

Computeren som videnskabeligt værktøj.

Aksel Wiin Nielsen, Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik.

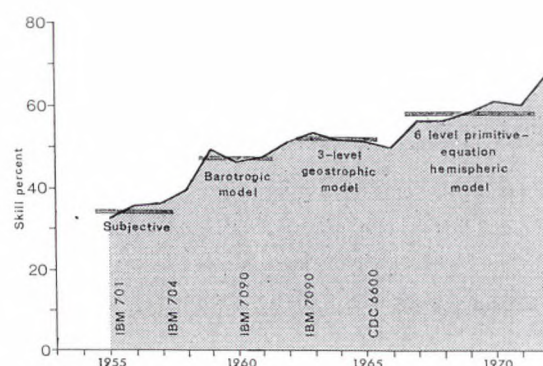
Indledning

I de sidste fire decennier har vi oplevet en infiltration af computeren i næsten alle dele af samfundet. I denne artikel skal vi fortrinsvis holde os til brugen af computeren i videnskaben og forskningen, hvor den anvendes på flere forskellige måder. I grove træk kan man dele brugen i tre væsentligt forskellige områder. Den anvendes for det første til bearbejdning af data, hvor man foretager statistiske og andre former for analyser af store mængder af data, der kan have deres oprindelse fra mange forskellige kilder. Formålet er at beskrive et system fra forskellige synsvinkler. Denne anvendelse er ikke altid lige ud af landevejen, men må dog anses for ret elementær sammenlignet med andre anvendelser. Det næste område kan vi kalde simulationsområdet eller det diagnostiske område. Hermed mener vi, at vi ved hjælp af en model, som vi selv har skruet sammen, forsøger at efterligne et system, som allerede kan beskrives ved en given datamængde. Modellen kan bygge på grundlæggende videnskabelige love, men den kan også være rent empirisk eller en blanding af teori og empirisme. Den tredje gruppe af problemer er forudsigelser, hvor man forsøger at beregne fremtidige tilstande af et givet system. Denne prognostiske virksomhed er ofte den virkelige afprøvning af, om vi forstår et givet system, for kun vel forståede systemer kan vi gøre os et berettiget håb om at forudsige.

Den ovenstående opdeling af problemerne ligner naturligvis de idéer, som vi har om videnskabens udvikling, hvor man sædvanligvis taler om fire trin: observationsfasen, beskrivelsesfasen, forudsigelsesfasen og kontrolfasen. Man antager, at enhver velfunderet videnskabsgren har gennemløbet disse faser i kronologisk orden, men det bør påpeges, at medens man ikke kan komme til en ny fase uden at have været igennem de foregående, så vil ankomsten af en ny fase ikke betyde, at arbejdet i de tidligere faser ophører. Der vil stadig være behov for observationer og deres bearbejdning, selv om man er begyndt på forudsigelsesfasen. Ikke alle videnskabsgrene kommer i århundredernes løb gennem alle fire faser. Medens de to første næsten altid eksisterer, er det ofte svært at komme ind i forudsigelsesfasen, fordi den kræver en formulering af en prognostisk model, der kan være svær at formulere på visse områder. Kontrolfasen nås kun sjældent i naturlige systemer, fordi vi ikke har de nødvendige energiresourcer til at påvirke meget store systemer, men der er dog undtagelser. F.eks. er vi i stand til at kontrollere en kunstig satellit, når en tilstrækkelig energimængde er opbevaret i den.

I det følgende vil det være naturligt for mig at vælge mine eksempler fra mit eget fagområde (at-

mosfærefysikken), men forhåbentlig vil mine betragtninger alligevel have en vis generel betydning. Meteorologien har iøvrigt været en stor bruger af computeren siden dens opfindelse i slutningen af 1940'erne. De første spæde forsøg på at fremstille vejrprognoser startede i 1949 ved The Institute for Advanced Studies i Princeton, New Jersey. Siden da har de meteorologer, der beskæftiger sig med vejrprognoser og klimamodeller, altid anvendt de mest avancerede computere. Vi har gang på gang været nødt til at tilpasse os til nye systemer som f.eks. parallelle computere, fordi appetitten på stadig flere enkeltheder har været umættelig. Dette gælder både de fysiske processer og ønsket om en beskrivelse af stadig mindre systemer i atmosfæren. Fig.1 viser et mål for godheden af de første operationelle forudsigelser for kun 36 timer.



