

DANMARKS METEOROLOGISKE INSTITUT

TEKNISK RAPPORT

00-13

Trafik og Miljø

Overvågning af luftkvaliteten

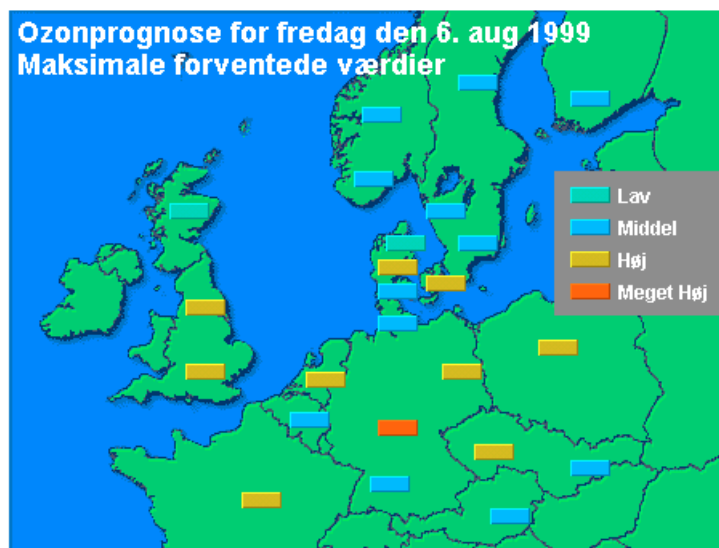
Atmosfæremodeller

Atmosfærekemimodeller samt smog- og ozon

Drivhuseffekt og klima

Sammenfattende rapport over DMI's Trafikpuljeprojekter 1995-99

Alix Rasmussen



KØBENHAVN 2000

ISSN: 0906-897X (printed version)
1399-1388 (online version)

Indholdsfortegnelse

Forord	3
1. Overvågning af trafikens bidrag til den lokale luftforurening i Danmark (TOV)	5
1.1 PROJEKTFORMÅL	5
1.2 BAGGRUND	5
1.3 INDLEDNING	6
1.4 RESULTATER.....	7
1.4.1 Måledata.....	7
1.4.2 Trafikindeks	8
1.4.3 Vejrindeks	9
1.4.4 Luftkvalitetsindeks	9
1.5 KONKLUSION	13
1.6 REFERENCER TIL DETTE AFSNIT.....	13
2. Atmosfæremodeller	14
2.1 PROJEKTFORMÅL	14
2.2 INDLEDNING	14
2.3 RESULTATER.....	15
2.3.1 Nye overfladedata.....	15
2.3.2 Nyt turbulensskema.....	17
2.3.3 DMI-HIRLAM-TRACER.....	19
2.4 KONKLUSION	19
2.5 REFERENCER TIL "ATMOSFÆREMODELLER"	20
3. Atmosfærekemimodeller samt smog- og ozonprognoser	21
3.1 PROJEKTETS FORMÅL	21
3.2 INDLEDNING	21
3.3 RESULTATER.....	22
3.3.1 DACFOS.....	22
3.3.2 Operationelle ozonprognoser.....	22
3.3.3 Verifikation af DACFOS.....	23
3.3.4 Nyt kemiskema - MOON.....	25
3.3.5 Lokale ozonprognoser - Kalmanfiltering	25
3.4 KONKLUSION	26
3.5 REFERENCER TIL DETTE AFSNIT.....	27
4. Drivhuseffekt og klima	28
4.1 PROJEKTFORMÅL	28
4.2 RESULTATER.....	28
4.2.1 Indledning.....	28
4.2.2 Globale tidsudsnits-beregninger	29
4.2.3 Regional dynamisk nedskalering.....	31
4.3 KONKLUSION	35
4.4 REFERENCER TIL "DRIVHUSEFFEKT OG KLIMA"	36

Forord

I "Brundtland-rapporten", 1987, fra Verdenskommissionen for Miljø og Udvikling blev der for alvor fokuseret på begrebet "bæredygtig udvikling", dvs. en udvikling der tilfredsstiller nutidens behov uden at ødelægge fremtidige generationers muligheder for at tilfredsstille deres behov.

En forudsætning for "bæredygtig udvikling" er at energiforbruget reduceres og at forureningen nedbringes til et niveau som ikke skader omgivelserne. Derfor blev der i Danmark som i mange andre lande opstillet (nye, stærkere) målsætninger for reduktion af emissionerne af specielt kuldioxid, svovldioxid, kvælstofoxider, kulbrinter og partikler.

I "Regeringens Transporthandlingsplan for miljø og udvikling", 1990, samt i trafikplanen "Trafik 2005. Problemstillinger, mål og strategier", 1993, er miljømålsætninger for transportsektoren angivet.

Endvidere blev forskellige initiativer til opfyldelse af målsætningerne beskrevet. Et af disse initiativer var etableringen af en "Trafik- og Miljøpulje" fra 1992, og beslutning om øget forskning og statistikindsamling for at skabe bedre grundlag for fremtidige beslutninger på området.

I relation til disse overordnede planer og Trafikministeriets planer for udbygning af trafikken i hovedstadsområdet foreslog DMI i 1994 en styrket indsats vedrørende kortlægning, overvågning samt varsling af trafikens bidrag til luftforureningen. Indsatsen skulle omfatte både den lokale og den landsdækkende luftforurening fra trafikken og luftforureningens betydning lokalt og landsdækkende samt på europæisk og global skala, herunder også langsigtede effekter i form af klimapåvirkning. Forslaget fra DMI resulterede i at følgende fem projekter blev sat i gang med økonomisk støtte fra Trafikministeriets Trafikpulje:

- Overvågning af luftkvaliteten og trafikens bidrag til luftforurening (gennemført i samarbejde med Danmarks Miljøundersøgelser (DMU), Vejdirektoratet (VD) og Københavns Kommunes Miljøkontrol (MJK))
- Videreudvikling af atmosfæremodeller
- Videreudvikling af atmosfærekemimodeller
- Forudsigelse af ozon- og smogkoncentrationer
- Videreudvikling og kvalificering af modeller vedrørende drivhuseffekt og klima

Projektperioden var oprindelig fra 1995-98, men da 1995 generelt blev benyttet til etablering blev projektperioden udvidet til også at omfatte 1999.

Der er for de forskellige projekter udarbejdet flere rapporter samt videnskabelige artikler. I denne rapport vil der blive givet en kort sammenfatning af hovedresultater samt angivet referencer til hoveddokumenter. Kort resumeret har Trafikpuljen betydet at

- ⇒ der er gennemført værdifulde trafik kortlægninger for ca. 30 gader,
- ⇒ der er gennemført værdifulde BTX-målinger i København og Odense,
- ⇒ der er gennemført værdifulde målinger af CO, NO og NO₂ i Odense,
- ⇒ der er gennemført analyser af luftkvaliteten, der viser en klart nedadgående trend i den trafikskabte luftforurening,
- ⇒ DMI har kunnet videreudvikle DMI-HIRLAM,

- ⇒ DMI har påbegyndt udviklingen af en integreret vejrprognose- og spredningsmodel,
- ⇒ DMI har udviklet et atmosfærekemimodelsystem, Danish Atmospheric Chemistry Forecasting System, (DACFOS), med hvilket der bliver udarbejdet ozonprognoser for store dele af Europa,
- ⇒ DMI har udført vurderinger af globale og regionale klimaændringer som følge af øget drivhuseffekt.

Denne rapport er en syntese-rapport hvis væsentligste bidrag er hentet fra:

Vejdirektoratet, 2000: *Trafik og gadeluft i Danmark. Registrering og beregning for 1995-1998*. Rapport nr. 199.

Hertel, O., Berkowicz, R., Palmgren, F., Kemp, K. og Egeløv, A., 2000: *Overvågning af trafikens bidrag til luftforurening (TOV) - Målinger og analyser udført af DMU, Danmarks Miljøundersøgelser*. 28 s. - Faglig rapport fra DMU, nr. 316 (online). ([http://www.dmu.dk/1 viden/2 Publikationer/](http://www.dmu.dk/1_viden/2_Publikationer/)).

Christensen, O.B., 2000: *Drivhuseffekten og regionale klimaændringer*. Danmarks Klimacenter, DMI, Rapport 00-2.

Kiilsholm, S.: *Validation of DACFOS Surface Ozone Forecasts 1996-98 - Description of the new verification System and Model Improvement*. Tech. Report 00-05, DMI

Chenevez, J., 2000: *"Advection experiments with DMI-HIRLAM-TRACER."* DMI, Scientific Report 00-05.

Sattler, K., 1999: *"New high resolution physiographic data and climate generation for the HIRLAM forecast system"*, DMI, Technical Report, No. 99-11.

Deltagere i projekterne var:

Alix Rasmussen, FM	Wilhelm May , FK	Ole Hertel, DMU
Sissi Kiilsholm, FM	Knud E. Christensen, V	Ruwim Berkowicz, DMU
Christian Ø. Jensen, FM	Rasmus Feldberg, V	Finn Palmgren, DMU
Joachim Jacobsen, FM	Erik Wienberg, E	Elisabetta Vignati, DMU
Allan Gross, FM	Lars Andersen, O	
Jérôme Chenevez, FM	Peter Vester-Fabrin, O	Hans Bendtsen, VD
Henrik Svensmark, FM		Lars Ellebjerg Larsen, VD
	Jan Tønnesen, MJK	Lone Reiff, VD
Eigil Kaas, FK	Raymond Skaarup, MJK	Rene Andersen, VD
Ole Bøssing Christensen, FK	Gitte Ploug Lorenzen, MJK	

DMU: Danmarks Miljøundersøgelser

VD: Vejdirektoratet

MJK: Københavns Miljøkontrol

FM: Sektion for Meteorologi, Forsknings- og udviklingsafdelingen, DMI

FK: Sektion for Klima, Forsknings- og udviklingsafdelingen, DMI

V: Vejrtjenesteafdelingen, DMI

E: EDB-afdelingen, DMI

O: Observationsafdelingen, DMI

1. Overvågning af trafikens bidrag til den lokale luftforurening i Danmark (TOV)

1.1 Projektformål

Projektets formål var at udvikle et overvågningssystem for den trafikskabte luftforurening for løbende at kunne vurdere om gennemførelsen af forskellige tiltag og handlingsplaner til begrænsning af emissionerne fra trafikken medfører den ønskede forbedrede luftkvalitet. Udviklingen i luftkvaliteten skal beskrives på en overskuelig måde - ideelt med kun ét årligt indeks for luftkvaliteten i Danmark hvor variationer der skyldes andre kilder end trafikken og variationer i meteorologiske forhold, er frafiltreret. Det anses dog ikke for realistisk at udvikle ét fælles indeks for de mange forskellige stoffer og forskellige lokaliteter.

Projektdeeltagere var:

- Danmarks Meteorologiske Institut (DMI)
- Danmarks Miljøundersøgelser (DMU)
- Vejdirektoratet (VD)
- Københavns Kommunes Miljøkontrol (MJK)

Deltagerne har i fællesskab udarbejdet et forslag til et overvågningssystem [DMI, 1995].

1.2 Baggrund

Baggrunden for TOV-projektet som er blevet støttet af Trafikministeriets Trafikpuljen 1995-98, er Transporthandlingsplanen for Miljø og Udvikling [Trafikministeriet, 1990] og Trafik 2005 [Trafikministeriet, 1993].

I Transporthandlingsplanen er der opstillet generelle målsætninger for hvor meget transportsektorens samlede emissioner af forurenende stoffer skal reduceres frem til år 2030, og den nyere *Trafik 2005* fastholder disse målsætninger. Målsætningerne der havde 1988 som referenceår, var:

- kuldioxid-udslippet (CO_2) stabiliseres inden år 2005, og der skal ske en reduktion på 25% frem til år 2030,
- kvælstofoxid- og kulbrinte-udslippet (NO_x og HC) reduceres med mindst 40% inden år 2000, der skal ske en reduktion på 60% inden år 2010 og en yderligere reduktion frem til år 2030,
- partikel-udslippet i byerne skal halveres frem til år 2010, og der skal ske yderligere reduktion frem til år 2030,
- for kulilte, svovldioxid og bly (CO , SO_2 og Pb) er der ikke opstillet nogen direkte måltal for udslip idet svovldioxid-udslippet fra transportsektoren ikke er særligt betydningsfuldt, bly-udslippet over en årrække næsten vil forsvinde, som følge af katalysatorer til personbiler og små varebiler, og kulilte-udslippet vil blive reduceret med omkring 75% inden år 2010, også som følge af katalysatorer til personbiler og små varebiler.

Transporthandlingsplanens målsætninger er således udtrykt i form af udslipsbegrænsninger hvorimod de deraf følgende forventede forbedringer i luftkvaliteten ikke er eksplicit udtrykt. Trafikministeriet ønskede imidlertid at trafikens bidrag til luftforureningen skulle overvåges

med henblik på at vurdere om udviklingen går i den retning, som implicit ligger i handlingsplanens målsætninger.

Det er vigtigt at følge udviklingen i trafikens bidrag til luftforureningen idet trafikken står for ca. 40% af de totale NO_x-emissioner og over halvdelen af HC-emissionerne. Trafikken vurderes at være kilde til 70 – 80% af den lokale luftforurening; for CO er trafikken stort set den eneste kilde til forurening lokalt i gaderne.

Overvågningssystemet bygger på eksisterende luftkvalitetsmålinger, meteorologiske målinger og trafikmålinger samt nogle få supplerende målinger af luftkvalitet og en del yderligere trafikmålinger og -kortlægninger.

1.3 Indledning

I projektplanen er de grundlæggende processer der styrer luftkvaliteten, og problemstillingen med opstilling af et årligt indeks for forskellige stoffer på forskellige lokaliteter diskuteret. Grundlæggende bør et overvågningssystem baseres på fire elementer:

- 1) luftkvalitetsmålinger
- 2) trafikmålinger (kortlægninger)
- 3) meteorologiske data
- 4) analyser og modellering

For at opbygge et effektivt og bredt dækkende overvågningssystem bør målinger og beregninger af gadeluftkvaliteten supplere hinanden, og ideelt skal der være målestationer fordelt over hele landet med repræsentative målinger: i bygader (street canyons), i udkanten af de store byer, i mellemstore provinsbyer, i landsbyer med gennemfartstrafik og tæt ved større trafik anlæg (motorveje, broer) m.m.

ad 1) Måling af luftkvalitet er ressourcekrævende, og de eksisterende måleprogrammer kan ikke antages at være fuldt dækkende for udviklingen på landsplan. Specielt kan bemærkes at målingerne kun omfatter centrale gader i København, Odense og Ålborg, baggrundsstationer i de samme byer, samt landstationer i Lille Valby ved Risø og ved Keldsnor Fyr på Langeland. Da etablering af flere nye målestationer imidlertid lå udenfor projektets rammer, blev der kun gennemført en besked, men alligevel væsentlig udbygning af de allerede eksisterende måleprogrammer.

ad 2) Som en del af projektet blev der iværksat omfattende trafik-kortlægninger i 34 gader i otte forskellige byer af varierende størrelse i forskellige landsdele. Ved kortlægningen der bl.a. skulle omfatte samtlige gader i måleprogrammet for luftkvalitet, blev trafikmængde, trafikmønster m.m. fastlagt ved stikprøve-tællinger. Generelt vurderes trafikdata at give et godt grundlag for modelberegningerne og sammenligningen af disse. Desværre er det på grund af tekniske problemer ikke lykkedes at få brugbare tællinger for Jagtvej, København, hvilket svækkede projektet (især modeldelen) da de mest omfattende luftkvalitetsmålinger netop foretages på Jagtvej-stationen. Endvidere medførte omfattende vejarbejder eller trafikomlægninger i nogle gader at antallet blev reduceret til 30 gader.

ad 3) De eksisterende meteorologiske måleprogrammer anses for dækkende. Endvidere er der i nogle studier benyttet analyse-data fra meteorologiske vejrprognosemodeller (DMI-HIRLAM).

ad 4) Til analysering af data blev det besluttet at anvende og videreudvikle DMU's gadeluftmodel Operational Street Pollution Model (OSPM), at anvende Nordisk Beregningsmetode

for Bilavgasser (NBB) samt at udvikle og teste en mere simpel normaliseringsmodel ("vejrindeks"), der etablerer sammenhængen mellem meteorologiske parametre og luftkvalitet. Typiske parametre af betydning er vindhastighed og -retning, atmosfærens stabilitet, grænse-lagshøjde, solindstråling, temperatur og fugtighed. Sammenhængen afhænger af årstid samt tid på døgnet. Endvidere er der forskelle i vejrindeks for forskellige luftforurenende stoffer.

Etableringen af supplerende luftkvalitetsmålinger samt spoler i vejbaner til trafiktællingerne blev gennemført i løbet af 1995. Derudover indeholder projektet vurderinger af tilgængelige data for trafikken og luftkvaliteten for perioden 1985 - 1995.

