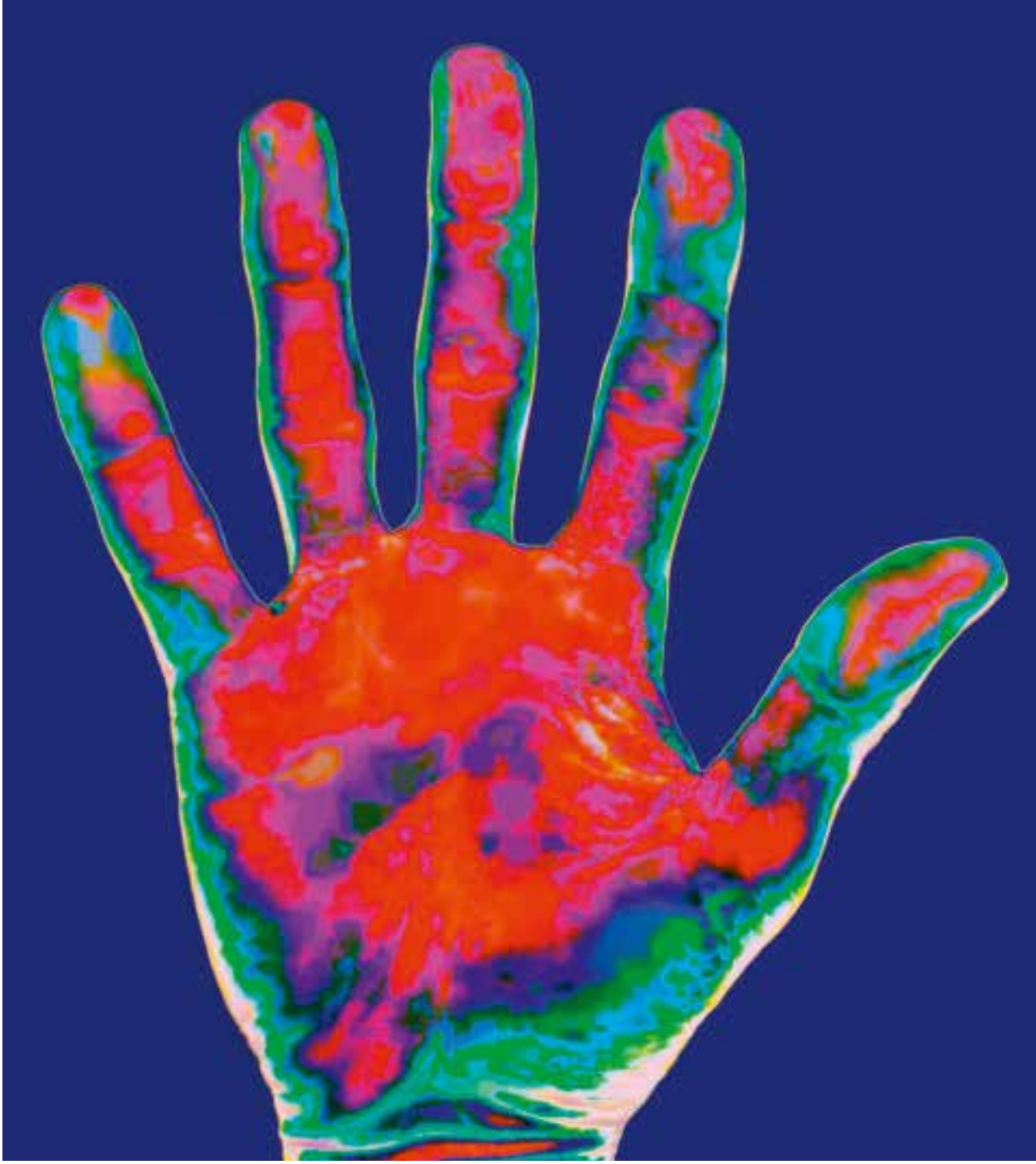


NORSK OLJEMUSEUM ÅRBOK 2013

NORSK OLJEMUSEUM

Klimaendringer i fortid, nåtid og fremtid

av Tore Furevik

Foto: shutterstock.com

Jordens klima har til alle tider variert, fra dampende hete og oversvømte kontinent til isnende kulde og kilometertykk is lagret på land. Kontinenter som beveger seg, en jord som går i ujevn bane, en sol som varierer i utstråling, vulkaner som spyr ut aske, og en landjord og et hav som tar opp og slipper ut karbondioksid, metan og andre drivhusgasser, kan hver for seg eller i fellesskap føre til store og dramatiske endringer i jordens klima. Hvordan kan vi da være så sikre på at det denne gang er menneskene

Tore Furevik (44) er professor i fysisk oseanografi, Universitetet i Bergen og direktør for Bjerknessenteret for klimaforskning. Han er leder for den nasjonale forskerskolen i klima, og har tidligere ledet både Bergens geofysikeres forening og Norsk geofysisk forening. Furevik er spesialist på storstilte klimavariasjoner i atmosfære og hav og bruker både klimamodeller og observasjoner i sine analyser. Furevik legger stor vekt på formidling, og har gitt over 100 populærvitenskapelige foredrag og opptrådd mer enn 200 ganger i nasjonale og internasjonale medier.

som har skylden for klimaendringene? Og hva blir konsekvensene av våre handlinger?

Jordens forbløffende fortid

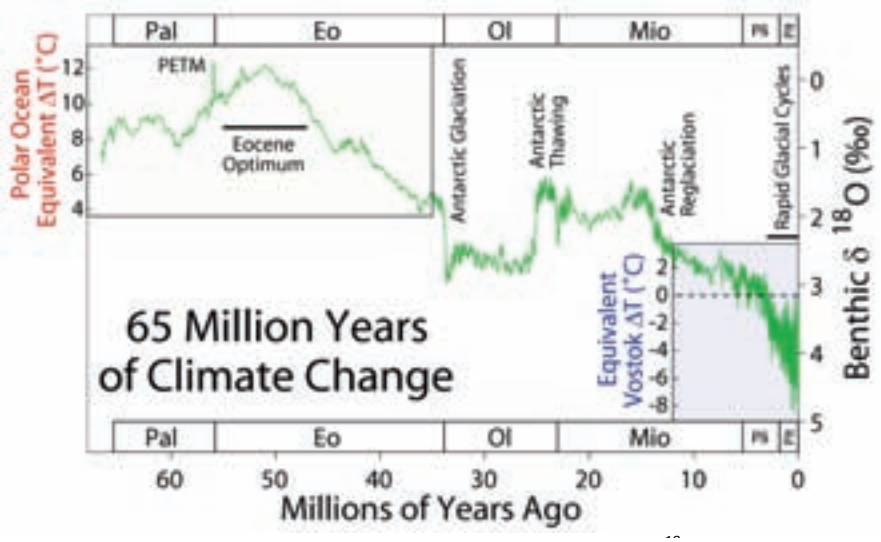
Forskerne bruker tre ulike former for data når de skal studere hvordan klimaet har variert tilbake i tid. Fra de siste par hundre år finnes direkte observasjoner målt med pålitelige instrument, og særlig for de siste tretti til førti årene har et stort antall værballonger, sensorer i havet og et utall av satellitter gjort at en med nokså stor nøyaktighet kan beskrive hvordan de ulike delene av klimasystemet forandrer seg. Vil en gå lengre tilbake i tid kan en støtte seg til historiske observasjoner som er nedtegnet i dagbøker, loggbøker, og andre skriftlige kilder. Eksempler på dette er lokalbefolkningen på Nord-Island som hver vinter siden 1150 har skrevet ned hvor mange dager sjøisen har nådd inn til kysten, eller de mange norske bøndene som flittig har notert når innhøstningen har startet, hvor store avlingene har vært, hvor lenge isen har ligget på nærliggende vann, eller mer katastrofale hendelser som ras og flom.

Selv om historiske nedtegnelser i noen tilfeller kan være flere tusen år gamle, har naturen selv sørget for mye bedre beskrivelser av hvordan klimaet har variert før instrumentene gjorde sitt inntog. Naturen påvirkes hele tiden av klimaet, og levende eller døde planter og dyr, luft som er fanget i is, og sandkorn som ligger på havbunnen, kan alle gi forskerne verdifull informasjon om fortidens klima. Og jo mer informasjon forskerne har samlet om hvordan klimaet har variert i tidligere tider, jo mer forbløffende oppdagelser har de gjort.

Det kanskje mest nyttige eksempelet på slike indirekte data, er en naturlig forekomst av en tung og stabil oksygenisotop, oksygen-18, som har ti nøytroner i kjernen i stedet for åtte som er det vanlige. Forholdet mellom antall tunge oksygen og antall normale oksygen i en prøve, kjent som $\delta^{18}O$ forholdet, vil kunne fortelle forskerne veldig mye om hva de klimatiske betingelsene var når innholdet i prøven ble dannet. Når vann fordamper blir de fleste tunge oksygen-18 isotoper liggende igjen, slik at nedbør og snø og is på land vil ha et mye mindre $\delta^{18}O$ forhold enn havvannet. Og jo mer is som blir stuet opp på land, jo høyere blir $\delta^{18}O$ forholdet i det vannet som blir tilbake i verdenshavene.