Figur 1. Udviklingen af godheden af numeriske forudsigelser i 1955-72. De anvendte computere er angivet på tidsaksen.

Observationer og beskrivelse

For at beskrive et givet system må man have målinger af de relevante parametre. Ved hjælp af disse observationer forsøger man at beskrive systemets tilstand til et givet tidspunkt, og hvis datamængden tillader det, ønsker man også at kunne beskrive systemets udvikling gennem en længere tid. På grundlag af sådanne analyser kan man komme frem til en beskrivelse af typiske tilstande af hele systemet. Lykkes dette, kan man ofte ved yderligere beregninger få en vis indsigt i systemets opførsel uden nødvendigvis at komme ind i forudsigelsesfasen.

Lad mig give et meteorologisk eksempel. Da observationerne i midten af dette århundrede var blevet så fuldstændige, at man kunne fremstille globale eller i det mindste hemisfæriske analyser af atmosfærens tilstand på daglig basis, fik man en mulighed for at give svar på visse spørgsmål, der havde plaget meteorologien siden det 17.

århundrede. Det havde været kendt, at atmosfæren opvarmes mere ved Ækvator end ved polerne. Da det ikke bliver mere og mere varmt på de lave bredder og koldere og koldere ved polerne, må der være en systematisk varme-transport fra Ækvator mod polerne i de to halvkugler. Hvorledes foregår denne varmetransport? I den spekulative periode havde man postuleret et antal meridionale celler, der skulle beskrive den typiske bevægelse mellem de lave og høje bredder (Hadley og Ferrel celler), men det var først, da computeren tillod en hurtig behandling af de store datamængder på daglig basis, at man kunne påvise ved en direkte beregning af varmetransporten, at denne blev udført af de atmosfæriske bølger og næsten ikke af de tidligere postulerede celler.

I løbet af de 20 år mellem 1950 og 1970 var mange meteorologer, inklusive forfatteren, beskæftiget med at kortlægge en masse fysisk vigtige størrelser, som tilsammen kunne beskrive transporter i atmosfæren og give en beskrivelse af atmosfærens energiindhold og de energitransformationer, der foregår i den globale atmosfære. Denne virksomhed var kun mulig, fordi de systematiske observationer muliggjorde globale analyser, som derefter let lod sig arrangere til globale beregninger. At have udført disse diagnostiske beregninger uden computeren, ville ikke have været muligt, da man ønskede sådanne beregninger over dage, uger, måneder og år.

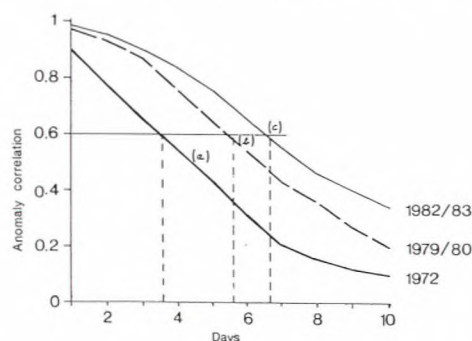
Mange videnskabsgrene er gået igennem en tilsvarende udvikling, som har tilladt en meget mere nøjagtigt og fysisk rigtigere beskrivelse. Beskrivelsesaktiviteten holder aldrig op, fordi man bruger den til at overvåge tingenes tilstand og til at registrere de ændringer, der forekommer. Vor tids miljøovervågning er bygget på lignende principper.

Forudsigelser

De fysikere, som beskæftiger sig med den klassiske mekanik og termodynamik, har længe været klar over, at de grundlæggende love for denne del af fysikken er deterministiske. Fra en given begyndelsestilstand kan der ved numerisk integration fremstilles én og kun én forudsigelse (prognose), når man har bestemt sig til den numeriske procedure, som skal anvendes ved tidsintegrationen. Man har også længe været klar over, at det var væsentligt at beskrive begyndelsestilstanden så nøjagtigt som muligt på grundlag af de eksisterende observationer. Det er for globale systemer en umulighed. Vi har kun et begrænset antal observationer til et givet tidspunkt. Målingerne kan være adskilt af flere hundrede kilometer, ja, endog tusinder af kilometer, når vi taler om den del af kloden, der er dækket af hav. Selv om de sædvanlige overfladestationer i de sidste halvtreds år er suppleret med radiosondeobservationer, der går op til ca. 40 km højde, og selv om satellitterne har hjulpet betydeligt gennem deres indirekte observationer af atmosfæren, så er det ikke desto mindre sandt, at en beskrivelse af temperatur, tryk og vindforhold over det globale område er behæftet med usikkerhed. Den egentlige årsag er naturligvis, at vi ikke kan observere på

den lille horisontale skala, der ligger mellem observationerne. Situationen bliver meget værre, hvis vi ville tænke os at give en tre-dimensional beskrivelse af oceanernes tilstand. Det er så svært på grund af de ganske få samtidige observationer, at det ikke har været prøvet.

