

Iversen, T. (2023). Numerisk værvarsling ved Meteorologisk institutt og norsk akademia. I Ø. Hov (Red.), *Forskning til samfunnsnytte: Trekk ved nyere norsk meteorologisk forskning* (s. 58–132). Fagbokforlaget.
DOI: <https://doi.org/10.55669/oa220102>

2

Numerisk værvarsling ved Meteorologisk institutt og norsk akademia

Trond Iversen

2.1 Motivasjon

Siden menneskeheten utviklet organisert næringsvirksomhet som påvirkes av vær eller tilgang på rent vann, slik som jordbruk og fiske fra åpen farkost, har det vært behov for å forutsi været de kommende timer, døgn, uker og måneder. Myter, værtegn i naturen og erfaringer fra sesongvariasjoner (jf. primstaven) har vært benyttet gjennom mange hundre, kanskje noen tusen, år. Det ble jevnlig erfart gjennom tap og sorg at å varsle været er vesentlig vanskeligere enn for eksempel å forutsi soloppganger og tidevann. Ikke desto mindre har vi i Norge fått daglige vær- og stormvarsler over eteren i snart 100 år,¹ og på TV-skjermen i over 60 år. Selv om disse varslene var bygget på

1 Utdrag av Bergen Radios historie, skrevet av Steinar Jensen til 90-årsjubileet, ansatt ved Bergen Radio 1970–1980: «I 1922 tok Bergen Radio i bruk rørsenderen som den første stasjon i Europa.

naturvitenskapelig teori, var det allment kjent at de kunne ha alvorlige feil som i verste fall kunne få alvorlige konsekvenser. Kanskje var det også slike «blandede erfaringer» som gjorde at altfor mange ikke tok konsekvensene av værvarslene til fjells under ulykkepåsken i Sør-Norge i 1967.² De første offentlige fjellvettreglene kom da, hvorav én het «Vis respekt for været og værmeldingen» (nå revidert til «Ta hensyn til vær- og skredvarsel»).

I dag er vi blitt vant med å finne fram til treffsikre og pålitelige værvarsler for de kommende døgn f.eks. via nettjenesten yr.no. Kvaliteten på værprognosene og allmennhetens tilgang til dem har utviklet seg formidabelt siden det siste årtusenskiftet. Dette er av stor betydning for privatpersoner, bedrifter og samfunnsinstitusjoner som påvirkes av vær og vind. Dette har ikke kommet av seg selv, men er resultat av en tålmodig og langsiktig utvikling av vitenskap og teknologi over mange tiår,³ der den økte kvaliteten til værvarslene som beregnes numerisk med kraftige datamaskiner, er hovedårsaken. De to, tre siste tiårenes forskning har også brakt fram metoder for å beregne jordas klima, hvordan det har variert historisk under vekslende ytre betingelser, og hvordan det kan endres som følge av ulike antagelser om menneskers påvirkning de kommende tiår og hundreår. Dette er numeriske klima- og jordsystemmodeller, som er nært beslektet med numerisk værvarsling.

Norske fagfolk innen numerisk værvarsling og klimaberegninger samarbeider nå mer internasjonalt enn noensinne. Dette gjøres dels for å få tilgang til noen av verdens mest regnekraftige datamaskiner, slik at de mest avanserte beregningene kan gjøres på kortest mulig tid, og dels fordi fagets

Senderen ble ombygget i 1923, slik at man også kunne sende ut værmeldinger på telefoni. Det hører med til historien at den første 'kringkasting' her i landet også foregikk fra Rundemanen. Under landbruksmøtet i Stavanger sommeren 1923, ble det – som et eksperiment – overført en tale av landbruksdirektøren, på landlinje fra Kristiania til Rundemanen og derfra over radio til møtet i Stavanger. I referatet fra møtet heter det at 'direktørens tale ble tydelig oppfattet'. Fra sommeren 1923 ble senderen også brukt til to daglige værmeldinger på telefoni og telegrafi. Meldingene var basert på værobservasjoner fra skip, som var bearbeidet ved værvarslingsinstituttet, hvorefter Rundemanen sendte ut rapporter om kuling, storm, vindretning og siktbarhet for de viktigste områdene.» Den første offentlige kringkasting til allmennheten, inkludert en værmelding, er dokumentert i boka *Vinden dreier*, s. 190–195. 15. desember 2024 kan vi i hvert fall markere et sikkert 100-årsjubileum (Kilde: statsmeteorolog Jon Smits).

2 <https://www.klikk.no/historie/doden-i-paskefjellet---tragedier-i-ko-da-uvaer-traff-skiturister-i-pasken-1967p-6899525>

3 www.nature.com/doi/10.1038/nature14956

utfordringer blir stadig mer avanserte og krever forskerkompetanse på en rekke ulike fagfelt. Dette omfatter forståelse av komplekse prosesser i jord-systemet, numerisk matematikk, optimal bruk av beregningskraftige elektroniske regnemaskiner, tilgang til og utnyttelse av store mengder direkte og indirekte observasjoner, kommunikasjon og presentasjon av store data-mengder i former som er nyttig for brukerne.

Denne artikkelen forsøker å beskrive viktige elementer i den utviklingen som har vært innen numerisk værvarsling, med vekt på norske bidrag. Fagfeltet fortsetter videre i årene som kommer med nye utfordringer. Veksten i regnekraft per prosessor kan ikke fortsette som før, samtidig som klimaendringene fører med seg flere potensielt farlige værhendelser, og behovet for pålitelige værvarsler øker. Det er å håpe at leseren får økt forståelse for hvordan moderne værvarsling er basert på naturvitenskap og teknologi, samtidig som gode værvarsler er av stor og økende betydning for samfunnet og for enkeltmennesker.

2.2 En eksakt naturvitenskap

Gamle tiders væerspådommer kunne nok et stykke på vei minne om noe vitenskapelig, men begrensningene var betydelige så lenge det ikke fantes instrumentelle observasjoner av værets elementer, og det manglet grunnleggende forståelse av lufta som medium og begreper som trykk, temperatur, fuktighet osv. Under seilskutetiden var passatvindene og stillebeltene godt kjent, og astronomen Edmond Halley forsøkte å forklare disse i 1686⁴ på basis av den tidas forståelse av fysikk, men han ble korrigert i 1735 av George Hadley.⁵ Det var den uttalte persistens som gjorde at passatvindene ble oppfattet som et spesifikt fenomen som man kunne forklare uten avanserte observasjonssystemer og moderne teori.

Værsystemene på midlere og høye bredder lot seg derimot ikke like enkelt forklare eller forutsi. Meteorologiske observasjoner hadde lenge vært tatt ved astronomiske observatorier i Europa da det midt på 1800-tallet ble

4 <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rstl.1686.0026>

5 <https://royalsocietypublishing.org/doi/abs/10.1098/rstl.1735.0014>

oppdaget at forflytningen av et farlig stormsystem gjennom Europa kunne ha vært varslet et døgn eller to i forveien. En analyse som ble foretatt i ettertid ved Paris-observatoriet,⁶ konkluderte at stormen kunne vært varslet dersom alle europeiske observasjoner av trykk, temperatur og nedbør hadde vært tilgjengelig i sann tid. Denne oppdagelsen førte til at flere meteorologiske institutter med ansvar for å varsle vær og vind, ble etablert de påfølgende årene. Det norske meteorologiske institutt ble grunnlagt 1. desember 1866 med Henrik Mohn som direktør. Dette la grunnlaget for nye systematiske studier av værvarslings muligheter og begrensninger på naturvitenskapelig grunn.

Norge er en pionérasjon innen naturvitenskapelig basert værvarsling. Eksempelvis ble den geostrofiske vindformel, som uttrykker en sammenheng mellom den horisontale fordeling av lufttrykk og de storskala vindene utenfor tropene, publisert allerede i 1876 av Henrik Mohn⁷ i samarbeid med Cato M. Guldberg.

Ved å måle lufttrykk samtidig over et geografisk område hadde man dermed også langt på vei kartlagt vindfordelingen i området. I tillegg var det kjent at det var en tilnærmet entydig sammenheng mellom den vertikale fordelingen av lufttrykk og høyden over havet med luftas massetetthet som proporsjonalitetskoeffisient (kalt hydrostatisk balanse). Dermed kunne også den vertikale variasjonen av vind kartlegges ved å måle den horisontale fordeling av temperatur og trykk samtidig. Dette ga et solid grunnlag for å bli internasjonalt enige om å ta meteorologiske observasjoner samtidig (synoptisk) og distribuere disse til alle værtjenester så fort det lot seg gjøre med datidens teknologiske muligheter. Mohn var en sterk pådriver for dette innen den internasjonale meteorologiske organisasjon (IMO), som mange tiår senere ble til WMO organisert under FN.

Værkart med linjer gjennom punkter for konstant trykk (isobarer) og temperatur (isotermer) var derfor nyttige i den grad mange nok samtidige observasjoner var tilgjengelige for værvarsleren. Man kunne også se for seg, og tentativt beregne, hvordan de storskala vindene kunne endre temperaturfeltet de kommende timene. Men det fantes ingen stringent vitenskapelig

6 <https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00033798400200311>

7 Guldberg, C.M. & Mohn, H., 1876. *Études sur les mouvements de l'atmosphère (del 1)*.

teori for utviklingen av trykk, temperatur og vind å basere værvarslene på. En slik teori ble imidlertid publisert i 1904 av Vilhelm Bjerknes. Han knyttet de termodynamiske og fluiddynamiske teorier sammen til det han kalte fysikalsk hydrodynamikk.⁸

Før Bjerknes' teori omfattet datidens tanker om vitenskapelig basert determinisme ikke værvarsling. Uten det formelt naturvitenskapelige grunnlaget på plass, var dette en blanding av vitenskap, observasjoner, anekdoter og huskereglar. Det var ikke anerkjent som fagfelt blant de såkalt *eksakte naturvitenskaper*, slik for eksempel beregninger av planetenes bevegelser var. Værvarsling var *subjektivt* fordi ulike eksperter i faget ville anvende huskereglar forskjellig og dermed avlede ulike værvarslar. Men med Bjerknes' teori fra 1904 var det – i hvert fall prinsipielt – mulig å tenke seg at værvarslar kunne beregnes uten fageksperters subjektive tolkninger. Værvarslar skulle altså kunne beregnes *objektivt*.

På grunnlag av sine ideer fikk Bjerknes økonomiske midler fra Carnegie-fondet i USA til å ansette to vitenskapelige assistenter for resten av sin aktive karriere. Det tok imidlertid nesten femti år før det formelle teoretiske grunnlag kunne omsettes til objektive beregninger av værets utvikling. Matematikken var komplisert, og man hadde dårlig innsikt i egenskapene til ligningene og deres løsninger. Før programmerbare elektroniske regnemaskiner ble tilgjengelige, kunne heller ikke slike beregninger gjennomføres i praksis (selv om det ble forsøkt av Richardson, se nedenfor).

Bjerknes og hans første assistenter satte imidlertid i gang med å utvikle metoder for å løse ligningene grafisk. Denne forskningen økte den fysiske forståelsen betydelig, men førte ikke fram til beregning av objektive prognoser. De praktiske prosessene som ble utviklet, la imidlertid grunnlaget for nye og bedre metoder for analyser av værkart som grunnlag for subjektive værvarslar. Dette revolusjonerte faget, og «Bergenskolen» dominerte den daglige værvarslingen utenfor tropene i mye av det påfølgende hundreår.

Vilhelm Bjerknes ble professor i mekanikk og teoretisk fysikk i Oslo i 1926. Der skiftet han tema og arbeidet med matematiske problemstillinger som etter hvert dannet en skole innen geofysisk fluiddynamikk («Oslo-

8 Bjerknes, V., 1904. Das problem der Wettervorhersage, betrachtet von Standpunkte der Mechanik und der Physik. *Meteor. Zeits.*, 21, 1–7; oversatt til engelsk av Y. Mintz: Weather forecasting as a problem in mechanics and physics.

skolen»). Dette ble dels videreført av Halvor Solberg, en av de tre mest sentrale skikkelsene i Bergensskolen, men i høyere grad av Einar Høiland, som ble V. Bjerknes' siste Carnegie-stipendiat i 1935.

Briten Lewis Fry Richardson forsøkte å beregne værutviklingen ved å engasjere mange mennesker til å bruke den tidens mekaniske regnemaskiner.⁹ Dette forsøket på manuell numerisk værvarsling ga voldsomt store feil, antagelig uten at Richardson forsto hvorfor (se f.eks. boken til Peter Lynch¹⁰); et godt eksempel på at man manglet en god forståelse for ligningenes egenskaper. Nå vet man at små unøyaktigheter i de analyserte feltene for trykk, temperatur og vind gir opphav til avvik fra geostrofisk og hydrostatisk likevekt, og disse unøyaktighetene gjør at det beregnes lydølger og tyngdebølger (som er samme type bølger som overflatebølger på vann) med fullstendig urealistisk høy energi. Richardsons beregnede løsninger ga derfor altfor store endringer over de kommende seks timene, og resultatet var svært langt fra det som i ettertid ble observert.

2.3 Norske bidrag til verdens første vellykkede numeriske værvarsel

Da man fikk tilgjengelig en elektronisk regnemaskin i USA (som til slutt ble Electronic Numerical Integrator and Computer, ENIAC) for å gjøre slike beregninger like etter andre verdenskrig, var forskerne klar over at urealistiske lyd- og tyngdebølger (kalt «meteorologisk støy» av Jule Charney) måtte kontrolleres for at de ikke fullstendig skulle maskere de mønstrene som hadde betydning for været.

En særdeles interessant førstehånds, men til dels anekdotisk, fortelling om fødselen av numerisk beregning av værvarslere og den faglige utvikling årene etter i USA, ble foredratt i forbindelse med USAs 200-årsjubileum i 1976 av Philip Duncan Thompson. Foredraget ble syv år senere gjengitt i *Bulletin of the Atmospheric Meteorological Society*.¹¹

9 Richardson, L.F., 1922. *Weather Prediction by Numerical Process*. Cambridge University Press.

10 Lynch, P., 2006. *The Emergence of Numerical Weather Prediction: Richardson's Dream*, Cambridge University Press, 279pp.

11 Thompson, Ph.D., 1983. A History of Numerical Weather Prediction in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64, 755–769.

En annen relevant kilde for det som påvirket utviklingen av NWP og dynamisk meteorologi i Norge etter krigen, er doktoravhandlingen til Thorleif Aass Kristiansen fra 2017¹²). Alle med interesse for meteorologi og værvarsling vil ha glede av disse to kildene, om ikke annet for å få innblikk i store og små trivialiteter bak en monumentalt viktig faghistorie.

Like etter andre verdenskrig ble ENIAC-maskinen tilgjengelig for vitenskapelige formål, og det var planlagt å installere en kraftigere maskin nr. 2 ved Institute for Advanced Study ved Princeton-universitetet i New Jersey i USA. Den berømte matematikeren John von Neuman, som var sentral i arbeidet med å utvikle verdens første programmerbare regnemaskiner, fikk i oppdrag å finne et vitenskapelig tema som var passende for den nye teknologien. Valget falt på numerisk beregning av værvarsler. Detaljene bak opprettelsen av prosjektet kan leses i nevnte publikasjon av Thompson.

Det grunnleggende matematiske apparatet var formelt basert på teorien til Vilhelm Bjerknes, men etter Richardsons mislykkede forsøk 30 år før, forsto flere forskere at ligningene ikke kunne anvendes direkte. John von Neumann knyttet til seg Jule G. Charney, som nylig hadde avlagt doktorgrad i dynamisk meteorologi og hadde gjort et viktig gjennombrudd i forståelsen av lange sykklonbølger på vestavindbeltene utenfor tropene. Avhandlingen ble avlagt i 1946 ved University of California at Los Angeles (UCLA) med Jack Bjerknes, Vilhelms sønn, som veileder.

Det var derfor ikke helt uventet at Charney besøkte Universitetet i Oslo noen måneder i 1947–48, på tross av forholdene i Norge etter krigen. Formålet var opprinnelig å besøke Halvor Solberg, men siden Solberg selv var på reise i USA, bestemte Charney seg for først å være et halvt års tid hos Carl-Gustaf Rossby i Chicago der det var et produktivt fagmiljø.

I Oslo ble miljøet rundt Einar Høiland viktig for Charney. Der ble han kjent med de norske forskertalentene Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtoft. De arbeidet ved Meteorologisk institutt og deltok i seminarer og diskusjoner hos Høiland mens de arbeidet med sine doktoravhandlinger. Sverre Pettersen var ansvarlig for det første meteorologiske laboratoriekurset (værkartanalyse m.m.) ved UiO, og Fjørtoft og Eliassen var blant de første som tok dette kurset like før krigen. Både Fjørtoft og Eliassen fikk erfaring fra praktisk daglig

12 Kristiansen, T.Aa., 2017. *Meteorologi på reise. Veivalg og impulser i Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtofts forskerkarrierer*, PhD-avhandling, Universitetet i Bergen.

værvarsling ved Meteorologisk institutt samtidig som de arbeidet med teoretiske problemstillinger. Charney forteller at han hadde liten kontakt med Solberg, men gir svært godt skussmål til miljøet rundt Høiland, og særlig Eliassen og Fjørtoft:¹³

It turned out that when I came to Oslo I think that Solberg ... was very much involved with university affairs. And he gave me an office next to his, but we had essentially no scientific discussions. ... and, uh, by this time I had ... had been introduced to Eliassen and Fjørtoft and Holland and found them a very congenial active group and ... it just came about that I had very little contact with Solberg. But I don't consider that a misfortune since, uh, ... these three people more than made up for, anything I might have missed ... And, of course, V. Bjerknes was very much there.

Eliassen og Fjørtoft ble etter tur invitert til Princeton der de skulle være med på å utvikle eksperimentet med numerisk værvarsling. Et brev datert 4. november 1947 til Ph.D. Thompson (som da var i Princeton hos von Neumann), allerede flere måneder før oppholdet i Oslo var slutt, bekrefter at Charney ønsket å ha med nordmennene på prosjektet:

... it occurred to me that you might be able to use one of these bright young men. Eliasson has had a very good mathematical and physical training under V. Bjerknes and has worked on the problem of numerical computation. He is aware that the finite differences cannot be chosen arbitrarily and that the initial conditions propagate at a finite rate. He is also aware of the impossibility of integrating the equations of motion as they stand. In short he is not naive. Furthermore he is one of the best forecasters in Norway and so has a proper appreciation of the physical aspects of the problem. Fjørtoft is damn good also, but he is not available.

Det er interessant å se nærmere på Charneys og Eliassens opplevelser av situasjonen under Charneys opphold i Oslo i forkant av Princeton-prosjek-

13 Platzman, G.W., 1987. *Conversations with Jule Charney*, NCAR/TN-298+PROC, Nov. 1987; 169 pp. Side 78–79.

tet. Overraskende nok gir Kristiansens avhandling inntrykk av at den faglige kommunikasjonen mellom Eliassen og Charney kunne ha vært bedre. I retrospekt virker dette bemerkelsesverdig siden de begge arbeidet med å utvikle forenklede versjoner av V. Bjerknes' generelle ligninger. Ligningene måtte manipuleres til å filtrere vekk «meteorologisk støy» som løsninger. Imidlertid hadde de ulike måter å angripe problemet på. Charney beskriver sin egen tilnærming som pragmatisk og observasjonsbasert, og Eliassens som mer stringent matematisk i tråd med «Osloskolen» til Solberg og Høiland¹⁴ (litt redigert):

I think his paper actually came out after I left Oslo. But I think it must have been in seminars or in conversations that I became aware of it. But I somehow, uh, regarded it as perhaps a formalistic approach and, um, and I think that the, uh, ... and never took it very much ... ever made use of it or even took the trouble to compare the results that one might obtain with it, uh, with those that one obtained with the quasige... quasi-geostrophic equations.

... the Eliassen equations were an intermediate step in some sense. But later on, ... it became apparent to me that the equations that Hoskins was using were Eliassen's equations, and ... I think I coined the term «semi-geostrophic», since we had been using ... the term «quasigeostrophic» for my equation.

I think in Eliassen's case, um ... and I think Fjortoft too, later on, used basically ... what were Eliassen's equations and showed that they are fundamentally much more accurate than, um, the quasi-geostrophic equations, especially when you have things like fronts.

And I don't remember Eliassen and I actually discussing, uh, comparing the two formulations. As you say, they were both published in [Geofysiske Publikasjoner (GWP)] ... totally independently.

14 Platzman, G.W., 1987. *Conversations with Jule Charney*, NCAR/TN-298+PROC, Nov. 1987, s. 76–78; og Eliassens kommentarer, s. 152–154.

Eliassen bekrefter langt på vei Charneys framstilling i sine kommentarer til transkripsjonene, der han også medgir en betydelig usikkerhet og beskjedenhet på egne vegne:

It is right as Jule said in the interview that he first became acquainted with my quasi-geostrophic (as I called it) method through seminars and conversations – my English manuscript was not finished until after he left Norway early in 1948. The transcript confirms my impression that he didn't show much interest in this part of my work; in fact, I am not sure that he quite understood it at the time. This is perhaps not surprising, since my explanations must have been very poor; I don't think I recognized then that one of my equations was in fact a kind of quasi-geostrophic vorticity equation. Besides, I had great difficulties in expressing myself in English, as well as understanding spoken English.

When I worked with frontal circulations later in the fifties, however, I came to the conclusion that the geostrophic momentum equations were perfectly suited for this purpose since they contained the all-important advection of entropy and momentum by the cross-frontal ageostrophic, divergent velocity component, which was ignored in Jule's quasi-geostrophic equations. It is clear from the transcript that Jule ultimately, after the Hoskins and Bretherton papers, came to the same conclusion.

Charneys kvasigeostrofiske ligninger¹⁵ benyttet grovere forenklinger, men var enklere å anvende i praksis enn Eliassens geostrofiske momentapproksimasjon.¹⁶ Charneys ligninger ble brukt i det første numeriske eksperimentet. Eliassens semigeostrofiske ligninger som inkluderte dynamisk viktige ageostrofiske effekter og var vesentlig mer nøyaktige, ble senere hovedsakelig anvendt i teoretiske arbeider i dynamisk meteorologi, slik som i studier av frontogenese og transversale sirkulasjoner ved jetstrømmer (av Eliassen selv og f.eks. av briten Brian Hoskins).

15 Charney, J.G., 1948. On the scale of atmospheric motions, *Geofys. Publ.*, 17.

16 Eliassen, A., 1949. The quasi-static equations of motion with pressure as independent variable, *Geofys. Publ.*, 17.

Da Eliassen var i Princeton i 1948–49, var det tekniske problemer med regnemaskinen som var installert i Princeton. Kommunikasjonen med Charney var neppe lenger noe problem, i den grad den hadde vært det i Oslo, for de samarbeidet godt om analytiske beregninger av stasjonære lange, planetariske Rossby-bølger som oppstår når vestavindsbeltet på den nordlige halvkule passerer over Rocky Mountains og Himalaya-massivet. Slike kan tidvis gi opphav til resonansfenomener som skaper persistent (langvarig) vær i visse regioner (for eksempel blokking av den normalt østgående forflytning av lavtrykk på midlere breddegrader), og er potensielt viktige for at vær tidvis kan varsles mange dager framover med god treffsikkerhet. Arbeidet resulterte i en klassiker av en vitenskapelig artikkel.¹⁷

Eliassen vekslet opphold ved Princeton med Fjørtoft (1949–50), men Princeton-maskinen var ennå ikke i orden, og de valgte til slutt å likevel bruke den langsommere ENIAC som var installert i Aberdeen i Maryland, USA.¹⁸ Ligningene for luftpartiklers bevaring av absolutt virvling midt i atmosfæren ble formulert på en måte som lot seg programmere. Alle prosesser i atmosfæren var representert ved kun én variabel, nemlig høyden av 500 hPa-flaten. Bakgrunnen for dette valget var publisert av Charney.¹⁹ Hvis den horisontale vinden endrer styrke, men ikke retning med høyden, fins et «ekvivalent-barotrop nivå» nær 500 hPa-flaten. Der er den horisontale vind nesten uten divergens, og kvasigeostrofisk står vi igjen med kun én ligning å løse. Fra den beregnes tidsutvikling av høyden av 500 hPa-flaten.

Det er verdt å merke seg at å representere atmosfærens dynamikk med ett trykknivå, er en mindre brutal forenkling enn Rossbys antagelse som lå til grunn for hans berømte formel for planetariske bølger. Rossby antok at tettheten er den samme entydige funksjon av trykket for alle luftpartikler – av V. Bjerknes kalt «autobarotropi» – som medførte ingen vertikalbevegelser eller horisontal vinddivergens. Til sammenligning antok ikke

17 Charney, J.G. & Eliassen, A., 1949. A numerical method for predicting the perturbations of the middle latitudes westerlies, *Tellus*, 1, 38–54.

18 Intervju med Ragnar Fjørtoft i ND News, No. 6, December 1972, Special Issue on Meteorology. 40 pp. A/S Norsk Data-Electronic.

