

## **Forutsigbarhet for vær og klimaendringer - klimamodeller**

Denne delen forklarer først hvordan moderne værvarsling utføres ved bruk av værvarslingsmodeller. Videre blir det forklart hvorfor det er grenser for hvor detaljert og hvor langt fram været kan varsles. Deretter blir det forklart hva en klimamodell er og hva slags eksperiment det kan gjøres med slike modeller. Det blir forsøkt å forklare at forutsigbarhet for klimaendringer er noe annet enn for været.



Allerede på begynnelsen av 1800-tallet var en klar over at fysikkens lover måtte gjelde for værfenomener i atmosfæren. På slutten av 1800-tallet blomstret mange vitenskaper, men svært lite av dette kom værvarsling til del. Mange land i Europa hadde riktignok opprettet sine nasjonale meteorologiske institutt og bygd ut meteorologiske målestasjoner med det formål å skaffe data for å varsle været. Telegrafene gjorde det etter hvert mulig å raskt samle dataene nasjonalt og spre dem internasjonalt. Imidlertid var værvarsling i denne



Vilhelm Bjerknes, malt av Rolf Groven i 1983.

tiden en beskrivende virksomhet basert på uklar erfaring og intuisjon. De store vitenskapsmenn var nok interessert i atmosfærens sirkulasjon og værvarsling, men fant ingen gode metoder å arbeide etter. Situasjonen beskrives godt av den geniale tyske vitenskapsmannen von Hermann von Helmholtz (1821-1894), som skriver<sup>1 2</sup>: *Under den samme himmelhvelving på hvilken de evige stjerner skrider frem som sinnbillede på naturens uforanderlige lovmessighet, baller skyene seg, veksler vinden, styrter regnet som tegn på den motsatte ytterlighet, blant alle naturfenomener de lunefullest vekslende, som flyktige og ugripbare unndrar seg ethvert forsøk på å fanges under lovens tøyler.* Det vart nordmannen Vilhelm Bjerknes som viste vei ut av uføret. Han var den første som analyserte problemet værvarsling ut fra vitenskapelige prinsipper<sup>3</sup>.

### Bjerknes' visjon for værvarsling

I 1904 publiserte Vilhelm Bjerknes en kort artikkel i *Meteorologische Zeitschrift*, Wien<sup>4</sup>, med overskrift *Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik* (Problemet værvarsling sett fra mekanikkens og fysikkens ståsted). Den inneholdt det som blir regnet for å være den første vitenskapelige analyse noen gang av problemet værvarsling, en syntese av hans tanker fra studier i lang tid innen hydro- og termodynamikk. Artikkelen ble innledet med følgende:

*Dersom det er slik, som alle naturvitenskapelig tenkende mennesker tror, at påfølgende tilstander i atmosfæren utvikles fra den foregående i følge fysikkens lover, da er det innlysende at den nødvendige og tilstrekkelige betingelse for en rasjonell løsning av problemet værvarsling er som følger:*

1. *Man må med tilstrekkelig nøyaktighet kjenne atmosfærens tilstand ved et bestemt tidspunkt.*
2. *Man må med tilstrekkelig nøyaktighet kjenne lovene som styrer utviklingen av atmosfæren fra en tilstand til den neste.*

Presist og direkte formulerer han her det som i dag kan kalles *Bjerknes' prinsipp om værvarsling*. Prinsippet gjelder for alle rasjonelle metoder for varsling av været. Bjerknes

beskrev kort hvordan oppgavene kunne utføres. Slik uttrykte artikkelen Bjerknæs' visjon og program for hva som skulle til for å utvikle en rasjonell værvarsling.

Han delte problemet i to deler; en analysedel – som Bjerknæs kalte diagnose - og en prognosedel. *Analysen* består i å kartlegge atmosfærens tilstand ved ett tidspunkt, dvs. lage værkart basert på målinger av vind, temperatur, trykk og fuktighet overalt på jorda i alle vertikale lag av atmosfæren. *Prognosen* består i å beregne framtidige endringer i atmosfærens tilstand uttrykt ved analysen fra kjente ligninger for bevegelsen, ligninger som uttrykker at bevegelsesmengde, masse og energi er bevart (ikke endrer seg i tid). Artikkelen la grunnlaget for moderne værvarsling, men siden beregninger av klimaendringer bygger på samme metode, har også moderne klimamodeller sin begynnelse i Vilhelm Bjerknæs' tenkning.

Da Bjerknæs skrev sin artikkel eksisterte det bare meteorologiske observasjoner for jordoverflaten, men han uttrykte i sin artikkel: "*Vi kan håpe ... at tiden snart vil komme da en, enten i daglig rutine eller for utvalgte perioder, har tilgjengelig en komplett diagnose for atmosfæren.*" Bjerknæs var litt senere med å organisere samtidige målinger over store deler av Europa i utvalgte perioder (gjennom International Commission for Scientific Aeronautic). Ballonger med meteorologiske instrumenter, som steg til mer enn 10 000 meter, ble sluppet flere ganger daglig fra utvalgte posisjoner fra flere land over perioder på noen få dager. Disse ballongene sprakk i stratosfæren og instrumentene med registreringene dalte ned til bakken i fallskjerm og ble som regel funnet. I sin tid som direktør for Geofysisk institutt i Leipzig (1912-1917), analyserte Bjerknæs og hans stab disse målingene, som senere skulle danne grunnlaget for de første forsøk på beregninger for å framskaffe en prognose. Samtidig bygde Bjerknæs og hans medarbeidere opp det teoretiske grunnlag for å gå løs på prognosedelen.

Bjerknæs listet opp ligningene fra mekanikk og fysikk som bestemmer framtidige tilstander i atmosfæren fra en starttilstand og skisserte metoder for å løse dem, dvs. for å utføre skritt 2 i sitatet over. Som han skrev, denne beregningsoppgaven var den viktigste og vanskeligste. Men han var sikker på at den lot seg gjennomgjøre og skrev i sin artikkel fra 1904: "*Vi vil helt sikkert ikke møte uoverkommelige matematiske vansker i gjennomføringen av metodene.*"

Det prognostiske skrittet består i å løse differensialligningene som uttrykker tidsendringen av atmosfærens tilstand, som Bjerknæs beskrev ved sju avhengige variable: trykk, temperatur, tetthet, fuktighet og de tre komponentene av vinden (to horisontale og den vertikale). Han identifiserte så sju uavhengige ligninger for å utføre det andre skritt i sitt varslingsprinsipp: de tre hydrodynamiske bevegelsesligningene (Newtons 2. lov om at akselerasjonen til en luftpartikkel er lik summen av kreftene som virker på den<sup>5</sup>), kontinuitetsligningen som uttrykker massens bevarelse<sup>6</sup> (uttrykker at masse ikke kan forsvinne), tilstandsligningen som knytter sammen trykk, temperatur og tetthet<sup>7</sup>, og to energiligninger om energiens bevarelse (første lov i termodynamikken<sup>8</sup>; uttrykker at energi ikke kan forsvinne) og entropiens økning<sup>9</sup> (andre lov i termodynamikken<sup>10</sup>). Bjerknæs artikkel var av filosofisk art, og han skrev ikke opp ligningene i detalj. Han gjorde en feil ved å bruke den andre loven i termodynamikken<sup>11</sup>. I stedet skulle han spesifisert en kontinuitetsligning for vanddamp.

Bjerknæs innså at ligningene fra teoretisk fysikk ikke kunne løses direkte på reelle atmosfæriske tilstander, dertil mente han - ganske riktig ut fra tidens teknologi - at

beregningsmengdene var for store. Han håpte på å utvikle omtrentlige grafiske metoder, men kom egentlig ingen vei med dette uten i helt enkle, idealiserte strømningsmønstre. Likevel hadde han et sterkt håp for framtiden. Da han begynte som direktør for et nyopprettet geofysisk institutt i Leipzig i 1912, da det allerede forelå målinger for deler av Europa i visse situasjoner, sa han i sin tiltredelsestale<sup>12</sup>: ”Nå som et fullstendig sett av observasjoner for en betydelig del av de frie luftlag er blitt publisert i regulære serier, venter et svært problem på oss som vi ikke lenger kommer utenom. Vi må ikke bare anvende ligningene i teoretisk fysikk for ideelle tilfeller, men også i aktuelle situasjoner slik de er beskrevet med moderne observasjoner. ... Problemet med nøyaktig forhåndsberedning, som ble løst for astronomien for århundrer siden, må også angripes på en seriøs måte for meteorologien.” Han innså hvor vanskelig oppgaven var og at reelle beregninger av prognoser kunne ta mer tid enn atmosfæren selv bruker på sin utvikling. I sin tale konkluderte han med at dersom bare beregningene stemte med virkeligheten for de dagene en hadde målinger for, ville vitenskapen vinne en stor seier og et gjennombrudd for værvarsling. Da ville meteorologi, som han sa, bli en eksakt vitenskap innen fysikk.

Han var overbevist om at dersom de teoretiske beregningsproblemene ble løst, ville praktiske anvendelser for værvarsling følge etter. Som han sa: ”Det kan ta år for å bore en tunnel gjennom et fjell. Mange arbeidere får ikke oppleve å se gjennombruddet. Likevel vil ikke dette hindre de som kommer etter å fare gjennom tunnelen med ekspressfart.”

### Utvikling av værvarslingsmodeller

Med sin artikkel fra 1904 uttrykte Bjerknes sin visjon for hva vi dag kaller *numerisk værvarsling*<sup>3 13</sup>. Louis Fry Richardson ble inspirert av Bjerknes og gjorde et fantastisk eksperiment for å regne ut for hånd været 6 timer fram<sup>14</sup>. Han brukte analyser fra et område over Tyskland utført av Bjerknes og hans assistenter for ulike vertikale lag. Richardson satte opp ligningene på en riktig måte og innførte numeriske metoder for å løse dem. Men svaret han fikk var helt urealistisk, slik beregnet han endringer i bakketrykket over 6 timer som var mange ganger større enn observert. Professor Peter Lynch fra Irland har vist at Richardson ikke gjorde en eneste regnefeil da han i flere måneder nesten kontinuerlig utførte de addisjoner og multiplikasjoner som måtte til for å løse ligningene<sup>15</sup>. Når resultatet likevel ble urealistisk, skyldtest dette av analysene av vindmønstrene ikke var i balanse med analysene av temperaturen som representerer massen<sup>16</sup>. Denne ubalansen førte til store tyngdesvingninger som ga store, urealistiske trykkvariasjoner.