1.4 Resultater

1.4.1 Måledata

I overvågningssystemet indgår luftkvalitetsdata fra det Landsdækkende Luftkvalitets Måleprogram (LMP) der drives af DMU for en række af landets kommuner og amter, data fra Hovedstadsregionens Luftovervågningsprogram (HLU) der drives af Københavns Kommunes Miljøkontrol, samt data fra supplerende målinger (TOV-luftkvalitetsmålinger). LMP og HLU supplerer hinanden i hovedstadsregionen således at tre LMP-målestationer indgår i overvågningen af hovedstadsregionens luftkvalitet, og tilsvarende indgår HLU-målestationer i det landsdækkende måleprogram.

Måleprogrammerne omfatter målinger i København, Odense og Ålborg samt to landstationer, én ved Lille Valby nær Roskilde og én ved Keldsnor Fyr på Langeland. I hver by er der opstillet mindst to målestationer - én i en trafikeret gade og én på et hustag i nærheden således at samspillet mellem den direkte luftforurening fra trafik i gaden og den generelle luftforurening i byområdet (bybaggrunden) kan belyses. Programmerne omfatter desuden meteorologiske målinger.

Lokalitet og program	type	Kemiske stoffer/forbindelser	Trafik og Meteorologi	Supplerende Målinger
Jagtvej, København LMP/SMP	gade	NO, NO ₂ , CO, SO ₂ , sod, BTX og O ₃	(Trafik)	BTX
H.C.Ø. Institutet, København	bybaggrund	NO, NO ₂ , O ₃ , SO ₂ og CO,	Met.	
H.C.Andersens Boulevard, HLU	gade	NO, NO ₂ , O ₃ , CO, SO ₂ , sod	Met.	
Bredgade, København, HLU	gade	NO, NO ₂ , CO og sod	Trafik	
Albanigade, Odense, LMP	gade	NO, NO ₂ og SO ₂ , BTX	Trafik	CO og BTX
Rådhuset, Odense, LMP	bybaggrund	NO, NO ₂ og O ₃	Met.	NO og NO ₂
Vesterbro, Aalborg, LMP	gade	NO, NO ₂ og SO ₂	(Trafik)	
Rådhuset, Aalborg, LMP	bybaggrund	O ₃	Met.	

Trafikmålinger og supplerende luftkvalitetsmålinger er finansieret af Trafikministeriets Overvågningssystem (TOV)

LMP: Det Landsdækkende Luftkvalitetsmåleprogram for luftkvalitet i danske byområder, drives af DMU for en række af landets kommuner.

SMP: Målinger under det Strategiske Miljøforskningsprogram (1992-96) som blev udført af DMU.

HLU: Hovedstadsregionens Luftovervågningsprogram, udføres af Miljøkontrollen i København

Tabel 1.1 Luftkvalitetsmålinger, meteorologiske målinger samt trafiktællinger hvoraf en del er anvendt i forbindelse med TOV-projektet.

Luftkvalitetsmålingerne i det Landsdækkende MåleProgram (LMP) for luftkvalitet og de supplerende målinger er gennemført efter planen, bortset fra mindre tekniske problemer.

Benzen-, toluen- og xylen- (BTX) målinger er foretaget både på Jagtvej i København og på Albanigade i Odense. Førstnævnte har kørt rutinemæssigt siden maj 1996 og sidstnævnte blev etableret i august 1997. Oprindeligt var det planlagt kun at måle BTX de to steder i kampagner, men ved at kombinere det med et andet af DMU's projekter, er det blevet muligt at gennemføre kontinuerlige målinger hvilket er af stor værdi for overvågningen da luftkvalitetsmålinger er basale i overvågningssystemet.

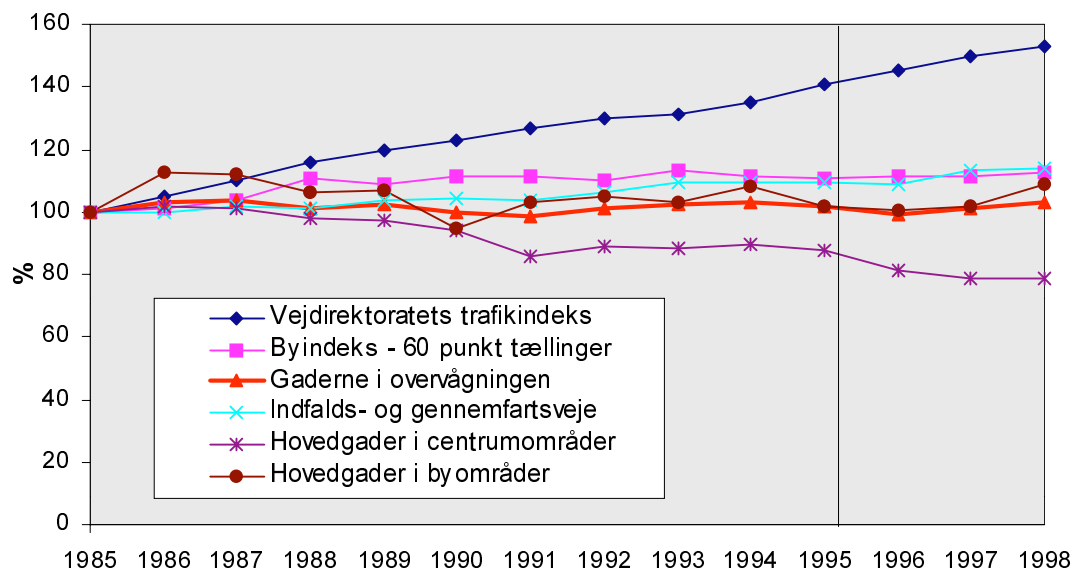
1.4.2 Trafikindeks

Trafiikkortlægninger og trafiktællinger der foretages af Vejdirektoratet, danner basis for opstilling af trafikindeks og er essentielle ved modelberegninger af luftkvaliteten i gaderne.

Trafiktællinger skulle efter planen gennemføres i 34 gader i 8 byer: København, Odense, Ålborg, Vejle, Næstved, Holbæk, Hillerød og Ikast. På grund af omfattende vejarbejder eller trafikomlægninger i nogle gader er antallet dog reduceret til 30. Gaderne der udgår, ligger i København, Ålborg, Næstved og Hillerød og er således jævnt fordelt på bykategorierne, men uheldigvis er der luftmålestationer i to af de gader der har måttet udgå, nemlig Jagtvej i København og Vesterbro i Ålborg.

I Bredgade i København er der foretaget kontinuerte, maskinelle trafiktællinger. I de øvrige 29 gader er der talt i ca. 5 uger pr. år. Der er foretaget manuelle tællinger med henblik på køretøjsfordeling i 32 gader samt hastighedsmålinger i 27 gader.

Foruden de nye målinger er ældre trafikdata blevet indsamlet således at der nu er trafikdata for gader tilbage til 1985. De ældre trafikdata (fra før 1995) har dog generelt ikke samme statistiske sikkerhed som de nyere data da tidligere data ofte er indsamlet på basis af én dags tællinger.



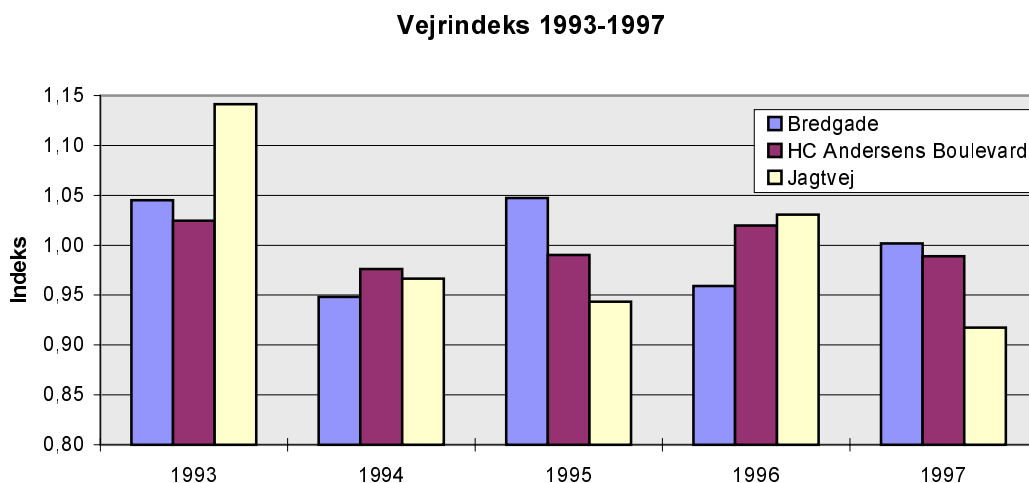
Figur 1.1 Trafikindeks for perioden 1985-98 for gaderne i overvågningen, totalt og opdelt efter gadetype, sammenholdt med "Vejdirektoratets trafikindeks", der beskriver udviklingen i den totale trafik.

Trafikindeks for perioden 1985-98 (Figur 1.1) viser, at trafikken på hovedgader i byområder udviser en stagnerende tendens, trafikken på hovedgader i centrumsområder udviser en fallende tendens, mens trafikken på indfalds- og gennemfartsveje kun udviser en svagt stigende tendens. Samlet set er trafikken på de 30 gader ikke steget i perioden 1985 til 1998. I den

samme periode er trafikken på landsplan steget med 50%. Den væsentlige forskel skyldes hovedsagelig at vejnettet er udbygget og at den mest markant trafikøgning i Danmark er sket på motorveje og regionale veje, og disse indgår ikke i overvågningssystemet.

1.4.3 Vejrindeks

Variationer i luftkvaliteten er stærkt afhængige af variationer i vejret, ikke kun fra dag til dag, men også fra år til år. Til belysning af dette har DMI udviklet modeller for et vejrindeks, der etablerer sammenhængen mellem meteorologiske parametre og luftkvalitet. De mest signifikante vejrparametre er vindhastighed og -retning, mens atmosfærens stabilitet, grænselagshøjde, solindstråling, temperatur og fugtighed kun har mindre betydning.



Figur 1.2 Vejrindeks for H.C. Andersens Boulevard, Jagtvej og Bredgade i København for perioden 1993-97. Indekset er baseret på den målte vindhastighed, vindretning i forhold til gadens retning og gaderummets opbygning.

Figur 1.2 viser et eksempel på vejrindeks beregnet for H.C. Andersens Boulevard, Jagtvej og Bredgade i København for perioden 1993-97. Indekset viser vejrets potentielle indflydelse på luftforureningen i gadeniveau. Det fremgår at der kan være store forskelle på de tre stationer, dog med 1994 som en undtagelse, og at variationerne for H.C. Andersens Boulevard er mindre end for de to andre stationer.

Vejret i 1993 bevirkede et højt vejrindeks, specielt for Jagtvej, hvilket også svarede til luftkvalitetsmålingerne (jf. Figur 1.4). Med et vejrindeks kan luftkvalitetsdata på en simpel måde korrigeres for variationer i vejret, på tilsvarende måde som der korrigeres for graddage ved opgørelser af varmeforbrug. Men det skal pointeres at de mere komplekse modelberegninger præsenteret i næste afsnit generelt giver en bedre forklaring af variationerne.

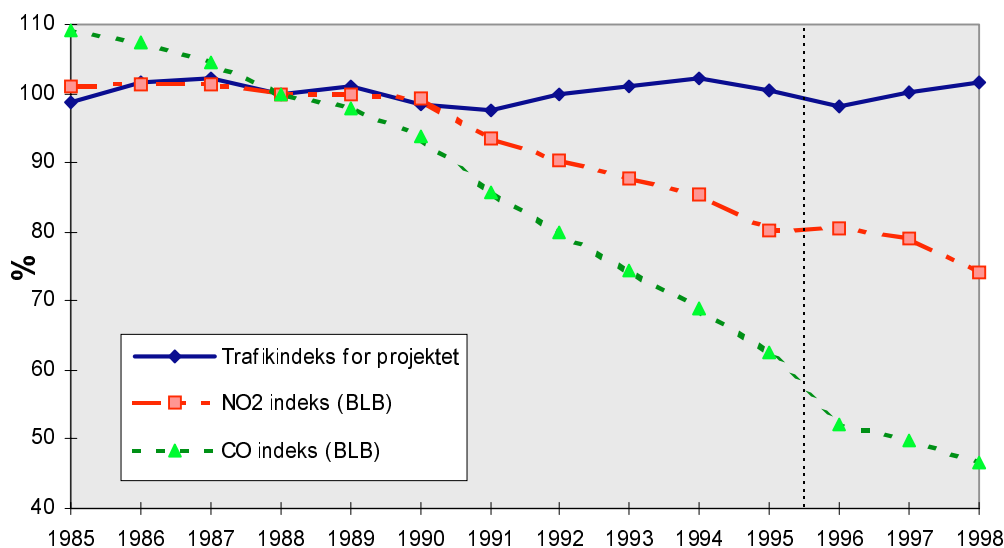
1.4.4 Luftkvalitetsindeks

Der eksisterer en del mere eller mindre avancerede modeller der kan beregne luftkvalitet ud fra trafiktællinger og trafikortlægninger. Nogle af disse modeller benytter standard meteorologiske data (gennemsnitsdata) mens andre benytter observerede meteorologiske data.

1.4.4.1 Beregnet ved anvendelse af BLB

En af de mere simple, men meget anvendte modeller, er den nordiske Beregningsmodel for Luftforurening i Bygader (BLB). Denne benytter standard meteorologiske data, og resultaterne

fra denne model er derfor upåvirket af variationer i vejret. BLB beregner koncentrationer af CO og NO₂, og det er således kun disse to stoffer der indgår i denne del af undersøgelsen. Dette er ikke optimalt set i lyset af den viden om og fokus på forureningen med blandt andet partikler som har præget debatten om trafikens forurening i de senere år.



Figur 1.3 Beregnet luftkvalitetsindeks ved anvendelse af BLB. Kurverne viser gennemsnittet for samtlige gader der indgår i overvågningsystemet. Stregen mellem 1995 og 1996 angiver skiftet mellem ældre og nyere trafikdata med større statistisk sikkerhed.

Resultater af luftkvalitetsberegninger for NO₂ og CO gennemført af Vejdirektoratet (Figur 1.3) viser at luftkvaliteten fortsat forbedres. Således er CO-niveauerne faldet støt med i gennemsnit 57% fra 1985 til 1998 mens NO₂-niveauerne er faldet med 27% i snit.

Forbedringerne i luftkvaliteten skyldes hovedsagelig at emissionerne fra de enkelte køretøjer er reduceret især ved indførelsen af katalysatorer på benzinbiler.

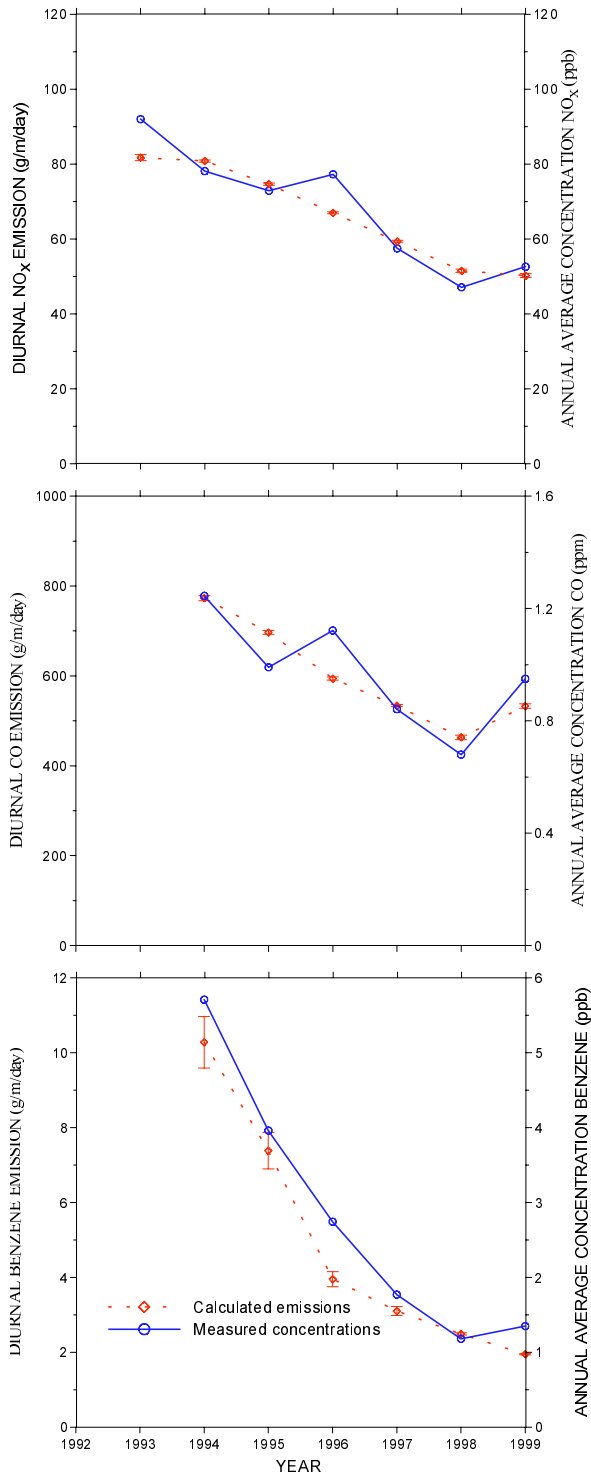
Både for CO og for NO₂ er der en rimelig god overensstemmelse mellem beregnede og målte værdier på de tre gader i undersøgelsen hvor der er luftmålestationer.

