt instrument, som er i stand til at måle rystelser i undergrunden.

”Instrumentet har registreret flere end 500 seismiske begivenheder. Altså jordskælv – eller i denne sammenhæng kunne man måske sige Mars-skælv,” siger Klaus Mosegaard, professor i geofysik ved NBI.

MARS-SKÆLV SLADRER OM PLANETENS INDRE

Sammen med forskergrupper i Tyskland, Schweiz, Frankrig og USA har NBI-forskerne undersøgt, hvordan rystelserne fra Mars-skælv ændres under deres passage gennem planetens øverste lag.

”Undersøgelserne giver et første indblik i skorpen struktur. På landingsstedet for InSight er tykkelsen af Mars’ skorpe kun ca. 22 kilometer. Det er omtrent det halve af den typiske tykkelse af skorpen under Jordens kontinenter. I Mars’ skorpe finder man desuden en mystisk grænseflade i 9 kilometers dybde. Denne struktur kan rumme vigtig information om planetens historie,” fortæller Klaus Mosegaard.

På længere sigt kan man forestille sig, at flere objekter i Solsystemet kan blive genstand for udforskning. Det er velkendt, at der er is på flere planeter samt deres måner. Også asteroider og kometer har is.

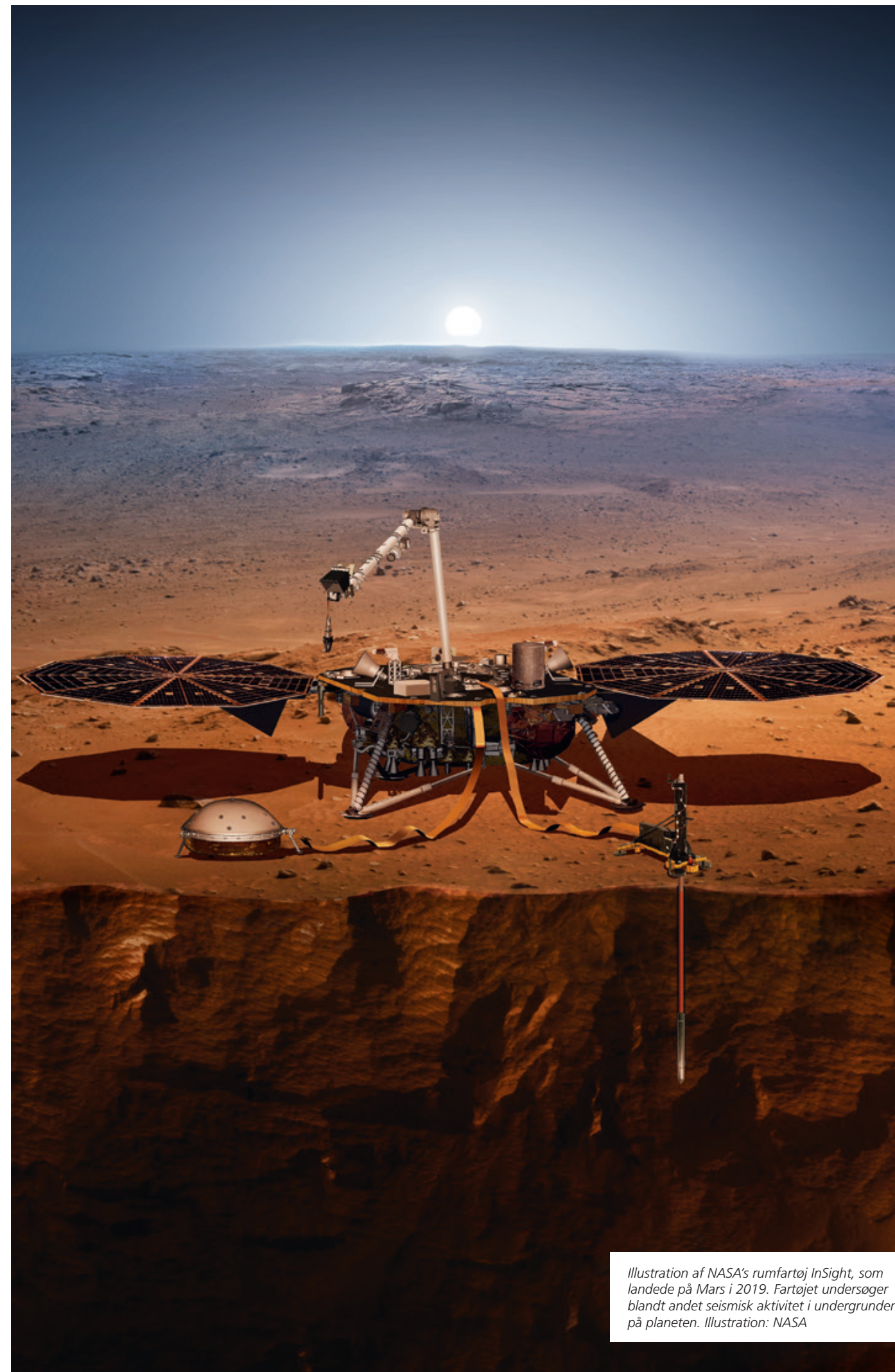


Illustration af NASAs rumfartøj InSight, som landede på Mars i 2019. Fartøjet undersøger blandt andet seismisk aktivitet i undergrunden på planeten. Illustration: NASA



FJERNE PLANETER I KIKKERTEN

Sammen med schweiziske kolleger har forskere fra NBI undersøgt planet-systemet omkring stjernen Trappist-1. Der er tale om en ultrakold rød dværgstjerne, som befinder sig omkring 40 lysår fra os i stjernebilledet Vandmanden.

Selvom radius kun er lidt større end Jupiters, er Trappist-1 hele 84 gange så tung. Omkring stjernen er der opdaget syv planeter, der kan minde om Jorden. Det er et af de største planet-systemer, som kendes uden for Solsystemet.

“Beregninger af de enkelte planets masser og radier er afgørende for at kunne fastslå, om der er betingelser for liv på deres overflader. Beregningerne sker ud fra de lejlighedsvis formørkelser af stjernen, som indtræffer, når en planet bevæger sig ind foran stjernen. Imidlertid er beregningerne uhyre vanskelige på grund af den indbyrdes massetiltrækning mellem de forskellige planeter,” forklarer professor Klaus Mosegaard, NBI.

NBI-forskerne har bidraget til at løse dette matematiske problem.

“Ved at kombinere disse undersøgelser med modeller for dannelse af planeter når man frem til, at der muligvis kan være et indhold af vand på op til 25 procent i planeternes indre. Det understøtter formodningen om, at flere af planeterne i Trappist-1 systemet kan indeholde nok vand til at opfylde betingelserne for liv,” konkluderer Klaus Mosegaard.

Illustration fra NASA, som viser TRAPPIST-1 og de syv planeter. Størrelserne og de relative positioner er i korrekt målestok. Illustration: NASA