Etter andre verdenskrig fikk den store matematikeren John von Neumann<sup>17</sup> i oppgave å utnytte de første elektroniske datamaskiner til numerisk værvarsling. For dette organiserte han en forskningsgruppe i Princeton, USA. Her var nordmennene Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtoft med, blant annet for å overføre kunnskap etter Bjerknes og hans mange assistenter til unge, lovende amerikanske forskere. Det første varslet utført på datamaskin ble publisert i 1950<sup>18</sup>. I forhold til modellen til Richardson var modellen brukt i Princeton mye enklere. Årsaken lå delvis i mangel på regnekapasitet. Etter som datamaskinene er blitt videreutviklet, har numerisk værvarsling utviklet seg etter Bjerknes sin visjon med modeller basert på ligninger slik de ble satt opp av Richardson.

## ECMWF

Et stort skritt mot forbedret numerisk værvarsling (numerical weather prediction<sup>19</sup>; NWP) ble tatt da European Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) ble opprettet i Reading, England i 1975<sup>20</sup>. Som Bergensskolen gjorde banebrytende forskning innen arbeidsomgivelser der operasjonell værvarsling var det viktigste, utviklet ECMWF metodene for NWP innen omgivelser der operasjonell NWP sto i sentrum. Metoder er blitt utviklet til å utnytte alle typer observasjoner; ikke bare avhengige variable som vind og temperatur, men også størrelser som er en funksjon av de avhengige variable, slik som stråling fra atmosfæren observert med satellitter. Gjennom de siste årene er *ensemblevarsling*<sup>21</sup> blitt innført. I dette konseptet blir det beregnet et ensemble (utvalg) av prognoser fra ulike analyser for samme tidspunkt, analyser som alle er sannsynlige ut fra datadekningen. På den måten har NWP fått en tilnærming mot sannsynlighetsvarsling, i motsetningen til Bjerknæs' deterministiske varsling. Ved ECMWF er hovedkjøringen en "deterministisk" kjøring med så god oppløsning som deres supercomputer<sup>22</sup> tillater (en kjøring fra en analyse). I tillegg kjøres et ensemble på 50 kjøringer. For å kunne utføre disse innen rimelig tid, er oppløsningen noe grovere enn i hovedkjøringen. Gjennomsnittet av ensemblet gir det beste varslet, mens størrelsen på avvikene fra gjennomsnittet uttrykker *usikkerhet*.

Lennart Bengtsson<sup>23</sup> var den første lederen av forskningsavdelingen. Han har karakterisert metodene innen NWP som "methods of brutal force". Han tenker da på de ufattelig mange aritmetiske operasjoner som blir utført på supercomputere. Uttrykket kan spores tilbake til Bjerknæs' utsagn om "tunneler" sin berømte tale i Leipzig i 1912.

## Norsk NWP

Fjørtoft ble direktør ved Meteorologisk institutt (MI; met.no) i 1955. Han klarte å få innkjøpt den første elektroniske datamaskinen til MI i 1960 for å utføre operasjonell NWP. Med en liten gruppe medarbeidere, som arbeidet halv tid i operasjonell værvarsling og halv tid i NWP, ble modeller utviklet og operert i daglige rutiner. Den første prognosemodellen ble utviklet av Hans Økland<sup>24</sup>. For å kunne utføre beregningene raskt nok, ble ligningene forenklet<sup>25</sup>. Dette ble gjort slik at en unngikk vanskene Richardson hadde. For fagfolk er det interessant at metoden som ble brukt for å løse ligningene (integrere i tid) brukes i dag i modifiserte former i de fleste modeller for værvarsling (Fjørtofts kvasi-lagranske tidsintegrasjon<sup>26 27</sup>).

Inntil Fjørtoft ble pensjonist i 1979, hadde NWP relativt stor plass ved MI. Hans drøm var å utvikle NWP basert på ligninger der felt for masse og vind er knyttet sammen på en nøyaktig måte (mye mer nøyaktig enn i tidligere balanserte modeller). Han ble støttet av Eliassen, som var professor i meteorologi ved Universitetet i Oslo. Fjørtoft trodde at den nødvendige forskningsutviklingen kunne bli gjort på MI, og dette var en av grunnene til at Norge ikke ble med i ECMWF fra begynnelsen (ECMWF ble opprettet i 1975). Men Fjørtoft lyktes ikke med sine ideer, den nasjonale gruppen som ble satt på oppgaven var alt for liten og de nasjonale datamaskinene alt for langsomme.

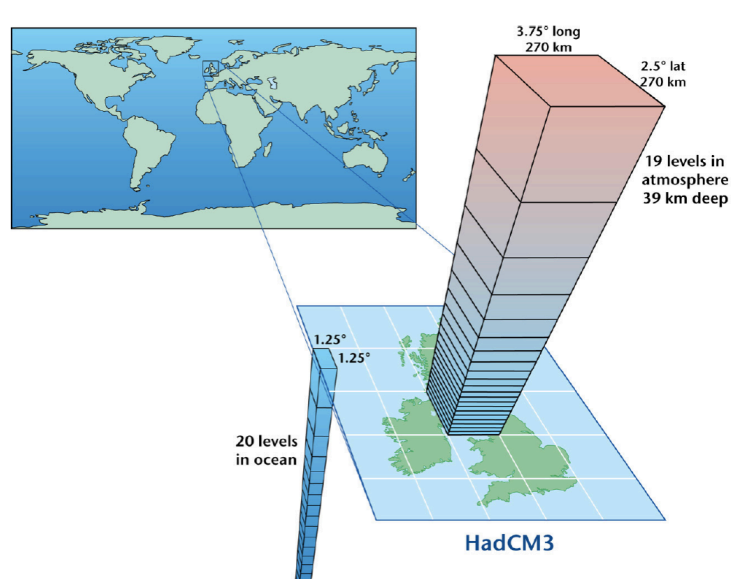
Da Fjørtoft ble pensjonist, ble det i stedet utviklet et system for kortsiktig NWP basert på de opprinnelige ligningene til Richardson, de som Fjørtoft prøvde å unngå. Den numeriske modellen beregnet på et begrenset geografisk område, med løsninger på rendene gitt fra resultater fra globale modeller fra meteorologiske sentra i utlandet. Originale og effektive metoder for tidsintegrasjon og dataassimilasjon ble utviklet etter ideer av Arne Bratseth, professor ved Institutt for geofysikk, Universitetet i Oslo. Jeg ledet arbeidet og de pensjonerte professorene Fjørtoft og Eliassen ble våre beste kunder i utviklingsfasen. De studerte de daglige produktene og var svært imponert over resultatene. Fjørtoft sa til meg at han aldri hadde trodd at NWP skulle nå den kvalitet han så i våre varsler. Eliassen uttrykte også sin begeistring og sa blant annet: ”Strukturen i værsystemene er helt lik den i atmosfæren!” Senere ble den nasjonale aktiviteten innen NWP innlemmet i et samarbeid mellom nordiske land, Nederland, Irland og Spania, kalt HIRLAM<sup>28</sup>. ECMWF tar seg i dag av den globale varslingen, mens nasjonale rutiner bygd på HIRLAM (og andre modeller) tar seg av kortsiktig varsling. Produkter fra ECMWF blir her brukt som løsninger på randen av begrensede geografiske beregningsområder.

### Dagens værvarslingsmodeller

Det er viktig å få tak i begrepet tilstand, atmosfærens tilstand eller *klimasystemets* tilstand ved et bestemt tidspunkt. Tilstanden i atmosfæren beskrives ved et visst antall variable - temperatur, vindkomponenter, trykk, fuktighet og skyer – i ett gitter – nett med punkter – som representerer atmosfæren. Ved et tidspunkt har alle variable en bestemt verdi i hvert gitterpunkt, dvs. beregningspunkter som dekker hele kloden og alle lag vertikalt.

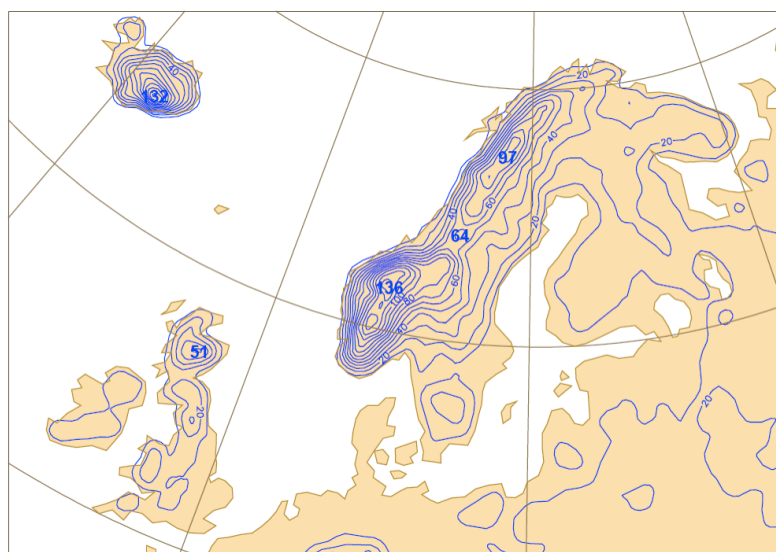
La oss tenke oss at kloden i retningen sør-nord dekkes med et gitterpunkt for hver breddegrad. Det ville da være cirka 111 km mellom gitterpunktene. Da blir det 90 punkter fra ekvator til hver av polene, totalt  $90 + 90 + 1 = 181$  punkter. La oss gjøre det samme i retning øst-vest langs ekvator. Det blir  $90 \cdot 4 + 1 = 361$  punkter. Også her vil avstanden være 111 km. Om vi gjør det samme for hver breddegrad, vil det bli mindre og mindre avstand mellom gitterpunktene og alt for mange punkter mot polene. I virkeligheten brukes det som regel et koordinatsystem der oppløsningen ikke øker mot polene. La oss likevel holde oss til det enkle geografiske gitteret. Da ville kloden dekkes av et gitter med  $181 \cdot 361 = 65341$  punkter. La oss anta at vi bruker 100 vertikale lag. Tilstanden ved ett tidspunkt beskrives med en verdi for hver variable i  $6534100$ , dvs.  $6534100 \cdot 7 = 45738700$ , altså cirka 45 millioner tall.