19 Charney, J.G., 1949. On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere., *J. Meteor.*, 6, 371–385.

Charneys modell noe om vindens divergens i andre nivåer enn i 500 hPa-flaten.²⁰ Eliassen hadde diskutert dette med Rossby selv:²¹

... I did not understand then – I didn't see what relevance the non-divergent dynamics had to the atmosphere. Rossby himself was not very clear – he gave a lecture in Oslo in 1946, and justified the non-divergent condition by referring to the small depth of the atmosphere compared with the earth's radius – a rather irrelevant argument.

Basert på observasjoner tatt ved ett tidspunkt innenfor et begrenset område på den nordlige halvkule, ble høyden av 500 hPa-flaten kartlagt i et regulært rutenett. Denne *analysen* ble utgangspunktet for at maskinen kunne kodes til å beregne et 24-timers værvarsel – *prognosen* – for høyden av 500 hPa-flaten, uten menneskelig inngripen.

Beregningen var vellykket, og dette ble selvsagt kjent i de fagmiljøene før arbeidet ble formelt publisert i den berømte artikkelen av Charney, Fjørtoft og von Neumann.²² At det ikke var «meteorologisk støy» i prognosen var viktig, men enda viktigere var det at den beregnede 24-timersprognosen hadde flere vesentlige likheter med den etterfølgende analysen på prognosetidspunktet («verifikasjonen») enn med analysen 24 timer tidligere.

-
- 20 *Forklaring av noen begreper*: Ordet «barotrop» brukes når den romlige variasjonen til en fysisk størrelse (her temperatur) er sammenfallende med trykkets romlige variasjon. Når en størrelse ikke er barotrop, omtales den som «baroklin», og hvis for eksempel temperaturen er baroklin, kan den geostrofiske vind i det generelle tilfelle transportere luft med ulik temperatur (varmluftadveksjon og kaldluftadveksjon), som igjen kan gi opphav til vertikalbevegelse og nedbørdannelse (ved oppstigning) eller uttørring (ved nedsynking). Det V. Bjerknes kalte «autobarotropi», var når luftas temperatur og massetetthet *alltid* er en entydig funksjon av trykket. En geostrofisk vind kan da aldri transportere luft av ulik temperatur. I Charneys «ekvivalent-barotrope» modell er ikke temperaturen en entydig funksjon av trykket, men siden vindretningen ikke varierer med høyden, kan den geostrofiske vind heller ikke transportere luft av ulik temperatur, altså en konsekvens som ligner på autobarotropi.
- 21 Platzman, G.W., 1987. *Conversations with Jule Charney*, NCAR/TN-298+PROC, Nov. 1987. Eliassens kommentarer, side 155. Eliassen fortalte også uformelt om dette på Inst, for geofysikk, UiO, på 1970-tallet.
- 22 Charney, J.G., Fjørtoft, R. & von Neumann, J., 1950. Numerical integration of the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 2, 237–254.

Underveis i beregningene måtte ENIAC kontinuerlig følges opp av operatører og programmerere²³ og brukte 24 timer på selve beregningen. Som værvarsel hadde ikke beregningene noen praktisk nytte, men innebar et prinsipielt gjennombrudd for fagfeltet *numerisk værvarsling* (ofte forkortet fra engelsk til *NWP*). Med tilgang på raskere regnemaskiner og bedre programmering av effektiv kode kunne man fortsette å utvikle numerisk værvarsling til et nyttig verktøy.

2.4 Faglige og teknologiske betingelser for NWP på 1950-tallet

I tillegg til de to nevnte hovedkildene (Thompson og Kristiansen) er Anders Perssons tre artikler om utviklingen av NWP utenfor USA lesverdige. Ikke minst diskuterer Persson flere enn de rent vitenskapelige og teknologiske forutsetningene for tidlig NWP-utvikling.²⁴

Det kan ikke understrekes nok hvor viktig tilgang på elektronisk regnekraft ble for meteorologi og oseanografi i løpet av de første 2–3 tiårene etter gjennombruddet i Princeton i 1950. Numeriske løsninger av de termofluid-dynamiske ligninger er sammen med avanserte observasjoner det viktigste redskap både for grunnleggende forskning i academia og for videreutvikling av NWP og numeriske modeller for klima og miljø. Dette skyldes at de generelle ligningene er ulineære og koblede slik at klassiske løsninger som kan drøftes analytisk, sjelden er mulig å finne. Grunnforskning og utvikling av nyttige anvendelser er gjensidig berikende og viktig for disse fagfeltene. Dette gjelder både for utvikling av relevant kompetanse og tilgang på elektroniske regnemaskiner, og var tydelig allerede i NWP-utviklingens spede begynnelse på 1950-tallet.

-
- 23 Platzman, G.W., 1979. The ENIAC computations of 1950 – Gateway to numerical weather prediction. *Bull. American Meteorol. Soc.*, 60, 302–312; Fjørtoft fortalte anekdotisk mange år senere (på 1970-tallet) at radiatorer stadig måtte skiftes og at fagfolkene måtte være med og vurdere restarting av beregningene underveis.
- 24 Persson, A., 2005. Early operational Numerical Weather Prediction outside the USA: an historical Introduction. Part I: Internationalism and engineering NWP in Sweden, 1952–69; *Meteorol. Appl.*, 12, 135–159; Part II: Twenty countries around the world. *Meteorol. Appl.*, 12, 269–289; Part III: Endurance and mathematics – British NWP, 1948–1965; *Meteorol. Appl.*, 12, 381–413.

2.4.1 USA: Princeton-prosjektets fortsettelse

I USA fortsatte en betydelig utvikling av NWP de første årene etter Princeton-gjennombruddet i 1950, men det tok noen år før NWP kunne få praktisk nytte i daglig værvarsling. Videre utvikling av programmerbare regnemaskiner var nødvendig, og forenklingene av atmosfærefysikken i Princeton-modellen var svært grove. Modellen kunne ikke beregne transport av luftmasser med ulik temperatur og kunne ikke nydanne eller dissipere absolutt virvling. Sagt på en annen måte, den kunne simulere lange planetariske Rossby-bølger (jf. Charney og Eliassen, 1949), men ikke de barokline bølgene som Charney hadde tatt doktorgrad på, og heller ikke frontalsyklonene som var kjent fra Bergensskolen.

De kvasigeostrofiske ligningene var brukt fordi de utelukket lyd- og tyngdebølger, men de var også resultat av tilnærminger som medfører betydelige unøyaktigheter. Ligningene kan beregne ageostrofiske og vertikale vindkomponenter i en modell med to eller flere nivåer, men disse komponentene inngår ikke når transport (adveksjon) beregnes. Dette gir raskt betydelige feil i den beregnede utvikling av vær fenomener knyttet til fronter og jetstrømmer.

Utover på 1950-tallet ble det forsket på å utvikle numeriske modeller med mindre grove antagelser. Både *barokline modeller med flere nivå eller lag* i vertikalretningen og *mer avanserte ligninger enn de kvasigeostrofiske* ble foreslått og studert. I tillegg ble det utviklet metoder for *objektiv numerisk analyse* av observasjoner til bruk for å beregne nøyaktige startbetingelser. Mer nøyaktige *skjemaer for diskretisering* av differensialligninger ble også studert. Samtidig var mange utålmodige mht. å høste fruktene av gjennombruddet i 1949–50 i operasjonell daglig NWP.

Amerikaneren Norman Phillips ga mange viktige bidrag i pionertiden for NWP på 1950-tallet. I 1951 foreslo han en tolagsmodell for atmosfæren som han brukte til analytiske studier. I 1953 formulerte han sammen med Charney en generalisering av tolagsmodellen til et vilkårlig antall lag, og de gjorde numeriske beregninger med tolagsmodellen med kvasigeostrofiske ligninger.²⁵ I 1956 brukte han en versjon av denne modellen utvidet med forenklet friksjon og ikke-adiabatiske prosesser (varmeoverføring), til å simu-

25 Charney, J.G. & Phillips, N.A., 1953. Numerical integration of the quasigeostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows., *J. Meteor.*, 10, 71–99.

lere den generelle sirkulasjon på den nordlige halvkule.²⁶ Modellen ble kjørt til den brøt sammen på grunn av langtidseffektene av trunkasjonsfeil (representasjonen av reelle tall i datamaskiner har et begrenset antall sifre), og han beregnet budsjetter for omsetning av energi og bevegelsesmengde. Den kan regnes som den første klimamodell som er kjørt på regnemaskin. I 1959 beskrev han en type numerisk instabilitet som skyldes aliasfeil av energi som hopes opp på kortere romlig skala enn det maskevidden i gitteret kan beskrive (subgrid skala), på grunn av ulineære ledd i ligningene.²⁷ Slike feil kan holdes i sjakk med selektiv demping av de korteste bølgene.

I 1954 ble Joint NWP Unit (JNWPU) organisert ved U.S. Weather Bureau i Washington med George P. Cressman som leder. Hensikten var å modernisere værtjenesten i tråd med relevante vitenskapelige framskritt. De satset raskt på å etablere en operasjonell produksjon med NWP.²⁸ De første operasjonelle beregningene ble gjort i mai 1955 med en trelags modell designet av Charney.²⁹ Prognosene var imidlertid ikke gode, og først i 1958 tilførte operasjonell NWP fra JNWPU positive bidrag til den daglige værtjenesten i USA. I den historiske artikkelen fra 1989 understreker Shuman allikevel at de tre årene (1955–58) ikke var bortkastet:

Although disappointing at the time, this was key to future success, and was the immediate and essential result of the decision by JMC to go operational. This «baptism by fire» immediately utilized the talents of the modeler, the judgment of the practicing synoptician, and the skills of the computer programmer. It established patterns of motivation with attention centered on accuracy and timeliness of delivery. This concentration of effort was a product of the operational environment.

The payoff came in 1958 when the problems were identified and solved, a suitable automatic analysis system was invented, and automatic data handling was developed.

-
- 26 Phillips, N.A., 1956. The general circulation of the atmosphere: A numerical experiment. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 82, 357–361.
- 27 Phillips, N.A., 1959. An example of non-linear computational instability. In: *The Atmosphere and the Sea in Motion*. B. Bolin (red.), Rockefeller Institute Press, New York, s. 501–504.
- 28 Shuman, F.G., 1989. History of Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center. *Weather and Forecasting*, 4, 286–296, s. 287.
- 29 Charney, J.G., 1954. Numerical prediction of cyclogenesis. *Proc. Nat. Acad. Sci.*, 40, 99–110.

Det var altså en læringsprosess som involverte forskere bak modellene, værvarslere (synopticians) og programmerere, og dette genererte en grunnleggende forståelse av hva som kreves for å kjøre kompliserte operasjonelle rutiner i sann tid. Dette har siden vært grunnfjellet for helt eller delvis automatisert operasjonell varsling ved meteorologiske institutter og værvarslingssentre verden rundt. Det ble også klart demonstrert at resultater fra NWP ikke kunne erstatte værvarslerne, men måtte brukes som et hjelpemiddel for å manuelt utvikle prognoser:

Skillful, timely numerical predictions were delivered to central forecasters, who in turn used them as guidance for their own manually prepared prognostic charts.

Det skulle ta ytterligere 3–4 dekader før man med realisme kunne se for seg automatisk genererte værvarslere basert på NWP. Ved JNWPU hadde man gått tilbake til å kjøre en barotrop modell med ett nivå i 1958. Med den forståelsen man hadde for hvor viktig vertikale variasjoner var for utvikling av virvling og bevegelsesenergi i stormer, var dette frustrerende. NWP-forskning og modellutvikling var ennå kun i en tidlig startfase.

2.4.2 Skandinavia: Rossby og Stockholmprosjektet

Men det var slett ikke bare amerikanere som ledet utviklingen av NWP. I sitt historiske foredrag om utviklingen av NWP oppsummerer Ph.D. Thompson statusen for de ledende faglige miljøene for NWP tidlig på 1950-tallet:³⁰

... by 1952, there were no less than four sizeable research groups who were concentrating on the problem, namely: the Meteorology Project at the Institute for Advanced Study, the Atmospheric Analysis Laboratory of AFCRL, the Napier Shaw Laboratory of the British Meteorological Office, and the International Meteorological Institute of the University of Stockholm, working in cooperation with the University of Oslo. The development of numerical prediction had become an organized and well-supported research movement, comprising a substantial fraction of the

30 Thompson, Ph.D., 1983. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64, 755–769. Side 761.

total meteorological research effort. Let us admit at once, however, that this would not have happened without collateral advances in the technology of computing, communications, and numerical analysis.

Thompson løftet fram tre skandinaver som særlig hadde bidratt til utviklingen av NWP i USA:³¹

Beyond providing a clear goal and a sound physical approach to dynamical weather prediction, V. Bjerknes instilled his ideas in the minds of his students and their students in Bergen and Oslo, three of whom were later to write important chapters in the development of numerical weather prediction in the United States. We shall refer to Rossby, Eliassen, and Fjørtoft later.

Siden Thompson nevner Rossby, Eliassen og Fjørtoft i samme åndedrag, er det interessant å sammenligne den tidlige utviklingen av NWP i Norge og Sverige. Karrierene til disse tre var, som Charneys og Thompsons, i sin tur direkte eller indirekte positivt influert av V. Bjerknes og fagmiljøene etter ham og hans elever. Rossbys opphold hos V. Bjerknes 1919–20 da Bergensskolens ideer var under modning, skal ha vært avgjørende for hans videre faglige karrierevalg. Eliassen og Fjørtoft var særlig inspirert av Carnegie-assistenten E. Høiland og til dels V. Bjerknes selv, Charney og Thompson hadde utdannelse fra UCLA hos J. Bjerknes og J. Holmboe, og Charney skrot av miljøet rundt Høiland og diskusjoner med V. Bjerknes (som da var en levende legende) da han var i Oslo i 1947.³²

Rossby var 15–17 år eldre enn henholdsvis Fjørtoft og Eliassen som akkurat hadde avlagt doktorgrad da de etter tur ble invitert til NWP-prosjektet i Princeton. Han var vel merittert som professor i Chicago allerede fra starten av andre verdenskrig. Han var en inspirator med betydelige evner og vilje til faglig entreprenørskap,³³ og han var med i tidlige faser av de faglige diskusjonene om NWP-prosjektet i Princeton. Han skal ha bidratt til at Jack

31 Thompson, Ph.D., 1983. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64, 755–769. Side 756.

32 Platzman, G.W., 1987. *Conversations with Jule Charney*, NCAR/TN-298+PROC, Nov. 1987. s. 76–78.

33 Thompson, Ph.D., 1983. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64, 755–769. Side 758.

Bjerknes, Jørgen Holmboe, Sverre Pettersen og Harald U. Sverdrup kom til USA.³⁴ Internasjonalt var norske atmosfæreforskere blant de fremste, men på 1950- og 1960-tallet var det langt på vei de faglige posisjoner den forrige generasjon norske forskere hadde i USA, som skapte muligheter for unge norske talenter.

Fra 1947 var Rossby med på å grunnlegge det som etter hvert ble Sveriges meteorologiska och hydrologiska institut (SMHI) i Stockholm (i dag i Norrköping). Han ble professor ved Stockholms universitet, og det var i denne rollen han la grunnlaget for og sterkt bidro til at Sverige ble det første landet i verden med operasjonell NWP allerede høsten 1954. Dette var et halvt år før USA og mange år før Norge. Persson nevner at denne svenske suksessen kunne skyldes tre viktige elementer:³⁵

Three factors contributed to the early development of NWP in Sweden: Carl Gustaf Rossby's return in 1947; the development of state-of-art computers; and, not least, international scientific and economic support.

Den elektroniske regnemaskinen «BESK» (Binär Elektronisk Sekvens Kalkylator)³⁶, som etter datidens målestokk var svært kraftig, ble utviklet i Sverige og ble operativ i 1953, selv om den var ustabil i starten. Samfunnsøkonomien i Sverige og Norge var ikke sammenlignbar de første tiårene etter andre verdenskrig, og en lignende teknologisk utvikling i 50-tallets Norge var ikke mulig. Den første maskinen til matematiske beregninger i Norge, «NUSSE» (Norsk Universell Siffermaskin Selvstyrt Elektronisk), ble utviklet ved Sentralinstituttet for industriell forskning (SI) og var mer eller mindre operativ 1954–1961.³⁷ Maskinen var tilgjengelig for forskere ved UiO, men kunne ikke måle seg med BESK verken i teknisk kvalitet eller egnethet for NWP.³⁸ Norge fikk sin første elektroniske regnemaskin dedikert til bruk for meteorologiske beregninger i 1960 (FACIT EDB 3).

34 Kristiansen, T.Aa., 2017. *Meteorologi på reise. Veivalg og impulser i Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtofts forskerkarrierer*, PhD-avhandling, Universitetet i Bergen, 2017, s. 44.

35 Persson, A., 2005. Early operational Numerical Weather Prediction outside the USA: an historical Introduction. Part I: Internationalism and engineering NWP in Sweden, 1952–69; *Meteorol. Appl.*, 12, 135–159. Side 135.

36 BESK Binär Elektronisk Sekvens Kalkylator (treinno.se)

37 NUSSE – Store norske leksikon (snl.no)

38 NUSSE kunne utføre 500 addisjoner per sekund, og BESK 17 800.

I Stockholm fortsatte Rossby som den faglige inspirator han også hadde vært i Chicago. Inspirasjonen og entreprenørskapet hadde ringvirkninger langt utenfor Stockholm. Han samlet i 1952 en rekke ledende forskere til et prosjekt ved Stockholms universitet for å presentere og utvikle ideer til NWP.³⁹ Eliassen var en av prosjektlederne⁴⁰ og andre norske forskere bidro også. Få år senere (1955) hadde Rossby sikret midler til å grunnlegge et mer langsiktig International Meteorological Institute (IMI), som gjorde det mulig å invitere utenlandske forskere til opphold av ulik varighet.⁴¹ IMI eksisterer ennå (2022) ved MISU i Stockholm.⁴² Blant dem som var assosiert med og hadde opphold av varierende lengde ved Rossbys prosjekt fram mot den operasjonelle NWP fra 1952 til 1955, var foruten Eliassen og svenske Bert Bolin (som begge var prosjektledere), K. Hinkelmann og E. Kleinschmidt (Tyskland), E. Hovmøller (Danmark), G. Arnason og P. Bergthorsson (Island), C. Newton og N.A. Phillips (USA), O. Haug (Norge) og B. Döös (Sverige).

Planene i Sverige var basert på artikkelen som Bolin skrev sammen med Charney i 1951.⁴³ Artikkelen var en første videreføring av Princeton-prosjektet med tendensberegninger for 10 værsituasjoner. Bolin ble sentral i den vellykkede operasjonelle NWP ved SMHI fra 1954. Ennå ble tendensen for bare ett nivå (500 hPa) beregnet, men etter hvert ble det utviklet en mer avansert balansebetingelse enn den kvasigeostrofiske. Den kvadratiske balanse-ligningen tok bl.a. hensyn til sentrifugalkraften i virvler når vinden ble beregnet. Charney publiserte samme utvidelse parallelt med Bolin, og i det store NWP-symposiet i 1960 foreslo Charney ytterligere utvidelser for beregning av tendenser i virvling og temperatur.⁴⁴ Eliassen var gjesteforsker hos

39 Staff Members of The Institute of Meteorology, 1952. Preliminary Report on the Prognostic Value of Barotropic Models in the Forecasting of 500 mb Height Changes, *Tellus*, 4, 21–30.

40 Wiin-Nielsen, A., 1991. The birth of numerical weather prediction, *Tellus A*, 43, 36–52.

41 Persson, A., 2005. Early operational Numerical Weather Prediction outside the USA: an historical Introduction. Part I: Internationalism and engineering NWP in Sweden, 1952–69; *Meteorol. Appl.*, 12, side 140.

42 <https://www.misu.su.se/svenska/the-international-meteorological-institute-in-stockholm-imi/visitors-program>

43 Bolin, B. & Charney, J., 1951. Numerical tendency computations from the barotropic vorticity equation. *Tellus*, 3, 248–257.

44 Charney, J.G., 1962. Integration of the primitive and balance equations. *Proc. Symp. Numerical Weather Prediction*, Tokyo, 131–152.

J. Bjerknes ved UCLA da svenskene fikk i gang sine operasjonelle prognoser. Imidlertid var Odd Haug (senere leder for DNMI's edb-avdeling) med da de numeriske varslene opp til 72 timer ble laget operasjonelt for det svenske luftforsvaret.

2.5 Utviklinger i Norge 1950–1980

Det går ingen «rød tråd» fra norsk deltagelse i det vellykkede NWP-eksperimentet i 1950 til 1980-tallet da DNMI utviklet det første helnorske operasjonelle NWP-systemet med direkte beregning av værelementer. Som et bakteppe skal man være klar over at det i de første tiårene etter krigen heller ikke internasjonalt var noen bred konsensus om at NWP var den nyvinningen som skulle forbedre værvarslingen. Først fra slutten av 1960-tallet av ble det klart at numerisk modellering og NWP skulle bli lokomotivet for modernisering av værvarslingen, men det hører til en av de største gåtene i norsk meteorologihistorie at Norge valgte å pense av den utviklingen ved å stå utenfor det europeiske værserveret (ECMWF) helt fram til 1989.⁴⁵

Selv ikke i USA eller i Sverige utløste de første suksesshistoriene noen umiddelbar satsing på NWP som grunnlag for daglig værvarsling. Det trengtes vesentlig etterarbeid av meteorologer for å «oversette» en NWP-prognose for én eller noen få trykkflater til værvarsler, og man så ingen umiddelbar nytte for den daglige værtjenesten. Bruk av statistiske modeller var foreslått av den kjente statistikeren Norbert Wiener, og Ed Lorenz ble prosjektleder for dette da han ble professor ved Massachusetts Institute of Technology (MIT) i 1955.⁴⁶ Også i Sverige var det betydelig skepsis til Rossbys NWP-prosjekt, som bl.a. kom til syne da Alf Nyberg ble direktør for SMHI i 1954.⁴⁷ Nyberg ble imidlertid ganske raskt overbevist om å satse på NWP da han ble direktør.

45 Hov, Ø. & Eliassen, A., 2021. *Veien til Norges medlemskap i ECMWF*. Meteorologisk institutt, Artikkel i denne boken.

46 <http://www.nasonline.org/publications/biographical-memoirs/memoir-pdfs/lorenz-edward.pdf> (side 14–15)

47 Persson, A., 2005. Early operational Numerical Weather Prediction outside the USA: an historical Introduction. Part I: Internationalism and engineering NWP in Sweden, 1952–69; *Meteorol. Appl.*, 12, side 148.

2.5.1 1950-tallet: ingen norsk regnemaskin

Det er ingen tvil om at norske forskere hadde fremragende kompetanse til å utvikle NWP på 1950-tallet. Med Eliassen og Fjørtoft som sentrale i det første vellykkede eksperimentet og etter hvert, for Eliassens del, til utviklingen av NWP i USA og Sverige, er det ikke unaturlig å tenke seg at Norge skulle ha gått i bresjen for operasjonell NWP. På ulikt vis skjedde også dette, dog ikke i konkurranse med Rossbys senter, men snarere gjennom faglig samarbeid med dette.

Om vi som et tankeeksperiment ser bort fra de samfunnsøkonomiske ulikhetene, hvem kunne fylt en lignende rolle for NWP i Norge som Rossby gjorde i Sverige på 1950-tallet? Mange av de viktigste fagfolkene som hadde virket i Bergen da polarfrontmodellen ble utviklet, var nå flyttet til USA (J. Bjercknes, S. Pettersen), Sverige (T. Bergeron, C.G. Rossby returnert fra Chicago) eller Oslo (V. Bjercknes, H. Solberg).

Som professor i teoretisk meteorologi i Oslo arbeidet Solberg med grunnforskningspregede problemer, blant annet teori for hvordan Bergensskolens polarfrontbølger kan vokse til sykloner. Han var ikke tilhenger av å forenkle de styrende ligningene før de anvendes, noe som gjorde analysene hans unødvendig kompliserte.⁴⁸ Mht. NWP var dessuten erfaringene fra Richardsons eksperiment at forenklinger måtte til. De første par tiår, inntil Arnt Eliassen fikk lektorat ved Universitetet i Oslo i 1953, var Solberg alene ansvarlig for meteorologutdannelsen i Oslo og han veiledet svært mange studenter. Han var dessuten sterkt involvert i universitetsadministrasjon, som dekanus en periode og i komiteer for bl.a. å få tilgang til elektroniske regnemaskiner.⁴⁹ Han var dessuten generalsekretær i Det Norske Videnskaps-Akademi fra 1946 til 1954.

I Bergen hadde Carl Ludvig Godske overtatt professoratet som J. Bjercknes hadde forlatt da han reiste til USA før krigen. Han grunnla en helt annen faglig retning der (lokal og statistisk meteorologi). Harald U. Sverdrup ble direktør for polarinstituttet og professor II i Oslo. Jack Bjercknes, som hadde tilsvarende faglig pondus som Rossby, var ikke involvert i diskusjonene

48 Eliassen, A., 1996. A brief historical account of hydrodynamic research at the University of Oslo. In: *Waves and Nonlinear Processes in Hydrodynamics*. J. Grue mfl. (red.). Kluwer Academic Publishers, 3–14. side 6.