Oksygenet i vannet vil bli tatt opp i kalkskallet til mange små organismer, så ved å måle $\delta^{18}O$ forholdet i avleiringer med fossiler på havbunnen, kan en beregne hvor mye is som må være lagret på land. Men det stopper ikke her. Mengden av tunge isotop i fossiler avhenger også av hvor varmt det var i vannet da organismene levde, og likeledes vil innholdet av tunge isotoper i nedbør over land avhenge både av avstanden til hvor vannet opprinnelig fordampet og temperaturen i lufta. Dermed vil $\delta^{18}O$ forholdet lagret i sedimenter på havbunnen eller i is på land kunne gi forskerne verdifull informasjon om både temperaturen i havet og i lufta, og om hvor mye is det til enhver tid har vært på Jorden.

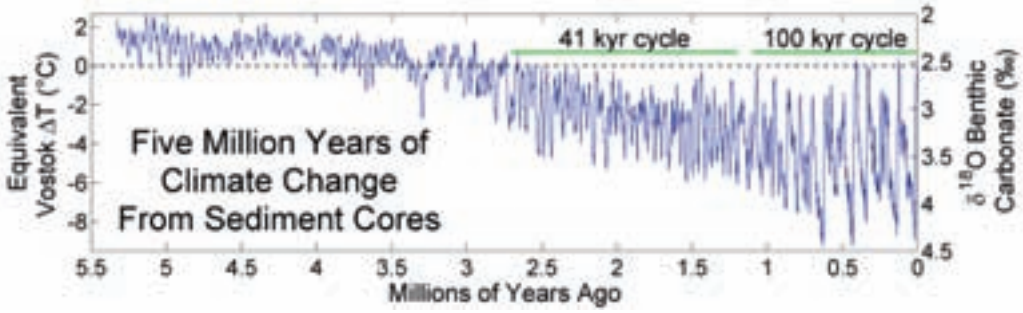
δ



Figur 1. Klimavariasjoner siste 65 million år. Dataene er basert $\delta^{18}O$ målinger fra fossiler på havbunnen. Oksygenisotopen reflekterer en kombinasjon av lokal temperaturendring og generell endring i sjøvannet på grunn av økning eller minke i isdekkene på land. For første del av måleserien var temperaturen mye høyere enn i dag, og det var sannsynligvis ikke is på planeten. Isotopen antas derfor å reflektere kun temperaturendringer. I siste del av måleserien er dataene sammenlignet med beregninger for temperaturendringer i Antarktis.

I et berømt arbeid fra 2001 brukte amerikaneren Jim Zachos $\delta^{18}O$ -metoden til å beregne hvordan klimaet har variert fra dinosaurene døde ut for 65 millioner år siden og frem til i dag (se figur 1). I det meste av denne perioden har temperaturen på Jorden vært mye høyere enn i dag. Varmest var det i det såkalte Paleosene – Eosene temperaturmaksimumet (PETM) for omtrent 57 million år siden. Store mengder karbondioksid slapp i løpet av kort tid (hundrer til tusener av år) ut til atmosfæren og en veldig sterk drivhuseffekt gjorde at den globale temperaturen steg fem til ti grader og kanskje enda mer. Forskerne diskuterer stadig årsakene til at dette skjedde, men sannsynlige kandidater er karbondioksidutslipp fra vulkansk aktivitet kombinert med store metanutslipp fra permafrost eller hydrokarboner på havbunnen. I Polhavet er det funnet rester av planktonarter som bare lever i tropiske farvann, og som viser at temperaturen i Arktis trolig var 20 grader varmere enn i dag. Det er også funnet spor av et mye surere og mer oksygenfattig hav, og mellom en tredjedel og halvdelen av alle bunndyr ble sannsynligvis utryddet.

Etter den eosene varmeperioden ble Jorden gradvis kaldere, og for 35 millioner år siden begynte det Antarktiske isdekket å bygge seg opp og havet sank med mer enn 50 meter. Dette skjedde samtidig med at Antarktis slet seg løs fra Sør Amerika, og kalde havstrømmer begynte å isolere kontinentet fra varmere vann i nord. I den pliosene epoken for 5,3 til 2,6 millioner år siden var jorda 2-3 grader varmere enn i dag og det er beregnet at havet stod 25 meter høyere. Dette var hovedsakelig på grunn av mindre



Figur 2. Klimavariasjoner siste 5,5 million år basert på samme type data som i figur 1.

is lagret på land, men i noen grad også på grunn av at varmt vann fyller mer enn kaldt vann.

Mot slutten av den pliosene epoken ble det gradvis kaldere, og Jorden gikk inn i en periode med stadig villere klima (se figur 2). Først var klimavariasjonene relativt beskjedne og hadde perioder på rundt 41 tusen år, men så for litt over en million år siden begynte det å bli voldsomme svingninger i temperatur, isdekke og havnivå, og periodene økte til rundt 100 tusen år. Ingen vet hvorfor dette skiftet skjedde, og det er heller ingen som kan å gi en fullgod forklaring på hvilke mekanismer som setter på bremsene når temperaturen har nærmet seg den nedre eller den øvre grense for utslagene.

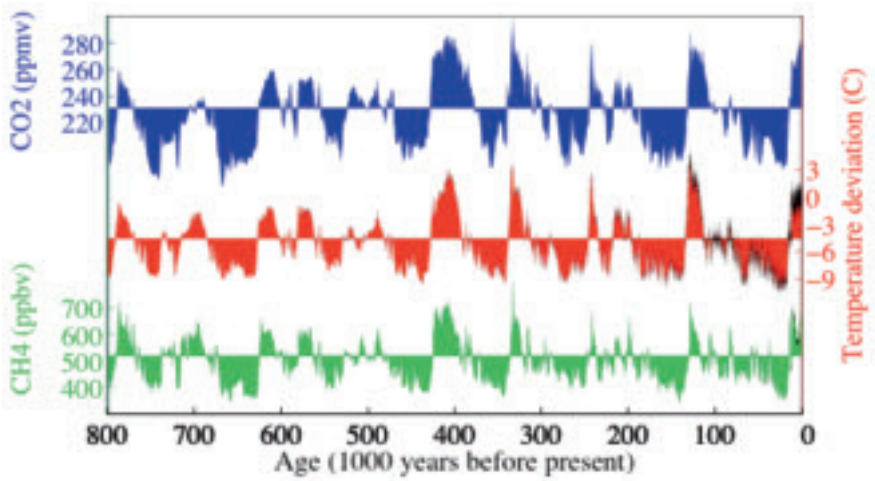
Sveitseren Louis Agassiz foreslo i 1837 at de stupbratte fjellsidene og dype dalene i Sveits var formet av store isbreer, og at Jorden derfor i tidligere tider måtte ha vært mye kaldere enn i dag. Både Agassiz og flere andre mistenkte at årsaken kunne være endringer i innstrålingen fra sola, men det tok nesten 80 år før den serbiske matematikeren Milutin Milankovic klarte å løse gåten. Han brukte tiden som krigsfange i Budapest under den første verdenskrig til å regne, og kom frem til at det er tre faktorer som bestemmer hvor mye varme Jorden mottar fra sola: Hvor elliptisk eller sirkelformet jordens bane rundt sola er, hvor mye jordaksen heller, og når på året Jorden er nærmest solen. De tre faktorene varierer med perioder på omtrent 100 tusen, 41 tusen og 21 tusen år, og de to første er nettopp de samme periodene som forskerne i dag finner spor av i avleiringer på havbunnen.

Selv om den totale energien som Jorden mottar varierer lite i tid, vil Milankovic svingningene skape store lokale forskjeller i vinter- og sommertemperaturer. Når vintrene blir varmere og somrene kaldere, vil det falle mer snø om vinteren og det vil smelte mindre om sommeren, og isbreer vil dermed begynne å vokse. Gjennom mange tusen år kan store iskapper med flere kilometer tykk is bygge seg opp. Den hvite overflaten virker som et speil som sender varmen fra solen ut igjen til verdensrommet, og er med

på å kjøle ned Jorden. I tillegg viser målingene at det blir mindre drivhusgasser i atmosfæren og et tørrere klima. Begge deler bidrar til å forsterke avkjølingen.
Den eldste isen i verden finner en i Antarktis. Omtrent midt på platået, der det er tørrere enn i Sahara og isen ligger nesten helt i ro, har europeiske forskerne boret seg ned gjennom flere kilometer tykk is. Gjennom et nitidig arbeid har de analysert isotoper, drivhusgasser og støvpartikler og kommet hele 800 tusen år tilbake i tid (se figur 3). Målingene gir en forbløffende god innsikt i hvordan temperaturen (rød kurve) og luftens innhold av karbondioksid (blå kurve) og metan (grønn kurve) har svingt i takt, med høye temperaturer sammenfallende med høye verdier av karbondioksid og metan. Overgangen fra de varme periodene til de kalde istidene har skjedd veldig gradvis, mens overgangen fra istidene til de varme mellomistidene har gått mye fortere. En enkel forklaring på dette kan være at det tar flere titalls tusen år å bygge opp en stor, kilometertykk iskappe, mens smeltingen kan gå mye raskere.