1.4.4.2 Beregnet ved anvendelse af OSPM

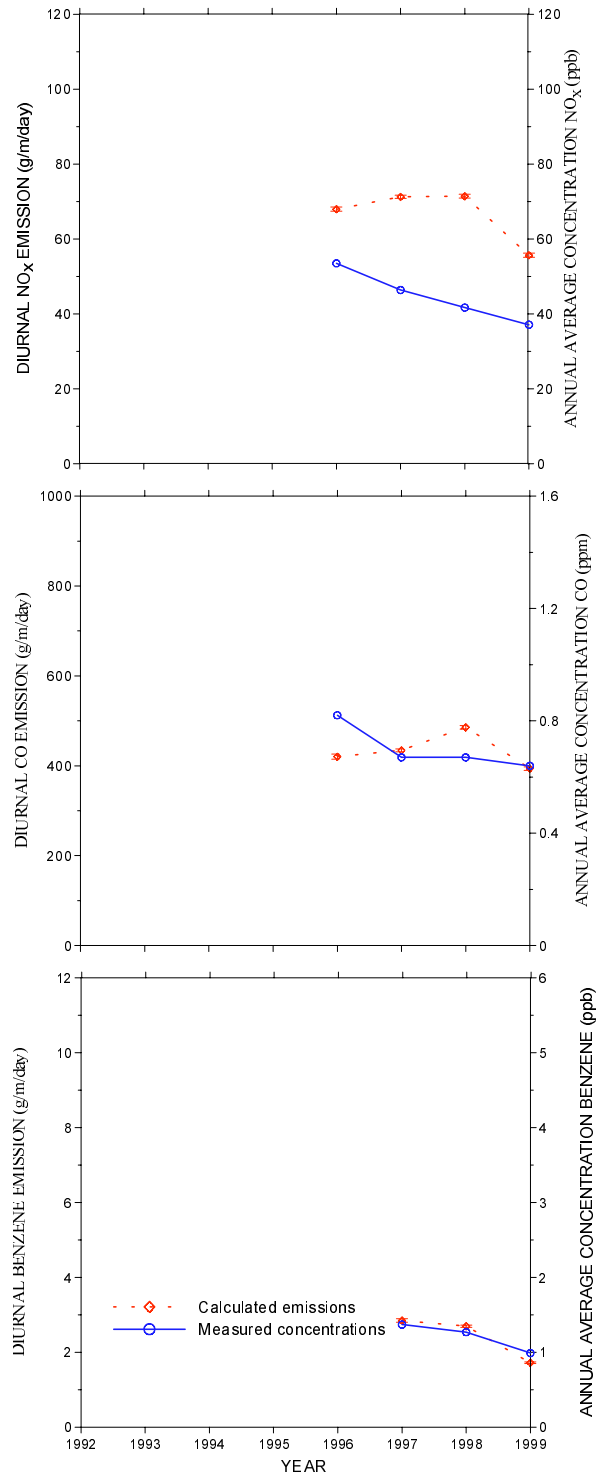
En mere avanceret model til beregning af luftkvaliteten er “Operational Street Pollution Model” (OSPM), udviklet af DMU. Denne model er baseret på atmosfærekemiske ligninger og kan både benytte modeldata og observerede data.

Ved at sammenholde modelberegninger med luftkvalitetsmålinger kan man regne sig frem til kildestyrken (emissionen) og på den måde bestemme udviklingen i kildens faktiske bidrag. Denne udvikling er upåvirket af de meteorologiske forhold. Anvendelsen af denne metode på trafikken er vist for Jagtvej, København (Figur 1.4), og for Albanigade, Odense (Figur 1.5).

Forskellen mellem målingerne i gaden og på tagstationen giver bidraget til luftforureningen fra trafikken i gaden. Dette bidrag for stofferne NO_x, CO og benzen er vist sammen med de beregnede emissioner for perioden 1993-1999 (CO- og benzenmålinger startede dog først i 1994). Variationen i de målte luftkoncentrationerne er påvirket af variationer i vejret i modsætning til de beregnede emissioner.



Figur 1.4 Udvikling i trafikens bidrag til luftforurening af NO_x, CO og benzen på Jagtvej, København udtrykt i form af gennemsnitlige døgnemissioner. Til sammenligning er vist de målte koncentrationer korrigeret for baggrundsforurening.

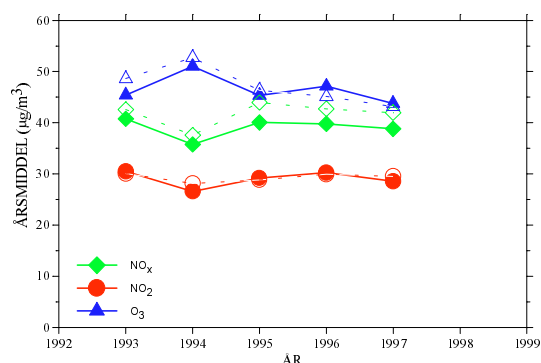


Figur 1.5 Som Figur 1.4, men for Albanigade, Odense.

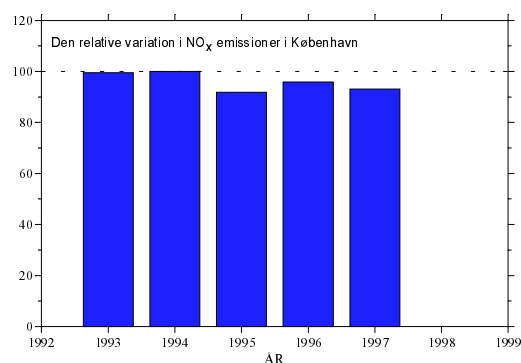
For Jagtvej ses det mest markante fald for stoffet benzen (en reduktion på ca. 80% i 1999 i forhold til 1994). Dette skyldes den løbende fornyelse af bilparken og den heraf følgende stigende andel af katalysatorbiler, men også en væsentlig reduktion af benzenindholdet i benzin i løbet af 1995. Noget mindre fald ses for CO (ca. 30% reduktion) og NO_x (ca. 40% reduktion). Sammenlignes de beregnede emissioner med de målte koncentrationer ses en generel god overensstemmelse, men det bemærkes at der specielt er afvigelser i 1996 og 1999 hvor mindre gode spredningsforhold bevirkede at de målte koncentrationer var relativt høje. For Albanigade er tidsserien kortere hvilket gør det vanskeligere at vurdere udviklingen.

En lignende metode er anvendt på den generelle luftforurening i København (baggrundsforurening). I Figur 1.6 er vist målinger af NO_x, NO₂, og ozon (O₃) fra bybaggrundsstationen i København. De observerede variationer fra år til år er små, og der kan ikke ses nogen tydelig tendens. Koncentrationerne af ozon i byområder ændrer sig modsat NO_x hvilket betyder at den lokale luftforurening fra trafikken medfører en faktisk reduktion af ozonluftforureningen i byområder. Totalt set giver trafikens luftforurening dog øgede i ozonkoncentrationer.

Modelberegningerne for perioden 1993-1994 (vist i Figur 1.6 med en stiplede linje) er foretaget med en trafikemissionsopgørelse udarbejdet af Vejdirektoratet i forbindelse med det Strategiske Miljøforskningsprogram 1992-1995. Beregningerne er udført med en uændret emission for samtlige år, og variationen i de beregnede koncentrationer skyldes derfor kun variationen i de meteorologiske forhold fra år til år. Ved at sammenholde de beregnede og de målte koncentrationer af NO_x kan man bestemme den relative variation af de gennemsnitlige emissioner i København.



Figur 1.6 Udvikling af målte og beregnede luftforureningskoncentrationer i Københavns bybaggrund. Modelberegningerne (stiplede linje) er foretaget med en uændret emission og afspejler derfor variationerne i vejret.



Figur 1.7 Udvikling i de gennemsnitlige NO_x emissioner i København bestemt ud fra sammenligning mellem målinger og modelberegninger.

Resultaterne er vist i Figur 1.7 hvor emissionen i 1994 er sat til 100%. Det ses at den gennemsnitlige reduktion af NO_x emissionerne fra trafikken i København er ret beskedent - mindre end 8%. Årsagen til at denne reduktion er væsentligt mindre end reduktionen af emissionerne fra trafikken i Jagtvej, er at mens trafikken i de mest trafikerede gader generelt er faldet er den samlede trafik i København formentligt steget. Desuden stammer et væsentligt bidrag til NO_x forureningen fra den tunge dieseltrafik. I modsætning til personbiltrafikken er der endnu ikke indført en effektiv emissionsbegrænsende teknologi for diesel biler. Det skal bemærkes at den tunge trafiks andel af trafikken på Jagtvej er lille.

1.5 Konklusion

Luftkvalitetsmålinger af kulilte, kvælstofoxider og benzen viser at luftforureningen fra trafikken i gader i København har været klart faldende fra 1993 til 1999.

Faldet i luftforurening fra trafikken i bygader i de senere år skyldes først og fremmest at udslippet fra især personbilerne er blevet reduceret i takt med den stigende andel af biler med katalysatorer. Specielt ses et meget kraftigt fald i forureningen med benzen fordi benzenindholdet i benzin solgt i Hovedstadsområdet er reduceret med omkring 40 % i perioden.

Der er ikke observeret et tilsvarende fald i den generelle (bybaggrunds-) forurening med fx kvælstofoxider. Det skyldes at den samlede trafik i København er steget, og at der er et væsentligt bidrag med kvælstofoxider fra den tunge trafik.

Samlet er trafikken i Danmark steget med 50% i perioden 1985 til 1998. I samme tidsrum var trafikken på hovedgader i byområder stagnerende, i hovedgader i centrumområder svagt faldende og på indfalds- og gennemfartsveje svagt stigende. Trafikindeks for samtlige gader i TOV-projektet var stort set konstant i hele perioden (ca. mellem 99 og 103).

Vejdirektoratets beregninger af luftkvaliteten baseret på de målte trafikdata og Beregningsmodel for Luftforurening i Bygader (BLB) viser for samtlige gadetyper at for NO₂ og CO er luftkvaliteten markant forbedret. Således er CO-niveauerne faldet støt med i gennemsnit 57% fra 1985 til 1998 mens NO₂-niveauerne er faldet med 27% i snit.

Beregninger med luftkvalitetsmodeller og modeller for vejrindeks gennemført af DMU og DMI viser, at de målte luftkvalitetsdata kan normaliseres, således at varierende meteorologiske forhold fra år til år frafilteres. Herved kan den reelle udvikling i luftkvaliteten vurderes. De udviklede metoder har vist sig velegnet til at bestemme trafikens bidrag til luftforureningen baseret på rutinemæssige luftkvalitetsmålinger, meteorologiske målinger og løbende trafiktællinger. Det må derfor anbefales at systemet bliver videreført.

1.6 Referencer til dette afsnit

Trafikministeriet, 1990: *Regeringens transporthandlingsplan for miljø og udvikling*.

Trafikministeriet, 1993: *Trafik 2005. Problemstillinger, mål og strategier*.

Vejdirektoratet, 1994: *Gadeluftkvalitet i Danmark - beregninger på 34 gader*, Rapport nr. 14.

Danmarks Meteorologiske Institut, 1995: *Aftale mellem Danmarks Meteorologiske Institut, Danmarks Miljøundersøgelser, Vejdirektoratet og Miljøkontrollen København vedrørende Trafikpuljeprojektet "Overvågning af luftkvaliteten og trafikens bidrag til luftforureningen"*. Notat.

Kiilsholm, S. and Rasmussen, A., 2000: *Trends of Air Pollution Normalised by a Simple Weather Index Model*. Tech. Report 00-14, DMI.

Vejdirektoratet, 2000: *Trafik og gadeluft i Danmark. Registrering og beregning for 1995-1998*. Rapport nr. 199.

Hertel, O., Berkowicz, R., Palmgren, F., Kemp, K. og Egeløv, A., 2000: *Overvågning af trafikens bidrag til luftforurening (TOV) - Målinger og analyser udført af DMU*, Danmarks Miljøundersøgelser. 28 s. - Faglig rapport fra DMU, nr. 316 (online). (<http://www.dmu.dk/1viden/2Publikationer/>).

2. Atmosfæremodeller

2.1 Projektformål

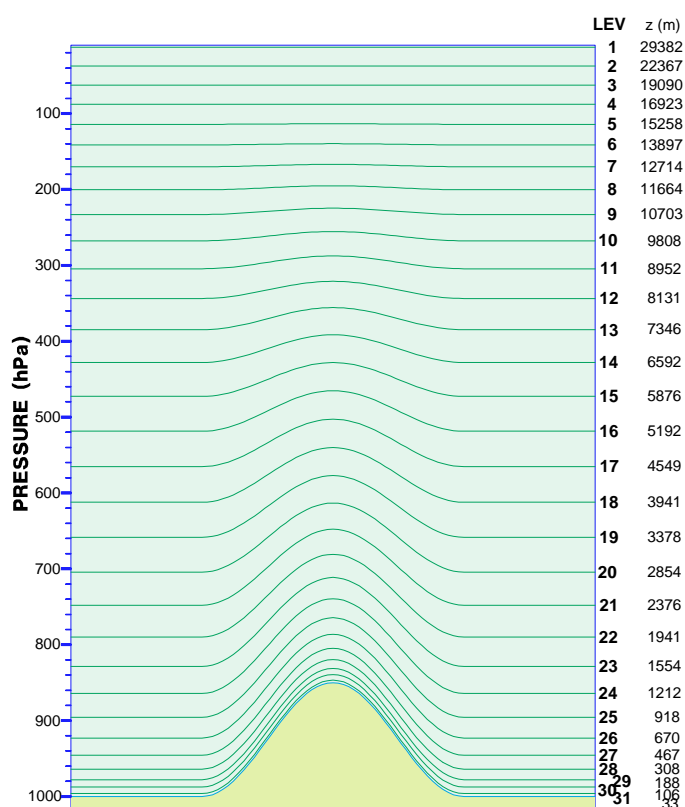
Projektets formål var at forbedre grænselagsparametriseringen i DMI's atmosfæremodel DMI-HIRLAM (DMI-High Resolution Limited Area Model), idet en mere nøjagtig forudsigelse af relevante meteorologiske parametre er en forudsætning for høj kvalitet af beregninger af luftforurening fra trafikken. Endvidere er der med støtte fra Trafikpuljen udviklet en første version af en integreret atmosfære- og spredningsmodel (DMI-HIRLAM-TRACER).

2.2 Indledning

HIRLAM-systemet er et avanceret numerisk vejrprognose-system bestående af forbehandling af data, analyser, initialisation, prognoser, efterbehandling af data og verifikation. HIRLAM blev oprindeligt udviklet i et internationalt samarbejde, som startede i 1985, mellem de meteorologiske institutter i de Nordiske lande og Holland. Senere har Irland, Frankrig og Spanien tilsluttet sig samarbejdet, og i dag er HIRLAM i operationel drift i flertallet af disse lande (Danmark, Norge, Sverige, Finland, Irland, Holland og Spanien). I Danmark blev DMI-HIRLAM sat i operationel drift i efteråret 1990.

HIRLAM er en hydrostatisk gitterpunktsmodel hvor de meteorologiske parametre vind, tryk, temperatur og fugtighed beregnes ud fra atmosfæreligninger (bevægelsesligninger, kontinuitetsligninger, termodynamiske ligninger, tilstandsligninger m.m).

Figur 2.1 og Figur 2.2 viser hhv. den vertikale opløsning og modelarealer for de forskellige versioner af DMI-HIRLAM. Det er specielt data fra DMI-HIRLAM-E og DMI-HIRLAM-D der benyttes til beregninger af spredning og luftforurening i Danmark.

