

MeMoS:

Udvikling af en konsekvensmodel for
svovldeposition for Sydsandinavien

Faglig rapport fra DMU, nr.149
1996

Willem A.H. Asman
Nicky Brown
Erik H. Runge
Afdeling for Atmosfærisk Miljø, DMU, Roskilde

Morten Tekiela
ELSAMPROJEKT A/S, Fredericia

Peter Børre Eriksen
Marianne Christiansen
ELSAM, Fredericia

Miljø- og Energiministeriet
Danmarks Miljøundersøgelser
Januar 1996

Datablad

Titel:	MeMoS	
Undertitel:	Udvikling af en konsekvensmodel for svovldeposition for Sydskan- navien	
Forfattere:	Willem A.H. Asman, Nicky Brown, Erik H. Runge, Morten Tekiela, Peter Børre Eriksen, Marianne Christiansen	
Afdeling:	Afdeling for Atmosfærisk Miljø ELSAMPROJEKT A/S ELSAM	
Serietitel og nummer:	Faglig rapport fra DMU, nr. 149	
Udgiver:	Miljø- og Energiministeriet Danmarks Miljøundersøgelser ©	
Udgivelsestidspunkt:	Januar 1996	
ETB:	Willem A.H. Asman, Susanne Paulsen	
EDB:	Willem A.H. Asman, Morten Tekiela, Marianne Christiansen	
EDB-grafik og Modelberegninger:	Willem A.H. Asman, Morten Tekiela	
Bedes citeres:	Asman, W.A.H., Brown, N., Runge, E.H., Tekiela, M., Eriksen, P.B., Christiansen, M. (1995): MeMoS. Udvikling af en konsekvensmodel for svovldeposition for Sydskan- navien. Danmarks Miljøundersøgelser .57s.- Faglig rapport fra DMU, nr. 149.	
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse	
Emneord:	Svovldioxid, emission, tørdeposition, våddeposition, model, tålegrænser, Sydskan- navien.	
ISBN:	87-7772-236-1	
ISSN:	0905-815x	
Trykt:	Grønager's Grafisk Produktion, Roskilde	
oplag:	100	
Sideantal:	57	
Pris:	80 kr. (inkl. 25% moms,excl. forsendelse)	
Købes hos:	Danmarks Miljøundersøgelser Afdeling for Atmosfærisk Miljø Frederiksborgvej 399 Postboks 358 4000 Roskilde Tlf.: 46 30 12 00 Fax.: 46 30 11 14	Miljøbutikken, Information og Bøger Læderstræde 1 1201 København K Tlf.: 33 92 76 92 (information) 33 93 92 92 (bøger)

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	7
1 Indledning	9
2 SO₂-emissioner	11
2.1 Emissioner fra kraftværker	11
2.2 Emissioner fra de øvrige danske kilder	11
2.3 Emissioner fra svenske kilder	16
2.4 Emissioner i det øvrige Europa	18
3 TREND-modellen	21
3.1 Overblik over modellen	21
3.2 Den meteorologiske præprocessor	22
3.3 Modelcheck og finjustering	22
3.4 Følsomhedsanalyse	28
4 MeMoS-modellen	38
4.1 Princippet	38
4.2 Eksempler	38
5 ELSAM's mulige behov for yderligere modeludvikling	49
5.1 Stoffer og modeltyper	49
5.2 Krav der skal stilles til modeller	49
5.3 EMEP-modellen	50
5.4 TREND-modellen	51
5.5 ACDEP-modellen	51
5.6 Modelstrategi	51
6 Diskussion og konklusioner	53
Referencer	54
Summary in English	55
Danmarks Miljøundersøgelser	57

Forord

Rapporten beskriver en konsekvensmodel for svovldeposition for Sydskandinavien. Arbejdet er primært udført for at give elselskaberne et planlægningsværktøj til at vurdere de luftforureningsmæssige konsekvenser af bygning og ændring af kraftværker. Projektet er udført i et samarbejde mellem DMU, ELSAMPROJEKT A/S og ELSAM. Udviklingen af modellen blev finansieret af ELSAM.

Tak til Hans van Jaarsveld, RIVM, Holland, for hjælp og vejledning ved anvendelse af TREND-modellen. Tak til Niels Kilde, Forskningscenter Risø, som stillede emissionsopgørelsen for SO₂ for Danmark for 1990 til rådighed. Tak til Christer Persson og Lennart Robertson (SMHI, Norrköping, Sverige) for information om svenske emissioner. Tak til EMEP for at stille information om de andre europæiske SO₂-emissioner til rådighed.

Tak til Jesper Bak (DMU-TERI) for hjælp ved information om tålegrænser for Danmark og til Harald Sverdrup (Lunds Universitet, Sverige) for samme information for Sverige. Tak til Mads Hovmand (DMU) for at stille danske måledata til rådighed.

Sammenfatning

På basis af et samarbejde mellem DMU, ELSAMPROJEKT og ELSAM er der udviklet en konsekvensmodel som simulerer emission, deposition og overskridelser af tålegrænser for forsurende stoffer for Sydszkandinavien. Modellen kaldes MeMoS.

Rapporten behandler især DMU's bidrag til modellens udvikling og -anvendelse. Dette bidrag inkluderer modellering af emissioner fra danske arealkilder, meteorologiske data og forholdet mellem emissioner og depositioner. MeMoS kan anvendes til scenariestudier for begrænsning af svovldeposition forårsaget af kraftværker og andre emissionskilder. Det er nemt at ændre emissionerne i modellen og på denne måde teste forskellige scenarier. Modellen beskriver forholdene i Danmark og Sverige syd for Stockholm.

Forholdet mellem emissioner og depositioner i MeMoS-modellen beregnes med den såkaldte TREND model, en sprednings- og depositionsmodel udviklet ved National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM, Bilthoven, Holland). Modellen modificeret til danske forhold, d.v.s. til de emissioner og den meteorologi, som er gældende for Danmark.

Emissioner

I MeMoS-modellen indgår emissioner fra alle kraftværker (uden og med afsvovling), øvrige danske kilder og udenlandske kilder (i alt 72 kildegrupper). Meteorologi i modellen er baseret på DMI's målinger i Kastrup.