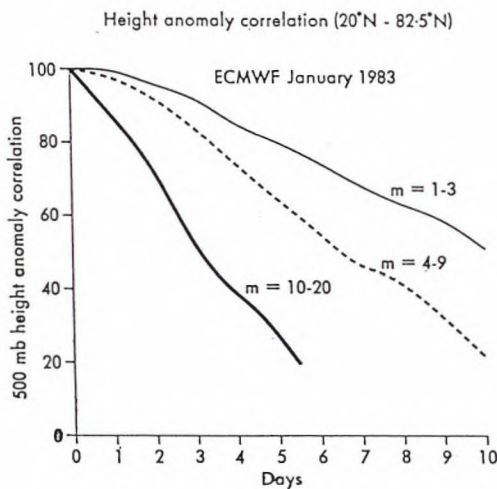
Det er ikke bare de globale systemer, der lider af denne skavank. Det er lige så umuligt at beskrive strømmingen i alle enkeltheder i et dansk vandløb, hvor strømmingen også foregår på mange skalaer fra den største, der bestemmes af vandløbets længde og bredde, til den mindste, der bestemmes af de ganske små hvirvler i åen. Endelig bør man gøre opmærksom på, at mange strømminger i naturlige systemer er af en turbulent karakter, og vi har ikke en grundlæggende teori for turbulens, selv om man har arbejdet på problemet siden begyndelsen af århundredet. Den grundlæggende opfattelse i de første 2/3 af århundredet har ikke desto mindre været, at jo bedre man kunne beskrive begyndelsestilstanden, jo længere ud i fremtiden kunne prognoserne fremstilles, og eventuelt ville der ikke være nogen principiel grænse for deres længde.



Figur 2. Kurverne viser den praktiske forudsigelighed på tre forskellige tidspunkter. Målet for godheden er korrelationen mellem forudsagte og indtrufne ændringer. Erfaringen viser, at når dette mål er mindre end 0.6, har prognosen ingen praktisk værdi.

Denne opfattelse var kædet sammen med den lignende iagttagelse, at jo bedre man ved hjælp af sin model kunne beskrive de fysiske processer i det system, som man arbejder med, desto længere kunne prognoselængden blive. Lad os igen bruge atmosfæren som eksempel. Man får ofte den opfattelse, at en model af atmosfæren følger direkte af de grundlæggende ligninger. Det gør den også, hvis man begrænser sig til det adiabatisk (d.v.s. ingen varmetilførsel) og gnidningsfri tilfælde. Men dette tilfælde er totalt urealistisk over længere tidsrum end nogle få timer. Man må derfor forsøge at beskrive varmekilderne og gnidningen. Med hensyn til den sidste har vi kun empiriske love at falde tilbage på, fordi den manglende turbulente teori igen sætter alvorlige begrænsninger. Om varmekilderne kan man sige, at de alle har det tilfælles, at selve processen foregår på en molekylær skala, medens vi skal forsøge at beskrive, hvad der foregår ved at bruge observationer, der er langt fra hinanden, eller punkter i et netværk, hvor afstanden fra punkt til punkt er i det mindste nogle dekalimeter, fordi selv de fineste modeller har gridafstande på 20-30 kilometer. Selv denne procedure,