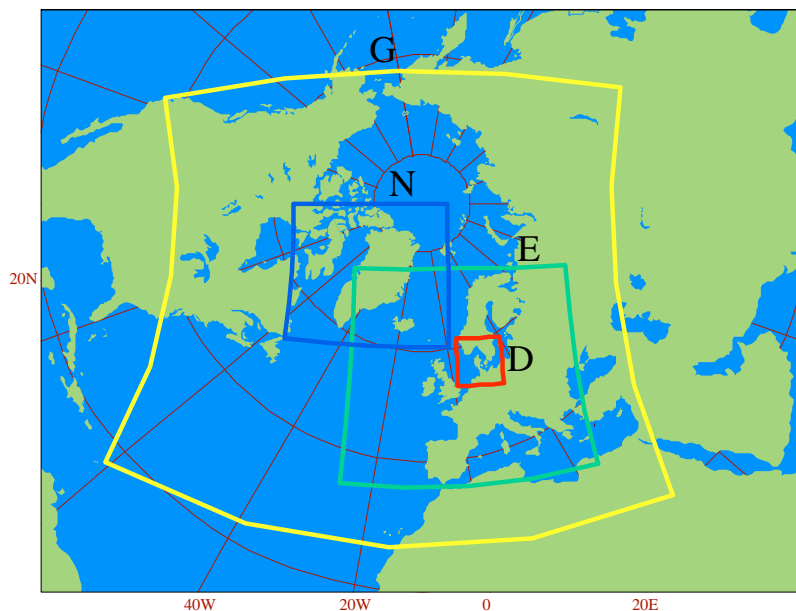


Figur 2.1 DMI-HIRLAM har p.t. 31 lag i atmosfæren og tre lag lige under jordoverfladen. De sidstnævnte lag, der tilsammen har en tykkelse på lidt under 1 meter, er nødvendige af hensyn til beregningen af jordoverfladens temperatur, fugtighed, vandindhold og sne-dybde.

DMI-HIRLAM har ikke tilsvarende lag i overfladen af oceanet, men oceanernes temperatur ved overfladen og fordampning fra oceanerne har afgørende betydning for vejrudviklingen.

Det fremgår at DMI-HIRLAM ikke p.t. har mange lag i "blandingslaget" - laget ved jordoverfladen hvor der sker god opblanding af luften - således er der fx kun 7 lag til at beskrive de nederste 1500 meter. Der er derfor planer om at udvide antallet af lag i nær fremtid hvilket vil give mulighed for mere præcise forudsigelser af relevante meteorologiske parametre.

Ved udviklingen af nye grænselagsparametriseringer er der også benyttet én-dimensionale modeller med meget høj opløsning.



Figur 2.2 Arealer for det operationelle DMI-HIRLAM system siden oktober 1997.

DMI's vejrmodelsystem består af modelversionerne DMI-HIRLAM-G, DMI-HIRLAM-E, DMI-HIRLAM-N og DMI-HIRLAM-D. Bortset fra beregningsområde og horisontal tæthed af beregningspunkter er modelversionerne ens. Afstanden mellem beregningspunkterne varierer fra ca. 45 km i G over 15 km i N og E til ca. 5 km i D. D og N er lokale modeller med høj opløsning for hhv. Danmark og Grønland, mens G og E er regionale modeller for hhv. Nordatlanten og Europa.

2.3 Resultater

Der er mange faktorer der har indvirkning på kvaliteten af de for luftforureningen relevante parametre (fx vindhastighed og vindretning, temperatur, stabilitet, grænselagshøjde, skydække og nedbør). I HIRLAM-samarbejdet er der således gennem de senere år blevet udført et stort arbejde specielt vedr. dataassimilation og nedbørdannelse. Med støtte fra Trafikministeriets Trafikpulje har det været muligt at fokusere på kvaliteten af parametre i grænselaget og opbygning af en første version af en integreret atmosfære- og spredningsmodel. Her vil der blive givet en kort sammenfatning af resultatet af dette arbejde. I referencerne (afsnit 2.5) er en mere uddybende gennemgang af resultater samt omfattende referencelister.

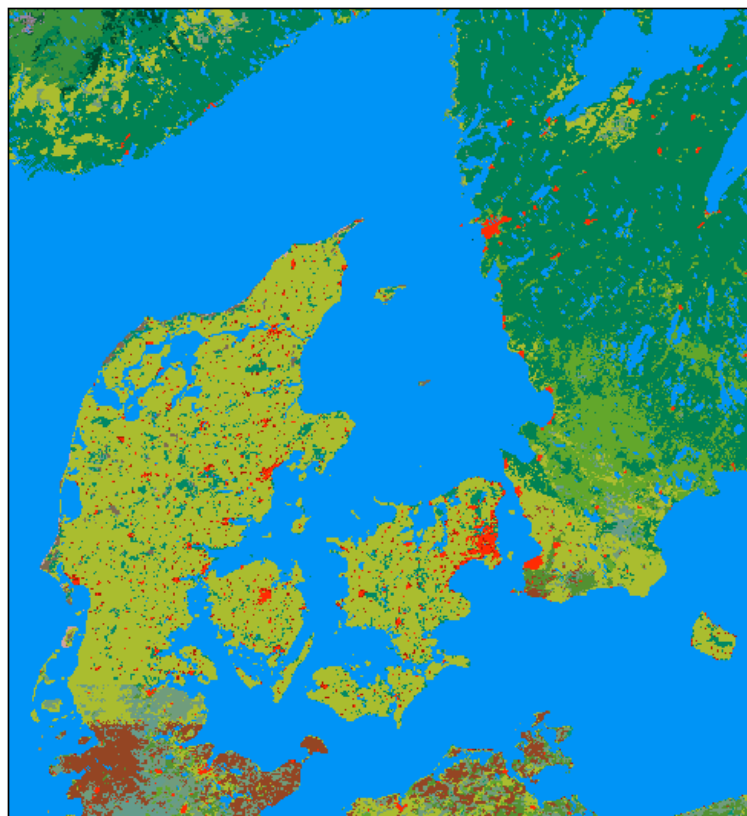
2.3.1 Nye overfladedata

Til beregning af de atmosfæriske grænselagsparametre benyttes såkaldte fysiografiske data der beskriver jordoverfladens beskaffenhed fx højde, albedo, ruhed, temperatur og fugtighed.

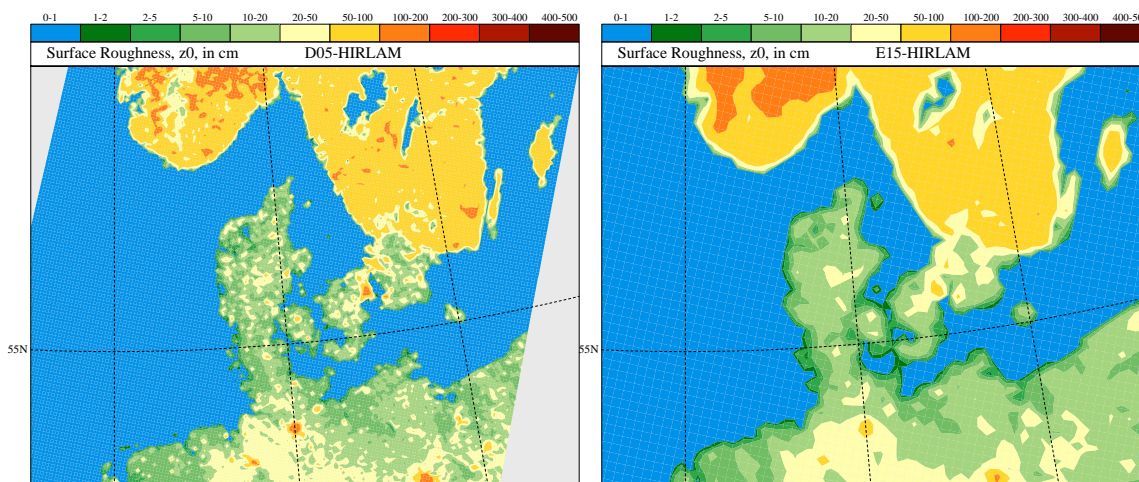
DMI har på basis af nye fysiografiske data med høj opløsning på ca. 1 km fra Global 30 Arc Second Elevation (GTOPO30), Global Land Cover Characteristics (GLCC) og Kort og Matrikstyrelsen (KMS) udarbejdet nye overfladedata til samtlige versioner af DMI-HIRLAM.

Figur 2.3 viser de nye højopløsnings fysiografiske data (landtyper) for Danmark, og tilsvarende ses i Figur 2.4 de beregnede overflade ruheder (z_0) for DMI-HIRLAM-D og DMI-HIRLAM-E der hhv. har 5 km og 15 km horisontal opløsning. Det fremgår, at specielt "E" modellen har for grov opløsning til beregning af detaljerede prognoser for meteorologiske

parametre i grænselaget mens "D" har mange detaljer med. Det skal bemærkes at "E" er en regional model for Europa, og for stor-skala spredningseksperimentet European Tracer EXperiment (ETEX) (se BOX 2.1 i afsnit 2.3.3) der blev gennemført i efteråret 1994, er der opnået bemærkelsesværdige resultater med DMI's spredningsmodel Danish Emergency Response Model of the Atmosphere (DERMA) ved anvendelse af nye DMI-HIRLAM-E data.



Figur 2.3 Klassificering af overfladetyper over Danmark ud fra GLCC-data og KMS-data. Bemærk, at der i legenden nedenfor kun er angivet et begrænset antal typer. I Modellen er der 21 forskellige landtyper.



Figur 2.4 Overflade ruhed (z_0) for DMI-HIRLAM-D og DMI-HIRLAM-E bestemt ud fra fysiografiske data med høj opløsning. "D" modellen er lokal model for Danmark med horisontal opløsning på ca. 5 km mens "E" er en regional model for Europa med ca. 15 km opløsning.

2.3.2 Nyt turbulensskema

Vigtige fysiske processer i atmosfæren foregår på en rumlig skala som er mindre end afstanden mellem atmosfæremodellens beregningspunkter. Disse såkaldte subgrid skala fysiske processer kan derfor ikke beregnes direkte i modellen. Deres virkning på atmosfæretilstanden i beregningspunkterne må derfor parametriseres hvilket betyder at deres effekt beregnes indirekte på grundlag af forskelle i atmosfæretilstanden mellem naboberegningspunkter og i visse tilfælde på grundlag af forskelle i en luftstøje fra bund til top i atmosfæren. Parametriseringen bygger på en kombination af teori og feltmålinger. Kravet til parametriseringen er, at den med stor nøjagtighed beregner effekten af de fysiske processer på subgrid skala under alle klimatiske forhold (dvs. fra tropisk til arktisk klima) og uanset om processerne finder sted tæt ved jordoverfladen eller højt oppe i atmosfæren.

De fysiske processer som parametriseres i DMI-HIRLAM, er: turbulens, overfladeprocesser, konvektion, skyer, nedbør og stråling. Gennem de seneste år er der lagt et stort arbejde i at forbedre parameteriseringen af flere af de ovennævnte processer. Det gælder bl.a. turbulens og overfladeprocesser.

Undersøgelser med DMI-HIRLAM har vist at arbejdet med at forbedre turbulensparameteriseringen er velbegrunderet. For eksempel har undersøgelser afsløret at vigtige detaljer i en orkanudvikling i betydelig grad formes af den benyttede turbulensparameterisering. Det gælder orkanens bane, dybde (dvs. minimum overfladetryk) og ikke mindst formen og styrken af orkanens vindfelt tæt ved overfladen.

Turbulens er navnet på en "kaotisk" strømning hvori der findes et meget stort antal interaktive hvirvler fra millimeter til kilometer størrelse. Strømningen i atmosfærens grænselag (ofte den nederste ca. en kilometer af atmosfæren) er næsten altid turbulent. Højere oppe i atmosfæren optræder turbulens i forbindelse med jetstrømme og bygeaktivitet. Turbulens har meget stor betydning for vejret. For eksempel transporterer turbulens typisk impuls, varme og fugtighed op og ned i atmosfæren 100.000 gange mere effektivt end de tilsvarende molekulære transportere.

Turbulensparameterisering bygger formelt på en analogi til de molekulære transportere af fx impuls, varme og fugtighed. Disse transportere er proportionale med hhv. vind-, temperatur- og fugtighedsgradienterne. Proportionalitetsfaktorerne kan i atmosfæren betragtes som konstanter. For impuls kaldes konstanten for den kinematiske viskositetskoefficient og for varme hedder konstanten den termiske diffusivitetskoefficient. De analoge koefficienter i turbulensparameteriseringen kaldes for hhv. eddy viskositeten og eddy diffusiviteten. En stor del af kompleksiteten i den turbulente strømning ligger gemt i eddy koefficienterne. Disse koefficienter varierer derfor meget i både tid og rum. Noget forenklet fremstillet er udfordringen i turbulensparameteriseringen derfor at beskrive eddy koefficienternes variation i tid og rum så nøjagtigt som muligt.

Turbulens kan i modsætning til molekylær varmetransport i visse tilfælde transportere varme fra et koldere til et varmere område. Dette kaldes for "counter-gradient" varmetransport. Denne effekt blev medtaget i det "ikke-lokale" turbulensskema der blev udviklet til DMI-HIRLAM i slutningen af 1990'erne. Skemaet blev indført operationelt ved DMI d. 23. februar 1999.

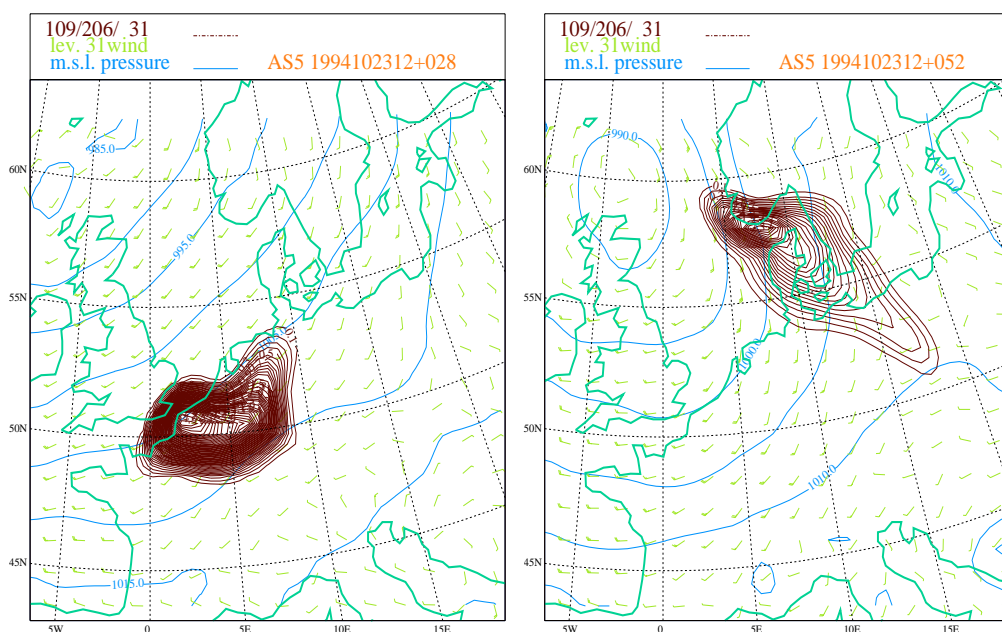
En anden vanskelighed er at beskrive turbulensen i atmosfærens grænselag og højere oppe i atmosfæren ved hjælp af de samme formler. For at løse dette problem er der blevet udviklet et nyt turbulensskema til DMI-HIRLAM, som beregner den turbulente kinetiske energi (TKE) på

grundlag af den turbulente kinetiske energiligning. Den beregnede TKE benyttes derefter i beregningen af eddy koeficienterne. TKE skemaet afløste det “ikke-lokale” skema i DMI’s operationelle modelsystem d. 29. September 1999.

2.3.3 DMI-HIRLAM-TRACER

Normalt er spredningsmodeller og vejrprognosemodeller adskilt, men med de stadig kraftigere computere er der i de senere år udviklet såkaldte integrerede modeller hvor spredningsmoduler er integreret i vejrprognosemodellen. Dette indebærer mange fordele og kan betyde mere præcise og detaljerede prognoser, men endnu er dette koncept beregningsmæssigt så krævende at de integrerede modeller kun anvendes i forskningen og i forbindelse med undersøgelser af specielle hændelser.

DMI har udviklet en første version af en integreret sprednings- og vejrprognosemodel, DMI-HIRLAM-TRACER, hvor spredningen af passive tracere er blevet inkluderet. Figur 2.5 viser spredningen beregnet for ETEX-1 hhv. 28 og 52 timer efter start. Generelt er der god overensstemmelse mellem beregninger og observationer.



Figur 2.5 Beregnede overflade koncentrationer for ETEX-1 hhv. 28 og 52 timer efter eksperimentets start med DMI-HIRLAM-TRACER.