Sammenligning med målinger

Resultaterne beregnet med TREND-modellen blev sammenlignet med målinger i Danmark og resten af Europa. Modelresultaterne for svovldioxid er i rimelig overensstemmelse med målinger for danske stationer. For mere central-europæiske stationer er der forskelle, som antagelig skyldes placering af målestationen i forhold til kilderne. For sulfat i partikelform er der god overensstemmelse mellem modelresultater og målinger for hele Europa. For våddeposition af svovl er forskellen mellem modelresultater og målinger større. På danske stationer underestimerer modellen våddepositionen med 25-45%, hvilket delvist kan forklares ud fra forskelle i nedbørsmængderne for de forskellige stationer.

Skorstenshøjde og Røggasmængde

Der blev foretaget en følsomhedsanalyse for at vurdere hvad effekten er af ændringer i skorstenshøjde og røggastemperatur for et kraftværk. Resultaterne viser at ændringer især giver sig udslag i depositionen tæt ved kilden, men at forskellen på 400 km afstand fra kilden er mindre end 20%.

Deposition i MeMoS-modellen

Koncentrationer og depositioner af svovlforbindelser i MeMoS-modellen blev beregnet for følgende særskilte meteorologiske situationer: dagtimer og nattimer for sommer og vinterhalvåret. I MeMoS-modellen bliver også de årgennemsnitlige koncentrationer og depositioner beregnet ud fra disse førnævnte beregninger. Den beregnede totale syredeposition forårsaget af svovl lægges sammen

med den aktuelle syredeposition forårsaget af kvælstof, hvorefter modellen kan beregne overskridelser af tålegrænser for forsurening.

ELSAM's mulige behov

En oversigt over hvilke atmosfæriske transportmodeller der er nødvendige for at udvikle konsekvensmodeller for andre stoffer som kvælstofoxider, ammoniak og ozon er præsenteret sidst i rapporten.

1 Indledning

Svovldioxid (SO_2) er en gas som dannes ved forbrændingsprocesser og ved processer i den kemiske industri. SO_2 kan transporteres over store afstande i luften før det afsættes på jordoverfladen i form af tørdeposition og våddeposition. Tørdeposition er afsætning af stoffer fra luften til overflader ved turbulens eller som følge af tyngdekraften. Våddeposition er afsætning af stoffer fra luften ved nedbør.

Hvorfor er modellen udviklet?

I luften reagerer svovldioxid under indflydelse af sollys eller i skyer til sulfat i partikelform (SO_4^{2-} -aerosol). Svovl i nedbør findes hovedsagelig i form af SO_4^{2-} , som stammer fra optagelse af SO_4^{2-} -partikler og SO_2 i skyer og i regndråber/snefnug. SO_2 og SO_4^{2-} kaldes tilsammen SO_x . Både SO_2 og SO_4^{2-} virker forsurende efter deposition. Af denne grund kan SO_x -deposition virke skadeligt på økosystemer. De danske kraftværker udsender SO_2 . For bedre at kunne tage hensyn til effekterne på miljøet af SO_2 -emissionen fra danske kraftværker, har ELSAM (en sammenslutning af jyske og fynske kraftværker) finansieret udviklingen af den i nærværende rapport beskrevne konsekvensmodel MeMoS. MeMoS er forkortelsen af Mesoskala Model for Sydkandinavien, en regional model for deposition i Danmark og Sverige syd for Stockholm. Denne del af Sverige er taget med i modellen fordi der i dette område befinder sig meget forsurede områder, som ved de internationale UN-ECE-forhandlinger om svovlprotokollen ofte er medbestemmende for, hvor meget de danske SO_2 -emissioner skal begrænses.

Princippet i MeMoS

I MeMoS-modellen vælger brugeren en kilde eller kildegrupper, og angiver emissioner. Modellen beregner efterfølgende koncentrations/depositionsfordelingen i modelområdet. Hvis der vælges totaldeposition (summen af tør- og våddeposition) af SO_x kan modellen ydermere give information om hvor i naturområder tålegrænsen (critical load) for forsurende stoffer overskrides. Resultaterne kan bl.a. præsenteres i form af kort.

Overførselsmatrix

I MeMoS-modellen anvendes såkaldte overførselsmatricer. En overførselsmatrix er en samling af tal. Hvert tal angiver for en bestemt meteorologisk situation hvor stor en koncentration/deposition i et punkt på landkortet der forårsages af en kilde med en emission på 1 ton SO_2 år⁻¹. Hvis koncentrationen/depositionen til et punkt, forårsaget af samme kilde men med en anden emission skal beregnes, skal tallet i overførselsmatricen blot ganges med den nye emission (i samme enheder) for at få koncentrationen/depositionen.

Samarbejde

Projektet er et samarbejde mellem ELSAM, ELSAMPROJEKT og DMU. Det er et forprojekt der sigter mod en senere samlet model for syredepositionen i Sydkandinavien, dvs. inklusiv både svovlforbindelser og kvælstofforbindelser (kvælstofoxider, ammoniak og deres reaktionsprodukter). Rapporten er primært skrevet for at beskrive DMU's bidrag til arbejdet, men der er tilføjet information fra ELSAM og ELSAMPROJEKT's dele så at læseren bedre kan forstå sammenhængen mellem de forskellige dele af projektet. Desuden præsenteres nogle eksempler på resultater.

Arbejdsfordeling

Arbejdsfordelingen i projektet var følgende:

1. ELSAM: Projektstyring, levering af emissionsdata fra danske kraftværker.
2. DMU: Indsamling af de øvrige emissioner for Danmark og emissioner for Europa, modellering af transport og deposition og beregning af overførselsmatricer.
3. ELSAMPROJEKT: Indsamling af detaljerede emissioner for Sverige, indsamling af information om tålegrænser for syredeposition for Danmark og Sverige og udvikling af selve konsekvensmodellen MeMoS ud fra information om emissioner, transport, deposition og tålegrænser.

Indhold rapporten

I kapitel 2 præsenteres en oversigt over danske og udenlandske SO₂-emissioner. I kapitel 3 gives et indblik i TREND-modellen, den atmosfæriske transportmodel som er benyttet til at beregne transport og deposition. I kapitel 4 beskrives kort hvordan MeMoS-modellen er sammensat, for hvilke stoffer koncentrationen/depositionen beregnes og der præsenteres nogle eksempler på resultater. I kapitel 5 diskuteres behovet for den yderlige modeludvikling på DMU, som er nødvendig for videreudvikling af konsekvensmodeller til brug for ELSAM. I kapitel 6 diskuteres resultaterne.