Siste mellomistid hadde sitt maksimum for omtrent 130 000 år siden. Temperaturen var da 2-3 grader høyere enn i dag, og havet stod 5-10 meter høyere. Så ble det igjen kaldere, innholdet av drivhusgasser i atmosfæren sank, og for bare 20 000 år siden nådde den foreløpig siste istid sitt maksimum. Da var hele Skandinavia dekket av flere kilometer tykk is, isen nådde helt ned til nåtidens London og Hamburg, og havet stod 120 meter lavere enn i dag. Det vil si at mange av dagens grunne sokkel- og havområder var tørt land.

En av de store pionerene innen analyser av iskjerner var dansken Willy Dansgaard. Sammen med sin sveitsiske kollega Hans Oeschger oppdaga han store og veldig raske svingninger i temperaturen på Grønland under siste istid. På bare noen få år kunne temperaturen svinge mellom kaldt istidsklima og et klima nesten like varmt som i dag. Vi kjenner til over tyve såkalte Dansgaard-Oeschger hendelser. Forskerne har lagt mye arbeid ned i å forstå hvordan slike raske klimasvingninger har kunnet oppstå, og om slike også kan oppstå i fremtiden. En teori som også norske forskere står bak er at Norskehavet under siste istid så omtrent ut som Polhavet gjør i dag. Det var islagt det meste av året. Under isen lå et kaldt, ferskt lag med smeltevann, og under der igjen et varmt, salt lag som strømmet inn fra Atlanterhavet. Gjentatte ganger har det varme vannet kommet i kontakt med isen slik at denne raskt smeltet, og de ble åpent hav i stedet for islagt hav hele året. Om vinteren gir dette så store temperaturforskjeller at det kan være forklaringen på det forskerne har funne på Grønland. Men mange ting gjenstår med denne modellen, blant annet hva det er som styrer lengden på de kalde og de varme periodene. Sammenligningen med dagens Polhav gir interessante assosiasjoner, særlig ettersom Polhavet etter all sannsynlighet blir isfritt sommerstid i nær framtid.

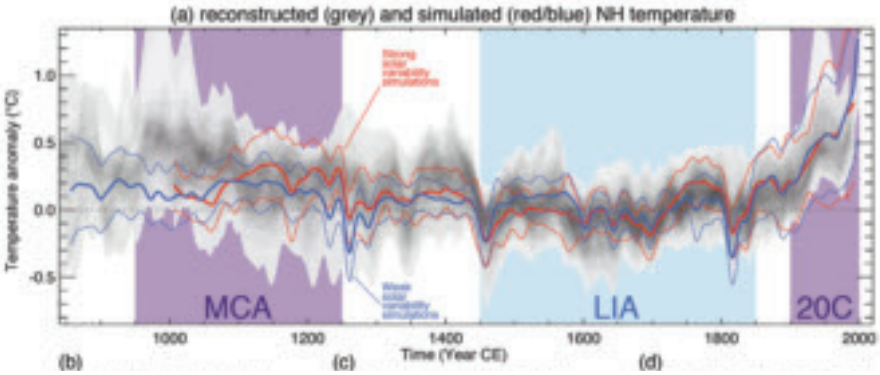


Figur 3. Klimavariasjoner siste 800 tusen år basert på målinger gjort i isen i Antarktis. Kurvene viser endringer i karbondioksid i luften uttrykt i deler per million (blått), endringer i beregnet lufttemperatur (rødt, avvik fra dagens temperatur), og endringer i metan i luften uttrykt i deler per milliard (grønt). Tidsskalaen er angitt under og går fra venstre mot høyre fra 800 000 år siden og frem til i dag.

Etter siste istids maksimum for 18 000 år siden, ble det raskt varmere. Hovedårsaken var stor helning på jordaksen og at Jorden var nærmest sola om sommeren på den nordlige halvkule. Det var dermed mye varmere somrer enn i dag, mens vintrene var kalde og lite nedbør falt som snø. Begge deler førte til at isen trekk seg tilbake, og for 8-10 tusen år siden var med få unntak alle norske breer smeltet fullstendig bort. Det er med andre ord ikke slik at breene er rester fra den siste istid, kanskje snarere starten på en ny.

Mange forskere har brukt indirekte data for å beregne hvordan temperaturen på Jorden har variert de siste tusen år (se figur 4). Selv om det er usikkerheter knyttet til de ulike beregningene, viser dataene en gradvis nedkjøling fra den varme middelalderen da norske vikinger bosatte seg på Grønland, til en kaldere periode fra ca 1400 til 1800 tallet som vi her til lands kjenner som den lille istid. Fra slutten av 1800 tallet begynte temperaturen igjen å stige, samtidig med at vi etter hvert begynner å få tilstrekkelig mange direkte temperaturmålinger til at vi med stor sikkerhet kan si hvordan klimaet har utviklet seg globalt og regionalt.

Når klimamodeller blir matet med alle kjente pådriv, klarer de i stor grad å gjenskape temperaturutviklingen de siste tusen år. De store negative utslagene i temperatur er alle forårsaket av store vulkanutbrudd som for eksempel Tambora i april 1815. Dette som trolig var det største vulkanutbruddet på tusen år, førte så mye aske opp i atmosfæren at det skapte en skyggevirkning over hele kloden, og kanskje så mye som en grads fall i den globale temperaturen. I mange land blir 1816 fortsatt kalt for året uten



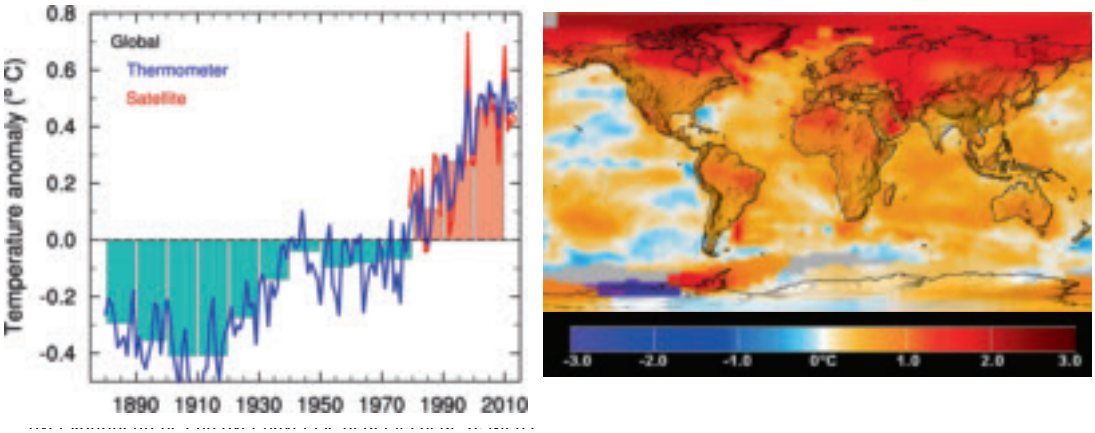
Figur 4. Klimavariasjoner siste 1200 år basert på temperaturer rekonstruert for den nordlige halvkule og klimamodeller. Rekonstruksjonene er basert på treringer og er vist med grå skyggelegging. Det gråeste feltet i midten hvor det er flest rekonstruksjoner. Tykk rød linje viser gjennomsnittet fra en rekke klimamodeller, og 90% av kjøringene ligger innenfor de tynne røde linjene. Blå viser kjøringer med sterkt solpådriv, rødt med svakere.

sommer, og i store deler av Europa og Nord Amerika slo avlingene fullstendig feil med hungersnød og uår som resultat. Både Tambora og det nesten like store Krakatao utbruddet i 1883, kom i Indonesia, det mest aktive vulkanske området på Jorden.

Det blir raskt varmere

Det er mer enn 400 år siden Galieo Galilei oppfant det første enkle termometeret. Dette var basert på at luften i en glasskolbe ville utvide seg eller trekke seg sammen når temperaturen endret seg, og ved hjelp av farget vann eller vin i et glassrør kunne temperatureffekten måles. I 1654 lagde storhertugen av Toscana det første innelukkede termometer med alkohol som væske og bare fem år senere startet det som i dag blir regnet som verdens lengste temperaturserie, fra det sentrale England. Utover 1700 tallet og tidlig 1800 tall startet det regelmessige temperaturmålinger for de fleste større byer i Europa. En av de lengste tidsseriene har en fra Stockholm der daglige målinger startet i 1754. I Oslo startet målingene i 1816 og i Bergen i 1861.

Mot slutten av 1800 tallet er det blitt tilstrekkelig mange meteorologiske stasjoner til at forskerne kan klare å beregne den globale gjennomsnittstemperaturen (se øverst figur 5). Målingene viser at de to kaldeste tiårene var fra 1900 til 1920, og at temperaturen deretter har steget med nesten en grad. Økningen har vært særlig sterk etter 1970, der hvert eneste tiår har vært betydelig varmere enn det foregående tiår. I tillegg til den generelle oppvarmingen, ser en at det har vært store endringer fra år til år, og til dels også fra tiår til tiår.