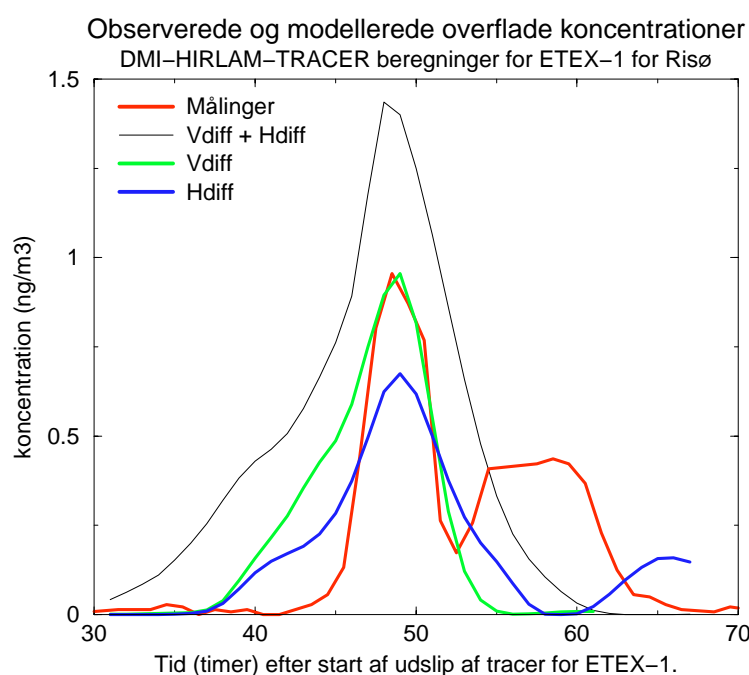
BOX 2.1: European Tracer EXperiment (ETEX) blev gennemført i oktober og november 1994, idet der i to omgange blev gennemført store kontrollerede udslip af sporstoffet PFC (Per Fluor Carbon). Det første udslip fandt sted fra d. 23.10.1994 16z og 12 timer frem, mens udslip nr. 2 skete fra d. 14.11.1994 15z og 12 timer frem. Begge udslip foregik i Bretagne.

DMI udførte real-time beregninger af sporstoffets udbredelse ved anvendelse af spredningsmodellen DERMA (Danish Emergency Response Model for the Atmosphere). En evaluering baseret på data fra de mange opstillede målestationer viste at blandt 28 real-time modeller fra Europa, USA, Canada, Japan og Israel fik DERMA en absolut topplacering.

ETEX var arrangeret af WMO, IAEA samt EU-kommissionen med det formål at fremskaffe kvalitetsdata til vurdering af spredningsmodeller specielt for langtransport af radioaktivitet.

Figur 2.6 viser de tilsvarende time-koncentrationer beregnet og målt ved Risø for ETEX-1 for forskellige værdier af diffusionen i DMI-HIRLAM-TRACER. Det fremgår at de bedste resultater opnås ved anvendelse af vertikal diffusion alene mens horisontal diffusion giver for lave værdier.

DMI-HIRLAM-TRACER vil blive videreudviklet til at inkludere kilder (emissioner, atmosfærekemiske reaktioner m.m.) og dræn (tør- og våddeposition, henfald, atmosfærekemiske reaktioner m.m.), så modellen mere realistisk kan beskrive spredningen af fx radioaktive stoffer og atmosfærekemiske stoffer



Figur 2.6 Beregnede overflade koncentrationer for ETEX-1 og målte koncentrationer ved Risø. De beregnede koncentrationer er for hhv. "Vdiff+Hdiff", der angiver vertikal + horisontal diffusion, "Vdiff" der angiver vertikal diffusion alene og "Hdiff" der angiver horisontal diffusion alene.

Det benyttede skema for den vertikale diffusion er udviklet med støtte fra Trafikpuljen.

2.4 Konklusion

Kvaliteten af DMI's operationelle prognosesystem DMI-HIRLAM er forbedret ved flere ændringer gennem de senere år, således er der indført højere opløsning samt forbedrede fysiske parametriseringer, nye fysiografiske data samt nye grænselagsparametriseringer. Arbejdet med de to sidstnævnte har været støttet af Trafikpuljen.

De indførte ændringer har medført markante forbedringer af forudsigelser af fx stabilitet, vindhastighed og -retning samt de vertikale profiler af temperatur og fugtighed i den nederste del af atmosfæren hvilket er af speciel stor betydning for spredningsberegninger. En yderligere fordel ved den nye grænselagsparametrisering er at beregninger af grænselagshøjden - som er en fundamental størrelse for atmosfærens spredning af luftforurening - er blevet en integreret del af DMI-HIRLAM-modellen.

Udviklingen af DMI-HIRLAM-TRACER hvor atmosfæremodel og spredningsmodel bliver integreret, er startet med støtte af Trafikpuljen. Foreløbige resultater viser at et integreret modelsystem vil have mange anvendelsesmuligheder.

2.5 Referencer til "Atmosfæremodeller"

Chenevez, J., 2000: *"Advection experiments with DMI-HIRLAM-TRACER."* DMI, Scientific Report 00-05.

Sørensen, J.H., Rasmussen, A., Ellermann, T. og E. Lyck, 1998: *Mesoscale Influence on Long-range Transport; Evidence from ETEX Modelling and Observations*, Atmos. Environ. **32**, 4207-4217

Sass, B. H., Nielsen, N. W., Jørgensen, J.U., 2000: *"The operational DMI-HIRLAM system, 2nd rev. ed."* DMI Technical Report, 99-21

Sattler, K., 1999: *"New high resolution physiographic data and climate generation for the HIRLAM forecast system"*, DMI, Technical Report, No. 99-11.

3. Atmosfærekemimodeller samt smog- og ozonprognoser

3.1 Projektets formål

Projektets formål var at udvikle og implementere et atmosfærekemisk modelsystem der muliggør beregning af regionale ozon- og smogprognoser for et vilkårligt punkt i Europa, samt at udvikle et system til forudsigelse af lokale koncentrationer af smog og ozon.

3.2 Indledning

Det danske smogberedskab for NO₂ og SO₂ blev oprettet i efteråret 1988 med deltagelse af Miljøstyrelsen, Danmarks Miljøundersøgelser (DMU), Københavns Miljøkontrol (MJK), Sundhedsstyrelsen og DMI. Beredskabet blev tiltrådt af Miljøministeren d. 10. oktober 1988 på grundlag af en indstilling fra Miljøstyrelsen. DMI er ansvarlig for udarbejdelse af prognoser mens DMU og MJK står for observationer af luftforureningen.

Som følge af EU-direktiv 92/72/EØF vedr. luftens indhold af ozon ved overfladen blev beredskabet i foråret 1994 udvidet til også at omfatte ozon. Ifølge direktivet skal medlemsstaterne ved overskridelse af visse tærskelværdier træffe de nødvendige foranstaltninger til at offentligheden underrettes, fx via radio, fjernsyn eller aviser, bl.a. om forudsigelse af udviklingen i ozonkoncentrationerne, det berørte område og varigheden af episoden.

Tærskelværdierne er:

Stof	tærskelværdi
ozon, O ₃	180 µg/m ³ (information)
ozon, O ₃	360 µg/m ³ (advarsel)
kvælstofdioxid, NO ₂	350 µg/m ³ (information)
svovldioxid, SO ₂	350 µg/m ³ (information)

Overskridelse af informationsniveauet, 180 µg/m³, for ozon sker almindeligvis et par gange om året mens koncentrationerne af SO₂ og NO₂ ikke har oversteget de fastsatte grænser siden beredskabets start i 1989. Advarselsniveauet for ozon på 360 µg/m³ forekommer ikke i Danmark.

De tre stoffer der indgår i beredskabet, er fundamentalt forskellige. SO₂ opstår overvejende ved afbrænding af olie og kul og kunne tidligere give anledning til problemer specielt om efteråret og vinteren i tilfælde af svage vinde og temperaturinversioner i lav højde. Denne vejr-situation er samtidig præget af diset eller tåget vejr og af høje koncentrationer af andre luftforurenende stoffer, fx sodpartikler, idet både den horisontale og vertikale spredning er lille. I dag er koncentration af SO₂ generelt meget lav, og i de tilfælde hvor koncentrationerne nærmer sig de benyttede grænseværdier, er fænomenet enten lokalt, fx i forbindelse med en lokal røgfane, eller et mere landsdækkende problem hvor forurenede luft fra Øst- eller Mellem-europa spredes op over Danmark.

NO₂ er typisk et produkt fra kraftværker og fra trafiksektoren, dels direkte fra bilernes udstødning, dels ved omdannelse af NO til NO₂. Normalt vil NO₂ kun give anledning til problemer i eller nær de større byer idet NO₂ ikke transporteres over store afstande da det forholdsvis hurtigt vil indgå i kemiske omdannelser eller deponeres på jordoverfladen.

Luftforurening med ozon (nær jordoverfladen) er et forholdsvis nyt problem i Danmark og optræder, modsat den øvrige luftforurening, om foråret og sommeren i solskinsvejr med høje temperaturer. Endvidere gælder specielt for ozon at de højeste koncentrationer normalt måles i landdistrikter idet koncentrationen af ozon i byområder reduceres ved kemiske omdannelser med udstødningsgasser fra trafikken. Gennem de senere årtier har der været en generel stigning i ozonkoncentrationen hvilket har skabt en større opmærksomhed om problemet. Stigningen skyldes hovedsagelig den øgede trafikmængde idet udstødningsgasserne ganske vist kan bevirke lokalt reducerede ozonkoncentrationer i byområder, men set over et større område medfører trafikken en stigning i ozonkoncentrationen.

Høje koncentrationer af ozon kan have skadelige effekter på mennesker og planter.

3.3 Resultater

3.3.1 DACFOS

DMI har i løbet af projektperioden udviklet et operationelt prognose-modelsystem for overfladeozonkoncentration over Europa. Systemet er baseret på en kobling af en kemisk model og DMI's 3D Lagrange'ske transportmodel. Den kemiske model er fra det europæiske samarbejde om grænseoverskridende luftforurening European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP), og er en meget anvendt kemisk model. Prognosesystemet benytter analyse- og prognosedata fra DMI's numeriske vejrprognosemodel DMI-HIRLAM.

Hele systemet kaldes Danish Atmospheric Chemistry FOrecasting System (DACFOS).

DACFOS er et såkaldt fotokemisk trajektoriemodelsystem. Princippet i systemet er at der for et vilkårligt udvalgt punkt, receptorpunkt, først beregnes hvor luftmassen som til et givet tidspunkt befinder sig over receptorpunktet, kommer fra, dvs. at der foretages en trajektorieberegning tilbage i tiden, hvorefter atmosfærekemiske beregninger udføres.

De atmosfærekemiske beregninger tager udgangspunkt i startpunktet for trajektorierne hvorfra man går frem til receptorpunktet. Undervejs optages emissioner af kemiske stoffer, og de kemiske omdannelser beregnes under anvendelse af kemimodulet fra EMEP MSC-W idet relevante meteorologiske parametre som solstråling, temperatur, nedbør m.m. fra DMI-HIRLAM indgår.

Beregninger foretages for 70 kemiske stoffer for hvilke ca. 130 kemiske reaktioner indgår. For hver beregning tages hensyn til afsætning af stofferne på jorden samt udvaskning pga. nedbør.

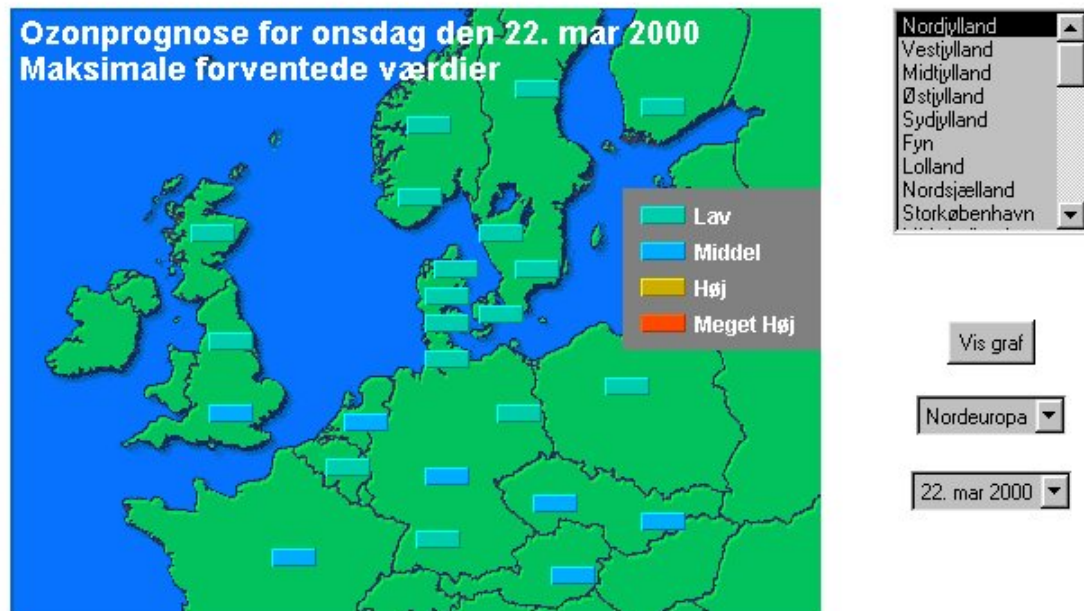
3.3.2 Operationelle ozonprognoser

DACFOS systemet blev fuldt operationelt i 1997 med beregninger for et stationsnet bestående af 32 stationer over Europa, heraf 11 danske (jf. Figur 3.1). Der beregnes prognoser for ozon og en række andre stoffer 48 timer frem fire gange i døgnet baseret på data fra DMI-HIRLAM (00, 06, 12 og 18 UTC). Prognoserne er siden juni 1998 blevet offentliggjort på Internettet (www.dmi.dk) hvilket har fungeret uden større problemer.

Ozonprognoser



Prognose for atmosfærens ozonindhold ved jordoverfladen



Alle tidsangivelser er i dansk lokaltid.
Prognoseerne er et automatisk produkt og må tages med forbehold.
Yderligere oplysninger om ozon kan findes under "Forskning og udvikling".

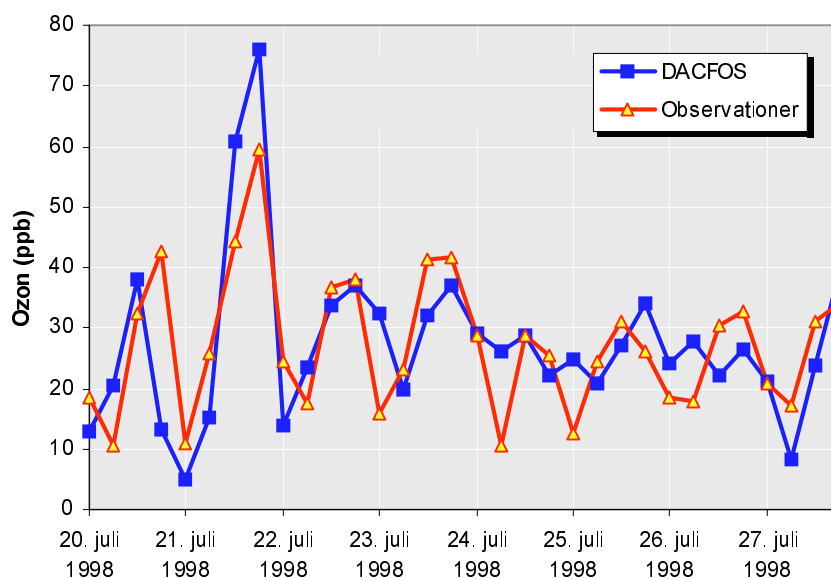
Ozonkoncentration ved jordoverfladen

Meget høj	over 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Høj	120 - 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Middel	60 - 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$
Lav	Under 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Figur 3.1 Ozonprognoser offentliggøres på DMI's Internet server (www.dmi.dk). Her ses et eksempel på de maksimale forventede værdier for Nordeuropa onsdag d. 22. marts 2000. Der er også mulighed for at se et Danmarkskort med 11 stationer. Endvidere kan der for de forskellige stationer optegnes grafer der viser udviklingen i ozonkoncentrationer to døgn frem i tiden.