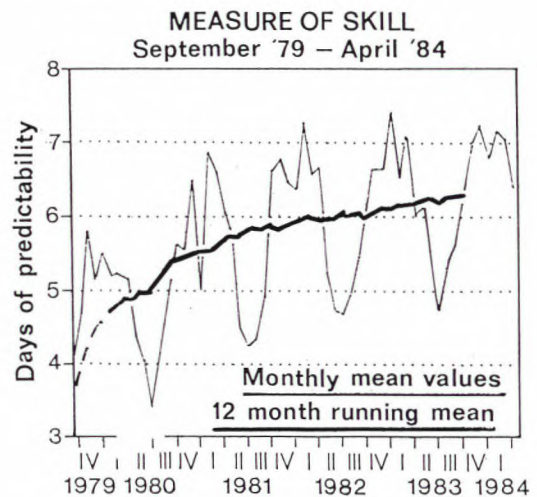
hvor man skal beskrive nettoresultatet af de molekylære processer ved hjælp af størrelser på meget større skalaer, kaldes en parameteriseringsopskrift. Det kan somme tider gøres med gode resultater, men eksakt bliver det aldrig. F.eks. har man studeret overførslen af varme og moment fra atmosfæren til havet eller omvendt, og man har ganske gode og efterprøvede opskrifter, der kan beskrive disse processer. Det sværeste er nok at beskrive vandets rolle i atmosfæren, for ikke alene kan det være til stede i tre tilstande (luft, vand og is), men det indvirker også på mange processer som strålingen fra solen, varmestrålingen fra jorden, kondensation og fordampning, nedbørsprocessen og fordampningen fra jorden.



Figur 3. Stigningen i forudsigelighed for den globale atmosfære, målt i dage, i perioden 1979-84. Bemærk, at atmosfæren er lettere at forudsige om vinteren end om sommeren.

Det turde være klart fra denne overfladiske beskrivelse, at modellen ikke heller kan være korrekt og er behæftet med usikkerhed. Ikke desto mindre var grundtanken altid den, at opskrifterne kunne gøres mere realistiske, og så kunne man fremstille prognoser over længere tidsrum, og igen så man ikke nogen principiel grænse, for ligningerne var jo deterministiske! Det store chok kom i 1963, da amerikaneren Edward N. Lorenz påviste, at selv om ligningerne er deterministiske, så er de meget følsomme overfor en ganske lille ændring i begyndelsestilstanden. Systemer, der har denne egenskab, kaldes desværre kaotiske, men det er et dårligt valgt ord - i hvert fald på dansk. Det følger umiddelbart, at sådanne systemer har begrænset forudsigelighed. Lorenz' opdagelse blev gjort med et lille legetøjssystem, der var reduceret til tre ikke lineære ligninger. Med mange flere variable skulle systemet beskrive fysik og bevægelse i en cumulus sky. Det første spørgsmål var, om den begrænsede forudsigelighed i hans system, var speciel for systemet eller mere generel. Hans kollega, Jule G. Charney, sammenkaldte med det samme en gruppe meteorologer, der var i besiddelse af globale modeller, for at undersøge om den begrænsede forudsigelighed også var en egenskab ved modeller med

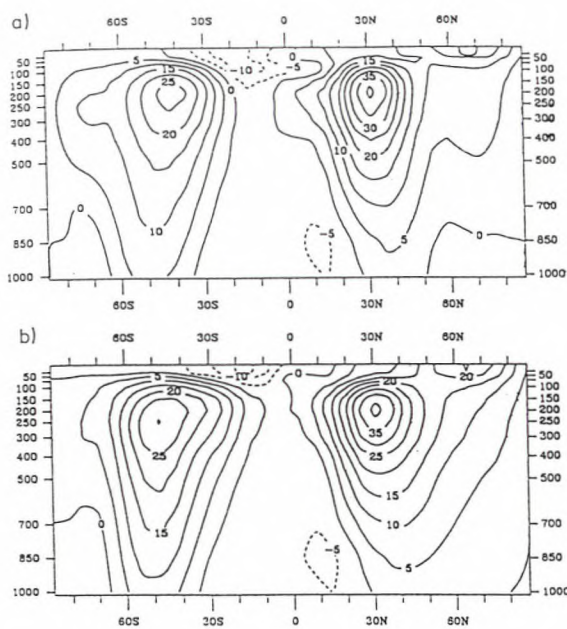
tusinder af frihedsgrader og ikke bare tre. Svaret på spørgsmålet var bekræftende, og man fandt, at den teoretiske grænse for forudsigelighed i atmosfæren var tre til fire uger beroende på årstiden. Man fandt dette resultat ved meget store beregninger, hvor man først integrerede de globale ligninger i flere uger for at få en tidsserie, med hvilken man kunne sammenligne. Dernæst gik man tilbage til begyndelsestilstanden, ændrede den lidt og gentog tidsintegrationen. Man sagde så, at al forudsigelighed var tabt, når forskellen mellem to tilstande var blevet så stor, som forskellen mellem to tilfældigt valgte tilstande fra samme årstid.