De fysiske ligningene gjør det mulig å beregne endringen i alle disse verdiene for et lite skritt fram i tid (tidsskritt), for eksempel en halv time. Dette involverer en mengde beregning som reduseres ned til addisjoner og multiplikasjoner. Når denne endringen legges til den opprinnelige tilstanden, kjenner vi tilstanden en halv time lengre fram i tid. Da kan vi forsette kverna og regne oss fram en ny halvtime, osv. Dersom en ville øke oppløsningen ved å minke avstanden horisontalt mellom gitterpunktene til det halve, får vi fire ganger flere gitterpunkter rundt kloden. Om vi gjorde noe tilsvarende vertikalt, vil vi til sammen ha åtte ganger flere punkter. Ofte fører en slik bedring av oppløsningen til at tidsskrittet må halveres. Altså fører en slik økning i gitterpunktene til 16 ganger mer beregning. Jo tettere gitterpunktene er, desto mer nøyaktig blir beregningene. Men bedre oppløsning krever hurtigere beregning. Derfor kan modellutviklere aldri få en supercomputer som er rask nok.



**Fig. 1:** Illustrasjon av beregningspunkter i en klimamodell for atmosfære og hav med vertikalt og horisontalt gitter. Hadley Centre, UK Met. Office.

Programvaren som utfører beregningene, dvs. løser ligningene, kalles *værvarslingsmodeller* og *klimamodeller* (Fig. 1). Vi sier at modellene simulerer atmosfærens bevegelse fra en utgangstilstand. Når beregningene utføres på en computer, sier vi også at vi kjører modellene. Værvarslingsmodeller omfatter vanligvis bare atmosfæren, mens klimamodeller også simulerer bevegelsen i havet og vekselvirkning mellom atmosfære og hav. I prinsippet har værvarslingsmodeller og klimamodeller lik struktur og samme løsningsmetoder. Siden begge typer modeller utnytter den regnekapasitet som er tilgjengelig, er den romlige oppløsningen best i værvarslingsmodeller. Den romlige oppløsningen måles ved hvor tett beregningspunktene er plassert. I værvarsling beregnes det gjerne 10 dager fram med cirka 20 km mellom beregningspunktene horisontalt (Fig. 2). Beregningstid til rådighet er av størrelsesorden en time. Klimamodeller regner ofte flere hundre år fram og benytter gjerne minst 100 km mellom gitterpunktene. Beregningstiden kan noen ganger være flere uker.



**Fig. 2:** Topografi i en modell med cirka 40 km mellom punktene (dekameter). ECMWF.



Det sier seg selv at modellene, som simulerer bevegelsen i atmosfære og hav, er kompliserte. Alle relevante fysiske prosesser er med; slik som kortbølget og langbølget stråling, skyer og nedbørprosesser, turbulens med *flukser* av bevegelsesmengde og varme for ulike typer overflater, drag fra fjell på mindre skala enn den som løses opp, varme og fuktighetstransport ned i jorda, prosesser i snø og is, avrenning til havet etc. (Fig. 3). Noen tror at bare ved å skru på fysiske konstanter som inngår, kan en tilpasse resultatene for å få fram det som observasjoner gir. Men dette er ikke tilfelle og heller ikke mulig. Bare fysiske konstanter inngår, slik som tyngdens akselerasjon og varmekonstanter som varmekapasiteter. Modellene simulerer hele klimasystemet med så realistiske prosesser som mulig, i tid og rom uavhengig av nye målinger som måtte være tilgjengelige. Det eneste stedet målinger brukes er i analysen av utgangstilstanden.

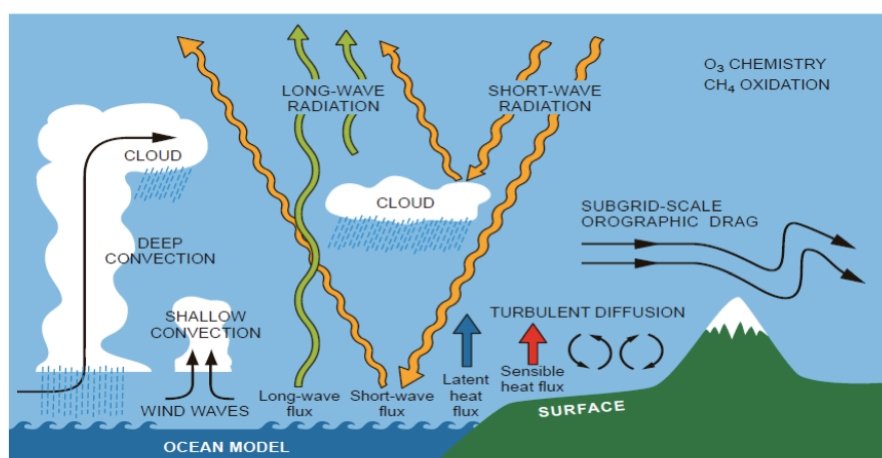


Fig. 3: Fysiske prosesser i atmosfæren som er med i en klimamodell. ECMWF.

I moderne værvarsling er det en formidabel oppgave å bestemme tilstanden ved et tidspunkt. Til dette brukes en kortsiktig prognose fra forrige gang tilstanden ble oppdatert, for eksempel seks timer tidligere. Denne prognosen bærer med seg kunnskap fra dette forrige tidspunktet. Så oppdateres denne prognosen med de siste observasjonene. Det er mange observasjonstyper, målt både fra jorda og fra satellitter. Målingene har visse feil og prognosen har feil. Til dels brukes direkte observasjoner av en variabel, for eksempel vind. Dels brukes indirekte målinger som for eksempel stråling fra atmosfæren målt fra en satellitt. Noen ganger vil nye observasjoner vise at prognosen har visse feil. I så fall prøver en å føre denne kunnskapen tilbake til forrige analyse slik at den kan bli oppdatert og ny forbedret prognose beregnet. Til sammen utgjør beregningene et gigantisk estimeringsproblem der observasjonene passer best mulig sammen med observasjonene og med oppdaterte prognoser fra forrige tidspunkt. Oppgaven kalles *dataassimilasjon*.

### Forutsigbarhet for værvarsling

Da Bjerknes skrev sin berømte artikkel var determinismen populær som en filosofisk retning<sup>29</sup>, som noe forenklet sier at universet utvikler seg på en lovbestemt måte, dvs. slik at utviklingen er forutbestemt. Bjerknes' arbeid passet godt inn i deterministisk tenkning. Dersom atmosfærens tilstand kunne bestemmes i detalj ved ett tidspunkt ved målinger, skulle det i prinsippet være mulig å beregne været fram for all framtid, dvs. så lenge de ytre

pådrivene på klimaet - slik som endringer i solstrålingen - er kjente. En tenkte seg nærmest at det var mulig å lage en kalender for været dag for dag. Selv om Bjerknes hadde enorm tro på vitenskapens muligheter, var han mer nøktern. I 1904 skrev han tre lange avisartikler i Aftenposten om problemet værvarsling. I den siste artikkelen<sup>30</sup> mener han at det vil bli mulig å varsle været i detalj et par uker fram. Videre ser han for seg sesongvarsler, igjen basert på modellberegninger, med utsagn som at neste årstid vil bli kaldere/varmere, våtere/tørre, mer stormfull/roligere enn normalt. Vi har ikke nådd de mål Bjerknes så for seg, men hans visjoner er omtrent det dagens meteorologer ser som en mulighet på sikt.

Dersom noen hadde drømmer om værkallendere, fikk de en alvorlig knekk like etter 1960. Da viste den amerikanske meteorolog og norgesvenn Edward N. Lorenz<sup>31</sup> at selv ørsmå feil i starttilstanden etter hvert vil få betydning for prognosene<sup>32</sup>. Han beregnet framtidige tilstander fra en utgangstilstand i et svært enkelt dynamisk system. Utgangsanalysen besto av tre tall som kan tolkes som koordinatene for et punkt i rommet. Disse tre tallene leste han inn i sin programvare med tre desimalers nøyaktighet. Datamaskinen regnet med sju desimalers nøyaktighet, dvs. fjerde, femte, sjette og sjuende desimal ble tilfeldig satt i analysen. Han gjorde en beregning for en tidsutvikling for systemet. Men da han gjentok beregningen etter en lunsjpause, så han at resultatet ble forskjellig et stykke ut i prosessen, og at forløpet etter hvert ble helt ulikt det han beregnet før lunsj. Han fant at de små og tilsynelatende ubetydelige forskjellene i utgangstallene var årsaken. Hans oppdagelser førte til det vi kaller *kaosteori*.

Anvendt på værvarsling betyr dette at dersom en værvarslingsmodell kjøres to ganger fra analyser for samme tidspunkt som er nesten like, kan prognosene etter hvert bli helt forskjellige. Det forutsettes at begge analysene passer med de observasjoner som fins. Forskjellene skyldes bare små feil i observasjonene og/eller mangelfull dekning. Små forskjeller på et sensitivt sted i analysene vil vokse raskt i tid og etter hvert kunne dominere utviklingen. Dette betyr at det er grenser for hvor langt fram været kan varsles, dvs. det er teoretiske grenser for hvor stor *forutsigbarhet* det er for værvarsling. Samme hvor mange nøyaktige observasjoner og raske superdatamaskiner en har til rådighet, etter en viss tid vil varslet være helt misvisende.

I de enkle ligningene som Lorenz løste, inngår det også tre konstanter. Han viste at på samme måte som små feil i utgangsanalysen etter hvert ødela prognosen, ville små unøyaktigheter i spesifiseringen av disse konstantene ha samme effekt. I værvarslingsmodeller (og klimamodeller) vil det alltid være bevegelser og fysiske prosesser som ikke løses opp i det gitteret som brukes. Disse prosessene må uttrykkes ved de tilstander som beskrives. Dette kalles *parameterisering* av prosesser på liten skala. Lorenz' enkle beregninger demonstrerer at små feil i slike parameteriseringer etter hvert vil ødelegge prognosene som værvarslingsmodeller gir.