2 SO₂-emissioner

2.1 Emissioner fra danske kraftværker

Røgfaneløft

I MeMoS-modellen er brugeren fri til at vælge emissionerne for alle danske kraftværker. Information om røggastemperatur og røggasmængde er dog nødvendig for at kunne beregne røgfaneløft. Skorsthøjden er også en vigtig parameter i beskrivelsen om spredning af røgfaner. Denne information blev samlet af ELSAM. De blokke, hvis røggasser udledes gennem samme skorsten, blev i spredningsberegningerne betragtet som een kilde, fordi spredningen er ens. Røgfaneløftet skal i spredningsmodeller baseres på røggasmængden når værket er i drift. Denne mængde var ikke direkte kendt, men blev beregnet ud fra røggastemperaturen og den totale årlige røggasmængde.

Afsvovling

Da der i MeMoS-modellen også skal laves beregninger for fremtidige nye kraftværker, dvs. for kraftværker med afsvovling, samt for eksisterende kraftværker som evt. senere forsynes med afsvovling, blev også røggasmængderne og temperaturen estimeret for disse anlæg. Røggasmængden ved afsvovling blev øget med 4% p.g.a. det øgede vandindhold og temperaturen blev sat til 70°C. Tabel 1 giver en oversigt over alle 58 kilder for hvilke der er udført spredningsberegninger. Figur 1 giver fordelingen af SO₂-emissionen fra danske kraftværker for 1990.

For at kunne checke TREND-modellen, der er en spredningsmodel som benyttes til at beregne svovldepositionen, var det nødvendigt at bruge aktuelle emissioner. Emissioner for året 1990 blev anvendt i den forbindelse (se også tabel 2).

2.2 Emissioner fra de øvrige danske kilder

Emissioner fra de øvrige danske kilder var i CORINAIR-regi til rådighed for året 1990 og var delt op i 2 grupper: emissioner fra 5 større punktkilder og emissioner fra alle andre, mindre kilder, som behandles som arealkilder. Denne information blev stillet til rådighed af Niels Kilde (RISØ-systemanalyseafdelingen). For arealkilder er denne emission kun kendt for amter, men er af DMU er fordelt på et regelmæssigt 5x5 km² gitter på basis af bl.a. befolkningstæthed.

Øvrige punktkilder

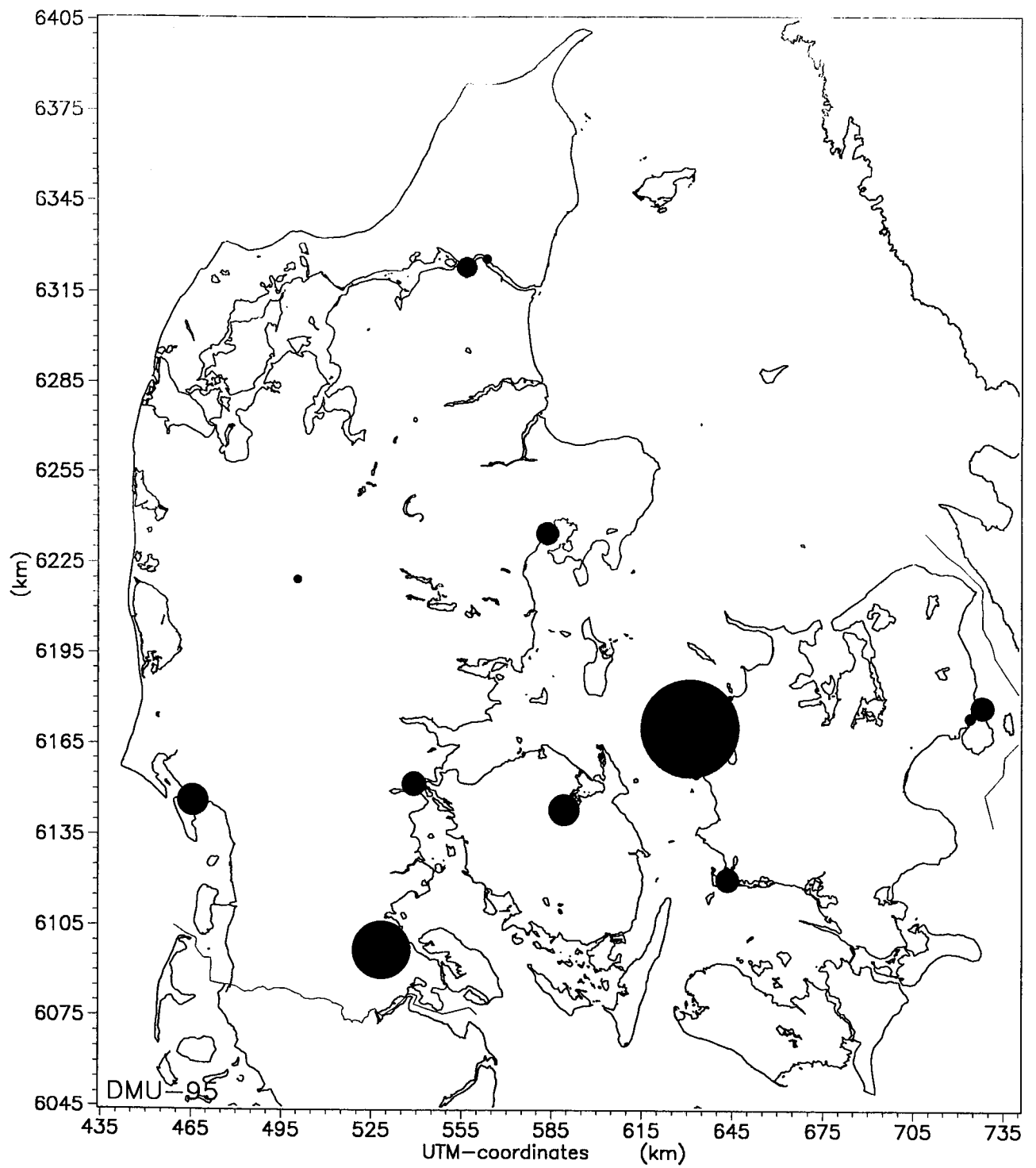
For de øvrige punktkilder var kildehøjden og røggastemperaturen kendt, dog ikke røggasmængden. Den blev sat til en vilkårlig, relativ lav, værdi af 100.000 Nm⁻³ år⁻¹. For Kastrup Lufthavn blev emissionshøjden sat til 200 m med et termisk output på 0 Mw.