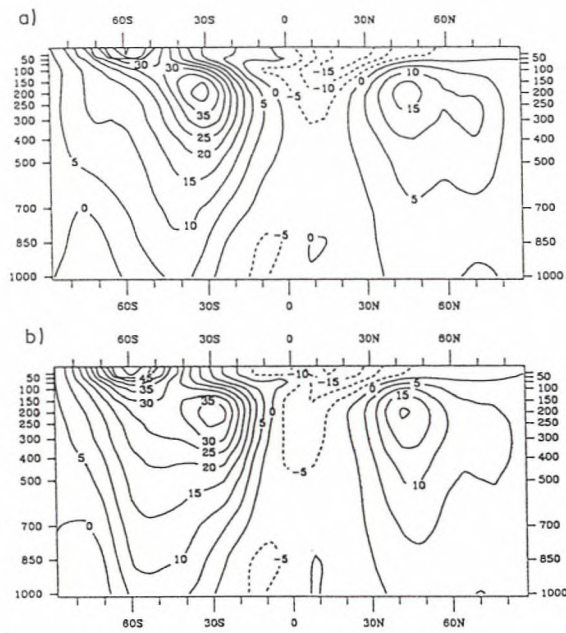
Figur 4. Korrelationen som funktion af tiden for tre forskellige bølgegrupper. De meget lange bølger ($m = 1$ til $m=3$) har størst forudsigelighed. Jo kortere bølgelængde des mindre er forudsigeligheden.

Man kan sige, at denne bestemmelse af den begrænsede forudsigelighed kun var mulig, fordi computeren tillod at gennemføre et så omfattende eksperiment. Vi har derfor i det mindste ét meteorologisk eksempel på virkeligt grundlæggende ændringer i vores fundamentale opfattelse forårsaget af computer-fysik. Hvordan forholder den praktiske grænse for forudsigelighed sig nu til den teoretiske grænse? For ca. 20 år siden bestemte Kiku Miyakoda den praktiske grænse til 3-4 dage (Se Fig.2). Den store forskel på den praktiske grænse og den teoretiske viste, at selv om man nu kendte en øvre grænse (eller i hvert fald dens størrelsesorden), så var der en så tilpas stor forskel mellem de to, at det fortsat var værd at forsøge at gøre denne forskel mindre. På dette grundlag skabtes det 'Europæiske Center for Mellem-Lange Vejr Prognoser', som forfatteren var direktør for fra begyndelsen til det tidspunkt, hvor de praktiske prognoser kunne sendes til de 16 europæiske stater, som havde skabt Centret. På det tidspunkt (1979) var den praktiske grænse øget til ca. 6 dage, og siden den tid er der lagt endnu et par dage til. Fig.3 og Fig.4 viser forskellige aspekter af disse prognoser.

De ovenstående forudsigelseseksperimenter er en si-



Figur 5. Den øvre figur er simuleringen af det zonale vindfelt for vinteren, medens den nedre figur er den observerede tilstand af samme parameter.