Moderne værvarsling har tatt konsekvensen av kaosteorien og har delvis forlatt den deterministiske tenkemåten. I våre dagers ensemblevarsling kjøres det derfor mange prognoser fra analyser som er nesten like, men som alle er sannsynlige ut fra det observasjonsgrunnlaget som fins. Denne teknikken gir et ensemble av varsler, som *a priori* (på forhånd) kan gi mål for usikkerheten i varslene. Denne usikkerheten varierer fra dag til

dag og for ulike geografiske områder. Noe forenklet kan en si at dagens værprognoser på våre bredder i gjennomsnitt har varslingsinformasjon en uke fram i tid.

Tankene til Ed Lorenz er blitt anvendt på svært mange forskningsfelt, også innen filosofi og religion. En kan si at hans forskning har forandret måten vi tenker på. Tidligere ble fysikk sett på som en eksakt vitenskap, for eksempel i motsetning til meteorologi som i praksis alltid har vært en ikkeeksakt vitenskap. Da Vilhelm Bjerknes svært mange ganger ble innstilt til Nobelprisen i fysikk, var hovedanklagen mot han at han ikke representerte en eksakt vitenskap. I fysikkåret 2005 ble tre oppdagelser siste hundre år vurdert som de viktigste: Einsteins relativitetsteori, kvantefysikken og kaosteorien. Med kaosteorien er heller ikke fysikk en eksakt vitenskap.

I 1981 ble jeg tilfeldigvis kjent med Ed Lorenz som i likhet med meg var gjesteforsker ved ECMWF i noen måneder. Han hadde forsket i Oslo et år på sekstitallet og kjente Norge godt. Her dyrket han blant annet hobbyen sin: fotturer i fjellet. Han var god venn av Jack Nordø, som var min forskningssjef ved Meteorologisk institutt og som hadde studert ved MIT der Lorenz var professor. Det hadde seg slik at jeg en dag ga en beskjed til Lorenz fra Nordø. Etter den hendelsen kom han alltid og satte seg ved samme lunsjbord som meg. Det var helt uforståelig for meg, kanskje det sier noe om hans positive erfaring med nordmenn.

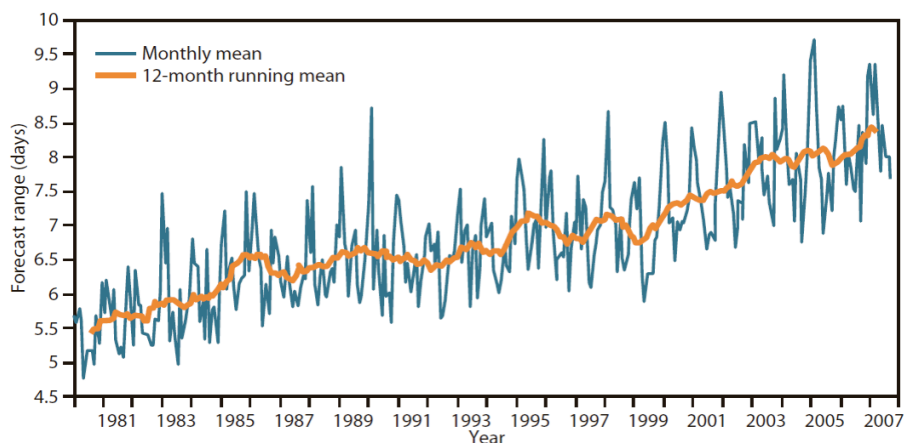
Lorenz var ualminnelig beskjeden på egne vegne og stille i sin ferd. Han var svært takknemlig da jeg et par ganger hjalp han med mindre computerproblem. I Oslo hadde han ry for å være en fabelaktig programmerer. På sekstitallet måtte en kjenne i detalj hvordan computeren var bygd opp og programmere direkte i tallkoder, enten i totallsystemet eller åttetallssystemet<sup>33</sup>. Han kodet opp en forenklet værvarslingsmodell og programmet fungerte ved første forsøk. Det var vanlig å bruke måneder på å identifisere og rette opp feil.

Jeg ventet lenge på at Lorenz skulle få Nobelprisen i fysikk. Men i april 2008 døde han 90 år gammel<sup>34</sup>. Ingen kunne vel gi Nobelprisen til en slik beskjeden mann. Det store intellektet hadde han, forskningsproduksjonen og banebrytende resultater, men han reklamerte aldri for sitt arbeid eller sin person.

På tross av de teoretiske begrensingene som kaosteorien setter for forutsigbarhet, er det imponerende hva værvarslingsmodeller kan utføre. De kan forutsi utvikling av sterke lavtrykk flere dager før de oppstår. Slike utviklinger innebærer en utløsning av det vi har kalt *baroklin instabilitet*, en komplisert prosess der små impulser kan vokse raskt. Et lavtrykk kan ses på som en sirkulasjon der horisontale *Rosshybølger* ved *tropopausen* vekselvirker med tilsvarende bølger ved overflaten. I denne prosessen oppstår sekundære vertikale sirkulasjoner knyttet til fronter der fuktighetsforholdene og frigjøring av latent varme spiller en stor rolle. Modellene simulerer disse sirkulasjonene så godt de frigjør varmen som skal til for å danne et kraftig lavtrykk.

Modellene danner skyer og utløser nedbør, prosesser som omfatter romskalaer fra mikrometer til tusen kilometer. Nedbørmengdene stemmer forbausende godt overens med observasjoner. Meteorologisk institutt har spesielle rutiner med varsling av *ekstremvær*, slik som vindstyrker eller nedbørmengder over visse terskler. Det er imponerende hvor godt

modellene har varslet slike situasjoner de siste årene. Dette skyldes nok delvis dyktig overvåking av været utført av varslingsmeteorologene, men modellenes varslingssevne teller mest. Modellenes suksess skyldes systematisk utvikling og dataassimilasjonen over flere tiår. Her har ECMWF vært ledende i verden (Fig. 4).



**Fig. 4:** Økning i forutsigbarheten for værvarsling ved ECMWF siden dette senteret startet operasjonell værvarsling i 1979. Resultatet bygger på verifisering av værvarslingsmodellens evne til varsle lavtrykk og høytrykk på stor skala. ECMWF.

## Havmodeller

Det er utviklet lignende modeller for havet, modeller som kjøres med pådriv fra atmosfæren. Disse pådrivene kan tas fra fortløpende analyser eller prognoser ved havoverflaten, ofte for hver 6. time. Det fins arkiv med slike analyser – *reanalyser* - fra førti og femtiårene og fram til i dag. Analysene gir blant annet vind og turbulente flukser av bevegelsesmengde og varme – direkte varme, latent varme og strålingsvarme - mellom hav og atmosfære, dvs. de størrelsene som trengs for å kjøre havmodeller. I slike rene havmodeller blir utstrekning og tykkelse av sjøis vanligvis regnet som kjent på forhånd.

Modeller for havet er på noen måter enklere enn for atmosfæren og på andre måter mer kompliserte. En har turbulensproblemet felles med atmosfæremodellene, men havmodellene har bare vann i en fase og ingen varmetilførsel som f. eks. tilsvarer frigjøring av latent varme (bortsett fra i forbindelse med is). Dette er en stor fordel og betyr at vannpartikler beveger seg over store avstander uten å endre tetthet og saltholdighet. Strålingsforholdene er også langt enklere og omfatter bare øverste lag. I enda større grad enn i atmosfæren fins det skarpe gradienter i variable mellom ulike vertikale sjikt. Kyster og skråninger mot kyster setter sterke føringer på sirkulasjonen. Til en viss grad byr sterke gradienter mellom sjiktene og kystene på matematiske problemer. Et stort problem med havmodeller er mange ulike rom- og tidsskalaer som inngår i havets bevegelse (*romlige og temporære skalaer*). Vi kjenner tidevannsstrømmene, mindre kjent er blandingsprosessene disse representerer.

Havet har også sine lavtrykk og høytrykk som dannes ved *baroklin og barotrop instabiliteter*<sup>35</sup> (se Del II, kap. 3). Det er bare det at skalaen for disse lavtrykkene er mye mindre enn i atmosfæren, på våre bredder cirka 20 km, mot et par tusen km i atmosfæren. Dette betyr at

modellene trenger romlig oppløsning som samsvarer med dette, altså bør oppløsningen i havmodellene være mye høyere enn i atmosfæren.

Institusjoner som Meteorologisk institutt kjører havmodeller operasjonelt hver dag, blant annet for å varsle vannstand og strøm i overflaten. Pådrivene tas da fra prognoser for atmosfæren. Modellene kan ha ned til en kilometer mellom gitterpunktene for store deler av Nord-Atlanteren. Modellene kan være globale, men det blir som regel for beregningskrevende å bruke stor oppløsning overalt. Noen modeller har varierende oppløsning der oppløsningen fokuseres i området med mest interesse. Modellene kan også ha begrenset geografisk utstrekning. Det betyr at variable må spesifiseres på de ytre rendene. Som regel har en ikke prognoser for dette. Derfor brukes ofte klimatologiske forhold på rendene. Dette anses som en stor svakhet.

Mens værvarsler kan vurderes ut fra en mengde observasjoner, har vi inntil nylig hatt få observasjoner fra havet. Ofte vurderes havmodellene mot observasjoner som er tatt på spesielle tokt. Det fins også regelmessige observasjoner langs spesielle snitt. Et eksempel er Svinøysnittet på tvers av kontinentalsokkelen fra Stad og nordvestover. Vannstandsmålinger fins langs kysten, og vi vet hvor gode modellene er for vannstand. Nye målinger er nå kommet til (se nedenfor).

Reanalyser er blitt brukt for å kjøre havmodeller for Nord-Atlanteren for de siste tiårene, til dels tilbake til 1950. Resultatene er sammenlignet med det som fins av observasjoner fra faste snitt og regelmessige tokt. For våre havområder fins det en god del slike observasjoner. Ikke minst har Havforskningsinstituttet og tilsvarende myndigheter i gamle Sovjet gjort en stor innsats. Det er bra overensstemmelse mellom simuleringer og observasjoner når det gjelder styrke og variasjon av ulike strømmer i våre områder. Dette betyr at reanalysene – en serie fra ECMWF<sup>36</sup> og en fra NCEP<sup>37</sup>, USA, som omfatter *troposfæren* og *stratosfæren* - gir realistiske pådriv for havmodeller.