Figur 5. Øverst: Endring i den globale middeltemperatur fra 1880 til 2013 basert på direkte målinger (blått) og satellittmålinger av nedre lag i atmosfæren (rødt). Søylene viser gjennomsnitt for hvert tiår. Nederst: Gjennomsnittstemperatur siste ti år basert på direkte målinger. Begge viser avvik fra gjennomsnittstemperatur 1961 til 1990.

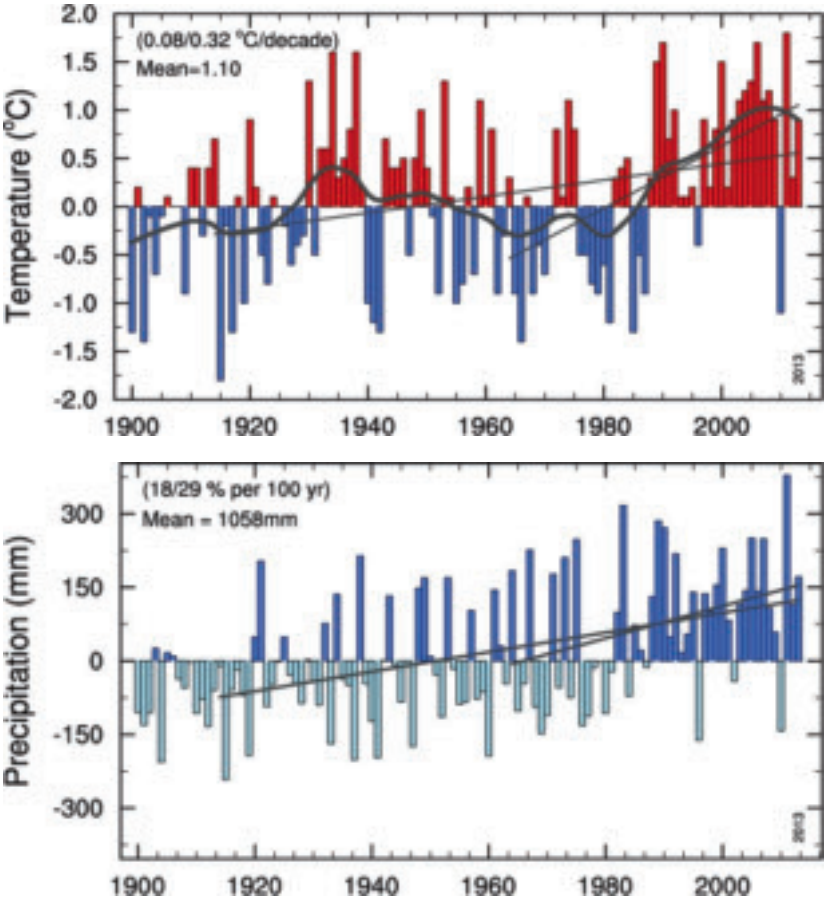
Oppvarminga er ikke likt fordelt. Fordi vann i overflaten hele tiden blandes med kaldere vann under, og også fordi mye av varmen som treffer havet går med til å fordampe vann i stedet for å varme opp vannet, har oppvarmingen vært større over kontinentene enn over havet (se nederst i figur 5). Men den som er aller mest synlig, er at temperaturøkningen har vært langt større i nord enn i sør, og aller størst i Arktis. Den viktigste grunnen til dette er at det finnes dobbelt så mye landmasser på den nordlige halvkule som på den sørlige. I havet rundt det isdekte Antarktis-kontinentet i sør kommer hele tiden kaldt vann til overflaten og hindrer oppvarming, mens på kontinentene og i Polhavet i nord smelter snø og is og erstattes av mørkere overflate som fanger varmen fra solen i stedet for å reflektere den tilbake.

Norge ligger langt mot nord og har dermed hatt noe større oppvarming enn det som har vært gjennomsnittet for hele Jorden (se figur 6). I tillegg til den raske oppvarmingen vi har hatt de siste tiårene, ser vi også at det var svært varmt i Norge i 1930- og 1940 årene da hele Arktis var inne i en veldig varm periode. Et viktig unntak var krigsårene 1940-1942 da særlig Øst-Europa var rammet av isnende vinterkulde. De to kaldeste januarmånedene i moderne tid var nettopp i 1941 og særlig 1942 da gradestokken var mer enn 6 grader kaldere enn normalt. De siste 50 årene har temperaturen i Norge steget med mer enn 0.3 grader per tiår og det varmeste året som er observert var i 2011. Økningen har vært mye større i nord enn i sør, og for Svalbard nesten tre ganger mer enn fastlands-Norge.

En annen tydelig trend er at Norge er blitt våtere, både i form av total nedbør gjennom året (se nederst i figur 6), antall nedbørsdøgn og antall døgn med ekstremt høye nedbørsmengder. Vest og nord i landet er store nedbørsmengder særlig knyttet til lavtrykk om høsten mens det i sør og øst

særlig er i tilknytting med intense regnskyll om sommeren de store nedbørsendringene inntreffer. Det klart våteste året som hittil er observert var i 2011, året som også var det varmeste. Faktisk er det slik at dagens 25-åringer kun har opplevd to år som har vært kaldere og tre år som har vært tørrere enn det som var gjennomsnittet mellom 1900 og 2000. Fortsatt kan vi forvente enkelte kalde og tørre år, men de blir tydeligvis mer og mer sjeldne.

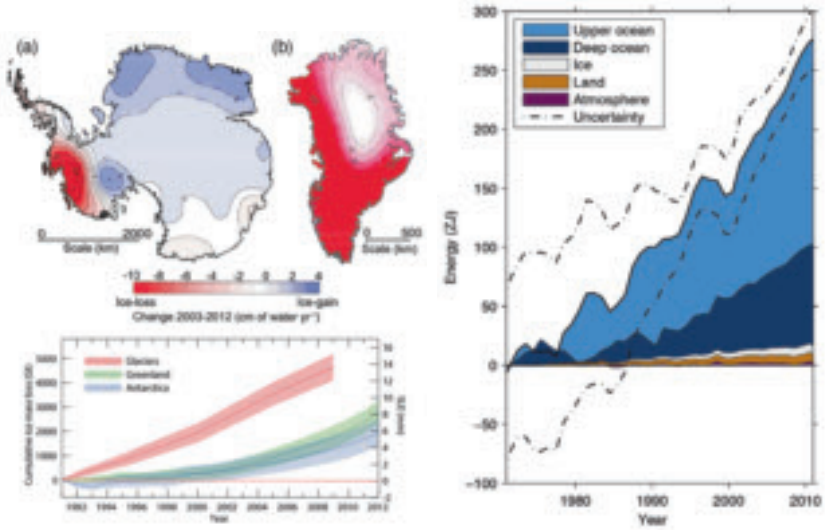
Fra alle deler av kloden finner nå forskerne spor av at klimaet er i rask endring, og FN sitt klimapanel kan med stadig større sikkerhet og for stadig flere av observasjonene slå fast at dette skyldes menneskets aktivitet. Det blir varmere på alle kontinent og i alle verdenshav. Det blir mindre sjøis i Arktis, mindre snø, mindre permafrost, færre isbreer og de store iskappene på Grønland og i Antarktis viser stadig raskere avsmelting. Havet stiger som følge av oppvarming og tilførsel av smeltevann fra isbreer og mindre grunnvann, det blir tilført mer karbondioksyd og det blir surere.



Figur 6. Endring i årsmidlet temperatur (øverst) og årsnedbør (nederst) for Norge fra 1900 til 2013. Verdiene er vist som avvik fra 1900-2000 gjennomsnittet. Oppe til venstre i hvert plott er trender for siste 100 år/siste 50 år indikert.

Noen resultater fra den femte hovedrapporten fra FN sitt klimapanel ferdigstilt i september 2013, er gjengitt i figur 7. Antarktis og Grønland har i millioner av år vært dekket av kilometertykk is. Så mye is er stuet opp her at om den skulle smeltet ville bidraget fra Antarktis fått verdenshavene til å stige med over 60 meter, og ytterligere 7 meter ville komt fra Grønland. Målinger gjort fra satellitter viser at innlandsisen i Antarktis er blitt tynnere i den vestlige delen (rødt område), men er ellers nokså stabilt. For Grønland er situasjonen mer alvorlig siden isen nå smelter overalt, også på de høyereliggende områdene i nord. Kurvene nede til høyre i figur 7 viser hvor mye is som totalt er smeltet bort siden målingene startet i 1991. Her er bidragene fra Grønland og Antarktis vist hver for seg, og i tillegg er det vist hvor mye som er smeltet fra alle de andre små og mellomstore breene på Jorden. Det siste bidraget er faktisk størst, deretter kommer Grønland og tilslutt Antarktis. Men smeltingen fra Grønland og Antarktis øker raskt, og de siste par årene har tapet av is på Grønland trolig vært større enn alle de små og mellomstore isbreene til sammen. Totalt har det i løpet av de siste tjue årene smeltet rundt ti tusen milliard tonn med is, nok til å fylle Mjøsa 180 ganger eller mer relevant å få verdenshavene til å stige med nesten 3 cm.