49 Jf. artikkel i Norsk biografisk leksikon.

rundt NWP i samme grad som Rossby. Både han og den litt yngre Sverre Pettersen var faglige ledertyper, men begge hadde hovedsakelig bakgrunn i analyse av data (synoptikk) og i mindre grad den matematisk baserte teorien bak NWP. J. Bjerknes ble i USA, mens Pettersen var i Norge og underviste værkartanalyse, varslet været bl.a. under krigshandlingene fra London, og ble riksværvarslingssjef ved Meteorologisk institutt 1945–48. Han dro tilbake til USA i 1948.

Det er ganske oppsiktsvekkende at J. Bjerknes (ved UCLA) hadde gitt Ph.D. Thompson i oppgave å utvikle numeriske beregninger av trykkintensiteter ut fra vertikalt integrert vind-divergens. Thompson var student hos J. Bjerknes ved UCLA samtidig med og etter Charney. Han arbeidet flere måneder med denne oppgaven før han innså at prosjektet var dødfødt⁵⁰ pga. altfor store unøyaktigheter i beregning av vind-divergens ut fra vindobservasjoner. Siden Richardson hadde diskutert metoden allerede i 1922, forteller dette noe om at J. Bjerknes' faglige interesser og styrker ikke var på de felter som trengtes for NWP-utvikling. Faktisk var det J. Bjerknes' norske kollega ved UCLA, Jørgen Holmboe, som fikk Thompson til å kontakte von Neumann i Princeton, dit han raskt flyttet. Charney var da hos Rossby i Chicago som mellomstasjon før reisen til Oslo, og planleggingen av NWP-prosjektet var da allerede godt i gang.

Einar Høiland fremstår som den soleklart nærmeste til å spille lignende rolle i Norge som Rossby hadde i Sverige tidlig på 1950-tallet. Ved å lede *Vitenskaps-Akademiets Institutt for vær- og klimaforskning* ved Universitetet i Oslo fra 1950 til 1960 ble han den fremste til å sikre videreutvikling av V. Bjerknes' matematisk-fysiske tilnærming til faget i Norge. Senteret ble opprinnelig motivert av tørkesommeren 1947 da det ble en etterfølgende strømkriser på grunn av uttørkede vannmagasiner. Et viktig praktisk formål var å utvikle et vitenskapelig grunnlag for langtidsvarsler av slike vær fenomener,⁵¹ men senteret var langt fra noensinne å utvikle noe slikt. Dette er heller ikke vanskelig å forstå ut fra dagens kunnskap, som særlig er utviklet ved ECMWF og ved sentre for klimamodellering over de siste 2–3 dekadene.

50 Thompson, Ph.D., 1983. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 64, 755–769. Side 758 og 759.

51 WMO, 1996: The Bulletin interviews: Professor Arnt Eliassen. *WMO Bulletin*, 46, 309–316. October 1996.

Høilands senter formaliserte det som i praksis hadde fungert som et vitenskapelig tyngdepunkt ledet av Høiland siden slutten av 1930-tallet da han var Carnegie-stipendiat. Både Eliassen og Fjørtoft var klare på at Høiland var avgjørende for deres karrierevalg,⁵² og gjennom dem hadde Høiland indirekte gitt norske bidrag til den internasjonale NWP-utviklingen. Dessverre ble senteret lagt ned omtrent samtidig med at DNMI fikk en adekvat regnemaskin,⁵³ og man kan bare tenke seg hvilken betydning senteret kunne hatt for utvikling av numeriske beregninger og operasjonell NWP på 1960-tallet.

Det er ingen tvil om at Høilands evner til å tiltrekke seg og inspirere flinke talenter kan sammenlignes med dem V. Bjercknes hadde 20–30 år tidligere. En lang rekke yngre talenter vokste fram under Høilands ledelse og innflytelse, og mange ble profilerte fagfolk i meteorologi, oseanografi og fluiddynamikk: Enok Palm, Eyvind Riis, Arne Foldvik, Kaare Pedersen, Marius Tødsen, Eigil Hesstvedt, Yngvar Gotaas, Jack Nordø, Per Martin Breistein mfl. Det er ingen overdrivelse å hevde at Høiland og V. Bjercknes til sammen hadde avgjørende betydning for svært mye av det norske forskere bidro med innen teoretisk meteorologi og NWP på 40-, 50- og 60-tallet, det være seg i USA, til Stockholm-prosjektet og, selvsagt, i Norge.

Uten elektronisk regnemaskin tilgjengelig ble mye av den teoretiske forskningen i Høilands senter utført med papir og blyant som redskap. Eliassen nevnte dette mange år senere i flere sammenhenger, f.eks. da han fikk Balzanprisen for sitt livsverk i 1996.⁵⁴ Mye av forskningen i senteret før 1960 var teoretisk med matematisk fysikk som innfallsvinkel. Ny fysisk forståelse ble utviklet når nye observasjoner kom til og dynamiske fenomener i atmosfæren ble diskutert og analysert matematisk.

Arbeidene innen hydrodynamisk stabilitetsteori var svært langt framme, der Fjørtofts doktoravhandling⁵⁵ fra 1950 var spesielt grensesprengende. Han

52 Kristiansen, T.Aa., 2017. *Meteorologi på reise. Veivalg og impulser i Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtofts forskerkarrierer*, PhD-avhandling, Universitetet i Bergen, 2017, s. 56–57.

53 Kristiansen, T.Aa., 2017. *Meteorologi på reise. Veivalg og impulser i Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtofts forskerkarrierer*, PhD-avhandling, Universitetet i Bergen, 2017, s. 269–271.

54 <https://www.apollon.uio.no/artikler/1997/vaermann.html>

55 Fjørtoft, R., 1950. Application of integral theorems in deriving criteria of stability for laminar flows and for the baroclinic circular vortex. *Geofysiske publikasjoner*. 17, nr. 6.

publiserte i 1953⁵⁶ også et viktig arbeid om hvordan kinetisk energi i todimensjonal turbulens på jordkloden forplantes mellom virvler av ulik utstrekning. Eliassens forskning bidro særlig til økt forståelse av vestavindsbeltene utenfor tropene, dannelse og oppløsning av fronter i atmosfæren og stående bølger som dannes når luft strømmer over fjell. Dette økte forståelsen av sentrale trekk ved jordas klimasystem, og dermed til den utvikling og evaluering av globale numeriske klimamodeller som kom mange år senere. Hans bidrag var blant de første som ga vitenskapelig forståelse av persistente avvik (blocking) fra normalsituasjonen med vestavind på midlere breddegrader. Slike persistente systemer assosieres med økt risiko for tørke, og Eliassen bidro på den måten til det opprinnelige formålet med Høilands senter.

Utvikling av værtjenesten med NWP? Etter 1955 hadde Fjørtoft og Eliassen stillinger og selvstendig faglig status som normalt skulle tilsi betydelig ressursmessig innflytelse. Før han ble DNMI-direktør i 1955, var Fjørtoft professor i København fra 1952. Som direktør kunne han ha prioritert å utvikle operasjonell NWP dersom økonomien hadde gjort det mulig å anskaffe regnekraft og relevant teknisk kompetanse. Med Høilands senter, Eliassen som universitetslektor i teoretisk meteorologi fra 1953 og professor fra 1958 og Fjørtoft som direktør ved DNMI etter tre år som professor i København, var den meteorologifaglige kompetansen i Oslo svært solid, og det ville ikke vært unaturlig om universitetet og DNMI samarbeidet strategisk for å utvikle operasjonell NWP. I hvilken grad dette ble vurdert, eller om det på 1950-tallet i det hele tatt var rom for å påvirke myndighetene til nødvendige investeringer, er imidlertid høyst usikkert. Forskning og teknologisk utvikling til støtte for norsk industri og næringsliv som grunnlag for allmenn velstandsutvikling var, forståelig nok, prioritert i gjenreisingsårene etter krigen.

Eliassen foreslo flere metoder til numeriske beregninger av atmosfærens dynamikk og optimal utnyttelse av observasjonsdata for kartlegging av begynnelsestilstanden for numeriske prognoser. At metodene ikke var programmert og testet ut på regnemaskin, var muligens en grunn til at det meste aldri ble publisert i åpne vitenskapelige tidsskrifter, men ble presentert i tek-

56 Fjørtoft, R., 1953. On the change in the spectral distribution of kinetic energy for twodimensional non-divergent flow, *Tellus*, 5, 225–230.

niske notater og rapporter. Det er særlig fire av Eliassens forslag på 1950-tallet som peker seg ut.

Blant de mange artiklene som ble publisert i *Tellus* fra prosjektet hos Rossby i Stockholm i 1952, var Eliassens analyser med en atmosfæremodell med to trykknivåer («toparametermodellen»)⁵⁷ I motsetning til tolagsmodellen til Phillips fra 1951,⁵⁸ antok ikke Eliassen at atmosfæren besto av to homogene væskelag. Det er ganske oppsiktsvekkende at det later til å være glemt at Sigurd Smebye, senere kjent i Norge som TV-meteorolog, gjorde numeriske beregninger med denne modellen ut fra analyserte værobservasjoner. Hans publikasjon tidlig i 1953⁵⁹ kom parallelt med eller i forkant av artikkelen til Charney og Phillips⁶⁰ som ofte regnes som det første vellykkede tredimensjonale numeriske modelleksperimentet for atmosfæren. Smebyes artikkel er registrert innsendt 19. desember 1952, mens Charney og Phillips' artikkel er registrert 5. januar 1953.

Som gjesteprofessor ved UCLA 1955–56 foreslo Eliassen et nytt skjema for diskretisering av de primitive ligningene i gitternett. Gitterpunktene for beregning av vind og massefelt (tetthet, trykk og temperatur) er forskjøvet i forhold til hverandre, og forskyvningen alternerer for hvert tidsskritt. Med dette blir beregningene av deriverte dobbelt så nøyaktige som når man beregner alle variabler i felles gitterpunkter, og dessuten blir det færre falske numeriske løsninger (computational modes). Denne måten å diskretisere på betegnes «Eliassen-grid» eller «Time-Staggered D-grid» (TSD). Metoden ble publisert i en rapport i 1956.⁶¹ Modellen ble programmert for en regnemaske (SWAC) av en programmerer, men ble dessverre ikke kjørt fordi det var en feil ved maskinen.

Hans kanskje mest oppsiktsvekkende forslag på 1950-tallet gjaldt objektiv analyse av observasjonsdata basert på statistisk behandling av dataene.

57 Eliassen, A., 1952. Simplified models of the atmosphere designed for the purpose of numerical weather prediction. *Tellus*, 4, 145–156.

58 Phillips, N.A., 1951. A simple three-dimensional model for the study of large-scale extratropical flow patterns. *J. Meteor.*, 8, 381–394.

59 Smebye, S., 1953. Tendency Computations with a Continuous Two-Parametric Atmospheric Model, *Tellus*, 5, 219–223.

60 Charney, J.G. & Phillips, N.A., 1953. Numerical integration of the quasigeostrophic equations for barotropic and simple baroclinic flows, *J. Meteor.*, 10, 71–99.

61 Eliassen, A., 1956. *A procedure for numerical integration of the primitive equations of the two-parameter model of the atmosphere*. Scientific Report No. 4, UCLA, March 1956, 64 pp.

Metoden omtales nå som optimal interpolasjon (OI) og ble opprinnelig beskrevet i et svært kort teknisk notat fra Høilands senter i 1954.⁶² At dette ikke ble publisert i et fagtidsskrift, har nok bidratt til at metoden ofte tilskrives Gandin fra en artikkel i 1963.⁶³ Til sammenligning foreslo Sasaki⁶⁴ nesten samtidig en variasjonsmetode som behandlet dataene deterministisk ved å minimalisere analysefeil ved å samtidig kreve oppfyllelse av naturlovene. Eliassens og Sakis metoder var begge langt forut for sin tid og kom begge i praktisk bruk for objektiv analyse først flere dekader senere. Videreutvikling av Sakis variasjonsmetode er nå mer populær siden den kan gjøre nytte av ikke-standard observasjoner, slik som strålingsflukser målt med instrumenter på satellitter.

Mot slutten av 1950-tallet formulerte Eliassen en spesiell type vertikal diskretisering av de primitive ligningene som ble et slags varemerke for ham. Han foreslo å bruke materielle vertikale koordinater slik at koordinatflatene følger med luftbevegelsene. Dette ble presentert i det første store internasjonale symposiet om NWP i Tokyo i 1960.⁶⁵

Fjørtoft hadde på 50- og tidlig på 60-tallet en betydelig bredde i sine interesser for utvikling av vitenskapelig baserte metoder til å modernisere den daglige værvarslingen. Hans egne vitenskapelige bidrag til NWP er også mindre tydelige enn Eliassens. Den faglige ambivalensen som kom til syne både i USA og i Sverige knyttet til om NWP ville være til hjelp i den daglige værvarslingen, påvirket ganske sikkert den norske direktørens avveininger. Det hadde vært i overkant dristig av en direktør med overordnet ansvar for værvarslingens bidrag til vern av liv og verdier, å ensidig satse på NWP. Regnemaskinressurser manglet, og teknisk kompetanse og erfaring med operasjonell drift måtte bygges opp. Kvaliteten til de første få numeriske prognosene kunne i høyden bidra til delvis inkrementelle forbedringer, men

62 Eliassen, A., 1954. *Provisional report on calculation of spatial covariance and autocorrelation of the pressure field*, Rep. 5, Norwegian Academy of Sciences, Institute of Weather and Climate Research, Oslo, Norway, 12 pp.

63 Gandin, L.S., 1963. *Objective Analysis of Meteorological Fields*. Gidromet, Leningrad, 285 pp. (translated by the Israel Program for Scientific Translations, Jerusalem, 1965).

64 Sasaki, Y., 1955. A fundamental study of the numerical prediction based on the variational principle. *J. Meteor. Soc. Japan*, 33, 30–43.

65 Eliassen, A., 1962. On the use of a material layer model of the atmosphere in numerical prediction, In: Proceedings of the international symposium on numerical weather prediction in Tokyo, Nov. 7–13, 1960. *Meteorol. Soc. Japan.*, 656, pp. 207–211.

var langt fra egnet til å rutinemessig erstatte vesentlige elementer i de manuelle metodene basert på Bergensskolen.^{66, 67, 68}

Man kan bare spekulere på hvilke vurderinger Fjørtoft gjorde om sin egen og DNMI's rolle på 50- og deler av 60-tallet, men kanskje var det slik at han visste at Eliassen aktivt utviklet nye metoder for NWP, slik at DNMI også burde utforske alternativer og ikke «legge alle egg i én kurv». Det var også begrenset hvor mye han som direktør hadde tid til å forske selv. Han etablerte i 1956 *direktørens testekontor*⁶⁹ som var en forløper for det som senere ble en forskningsavdeling ved DNMI. Noen ansatte ved DNMI samarbeidet med prosjektet ved SMHI i Stockholm (bl.a. Sigurd Smebye og Odd Haug) og det tok ikke lang tid for DNMI å kjøre operasjonell NWP etter at en elektronisk regnemaskin endelig ble installert i 1960.

Grovt sagt satset DNMI på 50- og 60-tallet på tre metoder for å utvikle værvarslingen: grafisk løsning av ligningene, statistiske metoder og NWP. Av disse kunne grafiske metoder implementeres raskt, mens de to andre krevde forskning og tekniske ressurser som instituttet ikke hadde på 50-tallet. Allerede i 1952, tre år før han ble direktør, foreslo Fjørtoft en metode til grafisk løsning av luftbevegelsene i 500 hPa-flaten,⁷⁰ altså det samme som ble løst numerisk i de første numeriske beregningene. Metoden perfektionerte han mens han var professor i København i en artikkel fra 1955.⁷¹ Suksessive romlige midlinger («glatttinger») fungerte som en «fattigmanns» Fourier-dekomposisjon ved at man fikk definert og skilt ut storskala vindfelt som endres langsomt, mens virvler på mindre skala kunne identifiseres og forflyttes i disse vindfeltene over det kommende døgn. Objektive varsler ett døgn fram kunne beregnes daglig etter ca. tre timers praktisk, manuelt

66 Staff members of the Joint Numerical Weather Prediction Unit, 1956. One year of operational numerical weather prediction, Part II. *Bulletin of the AMS*, 38, p. 315–328.

67 Shuman, F.G., 1989. History of Numerical Weather Prediction at the National Meteorological Center. *Weather and Forecasting*, 4, 286–296. Side 287.

68 Bergthorsson, P., Döös, B.R., Fryklund, S., Haug, O. & Lindquist, R., 1955. Routine Forecasting with the Barotropic Model, *Tellus*, 7, 272–274.

69 Kristiansen, T.Aa., 2017. *Meteorologi på reise. Veivalg og impulser i Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtofts forskerkarrierer*. PhD-avhandling, Universitetet i Bergen, 2017, s. 245.

70 Fjørtoft, R., 1952. On a numerical method of integrating the barotropic vorticity equation, *Tellus*, 4, 179–194.

71 Fjørtoft, R., 1955. On the Use of Space-Smoothing in Physical Weather Forecasting, *Tellus*, 7, 462–480.

arbeid. Metoden var unik og anvendbar, men ville kun være nyttig så lenge man ikke hadde elektroniske regnemaskiner. I et intervju publisert i ND-News 1972⁷², omtaler han denne «Fjørtoft-metoden», og der framgår det at han hadde NWP i tankene også da han utviklet den grafiske metoden:

ND-NEWS: This graphical method introduced by you, can it be elaborated any further?

Dr. Fjørtoft: It can but it is of no use. I mean, nobody would think of doing this now.

ND-NEWS: But some institutes use it even today.

Dr. Fjørtoft: Oh yes, but they do not have an electronic computer. The importance of this method was in the first place to pull a number of meteorologists into the field of numerical weather forecasting. They saw they could do some of these integrations in a simple way, and they became devoted to the field.

Noen av varslingsmeteorologene ble invitert til å dele sin tjeneste med forsknings- og utviklingsarbeid ved direktørens testekontor, og NWP var ett av flere faglige spor og med særlig Hans Økland som drivkraft. Jack Nordø ble hovedansvarlig for en satsing på å utvikle statistiske metoder for værvarsling ved instituttet. Det ble forsøkt etablert et samarbeid med Ed Lorenz ved MIT (Massachusetts Institute of Technology) i Boston, USA, som arbeidet med slike problemstillinger.⁷³ Feltet hadde et faglig slektskap til Eliassens optimale interpolasjon av observasjonsdata og til det som senere omtales som «Model Output Statistics» (MOS). Gjennom korrelasjonsanalyse knytter MOS de numeriske beregningene fra storskala NWP-prognoser til lokalt vær. Ut over dette er det ikke kjent om metodene ble benyttet i daglig værvarsling.

72 A look at modern meteorology. An interview with dr.philos Ragnar Fjørtoft. In: *ND-NEWS* No. 6, *Special Issue on Meteorology*. Dec. 1972, 40 s., s. 5–10.

73 Kristiansen, T.Aa., 2017. *Meteorologi på reise. Veivalg og impulser i Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtofts forskerkarrierer*. PhD-avhandling, Universitetet i Bergen, 2017, s. 263.

Odd Haug, som senere ble leder for instituttets EDB-avdeling, ga noen viktige bidrag allerede på 1950-tallet. Hans bidrag til SMHIs operasjonelle NWP fra midten av 1950-tallet er nevnt. Ved DNMI utviklet han en elegant metode for direkte løsning av visse elliptiske differensialligninger.⁷⁴ Slike måtte løses når man benyttet kvasigeostrofiske og andre modeller som filtrerer lyd-tyngde-bølger. Han utviklet også en praktisk anvendbar metode til objektiv analyse, som bl.a. ble presentert ved det store NWP-symposiet i Tokyo i 1960.⁷⁵

Fjørtoft arbeidet også selv videre med NWP-metoder, og typisk for ham foreslo han en ny og innovativ metode for å løse den ulineære balanseligning som var den utvidelsen av kvasigeostrofi som Bolin og Charney hadde foreslått i 1955 og 56. Dette ble først presentert ved symposiet i Tokyo i 1960.⁷⁶ Metoden ble senere anvendt, først mislykket ved NCAR USA av Søderberg under ledelse av Fjørtoft,⁷⁷ men siden vellykket av Sigbjørn Grønås og Magne Lystad så sent som i 1977.⁷⁸

2.5.2 1960-tallet: «FACIT-tiden»

DNMIs første elektroniske regnemaskin til bruk for meteorologiske beregninger ble installert i 1960. Dette var en FACIT EDB 3, som var en etterfølger til BESK, med transistorteknologi. Hans Økland var faglig nøkkelperson da DNMI fikk sin første operasjonelle NWP som ble kjørt på dette utstyret.⁷⁹ Andre meteorologer som var involvert, var Smebye, Haug og Lars

74 Haug, O., 1958. *A numerical method for integration of the Poisson and Helmholtz equations.*, Scientific report nr. 2, DNMI.

75 Haug, O., 1962. On the optimum use of available observations in numerical weather map analysis. Proceedings of the international symposium on numerical weather prediction in Tokyo, Nov 7–13, 1960, *Meteorol. Soc. Japan.*, 656, pp. Se også: Haug, O., 1959. A method of numerical weather map analysis. *Det Norske Meteorologiske Institutt Sci. Rep.* 5, 10 pp.

76 Fjørtoft, R., 1962. On the integration of a system of geostrophically balanced prognostic equations. Proceedings of the International Symposium on Numerical Weather Prediction in Tokyo, Nov 7–13, 1960. *Meteorol. Soc. Japan.* s. 153–159.

77 Fjørtoft, R. & Søderberg, B., 1965. *A prediction experiment with filtered equations.* NCAR, Boulder, Colorado. Manuscript No. 59.

78 Grønås, S. & Lystad, M., 1977. Solutions of the balance equation with minimum correction of the mass field, *Tellus*, 29, 502–511.

79 Økland, H., 1963. The operational forecasting model used in the Norwegian meteorological service, *Tellus*, 15, 280–283.

Haaland.⁸⁰ Modellen var kvasigeostrofisk og det ble kjørt både en ett-lags barotrop versjon for 500 hPa-flaten og en tolagsversjon. Integrasjonsmetoden var lagrangesk ved at horisontal forflytning av virvling ble beregnet ved hjelp av luftpakkebaner i det horisontale vindfeltet, også kalt trajektorier. På mange måter var ettlagsversjonen en numerisk videreføring av Fjørtofts grafiske teknikk fra 1952, men nå anvendt vesentlig mer nøyaktig og med mulighet for generalisering til tre dimensjoner. Det er verd å merke seg at DNMI i Oslo, ved Fjørtoft, arrangerte det andre store symposiet i NWP i 1963.⁸¹ Det første var det nevnte i Tokyo 1960.⁸²

Mens de kvasigeostrofiske ligningene var basis for den operasjonelle produksjon ved DNMI, arbeidet Økland videre og eksperimenterte med de primitive ligningene. Han programmerte en tolagsmodell med samme type integrasjonsskjema som var benyttet i den operasjonelle modellen i USA.⁸³ Dette forsøket var dessverre ikke vellykket, antagelig pga. feil i programmeringen av de numeriske metodene til Frederick Shuman som innebar en svært omfattende romlig midling og filtrering.⁸⁴ Arbeidet ble allikevel publisert⁸⁵ der følgende innledet konklusjonen:

There are quite obviously serious errors in the two-level prognoses presented here. For one thing there is a lack of smoothness caused by the noise waves. Some sort of smoothing procedure would certainly improve the forecasts on this point. But apart from this there are also errors in the meteorologically significant part, and some of these errors are not present in the barotropic forecasts.

80 Kristiansen, T.Aa., 2017. *Meteorologi på reise. Veivalg og impulser i Arnt Eliassen og Ragnar Fjørtofts forskerkarrierer* PhD-avhandling, Universitetet i Bergen, 2017, s. 259.

81 Platzman, G.W., 1963. International symposium on numerical weather forecasting, Oslo, March 11–16, *Tellus*, 15, 284–286.

82 Ito, 1961, International Symposium on Numerical Weather Prediction in Tokyo, *J. Meteor. Soc. Japan*, 39, 45–47.

83 Shuman, F.G., 1962. Numerical Experiments with the Primitive Equations. Proceedings of the international symposium on numerical weather prediction in Tokyo, Nov 7–13, 1960. *Meteorol. Soc. Japan.*, 656, pp. 85–106.

84 Bratseth, personlige diskusjoner.

85 Økland, H., 1965. An experiment in cyclogenesis prediction by a two-level model. *Mon. Wea. Rev.*, 93, 663–672.