Tabel 2 giver en oversigt over de danske emissioner for året 1990. I MeMoS-modellen bliver alle danske kilder undtagen kraftværker kaldt "øvrige danske kilder". Som det kan ses fra tabel 2 kommer hovedparten af det danske SO₂-udslip i 1990 fra kraftværker (66%).

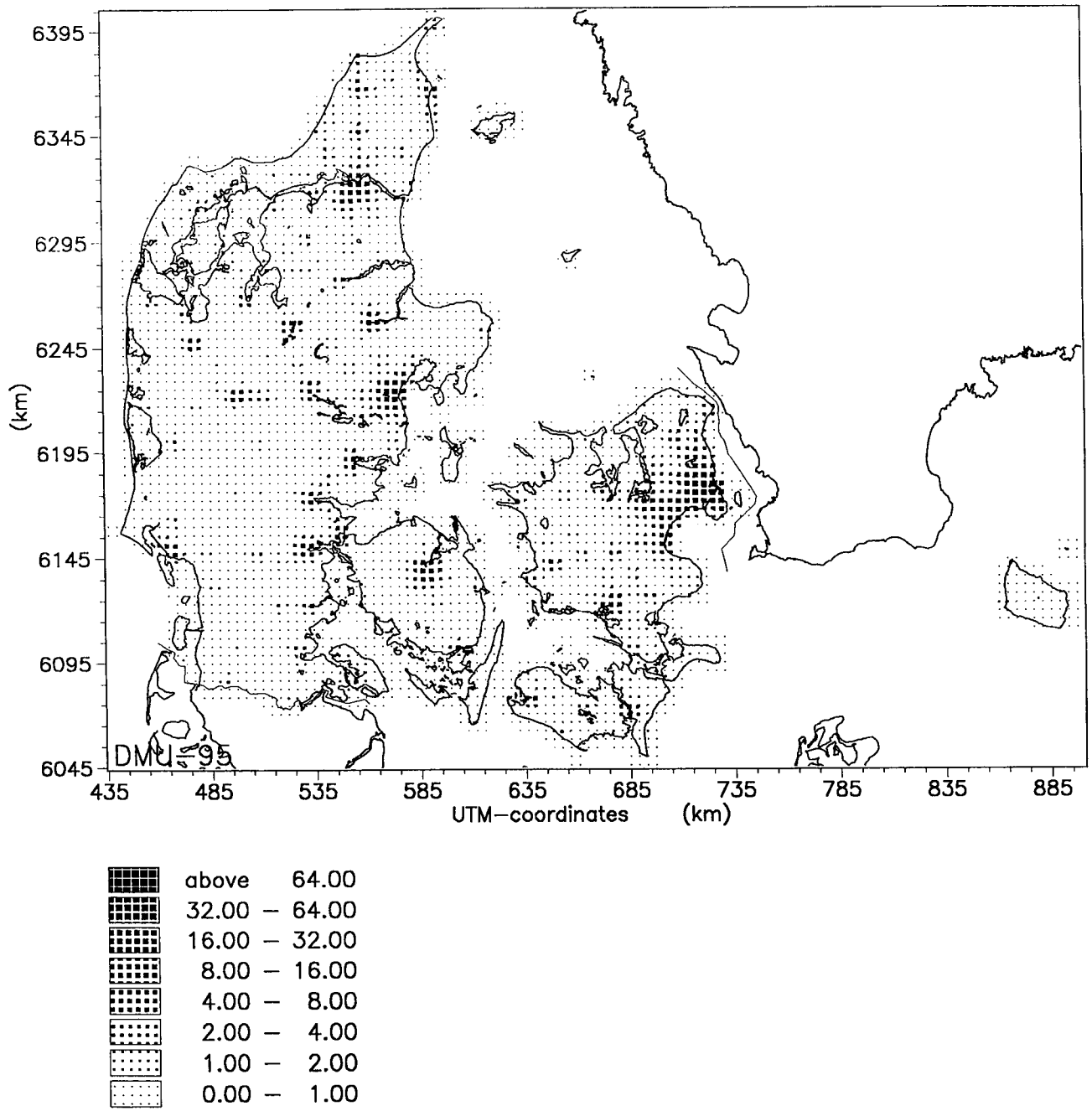
Tabel 1. Kraftværkskilder taget med i spredningsberegningerne; x og y er UTM-32 koordinaterne på kilden (m). Tilføjelsen A betyder at kilden er hypotetisk, dvs. data for kilden inkluderer et muligt fremtidigt afsvovlingsanlæg.

Kilde	Blok	x (m)	y (m)	Højde (m)	Temp. (°C)	Røggasmængde (1000 Nm-3 h-1)
Amagerværket	AMVB01-02	728100	6177300	150	130	702
Amagerværket A	AMVB01-02	728100	6177300	150	70	730
Amagerværket	AMVB03	728100	6177300	150	80	637
H.C. Ørstedsværket	HCVK01-06	723800	6173900	88	160	587
H.C. Ørstedsværket A	HCVK01-06	723800	6173900	88	70	610
H.C. Ørstedsværket	HCVK07	723800	6173900	113	125	290
H.C. Ørstedsværket A	HCVK07	723800	6173900	113	70	302
Kyndbyværket	KYVK11-13	680500	6189000	70	120	414
Kyndbyværket A	KYVK11-13	680500	6189000	70	70	431
Kyndbyværket	KYVB21-22	680500	6189000	130	220	431
Kyndbyværket A	KYVB21-22	680500	6189000	130	70	448
Masnedøværket	MAVB11	684600	6098400	80	145	179
Masnedøværket A	MAVB11	684600	6098400	80	70	186
Stignæsværket	STVB01	643400	6120500	130	145	398
Stignæsværket A	STVB01	643400	6120500	130	70	414
Stignæsværket	STVB02	643400	6120500	130	135	677
Stignæsværket A	STVB02	643400	6120500	130	70	704
Asnæsværket	ASVB01-04	630900	6170500	150	140	1865
Asnæsværket A	ASVB01-04	630900	6170500	150	70	1940
Asnæsværket	ASVB05	630900	6170500	220	80	1917
Avedøreværket	AVVB01	718800	6168500	150	80	1185
Avedøreværket	AVVB02	718800	6168500	150	80	1185
Fynsværket	FVOB01	589000	6143600	110	130	196
Fynsværket A	FVOB01	589000	6143600	110	70	204
Fynsværket	FVOB02	589000	6143600	125	130	565
Fynsværket A	FVOB02	589000	6143600	125	70	588
Fynsværket	FVOB03	589000	6143600	152	120	681
Fynsværket A	FVOB03	589000	6143600	152	70	708
Fynsværket	FVOB07	589000	6143600	235	70	1038
Studstrupværket	MKSB01	583400	6235100	124	130	291