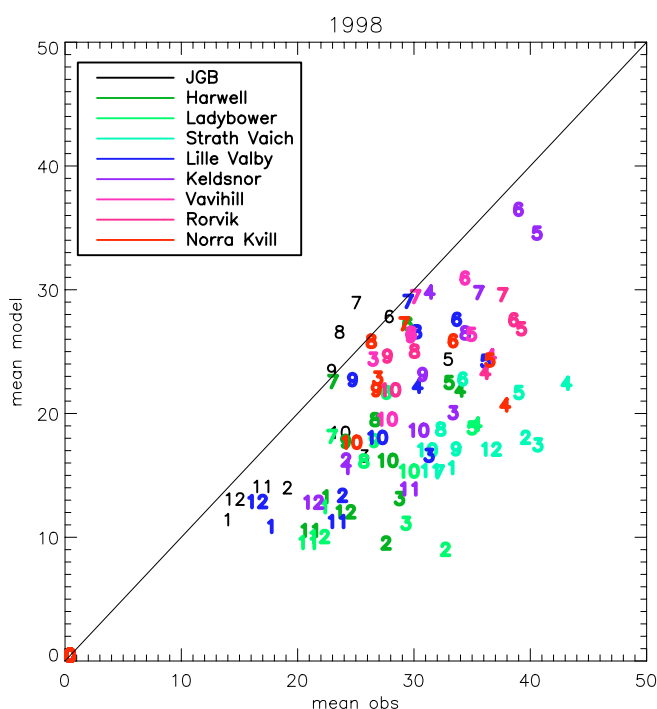
3.3.3 Verifikation af DACFOS

Verifikation af DACFOS baseret på overfladeozondata fra Jægersborg viser at der generelt er en rimelig god overensstemmelse mellem modelforudsigelser og observationer, jf. Figur 3.2, der viser en tilfældig periode fra juli 1998. En omfattende verifikation er givet i referencerne i afsnit 3.5.



Figur 3.2 Eksempel på DACFOS-ozonprognoser for Jægersborg d. 20.-27. juli 1998 sammenholdt med observationer. (1 ppb svarer ca. til $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

Til yderligere validering af DACFOS er der udviklet et automatisk system til hjemtagning af real-time ozon-observationer fra Storbritannien og Sverige over Internettet. Disse data har gjort det muligt at validere modelkonceptet på et langt bredere grundlag, specielt hvad angår ekstreme ozonepisoder der ikke er så hyppige i Danmark. Verifikationerne har medført nogle ændringer i modelkonceptet hvilket kun har haft mindre betydning for de beregnede koncentrationer for dansk område hvorimod der er sket store forbedringer for stationer fx i Storbritannien.

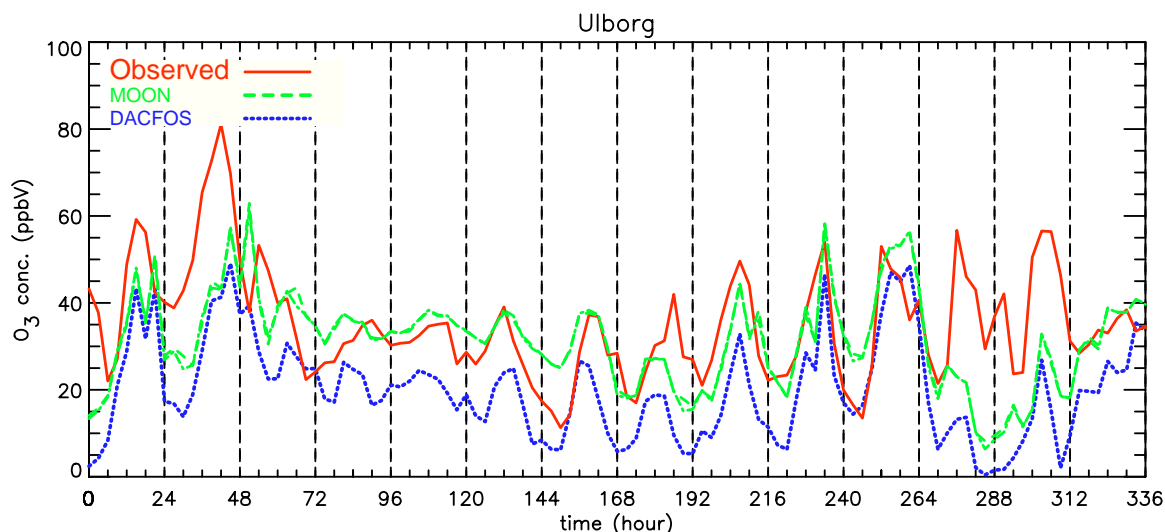


Figur 3.3 Middel observerede og beregnede ozonkoncentrationer (DACFOS) for 1998 for de forskellige måneder for danske stationer (Jægersborg, Lille Valby og Keldsnor), britiske stationer (Harwell, Ladybower, Strath Vaich) og svenske stationer (Vavihill, Rorvik og Norra Kvill). x og y-akse er i ppb svarende til ca. $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Verifikationer baseret på overfladeozon-data fra Danmark, Storbritannien og Sverige viser at DACFOS generelt forudsiger for lave koncentrationer specielt for de britiske stationer (markeret med grøn farve). Årsagerne til de for lave værdier kan skyldes flere faktorer, fx fejl i emissionerne, baggrundskoncentrationer, kemiskemaet m.m.

3.3.4 Nyt kemiskema - MOON

DMI har udviklet et nyt kemiskema, MOON (Multi-trajectory Original Ordinary-differential-equation Numerical box). Skemaet er udviklet i samarbejde med amerikanske forskere og er baseret på kemi-modellen fra Regional Atmospheric Chemistry Mechanism (RACM). Verifikation af dette system (jf. Figur 3.4) viser markante forbedringer i forhold til det operationelle system baseret på EMEP kemiskemaet. Det nye system der er mere beregningskrævende, forventes sat i operationelt drift i løbet af 2000.



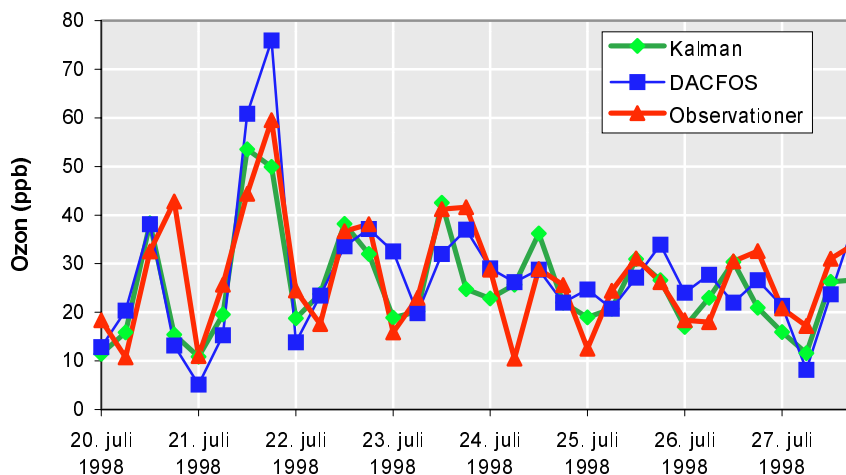
Figur 3.4 Observerede og modellerede ozonkoncentrationer for Ulborg for perioden 11. august til 25. august 1995. (1 ppb svarer ca. til $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)

3.3.5 Lokale ozonprognoser - Kalmanfiltrering

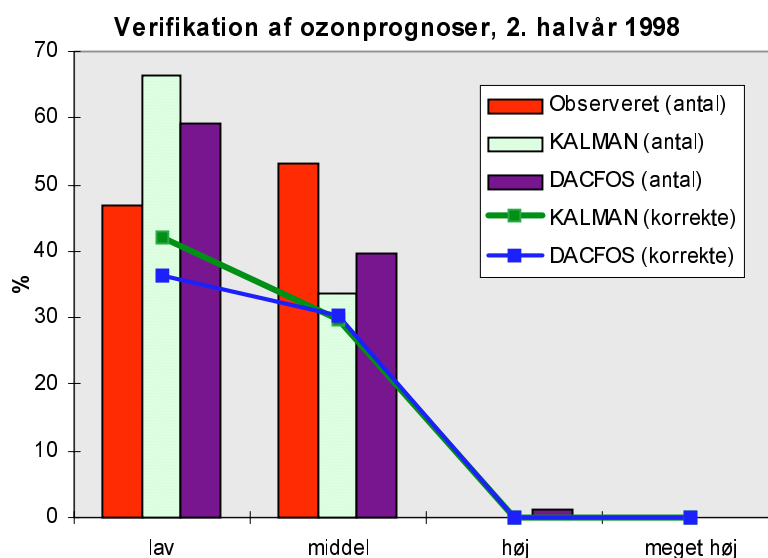
For at beskrive de lokale variationer i ozonkoncentrationerne bedre er der udviklet en statistisk efterbehandling af DACFOS-resultaterne ved brug af et såkaldt Kalmanfilter. Kalmanfiltreringssystemet justerer automatisk DACFOS-prognoserne i henhold til observerede luftkvalitetsdata og prognoser af meteorologiske parametre fra DMI-HIRLAM. Denne statistiske efterbehandling vil dog alene kunne gennemføres for stationer hvorfra der er adgang til real-time måledata.

Figur 3.5 viser et eksempel på ozonprognoser beregnet af DACFOS og med Kalmanfiltreringsmetoden. Det fremgår at variationerne for Kalmanozonprognosen bedre svarer til de observerede variationer - specielt kan bemærkes d. 21. juli, hvor DACFOS forudsiger alt for høje værdier med op til ca. 76 ppb mens observationerne kun viste ca. 60 ppb og Kalmanprognoserne var op til ca. 54 ppb.

Validering over en længere periode viser at Kalmanfiltreringen generelt medfører mere præcise prognoser. Figur 3.6 viser resultater af en verifikation af +24 timers ozonprognoser for Jægersborg 2. halvår 1998 i de fire klasser "lav", "middel", "høj" og "meget høj" (jf. figur Figur 3.1). Det fremgår at Kalmanprognoserne har en højere andel korrekte prognoser end DACFOS (72% mod 67%). Endvidere fremgår det at observationer kun forekommer i klasserne "lav" og "middel" (hhv. 47% mod 53%).



Figur 3.5 Eksempel på +24 timers ozonprognoser (DACFOS og Kalman) for Jægersborg d. 20.-27. juli 1998 sammenholdt med observationer.



Figur 3.6 Verifikation af +24-timers ozonprognoser for 2. halvår 1998.

Søjlerne viser hhv. observeret antal samt Kalman og DACFOS prognoser i de forskellige klasser angivet i % af totalt antal; fx er der for "observeret" forekommet 46.8 % tilfælde i klassen "lav" og 53.2% i klassen "middel" og nul procent i de to øverste klasser.

Kurverne viser antal rigtige prognoser i de forskellige klasser angivet i % af totalt antal prognoser, fx er der for Kalman 42.1 % rigtige prognoser i klassen "lav" og 29.9% rigtige prognoser i kategorien "middel" hvilket totalt giver 72% rigtige Kalman-prognoser.

3.4 Konklusion

DMI har i løbet af projektperioden udviklet et operationelt prognose-modelsystem, Danish Atmospheric Chemistry FOREcasting System (DACFOS). Systemet er baseret på en kobling af en kemisk model (EMEP MSC-W's oxidant model) og DMI's 3D Lagrange'ske transportmodel. Prognosesystemet benytter analyse- og prognosedata fra DMI's numeriske vejrprognosemodel DMI-HIRLAM.

Med DACFOS er det muligt at beregne regionale ozon- og smogprognoser for et vilkårligt punkt i Europa. Verifikation af DACFOS viser at der generelt forudsiges for lave ozonkoncentrationer. DMI har udviklet et nyt kemiskema kaldet MOON i samarbejde med førende

amerikanske forskere. MOON er baseret på kemi-modellen fra Regional Atmospheric Chemistry Mechanism (RACM). Verifikationer af dette system viser markante forbedringer i forhold til det operationelle system baseret på EMEP kemiskemaet. Det nye system forventes sat i operationel drift i løbet af 2000.

DMI har udviklet et informationssystem til Internettet hvor ozonprognoser kan ses for 32 stationer over Europa, heraf 11 danske. Prognoserne opdateres fire gange i døgnet.

Endvidere har DMI udviklet et Kalmanfilteringsystem til forudsigelse af lokale ozonkoncentrationer baseret på DACFOS ozonprognoser og meteorologiske prognosedata fra DMI-HIRLAM. Dette system giver generelt bedre prognoser end DACFOS.

3.5 Referencer til dette afsnit

Chenevez, J.: *Kalman Filtering of DACFOS for Ozone Forecasts*. Tech. Report 98-15, DMI.

Chenevez, J.: *Kalman Filtering of DACFOS. First Verification Report. Period July - December 1998*. Tech. Report 00-04, DMI.

Chenevez, J.: *Kalman Filtering of DACFOS. Verification Report for 1999*. Tech. Report 00-10, DMI.

Jensen, M. H., Rasmussen, A., Svensmark, H. and Sørensen, J. H.: *Danish Atmospheric Chemistry Forecasting System (DACFOS)*, Tech. Report 96-3, DMI.

Gross, A.: *Surface Ozone and Tropospheric Chemistry with Applications to Regional Air Quality Modeling*. PhD Thesis, Scientific Report, No. 00-03, DMI.

Kiilsholm, S.: *Validation of DACFOS Surface Ozone Forecasts 1996-98 - Description of the new verification System and Model Improvement*. Tech. Report 00-05, DMI

4. Drivhuseffekt og klima

4.1 Projektformål

Formålet med dette projekt var at gennemføre en grundig undersøgelse af de mulige regionale og lokale klimaændringer for Danmark samt for Færøerne og Grønland som følge af øget drivhuseffekt.

4.2 Resultater

4.2.1 Indledning

Til at undersøge mulige klimaændringer benyttes normalt globale klimamodeller samt forskellige nedskaleringsteknikker til beregning af regionale og lokale klimaændringer.

I klimamodeller beskrives dynamikken af hele atmosfæren som et sæt af værdier for lufttryk, temperatur, vind og fugtighed i fastlagte højdeniveauer og fastlagte gitterpunkter. Klimamodelberegningerne tager udgangspunkt i en basistilstand som kan være fra fortid, nutid eller fremtid, og på grundlag af fundamentale fysiske ligninger samt en række tilnærmelser og empiriske sammenhænge beregnes udviklingen af vejret frem i tiden. Beregningerne skal normalt dække meget lang perioder - flere årtier - så den statistiske usikkerhed ved beregning af klimaparametre bliver lille.

Ved konsekvensberegninger anvendes normalt koblede modeller hvor også oceanerne og deres vekselvirkning med atmosfæren beskrives gennem vindens træk på vandet, havoverfladetemperatur, nedbør, fordampning m.m.

Resultater fra de globale koblede klimamodeller er vigtige for mange forskellige former for konsekvensberegninger, men det er imidlertid problematisk at bruge de direkte resultater da de globale modelberegninger, trods en meget stor computerindsats, har relativt grov opløsning.

Derfor benyttes der forskellige nedskaleringsteknikker hvormed oplysninger fra de globale koblede modeller med grov opløsning kan udnyttes til at skaffe viden om lokale klimaændringer. DMI har igennem de seneste år benyttet tre typer af nedskalering af resultater fra globale koblede atmosfære-ocean-modeller (Ocean-Atmosphere General Circulation Models, OAGCM'er):

a) Der er udført globale tidsudsnits-beregninger hvor der i en kortere periode (her 2×30 år) udføres mere detaljerede beregninger med en global atmosfære-klimamodel med høj opløsning idet oceanbetingelser (havtemperatur og havisudbredelse) tages fra en mere grovmasket OAGCM-model hvor klimaet beregnes 100 år frem eller mere med stigende mængder drivhusgasser. Normalt vælges tidsudsnittet omkring nutid, fordobling af atmosfærens kuldioxid indhold eller tredobling af atmosfærens kuldioxid indhold. Her er benyttet nutid og en tredobling.

b) Der er udført regional dynamisk nedskalering hvor en regional klimamodel (Regional Climate Model, RCM) køres i en meget høj opløsning for et udvalgt område. Disse modeller får oceandata fra fx en OAGCM eller et felt baseret på observationer. Endvidere kræves data til randen (udkanten af modelarealet), og disse fås normalt fra en mere grovmasket model - fx fra en OAGCM, fra en global atmosfære-klimamodel eller fra en regional model med større udstrækning. Dynamisk nedskalering giver en direkte beregning af klimavariabel i meget høj

opløsning, men er bundet af den foreskrevne storskalacirkulation fra den model der giver randbetingelser og af de foreskrevne havtemperaturer.

c) Der er endelig udført statistisk nedskalering. Denne teknik udnytter at en lokal klimavariabel, som fx temperaturen ved en bestemt målestation, normalt er ret godt bestemt ud fra felter der har en stor udstrækning og derfor er beskrevet godt i en lavtopløst OAGCM, fx positionen af lavtryk bestemt ud fra mønsteret af overfladetryk.

Beregningsmæssigt er statistisk nedskalering meget billigere end dynamisk nedskalering. Det er dog problematisk at anvende statistiske relationer der er udledt af observationer i det nuværende klima, direkte i et scenario idet det ikke er sikkert at de statistiske relationer kan overføres til fremtidige forhold. De fysiske principper der styrer en dynamisk klimamodel, anses derimod for at være almene.