Han sammenlignet altså resultatene fra tolagsmodellen med en modell med ett lag (barotrop). Hensikten med artikkelen var å studere om en tolagsmodell kunne beregne utviklinger ved å generere virvling og overføre mellom potensiell og kinetisk energi. Den barotrope modellen med ett lag har ikke mulighet for slike prosesser, men det var ikke klart om en representasjon av atmosfæren med bare to lag kunne være nok til å frambringe vesentlige forbedringer. At maskevidden i gitteret var så grov som 381 km kunne også innvirke på effektiviteten av slike barokline prosesser i modellen. Om dette konkluderer Økland optimistisk (på tross av feilene han først innrømmer):

However, the two-level forecasts are definitely better than the barotropic in some places, and especially over eastern North America where strong cyclogenesis have taken place. There is therefore little doubt that this two-level model is capable of predicting at least some of the significant baroclinic developments.

Økland arbeidet med å utvikle, programmere og kjøre eksperimenter med disse modellene over flere år, inklusive et lengre opphold (1962–64) ved National Meteorological Center (NMC), U.S. Weather Bureau, hos bl.a. Shuman og Cressman. Det er ikke utenkelig at det mislykkede eksperimentet til Økland reduserte Fjørtofts vilje til å satse sterkt på NWP ved DNMI basert på primitive ligninger. Man kan også spekulere på om dette kan ha bidratt til hans (og andres) negative holdning til at Norge skulle bli medlem av ECMWF noen år senere.⁸⁶

Økland programmerte imidlertid senere en annen modell basert på primitive ligninger for fire nivåer som ble brukt til å studere frontogenese i en idealisert sonal grunnstrøm, men altså ikke på reelle værddata. Her brukte han det vesentlig enklere Eliassen-gitteret. Dette modelleksperimentet ble gjort ved DNMI, var teknisk og meteorologifaglig vellykket og ble publisert i 1969.⁸⁷ Modellen og infrastrukturen rundt måtte imidlertid ha blitt vesentlig videreutviklet før den kunne ha blitt brukt til operasjonell NWP dersom det hadde vært ønskelig.

86 Hov, Ø. & Eliassen, A., 2022. Veien til Norges medlemskap i ECMWF. Artikkel i denne boken.

87 Økland, H., 1969. Experimental integration of a 4-level primitive equation model of the atmosphere. *Tellus*, 21, 359–367.

Et av Øklands sterkeste faglige bidrag var resultatet av hans andre opphold, 1968–69, ved NMC i Washington, D.C., USA. Der studerte han særlig geostrofisk tilpasning i barokline atmosfæremodeller. Han foreslo og testet ut teknikker for dynamisk initialisering av starttilstanden for numeriske prognoser for å kontrollere meteorologisk støy i modeller basert på primitive ligninger. Han beregnet «normale moder»⁸⁸ og pekte på den måten fram mot det som noen få år senere ble utviklet til ikke-lineær initialisering med eksplisitt beregning av horisontale og vertikale normale moder. Arbeidene ble publisert vitenskapelig,⁸⁹ og utgjorde brorparten av hans arbeid til dr.philos-graden. Økland var en faglig lederfigur innen numeriske beregninger og NWP både i årene ved DNMI og da han senere ble ansatt ved UiO.

Ved universitetet ledet Eliassen et større prosjekt 1960–64 som bl.a. omfattet integrasjon av en tolagsmodell med primitive ligninger. Den «meteorologiske støyen» i modellen ble holdt i sjakk ved å sikre balanserte starttilstander med beregninger som omfattet den ulineære balanseligningen. En innovativ analyse av løsningsmetoden for balanseligningen ble presentert, og beregningene ble utført på FACIT-maskinen ved DNMI. Prosjektet var finansiert gjennom en kontrakt med USAs luftforsvar. Med på dette prosjektet var Arne Grammeltvedt, Ole Bremnes og Marius Todsén, og amerikaneren William Blumen var gjesteforsker. Resultatene av prosjektet ble rapportert teknisk,⁹⁰ men ikke som vitenskapelig publikasjon i et tidsskrift.

Etter dette satte Eliassen vitenskapelige assistenter til å programmere og studere dynamikk i flerlagsmodeller med potensiell temperatur som vertikalkoordinat. Elmer Raustein, Oddvar Hellevik og Arne Bratseth var alle involvert i å utvikle ulike versjoner av et slikt modellapparat. De fleste av Eliassens hovedfagsstudenter benyttet dette i sine numeriske studier av atmosfæren. Modellene anvendte Eliassen-gitteret med både primitive lig-

88 Normale moder kan sammenlignes med de naturlige svingningene en gitarstreng kan ha; én buk = grunntonen, to buker med et knutepunkt på midten = første overtone, tre buker = andre overtone, osv.

89 Økland, H., 1970. On the adjustment toward balance in primitive equation weather prediction models, *Mon. Wea. Rev.*, 98, 271–279, og Økland, H., 1972. On the Balance, Initialization and Data Assimilation in Primitive Equation Prediction Models, *J. Atmos. Sci.*, 29, 641–648.

90 Eliassen, A., Grammeltvedt, A. & Bremnes, O., 1964. Studies in Numerical Weather Prediction and the dynamics of fronts. Final Report, Contract AF 61(052)-525, Institutt for Teoretisk Meteorologi, University of Oslo, 67 pp.

ninger og ligninger filtrert med den geostrofiske momentapprosimasjon, som Eliassen utviklet i sin doktoravhandling fra 1949.

Kaare Pedersen ble dosent ved universitetet i 1963 etter at han tok doktorgraden på et arbeid om numeriske prognoseberegninger som omfattet luftfuktighet og beregning av nedbør. Dette ble hovedsakelig utført da han var hos Sverre Pettersen i Chicago i tre år. Modellen var kvasigeostrofisk og besto av tre nivåer. Det ble publisert i 1963⁹¹ og er blant de første vellykkede forsøk med numeriske beregninger av objektive nedbørprognoser. Pedersen arbeidet senere spesielt med generaliserte balansebetingelser for atmosfærens dynamikk som foreslått av Charney⁹² som startet i samarbeid med Knut Erik Grønnskei.⁹³ På dette feltet veiledet han Thor Erik Nordeng og Trond Iversen som ble de første med dr.scient.-grad i geofysikk ved UiO (september 1981).

Arne Grammeltvedt tok doktorgraden ved UiO på et arbeid der han eksperimenterte med en rekke ulike diskretiseringskjema for primitive ligninger. En viktig del av dette arbeidet gjorde også han i USA, hos Warren Washington ved NCAR (National Center for Atmospheric Research) i Boulder, Colorado.⁹⁴ Grammeltvedt ble senere professor i Bergen, der han også var vert for FGGE-symposiet i juni 1980.⁹⁵ FGGE (First GARP Global Experiment) var et eksperiment under WMOs GARP (Global Atmospheric Research Programme) for å samle og behandle så mye som mulig av observasjoner i 1979 (FGGE-året), bl.a. for å studere muligheter og begrensninger av NWP.⁹⁶ På mange måter markerer FGGE-året et tidsskille mht. bruk av kvantitativ informasjon fra observasjoner fjernmålt med instrumenter på satellitter.

91 Pedersen, K., 1963. On quantitative precipitation forecasting with a quasi-geostrophic model. *Geoph. Publ.*, 25, 1–25.

92 Charney, J.G., 1962. Integration of the primitive and balance equations. Proceedings of the international symposium on numerical weather prediction in Tokyo, Nov 7–13, 1960. *Meteorol. Soc. Japan.*, 656, pp. 131–152.

93 Pedersen, K. & Grønnskei, K.E., 1969. A method of initialization for dynamical weather forecasting and a balanced model. *Geophys. Norv.*, 27, No. 7.

94 Grammeltvedt, A., 1969. A survey of finite-difference schemes for the primitive equations for a barotropic fluid *Mon. Wea. Rev.*, 97, 384–403.

95 International conference on preliminary FGGE data analysis and results: Bergen, Norway, 23–27 June 1980. WMO, Geneva, 1981. 552 sider.

96 *The First GARP Global Experiment: Objectives and plans*. Geneva, World Meteorological Organization (WMO), Global Atmospheric Research Programme (GARP), 1973. xxxvi, 107 p. QC/869/F44/G632/1973.

Grammeltvedt var direktør ved DNMI 1983–99, i en periode da instituttet satset sterkt på numeriske modeller av prosesser i atmosfære og hav, og ikke minst NWP. Instituttet ble medlem av ECMWF mens han var direktør. Den endelige avgjørelsen om medlemskap skyldtes hovedsakelig sterkt påtrykk fra fagfolk som ikke nettopp arbeidet med NWP, men som trenger numeriske analyser av atmosfærens tilstand for såkalt nedstrøms beregning av miljøkonsekvenser av menneskers gjøren og laden.⁹⁷

2.5.3 1970-tallet: balanserte modeller på Nordic-anlegget

Tidlig i 1972 ble et nytt regnearbeid installert ved DNMI. Dette anlegget, NORDIC – The multicomputer installation to the Norwegian Meteorological Institute, var resultat av et utviklingssamarbeid med Norsk Data-Elektronikk (senere Norsk Data). Det tidligere nevnte spesialnummeret om meteorologi av magasinet ND-News publisert i desember 1972⁹⁸ informerte og reklamerte for samarbeidet. I tillegg til det tidligere nevnte intervjuet med Fjørtoft var det artikler av Jan A. Børresen, Lars Håland, Hans Økland og dansken Aksel Wiin Nielsen. Dette regnearbeidet ble det viktigste redskapet for operasjonell NWP ved DNMI fram til 1980-tallet.

DNMI (og UiO) var utover 1970-tallet også koblet til Regnearbeidet Blindern-Kjeller (RBK) som opererte en Control Data Cyber-74 på Kjeller. Cybermaskinen var kraftig etter datidens målestokk, og ble bl.a. brukt til forskning og utvikling innen numeriske beregninger av atmosfære og hav, men ikke til operasjonell produksjon annet enn som reserve dersom NORDIC var nede.

På slutten av det nevnte intervjuet med Fjørtoft i ND-News fra desember 1972, ble han spurt om årsaken til den tidens tilsynelatende langsomme framdrift i kvalitet av NWP. Det er interessant å lese hans svar på dette som én mulig bakgrunn for hans negative holdning til norsk ECMWF-medlemskap. I denne sammenheng er det også på sin plass å minne om at Fjørtoft helt sikkert var godt kjent med at Ed Lorenz allerede i flere år hadde studert

97 Hov, Ø. & Eliassen, A., 2022. Veien til Norges medlemskap i ECMWF. Artikkel i denne boken.

98 ND-NEWS No. 6, *Special Issue on Meteorology*. Dec. 1972. 40 sider.

og diskutert vekst av små unøyaktigheter i inngangsdata til numeriske værmodeller. Disse arbeidene grunnla etter hvert et helt nytt fagfelt: Teori for ulineære dynamisk systemer og «kaos».

There is no doubt that when the forecasts go badly wrong, this is due to a combination of lack of knowledge of the state of the atmosphere and proper data. ... I have no opinion of what is the most important, but I will tell you that this is one of the major tasks for the groups that prepare GARP (Global Atmosphere Research Program). They are trying to find out what are the main reasons why we do not proceed and improve the forecasts significantly. Is it mainly because of the models which are not physically so sound as they should be, or is it mainly because of lack of knowledge of the atmosphere, or is it both? Why does the forecast go wrong after 4-5 days; this we really do not know, and there are many problems to be solved.

Økland beskrev i popularisert form hvordan NWP fungerer ved bruk av elektroniske regnemaskiner. Han ga bl.a. eksempler fra foreløpige beregninger med en balansert modell med 4 lag som han omtaler som «rather simple». Dette er antagelig en forløper til den modellen som i ulike versjoner var operasjonell gjennom det meste av 1970-årene, og som Sigbjørn Grønås og Magne Lystad var daglig ansvarlig for.⁹⁹ Det er ikke klart når denne modellen ble operasjonell, men rapporten viser iallfall resultater fra juli 1973. Modellen brukte den kvadratiske balanseligningen, som altså er en del bedre enn ren kvasigeostrofi. Det er heller ikke beskrevet hvordan startbetingelsene er beregnet ved objektiv analyse. Knut Bjørheim programmerte en analysemetode, men denne ble ikke publisert i rapportens form før fire år senere, i 1979.¹⁰⁰ Visse utvidelser og justeringer ble senere gjort i 1976¹⁰¹ og 1977¹⁰², uten vesentlig forbedringer i resultatene.

99 Grønås & Lystad, 1975. *A four layer balanced model operated at the Norwegian meteorological institute*, Tech. Rep. No. 23, DNMI, 1975. 65 sider.

100 Bjørheim, K., 1979. Tech. Rep., No. 40, DNMI, 44 sider.

101 Grønås, S., 1976. Tech. Rep., No. 40, DNMI, 44 sider.

102 Lystad, M., 1977. *A general balanced model for numerical weather prediction. Beitr. Phys. Atmos.*, 50, 41–54.

Det er interessant hvordan Økland vurderer prognosen på basis av ett enkelt tilfelle. Dette var et tilfelle der «vår» modell viste bedre resultater for et spesifikt stormsystem enn andre modellresultater som var tilgjengelig ved DNMI ved dette tilfellet. Han skriver:

It so happened that none of the other numerical prognoses we had access to ... had developed this low with comparable accuracy, although some of these prognoses were made by more sophisticated models and bigger computers. There can be little doubt that the success was caused more by an accurate initial analysis than by any special virtue of the model itself.

Økland vektlegger altså kvaliteten på startdataene for prognosen, siden modeller som skulle være bedre, ikke ga bedre resultat. At det kunne være slik at «vår» modell rent tilfeldig ga bedre resultat, ser det ikke ut til at han vurderte. Slike tilfeldigheter for enkelt-realiseringer kan oppstå som følge av redusert prediktabilitet. I konklusjonen gir han også uttrykk for synspunkter som i retrospekt kan tolkes i lys av Norges holdning til medlemskap i ECMWF:

For instance, one may visualize a mammoth computer tied directly to a network of automatic observing stations through a sophisticated telecommunication system, and the output from the computer coming into the national services in vast amounts. However, in the national centres expert meteorologists will be needed to explain the implications of these results to the public. To train such experts in sufficient numbers may prove to be a formidable task. A country which has a staff of meteorologists already trained through the use of a computer of their own will have a great advantage.

Man skal selvsagt være forsiktig med å tolke slike utsagn i lys av situasjonen nå 50 år etterpå, men det er ikke urimelig å ane en betydelig skepsis til å inngå i et samarbeid av den type som ECMWF tegnet til å kunne bli den gang.

Forskningen i dynamisk meteorologi og numeriske metoder ved UiO på 1970-tallet var ikke like aktiv som de to foregående tiårene. Oddvar Hellevik og Arne Bratseth var vitenskapelige assistenter, én av dem finansiert av NAVF (Norges allmennvitenskapelige forskningsråd) som bidrag til GARP. De eksperimenterte med isentropflater i modellene under veiledning

av Eliassen. At Bratseth var et stort forskertalent skulle særlig vise seg på 80- og 90-tallet. Hellevik gikk over til forskningsavdelingen ved DNMI da en ny NWP-modell basert på primitive ligninger ble planlagt utviklet (NorLAM). Cyber-maskinen ved RBK på Kjeller var hovedsakelig den regnemaskinen som ble benyttet.

Den ganske aktive reisevirksomheten med lengre forskningsopphold ved institutter i USA var så godt som slutt på 1970-tallet, iallfall for yngre forskere. Dog var det stadig besøk av gjesteforelesere på Institutt for geofysikk (Mel Shapiro, Ron Smith, Ed Lorenz og noen av kortere varighet). Ingen doktorgrader på tema med NWP-relevans eller dynamisk meteorologi ble avlagt ved instituttet mellom Økland (1973) og Iversen og Nordeng (1981) og Bratseth (1987).

Om Nordengs og Iversens dr-avhandling. Av opplagte grunner tillater jeg meg å diskutere denne avhandlingen litt nærmere, inklusive en (selv)kritisk kommentar om valg av tema. Med Kaare Pedersen som veileder arbeidet Nordeng og Iversen (jeg) sammen om å utvikle og eksperimentere med et hierarki av balanserte modeller med lignende diskretisering som ble brukt i den operasjonelle modellen til Grønås og Lystad ved Meteorologisk institutt. I september 1981 disputerte vi til dr.scient-graden. Selve avhandlingen¹⁰³ er dårlig strukturert, men de viktigste vitenskapelige bidragene kan leses i de tre publikasjonene som refereres nedenfor.

De to mest avanserte av de fem balanserte modellene var utvidelser av den Jule Charney foreslo på symposiet i Tokyo i 1960.¹⁰⁴ Meteorologisk støy filtreres med minst mulig endring av ligningene ut over dette ved å kreve enten at de romlig lokale eller at de materielt individuelle variasjoner av den horisontale divergens er null i divergensligningen. Når alle andre ledd beholdes, avledes en generalisert balanseligning som er en relasjon mellom massefeltet (trykk og temperatur) og det horisontale vindfeltet. Sammen med de andre ligningene gir dette et system av ulineært koblede differensialligninger. Fra dette systemet beregnes tredimensjonale vindfelt og tids-tendensen for virvling og temperatur ved å simultant løse balanseligningen,

103 Iversen, T. & Nordeng, T.E., 1981. *On the use of filtered models in Numerical weather prediction.* Thesis, Dr.Scient. The Faculty of Mathematics and Natural Science, University of Oslo, Norway.

104 Charney, J.G., 1962. Integration of the primitive and balance equations. *Proc. Symp. Numerical Weather Prediction*, Tokyo, 131–152.

virvlingsligningen, den termodynamiske energiligning og omegaligningen under gitte grenseflatebetingelser på bakken, ved atmosfærens yttergrense og ved de åpne begrensningene av beregningsområdet.

Løsningen ved hvert tidskritt beregnes ved en iterasjon som kan konvergere dersom de foreløpige løsningene ved hver iterasjon gjør at lignings-systemet er elliptisk. Dette oppnås når den potensielle virvling har samme fortegn som coriolisparameteren i alle punkter. Problemet er at i den virkelige atmosfæren brytes denne betingelsen fra tid til annen, for eksempel på den antisyklonale siden av sterke jetstrømmer i den øvre delen av troposfæren og ved skarpe fronter med sterk baroklinitet i de nederste få kilometerne over bakken. Dersom modellens maskevidde i gitternettet er 100 km eller mindre og skydannelse og nedbør inkluderes i beregningene, vil skarpe fronter med regnbånd opptre hyppig. Dersom man skulle ønske å bruke vår type balanserte modeller til operasjonell NWP måtte det utvikles nye løsningsmetoder som ikke bryter sammen under slike forhold. Disse begrensningene ble diskutert sammen med presentasjon av resultater i hovedartikkelen.¹⁰⁵

De balanserte modellenes evne til å undertrykke meteorologisk støy når de initialiserer modeller basert på primitive ligninger, ble også studert. To modeller basert på de primitive ligningene ble programmert, én med standard bruk av kartesiske vindkomponenter og én med samme vindbeskrivelse og numerisk diskretisering som i de balanserte modellene. Slik ble det demonstrert hvor viktig det er at modellen med primitive ligninger avviker minst mulig fra modellen som initialiserer.¹⁰⁶

Det kanskje mest oppsiktsvekkende resultatet var et tilnærmet stringent bevis for numerisk løsning av den kvadratiske balanseligningen,¹⁰⁷ med metoden foreslått av Eliassen, Grammelvedt og Bremnes i rapporten fra 1964. Resultatet ble kommentert av Jan Paegle i 1985.¹⁰⁸

105 Iversen, T. & Nordeng, T.E., 1984. A Hierarchy of Nonlinear Filtered Models-Numerical Solutions. *Mon. Wea. Rev.*, 112, 2048–2059.

106 Iversen, T. & Nordeng, T.E., 1984. Static initialization of primitive equation models on a bounded, extratropical region. *Tellus*, 36A, 21–29.

107 Iversen, T. & Nordeng, T.E., 1982. A convergent method for solving the balance equation. *Mon. Wea. Rev.*, 110, 1347–1353.

108 Paegle, J., 1985. Reply. *Mon. Wea. Rev.*, 113, 695.

Iversen and Nordeng (1982) and Bijlsma and Hoogendoorn (1983) have separately developed convergence proofs that explain most of the experimental results based on the Shuman (1957) and Miyakoda (1956) approach. As the authors state, both analyses contain simplifications that obviate completely general convergence conclusions, and I see no clear resolution of the difficulties beyond the analysis given on page 1350 of Iversen and Nordeng (1982).

Ved disputasen var Hilding Sundqvist, MISU (Meteorologiska institutet, Stockholms universitet), opponent. Hans første spørsmål var hvorfor vi hadde valgt å studere balanserte modeller istedenfor modeller basert på primitive ligninger. Dette spørsmålet var høyst betimelig og loddet dypere enn jeg hadde innsikt nok til å fatte på disputasen. Som veileder var K. Pedersen positiv og oppmuntrende, og Nordeng og jeg lærte mye dynamisk meteorologi, numerisk matematikk og programmering av arbeidet med avhandlingen. Det var også en håndfull studenter som etter hvert tok hovedfagsoppgaver basert på de balanserte modellene med støtteveiledning av oss.

Som rent nysgjerrighetsdrevet forskning med bidrag til utdanning hadde dette arbeidet en plass. Vi innså imidlertid snart etter disputasen at potensialet for operasjonell NWP var forsvinnende lite. Snarere representerte arbeidene en sluttstrek for NWP-æraen med balanserte modeller utover teoretiske studier i dynamisk meteorologi. Ved slutten av 1970-årene hadde utvikling av semi-implisitt integrasjon og nye metoder for å initialisere, aktualisert bruken av de primitive ligningene til NWP. Ressurskrevende invertering av koblede elliptiske ligninger trengs da ikke, og fysiske prosesser og eksplisitt beregning av værparametere kan inkluderes vesentlig enklere.

Hvis Norge hadde vært medlem av ECMWF den gangen, hadde dette kunnet åpne for nye og mer relevante perspektiver i doktorprosjektet. I så fall ville dette ganske sikkert økt interessen for våre resultater med vesentlig mer internasjonal kontakt som resultat.

2.5.4 1980-tallet: NorLAM – Norwegian Limited Area Model

Rundt årsskiftet 1982/83 ble en vektormaskin (Floating Point System, FPS 164) installert ved DNMI, med en IBM som frontmaskin (IBM 4341/10, senere oppgradert til 9370) for administrasjon av data til og fra FPS. Disse maskinene erstattet Nordic-anlegget, og gjorde det mulig å planlegge å utvikle en helt ny modell for operasjonell NWP basert på de primitive ligninger. Et prosjekt for dette ble planlagt ved Meteorologisk institutt med faglig støtte fra Institutt for geofysikk ved UiO.

På starten av 1980-tallet, i tiden mellom NORDIC og FPS/IBM-anleggene, var DNMI uten egen produksjon av operasjonell NWP. Dette utgjorde ingen umiddelbar krise for den daglige værvarslingen, siden instituttet hadde tilgang på numeriske produkter fra flere internasjonale sentre, og rutinene for vakthavende meteorolog var fremdeles slik at numeriske produkter var én av flere kilder til den manuelle utarbeidelse av varsler. Forsknings- og utviklingsarbeid og eksperimenter var heller ikke stoppet opp fordi slikt kunne gjøres, og ble også gjort, på maskinen Cyber-74 ved Regneanlegget Blindern-Kjeller (RBK).

For anvendelser som trengte numeriske meteorologiske analyser eller prognoser på digital form som input til nedstrøms modellering og aktiviteter, var imidlertid dette svært uheldig. DNMI kunne ikke ha en slik situasjon veldig lenge uten å miste renommé og troverdighet som faglig samarbeidspartner innen forskning og utvikling, eller som leverandør av kvantitativ meteorologisk informasjon til samfunnet. Én slik viktig aktivitet var det europeiske programmet for beregning og vurdering av grenseoverskridende luftforurensninger i Europa (EMEP). DNMI hadde som oppgave å være det vestlige meteorologiske senteret (MSC-West) for beregning av slike forurensninger. Det ble derfor inngått avtale om at dette prosjektet skulle delfinansiere det nye regneanlegget. Prosjektet lønnet for en periode også en forskerstilling som skulle være med på å utvikle modellen, slik ble det sikret at relevante meteorologiske data til bruk for EMEPs beregninger ble tatt ut fra NorLAM.

En viktig grunn til at man valgte å satse på en egen ny modell – *NorLAM* – var innovative metoder i numerisk diskretisering, dataassimilasjon og initialisering utviklet av Arne M. Bratseth i en tiårsperiode fra andre halvdel av 1970-tallet, da han var vitenskapelig assistent ved UiO, til han avla den filo-

sofiske doktorgrad (dr.philos.¹⁰⁹) i 1987. Han ble utnevnt i statsråd til professor i 1989¹¹⁰ i stillingen etter Arnt Eliassen og Hans Økland.