Studstrupværket A	MKSB01	583400	6235100	124	70	303
Studstrupværket	MKSB02	583400	6235100	124	160	587
Studstrupværket A	MKSB02	583400	6235100	124	70	610
Studstrupværket	MKSB03-04	583400	6235100	192	70	1673
Aarhusværket	MKAK09-12	575500	6223700	107	150	405
Aarhusværket A	MKAK09-12	575500	6223700	107	70	421
Nordjyllands elv.	NEVB01	563300	6326200	112	160	247
Nordjyllands elv. A	NEVB01	563300	6326200	112	70	257
Nordjyllands elv.	NEVB02	563300	6326200	112	85	605
Nordjyllands elv.	NEVB03	563300	6326200	170	60	1038
Nordkraft	NKAB01	556800	6323400	150	130	530
Nordkraft A	NKAB01	556800	6323400	150	70	551
Nordkraft	NKAK05-07	556800	6323400	108	170	344
Nordkraft A	NKAK05-07	556800	6323400	108	70	358
Skærbækværket	SVSB01-02	539000	6152100	100	140	875
Skærbækværket A	SVSB01-02	539000	6152100	100	70	910
Enstedværket	SHEB02	528300	6097250	127	115	283
Enstedværket A	SHEB02	528300	6097250	127	80	294
Enstedværket (= A)	SHEB03	528300	6097250	183	60	1705
Esbjerg	VKEB01	465500	6146500	120	140	272
Esbjerg A	VKEB01	465500	6146500	120	70	282
Esbjerg	VKEB02	465500	6146500	150	120	493
Esbjerg A	VKEB02	465500	6146500	150	70	512
Esbjerg	VKEB03	465500	6146500	250	70	1038
Vestkraft Herning	VKHB01	500600	6219800	90	125	274
Vestkraft Herning A	VKHB01	500600	6219800	90	70	285
Randers	RKEM01	564600	6257800	132	130	131
Randers A	RKEM01	564600	6257800	132	70	136



Figur 1. SO₂-emissionen fra danske kraftværker i 1990. Cirklernes størrelse angiver kildernes relative størrelse.



Figur 2. SO₂-emissionstæthed for danske arealkilder i 1990 på et 5x5 km² gitter (ton SO₂ km⁻² år⁻¹).

Tabel 2. SO₂-emission fra forskellige kildegrupper i Danmark i 1990.

Kildegruppe	Emission (ton SO ₂ år ⁻¹)	Relativ andel (%)
Kraftværker	126264	66
Øvrige store punktkilder	8081	4
Public power and cogeneration plants	15339	8
Fjernvarme	9087	5
Industriel forbrænding	24229	13
Vejtrafik	6642	3
Andre mobile kilder	2534	1
Total	192176	100

Arealkilder

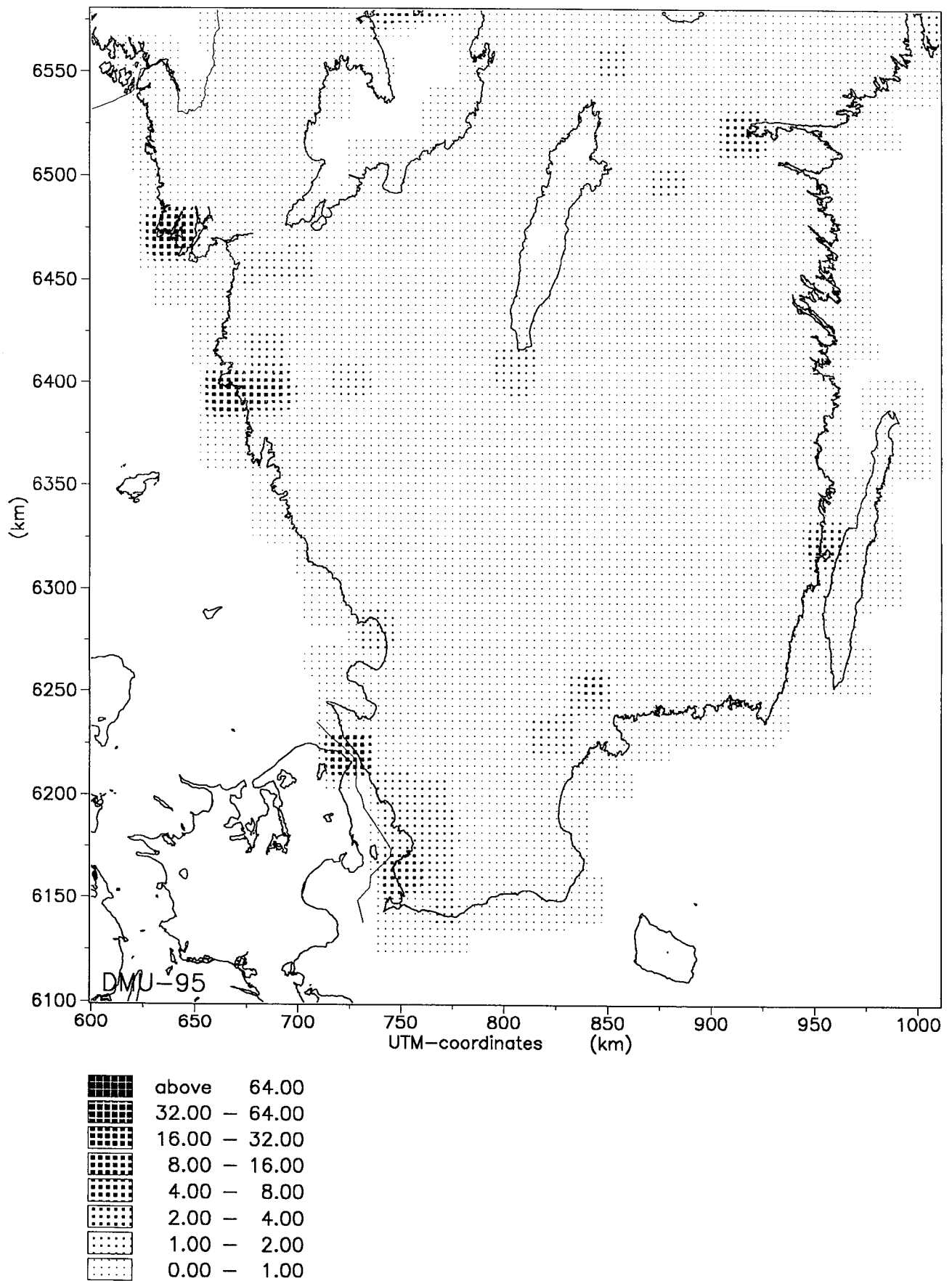
Figur 2 giver den geografiske fordeling af SO₂-emissionstætheden for arealkilder i Danmark for 1990. Arealkilder er alle andre kilder end kraftværker og øvrige store punktkilder. I beregningerne tages 2144 danske 5x5 km² arealkilder med, hvis udslipshøjde beregnes ud fra fordelingen mellem de forskellige kildegrupper indenfor samme gitter. Det antages lidt vilkårligt, at alle arealkilder har et termisk varmeoutput på 0 MW, at udslipshøjden er 3 m for vejtrafik og andre mobile kilder, 10 m for boligopvarmning og fjernvarme og 35 m for industriel forbrænding og public power and cogeneration plants. De øvrige danske punktkilder tages i TREND-beregningerne med som 5 særskilte punktkilder.