Det fins likevel ennå visse problem med modellene, et generelt problem gjelder hvor raskt vannmassene blander seg nedover i dypet, spesielt slike steder der *konveksjon* kan oppstå. Som i atmosfæren er konveksjon en ustabil prosess som det er vanskelig å modellere. Dagens klimamodeller, som kopler atmosfære og hav (se nedenfor), har en tendens til å transportere varme for raskt ned i dyphavet. Det er verdt å merke seg at dette gir en langsommere klimarespons på klimapådriv enn i virkeligheten.

Etter krigen, før satellittenes tid, ble observasjonsnett for værvarsling bygd ut med radiosonde-stasjoner, dvs. ballonger som stiger i atmosfæren og måler vind, trykk, temperatur og fuktighet. Værvarsling for lufttrafikk over Nord-Atlanteren var den gang svært viktig. Derfor ble det opprettet et imponerende nett med værskip i Atlanteren. Store skip med store mannskap opererte på faste posisjoner. Som regel ble det brukt to skip for å operere en posisjon. Det ble gjort forsøk på å få disse skipene til også å ta regelmessige observasjoner i havet ned til bunnen. Dette lyktes ikke. Det ble plassert et værskip i Norskehavet på 66 grader nord og to grader øst. Posisjonen kalles Mike og ble operert av Meteorologisk institutt ved et værskip som er blitt kalt Polarfront<sup>38</sup>. Her lyktes det å få gjort regelmessige målinger – en gang hver uke - i havet fra begynnelsen i 1948. Denne serien er den lengste i

verden når det gjelder oseanografiske målinger av temperatur og saltholdighet til store dyp. Nå er alle værskipene borte, også Polarfront, som opererte nesten til 2010<sup>39</sup>.

Å få kartlagt havets tilstand ved målinger er en stor oppgave. De siste tiårene har vi fått mange flere rutinemålinger av havets fysiske tilstand gitt ved strøm, temperatur og saltholdighet. Spesielt ble det bygd ut et observasjonsnett for å overvåke *El Niño*. I de siste årene har vi fått observasjonssystemet *Argo*, som 2008 talte over 3000 bøyer som måler ned til 2000 m<sup>40</sup> (Fig. 5). Plattformen med instrumentene senkes til store dyp og heves deretter til overflaten for å overføre data via satellitt. Andre nye data er målinger fra satellitt av blant annet havets nivå. Det er nå mulig å bruke alle tilgjengelige data til å analysere havet tilstand i det vi kaller sann tid, dvs. like etter at observasjonene er tatt, på samme måte som i værvarsling. Til det trenger en å utvikle lignede assimilasjonsmetoder som brukes i atmosfæren. I Bergen har Nansensenteret stor internasjonal kompetanse på dette<sup>41</sup>.

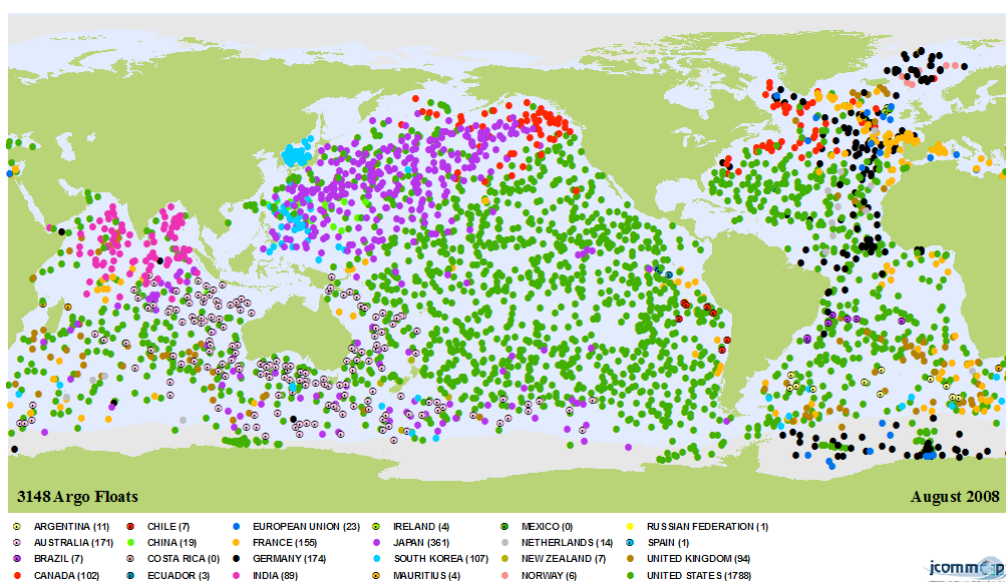


Fig. 5: Nettverket med Argo float august 2008. <http://en.wikipedia.org/>

## Klimamodeller

I prinsippet er en klimamodell en numerisk modell som omfatter klimasystemet, dvs. atmosfæren, havet, *sjøisen* og jordoverflaten. Utgangspunktet i utviklingen av klimamodeller har vært en global værvarslingsmodell, en global havmodell og en modell for sjøis. Den siste er en modell som simulerer endringer i sjøisen når analyser eller prognoser for havoverflaten er kjent, helst både på hav og atmosfære. En kaller gjerne de ulike delene for moduler i klimamodellen. Det foregår arbeid for å inkludere nye moduler i modellene, slik som kretsløpet for CO<sub>2</sub> og på sikt endringer i innlandsisen ved polene.

En klimamodell kan også være definert for en enkelt eller for et begrenset antall komponenter i klimasystemet. I en klimamodell for bare atmosfæren må pådrivene fra komponenter som havet og jordoverflaten, spesifiseres.

I en modell som kople atmosfære og hav overføres det hele tiden informasjon, slik som varmekuller, fra atmosfæredelen til havet og ismodellen og fra havet til atmosfæren og ismodellen, og fra ismodellen til hav og atmosfære. Det er ingen enkel oppgave å kople modulene. En atmosfæremodell som kjøres alene holdes i sjakk ved blant annet en sjøtemperatur som er ganske korrekt. Analyser av blant annet vind ved havoverflaten bidrar til å holde kjøringene med havmodeller innen realistiske grenser. I en kople modell er alle variable fri til å variere, slik danner klimamodeller sitt eget klima både for atmosfære og hav. Så spørres det om modellens klima samsvarer med reelt klima.

Alle klimamodeller testes først ved å kjøre modellen for flere hundre år uten ytre pådriv, dvs. med samme styrke på sola, med samme innhold av drivhusgasser og med bare naturlige kilder for aerosoler. Dette kalles en *kontrollkjøring*.

Det er et problem er å finne en starttilstand for kontrollkjøringene. For atmosfæren gir reanalyser realistiske tilstander for siste 50 år, men havets starttilstand er vanligvis ikke kjent. Hvordan kan en da skaffe seg en starttilstand som omfatter havet? En kan for eksempel starte med klimatologiske forhold for havet for en årstid basert på de målingene som fins. Så kan en kjøre havmodulen alene med kjente føringer fra atmosfæren. Slike kjøringene over mange tiår kan gi en realistisk sirkulasjon i havet. Sammen med en tilfeldig tilstand for atmosfæren, kan en kople kjøring nå slippes løs. Med dette startes en kontrollkjøring. Av ulike årsaker skjer det da vanligvis en drift i modellklimaet over mange år. Driften er et uttrykk for at starttilstanden ikke er i balanse med det klima modellen representerer. Modellene, som ikke er perfekte, driver av for å utvikle sitt eget klima litt forskjellig fra de klimaet vi måler. Driften er vanligvis så markant at den kommer til syne som en markant trend i global temperatur, som en kan øke eller avta over mange tiår. Dersom denne driften stopper opp, betyr det at modellen simulerer et stabilt klima, litt forskjellig fra vårt virkelige klima. Slik gir kontrollkjøringen et kontrollklima.

Det kan tenkes at en slik klimadrift fortsetter i flere hundre år. En årsak kan være at havmodellen ikke gir store nok flukser av varme fra ekvator til polene slik at klimaet ved polene gradvis blir kaldere. En slik feil har ofte med dårlig oppløsning i havmodulen å gjøre. Til nylig har det fleste modellene hatt en slik feil. For å rette på feilen har en innført korreksjoner i fluksene av varme mot polene – såkalt *flukskorreksjon* - slik at klimaet i kontrollkjøringen holder seg konstant. Stadig flere modeller viser bare litt drift i begynnelsen og deretter et konstant klima uten flukskorreksjon. Med konstant klima - med eller uten flukskorreksjon - kan vi mene at for eksempel global temperatur ved jordoverflaten ikke viser trender over lang tid, dvs. flere hundre år. I slikt konstant klima vil klimamodellene vise visse variasjoner fra år til år, fra dekadene til dekadene og i en viss grad over litt lengre perioder (multidekader). Dette er de interne variasjoner som modellens klimasystem selv er årsak til.

I motsetning til en værvarslingsmodell må en klimamodell simulere årlige variasjoner, for eksempel smelte deler av sjøisen i Arktis realistisk om sommeren og fryse den til igjen om høsten. Modellene må simulere konveksjon i tropene, vandrede lavtrykk og høytrykk på midlere bredder, nedbør og snødekke, inversjoner etc. I gjennomsnitt må en modell få fram en realistisk *hadleycelle*, subtropiske høytrykk, *Islandslavtrykket*, *Sibirhøytrykket* etc. Variasjonene fra år til år må omfatte realistiske svingninger over flere år som *NAO* og *ENSO*

(se Del IV). Også sirkulasjonen i stratosfæren må gi realistiske årlige variasjoner og hendelser som plutselige stratosfæreoppvarming om vinteren.

Kontrollklimaet i alle modeller blir nøye sammenlignet med meteorologiske og oseanografiske målinger. Det identifiseres på den måten visse forskjeller mellom kontrollklima og reelt klima. Det kan være at vestavindsbeltet på våre bredder er litt sterkere i modellen enn i virkeligheten og går mer inn over sentrale områder i Europa enn det målinger viser. Dette betyr i så fall at lavtrykksbanene (*stormbaner*) ikke i stor nok grad går inn i Norskehavet. Det kan være at de nevnte svingningene ikke varierer helt slik som målingene viser osv. Realistisk simulering av skyer gir spesielle utfordringer.