Det aller meste av Bratseths innovasjoner var inspirert av metoder som Eliassen og Fjørtoft hadde foreslått på 1950-tallet. Han videreutviklet Eliassen-gitteret – foreslått i 1956 – på en måte som bevarte den høye nøyaktigheten i den horisontale diskretiseringen samtidig som han unngikk den tids-alternerende romlige forskyvningen av vindkomponentene og massefeltet. Metoden ble rapportert i en instituttrapport fra Institutt for geofysikk (UiO) i 1978,¹¹¹ men tidsskriftsartikkelen ble først publisert i 1983¹¹² på grunn av en forsinkelse etter en inkurie hos tidsskriftets redaksjon.

I en rapport fra 1981¹¹³ foreslo han en effektiv måte å kontrollere meteorologisk støy på gjennom dynamisk initialisering av de primitive ligningene. Det er historisk interessant at han foreslo å bruke suksessiv glatting til å skille moder med ulik horisontal utstrekning. Dette var inspirert av Fjørtofts grafiske metode fra 1952 som også Økland hadde benyttet da han laget DNMI's første operasjonelle NWP i 1963. For å skille støyen fra de meteorologisk interessante bevegelsene, splittet han ligningenes tilpasningsledd (som gir opphav til tyngde-treghetsbølger og Lamb-bølger) fra adveksjonsleddene, og kunne dermed dempe amplitudene til støykomponenter med minimal påvirkning av meteorologiske komponenter.¹¹⁴

Endelig utviklet Bratseth en ganske genial metode for objektiv analyse basert på suksessive korreksjoner, men der vektlegging av observasjoner og modellens første estimat velges slik at løsningen konvergerer mot det samme

109 Bratseth, A.M., 1987. *Some new methods related to numerical weather prediction*. Thesis, Dr. Philos, Institute of Geophysics, University of Oslo.

110 Professoratet var stillingen som ble ledig da Økland ble emeritus, og var stillingen Eliassen hadde fra 1958 til 1982 da han ble seniorstipendiat (NAVF).

111 Bratseth, A.M., 1978. *A class of efficient finite difference schemes for the primitive equations*. Inst. Rep. Series, No. 37. Institute of Geophysics, University of Oslo.

112 Bratseth, A.M., 1983. Some economical, explicit finite-difference schemes for the primitive equations. *Mon. Wea. Rev.*, 111, 663–668.

113 Bratseth, A.M., 1981. *A new approach to the initialization of primitive equation models*. Inst. Rep. Series, No. 44. Institute of Geophysics, University of Oslo.

114 Bratseth, A.M., 1982. A simple and efficient approach to the initialization of weather prediction models. *Tellus*, 34, 352–357, og: Bratseth, A.M., 1989. Efficient dynamical initialization of a limited area model. *Tellus*, 41A, 18–31.

resultatet som statistisk optimal interpolasjon som var foreslått av Eliassen i 1954,¹¹⁵ men med en vesentlig enklere prosedyre.

2.5.5 Pionertid for NWP ved DNMI

Med NorLAM gikk NWP-aktivitetene ved DNMI inn i en lang periode som fortjener betegnelsen «glansperiode» med tydelig pionerånd. Uten tvil la dette grunnlaget for mye av aktivitetene og utvikling av kompetanse basert på numeriske modeller i en ekspanderende forskningsavdeling og mange år senere også i Senter for utvikling av værtjenesten (SUV) helt fram til i dag (2022).

På tross av at de nye metodene i all hovedsak var Bratseths, var Sigbjørn Grønås den som i store deler av NorLAMs utvikling utrettelig ledet prosjektet og sørget for framdrift og oppdateringer gjennom flere faser som moderne operasjonell rutine for NWP, inntil han ble professor ved Geofysisk institutt ved UiB i 1990.¹¹⁶ Han hadde i en lengre periode i andre halvdel av 1970-tallet uttrykt betydelig frustrasjon over manglende prioritering av nyutvikling av NWP ved DNMI. Han arbeidet selvsagt ikke alene med prosjektet. Oddvar Hellevik ble først ansatt ved DNMI's forskningsavdeling med støtte fra EMEP etter to perioder som vitenskapelig assistent for Eliassen på GARP-prosjektet (NAVF). Thor Erik Nordeng overtok hans stilling i mai 1982 da han kom fra en vitenskapelig assistent stilling ved UiO et drøyt halvår etter doktorgraden.

Bratseth var ansatt samme sted i snaut to år fra 1981 til 1982/83 da han dels utviklet de nye metodene for NorLAM og dels programmerte modellversjonen som ble grunnlaget for operasjonell produksjon. Han fortsatte arbeidet med NorLAM-metodene da han returnerte til UiO som førsteamanuensis i 1983 i stillingen som ble ledig da Økland ble professor. Som en kuriositet kan nevnes at en egen datakabel ble montert fra FPS/IBM-anlegget ved DNMI gjennom lange kjellerkorridorer ved UiO til Bratseths kontor på Institutt for geofysikk, UiO. Det fantes den gang ikke noe raskt fungerende internett slik vi er vant med i våre dager (2022).

115 Bratseth, A.M., 1986. Statistical interpolation by means of successive corrections. *Tellus*, 38A, 439–447.

116 I stillingen etter Hilding Sundqvist som ble ledig da han ble professor ved MISU ved Stockholms universitet.

I påvente av at det nye regneanlegget skulle bli installert ved DNMI, startet NorLAM-utviklingen på Cyber-74 maskinen ved RBK. Sammen med Hellevik programmerte Grønås den første modellversjonen i 1982.¹¹⁷ Eksperimenter ble gjort på noen utvalgte tilfeller i et stort område på den atlantisk-europeiske sektor av den nordlige halvkule med 300 km gitteravstand og på et mindre område nestet inn med 150 km gitteravstand. Bratseth programmerte like etter modellen på nytt. Den koden var meget effektiv og oversiktlig og ble altså senere brukt til operasjonell produksjon på FPS/IBM-anlegget.

De fysiske prosessene i denne første versjonen var svært forenklet. Thor Erik Nordeng ble hovedansvarlig for å utvikle det som på den tiden ble ansett å være en fullstendig beskrivelse av fysiske prosesser i NWP-modeller for stor mesoskala.¹¹⁸ Trond Iversen bisto på deler av dette arbeidet. Fysikken omfattet effekter av småskala turbulens i atmosfærens grenselag mot bakken, grunn og dyp konveksjon, skyfysikk og nedbør, og kort- og langbølget stråling. Nordeng utviklet også en sub-modell for beregning av varmeledning og fuktighet i jordbunnen på land.

Nordeng utviklet teori for og implementerte fysiske prosesser som ikke hadde vært representert i NWP-modeller tidligere. En av disse var en parameterisering av «slantwise convection» som forklarer at nedbørsbånd kan oppstå på grunn av symmetrisk ustabilitet som fører til parallelle omveltninger langs skarpe fronter med sterke temperaturkontraster, eller ved kraftig antisyklonal skjær-virvling langs kraftige jetstrømmer¹¹⁹. Han generaliserte også senere den klassiske Charnocks formel for beregning av ruhet over vindsjø til havs¹²⁰ som påvirker hvor effektivt vind bremses av friksjon over åpne vannflater. Videre brukte han modellen til en rekke spesialiserte studier av fysisk-dynamiske prosesser i atmosfæren. Spesielt kan nevnes simulering av polare lavtrykk i det store prosjektet ved DNMI under ledelse av Magne Lystad.¹²¹

117 Grønås, S. & Hellevik, O.E., 1982. *A limited area prediction model at the Norwegian meteorological institute*. Tech. Rep., No. 61, DNMI, Oslo. 75 sider.

118 Nordeng, T.E., 1986. *Parameterization of physical processes in a three-dimensional numerical weather prediction model*. Tech. Rep. No. 65, DNMI, Oslo.

119 Nordeng, T.E., 1987. The effect of vertical and slantwise convection on the simulation of polar lows. *Tellus*, 39A, 354–375.

120 Nordeng, T.E., 1991. On the wave age dependent drag coefficient and roughness length at sea. *J. Geophys. Res., Oceans*, 96, 7167–7174.

121 Lystad, M., 1986. *Polar lows in the Norwegian, Green/and and Barents Sea. Final report of the Polar Lows Project*. The Norwegian Meteorological Institute, Oslo.

Nordengs bidrag ble lagt merke til utenfor landets grenser, og han ble invitert til forskningsopphold ved Météo-France (den gang i Paris), NCAR i Boulder, USA, og til ECMWF etter at Norge ble medlem. Han ble også invitert til MIT i Boston, USA, for et gjesteforedrag fordi Kerry Emanuel hadde spesiell interesse for «slantwise convection». Da første versjon av NorLAM ble klar til å kjøres operasjonelt, etterkjørte Nordeng modellen med 150 km maskevidde og 10 nivåer vertikalt for å generere data for hele året 1985 til bruk i modellene for transport av luftforurensninger i Europa for EMEP.

Trond Iversen var ansatt på NILU, men ble av direktør Brynjulf Ottar fristilt inntil to dager per uke over en periode fra 1983 til 1986 da han ble ansatt ved DNMI's forskningsavdeling lønnet på EMEP. Formålet fra NILU's side var å utvikle en versjon av NorLAM som kunne brukes til å generere meteorologiske data for spredningsberegninger av luftforurensninger på byskala og i komplekst terreng i Norge. Beregninger av vind og turbulens ble bl.a. brukt i basisundersøkelsen i Bergen (finansiert av Statens forurensningstilsyn, SFT) basert på en modellversjon med 1 km gitteravstand nestet inn i et gitter med 10 km avstand.¹²² Dette arbeidet ble, som ovenfor nevnt, gjort i samarbeid med Nordeng som del av de fysiske parameteriseringene han utviklet og implementerte i den etter hvert operasjonelle versjonen av NorLAM.

Knut Helge Midtbø, som hadde vært statsmeteorolog i Tromsø og Bergen, ble ansatt ved forskningsavdelingen i januar 1984 med hovedansvar å få på plass objektiv analyse. Det ble først forsøkt å lage et system basert på Odd Haugs metoder fra 50-tallet, men i en utvidet multivariat versjon. Dette viste seg problematisk å realisere. I stedet ble det utviklet et system for analyse basert på Bratseths tilnærming til optimal interpolasjon via suksessive korreksjoner. I samarbeid med Grønås og jevnlig diskusjoner med Bratseth fikk Midtbø implementert dette systemet for operasjonell objektiv analyse for NorLAM.¹²³

122 Iversen, T. & Nordeng, T.E., 1987. *A numerical model suitable for the simulation of a broad class of circulation systems on the atmospheric mesoscale*. NILU TR 2/87, 66 sider. Norsk Institutt for luftforskning.

123 Grønås, S. & Midtbø, K.H., 1986. Four-dimensional data assimilation at The Norwegian Meteorological Institute. Technical Report No. 66. DNMI, Oslo, Norway – og Grønås, S. & Midtbø, K.H., 1987. Operational multivariate analyses by successive corrections. In: *Short- and medium-range Numerical Weather Prediction*. Collection of papers presented at the WMO/IUGG NWP Symposium, Tokyo, August 1986, 61–74.

Anstein Foss var involvert i å utvikle det meste av systemene som trengtes for effektiv kjøring av analysen og prognosemodellen på regneanlegget. Han programmerte også imponerende systemer for grafiske produkter og verifikasjon. Det kan nevnes at Lennart Bengtsson, som den gang var direktør ved ECMWF, besøkte DNMI i 1986 og fikk demonstrert de grafiske produktene til Foss. Han ble tydelig imponert og tok med seg inspirasjon til å få utviklet tilsvarende grafikk i global skala ved ECMWF. Siden har dette systemet blitt videreført av produktutviklere ved Meteorologisk institutts IT-divisjon under navnet DIANA. Rebecca Rudsar var, sammen med Foss, en nøkkelperson for å få på plass og drive det operasjonelle prognosesystemet som startet opp våren 1986, med alt det medfører av krav om regularitet og tidsfrister for produktleveranser.

Modellsystemet ble stadig utviklet etter hvert som tilgangen på regnekraft økte. Først ble modellen kjørt med 150 km gitteravstand og 10 nivåer vertikalt på et stort område på den nordlige halvkule og et lite område med 50 km oppløsning nestet inn i dette. Etter at DNMI fra 1987 fikk tilgang til det nasjonale anlegget CRAY X-MP/28 ved RUNIT¹²⁴ (Regnesenteret ved Universitetet i Trondheim), ble modellen oppgradert og kjørt med 50 km oppløsning og 18 nivåer vertikalt på stort område (LAM50s, «SuperLAM») og med 25 km i det indre området (LAM25s).¹²⁵ Anstein Foss gjorde det aller meste av jobben med å «porte» og vektorisere koden i henhold til effektiv utnyttelse av CRAY-maskinen.

Polare Lavtrykk. Som allerede nevnt ble modellsystemet et viktig verktøy for studier av potensielt farlige virvler i Barentshavet og Norskehavet. Dette ble hovedsakelig gjort etter det store norske prosjektet om polare lavtrykk ledet av Magne Lystad 1983–1985.¹²⁶ En rekke publikasjoner som

124 I 1992 ble regneanlegget i Trondheim oppgradert til en CRAY Y-MP/464, i 1995 til CRAY J90 og dernest CRAY T3E med 64 noder. X-MP-maskinen hadde en ytelse på 0.5 Gigaflops, mens T3E hadde snaut 40. En moderne smarttelefon har mange ganger denne ytelsen.

125 Grønås, S., 1990. Early results with the new Norwegian high resolution operational NWP models. HIRLAM Workshop on Mesoscale Modelling Copenhagen, Denmark 3–5 September 1990. HIRLAM Tech. Rep. No. 8, s. 127–136.

126 Lystad, M., 1986. *Polar lows in the Norwegian, Greenland and Barents Sea. Final report of the Polar Lows Project.* The Norwegian Meteorological Institute, Oslo – og Rasmussen, E.A. & Lystad, M., 1987. The Norwegian Polar Low Project: A summary of the International Conference on Polar Low. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 68, 801–816.

omfattet numerisk modellering av polare lavtrykk med ulike konfigurasjoner av NorLAM, kom ut i årene etter. Disse fikk betydelig internasjonal oppmerksomhet ikke minst takket være den faglige og tekniske «state-of-the-art»-statusen til NorLAM.¹²⁷

Universitet i Bergen. I 1986 ble Bergen Scientific Centre (BSC) opprettet i tilknytning til universitetet. UiB fikk dermed tilgang til en av den tidens aller kraftigste regnemaskiner (IBM 3090), og ikke lenge etter ble Hilding Sundqvist professor i meteorologi ved Geofysisk institutt, UiB. Sundqvist kom fra et lektorat ved MISU, Stockholm, der han blant annet hadde arbeidet med utvikling av et helt nytt skjema for parameterisering av skyer og nedbør i numeriske modeller. Sammenfallet i tid av DNMI's nyutviklede NorLAM, ansettelsen av Sundqvist ved UiB og opprettelsen av BSC med en superdatamaskin førte raskt til et meget fruktbart samarbeid. Sundqvist returnerte til MISU der han ble professor i 1989.

NorLAM ble tilrettelagt for IBM 3090-maskinen med hjelp av Foss, Grønås og Nordeng, og Sundqvist brukte modellen til å fortsette sine studier av skyfysikk og koblingen til dynamiske atmosfærefenomener. En rekke studenter fikk dermed sin hovedfags- og forskerutdannelse med NorLAM som et av verktøyene. Dette omfattet blant andre Jón Egill Kristjánsson, Erik Berge, Frode Flatøy og Nils Gunnar Kvamstø.¹²⁸

-
- 127 Grønås, S., Foss, A. & Lystad, M., 1987. Numerical simulations of polar lows in the Norwegian Sea. *Tellus*, 39A, 334–353 – og Midtbø, K.H., Grønås, S., Lystad, M. & Nordeng, T.E., 1989. Analyses of polar lows in the Norwegian Sea with a mesoscale limited area NWP system. In: *Polar/Arctic lows* (red. Paul Twitchell, Erik Rasmussen & Ken Davidson). A. Deepak Publishing – og Nordeng, T.E., 1990. A model-based diagnostic study of the development and maintenance mechanism of two polar lows. *Tellus*, 42A, 92–108 – og Nordeng, T.E. & Rasmussen, E.A., 1992. A most beautiful polar low. A case study of a polar low development in the Bear Island region. *Tellus*, 44A, 81–99.
- 128 Sundqvist, H., Berge, E. & Kristjánsson, J.E., 1989. Condensation and cloud parameterization studies with a mesoscale NWP model. *Mon. Wea. Rev.*, 117, 1641–1657 – og Kvamstø, N.G., 1993. An Investigation of the Cumulus Cloudiness Parameterization in Northerly flows in the Norwegian Sea. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 1434–1449.

2.6 Utvikling av europeisk samarbeid om LAM-NWP

Modeller for operasjonell numerisk værvarsling (NWP) på begrenset område (Limited Area Model, LAM) i Europa har siden slutten av 1980-tallet hovedsakelig vært utviklet i konsortier av samarbeidende nasjonale meteorologiske tjenester. HIRLAM¹²⁹ var det første av disse konsortiene, etablert i 1985 i Norden og senere utvidet med andre medlemmer.

Andre europeiske konsortier er per 2021: ALADIN¹³⁰ med Météo-France som faglig sentralt medlem hadde oppstart i 1991 og som er en del av modellsystemet IFS¹³¹; LACE¹³² har siden 1994 utgjort et konsortium av land i Sentral-Europa tilknyttet ALADIN; COSMO¹³³ ble grunnlagt mellom den tyske og sveitsiske værtjenesten i 1998, men utvidet i 1999; SEECOP¹³⁴ ble etablert i 2015 som det siste. UK MetOffice¹³⁵ er et selvstendig senter med samme status som et konsortium.

Siden januar 2021 har HIRLAM og ALADIN/LACE inngått et nytt samarbeid under navnet ACCORD¹³⁶ med til sammen 26 deltagerland. Dette samarbeidet startet med planer omkring 2005/2006 under navnet HARMONIE,¹³⁷ da HIRLAM gikk over fra å være en serie prosjekter å lengde tre år, til et program med fem års faser. En ikke ubetydelig forskjell i samarbeidskultur og de operasjonelle ambisjonene med modellsystemene har gjort at en fullstendig overgang til ett felles konsortium er satt til 2025. Derfor er HIRLAM, ALADIN og LACE ennå aktive i 2022, og antagelig fram til og med 2025. Kartet er en summarisk oversikt over konsortiene.

129 High Resolution Limited Area Model (<https://hirlam.org/>).

130 Aire Limitée Adaptation Dynamique Développement International (<http://www.umr-cnrm.fr/aladin/>).

131 IFS=Integrated Forecast System som utvikles i samarbeid med ECMWF.

132 RC LACE = Regional Co-operation for Limited Area modelling in Central Europe (rclace.eu).

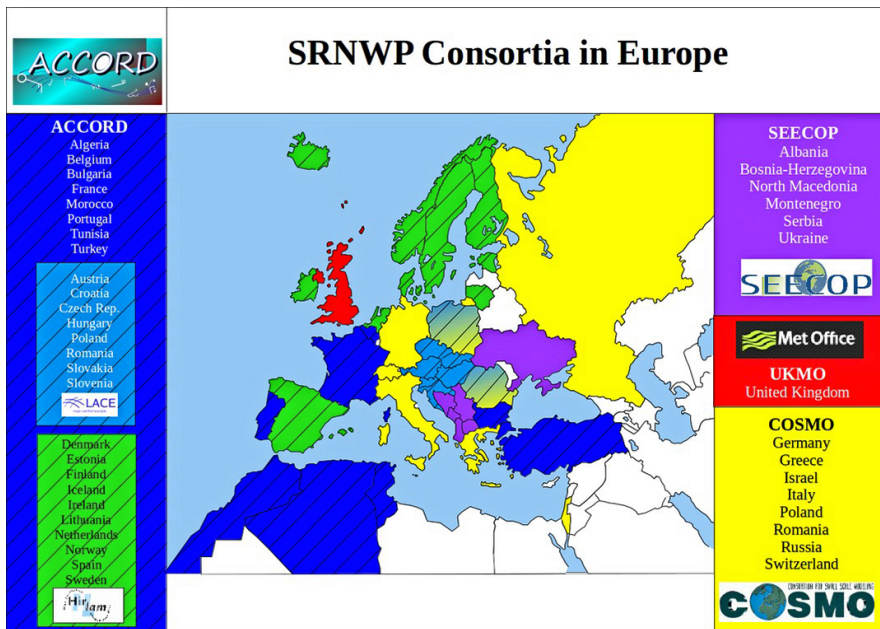
133 Consortium for Small-scale Modeling (<https://www.cosmo-model.org/>).

134 South-East European Consortium for Operational Weather Prediction (<http://seecop.meteo.co.me/>).

135 <https://www.metoffice.gov.uk/research/approach/modelling-systems/unified-model/weather-forecasting>

136 A Consortium for Convection-scale modelling Research and Development (<http://www.accord-nwp.org/>) Medlemmer: HIRLAM (Danmark, Estland, Finland, Island, Irland, Litauen, Nederland, Norge, Spania, Sverige); ALADIN (Algerie, Østerrike, Belgia, Bulgaria, Kroatia, Tsjekkia, Frankrike, Ungarn, Marokko, Polen, Portugal, Romania, Slovakia, Slovenia, Tunis, Tyrkia); LACE (Østerrike, Kroatia, Tsjekkia, Ungarn, Polen, Romania, Slovakia, Slovenia). http://www.umr-cnrm.fr/accord/IMG/pdf/matrix_accord.pdf

137 Hirlam-Aladin Research towards Meso-scale Operational NWP in Europe.



Figur 2.1 Oversikt over SRNWP-konsortier i 2021 (fra: <http://srnwp.met.hu/>)

EWGLAM, SRNWP og Eumetnet. I tillegg til de formelle konsortiene om utvikling av systemer for NWP LAM i Europa er det organisert faglig samarbeid mellom konsortiene og deres medlemslands meteorologiske tjenester. EWGLAM (European Working Group on Limited Area Modelling) startet med et møte ved SMHI i Norrköping 8.–11. oktober 1979, og var opprinnelig en løselig organisert faglig diskusjonsklubb med årlige møter lenge før noe formelt konsortium var påtenkt. Hensikten var å dele relevante vitenskapelige ideer, framskritt og praktiske erfaringer mellom forskere og operasjonelt ansvarlige på en åpen og uforpliktende måte. Det første EWGLAM-møtet arrangert av Meteorologisk institutt var i oktober 1984, nr. seks i rekken.

EWGLAM ble mer formalisert da SRNWP (Short-Range NWP) ble stiftet ved Météo-France i 1993. SRNWP er den viktigste formaliserte arena for kontakt mellom de ulike NWP-konsortiene i Europa. Det første møtet var ved SMHI i Norrköping sammen med det årlige EWGLAM-møtet i 1994. I 2000 ble SRNWP et koordinert program (C-SRNWP) under Eumetnet (European Network of Meteorological Services) med finansiering av et

lite sekretariat (Sveits, 2000–2006, og dernest Ungarn).¹³⁸ Land som ikke er med i Eumetnet, kan også delta i SRNWP siden noen av NWP-konsortiene inkluderer land utenfor Europa.

Gjennom formelle beslutninger i Eumetnet defineres fra tid til annen egne programmer med faglig og operasjonelt fokus under SRNWP. Slike skal støtte opp om medlemslandenes muligheter, slik som å kjøre NWP-modeller, utveksle data, bruke modelldata i værtjenesten og vurdere NWP-varslenes kvalitet på en konsistent måte. I slike tilfeller blir ett land valgt som faglig og administrativt ansvarlig for aktivitetene med en viss økonomisk støtte fra Eumetnet. Det kreves enstemmighet i Eumetnets råd (bestående av værtjenestens administrerende direktører) for å starte slike satsinger. Eksempler på slike programmer er ett om interoperabilitet og ett om verifikasjon (begge ledet av UK MetOffice) og utvikling av probabilitiske prognoser (ledet av det spanske meteorologiske institutt, AEMET).

Under SRNWP er det også organisert «Expert Teams» (ET) med to medlemmer fra hvert konsortium. Disse fokuserer på spesielle faglige spørsmål i tilknytning til NWP. For tiden (2022) er det åtte slike,¹³⁹ se tabellen.

Tabell 2.1 Ekspertgrupper innenfor C-SRNWP som er et koordinert program under European Network of Meteorological Services (Eumetnet).

C-SRNWP «Expert Teams» (2022)
Dataassimilasjon
Dynamikk og kobling ved laterale render
Tilknytning til anvendelser
Fysisk parameterisering (prosesser i luft)
Prediktabilitet og ensemble-prognoser (EPS)
Bakken og prosesser i jorda (modell og dataassimilasjon)
System-aspekter
Verifikasjon

138 Sekretariatet for C-SRNWP har web-side: <http://srnwp.met.hu/>

139 http://srnwp.met.hu/Expert_teams/composition.html

2.6.1 HIRLAM – Det nordiske samarbeidet om en «High Resolution Limited Area Model»

I 1982 ble det nedsatt en nordisk arbeidsgruppe for å utrede mulighetene for et faglig samarbeid mellom de statlige meteorologiske instituttene med formål å utvikle en felles nordisk atmosfæremodell for numerisk værvarsling med høy oppløsning: High Resolution Limited Area Model (HIRLAM).¹⁴⁰ Initiativet til dette var trolig svensk.¹⁴¹ Suksessen med det europeiske samarbeidet om ECMWF – der Norge ikke var med på det tidspunktet – var en motivasjon i tillegg til de rent faglige problemstillingene.