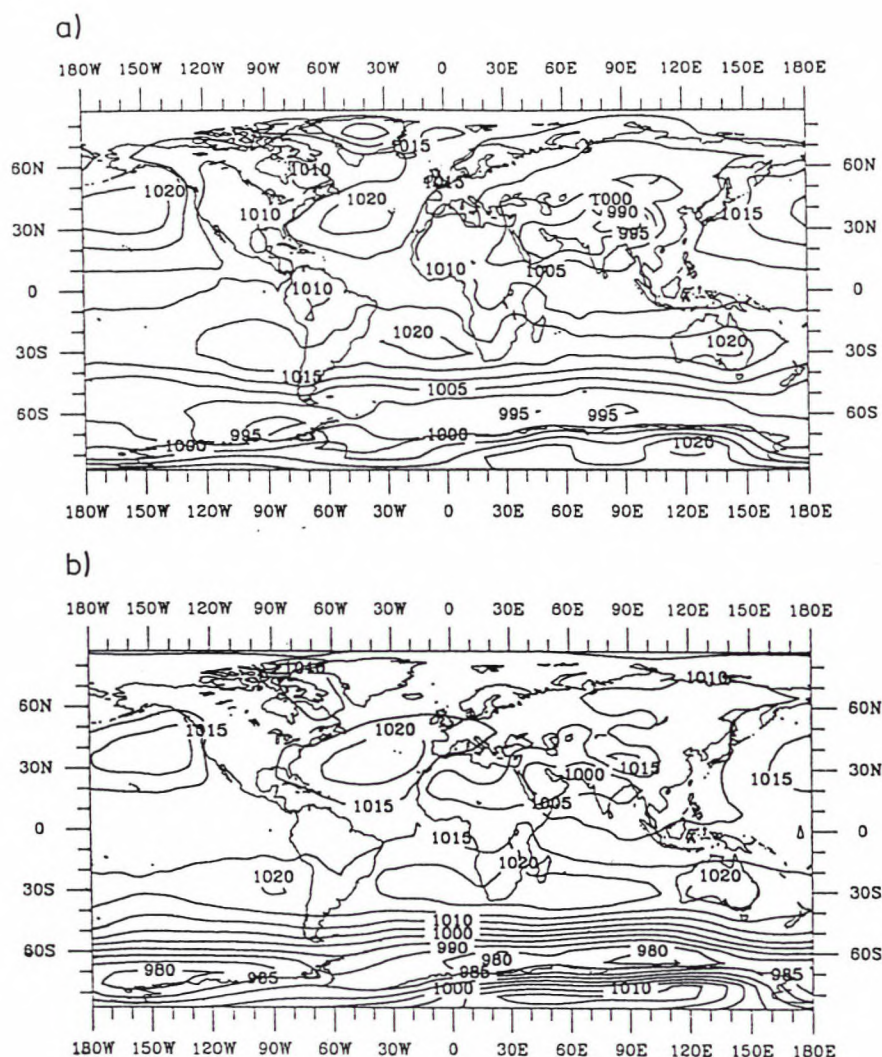


Figur 6. Som fig.5, men for sommeren.

mulation af atmosfæren på kort tidsskala. Lad os nu se på et simulationseksperiment på en meget større tidsskala, nemlig jordens klima. Dette er som bekendt defineret som atmosfærens gennemsnitlige tilstand, når man tager et gennemsnit i tiden over mange år. Normalt tages gennemsnittet over 30 år, men det er et ret tilfældigt tal. Det kunne lige så godt være 10 år. Det væsentlige er, at tidsintervallet skal være så langt, at man ikke ser forskellen mellem to på hinanden følgende år, men samtidigt så kort, at man kan observere ændringer i jordens klima. Kan man bestemme klimaet ved en modelberegning? Hvis det skal være muligt, så må man for det første tage hensyn ikke bare til atmosfæren, selv om det er dens gennemsnitlige tilstand, vi søger, men også til de andre systemer, som atmosfæren er påvirket af, og som den selv påvirker. Klimasystemet defineres på denne måde som bestående af atmosfæren, havene, kontinenterne, ismasserne og biomassen. For det andet må tidsintegrationerne arrangeres på en sådan måde, at man starter fra en atmosfære uden bevægelse, hvorefter man "tænder" for solen, som er den primære energikilde. Derved opstår der temperaturforskelle i atmosfæren, som i sin tur vil skabe bevægelse. Målet er nu at fortsætte denne tidsintegration så længe, at man kan tage det nødvendige tidsgennemsnit og undersøge, om man har reproduceret jordens klima. Fig.5 og Fig.6 giver en klar indikation af den næsten rigtige efterligning af de zonale vindfelter for vinter og sommer, medens Fig.7 viser nøjagtigheden af simulationen af trykfeltet ved jordens overflade. Det bemærkes, at disse resultater er opnået med en koblet model ved Max-

Planck-Institutet for Meteorologi i Hamburg.