Til høyre ser vi hvor mye energi som er gått med til å varme opp havet, landjorden og atmosfæren og til å smelte is. Enheten på aksen er i Zeta Joule, et tall med 21 nuller bak. Mer enn 90% av den økte energien i klimasystemet har gått til å varme opp havet, mens resten har gått til å



Figur 7. Panelet til venstre viser øverst målt endring i istykkelse for Antarktis og Grønland (cm per år for perioden 2003-2012) og nederst den totale issmeltingen i milliarder av tonn fra små og mellomstore breen (rødt), Grønland (grønt) og Antarktis (blått). Bidraget til havnivåstigning er angitt til høyre. Her viser kurvene hvor mye varme som er brukt til å varme opp havet (blått felt), smelte is (hvitt), varme opp bakken (oransje) og varme opp lufta (lilla).

smelte is, varme opp landjorden eller varme opp lufta. Enkel regning gir at ubalansen i klimasystemet, det vil si forskjellen mellom den energien som Jorden har mottatt og den energien som den har avgitt, har vært på en halv watt per kvadratmeter, eller samme effekt som at vi fordeler 220 milliarder kokeplater, hver på tusen watt, utover jorda.

I tillegg til oppvarming og avsmelting viser også målingene stadig flere andre tegn på at klimaet endres raskt. Det er økt fordampning og stadig mer tørke i landene rundt Middelhavet, i store deler av USA, Kina, Australia, i Sør Amerika og i sørlige Afrika. Samtidig ser en økt nedbør og kraftige regnskyll langt nord og langt sør på kloden. Dette finner en også spor av i for eksempel endret saltfordeling i verdenshavene. Hyppigheten av de mest kalde dagene har minket, mens hyppigheten av veldig varme dager har økt. Særlig har det vært en sterk øke i sommertemperaturene i de samme områdene som har fått mindre nedbør, en kombinasjon som leder til uttørkning av Jorden og store vansker med tilstrekkelig vannforsyning og matproduksjon.

Hvorfor blir det varmere?

Vi deler vanligvis klimasystemet inn i fem deler, nemlig luft, flytende vann, frossent vann, jordsmonn, og det levende liv. På fagspråket blir dette atmosfære, hydrosfære, kryosfære, litosfære og biosfære. Siden menneskenes aktiviteter i stadig større grad påvirker de ulike delene av klimasystemet, er det blitt vanlig å snakke om menneskene som en sjette del av klimasystemet, antroposfæren.

Det er mange ting som kan påvirke klimasystemet. Vi skiller ofte mellom ytre og indre pådriv, der de ytre påvirker systemet fra utsiden uten å selv bli påvirket, mens de indre skaper klimavariasjoner innenfra og blir også selv påvirket. Eksempler på det første er endringer i utstråling fra solen, jordens bane rundt solen, kontinentalforskyvning eller vulkaner, mens eksempler på det andre er utslipp av drivhusgasser eller partikler til atmosfæren (som ikke er forårsaket av vulkaner), landskapsendringer, eller tilfeldige variasjoner i en eller flere deler av klimasystemet.

Klimaendringer forårsaket av ytre pådriv, som for eksempel istider eller kuldeperioder etter store vulkanutbrudd, er åpenbart naturlige variasjoner. Vi har også en rekke andre variasjoner i klimasystemet forårsaket av et ofte komplisert samspill mellom to eller flere deler i klimasystemet, der både fysiske, kjemiske og biologiske prosesser kan være involvert. Vind som driver havstrømmer eller havtemperaturer som driver endringer i luftstrømmene er eksempler på fysiske prosesser som kan være med å skape naturlige klimavariasjoner. Havets opptak eller utslipp av drivhusgasser er eksempler på kjemiske prosesser, mens fotosyntesen i alle planter på land og i alger i havet er eksempel på en veldig viktig biologisk prosess i klimasystemet.

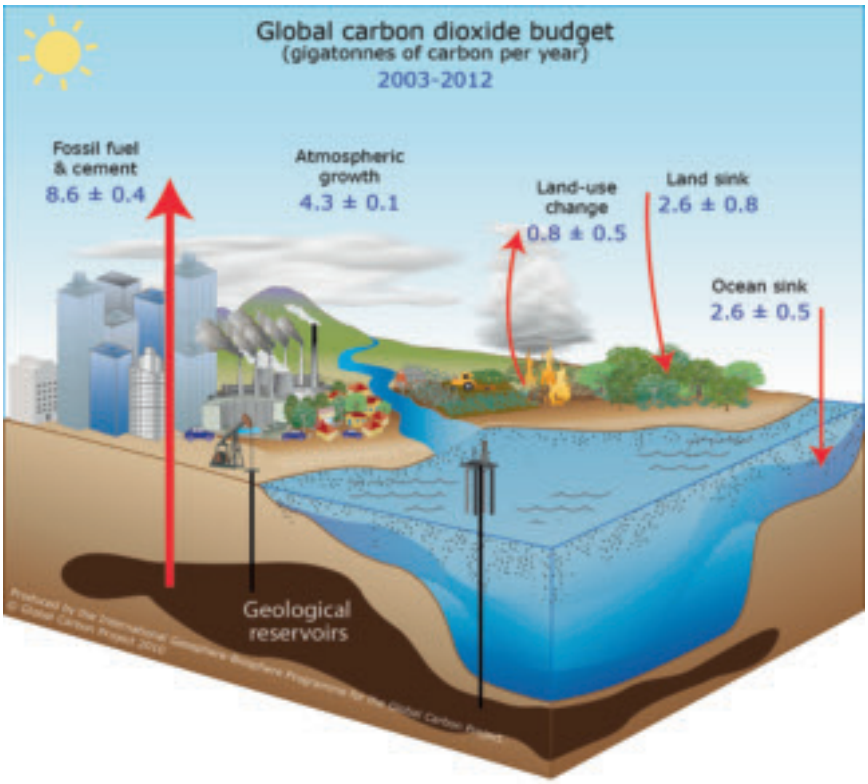
Samspillet mellom de ulike delene av klimasystemet spiller også en veldig viktig rolle gjennom det som kalles for tilbakekobling. Slike kan være

av fysisk, kjemisk eller biologisk art, og de er beskrevet mange hundre slike effekter i forskningslitteraturen. Det som i utgangspunktet er små endringer i de ytre pådriv, for eksempel en liten endring i hvor mye innstråling som Jorden mottar fra sola, kan bli til store endringer i klimaet dersom det finnes forsterkende tilbakekoblinger. En viktig forklaring på de store istidene er at litt kaldere klima gjør at snø og is begynner å ligge litt lenger utover våren. Dette reflekterer mer av den innkommende varmen fra sola, fører til kaldere vær, og smeltingen går enda senere. En tilsvarende effekt, men i motsatt retning, ser en i Arktis i dag der snø og is smelter tidligere om våren, og en større del av varmen fra sola går til å varme opp bakken eller havet i stedet for å bli reflektert tilbake til verdensrommet.

FN sine klimarapporter er resultat av det mest grundige arbeidet som noen komité noensinne utfører. Den siste rapporten er på 1535 sider, og har hatt mer enn 200 hovedforfattere og 600 bidragsytere. Forfatterne har behandlet og svart på nærmere 55 000 kommentarer og referert til over 9000 vitenskapelige arbeid. FN sitt klimapanel er klar i sin konklusjon: Det hersker ingen tvil om at klimasystemet blir varmere, og at dette i all hovedsak skyldes massive utslippene av karbondioksid og andre drivhusgasser til atmosfæren. Mekanismen er enkel: Drivhusgassene (vanndamp, karbondioksid, metan, lystgass, osv) slipper sollyset nesten uhindret gjennom, mens gassene fanger opp og delvis sender tilbake varmen som stråler tilbake fra jordoverflaten. Effekten ble påvist allerede i 1896 da svensken Svante Arrhenius målte strålingen som nådde jorden fra månen. Mens det synlige lyset, det vil si sollys som månen reflekterer, gikk nærmest uhindret gjennom jordens atmosfære, forsvant det meste av varmestrålingen fra månen selv fanget i atmosfæren.

Det finnes i dag veldig gode målinger av hvor mye drivhusgasser som menneskene slipper ut, og hvor dette blir av. Det globale karbonprosjektet har forskere fra mer enn 46 institusjoner i 14 land, blant annet fra Bjerknessenteret i Bergen. Som del av prosjektet blir hvert år det globale karbonbudsjettet beregnet, det vil si hvor mye karbon som er forbrent og hvor det er blitt av (se figur 8). Gjennom de siste ti år har det i gjennomsnitt vært forbrent 8,6 milliarder tonn karbon fra olje, kull og gass og 0,8 milliard tonn karbon fra skog. Når karbon brennes forbrukes oksygen, slik at den totale mengden av karbondioksid i atmosfæren blir faktisk 3,66 ganger høyere. De totale utslippene stiger raskt, og i 2014 vil vi forbrenne tett på 11 milliarder tonn karbon som fører ytterligere 40 milliarder tonn karbondioksid ut i atmosfæren. Slike gigantiske tall kan kanskje lettere forstås når de skrives som 110 million tonn per dag eller 1300 tonn per sekund!