Kontrollklimaet kan være forbausende likt observert klima med realistiske strukturer og variasjoner over året og fra år til år. Men modellene kan også ha alvorlige systematiske feil. Om en for eksempel undervurderer snømengden systematisk, vil endringer i *albedo* gi en *tilbakekopling* med store følger. Feil i simulering av fuktighet i jordbunn og vegetasjon kan gi store feil i avrenning til havet gjennom elver. Flere modeller har vansker med å simulere et realistisk havklima, noe som trolig skyldes for dårlig oppløsning. Men modellene får fram de viktigste havstrømmene slik som Golfstrømmen og de store *gyrene*. Også omveltningen i Nord-Atlanteren (*meridional omveltningssirkulasjon*), som betyr så mye for vårt klima, er med på en realistisk måte. Men flere detaljer kan mangle. For eksempel kan det være at modellene ikke fører nok varmt vann inn i Barentshavet med den følgen av det blir mer sjøis enn observert.

Når en tilfredsstillende kontrollkjøring foreligger, kan klimamodellen brukes til klimasimuleringer. Det viktigste er å teste modellen på observerte klimavariasjoner siste 150 år ved å bruke tilgjengelig kunnskap om ulike strålingspådriv. Starttilstandene blir da tatt fra tilstander i kontrollkjøringen. Resultatene i en klimamodell kjørt i mange år blir etter hvert uavhengig av starttilstanden. Som regel kjøres det et ensemble av like kjøringene fra ulike starttilstander. De ulike kjøringene er litt ulike, men simulerer som regel lik langtidsvariasjon slik som oppvarmingen de siste tiårene.

Tidsutviklingen av de ulike *strålingspådrivene* føres på underveis i kjøringene, og eksperimentet blir kalt et *transient klimaeksperiment*. Det er en stor forskningsoppgave å rekonstruere de ulike pådrivene. Variasjonen i konsentrasjonen av de ulike klimagassene, slik som CO<sub>2</sub>, kjenner en med relativt stor nøyaktighet. Pådrivet dette gir blir beregnet av modellenes strålingsfysikk. Eventuelle endringer i solstrålingen blir innført direkte. Vi kjenner til de store vulkanutbruddene for denne perioden, det viktigste her er å ha gode anslag for hvor mye av partiklene som når stratosfæren (Del VI, kap. 5). Andre pådriv skyldes *antropogene* utslipp av forurensinger som fører til partikler i troposfæren. De mest avanserte modellene simulerer kretsløpet for aerosoler, dvs. starter med utslippene, flytter partiklene, omformer dem og beregner avsetning i overflaten.

Det fins til sammen omkring 10 ulike pådriv som kan være med i klimasimuleringer. Modellenes simuleringsevne blir avdekket ved å sammenligne klimavariasjonene i disse 150 årene med endringene som er observert. Det første som sammenlignes er gjerne global temperatur. Vi skal komme tilbake til resultatene.



Har en først utviklet en klimamodell, utgjør den et slags elektronisk laboratorium. En kan for eksempel kjøre modellene siste 150 år med hvert pådriv hver for seg eller grupper av pådriv, for eksempel alle naturlige pådriv og alle antropogene pådriv. En kan kjøre modellene på fortidens klima, for eksempel for å estimere klimaet i visse klimaperioder. Slik er det gjort mange simuleringer for å rekonstruere klimaet under *siste istids maksimum*, eller ved i den varmeste perioden midt i *holosen*. For istiden er det viktig å på forhånd kjenne utstrekning og høyde på de store innlandsisene ved polene, slik som store massiv som lå over Canada og Fennoskandia (Skandinavia, Finland og Nordkalotten). I tillegg må en ha riktig konsentrasjon av drivhusgassene. Slike kjøring blir som en kontrollkjøring med pådriv som ikke endres. Resultatet kan sammenlignes med rekonstruksjoner av for eksempel temperatur utført med forskjellige metoder for flere steder. Skeptikere anklager klimatologer som rekonstruerer slike klimaendringer, for å justere sine resultater etter hva klimamodellene viser<sup>42</sup>.

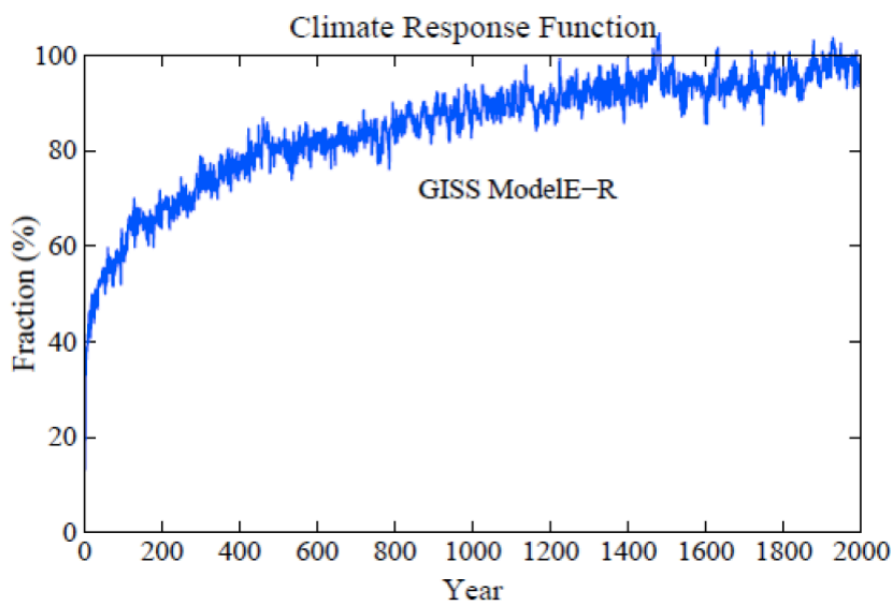
Går en langt tilbake i tid, har klimamodellene store problem med å simulere riktig klima. Eosen er en geologisk epoke som varte fra  $55.8 \pm 0.2$  til  $33.9 \pm 0.1$  millioner år siden<sup>43</sup>. I starten av denne epoken ble klimaet på jorda varmere gjennom en periode kalt *termalmaksimumet i paleosen-eosen*<sup>44</sup>. Årsaken til dette var langt høyere mengder av CO<sub>2</sub> i atmosfæren som følge av intens forflytning av visse kontinenter da fjellkjeden Himalaya ble dannet. I polare områder var klimaet så varmt at en type krokodiller eksisterte på Spitsbergen. I Minnesota fantes det fauna som ikke ville overleve frost. Solstrålingen var en smule svakere enn i våre dager. Kontinentenes posisjon var forskjellig, men på nordlige halvkule var deres geografiske bredde nesten som i dag. En har prøvd å simulere det varme klimaet i klimamodeller ut fra kunnskap om CO<sub>2</sub> og kontinentenes posisjon. Modellene viser langt varmere klima enn i våre dager, men får ikke tilstrekkelig varmt klima i nordområdene. Det betyr at modellene ikke klarer å transportere tilstrekkelig med varme fra ekvator til polene. Skeptikere tar dette til inntekt for at det er noe fundamentalt galt med klimamodellene, at f. eks. at visse parametre i modellene er tilpasset et klima karakterisert ved is ved polene. Siste ord om slike problem er ikke sagt.

Modellene er det beste verktøyet en har for å anslå framtidens klimavariasjoner. Dette kan gjøres ved å fortsette kjøringene som startet for 150 år siden med *utslippsscenarioer* for framtiden<sup>45</sup>. Igjen kjøres det et ensemble av kjøring for hvert scenario. Modellene simulerer da gjerne til et stabiliseringsnivå for CO<sub>2</sub> ved år 2100 og videre fram i enda hundre år. En kan da for eksempel sammenligne klimavariasjonene i kjøringene for perioden 2071-2100 med perioden 1971-2000. En fokuserer gjerne på differansen. Det første som undersøkes er igjen global temperatur, men globale klimamodeller gir resultater overalt på kloden med detaljer som er bestemt av oppløsningen. Når slike resultater er kjent, kan de brukes til å beregne forhold som ennå ikke direkte er med i modellene, slik som endringer i *breer og innlandsis* og havets nivå. Om det kjøres et ensemble med samme modell, gir hvert medlem i ensemblet noe forskjellig resultat, og variasjonen gir et uttrykk for betydningen av indre klimavariasjoner i modellen. Dersom en kjører flere modeller fra samme starttilstand, vil hver modell gi noe forskjellig resultat og variasjonen gir uttrykk for usikkerhet i modellene. Det må legges til at modellene kan ha systematiske feil av samme karakter, det vil si at de kan fravike fra virkeligheten på en lignende måte.

Den viktigste årsaken til forskjellige resultater i de forskjellige modellene skyldes ulik representasjon av de prosessene som ikke er oppløst, det vi kalte parameterisering. Det arbeides nå med å uttrykke usikkerhet i slik parameterisering direkte i modellene. Et ensemble med en slik modell skal da kunne uttrykke modellusikkerheten direkte<sup>46</sup>.

Siden det i modellene inngår utslippsscenarioer, kaller vi ikke resultater for framtiden for klimaprognooser, men *klimaprojeksjoner*.

Noen ganger blir det kjørt såkalte *likevektseksperiment*. Dette er eksperiment der det legges på et strålingspådriv i starten, f. eks. en dobbel konsentrasjon av CO<sub>2</sub>, og det kjøres fram til at ny *strålingsbalanse* er oppnådd. I slike eksperiment studeres bare forskjellen mellom slutttilstanden og starttilstanden, en forskjell som gir et uttrykk for *klimasensitiviteten* (se Del II, kap 2). I tillegg gir et slik eksperiment en kurve for hvor raskt modellen tilpasser seg et klimapådriv, som oftest uttrykt i prosent av totalrespons for flere hundre år framover i tid (Fig. 6). Sammen med klimasensitiviteten gir en slik responskurve de viktigste karakteristiske egenskapene ved en klimamodell. Slik kunnskap bør alltid finnes for alle modeller.