I visse sektorer blandt klimatologer ser man ikke med sympati på sådanne massive beregninger. Formålet med dem fejles af bordet med en bemærkning om, at det eneste, som man ved efter en god beregning er, at ligningerne er "rigtige". Dette synspunkt deles ikke af forfatteren, fordi også klimamodellerne må indeholde en række parameteriseringsopskrifter, som er empiriske. Prøven bliver da, om vi har så stor indsigt i atmosfærens fysik og kan beskrive den på en sådan måde, at vi får en god simulation af atmosfærens tilstand og dens strømning. Forsøg i denne retning gennem de sidste 30 år har da også vist, at vi kun gradvis er kommet nærmere til målet, og at udvekslingen mellem atmosfæren og de andre dele af klimasystemet er en væsentlig del, hvis vi skal komme nær på det nuværende klima. Medens udvekslingen mellem atmosfæren og kontinenterne og ismasserne er relativt let at tage vare på, viser det sig, at udvekslingen med havene er langt det sværeste problem. Det ligger i, at begge medier bevæger sig hurtigt sammenlignet med kontinenterne og ismasserne. På den anden side bevæger atmosfæren og havet sig med meget forskellige hastigheder. Medens hastigheden i de store havstrømme er nogle cm per sekund, så er den typiske vindhastighed i den frie atmosfære snarere 10 til 50 m per sekund. Der er således et forhold på ca. 1000 mellem de typiske hastigheder. Det samme forhold eksisterer mellem massefylden i de to medier. Det er derfor et formidabelt problem at simulere koblingen imellem dem, hvor vindene i den nedre del af atmosfæren



Figur 7. Den øvre figur er den simulerede trykfordeling ved jordens overflade. Den nedre figur er den observerede fordeling af den samme parameter.

driver de store strømsystemer i havet, medens udvekslingen af varme og moment og fordampningen fra havene har en væsentlig påvirkning af atmosfæren. Koblingen mellem atmosfære- og havmodellerne er endnu ikke udført med tilstrækkelig nøjagtighed, men der arbejdes intenst på problemet ved nogle få store centre for klimaforskning i Europa og U.S.A. Selv om koblingen, som svarer til at konstruere en kobling med et udvekslingsforhold på 1000, endnu ikke har fundet en god løsning, så er der intet i vejen for at udføre disse massive beregninger, og den efterfølgende sammenligning med det virkelige klima viser ganske god overensstemmelse mellem det beregnede og observerede klima.

Alle disse meget store modeller for forudsigelse og klimasimulering er så indviklede, at de bør efterprøves ved en lang række såkaldte følsomhedsberegninger. Derved forstås en sammenligning mellem den mest fuldstændige model, som man er i besiddelse af, og det resultat, som

man kommer til, hvis man ændrer væsentligt på en af delprocesserne. På denne måde har man fundet ud af den effekt, som en enkelt delproces har på slutresultatet. I en forudsigelsesmodel er det f.eks. forholdsvis let at fjerne alle bjergeffekter fra modellen eller at fjerne ismasserne og erstatte dem med vand af en passende temperatur. Det bedst kendte eksperiment af denne slags i klimamodeller er de simuleringer, der er foretaget med hensyn til betydningen af en ændret koncentration af kuldioxid i atmosfæren. Disse eksperimenter er i virkeligheden følsomhedseksperimenter, men de er naturligvis blevet udført, fordi man har observeret en voksende mængde af kuldioxid i atmosfæren. Man anslår, at koncentrationen er vokset med 25% siden begyndelsen på den industrielle tidsalder. Det er naturligvis også udmærket, at man nu ved fra de bedste af disse modeller, at effekten vil blive en temperaturøgning på ca. 0.5 grader i den globale middeltemperatur med større ændringer nær ved

polerne og næsten ingen ændring på de lave breddegrader. Det uansvarlige i brugen af disse resultater i visse klima- og miljøsektorer er, at man forventer, at disse simulerede temperaturændringer virkelig vil indtræffe. Klimaet har for det første en observeret ændring, som ligger i systemet selv, d.v.s. den såkaldte naturlige klimavariation. For det andet har klimaobservationerne ikke vist en stadig stigning af temperaturen i de sidste 250 år. Der har været mange temperaturændringer, som ikke kan tilskrives ændringer i kuldioksydmængden som f.eks. det fald i den globale middeltemperatur, som fandt sted mellem ca. 1940 og 1970. For det tredje er der en række tilbagekoblingsmekanismer, som ikke er taget med i modellerne, og de kunne have den modsatte virkning på temperaturen. Nu skal denne artikel ikke dreje sig om den såkaldte drivhuseffekt, men den er nævnt her som et eksempel på den forsigtige anvendelse, som man bør gøre af sådanne eksperimenter.

Lidt videnskabsteori.