Heldigvis vil ikke all karbondioksidet som slippes ut bli værende igjen atmosfæren, men vil inngå i det naturlige kretsløpet og gradvis fordele seg på de andre delene av klimasystemet. Når det blir mer karbondioksid i atmosfæren, vil det også bli mer opptak i havet og på landjorden. Denne effekten er lettest å måle i havet, og siden en kjenner utslippene og kan måle

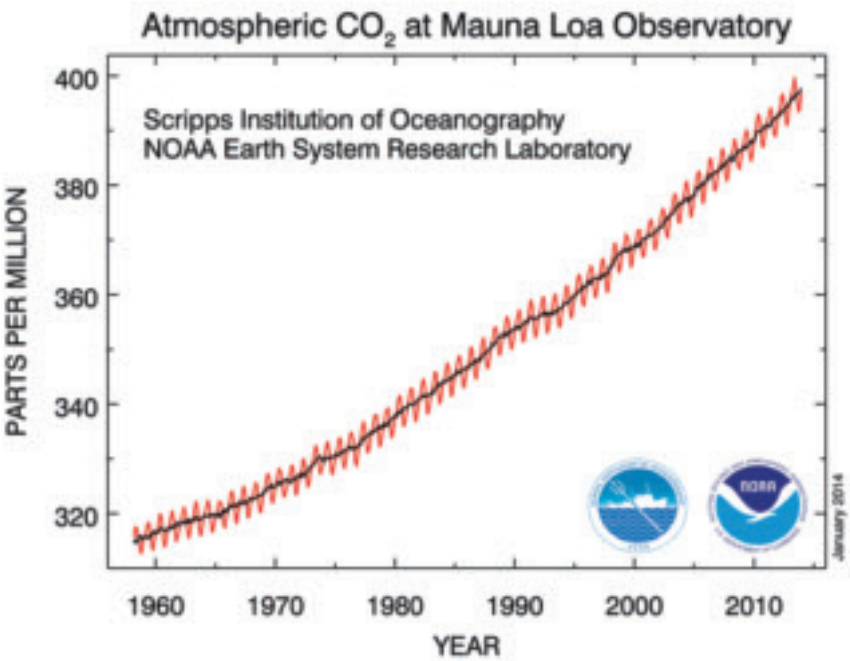


Figur 8. Utslipp og opptak av karbon fra menneskelig aktivitet. Alle tall er i milliarder av tonn. Forbrenning av olje, kull og gass, sementproduksjon, og avskoging fører til utslipp til atmosfæren, mens noe av dette blir tatt opp igjen i havet eller på landjorden.

hvor mye som blir igjen i atmosfæren, kan en også beregne hvor mye som blir tatt opp på land. Forskerne har kommet frem til at bidraget de siste år har vært omtrent 2,6 milliarder tonn for begge. Dermed har en for de siste årene at omtrent halvparten av utslippene har blitt igjen i atmosfæren, mens en fjerdedel har blitt tatt opp i havet og en fjerdedel på land.

En av de mest berømte måleseriene i klimaforskningen er den såkalte Keeling-kurven, oppkalt etter den amerikanske forskeren Charles Keeling som begynte å måle karbondioksid på Mauna Loa observatoriet på Hawaii allerede i 1958 (se figur 9). Det er etter hvert blitt hundrevis av tilsvarende måleserier rundt om i verden, og alle målingene viser det samme: En stadig raskere økning i mengden karbondioksid i lufta. Frem til slutten av 1800 tallet var mengden av karbondioksid i atmosfæren rundt 280 deler per million, omtrent på samme nivå som det hadde vært mellom alle de foregående istidene (se figur 3). 280 deler per million vil si at 0,28 promille av lufta da var karbondioksid.

Tidlig på 1960 tallet passerte mengden av karbondioksid 320, midt på 1990 tallet 360, og i 2013 kom de første enkeltmålingene over 400. I tillegg til den generelle økningen, viser Keeling-kurven veldig godt den naturlige årstidsvariasjonen i karbondioksid i atmosfæren. De høyeste verdiene finner vi om våren og de laveste om høsten. Grunnen til det er at mer enn to



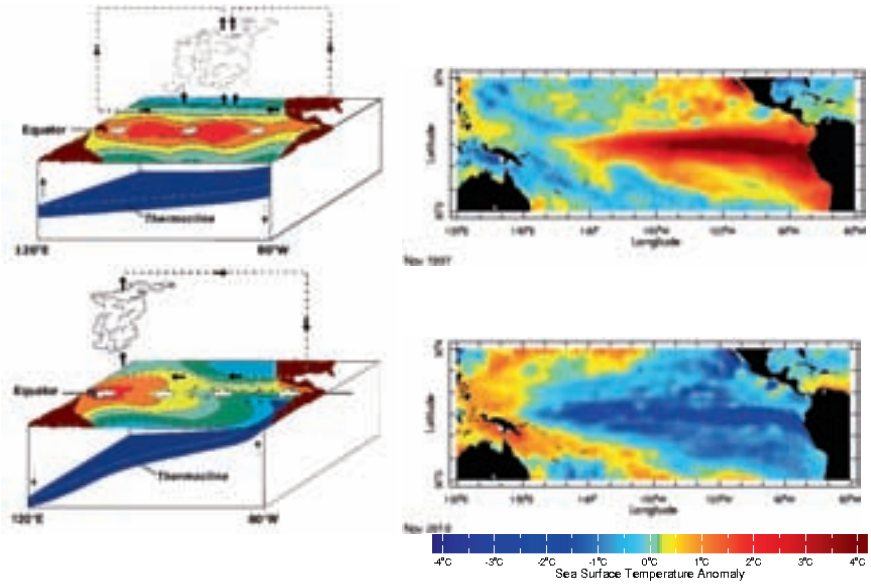
Figur 9. Målinger av atmosferens innhold av karbondioksid på Mauna Loa observatoriet på Hawaii. Rød kurve viser månedsverdier og sort kurve viser månedsdata der sesongvariasjonen er fratrukket.

tredjedel av landmassene er på den nordlige halvkulen, slik at fotosyntese og plantevekst om sommeren vil trekke karbondioksid ut av lufta, mens forråtnelse og utgassing om vinteren vil tilføre luften mer karbondioksid.

Hvorfor går oppvarmingen i rykk og napp?

Det er ikke bare den raske økningen i drivhusgasser som fører til at temperaturen på jorden endrer seg fra år til år og tiår til tiår. Store vulkanutbrudd kan spy så mye aske og gasser ut i atmosfæren at det vil skygge for sollyset og forårsake nedkjølinger av planeten som kan vare i flere år. Det siste store vulkanutbruddet var Mount Pinatubo på Filippinene juni 1991 da beregnede 20 million tonn med svoveldioksid ble slynget høyt opp i atmosfæren og førte til at temperaturen sank med opptil en halv grad de neste par årene. Denne effekten kan sees som en kortvarig dipp i den globale middeltemperatur (figur 5), og vi husker også Tambora i 1815 og Krakatao i 1883 (figur 4).

En annen faktor som har stor betydning for år-til-år variasjoner i klimaet, er et fenomen i Stillehavet som kalles El Nino – Sørlige oscillasjon, forkortet til ENSO. Stillehavet dekker nesten en tredjedel av jordens overflate, og er større enn alle landmasser til sammen. Klimaet er dominert av passatvindene, som blåser fra et område med høyt lufttrykk i øst, til et område med lavere lufttrykk i vest. Vinden dytter på havet, slik at også overflatevannet vanligvis strømmer fra øst til vest. Dermed blir det en oppstuvning av et tykt lag med varmt vann i vest, mens det i øst vil strømme kaldt og veldig næringsrikt vann opp til overflaten for å erstatte vannet som



Figur 10. Bildene til venstre viser skjematisk hvordan vindsystemene, nedbørsmønstrene, havstrømmene og overflatetemperatur- og tykkelse ser ut for øverst perioder med svake passatvinder og El Nino situasjon, og nederst for perioder med unormalt sterke passatvinder og La Nina situasjon. Bildene til høyre viser målte avvikene i overflatetemperatur i Stillehavet i november 1997 og i november 2010. Arealet av kartutsnittet er akkurat en fjerdedel av arealet til jorden.

strømmer vestover. Dette gir grunnlaget for det rikeste fiskeriene i verden. Det kalde vannet i øst kjøler ned luften over og er med å opprettholde høytrykket, mens det varme vannet i vest varmer opp lufta over og er med å opprettholde lavtrykket.