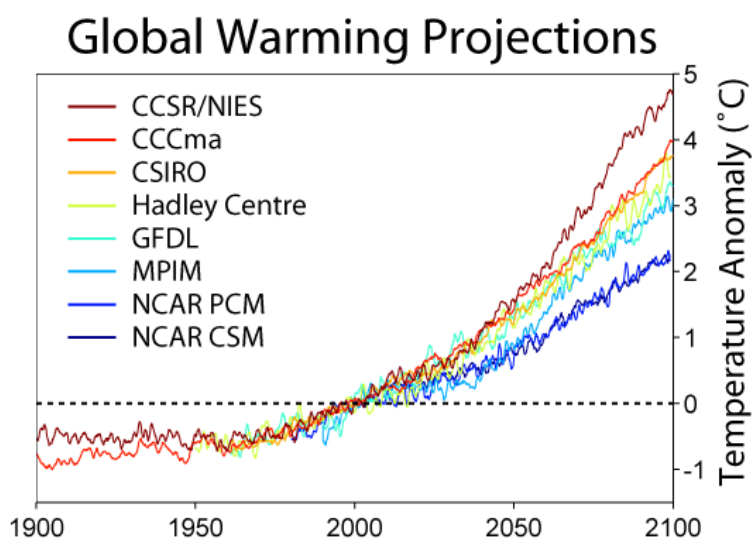
**Fig. 6:** Responskurve for en klimamodell fra GISS, NASA (modelE-R) basert på et kontrolleksperiment over 2000 år og et eksperiment med doubling av CO<sub>2</sub> i atmosfæren i starten<sup>49</sup>. Innlandsis og vegetasjon ble holdt konstant i eksperimentene. Kurva viser fraksjon av respons ved ny likevekt i prosent. Modell-R har en klimasensitivitet på 3 °C for en doubling av CO<sub>2</sub>, og responskurva blir vurdert til å være noe langsommere enn virkeligheten<sup>50</sup>.

En kan også anslå klimasensitiviteten ved å kjøre såkalte *dobbelt CO<sub>2</sub>-eksperiment*. Da starter en fra en tilstand i kontrollkjøringen og øker konsentrasjonen av CO<sub>2</sub> forløpende med en prosent per år. Da får vi en doubling i løpet av 70 år. Det er vanlig å sammenligne resultatet for de siste tjue årene med gjennomsnitt over lang tid i kontrollkjøringen. Da ser en på det som kalles *transiente endringer*. For å finne sensitiviteten må en kjøre videre med konstant

nivå for CO<sub>2</sub> inntil strålingsbalanse og stabilt klima er oppnådd. Om en bare kjører i 70 år og likevel vil estimere sensitiviteten, kan en med forsiktighet bruke teoretiske argument og resultat fra andre kjøringene som er kjørt til likevekt.

IPCC bestemmer utslippsscenarioer for fremtiden og innbyr de forskjellige klimasentrene til å gjøre klimasimuleringer med sine modeller etter visse felles spesifikasjoner. Fra tid til annen setter IPCC strengere krav til modellene og kjøringene i takt med generell utvikling av klimamodeller. Modellene brukt til rapporten i 2007 tok utgangspunkt i observerte konsentrasjoner for klimagassene (Fig. 7). IPCC planlegger nye rapporter til 2014. Det vil da bli krevd at modellene skal inkludere kretsløpet for CO<sub>2</sub>. Det betyr at de må starte med utslippene av klimagasser som CO<sub>2</sub> og gjøre beregninger av ulike kilder og sluk som omfattes av kretsløpet for karbon (se Del VI kap. 4). Konsentrasjonen av drivhusgassene blir på denne måten et resultat av hvordan kretsløpet fordeler utslippene. Spesielt gis det rom for ulike tilbakekoplinger, som for eksempel effekten av at havets opptak av CO<sub>2</sub> kan endre seg om det blir oppvarmet.

**Fig. 7:** Scenarier for global oppvarming beregnet i ulike globale klimamodeller. Scenariet for utslipp er A2. [http://en.wikipedia.org/wiki/Global\\_climate\\_model](http://en.wikipedia.org/wiki/Global_climate_model)



Flere klimasentra i verden arbeider nå med å analysere aktuelle starttilstander for klimasystemet basert på målinger, på lignende måte som meteorologene utfører regelmessige analyser for atmosfæren. Tanken er å kunne kjøre klimamodeller fra dagens tilstand. Vi har nevnt at rutineobservasjoner i havet har ført til at det nå utvikles metoder for å assimilere observasjoner i havmodeller for å estimere havets øyeblikkelige tilstand. Noen værvarslingssentra som ECMWF og Hadleysenteret, har lenge kjørt komplette modeller fra reelle tilstander for å eksperimentere med sesongvarsling av været. Det neste steget er simuleringer over flere tiår fra aktuelle tilstander. For slike korte perioder er ikke resultatet så mye avhengig av hva slags scenario som eventuelt brukes for utslipp. Derfor blir resultatet betegnet en *klimaprediksjon* (i motsetning til projeksjon). De første resultatene er allerede publisert av Hadleysenteret for global temperatur<sup>47</sup>. Beregningene kan betraktes som forsøk på varsling av klimaendringer. Intensjonen er å kjøre noen få tiår fram i tid. Det står igjen å finne ut hvor stor forutsigbarhet det er for slike variasjoner.

I dag lages det altså reelle analyser for tilstandene i atmosfæren og havet hver for seg. I tillegg kommer analyser av sjøis og visse forhold i jordoverflaten slik som fuktighet i jordbunnen. Om en starter en klimamodell fra slike observerte tilstander, får en problem med klimadrift. Modellene starter fra en realistisk tilstand i et realistisk klima, men driver over i sitt eget modellklima litt forskjellig fra reelt klima. Denne driften er som regel størst de første årene. Slik blir noe av endringene som beregnes klimadrift og ikke uttrykk for reelle klimaendringer. Noen tiår tilbake hadde værvarslingsmodellene lignende problem ved at observasjoner av masse og vind ikke var i det vi kaller dynamisk balanse. Dette problemet er for lengst løst. For klimamodeller kan det også løses, men det er ingen enkel oppgave.

IPCC har åpne dataarkiv for ulike klimasimuleringer som er blitt vurdert i deres rapporter. Det samme gjelder tidsserier for klimapådriv. Sammen med observasjoner av klimaendringer blir dataene brukt i formelle studier for å påvise klimaendringer og for å finne årsakene til klimaendringer. I slike studier blir klimaendringer ”detektert” og ”årsakstilskrevet” (*deteksjon og tilskrivning*)<sup>48</sup>. På den måten er *tilskrivingsstudier* bestrebelser på å bestemme mekanismene bak klimaendringer. Studiene gjøres først og fremst for siste 150 år, og spesielt for siste 50 år da global temperatur har økt markant. Å detektere et klimasignal betyr å påvise at en observert endring ikke kan forklares som en naturlig intern klimavariasjon. Å tilskrive en årsak til en klimaendring betyr å påvise at det målte klimasignalet er konsistent med en estimert respons for en gitt kombinasjon av antropogene og naturlige strålingspådriv. Omvendt må signalet ikke være konsistent med alternative, fysisk plausible forklaringer som ekskluderer viktige elementer i den gitte kombinasjonen av pådriv. De formelle statistiske studiene tilstreber å gi sannsynligheter for tilskrivelse. På grunnlag av tilskrivingsstudier skriver for eksempel IPCC i sin fjerde rapport at *det er svært sannsynlig at menneskelige aktiviteter har påført klimasystemet en betydelig netto oppvarming siden 1750*.

Modellene beregner klimasystemets tilbakekopling på strålingspådriv. Siden vanndamp er den viktigste drivhusgassen, er det viktig å få fram realistiske endringer i vanndampen og den tilbakekopling den gir. Det kan se ut som om modellene klarer dette tilfredsstillende. Det er verre å få til tilbakekoplingen fra skyer. Vi vet ikke sikkert hvor stor denne er fra observasjonsstudier og vi vet ikke helt hvor godt modellene simulerer en slik tilbakekopling. Dette kommer vi tilbake til.

### Forutsigbarhet for klimaendringer

Når det er klare teoretiske og praktiske grenser for hvor langt fram været kan varsles, er det da mulig å beregne klimaendringer? Som kjent er klima været i gjennomsnitt over lengre perioder, gjerne 30 år, representert ved statistisk. Forutsigelse av klimaendringer blir på denne måten noe helt annet enn for varsling av været. Forutsigbarhet for værvarsling og klimaendringer viser seg teoretisk sett å være to helt ulike former for forutsigbarhet, to ulike typer problem. I faglitteraturen kalles evnen til værvarsling *forutsigbarhet av første slag*, mens evnen til varsling av klimaendringer *forutsigbarhet av andre slag*. Forutsigbarhet for værvarsling er knyttet til usikkerhet i begynnelsestilstanden og ikke-lineær vekst av små forstyrrelser. I tillegg kommer usikkerhet knyttet til værvarslingsmodellene, spesielt i parameterisering av prosesser på mindre skalaer enn dem modellen løser opp. Forutsigbarhet for klimaendringer er mer knyttet til ytre *pådriv på klimasystemet*, slik som endringer i solstråling og drivhusgasser kan gi. Begynnelsestilstanden betyr mindre. Teoretisk tenkning

og erfaring fra klimamodeller tyder på at det er mulig å beregne klimaendringer som skyldes ytre pådriv. Vi tenker da for eksempel på endringer som trender i temperatur og nedbør over flere dekadere.

Variasjoner fra årstid til årstid, år til år og fra dekadere til dekadere er avhengig av begynnelsestilstanden og generelt mindre forutsigbare. Spørsmålet er om det fins forutsigbarhet på disse tidsskalaene i det hele tatt. Ut fra teoretiske betraktninger er det nærliggende å tenke at ulike avvik – anomalier – i jordoverflaten, som tilnærmet varer like lenge som varslingsperioden, kan påvirke sirkulasjonen i atmosfæren. Eksempler er anomalier i sjøtemperaturen over større områder og anomalier i snødekket. Slik mener en for eksempel at uvanlig mye snø over Asia om høsten kan påvirke været den følgende vinter. Anomalier i SST er knyttet til anomalier i havsirkulasjonen. Flere mener at dekaderevariasjoner i havsirkulasjonen gir lignende variasjoner i atmosfæren. Derfor blir det spennende å se om kjøring av klimamodeller fra reelle aktuelle tilstander kan gi forutsigbarhet for dekaderevariasjoner.