I 1982 hadde ECMWF daglig beregnet globale prognoser fram til og med ti døgn i over to år (siden 1. august 1979) med produkter fram til døgn sju distribuert til brukere. Vakthavende meteorolog hadde også tilgjengelig globale prognoser over flere døgn fra UK MetOffice, NMC (USA, senere National Center for Environmental Prediction, NCEP) og noen få andre sentre. Den horisontale maskevidden i de globale modellene var typisk 200–400 km med 10–20 nivåer vertikalt, som er altfor grovt til å kunne oppløse geografiske detaljer i Skandinavia eller fysiske prosesser i spesifikke værsystemer i regionen.

HIRLAM-samarbeidet var først organisert i seks prosjekter av varighet tre år som fulgte etter hverandre (HIRLAM-1 til HIRLAM-6). De var finansiert gjennom personell fra de deltagende instituttene stilt til rådighet i prosjektet og hadde i tillegg finansiell støtte fra Nordisk ministerråd (NMR). Samarbeidet fortsatte som femårige programmer, HIRLAM-A (2006–2010), HIRLAM-B (2010–2015) og HIRLAM-C (2016–2020). HIRLAM-C er siden utvidet til 2025 parallelt med at ACCORD er igangsatt, for å sikre at HIRLAM-landenes NWP-tjenester får en sømløs overgang når ACCORD overtar som felles konsortium.

I det følgende beskrives viktige utviklinger i HIRLAM siden starten omtrent fram til dagens situasjon (høst 2022). Dette er ingen fullstendig

140 Arbeidsgruppen besto av ledere for de avdelinger som hadde ansvar for forskning og utvikling knyttet til NWP ved de nordiske meteorologiske instituttene. Fra Norge deltok Anton Eliassen, som da var daglig leder for forskningsavdelingen ved DNMI. Det har p.t. ikke latt seg gjøre å finne dokumentasjon fra drøftingene.

141 Dette er ikke dokumentert formelt, men formuleringer i et foredrag av Per Undén ved SMHI i forbindelse med HIRLAMs 20-årsjubileum antyder at SMHIs Svante Bodin og Per Undén var sentrale da diskusjonene startet. Se lysark nr. 8 i: <https://www.slideshare.net/punden/hirlam20>

beskrivelse, og det er helt sikkert noe som kan savnes, dels fordi forfatteren i lange perioder har vært perifer ift. HIRLAM, og dels fordi viktig dokumentasjon mangler. Særlig i perioden etter 2000 har jeg valgt å vektlegge viktige bidrag fra norske forskere og utviklere.

HIRLAM 1; 1985–88: Bennert Machenhauer, DMI. Den offisielle starten på HIRLAM ble 1. september 1985.¹⁴² Dette første HIRLAM-prosjektet var finansiert av deltagerlandene med økonomisk støtte fra Nordisk ministerråd, og var et FoU-prosjekt over tre år. Prosjektlederen Bennert Machenhauer fra DMI startet allerede i februar 1985. Prosjektet var en kombinasjon av et senter ved DMI i København og forskere som arbeidet ved sitt eget institutt i hvert av deltagerlandene. At man fikk på plass en samlet prosjektgruppe, ble regnet som nødvendig for å sikre et fruktbart samarbeid, og HIRLAM 1 ble en suksess som la grunnlaget for den videre utviklingen de neste tiårene, og samarbeidet er i høyeste grad aktivt per dags dato (2022).

I tillegg til prosjektlederen besto den sentrale gruppen ved HIRLAM-senteret fra starten av Jan Erik Haugen (Meteorologisk institutt, DNMI), Niels Woetmann Nielsen, Bent Hansen Sass (DMI), Simo Järvenoja (FMI) og Nils Gustafsson som alternerte med Per Kållberg (SMHI). Ved hjemmeinstituttene arbeidet Thor Erik Nordeng (DNMI), Kalle Eerola og Rauno Nieminen (FMI), samt Per Kållberg alternerende med Nils Gustafsson (SMHI). Island var kun assosiert medlem de første årene, mens det nederlandske meteorologiske institutt (KNMI) var observatører og ble fullt medlem det siste året av HIRLAM 1. Da KNMI kom med, ble den sentrale prosjektgruppen styrket med Bronno de Haan, og med Gerard Cats og Leo M. Hafkenscheid ved hjemmeinstituttet. Totalt var 15–20 forskere knyttet til samarbeidet under HIRLAM 1.

Prosjektet ble formelt styrt av et råd (Council) bestående av direktørene ved de meteorologiske instituttene i deltagerlandene. I tillegg ble det etablert en teknisk og vitenskapelig komité (TSC) som faglig mellomledd mellom prosjektlederen og Council, som under HIRLAM 1 besto av Anton Eliassen / Sigbjørn Grønås (DNMI), Lars Moen (SMHI), Juhanni Rinne (universitetet i Helsinki) og Erik Busch / Anne Mette Jørgensen (DMI). KNMI var repre-

142 Machenhauer, B. (red.), 1988. *Hirlam final report*. Hirlam Technical Report No. 5. <http://hirlam.org/index.php/publications-54/hirlam-technical-reports-a>.

sentert med A.P.M. Baede som observatør. Det ble også etablert en egen arbeidsgruppe som hadde til oppgave å undersøke mulighetene for operasjonell NWP med HIRLAM-modellen.

Formålet med HIRLAM 1 var nedfelt i de følgende fire punktene:

- (i) to develop an operational system for short range forecasting based on a high resolution model and a system for analysis and data assimilation,
- (ii) to prepare all aspects of the operational utilization of such a system at the Nordic weather services including the need for initial data,
- (iii) to carry out the necessary research and development in order to reach the objectives mentioned above,
- (iv) to develop the complete software in such a way that it can be implemented at the Nordic meteorological institutes.

Disse delmålene var ambisiøse for et prosjekt over tre år. Det kan diskuteres i hvilken grad (ii) og (iv) var gjennomført til fulle da prosjektet var ferdig i august 1988. Delmål (i) og (iii) var alene ambisiøse nok, og var i seg selv nok til å sikre at HIRLAM 1 ble en suksess som ble fulgt opp med HIRLAM 2 for 1989–1991.

En viktig årsak til suksessen var at flere forskere i de nordiske landene var høyt kompetente innen NWP og hadde god erfaring med relevante modellverktøy. I løpet av det første året ble det gjort praktiske eksperimenter («baseline experiments») med noen av disse modellene.¹⁴³ Den norske NorLAM ble anvendt i disse eksperimentene med 150 km maskevidde på et stort geografisk område, mens versjonen med 50 km maskevidde kun ble anvendt på et lite område. Imidlertid fungerte eksperimenter med en dansk-svensk versjon av ECMWFs modell, utviklet og tilpasset for et begrenset område av Per Undén ved SMHI, bedre. Riktignok hadde den modellen mye enklere beskrivelse av fysiske prosesser enn i NorLAM (og i den opprinnelige

143 Gustafsson, N., Järvenoja, S., Källberg, P. & Woetmann Nielsen, N., 1986. *Baseline experiments with a high resolution limited area model*. HIRLAM T. R. No. 1.

Nordeng, T.E. & Foss, A., 1987. *Simulation of storms within the HIRLAM Baseline experiment with the Norwegian mesoscale limited area model system*. HIRLAM T. R. No. 2.

Gustafsson, N. & Järvenoja, S., 1987. *Sensitivity tests with the limited area version of the ECMWF analysis scheme*. HIRLAM T. R. No. 3.

ECMWF-modellen),¹⁴⁴ men dekket et vesentlig større geografisk område enn NorLAM og med en halv grads (ca. 55 km) oppløsning, slik at man fikk studert effekter av modellens egne startbetingelser over en lengre periode før de mer storskala dataene som ble foreskrevet ved de åpne rendene, begynte å dominere løsningen. Slik fikk prosjektgruppen relevant praktisk erfaring og teoretisk forståelse som kom til nytte da den første modellen – «HIRLAM Level 1» – ble utviklet i andre del av prosjektet.

Dette egenutviklede systemet brukte endelige differanser representert i et nett av gitterpunkter, inkluderte dataassimilasjon av observasjoner for objektive analyser basert på statistisk interpolasjon (re. Eliassens metode¹⁴⁵), kontroll av «meteorologisk støy» gjennom ulineær filtrering av normale moder, og behandling av data fra globale modeller ved de åpne rendene. Modellens fysiske prosesser var avanserte etter den tidens standard, og inkluderte stratiform (storskala) og konvektiv (småskala) nedbør, effekter av turbulens, kortbølget solstråling og langbølget jordstråling, samt utveksling av energi, bevegelsesmengde (friksjon) og fuktighet med bakken. Systemet inkluderte også verktøy for pre- og postprosessering av data, og var således et fullstendig system for NWP på et begrenset beregningsområde. Det var dimensjonert til å kunne kjøres opp til to døgn fram i tid med minste maskevidde på 0,5 grader, forutsatt at observasjoner og data ved de åpne rendene var tilgjengelig i sann tid.

Da HIRLAM 1-prosjektet var ferdig i august 1988, var systemet ikke tatt operasjonelt i bruk ved noen av de deltagende meteorologiske instituttene. Det var det finske FMI som i januar 1990 først tok det i bruk operasjonelt, mens det danske DMI fulgte opp et år etter i januar 1991.¹⁴⁶ Objektive og subjektive verifikasjoner av de operasjonelle systemene indikerte at systemets kvalitet kunne sammenlignes med dem fra større europeiske sentre.

HIRLAM 2; 1989–91: Nils Gustafsson, SMHI. Andre fase av HIRLAM startet i januar 1989, fem måneder etter avslutningen av første fase. Fortset-

144 Undén, P., 1982. *The Swedish Limited Area Model*. RMK35. SMHI, Norrköping, Sweden.

145 Eliassen, A., 1954. *Provisional report on calculation of spatial covariance and autocorrelation of the pressure field*, Rep. 5, Norwegian Academy of Sciences, Institute of Weather and Climate Research, Oslo, Norway, 12 pp.

146 Gustafsson, N., 1993. *HIRLAM 2 Final Report*. HIRLAM T.R. No. 9. March 1993, Norrköping, Sweden. 126 pp.

telsen av HIRLAM ble gjennomført desentralisert, dvs. uten et felles senter. Prosjektlederen for HIRLAM 2 var Nils Gustafsson ved SMHI. Nederland var fullt med i prosjektet fra og med det siste året av HIRLAM 1, og i april 1989 ble også Irland med. Direktørene utgjorde det øverste styrende organet for HIRLAM 2 (Council) med åtte eksperter i en teknisk-vitenskapelig komité (TSC). Dette systemet er siden blitt brukt i styringen av samarbeidet i HIRLAM, men der TSC nå kalles HAC (HIRLAM Advisory Committee).

Formålet med HIRLAM 2 ble nedfelt i et «MoU» (Memorandum of Understanding) signert av de deltagende institutters direktører.¹⁴⁷ Prosjektgruppen var en ekspertgruppe som de deltagende institutter kunne konsultere når operasjonell produksjon med HIRLAM-systemer skulle implementeres og brukes. Forskning og utvikling omfattet videre utvikling av «HIRLAM Level 1» med maskevidde 30–50 km med vekt på forbedret dataassimilasjon og kostnadseffektive numeriske metoder og parameterisering av fysiske prosesser. Videre skulle det utvikles en testversjon med finere oppløsning (10–30 km maskevidde), med vekt på å estimere nytten i forhold til kostnadene og mulighetene for å gjøre bruk av nye fjernmålte observasjoner som var planlagt.

I tillegg til prosjektlederen ble Gerard Cats fra nederlandske KNMI engasjert som systemansvarlig. Andre bidrag var «in kind» fra medlemslandene, og omfattet 36 forskere, hvorav tre ved universiteter. Fra DNMI bidro Thor Erik Nordeng, Lars Anders Breivik, Jan Erik Haugen, Jón Egill Kristjánsson og Mariken Homleid. Særlig Haugens bidrag til utviklingen av kjernen i den numeriske modellkoden var viktig for HIRLAM gjennom flere faser.¹⁴⁸ Han avla doktorgrad i 1992 på en avhandling basert på sitt arbeid med numeriske metoder og initialisering. Kristjánsson bidro med et nytt skjema for parameterisering av skyer og nedbør.

HIRLAM 3; 1992–96: Erland Källén, MISU. Tredje fase av HIRLAM ble ledet av professor Erland Källén fra universitetet i Stockholm. Det er

147 Gustafsson, N., 1993. HIRLAM 2 Final Report. HIRLAM T.R. No. 9. March 1993, Norrköping, Sweden. 126 pp.

148 Haugen, J.-E. & Machenhauer, B., 1993. A Spectral Limited-Area Model Formulation with time-dependent boundary conditions applied to the shallow-water equations. *Mon. Wea. Rev.*, 121, 2631–2636 – og McDonald, A. & J.-E. Haugen, 1993. A two time-level, three-dimensional, semi-Lagrangian, semiimplicit limited area gridpoint model of the primitive equations. Part II: Extension to hybrid vertical coordinates. *Mon. Wea. Rev.*, 121(7), July 1993.

dessverre ikke funnet noen formell sluttrapport fra HIRLAM 3, men et oppgradert modellsystem, HIRLAM Level 2.5, ble utviklet.¹⁴⁹ Det spanske meteorologiske institutt (INM, nå AEMET) ble fullt medlem av HIRLAM-samarbeidet i løpet av 1994.¹⁵⁰

HIRLAM 4; 1997–1999: Peter Lynch, Met Éireann – The Irish Meteorological Service. I HIRLAMs fjerde fase ble prosjektlederen hjulpet av en ledergruppe bestående av prosjektlederen selv og tre assisterende prosjektledere med ansvar for hhv. dataassimilasjon og analyse, modellering og systemledelse. Sigbjørn Grønås, som var professor ved UiB, var prosjektleder for modellering i en del av HIRLAM 4. Instituttens direktører utgjorde HIRLAMs råd (Council) mens HIRLAMs faglige rådgivningskomité (HAC) besto av representanter fra hvert land og behøvde ikke å komme fra de meteorologiske instituttene. HIRLAM 4 åpnet faglig samarbeid med NWP-utviklerne ved Météo-France i denne fasen, og de hadde også en representant i HAC.

I prosjektlederens sluttrapport¹⁵¹ ble de viktigste framskrittene presentert. Verd å nevne er bedret kvalitet over de tre årene på ett-døgns prognoser av vind og bakketrykk på 55 observasjonsstasjoner i EWGLAM-nettet. For temperatur var kvaliteten uforandret. Det ble arbeidet med å utvikle dataassimilasjon basert på variasjonsanalyse istedenfor det til da brukte statistisk optimal interpolasjon. Med variasjonsanalyse kan det dras nytte av et vell av indirekte asynoptiske og fjernmålte data, slik som TOVS/ATOVS fra satellitt, radardata og bakkebasert GPS-data.^{152, 153} I første rekke ble det utviklet

149 Källén, E. (red.), 1996. HIRLAM Documentation Manual. System 2.5. Available from SMHI, Norrköping, Sweden.

150 Navascués, B., Calvo, J., Morales, G., Santos, S., Callado, A., Cansado, A., Cuxart, J., Díez, M., del Río, P., Escribà, P., García-Colombo, O., García-Moya, J.A., Geijo, C., Gutiérrez, E., Hortal, M., Martínez, I., Orfila, B., Parodi, J.A., Rodríguez, E., Sánchez-Arriola, J., Santos-Atienza, I. & Simarro, J., 2013. *Long-term verification of HIRLAM and ECMWF forecasts over Southern Europe.* History and perspectives of Numerical Weather Prediction at AEMET. <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.01.010>. s. 1.

151 https://maths.ucd.ie/~plynch/Publications/H4FR_Content.html

152 Lindskog, M., Gustafsson, N., Navascués, B., Mogensen, K.S., Huang, X.-Y., Yang, X., Andrae, U., Berre, L., Thorsteinsson, S. & Rantakokko, J., 2001. Three-dimensional variational data assimilation for a limited area model. Part II: Observation handling and assimilation experiments. *Tellus*, 53A, 447–468 – og Lindskog, M., Järvinen, H. & Michelson, D.B., 2000. Assimilation of radar radial winds in the HIRLAM 3D-Var. *Phys. Chem. Earth*, 25B, 1243–1249, [http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1909\(00\)00187-8](http://dx.doi.org/10.1016/S1464-1909(00)00187-8)

153 Advanced TIROS Operational Vertical Sounder (ATOVS) på the NOAA-15-satellitten som ble satt i bane i mai 1998. TOVS var forløperen (TIROS Operational Vertical Sounder). GPS (Global

kode for 3D-Var,¹⁵⁴ men det ble også eksperimentert med det vesentlig mer beregningskrevende systemet 4D-Var.¹⁵⁵ Initialisering og kontroll av meteorologisk støy ble innovativt løst gjennom prosjektlederens egne bidrag, digitalt filter.¹⁵⁶

En rekke nyutviklinger som skulle få et langt liv i HIRLAM, ble startet i fjerde fase. ISBA-skjemaet¹⁵⁷ for beregning av utveksling av varme, vann-damp og moment (friksjon) mellom bakken og atmosfæren ble tilpasset. To alternative parameteriseringer av skyer og nedbør ble utviklet og testet ut. STRACO (forkortet fra «Stratiform and Convective») beregner konveksjon og storskala skyer og nedbør på en enhetlig måte, og er utviklet ved det danske meteorologiske institutt.¹⁵⁸ Det alternative oppsettet er en kombi-

Positioning System) er i dag (2022) et nettverk bestående av omtrent 30 satellitter som er plassert i bane rundt jorden av USAs forsvar, og som brukes til satellittnavigasjon.

- 154 Gustafsson, N., 1999. The numerical scheme and lateral boundary conditions for the spectral HIRLAM and its adjoint. ECMWF Seminar Proceedings. Recent developments in numerical methods for atmospheric modelling. ECMWF, Reading, UK, 7–11 September 1998, s. 335–363 – og Gustafsson, N., Berre, L., Hörnquist, S., Huang, X.-Y., Lindskog, M., Navascués, B., Mogensen, K.-S. & Thorsteinsson, S., 2001. Three-dimensional variational data assimilation for a limited area model. Part I: general formulation and the background constraint. *Tellus*, 53 A, 425–446. <http://dx.doi.org/10.1111/j.1600-0870.2001.00425.x>
- 155 Variasjonsanalyse innebærer å finne en tilstand for modell-atmosfæren som minimaliserer et integrert mål for forskjellen mellom modellens beregnede tilstand over et intervall på noen få timer og observasjoner tatt i det samme tidsintervallet. Med tredimensjonal variasjonsanalyse (3D-Var) anslås at observasjonene tatt over tidsintervallet gjelder for ett gitt analysetidspunkt. Med fire-dimensjonal analyse (4D-Var) antas observasjonene å gjelde ved de tidspunktene de faktisk er tatt, og den resulterende analysen er en tidsutvikling over det valgte tidsintervallet. Modellprognoser beregnes ut fra det siste tidspunktet av dette intervallet. Til dette formålet konstrueres en tangent-lineær versjon av modellen som beregner avviket fra den opprinnelige ulineære modellberegningen forover i tid, mens dens adjungerte integreres baklengs. Beregningene fram og tilbake gjentas som en iterasjon der også den ulineære beregningen kan oppdateres, og en tilnærmet løsning til sist finnes etter et antall gjentakelser som bestemmes på forhånd. Et alternativ til tradisjonell 4D-Var er «4D-EnsVar» der man bruker ensembler direkte når man minimaliserer avviket mellom modellberegninger og observasjoner.
- 156 Lynch, P. & Huang, X.-Y., 1992. Initialization of the HIRLAM model using a digital filter. *Mon. Weather Rev.* 120, 1019–1034. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493\(1992\)120b1019:IOTHMU>2.0.CO;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0493(1992)120b1019:IOTHMU>2.0.CO;2)
- 157 ISBA = Interactions between Surface–Biosphere–Atmosphere. Noilhan, J. & Mahfouf, J.-F., 1996. The ISBA land surface parameterisation scheme. *Global Planet. Change*, 13, 145–159.
- 158 Sass, B.H., Nielsen, N.W., Jørgensen, J.U. & Amstrup, B., 1999. *The Operational HIRLAM System at DMI*. DMI Tech Rep. no 99-21. Danmarks Meteorologiske Institut, Copenhagen, Denmark. Se også: Undén mfl., 2002. *The HIRLAM 5 Scientific Documentation*. 144 sider. SMHI, Norrköping, Sverige.

nasjon av Kain-Fritsch-skjemaet for byger og konveksjon¹⁵⁹ og skjemaet til Rasch og Kristjánsson for storskala stratiform nedbør og skydannelse.¹⁶⁰

I HIRLAM 3 og 4 ble det også arbeidet med programmeringstekniske løsninger for å kunne kjøre modellen effektivt på maskiner med parallelt arbeidende prosessorer. Her bidro Meteorologisk institutts forskere betydelig.¹⁶¹ En egen programpakke, HIRVDA, for variasjonsanalyse med prosessering av utvalgte indirekte observasjonsdata, ble utviklet. For effektiv kommunikasjon mellom deltagerne i prosjektet ble det satt opp en webportal for intern utveksling av informasjon (kalt HeXnet). Et system for versjonskontroll av HIRLAM-modellen ble implementert.

HIRLAM 5, 6; 2000–2005: Per Undén, SMHI. Det vitenskapelige arbeidet i HIRLAM ble grundig rapportert i 2002.¹⁶² Modellsystemet var i en fase som inkluderte simulering av komplekse prosesser som sammen kan påvirke atmosfæriske bevegelser og karakteristisk vær. Selve systemarbeidet omfattet dels utvikling av prosedyrer for dokumentasjon, verifikasjon, diagnose og effektiv utnyttelse av tilgjengelig maskinvare, og dels utvikling og tilpassing av programvare som tillot å kjøre modellsystemet på ulike plattformer. Ved Meteorologisk institutt har Ole Vignes og, i senere HIRLAM-faser, Trygve Aspeli mfl. vært viktige i systemarbeidet.

Ved anvendelse av HIRLAM-systemet kunne de enkelte medlemslands institutter velge mellom flere alternative oppsett. For modelldynamikken kunne velges mellom semi-lagrangesk / semi-implisitt og spektral diskretisering. Jan Erik Haugen hadde vært sentralt med i utviklingen av begge disse. Som nevnt under fase fire kunne det også velges mellom to skjemaer for parameterisering av skyer og nedbør. Det nyeste skjemaet for beregning av flukser i atmosfærens grenselag i de nederste få hundre meter over bak-

159 Kain, J.S. & Fritsch, J.M., 1993. Convective Parameterisation for Mesoscale Models: The Kain-Fritsch scheme. In: *The representation of cumulus convection in numerical models*. Red: K.A. Emanuel & D.J. Raymond. *AMS Monograph*, 46, 246p.

160 Rasch, P.J. & Kristjánsson, J.E., 1998. A comparison of the CCM3 model climate using diagnosed and predicted condensate parameterizations. *J. Climatol.*, 11, 1587.

161 Skålin, R. & Bjørge, D., 1997. Implementation and performance of a parallel version of the HIRLAM limited area atmospheric model. *Parallel Computing*, 23, 2161–2172.

162 Undén mfl., 2002. *The HIRLAM 5 Scientific Documentation*. 144 sider. SMHI, Norrköping, Sverige.

ken, inkluderte prognostisk beregning av turbulent kinetisk energi som dermed kan drive med den midlere vinden, mens utveksling ved jordoverflaten inkluderte avansert beregning av varme og fuktighet i bakken (ISBA-skjemaet¹⁶³). Fjell og annen topografisk virkning på vindens variasjon med høyden ble også videreutviklet i denne fasen.

For dataassimilasjon og bestemmelse av initialtilstand var optimal statistisk interpolasjon ferdig utviklet, mens 3D-Var ble utviklet med kobling til fjernmålte, indirekte observasjoner. Harald Schyberg ved Meteorologisk institutt var HIRLAM-prosjektleder for observasjonsbruk i dataassimilasjon i HIRLAM 6 (2003–2005). Han og andre ved Meteorologisk institutt var sentrale, og til dels ledende i HIRLAM-samarbeidet, på utviklingen av å gjøre nytte av satellittobservasjoner i dataassimilasjon.