Her vil kun resultater fra de to førstnævnte metoder blive omtalt. Alle simuleringer beskrevet her benytter IPCC's IS92a scenario for udslip og drivhusgasser.

4.2.2 Globale tidsudsnits-beregninger

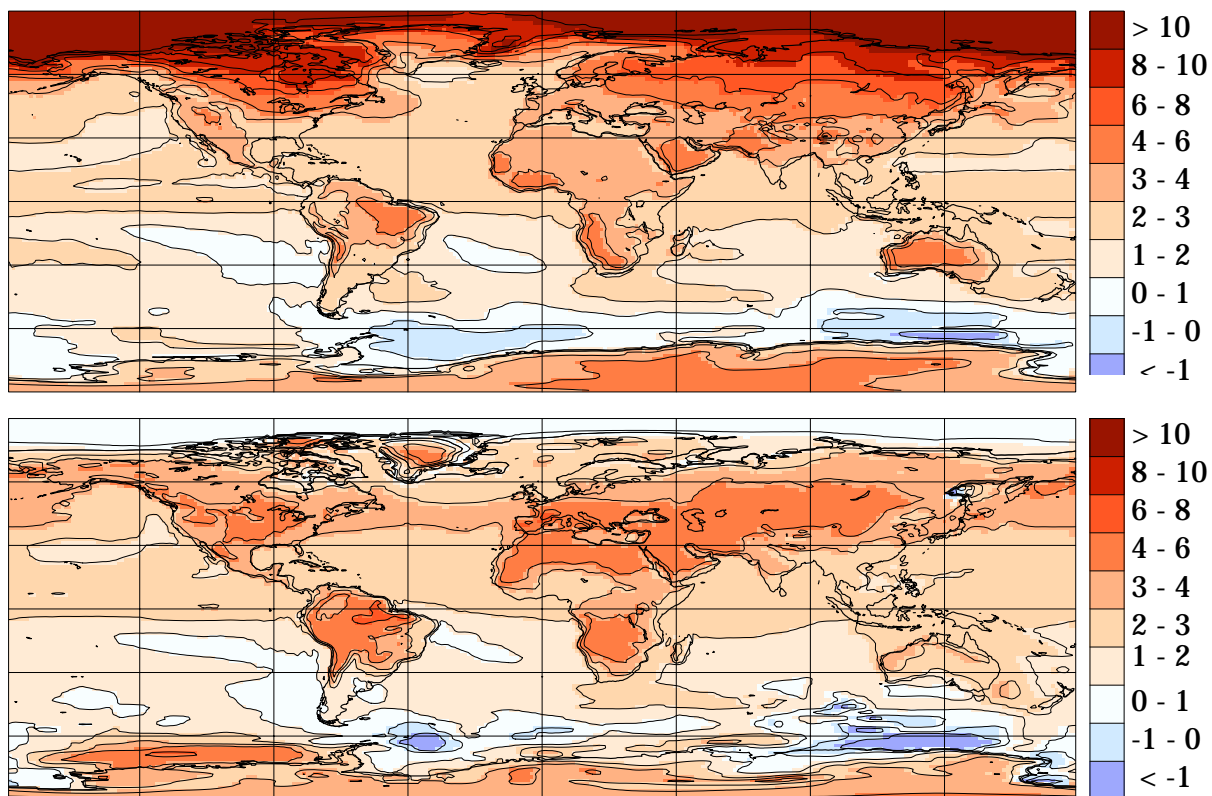
Der er udført simuleringer over klimaændringer med den globale model ECHAM4 i ca. 125 km opløsning. Denne simulering er blandt de første i verden med så detaljeret opløsning der samtidig dækker hele 2×30 år. Beregningerne er udført med væsentlig flere horisontale gitterpunkter end der normalt benyttes i globale klimamodeller. Simuleringerne indeholder derfor også detaljer og ekstremer på lille geografisk skala som ellers ikke ses i globale klimamodeler.

Der er i begge perioder benyttet oceanbetingelser (havtemperaturer og havisudbredelse) fra en simulering med en relativt grovmasket koblet model (ECHAM4(T42)/OPYC) der beskriver atmosfære, oceaner og havis. I denne koblede simulering blev mængden af drivhusgasser gradvist øget fra koncentrationen observeret i førindustriel tid til 1990 og derefter ifølge et scenario (IPCC's IS92a) for fremtidige udslip af CO₂.

Den første 30-årsperiode i den detaljerede simulering svarer til klimaet omkring 1990, og den anden svarer til ca. 2075. Der er brugt de samme varierende koncentrationer af drivhusgasser i den detaljerede beregning som i den mere grovmaskede koblede model.

Figur 4.1 viser forskellen i simuleret temperatur (°C) mellem det drivhusopvarmede klima omkring 2075 og det nuværende klima. Det ses at der om vinteren er store temperaturstigninger i det arktiske område. Dette hænger bl.a. sammen med en smeltning af havisen om sommeren og med at vinterhavisen først etableres ud på vinteren i det simulerede varmere klima. Når is og sne forsvinder, vil jordoverfladen reflektere mindre sollys tilbage til atmosfæren og dermed blive yderligere opvarmet; denne selvforstærkende mekanisme er tydelig at se i langt de fleste klimamodelberegninger. Der ses også betydelige temperaturstigninger over Canada og Sibirien. Både sommer og vinter ses flere områder med store stigninger over land - bl.a. i Brasilien. Dette hænger især sammen med en udtørring af jordoverfladen i det varmere klima.

Også nedbøren udviser væsentlige forandringer ifølge simuleringerne (ikke vist her). Der er således en generel tendens til forøget nedbør på høje breddegrader og en tilsvarende reduktion i nedbøren i subtropene. I tropene ses både fald og stigninger.



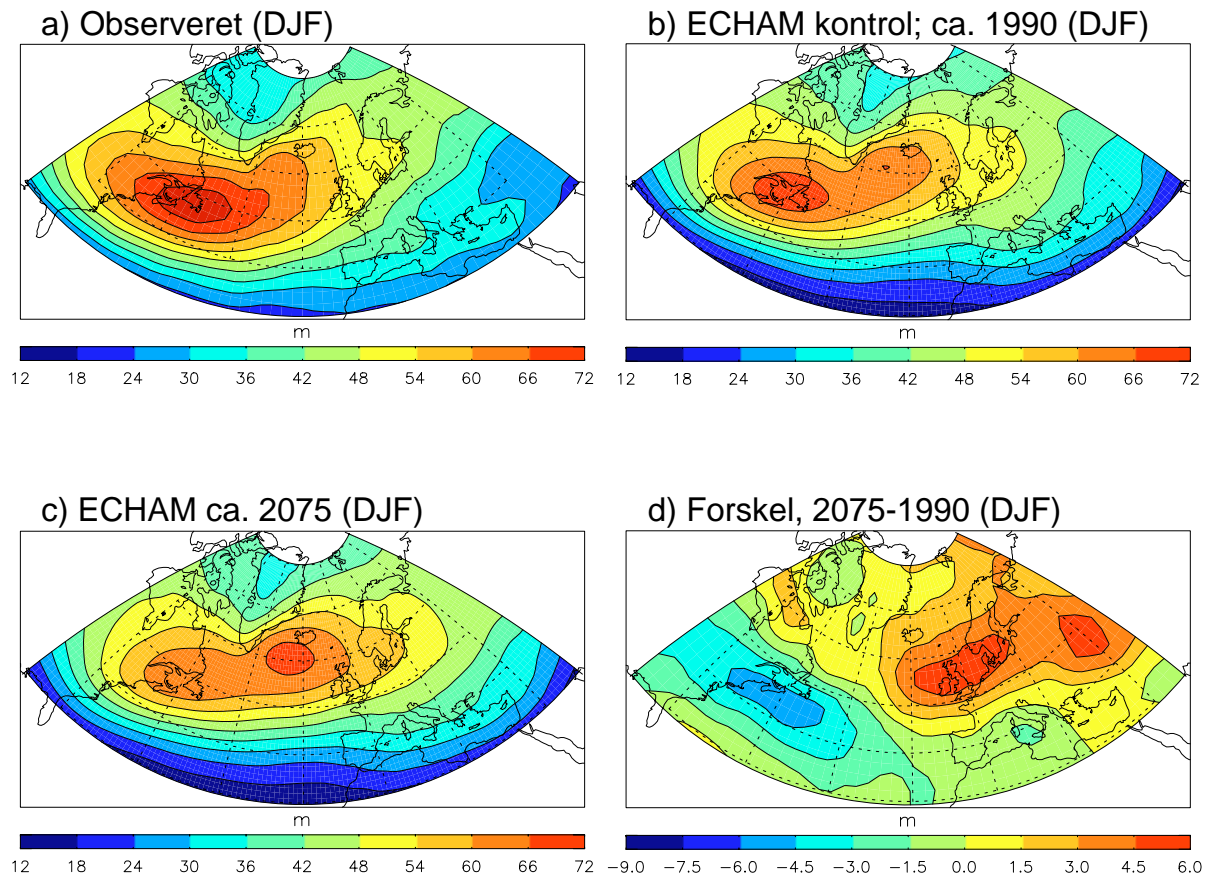
Figur 4.1. Forskel i simuleret temperatur (°C) mellem det drivhusopvarmede klima omkring 2075 og det nuværende klima. Figuren viser forskelle i lufttemperatur nær ved overfladen i december, januar og februar (øverst) og i juni, juli og august (nederst). Figuren er baseret på 30 års tidsudsnit-beregninger udført ved Danmarks Klimacenter med modellen ECHAM4(T106).

4.2.2.1 Stormaktivitet over Nordatlanten

De ovenfor omtalte globale tidsudsnit-beregninger viser at områderne med kraftig stormaktivitet over det nordlige Atlanterhav rykker lidt mod øst i forbindelse med forøget drivhuseffekt. Det betyder at vi blandt andet i Danmark og nordøst herfor kan forvente en vis stigning i hyppigheden og styrken af storme i løbet af de næste 50 år. Der vises i Figur 4.2 en indikation af dette. Størrelsen der plottes, er variabiliteten af 500 hPa fladens højde på tidsskalaer karakteristiske for lavtryk (2-6 dage). Et højt tal viser at der har været kraftig lavtryksaktivitet i den relevante periode. Figuren viser for vinterperioden: Den observerede størrelse; klimamodelens bud på det nuværende klima; dens bud på klimaet omkring 2075; klimaændringssignalet, altså forskellen mellem de to forrige størrelser. Signalet viser at de baner som lavtryk følger, vil nå længere østpå i fremtiden end de normalt gør nu.

Denne konklusion har til dels været opnået tidligere ved beregninger på andre klimacentre i verden. Ulempen ved disse lidt ældre beregninger er dog at de er udført med en grov detaljeringsgrad, der ikke tillader beskrivelse af stærke storme med lille geografisk udstrækning.

De nye beregninger fra DMI/DKC er af stor betydning i forbindelse med studier vedrørende konsekvenserne af en forøget drivhuseffekt. Beregningerne og betydningen for bølge og stormflodsaktivitet vil blive analyseret nærmere i de kommende år.



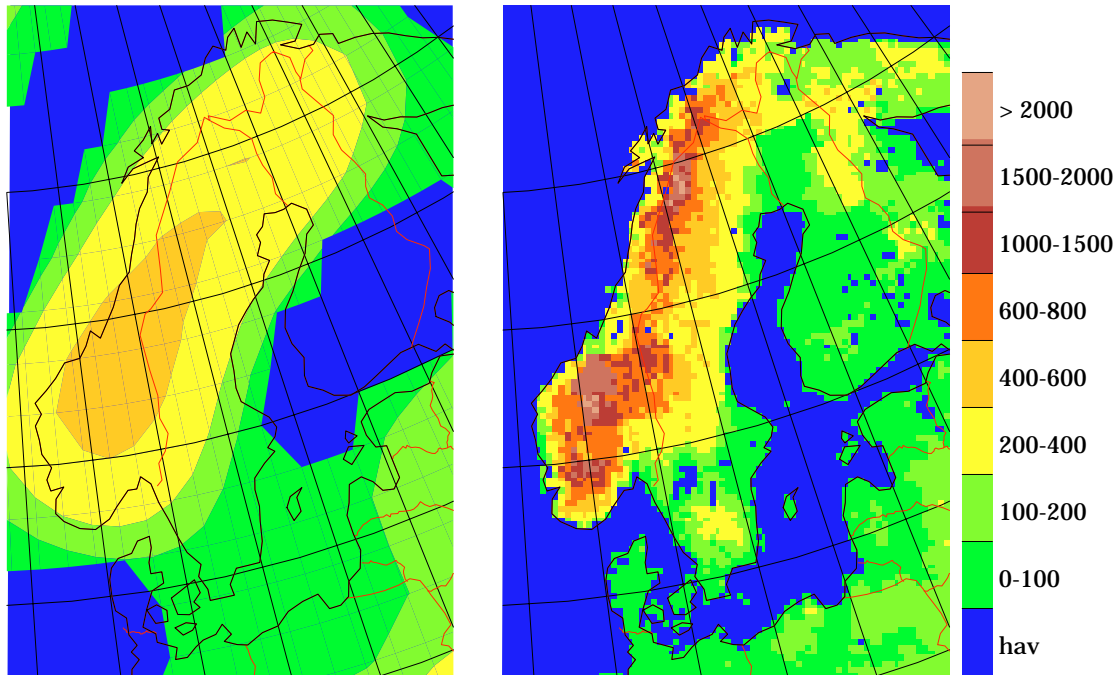
Figur 4.2 Fordelingen af stormaktivitet om vinteren. Værdien er høj hvis der på en tidsskala af nogle dage har været en stærk variation af højden af 500 hPa fladen hvilket er udtryk for passager af kraftige lavtryk. Blå farver indikerer relativt svag stormaktivitet, og orange stærk aktivitet. Øverst til venstre ses den observerede stormaktivitet; øverst til højre resultatet af kontrolkørslen med ECHAM(T106); nederst til venstre resultatet af scenariet svarende til år 2075; nederst til højre ses forskellen mellem 2075 og kontrol. Bemærk, at der i den sidste delfigur benyttes en anden farveskala.

4.2.3 Regional dynamisk nedskalering

I forbindelse med et internationalt samarbejdsprojekt og med støtte fra Trafikministeriets Trafikpulje er der udført detaljerede simuleringer af klimaændringer i Skandinavien med den regionale klimamodel HIRHAM4.

Simuleringerne er udført som en to-trinsberegning. Først er den regionale model kørt for et område dækkende Europa og en del af Atlanterhavet med ca. 55 km opløsning idet rand- og oceanbetingelser er fra den grovmaskede koblede model ECHAM4/OPYC. Derefter er resultater fra den regionale klimamodel med 55 km opløsning blevet benyttet som randbetingelser til en beregning med en endnu højere opløsning, ca. 19 km, for et område dækkende Skandinavien.

Simuleringerne indeholder derfor detaljer på meget lille geografisk skala der ikke engang anes i GCM-simuleringen, jf. højdekort (Figur 4.3), for de to forskellige beregninger. Da der midles over meget mindre arealer, vil ekstremværdier blive beskrevet meget bedre i den højopløste model.