Teoretisk sett er varsling på sesongskala mer forutsigbar for tropene enn for områdene utenfor tropene. Dette skyldes at bevegelsene ikke er fullt så kaotiske som på høyere bredder. Mye forskning er blitt utført ut fra hypoteser om at anomalier i tropene, i sjøtemperatur og/eller i selve sirkulasjonen i atmosfæren, påvirker været utenom tropene. Slik har det lenge funnet sted en jakt på sammenhenger i været på tidsskalaer utover den som dekkes av vanlig værvarsling, sammenhenger som ikke bare gir bedre forståelse for hvordan vekslingsene i været virker, men som også gir håp om varsling. I neste del gir vi et innblikk i disse anstrengelsene og resultatene de har gitt.

Klimamodeller er kompliserte og vanskelige å få tak på for folk flest. Klimaskeptikere tror gjerne at konstanter i beregningene ”tunes” for å resultatene til å stemme med observasjoner. Dette er direkte galt, slik ”tuning” er praktisk talt umulig å gjennomføre i så kompliserte modeller. Klimaskeptikere hevder også at problemet global oppvarming er et fenomen som bare opptrer i klimamodeller. Dette er også direkte galt. Den viktigste informasjonen om global oppvarming kommer ikke fra klimamodeller, men fra observasjoner. James Hansen setter faktisk data fra *paleoklima* for de viktigste når dagens klimasituasjon skal vurderes. På andre plass setter Hansen observasjoner fra den siste tiden, og informasjon fra klimamodeller kommer på tredje.

Da Jule Charney brukte eksisterende modeller til å estimere klimasensitiviteten for dobling av karbondioksid, kunne han bare si at den sannsynligvis var mellom 1,5 og 4,5 grader. Og med ”sannsynligvis” mente han at det bare var 65 prosent sjanse for at den ligger innenfor disse rammene. Over tretti år senere gjør modeller jobben bedre, men fortsatt er sprikene store når det gjelder bestemmelse av klimasensitivitet. Derfor gir de også store sprik i resultatene for framtidige projeksjoner. Klimamodeller gjør en respektabel jobb i å demonstrere visse tilbakekoplinger, slik som fra vanddamp og sjøis, men fortsatt store sprik for klimasensitivitet bekymrer. Likevel er klimamodeller det beste redskapet for projeksjoner etter visse utslippsscenarioer.



- <sup>1</sup> Helmholtz, H. von 1884, *Wirbelstürme und Gewitter*. Vorträge u. Reden, 2, p. 141, Braunschweig.
- <sup>2</sup> Godske, C.L 1956. *Hvordan blir været?* J.W Cappelens forlag, Oslo, 258 sider.
- <sup>3</sup> Grønås, S., 2005. Vilhelm Bjerknes' Vision for Scientific Weather Prediction. In: Geophysical Monograph Series 158. *The Nordic Seas: An Integrated Perspective; Oceanography, Climatology, Biogeochemistry and Modeling*. Eds H. Drange et al. American Geophysical Union.
- <sup>4</sup> Bjerknes, V. 1904. Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik and der Physik. *MeteorologischeZeitschrift*, Wien, 21, 1-7.
- <sup>5</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Newton's\\_laws\\_of\\_motion](http://en.wikipedia.org/wiki/Newton's_laws_of_motion)
- <sup>6</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Continuity\\_equation](http://en.wikipedia.org/wiki/Continuity_equation)
- <sup>7</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Equation\\_of\\_state](http://en.wikipedia.org/wiki/Equation_of_state)
- <sup>8</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Conservation\\_of\\_energy](http://en.wikipedia.org/wiki/Conservation_of_energy)
- <sup>9</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Entropy>
- <sup>10</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Second\\_law\\_of\\_thermodynamics](http://en.wikipedia.org/wiki/Second_law_of_thermodynamics)
- <sup>11</sup> Eliassen, A. 199. Vilhelm Bjerknes' early studies of atmospheric motions and their connection with the cyclone model of the Bergen School. In *The Life Cycles of Extratropical Cyclones*, (M. Shapiro and S. Grønås, Eds) American Meteorological Society, Boston, pp 5-13.
- <sup>12</sup> Bjerknes, V. 1914. Meteorology as an exact science. Translation of Die Meteorologie als exakte Wissenschaft. Antrittsvorlesung gehalten am 8. Jan 1913 in der Aula der Universität Leipzig. *Mon. Wea. Rev.*, 42, 11-14.
- <sup>13</sup> Lynch, P. 2007. *The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream*. Cambridge.
- <sup>14</sup> Richardson, L.F., 1922. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press. (Reprinted by Dover Publications, New York, 1965, with a new introduction by Sydney Chapman.)
- <sup>15</sup> Lynch, P. 1999. Richardson's marvellous forecast. In *The Life Cycles of Extratropical Cyclones*, (M. Shapiro and S. Grønås, Eds), American Meteorological Society, Boston, pp 61-73.
- <sup>16</sup> Det krever en del kunnskap i meteorologi for å forstå dette. Det er en nøye sammenheng mellom vindens tilstand og temperaturen gitt ved ligningene nevnt over. Analyser av vind og temperatur over store områder vil ikke kunne få fram denne sammenhengen tilstrekkelig nøyaktig uten å bruke spesielle metoder som sikrer balanse.
- <sup>17</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/John\\_von\\_Neumann](http://en.wikipedia.org/wiki/John_von_Neumann)
- <sup>18</sup> Charney, J.G., R. Fjørtoft, and J. von Neumann, 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2, 237-254.
- <sup>19</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical\\_weather\\_prediction](http://en.wikipedia.org/wiki/Numerical_weather_prediction)
- <sup>20</sup> <http://www.ecmwf.int/>
- <sup>21</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Ensemble\\_forecasting](http://en.wikipedia.org/wiki/Ensemble_forecasting)
- <sup>22</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Supercomputer>
- <sup>23</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Lennart\\_Bengtsson](http://en.wikipedia.org/wiki/Lennart_Bengtsson)
- <sup>24</sup> Økland, H., 1963. The operational forecasting model used in the Norwegian meteorological service, *Tellus*, 3, 280-283.
- <sup>25</sup> Det ble brukt en modell med en balanse mellom vindfelt og massefelt (gitt ved temperaturen eller geopotensiell høyde) som gjelder til en hver tid.

<sup>26</sup> Fjørtoft, R., 1952. On a numerical method of integrating the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 4,3

<sup>27</sup> Løsningsprosedyren brukt av Richardson er en såkalt Eulersk metode, hvor beregningene utføres lokalt i hvert gitterpunkt. Alternativet er den Lagrangske metode, der beregningene foretas langs partiklenes baner. Den kvasi-Lagrangske metoden kombinerer disse to metodene når det gjelder feltenes bevegelse. Den sikrer lengre tidsskritt og er slik mindre beregningskrevende. Metoden brukes i dag i de fleste værvarslings- og klimamodeller.

<sup>28</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/HIRLAM>

<sup>29</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Determinism>

<sup>30</sup> Bjerknes, V. 1904. Veirforudsigelser og mulighetene til at forbedre dem. *Aftenposten* 8.-10. januar.

<sup>31</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Edward\\_Norton\\_Lorenz](http://en.wikipedia.org/wiki/Edward_Norton_Lorenz)

<sup>32</sup> Lorenz, E., 1963. Deterministic non-periodic flow. *J. Atmos. Sci.*, 20, 130-141.

<sup>33</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Octal>

<sup>34</sup> Grønås, S. 2008. Kaosteroriens far er død. <http://www.forskning.no/artikler/2008/april/180376>

<sup>35</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Baroclinity>

<sup>36</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/ECMWF\\_re-analysis](http://en.wikipedia.org/wiki/ECMWF_re-analysis)

<sup>37</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/NCEP/NCAR\\_Reanalysis](http://en.wikipedia.org/wiki/NCEP/NCAR_Reanalysis)

<sup>38</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Weather\\_ship](http://en.wikipedia.org/wiki/Weather_ship)

<sup>39</sup> Når dette skrives, henger Polarfronts framtid i en tynn tråd.

<sup>40</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Argo\\_\(oceanography\)](http://en.wikipedia.org/wiki/Argo_(oceanography))

<sup>41</sup> <http://www.nersc.no/main/index2.php>

<sup>42</sup> Lindzen, R.S. 2008. Climate Change: I s it currently designed to answer questions? <http://arxiv.org/abs/0809.3762>

<sup>43</sup> <http://en.wikipedia.org/wiki/Eocene>

<sup>44</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Paleocene-Eocene\\_Thermal\\_Maximum](http://en.wikipedia.org/wiki/Paleocene-Eocene_Thermal_Maximum)

<sup>45</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Special\\_Report\\_on\\_Emissions\\_Scenarios](http://en.wikipedia.org/wiki/Special_Report_on_Emissions_Scenarios)

<sup>46</sup> [http://www.agu.org/meetings/fm10/lectures/lecture\\_videos/A42A.shtml](http://www.agu.org/meetings/fm10/lectures/lecture_videos/A42A.shtml)

<sup>47</sup> Smith, D.M. *et al.* 2007. Improved Surface Temperature Prediction for the Coming Decade from a Global Climate Model. *Science*, **317**, 796-799.

<sup>48</sup> [http://en.wikipedia.org/wiki/Attribution\\_of\\_recent\\_climate\\_change](http://en.wikipedia.org/wiki/Attribution_of_recent_climate_change)

<sup>49</sup> Hansen, J., M. Sato, R. Ruedy, P. Kharecha, A. Lacis, R.L. Miller, L. Nazarenko, K. Lo, G.A. Schmidt, G. Russell *et al.*, 2007. Climate simulations for 1880-2003 with GISS modelE. *Clim. Dynam.*, 29, 661-696, doi:10.1007/s00382-007-0255-8.

<sup>50</sup> Hansen, J, M. Sato, P. Kharecha, K. von Schuckmann 2011. Earth's Energy Imbalance and Implications. [http://www.columbia.edu/%7Ejeh1/mailings/2011/20110415\\_EnergyImbalancePaper.pdf](http://www.columbia.edu/%7Ejeh1/mailings/2011/20110415_EnergyImbalancePaper.pdf)