For folkene som har levd av fiske langs kysten av Peru og Chile har enkelte år har vært katastrofale. Varmt vann har plutselig erstattet det kalde og næringsrike vannet, og fisken ble borte i måneder og år. Siden dette ofte først inntraff rundt juletider, ga de spansktalende fiskerne fenomenet navnet El Nino, som på spansk betyr guttebarnet og sikter til jesusbarnet. Et annet fenomen som i lang tid hadde vært kjent i Stillehavet, gikk under navnet den sørlige oscillasjon. Det hadde vært målt at lufttrykket i Darwin helt nord i Australia, og på Tahiti i den sentrale Stillehav svingte i motfase. Når det var unormalt høyt trykk og tørke i Darwin var det unormalt lavt trykk og mye nedbør på Tahiti, og tilsvarende den andre veien.

Det var så sent som i 1969 at sammenhengen mellom El Nino og den sørlige svingning ble funnet, og det måtte en nordmann til! Jacob Bjerknes, som sammen med sin like berømte far Vilhelm Bjerknes har gitt navn til Bjerknessenteret i Bergen, forklarte da den mekanisme som senere har fått navnet Bjerknes tilbakekobling. Dersom passatvindene av en eller annen grunn skulle svekkes, vil noe av det varme vannet som har vært stuet opp i vest begynne å renne østover. Samtidig vil mindre kaldt vann strømme til overflaten, slik at overflaten blir varmere. Dette vil varme opp luften

over, minske lufttrykket, og resultatet vert ytterligere svekkelse av passatvindene. El Nino blir dannet. Det motsette fenomen, med sterkere enn normal passatvind og kaldere enn normalt vann i øst, har fått navnet La Nina eller jentebarnet på norsk. Figur 10 viser hvordan dette ser ut skjematisk og avvik i overflatetemperaturen for november 1997 og november 2011 med sterke El Nino og La Nina episoder.

En tredje faktor som kan forklare noe av svingningene i temperatur, er styrken på solen. Hvor nye stråling som solen sender ut, viser seg å henge sammen med hvor mye solflekker der er. Jo flere solflekker jo mer energi blir sendt ut. Antallet solflekker varierer over en 11 års svingeperiode, og målinger utført fra satellitt viser at strålingen som treffer toppen av atmosfæren varierer med omtrent 2 watt per kvadratmeter. Fordi Jorden er en kule som bare blir belyst fra en side om gangen, må dette tallet deles på fire for å få gjennomsnittet over hele kloden, altså en halv watt per kvadratmeter.

Den lille istid falt sammen med en lang periode med veldig få solflekker og altså unormalt svak sol, og forskerne mener i dag at noe av forklaringen på denne kalde perioden skyldtes den svake solen. Tilsvarende kan noe av oppvarmingen frem til midten av forrige århundre skyldes en sterkere sol. Men de siste 50 årene har solen igjen gradvis blitt svakere igjen, og i 2013 hadde den en topp i sin 11 års periode som er den svakeste som er blitt registret på over hundre år. Dersom vi er på vei inn i en ny periode med veldig liten solaktivitet, slik som tilfellet var under den lille istid, kan vi forvente en noe mindre temperaturøkning enn det som ellers ville vært tilfelle. Globalt vil det neppe utgjøre mer enn høyst et par tidels grader, men lokalt hos oss kan denne effekten være noe større. Nyere forskning antyder for eksempel at det har vært en sammenheng mellom minimum i solflekkaktiviteten og unormalt kalde vintrer i Europa opp gjennom århundrene.

Det har den siste tiden vært stort fokus på utflatningen av den globale gjennomsnittstemperaturen de siste 15 årene, og at dette passer dårlig med at det stadig er blitt mer karbondioksid i atmosfæren. Selv om det er ingen som kjenner alle svarene, er det mye som tyder på at alle de tre faktorene over har spilt en rolle, det vil si ENSO, vulkaner og sol. Viktigst har antagelig en tendens til flere kalde La-Nina hendelser i Stillehavet vært, men det har også blitt noe svakere sol, og det har vært flere mindre vulkanutbrudd som til sammen har ført til litt mer partikler høyt oppe i atmosfæren og økt skygge for solen. Uansett årsak, er det liten grunn til å tro at de tilfeldige variasjonene som naturen selv skaper vil kunne holde den stadig sterkere drivhuseffekten i sjakk over lang tid, og når den tid igjen kommer at både de naturlige og de menneskeskapte endringene igjen vil peke i samme retning, vil temperaturen kunne stige veldig raskt.

Fremtidens klima.

Fremtidens klima vil avhenge av hvordan alle ytre og indre pådriv i klimasystemet vil endre seg, og hvordan samspillet i klimasystemet vil kunne

forsterke eller eventuelt svekke effekten av disse endringene. Mens jordens baneparametre kan beregnes tusener og millioner av år frem i tid, må det gjøres antagelser for mange av de pådriv som styrer klimaet fra år til år og tiår til tiår. Dette gjelder blant annet mengden av drivhusgasser og partikler som vi slipper ut i luften, vulkanutbrudd og aktiviteten til solen.

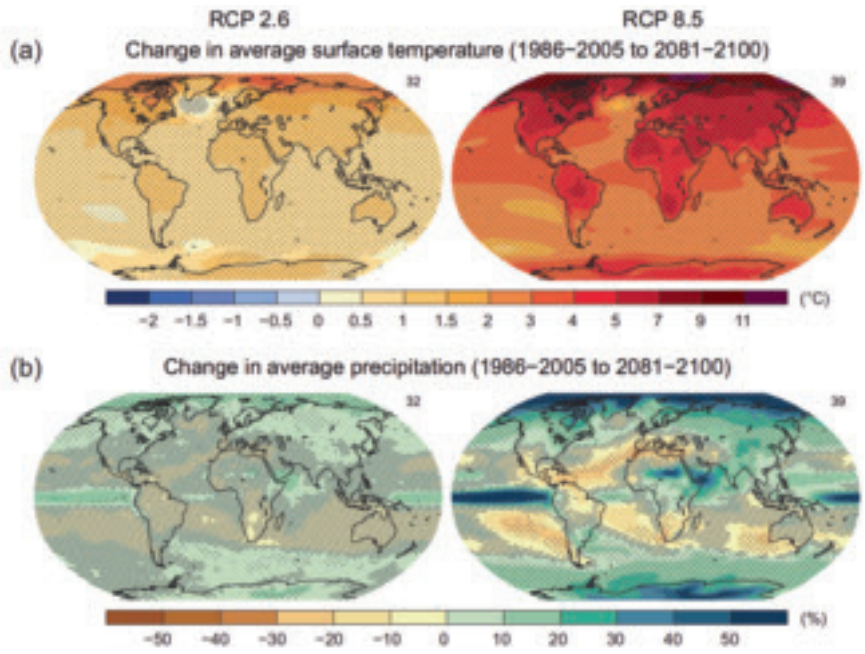
FNs klimapanel opererer med fire ulike scenarioer for hvordan innholdet av drivhusgasser og partikler i atmosfæren vil utvikle seg fremover. De er basert på ulike modeller for hvordan folketall, økonomi, teknologi og politikk vil utvikle seg, og gir mot slutten av dette århundre en ekstra varmestråling mot bakken på hhv 2.6, 4.5, 6.0 og 8.5 watt per kvadratmeter. For 2011 ble til sammenligning varmestrålingen beregnet til å være 2.3 watt per kvadratmeter høyere enn den var før den industrielle utviklingen satte fart i utslippene. Varmere jord fører også til mer tilbakestråling, slik at forskjellen mellom den energien som Jorden mottar og den energien som Jorden avgir blir mye mindre enn den ekstra varmestrålingen Fra observasjonene av varmeinnhold i havet (figur 7) husker vi at dette er målt til omtrent 0.4 watt per kvadratmeter over de siste 40 år, og beregninger basert på de ulike utslippsscenarioer gir at dette vil kunne femdobles for et strålingspådriv på 8.5 watt per kvadratmeter.

Figur 11 viser forventet endring i temperatur og nedbør for scenarioene med minst og størst utslippsøkning. Begge gjenskaper og forsterker det som vi allerede har sett fra observasjoner. For temperatur forventes det størst oppvarming over land og mest i nord, og for nedbør blir det våtere i tropene og nær polene, og tørrere i det subtropiske høytrykksbeltet som hos oss vil si Middelhavslandene.

I Norge og Nord-Europa blir det altså varmere og våtere, og særlig vil dette gjelde om vinteren. De direkte effektene av klimaendringene vil for Norge være relativt små og ofte positive. Lengre vekstsesong, mer vann i magasinene, mindre behov for fyring, og kraftoverskudd vil være positivt, mens hyppigere episoder med ekstremnedbør, flom og rasproblematikk, og høyere vannstand vil gi negative konsekvenser. Mange vil også se det negative i at snøgrensen vil krype stadig oppover selv om også det vil ha positive effekter på for eksempel varetransport.