2.3 Emissioner fra svenske kilder

Da MeMoS-modellen er udviklet til at beregne deposition og overskridelser af tålegrænser i både Danmark og Sverige er det vigtigt at have en god beskrivelse af de svenske SO₂-emissioner til rådighed. For Sverige findes emissionerne kun i form af arealemissioner på et 20x20 km² regelmæssigt gitter i svenske RAK-koordinater. Information om kildehøjden, røggastemperatur og røggasmængder var altså ikke til rådighed. Da denne information delvis bestemmer hvor langt forureningen transporteres var det vigtigt at have et indtryk af fordelingen af kildetyper. Imidlertid fandtes der nogen information fra EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) over fordelingen mellem emissionerne fra høje og lave kilder på et ca. 150x150 km² regelmæssigt gitter. De svenske emissioner på 20x20 km² gitteret blev nu delt op i bidrag fra høje og lave kilder, hvorved blev taget udgangspunkt i den pågældende fordeling for de EMEP-gitre hvori det pågældende gitter ligger.

Antagelse af kildehøjder

For høje kilder bruges en skorstenshøjde på 100 m og et termisk output på 30 MW i beregningerne, hvilket er baseret på erfaringer med beregninger for Europa (Hans van Jaarsveld, National Institute of Public Health and Environmental Protection, RIVM, Bilthoven,



Figur 3. SO₂-emissionstæthed for svenske kilder i 1991 (ton SO₂ km⁻² år⁻¹). Da de svenske emissioner foreligger på et 20x20 km² gitter vil den maksimale emissionstæthed ikke kunne være så stor som for de danske, som foreligger på et 5x5 km² gitter.

Holland, personlig meddelelse). For lave kilder bruges en udslipshøjde på 10 m og et termisk output på 0 MW. Den totale svenske SO₂-emission (landbaserede kilder) var i 1991 115296 ton SO₂ år⁻¹ og ved beregningerne tages 1603 særskilte kilder med. Figur 3 viser fordelingen af emissionstætheden i Sverige.