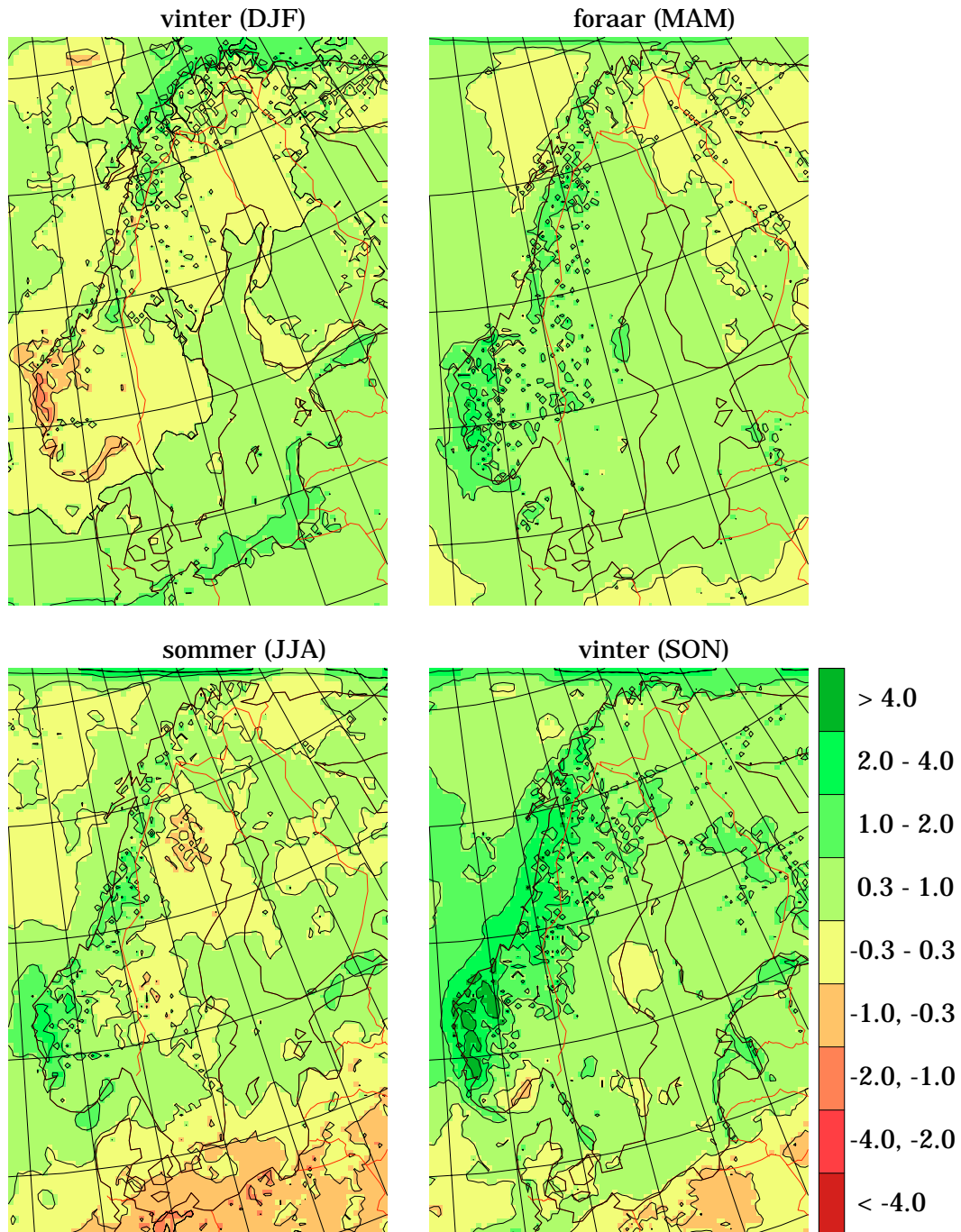


Figur 4.3 Højdekort for to forskellige klimamodeller. Venstre: Den grove GCM ECHAM4(T42). Højre: Den regionale klimamodel HIRHAM4 med 19 km opløsning.

Der er udført to detaljerede simuleringer hver på 10 år - den ene omkring 1990 med det nuværende atmosfærisk indhold af drivhusgasser og den anden omkring 2075 med en tredobling af koncentrationen af drivhusgasser.

For temperaturen (ikke vist her) giver den detaljerede simulering en generel opvarmning på omkring 4°C. Denne ændring er ret jævnt fordelt over området. Opvarmningen er størst om vinteren og om natten, og den gennemsnitlige temperaturforskel mellem nat og dag mindskes. Den højere detaljeringsgrad i den regionale simulering påvirker kun temperaturændringerne lidt - de er stadig ret ensartede over hele området.

Betragtes derimod forskellige parametre i vandbalancen, er der tydelige forbedringer. I GCM modellerne ses de norske fjelde kun som et stort plateau på 400-600 meter. Derfor regner det i de grovere modeller ikke nær nok i fjeldområderne i Norge ligesom for meget nedbør falder på den anden side af fjeldene, således også over Danmark. Med den højere opløsning opnås en langt mere realistisk nedbørfordeling.



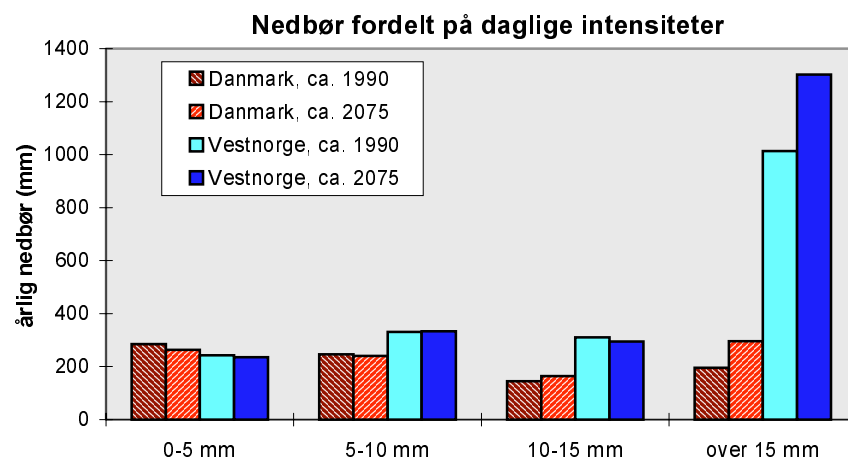
Figur 4.4 Forskel i simuleret nedbør (mm/dag) mellem klimaet omkring 2075 og klimaet i dag for hhv. vinter, forår, sommer og efterår. Figuren er baseret på 10 års tidsudsnits-beregninger udført ved Danmarks Klimacenter med den regionale klimamodel HIRHAM med 19 km opløsning.

For beregning med høj opløsning ses i Figur 4.4 forskellen i nedbør mellem klimaet omkring 2075 og klimaet i dag fordelt på de fire årstider. Det fremgår at der sker en generel forøgelse af nedbørmængden på alle årstider, dog med en lille tendens til noget tørrere somre i den sydøstlige del af regionen. Det ses endvidere at den kraftigste ændring forekommer om efteråret over det vestlige Norge. Nedbørforøgelsen er en del større vest for de skandinaviske fjelde end øst for disse. Dette hænger sammen med at vejret i scenariet i højere grad end i kontrolberegningen er karakteriseret ved vestlig strømning, altså kraftigere vestenvinde, der

giver mere nedbør i Vestnorge. Læeffekten af fjeldene er mere udtalt i det fremtidige klima hvorfor der er en ret svag nedbørforøgelse øst for disse.

Det bemærkes at de simulerede ændringer alle er relativt små sammenlignet med normalnedbøren. Resultaterne er i grove træk i overensstemmelse med hvad man får fra de grovere globale simuleringer. De 10 år er dog lidt for kort tid til at give en tilstrækkelig statistisk sikkerhed på den beregnede ændring i nedbøren.

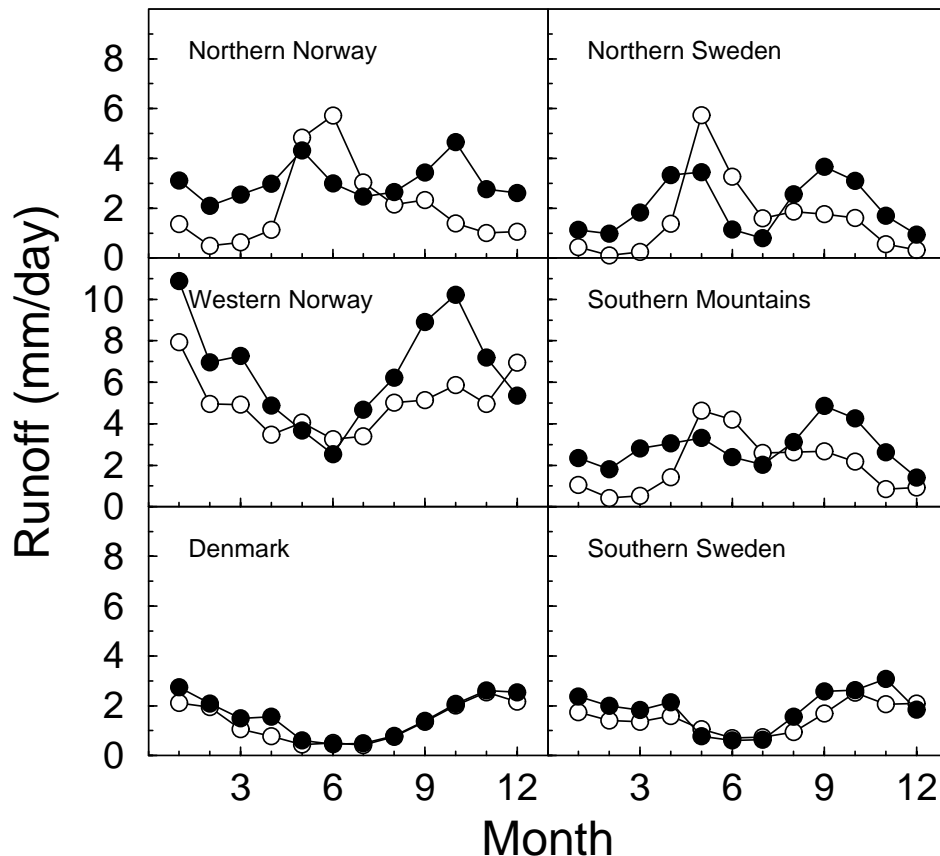
En nærmere analyse af de simulerede nedbørforhold viser at ændringerne ud over at gå i retning af et noget vådere klima, samtidig betyder en tendens til hyppigere forekomst af kraftig nedbør. Dette illustreres i Figur 4.5 hvor nedbøren er klassificeret efter intensiteten af regnvejret/snefaldet. Denne intensitet er beregnet på basis af den samlede nedbør på den pågældende dag.



Figur 4.5 Beregnet samlet årlig nedbør fordelt på daglige intensiteter (mm/dag). Det skal bemærkes at den beregnede 30-års nedbør for ca. 1990 er lidt større end den observerede 30-års nedbør for perioden 1960-90.

Der er en kraftig samlet effekt af opvarmningen og den forøgede nedbør på afstrømningen, dvs. den mængde vand der løber i floder og elve. En beskrivelse af afstrømningen kan kun foretages hvis den benyttede model har en tilstrækkelig høj opløsning til at kunne give en realistisk simulering af topografi og dermed af snedække og sneafsmeltning. Den her benyttede opløsning på ca. 19 km er betydeligt bedre end GCM-opløsninger og reproducerer observationer af den årlige gang rimeligt.

På Figur 4.6 ses den årlige udvikling af denne størrelse fordelt over seks delområder i Skandinavien. Især i det nordlige Skandinavien ændrer den årlige gang sig. I dag er der et maksimum om foråret når sneen i fjeldene smelter. I 2075 er dette maksimum svækket pga. mindre sne i fjeldene og ligger tidligere. Samtidig er der kommet et nyt maksimum der skyldes forøget nedbør om efteråret og en senere start af vinterens frost.



Figur 4.6 Afstrømning i mm/dag fordelt på delområder af Danmark-Sverige-Norge. Hvide cirkler er det nuværende klima, sorte cirkler er for 2075.

Den generelle opvarmning som forårsages af den øgede drivhuseffekt, øger således temperatur såvel som nedbør. Simuleringen viser at der bliver væsentligt mindre sne om vinteren over hele Skandinavien, men især i de norske og svenske fjelde. Dette forskubber hele det årlige mønster for vandets kredsløb over den Skandinaviske Halvø idet tøbruddet om foråret helt ændrer karakter. Som en følge af den mindre mængde af oplagret sne om vinteren og den generelle opvarmning, sker forårstøbruddet tidligere. Vandmængden der frigives, er væsentligt mindre. Til gengæld medfører den øgede nedbør om efteråret at vandmængden i floder og elve øges på den årstid.

4.3 Konklusion

De beregnede klimaændringer ser ret voldsomme ud sammenlignet med andre offentliggjorte globale beregninger. I den forbindelse er det vigtigt at huske på at tidsperioden omkring 2075 ligger senere end de fleste globale modelberegninger. Der er på dette tidspunkt med det benyttede udslipsscenario sket næsten en tredobling af den naturlige atmosfæriske CO_2 koncentration. Endvidere er det væsentligt at bemærke at den koblede beregning som blev udført i 1996, ikke medregner effekter af samfundets udslip af sulfataerosoler. Disse mikroskopiske partikler der er en del af den industrielle forurening, virker afkølede på atmosfæren ved at reflektere sollys væk fra jorden. Derfor har de en modsat virkning af den menneskeskabte drivhuseffekt, især i de industrialiserede dele af verden. I modsætning til CO_2 har aerosolerne en ret kort levetid. Derfor breder de sig ikke ud over hele jordens atmosfære som det er tilfældet med CO_2 . De har en lokalt afkølede virkning i de industrialiserede dele af verden.

Der er diskuteret tre teknikker til nedskalering af de grovmaskede data fra globale koblede atmosfære-ocean modelkørsler så ændringer i det regionale og lokale klima kan vurderes. Hver teknik har fordele og ulemper.

Tidsudsnits-beregninger med en global atmosfærisk klimamodel har en konsistent fysisk beskrivelse af atmosfæren. Selv om de ikke i sig selv kan bruges til at forudsige et klimaændringssignal, kan de på en realistisk måde oplyse om eventuelle ændringer i den atmosfæriske cirkulation på stor skala samtidig med at der er en ret detaljeret rumlig opløsning. Der kræves imidlertid store computerressourcer for at udføre sådanne beregninger.

En regional klimamodel giver oplysninger på endnu mindre skala, men er bundet af den foreskrevne storskalacirkulation fra den model der giver randbetingelserne. Ligesom den globale model er det lokale klima beskrevet ud fra fundamentale fysiske principper, således at det ikke i sig selv er problematisk at benytte modellen i et forceret klima, fx et klima hvor en ændret atmosfærisk sammensætning påvirker strålingsbalancen.

Statistisk nedskalering er en billig metode der benytter statistiske sammenhænge udledt fra en træningsperiode, normalt det nuværende klima. Kvaliteten af statistisk nedskalering afhænger af hvilke felter der benyttes til forudsigelsen, og hvilke der forudsiges.

Hvilken af de tre teknikker der vil være bedst egnet til en given anvendelse, afhænger naturligvis af arten af denne. Hvis den relevante klimaændring involverer væsentlige ændringer i strømningen på stor skala, er det nødvendigt med en global klimasimulering; hvis ændringen er lokal, og hvis den involverer mulige ændringer i klimasystemets følsomhed, vil dynamisk nedskalering med en regional klimamodel være en mulighed; hvis den størrelse der er brug for, er dårligt beskrevet af en klimamodel, eller hvis det relevante felt befinder sig et sted så selv en middelværdi over en 20km stor gitterboks ikke giver en god tilnærmelse, er der mulighed for at benytte statistisk nedskalering.

Der eksisterer nye klimasimuleringer hvor aerosolernes reduktion af opvarmningen er medregnet på en simplificeret måde. I fremtiden vil der være behov for simuleringer, hvor denne effekt er medregnet fuldt. Der vil endvidere være behov for at benytte nye, reviderede scenarier for fremtidige udslip af drivhusgasser, konstrueret af IPCC for nylig. Klimamodellerne selv bliver bedre og bedre i takt med at computerne bliver hurtigere og der implementeres mere fuldstændige beregninger af klimasystemets processer.

DMI deltager i denne forskning og vil i fremtiden både udføre koblede ocean-atmosfære simuleringer med globale modeller samt videreudvikle de nedskaleringsteknikker der er omtalt i denne rapport.

4.4 Referencer til "Drivhuseffekt og klima"

Christensen, O.B., 2000: *Drivhuseffekten og regionale klimaændringer*. Danmarks Klimacenter, DMI, Rapport 00-2.

Christensen, J. H., O. B. Christensen, P. Lopez, E. van Meijgaard, and M. Botzet, 1996: *The HIRHAM4 regional atmospheric climate model*. Scientific Report 96-4, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark.

Christensen, O. B., J. H. Christensen, B. Machenhauer, and M. Botzet, 1998: *Very-high-resolution regional climate simulations over Scandinavia. Present climate*. J. Climate, 11, 3204-3229.

Houghton, J. T., L. G. M. Filho, B. A. Callander, N. Harris, A. Kattenberg, and K. Maskell (Eds.), 1996: *Climate Change 1995: The Science of Climate Change*. Cambridge University Press.

Kaas, E., and P. Frich, 1995: *Diurnal temperature range and cloud cover in the Nordic countries: observed trends and estimates for the future*. *Atmos. Res.*, **37**, 211-228.

Kaas, E., T.-S. Li, and T. Schmith, 1996: *Statistical hindcast of wind climatology in the North Atlantic and North-western European region*. *Clim. Res.*, **7**, 97-110.

Machenhauer, B., M. Windelband, M. Botzet, J. H. Christensen, M. Déqué, R. G. Jones, P. M. Ruti, and G. Visconti, 1998: *Validation and analysis of present day climate and climate change climate change simulations over Europe*. MPI Report 275, Max-Planck Institut für Meteorologie, Hamburg, Germany.

May, W., 1999: *A time-slice experiment with the ECHAM4 A-GCM at high resolution: The experimental design and the assessment of climate change as compared to a greenhouse gas experiment with ECHAM4/OPYC at low resolution*. Scientific Report 99-2, Danish Meteorological Institute, Copenhagen, Denmark.