Computeren finder stadig større anvendelse i mange grene af videnskaben. Den er et alment værktøj, som kan bruges til mangfoldige formål, men den er naturligvis aldrig bedre end den realitet, som findes i de modeller, som er blevet opfundet på grundlag af vor nuværende viden på et bestemt område. Den kan bruges til at simulere processer i en bestemt teori, men kan også bruges til at efterligne opførslen af et virkeligt system. Hvis den simulerede opførsel er nær ved den virkelige opførsel, som observeret af data fra naturen eller et laboratorieeksperiment, kan man, hvis behovet eksisterer, overføre modellen til anvendelsesområdet, hvor modellen kan anvendes i de praktiske forudsigelser. Der vil den så eksistere, indtil forskningen har produceret en endnu bedre simulations- eller prognosemodel.

Ny og dybere indsigt er opnået gennem computersimuleringer af fysiske, kemiske og biologiske processer. Enkelte eksempler fra atmosfærefysikken er nævnt i de tidligere afsnit, men mange flere eksempler kunne gives fra de forskellige videnskabsgrene. Man har sammenlignet anvendelsen af computeren med et laboratorieeksperiment. De har i hvert fald det tilfælde, at man i begge tilfælde må gå igennem omhyggelig planlægning, foretage en ligeså omhyggelig "opstilling" og stille en række spørgsmål, som muligvis kan besvares af "eksperimentet". De er dog også forskellige, fordi man i laboratoriet - i hvert fald i visse tilfælde - har at gøre med den virkelige verden, medens modellen i computeren kun kan indeholde enten, hvad vi ved, eller noget, som vi gerne vil prøve, og i det sidste tilfælde må man så gå til naturen eller til laboratoriet for at se om simuleringen er i orden. Computersimuleringer kan således ikke erstatte den eksperimentelle videnskab i almindelighed, men den kan være det *eneste* værktøj, som står til rådighed i visse videnskabsgrene, hvor laboratorieforsøg ikke kan udføres på

realistisk måde.

Eksempler på den sidste situation finder vi typisk i de videnskabsgrene, hvor man beskæftiger sig med de virkeligt store systemer, som ikke kan bringes ind i laboratoriet (geovidenskaberne og astrofysikken er eksempler). Disse store systemer kan til nød observeres, men vi kan ikke på realistisk måde lave gode forsøgsopstillinger. Der har f.eks. i mange år været forsøg på at simulere atmosfærens og havenes strømninger i laboratoriet. Man kan komme et godt stykke på vej, og man kan med roterende kar på primitiv måde demonstrere visse aspekter af cirkulationen, men man kan ikke efterligne det virkelige tyngdefelt, der er parallelt i laboratoriet, men centralt på jorden. Sky- og nedbørsprocesser lader sig ikke simulere i laboratoriet. Strålingbudgettet afhænger af skyerne og deres bevægelse, så også denne proces mangler. Det er af disse grunde, at de laboratorier, der har eksisteret i geofysisk fluidmekanik, er lukket eller fører en kummerlig tilværelse. Man vil derfor forstå, at for de videnskaber, hvor realistiske forsøgsopstillinger ikke kan skabes, bliver computeren næsten det eneste værktøj, der findes. Dertil kommer, at visse af disse videnskabssområder næsten udelukkende foregår i den ikke-lineære verden, hvor sædvanlige matematiske metoder ikke rækker langt. Igen er der områder, hvor man forsøger at omgå de ikke-lineære processer ved de såkaldte parametriseringer, men medens sådanne heuristiske metoder kan bruges til demonstration af visse effekter på skematisk måde, er de aldrig det sidste ord i sagen.

Den meget hurtige udvikling af computeren både i kapacitet og hastighed er derfor meget velkommen i de videnskabsgrene, hvor man er så afhængig af den. Den almindelige indsigt, som man har fået over de sidste 40 år, i computersimuleringer har været en læreproces, selv om man gang på gang har måttet resignere, fordi man ikke kunne komme nærmere på naturen på grund af manglende computerressourcer. Læreprocessen har imidlertid afklaret en stor del af de problemer af principiel natur, som findes i computerfysikken, men netop fordi dette er sket, er appetitten for endnu bedre computere øget med ønsket om at komme endnu nærmere på de virkelige systemer.



Aksel Wiin Nielsen. dr.scient. h.c. Professor i dynamisk meteorologi ved Niels Bohr Institutet for Astronomi, Fysik og Geofysik, Københavns Universitet.