2.4 Emissioner i det øvrige Europa

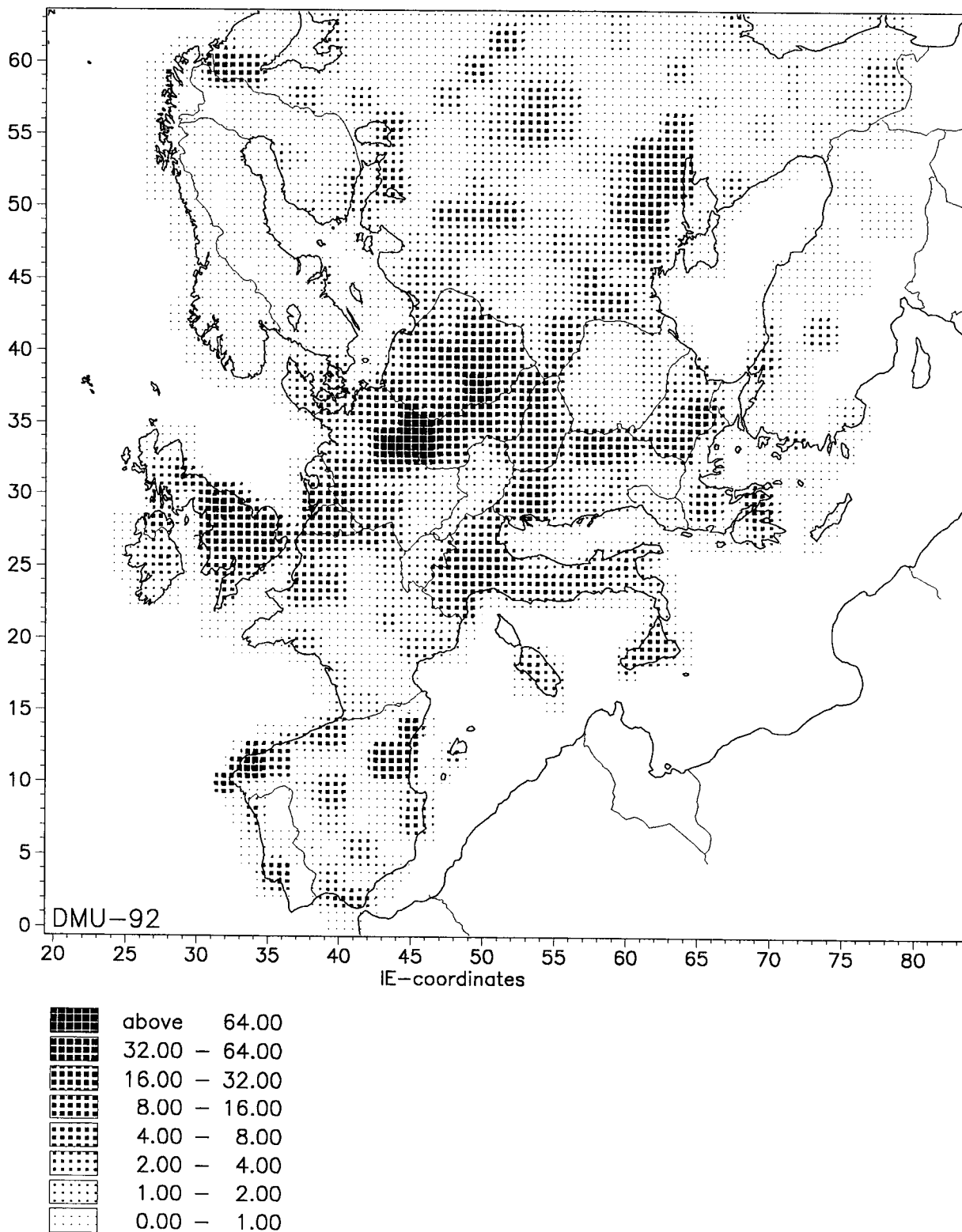
For alle lande bruges EMEP's SO₂-emissioner for året 1989. Oprindeligt ligger de på et regelmæssigt 150x150 km² gitter. Det er et meget groft gitter sammenlignet med det 5x5 km² gitter som anvendes for Danmark ved depositionsregninger eller 20x20 km² som anvendes for Sverige. Da det grove gitter ville betyde at en del af de udenlandske emissioner i TREND-modellen vil finde sted i Danmark, blev de udenlandske emissioner tæt ved Danmark (bortset fra Sverige) genfordelt over mange små arealkilder, således at de i TREND-modellen næsten udelukkende vil finde sted i udlandet. Desuden blev emissionerne for alle øvrige områder genfordelt på et regelmæssigt 75x75 km² gitter for at formindske effekten af forkert placering af emissionerne på havet. Alle arealkilder opdeles i høje og lave kilder og i TREND-beregningerne behandles de særskilt. I alt 4687 kilder bruges i beregningerne.

Antagelse af kildehøjder

For høje kilder bruges en skorstenshøjde på 100 m og et termisk output på 30 MW i beregningerne, hvilket er baseret på erfaringer med beregninger for Europa. For lave kilder bruges en udslipshøjde på 10 m og et termisk output på 0 MW.

Geografisk fordeling

Tabel 3 viser emissioner for alle områder i Europa, som tages med som kildeområde i MeMoS-modellen. For Danmarks vedkommende er totaltallet givet. Figur 4 viser fordelingen af emissionstætheden for Europa.



Figur 4. SO₂-emissionstæthed for europæiske kilder for 1989 (ton SO₂ km⁻² år⁻¹). Emissionerne foreligger på et 75x75 km² gitter.

Tabel 3. SO₂ emissioner i de andre europæiske kildeområder som behandles separat i MeMoS-modellen.

Land	Emission (ton SO ₂ år ⁻¹)
Belgien	418000
Danmark	192176
Finland	277300
Frankrig	1271000
Holland	254000
Norge	63600
Polen	3909800
Storbritannien	3551000
Sverige	115296
Tjekkoslavakiet	2774000
USSR (europæisk del)	9317402
Vesttyskland	1060000
Østtyskland	5242000
Øvrige lande	11017100

3. TREND-modellen

3.1 Overblik over modellen

Matricer

TREND-modellen er brugt til at beregne koncentrationer/depositioner, som efter normering med emissionen for det pågældende område bruges som overførselsmatricer i MeMoS-modellen til at udføre depositionsregninger ud fra emissioner, som kan varieres efter behov.

Statistisk model

TREND-modellen, er udviklet af Hans van Jaarsveld på RIVM (*van Jaarsveld, 1995*). Der er tale om en statistisk transportmodel, dvs. at der ikke beregnes koncentrationer og depositioner for hver time i et år. Derimod beregnes koncentrationer og depositioner for et begrænset antal meteorologiske situationer, som er delt op i 6 stabilitetsklasser og som hver for sig igen er delt op i transport fra nære kilder, kilder som er lidt længere væk (ca. 100 km) og kilder som er ret langt væk (ca. 600 km). I modellen skelnes mellem 12 vindretningssektorer på 30° og for hver vindretningssektor gennemføres en beregning for hver af de 6 stabilitetsklasser, med meteorologiske forhold, som er gennemsnit for denne kombination af klasse/vindretning/afstand kilde-receptorpunkt. Meteorologiske parametre som indgår i modellen er bl.a. vindhastighed, blandingshøjde, modstande for transport til overfladen (forskellig for SO₂ og SO₄-aerosol) samt nedbørens hyppighed, mængde og varighed.

Spredning

I TREND-modellen beskrives spredningen tæt ved kilden ved hjælp af en Gaussisk røgfanemodel. På større afstand kan det antages at alt stof i blandingslaget er blandet så godt op, at koncentrationen er ens, bortset fra den vertikale gradient der opstår som følge af tørdeposition. Da modellen er Gaussisk kan der tages højde for kildernes nøjagtige højde, således at udslip fra høje kilder med udslipshøjde over blandingslaget, først kan nå overfladen når opblandingen har fundet sted.

Receptorpunkter

I modellen defineres et antal punkter for hvilke koncentrationen/depositionen ønskes beregnet (receptorpunkter). Beregningerne med TREND-modellen foregår således, at bidraget fra hver enkelt kilde til receptorpunktet beregnes (faktisk for forskellige meteorologiske situationer) og opsummeres til den totale koncentration/deposition i receptorpunktet.