Lengre sør i Europa forventes sterk oppvarming og nedbørsreduksjonen særlig om sommeren. Dette henger sammen siden mindre nedbør og tørrere jord gjør at varmen fra solen vil varme opp bakken i stedet for å fordampe vann. Tilsvarende områder finner vi i store deler av Nord- og Syd Amerika, Syd Afrika, Asia og Australia, De direkte effektene vil her være utelukkende negative, siden kombinasjonen av veldig høy sommervarme og lite nedbør gir uttørking av jorden og veldig dårlige betingelser for matproduksjon.

Det finnes etter hvert skremmende mange eksempler på hvordan ekstreme sommertemperaturer kombinert med lite nedbør vil slå ut. Sommeren 2003 fikk Vest-Europa en forsmak på fremtidig klima, da store deler av

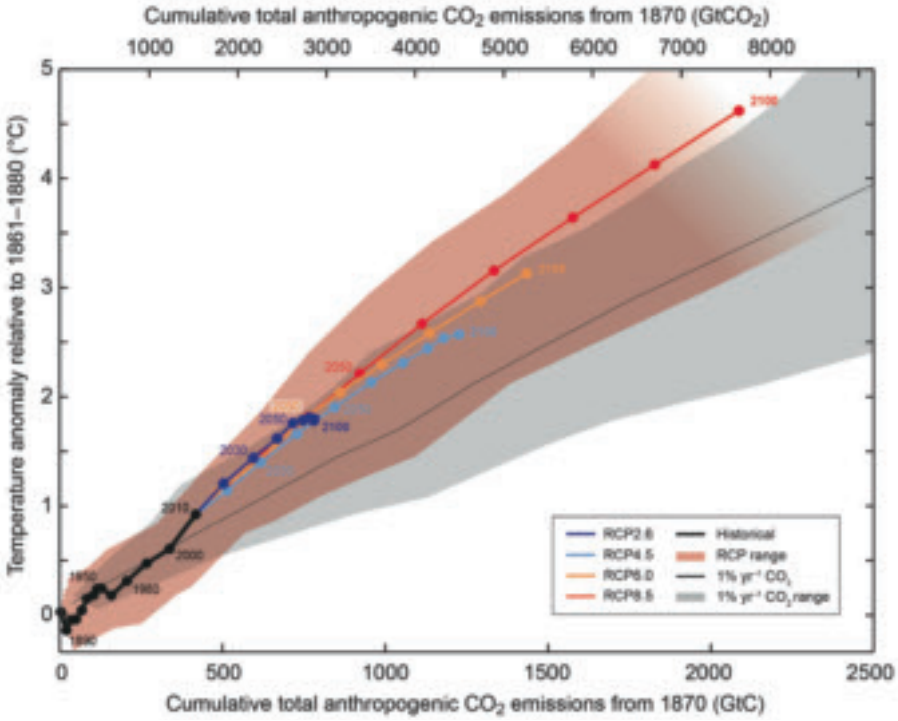


Figur 11. Forventet endring i overflate-temperatur og nedbør mot slutten av dette århundre for det mest optimistiske og det mest pessimistiske av de fire scenarioene til FN sitt klimapanel. Temperaturendring er vist i grader Celsius og nedbørsendring i prosent.

Frankrike hadde en hel måned med temperaturer 5 til 10 grader celsius høyere enn normalt. For alle aldersgrupper over 45 år skjøt dødstallene i været, og kanskje så mange som 50 000 menneske omkom som direkte følge av varmen. Jorden tørke ut, og på tross av massiv vanning forsvant en tredjedel av avlingene i Frankrike og flere av nabolandene denne sommeren. Tilsvarende ekstreme varme- og tørkeepisoder har en hatt i Russland i 2010, i USA i 2012, i Australia 2013 og 2014, osv.

Forskere fra Stanford Universitetet har studert utviklingen i den samlede globale jordbruksproduksjonen de siste tretti årene, og sammenlignet dette med utviklingen i temperatur og nedbør i vekstsesongen. Over store deler av kloden har temperaturøkningen vært mye større enn det som tidligere har vært innenfor de normale variasjonene, og forskerne finner en tydelig negativ effekt på matproduksjonen. Totalt for hele verden kom forskerne frem til at klimaendringene allerede har redusert produksjonen av mais og hvete med tre og fem prosent. Det høres lite ut, men tilsvarer den samlede produksjonen av mais i Mexico og hvete i Frankrike.

Rekordhøye sommertemperaturer og mindre nedbør i mange av de mest folketette områdene i verden blir trolig menneskehetens største utfordring i et fremtidig varmere klima. Mer lokalt vil ofte andre endringer dominere, som for eksempel økt nedbør, flom og ras, høyere vannstand og kanskje hyppigere episoder med sterk vind. Det er også et stort spørsmål hva effekten av mer karbondioksid og et stadig surere hav vil kunne bli på næringskjeden og matproduksjonen i havet.



Figur 12. Beregnet økning i den globale middeltemperatur som funksjon av de totale utslippene av CO2. Sort linje viser utvikling frem til nå, med forbruk karbon langs førsteaksen og temperaturendring langs andreaksen. Mørkeblå, lyseblå, oransje og røde linjer viser utviklingen ut fra de fire utslippsscenarioene.

Når en sammenligner dagens situasjon med de store klimaendringene vi har hatt de siste tusener eller millioner av år, kan en lett sitte igjen med inntrykk av at de klimaendringene som observeres nå, er forsvinnende små. Dette er ikke riktig. Endringene i den globale middeltemperatur går nå ekstremt mye hurtigere enn selv de raskeste svingningene under siste istid, og allerede i løpet av dette århundret vil Jorden kunne bli varmere enn den har vært på flere millioner år. Og siden det vil ta flere hundre år før naturen selv har klart å trekke drivhusgassene ut fra atmosfæren og lagre dem i jordsmonn eller dyphav, vil temperaturen holde seg høy, iskappene på Grønland og Antarktis vil fortsette å smelte, og havet vil stige i mange hundre år fremover.

Under den store klimakonferansen i København i 2009 skrev så godt som alle land, også Norge, under på at en skulle forsøke å hindre en temperaturøkning på mer enn 2 grader fra førindustriell tid. Resultatene fra FN sin klimarapport viser at vi har veldig lite tid å gjøre det på om 2-gradersmålet skal nås. Vi har frem til i dag slippet ut rundt 530 milliarder tonn karbon, og temperaturen har steget nesten en grad (se figur 12). Kloden kan forventes å passere 2 graders oppvarming når det totale utslippene har økt

til rundt 800 milliarder tonn. Med dagens utslipp vil det si om bare 25-30 år, og stadig færre tror at dette kan la seg gjøre. Uansett om målet kan nås eller ikke, vil våre valg i dag ha store konsekvenser for våre barn og deres barn og barnebarn, og vi må forberede oss på et fremtidig samfunn basert på renere energi og tilpasset et klima som vi ikke helt vet hvordan vil bli.

Figurliste

1. *Fra Wikipedia. Figuren er laget av Robert A. Rohde / Global Warming Art basert på data fra artikkelen Zachos, James, Mark Pagani, Lisa Sloan, Ellen Thomas, and Katharina Billups (2001). "Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present". Science 292 (5517): 686–693.*
2. *Fra Wikipedia. Figuren er laget av Robert A. Rohde / Global Warming Art basert på data fra Lisiecki, L. E., and M. E. Raymo (2005). "A Pliocene-Pleistocene stack of 57 globally distributed benthic □18O records". Paleoceanography 20: PA1003*
3. *Laget av forfatteren basert på publiserte data fra det europeiske EPICA prosjektet (Referanse for temperatur: Jouzel m fl. (2008.) Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. Science, Vol. 317, No. 5839, pp.793-797, 1. Referanse for karbondioksid : Lüthi, m. fl. (2008). High-resolution carbon dioxide concentration record 650,000-800,000 years before present. Nature, Vol. 453, pp. 379-382, 15 May 2008. Referanse for metan: Loulergue m. fl. (2008). Orbital and millennial-scale features of atmospheric CH4 over the past 800,000 years. Nature, Vol. 453, pp. 383-386, 15 May 2008.*
4. *Fra den femte hovedrapporten til FN sitt klimapanel (IPCC AR5, 2013)*
5. *Laget av prof. Helge Drange ved Bjerknessenteret / Universitetet i Bergen basert på direkte målinger fra National Aeronautics and Space Administration (USA) og Met Office Hadley Centre (England), og satellittmålinger fra Remote Sensing Systems og University of Alabama (USA).*
6. *Laget av prof. Helge Drange ved Bjerknessenteret / Universitetet i Bergen basert på data fra Meteorologisk institutt.*
7. *Fra den femte hovedrapporten til FN sitt klimapanel (IPCC AR5, 2013)*
8. *Fra Global carbon project - http://www.globalcarbonproject.org/.*
9. *Fra National Oceanographic and Atmospheric Administration, http://www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/co2_data_mlo.html*
10. *Skissene til venstre er fra Wikipedia og bildene til høyre har forfatteren laget ut fra data fra National Oceanic and Atmospheric Administration (USA).*
11. *Fra den femte hovedrapporten til FN sitt klimapanel (IPCC AR5, 2013)*
12. *Fra den femte hovedrapporten til FN sitt klimapanel (IPCC AR5, 2013)*