Særlig viktig var observasjoner i mikrobølgeområdet¹⁶⁴ der data ikke maskeres av skyer og det er mulig å skille mellom skyer og havis fra satellittens data. Instituttet ledet også arbeidet med assimilasjon av scatterometerdata til bestemmelse av vinden ved havoverflaten. I senere faser av HIRLAM har instituttet fått med assimilasjon av data fra nyere instrumenter som detekterer i infrarødt, for eksempel IASI-instrumentet (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) i forbindelse med varsling av polare lavtrykk.¹⁶⁵ En del av disse satsingene ved Meteorologisk institutt er begrunnet med ansvaret for værvarslingen over områder der det er få eller ingen konvensjonelle observasjoner. Norsk Romsenter har støttet dette utviklingsarbeidet.¹⁶⁶

Meteorologisk institutt har også lenge hatt en viktig rolle innen iskartlegging fra satellittobservasjoner som del av en felles europeisk tjeneste for

163 Bringfelt, B., M. Heikinheimo, N. Gustafsson, V. Perov & A. Lindroth, 1999. A new land surface treatment for HIRLAM – Comparisons with NOPEX measurements. *J. of Agr. and Forest Met.*, 98.

164 Schyberg, H., T. Landelius, S. Thorsteinsson, F. Thomas Tveter, O. Vignes mfl., 2003. *Assimilation of ATOVS data in the HIRLAM 3D-Var system*. HIRLAM Technical Report No. 60, April 2003. Available from HIRLAM-5 Project c/o Per Undén, SMHI, S-60176 Norrköping, Sweden – og Schyberg, H., V.W. Thyness & F.T. Tveter, 2005. *AMSU-A assimilation over sea ice in HIRLAM 3D-Var: Impact studies for the period February–March 2005*. Norwegian Meteorological Institute Note no 13/2005. Available from the Norwegian Meteorological Institute, <http://www.met.no>

165 Randriamampianina, R., Iversen, T. & Storto, A., 2011. Exploring the assimilation of IASI radiances in forecasting polar lows. *Q.J.R. Meteorol. Soc.* 137, 1700–1715, <http://dx.doi.org/10.1002/qj.838>.

166 Innspill fra Harald Schyberg.

overvåking av havis. Innen NWP er dette relevant for bakkebeskrivelsen i modellområder som dekker deler havområder som er islagte hele eller deler av året.¹⁶⁷

HIRLAM A (2006–10), B (2010–15), C (2016–20, forlenget til 2025): Jeanette Onvlee, KNMI. Mot slutten av HIRLAM 6 ble utviklingen i HIRLAM-prosjektene fram til da og de videre utviklingsmulighetene evaluert av en internasjonal komité.¹⁶⁸ Flere viktige endringer ble fulgt opp ved videreføringen av HIRLAM. Konsortiet skulle fortsette desentralisert, men i stedet for treårige prosjekter ble HIRLAM-konsortiet definert som program med faser av varighet på fem år. Lederen fikk tydeligere styringsfullmakter ved at landene skulle stille til rådighet personressurser som lederen kunne disponere («core personnel»), i tillegg til at det ble utlyst prosjektlederstillinger for utvalgte områder (modell-dynamikk, fysisk parameterisering, dataassimilasjon, sannsynlighetsprognoser og modellsystemet). Ytterligere personell var med samtidig som de også hadde andre oppgaver ved moderinstituttet. Styringsdokumentene var (og er) en langsiktig vitenskapelig plan, og årlige svært detaljerte arbeidsplaner.

Av nye faglige satsinger som ble prioritert høyt i HIRLAM A, var særlig modellering med svært høy oppløsning (typisk 1–2,5 km maskevidde) med ikke-hydrostatisk dynamikk. Men også modeller for «den grå sone» inngikk, dvs. der byggevær og lignende fenomener bare er delvis oppløst av modellens maskenett, slik at prosesser også må parameteriseres (typisk 5–10 km maskevidde). Begge typer modellverktøy var kommet langt i utvikling innen ALADIN- og LACE-konsortiene i 2006 med den franske ikke-hydrostatiske AROME-modellen for de aller fineste oppløsningene, og LACE-konsortiets ALARO-modell for «den grå sone». ALADIN-konsortiets hovedmodell var sammenlignbar med HIRLAM-konsortiets.

Estland, som ble medlem av HIRLAM-konsortiet 1. januar 2007, hadde allerede utviklet en ikke-hydrostatisk modellversjon av HIRLAM som i prin-

167 Breivik, L.A.S., Eastwood, Ø., Godøy, H. Schyberg & Tonboe, R., 2001. Sea Ice products for EUMETSAT Satellite Application Facility. *Canadian Journal of Remote Sensing* 27(5), 403–410.

168 Evalueringsrapporten er i ettertid ikke funnet, men prosjektleder Undén (for 6. fase) henviste til den i et kort notat fra 2005 (http://www.arso.gov.si/ewglam_2005/presentations/01_hirlam.pdf). Han peker også på aktuelle utviklingstrekk i et foredrag i anledning at HIRLAM-samarbeidet var 20 år: The strategy of the new HIRLAM programme. Slides of talk, June 2005. (<https://www.umr-cnrm.fr/aladin/IMG/pdf/PERUNDEN.pdf>)

sippet kunne kjøres med svært høy oppløsning.¹⁶⁹ Satsingene i HIRLAM A betød at man likevel gikk bort fra videre satsing på den gamle HIRLAM-koden, og videre faser ble utviklet som et samarbeid med ALADIN, LACE og Météo-France. Dette medførte blant annet at Meteorologisk institutts modell ble en del av IFS-samarbeidet med ECMWF, som blant annet gir tilgang til mye ferdigutviklet programvare som er nødvendig for assimilasjon av fjernmålte data. I første omgang ble dette til HARMONIE (Hirlam Aladin Research towards Meso-scale Operational NWP In Europe), og siden 2021 ACCORD-konsortiet (A Consortium for Convection-scale modelling Research and Development), samtidig som HIRLAM C fortsatt drives parallelt fram til 2025. Det er HARMONIE-AROME som p.t. er det aktuelle modell-systemet.¹⁷⁰

En annen nyutvikling var at numeriske sannsynlighetsprognoser som reflekterer den aktuelle forutsigbarhet av været til enhver tid og på ethvert sted, ble tatt inn i HIRLAM A. Inspirert av det grensesprengende miljøet ved ECMWF for globale varsler over flere døgn og opp til sesonger, hadde det vært forskning på dette tema for regionale værprognoser blant annet ved UiO. Inger-Lise Frogner tok sin PhD på dette i 2001, og da hun fikk stilling ved Meteorologisk institutt utviklet hun dette videre.¹⁷¹ Iversen var prosjektleder i HIRLAM 2006–2011, med Frogner som «core person», og det ble utviklet en operasjonell pan-europeisk produksjon (Grand Limited-Area Model Ensemble Prediction System, GLAMEPS¹⁷²) innenfor HIRLAM-ALADIN som ble kjørt i sann tid ved ECMWF. Kai Sattler (Danmarks meteorologisk institutt, DMI) var sentral utvikler av systemet sammen med Xiaohua Yang (DMI)

169 HIRLAM Technical Reports, No. 48, 49 og 55. Viktigste bidrag fra Rein Rõõm og Aarne Männik ved universitetet i Tartu.

170 Bengtsson, L., Andrae, U., Aspelien, T., Batrak, Y., Calvo, J., de Rooy, W., Gleeson, E., Hansen-Sass, B., Homleid, M., Hortal, M., Ivarsson, K., Lenderink, G., Niemelä, S., Nielsen, K.P., Onvlee, J., Rontu, L., Samuelsson, P., Muñoz, D.S., Subias, A., Tijm, S., Toll, V., Yang, X., & Koltzow, M.Ø., 2017. The HARMONIE-AROME model configuration in the ALADIN-HIRLAM NWP system. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 1919–1935, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-16-0417.1>

171 Frogner, I.-L. & Iversen, T., 2002. High-resolution limited-area ensemble predictions based on low resolution targeted singular vectors. *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 128, 1321–1341 – og Frogner, I.-L., Haakenstad, H. & Iversen, T., 2006. Limited-area ensemble predictions at the Norwegian Meteorological Institute, *Q.J.R. Meteorol. Soc.*, 132, 2785–2808.

172 Iversen, T., A. Deckmyn, C. Santos, K. Sattler, J.B. Bremnes, H. Feddersen & I.-L. Frogner, 2011. A grand LAM-EPS (GLAMEPS) for operational use. *Tellus*, 63A, 513–530, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00507.x>

og Alex Deckmyn (Belgias meteorologiske institutt). Med en oppgradering i 2014 gikk dette systemet kontinuerlig fram til 2019.¹⁷³

Parallelt med utvikling og kjøring av GLAMEPS ble det i HIRLAM B (og senere C) arbeidet stadig mer med å utvikle et system med sannsynlighetsprognoser basert på full oppløsning av dyp konveksjon og bygevær. Da flere land fikk erfaring med AROME i egne områder, etterspurte HIRLAMs medlemmer stadig mer informasjon om sannsynlighetsprognoser for potensielt ekstremt lokalt vær. Frogner overtok som prosjektleder for dette i 2011, og utvikling av HarmonEPS fikk vind i seilene.¹⁷⁴ Dette er (ennå) ikke en felles pan-europeisk produksjon, men flere land kjører versjoner av systemet lokalt. I HIRLAM C ble Roger Randriamampianina (Meteorologisk institutt) prosjektleder for dataassimilasjon og bruk av observasjoner. Da ACCORD startet gikk han over i prosjektledelsen der, mens Frogner fortsatte i HIRLAM-konsortiet fram til 2025. Andrew Singleton (også Meteorologisk institutt) er «core person» for kvalitetssikring. Han har også utviklet et avansert og brukervennlig system for kvalitetssikring og evaluering av sannsynlighetsvarsler for HIRLAM og HARMONIE («harp»).

2.7 Noen trekk ved Meteorologisk institutts NWP siden HIRLAM

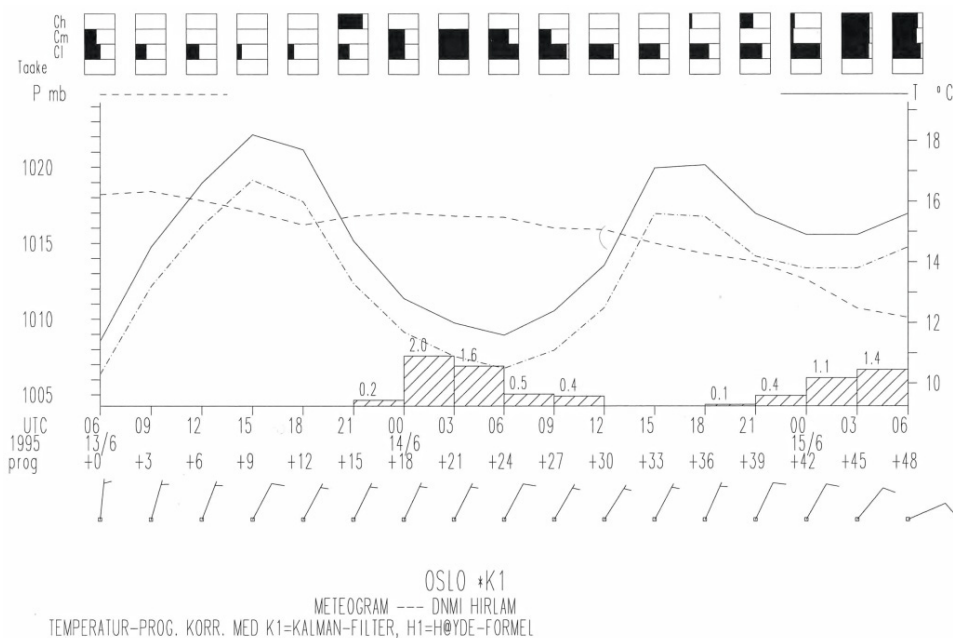
Finland ble i januar 1990 det første landet som kjørte HIRLAM operasjonelt, og har siden i mange år kjørt en versjon av modellen som regnes som en referanse (RCR, Regular Cycle of the Reference Model) etter at denne opprinnelig ble kjørt ved ECMWF.¹⁷⁵ At det hele tiden har vært definert referanseversjoner av HIRLAMs modeller, er et særtrekk ved HIRLAM-kon-

173 <https://www.ecmwf.int/en/newsletter/165/news/life-glameps>

174 Frogner, I.-L., Andrae, U., Bojarova, J., Collado, A., Escriba, P., Feddersen, H., Hally, A., Kauhanen, J., Randriamampianina, R., Singleton, A., Smet, G., van der Veen, S. & Vignes, O., 2019. HarmonEPS – The HARMONIE Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, 34, p. 1909–1937. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0030.1> – og Frogner, I.-L., Singleton, A.T., Koltzow, M.Ø. & Andrae, U., 2019. Convection-permitting ensembles: Challenges related to their design and use. *Quart. J. Roy. Meteor. Soc.*, 145, 90–106, <https://doi.org/10.1002/qj.3525>

175 Eerola, K., 2013. Twenty-one years of verification from the HIRLAM NWP system. *Wea. Forecasting*, 28, 270–285, <https://doi.org/10.1175/WAFD-12-00068.1>

sortiet, som ikke bare stiller en modellkode til disposisjon for medlemmene, men hele produksjonssystemer fra observasjoner, dataassimilasjon, data ved de åpne grenseflatene, prognosemodellen, samt dokumentasjon av prognosenes kvalitet. De ulike landenes værtjenester kan sette opp sine systemer etter egne behov og tilgang til regnekraft, mens RCR sikrer at det fins oppsett som faktisk fungerer og evalueres. Danmark startet opp ett år etter Finland (januar 1991) og Sverige ved slutten av 1992. At Norge ikke startet opp før i juni 1995, skyldtes at Meteorologisk institutt allerede siden midten av 1980-årene hadde kjørt stadig oppdaterte versjoner av NorLAM operasjonelt. På det tidspunktet var HIRLAM operasjonell i alle de andre medlemslandene. Figuren viser det første meteogrammet som ble laget med HIRLAM (versjon 2.7) med 50 km maskevidde.



Figur 2.2 Det første meteogrammet som ble laget på basis av en HIRLAM50-prognose ved Meteorologisk institutt. Varsel av trykk, temperatur, nedbør og skydekke for Oslo, ut fra 13. juni 1995, 00 UTC. (Laget av Anstein Foss, kilde: Jan Erik Haugen)

Behovet for effektivt å kunne parallellisere modellkode var en av grunnene til å erstatte LAM50s med HIRLAM50.¹⁷⁶ Kvaliteten til HIRLAM-prognosene var ikke utslagsgivende for valget, siden de snarere opplevdes dårligere eller høyst like gode som dem produsert med NorLAM,¹⁷⁷ se figuren nedenfor som viser en subjektiv verifikasjon. Parallellversjonen av HIRLAM («PAR-LAM») ble utviklet ved Meteorologisk institutt og var klar i 1995.

Fra starten med HIRLAM50 i 1995 brukte instituttet samme dataassimilasjon for analyser som tidligere var benyttet med LAM50s. Beregningsområdet var større, og samme år ble det også startet opp en testversjon med 10 km maskevidde på et område som dekket fastlands-Norge.¹⁷⁸ I instituttets årsrapport for 1993 (s. 110–111) ble følgende formulert:

Resultatene viser at kvaliteten av den norske modellen er i middel like bra som eller bedre enn både EC og UK for det første døgnet, mens EC-modellen har best kvalitet for den siste del av 48-timers prognosen.

Dette stemmer godt overens med den subjektive indeksen i figuren. Dessverre finnes ikke tilsvarende formuleringer om modellprognosenes kvalitet 1995–1999.

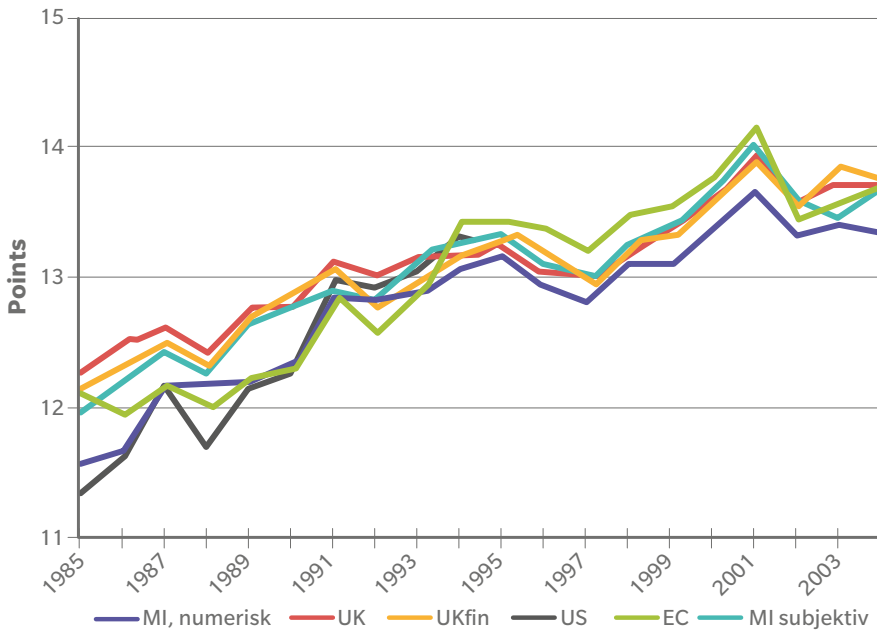
At HIRLAM50-prognosenes kvalitet gjennomgående var dårligere eller omtrent like gode, avhengig av hvilken værparameter som ble evaluert, som prognosene fra ECMWF gjennom flere år, var ikke tilfredsstillende. Både i HIRLAM-prosjektet og FoU-avdelingens seksjon for numerisk værvarsling ved Meteorologisk institutt ble det arbeidet med forbedringer. Som nevnt under avsnittene om HIRLAM 5 og 6 hadde instituttet både betydelig kompetanse på og ambisjoner om å utnytte flere typer avanserte fjernmålte data fra satellitt, særlig slike som kunne «se gjennom skyer» i mikrobølgedelen av det elektromagnetiske spekteret.¹⁷⁹ Testkjøringer med 3D-Var hadde alle-

176 Ole Vignes, personlig kommentar.

177 Det er funnet kun én analyse som underbygger dette, og det er den subjektive verifikasjonen med «JMA-indeks» som er beskrevet i et eget diagram.

178 Meteorologisk institutts årsrapport 1995, s. 100–101.

179 Schyberg, H., Landelius, T., Thorsteinsson, S., Tveter, F.T., Vignes, O. mfl., 2003. *Assimilation of ATOVS data in the HIRLAM 3D-Var system*. HIRLAM Technical Report No. 60, April 2003.



Figur 2.3 Kvalitetsindeks (JMA-index, utviklet av statsmeteorolog Jarl M. Andersen) for daglige værprognoser for 1,5 døgn gjennom 1985–2004. Numeriske prognoser fra: Meteorologisk institutt, LAM50s (mørk blå); UK MetOffice (rød og gul); fra USA fram til 1994 (svart); og fra ECMWF (grønn). Subjektive prognoser fra meteorolog på vakt (lys blå). Alle prognoser ble betydelig forbedret over 20 år. De siste årene da LAM50s ble kjørt (1991–1994/95) var instituttets numeriske prognoser blitt relativt gode, men etter at HIRLAM50 overtok, ble kvaliteten relativt dårligere. (Kilde: Mariken Homleid)

rede vært gjort over en toårs periode,¹⁸⁰ og i løpet av år 2000 ble 3D-Var kjørt operasjonelt med HIRHAM50.¹⁸¹

For instituttets del var begrensningen i tilgjengelig regnekraft lenge en hindring. Høsten 2001 ble CRAY T3E erstattet med en SGI Origin 3800 med mye større regnekraft. Dette åpnet for betydelige oppgraderinger som en

180 Vignes, O., 1999. *A parallel test of the HIRLAM 3D-Var data assimilation system and the operational DNMI system*, Research Report No. 90.

181 Meteorologisk institutts årsrapport, 2000, s. 109.

stund dels hadde vært testet ut eller ville bli utviklet i henhold til nye modellversjoner fra HIRLAM sentralt. Særlig viktig ble tilgangen til HIRLAM versjon 5.2¹⁸² som inneholdt en rekke mulige valg og forbedringer i beskrivelsen av fysiske prosesser, muligheter for å inkludere ytterligere observasjonsdata i variasjonsanalysen, og analyse av observasjonsdata for bakkeparametere.

I mars 2003 implementerte instituttet versjon 5.2 med 0,2 graders maskevidde og 40 lag i en HIRLAM20 operasjonelt, med 60-timers prognoser beregnet fire ganger per døgn. Systemet omfattet også en forbedret tilgang til data fra ECMWF ved beregningsområdets åpne render. Alt i alt førte dette til en betydelig forbedring av prognosenes kvalitet, og rapporten som inkluderte tester av kildene til kvalitetsforbedringer,¹⁸³ bruker følgende formuleringer i konklusjonene på side 12:

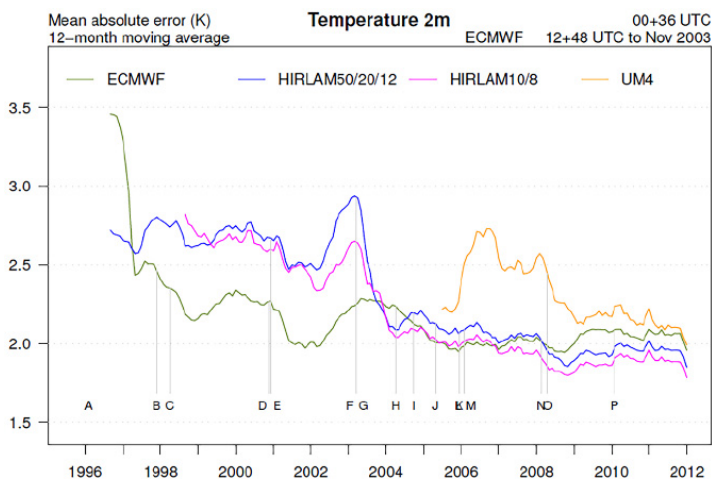
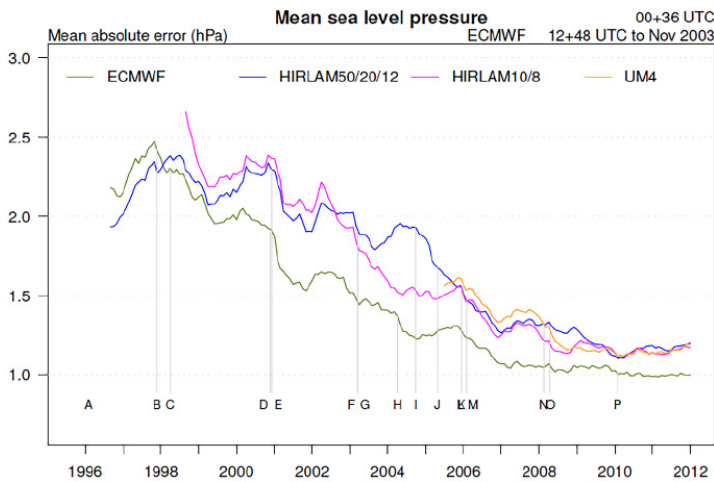
The verification results show that the new reference version is superior to the operational system at met.no. The improvement is significant for the 2m temperature but most important is the improvement in mslp and the forecasts on pressure surfaces. The new model version represents a better model for the synoptic scale. The horizontal resolution is increased to 0.2 degrees with retainance of the operational area. The improved quality due to increased resolution is smaller than the improvements due to change in model version.

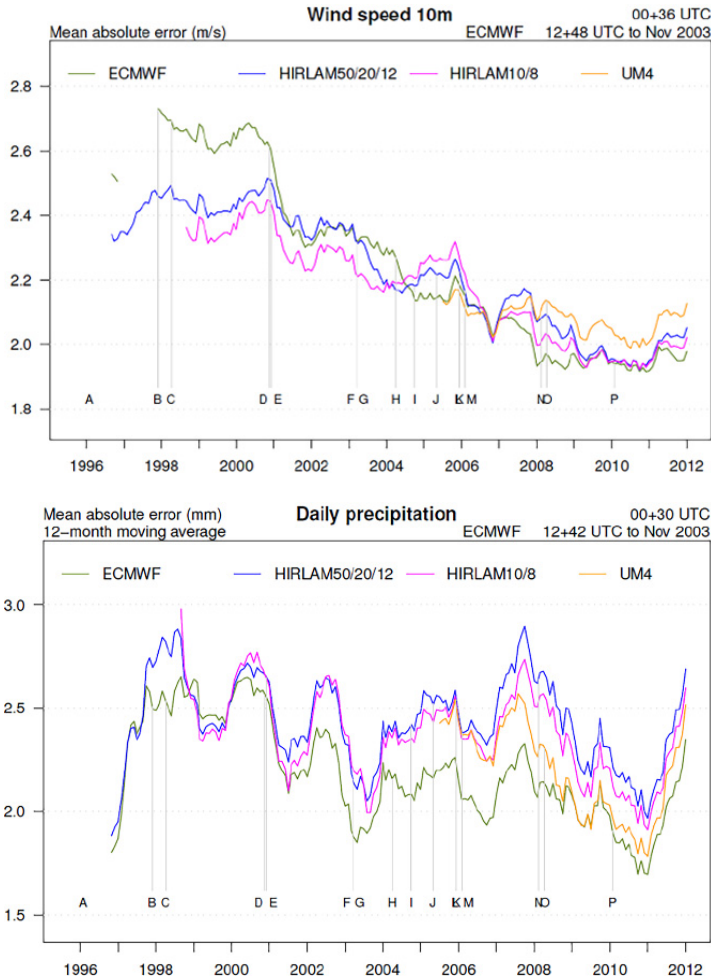
Instituttets operasjonelle HIRLAM-versjon har siden blitt oppgradert. Oppgraderinger har omfattet økt oppløsning, forbedret fysisk parameterisering, bedre analyser, og endringer i randdata. Fra instituttets årsrapport for 2011 vises kvalitetsforbedringene fra 1996 til 2012 i varslet bakkestrykk, temperatur og vindstyrke like over bakken samt døgnlige nedbørmengder for instituttets HIRLAM- og UM-prognoser for 36 timer sammenlignet med ECMWFs prognoser for 48 timer (36 timer fra 2003), som er samtidig tilgjengelig for værvarslere og brukere. UM beskrives i neste avsnitt.

182 Undén mfl., 2002. *The HIRLAM 5 Scientific Documentation*. 144 sider. SMHI, Norrköping, Sverige.

183 Bjørge, D., Haugen, J.E., Homleid, M., Vignes, O.N. & Ødegaard, V., 2003. *Updating the HIRLAM numerical weather prediction system at met.no 2000–2002*, Research Report No. 145, kan lastes ned fra: <https://www.met.no/publikasjoner/met-report/met-report-2003>

Bakketrykket er en storskala variabel som den globale ECMWF-modellen beregner konsistent bedre enn de regionale modellene. Lignende resultater gjaldt tilsynelatende også for døgnlign akkumulert nedbør, men det kan skyldes såkalt «dobbel belastning» som en modell med dårlig oppløsning tjener på. For temperatur og vindstyrke var HIRLAM like god eller litt bedre enn ECMWF siden 2004, mens UM4 var konsistent dårligere for temperatur og vind, men sammenlignbar med ECMWF for døgnakkumulert nedbør. Det er også verdt å merke seg at kvaliteten ble langsiktig forbedret, men at denne trenden i større grad ble maskert av store variasjoner fra år til år for nedbør.





Figur 2.4 Midlere absolutt feil i fire beregnede variabler ett og et halvt døgn fram i tid fra instituttets operasjonelle versjoner av HIRLAM fra 1996 til 2012 og UM fra 2004 til 2012, sammenlignet med tilsvarende feil for ECMWFs todøgns prognoser som gjelder for samme tidspunkt. 12 måneders glidende gjennomsnitt. Bokstavene angir tidspunkt for endringer i de operasjonelle modellsystemene. For HIRLAM ses tydelige forbedringer sammenlignet med ECMWF ved: E (3D-Var startet 2003); F (oppgradert med 20 km maskevidde i 2005); H (randdata fra ECMWF endret fra 150 km til 50 km maskevidde), J (daglig oppdatert havoverflatetemperatur i 2005), N (maskevidde redusert fra 20 og 10 km til 12 og 8 km i 2008), O (UM4 operasjonell med forbedret fysikk i 2008, se eget avsnitt om UM).

(Kilde: Instituttets årsrapport, 2011, s. 7–10)

Det bør nevnes at på tross av at det har vist seg vanskelig for en enkeltprognose med HIRLAM å tydelig verifisere bedre enn enkeltprognoser fra ECMWF, har sannsynlighetsvarsler gjennom ensembler verifisert betraktelig bedre enn de operasjonelle ensemblene fra ECMWF. Dette skyldes i hovedsak måten ensemblene er generert på, og for det pan-europeiske GLAMEPS var det bruken av flere ulike modeller og modellversjoner som bidro mest til forbedring.¹⁸⁴

Samarbeid med UK MetOffice om bruk av Unified Model (UM). I HIRLAMs fase 5 og 6 var det et økende fokus på ikke-hydrostatisk, mesoskala modellering, etter hvert som man så for seg behov for stadig finere maskevidde som eksplisitt beregner kraftige byger istedenfor gjennom parameterisering. Det ble også laget en noe forenklet ikke-hydrostatisk versjon av HIRLAM,¹⁸⁵ som forskningsavdelingen ved Meteorologisk institutt også eksperimenterte med. Denne modellutviklingen ble imidlertid ikke videreført i HIRLAMs neste faser. I stedet ble samarbeidet med ALADIN-prosjektet med Météo-France i ledelsen forløsende for en slik utvikling.

I mellomtiden opprettet Meteorologisk institutt et samarbeid med UK MetOffice sommeren 2002,¹⁸⁶ og fikk på den måten rett til å anvende deres ikke-hydrostatiske modell som på instituttet ble omtalt som UM-modellen. Dag Bjørge ble hovedansvarlig for implementeringen av UM, som ble satt opp med 4 km oppløsning, UM4, for et område som dekket hele fastlands-Norge, men uten dataassimilasjon. Eksperimentell produksjon ble startet i juli 2003 med dynamisk nedskalering av HIRLAM10-prognoser to ganger per døgn.¹⁸⁷

I 2005 ble beregningsområdet for UM utvidet til å dekke hele Skandinavia,¹⁸⁸ og i instituttets årsrapport fra 2006 (s. 15) fortelles det at samarbeidsavtalen med UK MetOffice ble fornyet. Der ble det også rapportert at vindprognosene hadde kvalitet som var tilfredsstillende for operasjonell bruk, men at det var et problem som måtte løses med for lave temperaturer over snødekte flater. I 2008 ble det rapportert at disse problemene så ut til

184 Iversen, T., Deckmyn, A., Santos, C., Sattler, K., Bremnes, J.B., Feddersen, H. & Frogner, I.-L., 2011. Evaluation of 'GLAMEPS' – A proposed multimodel EPS for short range forecasting. *Tellus*, 63A, 513–530, <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2010.00507.x>

185 Anelastisk tilnærming som filtrerer lydbølger.

186 Meteorologisk institutts årsrapport, 2002.

187 Meteorologisk institutts årsrapport, 2003 og 2004.

188 Meteorologisk institutts årsrapport, 2005.

å være løst, og full operasjonell drift ble satt i gang i mars 2008. Det ble rapportert at UM4-prognosene var klart bedre enn de tilgjengelige HIRLAM-prognosene, som på det tidspunktet var HIRLAM12 og HIRLAM8 med 60 lag.¹⁸⁹

Operasjonelt samarbeid i Norden basert på HARMONIE: MetCoOp. I august 2011 inngikk Meteorologisk institutt og SMHI en avtale¹⁹⁰ om operasjonelt samarbeid om produksjon av mesoskala NWP-prognoser, Meteorological co-operation on operational Numerical Weather Prediction (MetCoOp). Ved å alternere ansvar for anskaffelse av maskinvare, kunne denne oppdateres så ofte som hvert andre år. Modellsystemene kunne også moderniseres betraktelig oftere og være basert på det vel etablerte samarbeidet i HIRLAM-programmet, dvs. HARMONIE. Den 1. januar 2017 ble også det finske meteorologiske institutt (FMI) fullt medlem av MetCoOp.

Perioden fram til februar 2014 var en pre-operasjonell fase med planlegging og teknisk utvikling. Den ikke-hydrostatiske AROME-modellen, opprinnelig utviklet ved Météo-France og sentral i HARMONIE-samarbeidet (og nå ACCORD), utgjorde modellsystemet sammen med variasjonsanalyse (3D-Var) med avanserte fjernmålte data og analyser basert på optimal statistisk interpolasjon (CANARI¹⁹¹) for tilstanden ved bakkens overflate. Systemet AROME-MetCoOp, med 2,5 km maskevidde, 65 nivåer opp til ca. 33 km og 66 timers prognoser produsert hver tredje time, ble lansert i operasjonell drift fra medio mars 2014. Systemet benytter prognoser fra ECMWF langs de åpne rendene til beregningsområdet, omfatter produksjonsovervåkning med reserveløsninger for stabil produksjon, prognosedata i format etter internasjonal standard (netCDF) og opplegg for kontinuerlig evaluering av prognosenes kvalitet. Drøfting av systemets egenskaper ble i 2017 publisert vitenskapelig i *Weather and Forecasting*.¹⁹² Beregningsområdet ble utvidet østover da FMI ble med i 2017.

189 Meteorologisk institutts årsrapport, 2008 (s. 13).

190 Signert av direktørene ved SMHI (Lena Häll Eriksson) og Meteorologisk institutt (Anton Eliassen) datert 20. september 2011.

191 Code d'Analyse Nécessaire à ARPEGE pour ses Rejets et son Initialization (CANARI; Taillefer, F., 2002. CANARI: Technical documentation. CNRM/ GMAP Internal Rep., Météo-France, 55 s.)

192 Müller, M., Homleid, M., Ivarsson, K., Køltzow, M.A.Ø., Lindskog, M., Midtbø, K.H., Andrae, U., Aspelien, T., Berggren, L., Bjørge, D., Dahlgren, P., Kristiansen, J., Randriamampianina, R., Ridal, M. & Vignes, O., 2017. AROME-MetCoOp: A Nordic Convective-Scale Operational Weather Prediction Model, *Weather and Forecasting*, 32(2), 609–627. Retrieved Dec 31, 2022, from https://journals.ametsoc.org/view/journals/wefo/32/2/waf-d-16-0099_1.xml

Ved Meteorologisk institutt hadde det da allerede vært et lignende system (AROME-Norway) i drift siden 2. oktober 2013 med fire prognoser per døgn, egne analyser av bakkeoverflatens tilstand, men uten eget system for dataassimilasjon i atmosfæren. Fra den datoen hadde instituttet stoppet tidligere operasjonelle rutiner, inklusive vakthavende meteorologs manuelle editering av de numeriske prognosene, basert på HIRLAM og UM.¹⁹³

Meteorologisk institutt har et spesielt ansvar for værvarsling for deler av Arktis, og dette ansvaret dekkes ikke av AROME-MetCoOp. Siden 15. november 2015 har derfor instituttet kjørt egen operasjonell produksjon av numeriske værprognoser for et utsnitt av Arktis, AROME-Arctic.¹⁹⁴ Bortsett fra områdets størrelse og geografiske plassering er systemet tilsvarende konfigurert som for MetCoOp. De geofysiske forholdene i Arktis byr imidlertid på andre typer faglige utfordringer enn over Skandinavia, slik som store årstidsvariasjoner for solstråling og varmestråling, transport av varme og fuktighet fra og til en havoverflate med store variasjoner i temperatur og isdekning, samt betydning av varierende snødekke. I regionen forekommer også spesielt farlige værforhold, slik som polare lavtrykk og ekstreme kaldfronter. Modellsystemet var en viktig komponent i det nylig avsluttede «Year of Polar Predictions»¹⁹⁵ (YOPP).¹⁹⁶

MEPS: operasjonell varsling av sannsynligheter for værhendelser. Fra 8. november 2016 har det vært kjørt et system for sannsynlighetsprognoser: MetCoOp Ensemble Prediction System (MEPS), hovedsakelig basert på samme modelloppsett som AROME MetCoOp.¹⁹⁷ For AROME-Arctic er et lignende EPS under utvikling (2022).

Et system for EPS skal beregne konsekvenser av usikkerheter i atmosfærens starttilstand, i data som importeres inn i beregningene gjennom rendene og ved bakken, og av usikkerheter i modellens representasjon av fysiske

193 Informasjon fra Jørn Kristiansen og Morten Ø. Køltzow.

194 Müller, M., Y. Batrak, J. Kristiansen, M.A. Køltzow, G. Noer & A. Korosov, 2017. Characteristics of a Convective-Scale Weather Forecasting System for the European Arctic. *Mon. Wea. Rev.*, 145, 4771–4787, <https://doi.org/10.1175/MWR-D-17-0194.1>

195 <https://www.polarprediction.net/>

196 Køltzow, M., Casati, B., Bazile, E., Haiden, T. & Valkonen, T., 2019. A NWP model inter-comparison of surface weather parameters in the European Arctic during the Year of Polar Prediction Special Observing Period Northern Hemisphere 1. *Weather and Forecasting*. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0003.1>

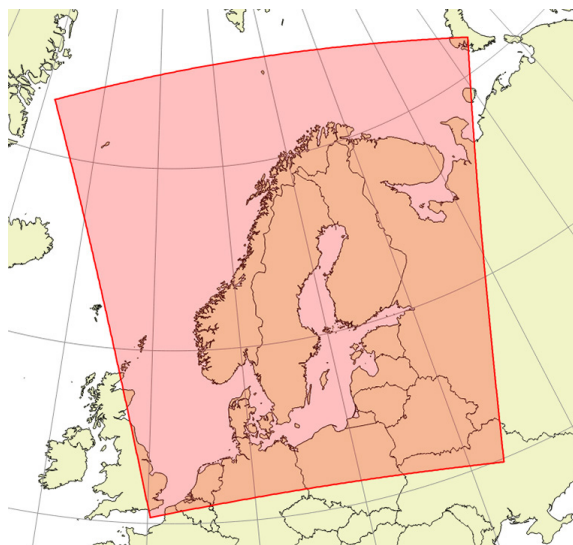
197 Ulf Andrae, SMHI mfl., 2017. The MetCoOp ensemble MEPS. *Aladin-Hirlam Newsletter no. 8*, s. 98–103.

prosesser. Kontrollprognosen fram til 66 timer beregnes hver tredje time ut fra det som antas å være det beste estimatet av utgangstilstanden. Den første versjon av MEPS konstruerte ni alternative varslere (ensemblemedlemmer) fram til 48 timer ut fra at det ved hvert tidspunkt er flere kontrollprognoser tilgjengelig fra ulike starttidspunkt. For eksempel er det klokka 18.00 tilgjengelig én 12 timers prognose fra kl. 06.00, én 15 timers prognose fra kl. 03.00, én 18 timers prognose fra kl. 00.00, osv. Det er da tre timers lag (forskyvning) mellom de prognosene som gjelder for samme klokkeslett. Siden forskjellen mellom to prognoser øker med forskjellen i deres alder, skaleres forskjellen mellom prognosene av ulik lengde slik at de blir tilnærmet like forskjellige. Denne måten å generere alternative prognoser kalles Scaled Lagged Averaged Forecasting (SLAF).

MEPS konstruerte ni alternative prognoser fram til 48 timer ved hjelp av SLAF i atmosfæren samt at hver alternative prognose startet ut fra sitt eget estimat av bakkens tilstand fra analyseskjemaet for bakkens overflate. Ved de åpne rendene ble perturbasjonene generert ved å anvende SLAF-teknikken på dataene fra ECMWFs prognoser.

Dette lille antallet ensemblemedlemmer i MEPS viste seg å produsere bedre produkter for sannsynlighetsvarsler enn det operasjonelle, pan-europeiske GLAMEPS med 44 medlemmer som da gikk operasjonelt i HIRLAM. Den høye geografiske oppløsningen i MEPS var utslagsgivende, og det var innlysende at det ville være riktig og viktig å videreføre satsingen på høy-oppløselig EPS for de første par døgn. Rammeverket for dette var HarmonEPS i HIRLAM.¹⁹⁸

198 Frogner, I.-L., Andrae, U., Bojarova, J., Collado, A., Escriba, P., Feddersen, H., Hally, A., Kauhanen, J., Randriamampianina, R., Singleton, A., Smet, G., van der Veen, S. & Vignes, O., 2019. HarmonEPS – The HARMONIE Ensemble Prediction System. *Weather and Forecasting*, 34, p. 1909–1937. <https://doi.org/10.1175/WAF-D-19-0030.1>



Figur 2.5 Dagens beregningsområde for MEPS

Da FMI ble medlem av MetCoOp, ble beregningsområdet utvidet til det som vises på kartet. MEPS er oppgradert siden den første versjonen, blant annet ved at tre ulike datamaskiner er involvert. Nyere versjoner av AROME er tatt i bruk, og flere dataassimilasjoner kjøres i parallell. Måten ensemblemedlemmer genereres på, er endret på en innovativ måte for å utnytte tilgjengelig kapasitet på datamaskinene bedre. Optimaliseringen oppnås ved at få nye ensemblemedlemmer genereres ofte (hver time) istedenfor at alle ensemblemedlemmer genereres hver 6. time og samtidig.

Siden februar 2020 genereres fem nye ensemblemedlemmer av lengde 66 timer hver time. Dermed kan det for hvert tidspunkt settes sammen et varierende antall alternative varsler ved tidsforskyving (lagging). Uperturberte kontrollprognoser genereres hver tredje time, åtte ganger per døgn. For eksempel kan man da hver tredje time generere 30+2 medlemmer av lengde 61 timer ved å bruke 30 perturberte prognoser og to kontrollprognoser fra de siste seks tidspunktene. Usikkerheten i modellens fysikk bidrar nå også til spredningen i ensemblet.¹⁹⁹

¹⁹⁹ Andrae, U., Frogner, I-L., Vignes, O., Singleton, A., Azad, R., Partio, M. & Sokka, N., 2020. A continuous EDA based ensemble in MetCoOp, *ALADIN-HIRLAM Newsletter Nr. 14*, 189–198.

2.8 Tanker om samfunnsnytten av numerisk værvarsling

I denne artikkelen har vi resymert og diskutert utviklingen av numerisk værvarsling (NWP) fra dens spede begynnelse fram til de siste ti årene. Hovedfokus har vært på bidrag fra norske forskere og utviklere til NWP generelt, og på hva Meteorologisk institutt selv har produsert av NWP delvis med assistanse fra akademia. Det er den potensielle nytten for samfunn og enkeltmennesker, i form av vern av liv og verdier, som er formålet med numerisk værvarsling. Uten et slikt formål i sikte som gradvis gjennom flere tiår har blitt stadig bedre oppfylt, hadde vi ikke hatt denne historien.

Begrensningene som forskere og utviklere over nesten tre generasjoner har vært nødt til å arbeide for å utvide, har grovt sagt vært bestemt av: (1) vitenskapelig forståelse av relevante geofysiske prosesser, (2) innovative matematiske ferdigheter, (3) teknologi for digital operasjonalisering, (4) observasjoner og deres tolkning, (5) bevilgninger, og (6) tilgang på og utvikling av forskertalenter. Disse seks punktene er ikke uavhengige av hverandre.

Det var først ved starten av det 20. århundre da Vilhelm Bjerknes knyttet teoretisk fluiddynamikk og termodynamikk sammen, at værvarsling *i prinsippet* kunne betraktes som en utfordring som kunne defineres innen klassisk naturvitenskapelig teori. I tillegg var han med på å utvikle teorien bak elektromagnetiske bølger som la grunnlaget for trådløs telegrafi og som gjorde det mulig å raskt distribuere nye meteorologiske observasjoner i sann tid.

Den *praktiske* løsningen av værvarslingsproblemet var imidlertid ikke like om hjørnet, og forsøket til Richardson i 1920-årene feilet ikke på grunn av dårlige regneferdigheter, men av manglende forståelse av fysikken. Det var Vilhelm Bjerknes' elever og hans elevers elever som under og etter andre verdenskrig utviklet en forståelse av fysikken som gjorde det mulig å gjøre de første vellykkede numeriske prognosene. Men disse prognosene tok lang tid å beregne på datidens regnemaskiner, og de var svært langt fra noe som hadde med opplevd vær å gjøre.

Tiårene etter det såkalte gjennombruddet for NWP kan karakteriseres som en langsom evolusjon der alle de seks ovennevnte punktene var ingredienser. Regnekraften økte langsomt, det samme gjorde tilgangen på observasjoner og deres tredimensjonale tolkning, og med dette økte forståelsen av fysikken og matematikken langsomt. Direktører med ansvar for å redde liv

og verdier måtte «ha is i magan» om de skulle tørre å satse stort på NWP som grunnlag for værvarsling. Andre metoder var ofte mer fristende, og dette påvirket også bevilgninger og tilgang på relevante forskertalenter.

Først utover på 1970-tallet kom det storstilte, og vågale, satsinger som vitnet om en vesentlig forventning om at NWP kunne bli virkelig samfunnsnyttig ut over akademisk teori. Det var selvsagt mange forskere som trodde på den mulige nytten av NWP før dette, men det var få muligheter til å demonstrere det i praksis. Med ECMWF ble dette mulig etter ganske kort tid. Fra 1990 og utover fikk man avanserte systemer for å utnytte fjernmålte observasjoner fra satellitt og andre teknologier, praktisk beregning av forutsigbarhetens begrensninger og muligheter, og representasjon av fysiske prosesser i modellene, og det ble mulig å beregne opplevd vær direkte.

Norge kom av uforståelige grunner ikke med i ECMWF før i 1989, men forskere ved Meteorologisk institutt og Institutt for geofysikk UiO, og noe senere Geofysisk institutt UiB, gjorde en beundringsverdig innsats da NORLAM ble utviklet. Selv om HIRLAM-modellenes prognoser de første 10–15 år ikke hadde samme kvalitet, var det imidlertid strategisk riktig å gå over til HIRLAM som operasjonell modell i 1995. Å høste av formelle, og ikke minst uformelle, samarbeid er uvurderlig for et lite land som Norge. Innen HIRLAM – HARMONIE – ACCORD utvikles og bidrar norsk kompetanse, og sammen med andre lands kompetanse har man fått på plass systemer som beregner verdens beste numeriske værprognoser for Norge over 2–3 døgn.

Og det er all grunn til å hevde at dette vil fortsette de neste tiårene. Ytterligere modellforbedringer, høyere oppløsning, flere observasjonssystemer og bedre sannsynlighetsprognoser for potensielt farlig vær vil utvikles i samarbeid mellom norsk og andre lands sterke kompetanse. Utvidelsen i 2022 av MetCoOp til å inkludere Estland, Latvia og Litauen i et østlig UWC (United Weather Centre) og dannelsen av et tilsvarende vestlig mellom Nederland, Danmark, Irland og Island vitner om MetCoOps suksess.

Medlemskapet i ECMWF sikrer en tilsvarende situasjon for værvarsling ut over de første døgn og for måneder, sesonger og kanskje år. Imidlertid ser vi ennå noe som kan tolkes som et tydelig etterslep av at Norge kom altfor sent med i samarbeidet. Det er få norske forskere og utviklere som søker og får stilling ved ECMWF. Det er også en ny usikkerhet ved at ECMWF er blitt splittet opp i tre sentre, ikke minst som en konsekvens av brexit. I tillegg til hovedsenteret i Reading i England er det opprettet et senter for tungregning

i Bologna i Italia og Copernicus-aktiviteten er lokalisert i Bonn i Tyskland. Mange vil hevde at en suksessfaktor for ECMWF har vært samlokalisering av dedikerte fagfolk med ett viktig felles mål. Å publisere artikler i vitenskapelige tidsskrifter (som *er viktig*) har nesten vært underordnet tilfredsstillelsen av å bidra til nye gjennombrudd i de operasjonelle prognosene. Det er et tankekors at mens utviklingen av europeisk NWP for korttidsprognoser går mot økt konsentrasjon av menneskelige og teknologiske ressurser, går ECMWF tilsynelatende motsatt vei. Dette er imidlertid ennå helt nytt, og tiden vil sannsynligvis vise at det går godt.

Samfunnsrelevansen til NWP er nå udiskutabel. Uten åpen tilgang til alle de data som NWP-prognoser genererer som et økonomisk felles gode finansiert av det offentlige, vil samfunnets evne til å planlegge kostbare investeringer og forebygge konsekvenser av farlig vær, være mye dårligere. Dette er ikke minst viktig når konsekvensene av menneskeskapte klimaendringer blir tydeligere og tydeligere. De vil bare øke de neste år og tiår. Gode, pålitelige værvarsler er en viktig del av en nødvendig tilpasning til klimaendringene.

Det har tatt drøyt et hundreår fra Vilhelm Bjerknes' erkjennelse av at værvarsling er et initialverdiproblem i klassisk fysikk, til vi nå varsler været uten subjektive vurderinger fra en meteorolog på vakt. Dette er resultat av at menneskene faktisk kan samarbeide frivillig, konstruktivt og langsiktig for å oppnå noe alle har nytte av, og nordmenn har bidratt vesentlig til denne viktige historien. Den tankevekkende ingressen til Nature-artikkelen *The quiet revolution of numerical weather prediction* av Bauer, Thorpe og Brunet²⁰⁰, oppsummerer denne viktige historien:

Advances in numerical weather prediction represent a quiet revolution because they have resulted from a steady accumulation of scientific knowledge and technological advances over many years that, with only a few exceptions, have not been associated with the aura of fundamental physics breakthroughs. Nonetheless, the impact of numerical weather prediction is among the greatest of any area of physical science. As a computational problem, global weather prediction is comparable to the simulation of the human brain and of the evolution of the early Universe, and it is performed every day at major operational centres across the world.

200 www.nature.com/doi/10.1038/nature14956