Arealkilder

Arealkilder kan behandles korrekt i modellen fordi deres spredning er parametriseret på basis af beregninger med et meget stort antal punktkilder. For beregninger med TREND-modellen behøver arealkilder ikke at ligge på et regelmæssigt gitter. I modelberegningerne med TREND-modellen indgår de svenske emissioner f.eks. i et regelmæssigt gitter i svenske RAK-koordinater. De danske emissioner ligger på et regelmæssigt gitter i UTM-32 koordinater og de europæiske emissioner indgår på et regelmæssigt gitter i IE-koordinater. Alle disse gitter ligger forskudt i forhold til hinanden.

Begrænsninger

Ovenstående gør det muligt at tage hensyn til mange kilder i modellen og behandle dem meget præcist. Som i alle modeller opnås noget på bekostning af noget andet. TREND-modellen er primitiv på den måde at den har ens, dog som funktion af tiden varierende, tørdepositions hastigheder, nedbørshyppighed og omdannelseshastighed. Denne egenskab betyder at f.eks. tørdepositions hastigheden ikke er en funktion af overfladen og at omdannelseshastigheden ikke direkte kan påvirkes af andre stoffers tilstedeværelse etc., hvilket ikke vil være korrekt. Når resultaterne fra TREND-modellen bruges som udgangspunkt for MeMoS-modellen er det en fordel, at modellen er lineær, således at man kan bestemme koncentrationen/depositionen i et receptorpunkt ved at summere bidragene fra de enkelte kilder.

Parameterverdier

Efter finjustering blev følgende parameterverdier anvendt i de endelige modelkørsler: Tørdepositions hastighed SO_2 : $0,89 \text{ cm s}^{-1}$, tørdepositions hastighed SO_4 -aerosol: $0,16 \text{ cm s}^{-1}$, omdannelseshastighed SO_2 til SO_4 -aerosol: $2.1\% \text{ time}^{-1}$. Den hastighed hvorved SO_2 fjernes ved nedbør er sat til ca. 40% af værdien for SO_4 -aerosol.

3.2 Den meteorologiske præprocessor

TREND-modellen bruger ikke selve de meteorologiske målinger som inddata, men en meteorologistatistik. Denne meteorologistatistik laves ud fra meteorologiske målinger ved hjælp af en såkaldt meteorologisk præprocessor. Til TREND-modellen hører også en bestemt meteorologisk præprocessor, som skal have inddata præsenteret i et bestemt fastlagt format.

Dansk meteorologi

Indtil nærværende projekt er beregninger med TREND-modellen for Danmark udført med en hollandsk meteorologistatistik. Dette er måske lige så forkert som at en bruge dansk statistik, hvis det drejer sig om beregning af bidraget fra udenlandske kilder. For at beskrive situationen i Danmark er det dog bedst at bruge en dansk statistik. I nærværende projekt er der for første gang brugt en dansk statistik i TREND-modellen. Denne statistik blev beregnet på basis af meteorologiske data (fra DMI), som DMU har kvalitetskontrolleret og lagt i en database. Ved beregningerne er mest brugt data for Kastrup (for hvilke der findes data for 1979-1989) og for Karup (for hvilke der findes data for 1979-1988).

3.3 Modelcheck og finjustering

Sammenligning med RIVM's version

For at checke om TREND-modellen giver rimelige resultater, ikke kun for Danmark, men også for Europa, blev der udført en række modelkørsler. På basis af disse modelkørsler er nogle parametre i modellen blevet finjusteret. Det er vigtigt at resultaterne ikke udelukkende er gode for Danmark, fordi modellen også skal beskrive transporten fra fjerne kilder. DMU's og RIVM's version af TREND-modellen, med samme meteorologi (Kastrup 1979-1989), men med lidt forskellige emissioner blev sammenlignet for ca. 90 stationer i Europa. Det viste sig, at der var en meget god overensstemmelse (< 20% forskel) mellem resultaterne for begge kørsler.

For at kunne checke modelresultater er der brug for målinger. Der findes målinger for SO₂- og SO₄-koncentrationer i luften og for våddeposition af SO₄. Kontinuerlige målinger af tørdeposition af både SO₂ og SO₄-aerosol findes ikke. Dette betyder at det faktisk ikke kan checkes om den modellerede deposition er i god overensstemmelse med den målte deposition.

Måledata

For Danmark er der brugt måledata som Mads Hovmand (DMU) har indsamlet. For Europa er data fra EMEP anvendt til dette formål. Måledata er, ligesom modeldata, behæftet med fejl. I EMEP-regi analyserer hvert land sin egne prøver. Det betyder at der anvendes forskellige metoder i forskellige lande, hvilket medfører at resultater fra forskellige lande ikke altid kan sammenlignes. Med regelmæssige mellemrum sammenlignes metoderne for at rette op på dette, men der vil altid forekomme forskelle af den grund.

Repræsentativitet

Desuden er der en anden grund til uoverensstemmelse mellem model- og måleresultater. Måleresultater er specifikke for et punkt. I transportmodeller indgår emissioner, tør- og våddepositions-hastigheder, omsætnings-hastigheder, som er et gennemsnit for en bestemt areal. Et eksempel på et sted, hvor der let kan være uoverensstemmelser mellem model- og måleresultater er et punkt tæt ved en stor SO₂-kilde eller gruppe af SO₂-kilder. Af denne grund vil den målte SO₂-koncentration være forholdsvis stor. I modellen er emissionerne jævnt fordelt over en rude i gitteret og derfor vil den beregnede koncentration nok være lavere end den målte. Ved et målepunkt i et naturområde kan situationen være omvendt. Målestationerne er placeret således, at der ikke er direkte indflydelse fra nære kilder. Af denne grund vil den målte SO₂-koncentration ofte være mindre end den modellerede. For reaktionsproduktet SO₄-aerosol, som er langtransporteret har placeringen af stationen en ringere indflydelse på målte koncentrationer. Det er ligeledes tilfældet for våddeposition af SO₄, selvom denne deposition også indeholder et bidrag fra SO₂.

Nedbørsmængde og våddeposition

Ved våddeposition spiller også nedbørsmængden en rolle. Jo større nedbørsmængden er, jo større er våddepositionen, omend våddepositionen tiltager mindre end lineært med nedbørsmængden. I TREND-modellen er nedbørsmængden den samme overalt og det vil kunne forårsage en forskel mellem modellerede og målte værdier.

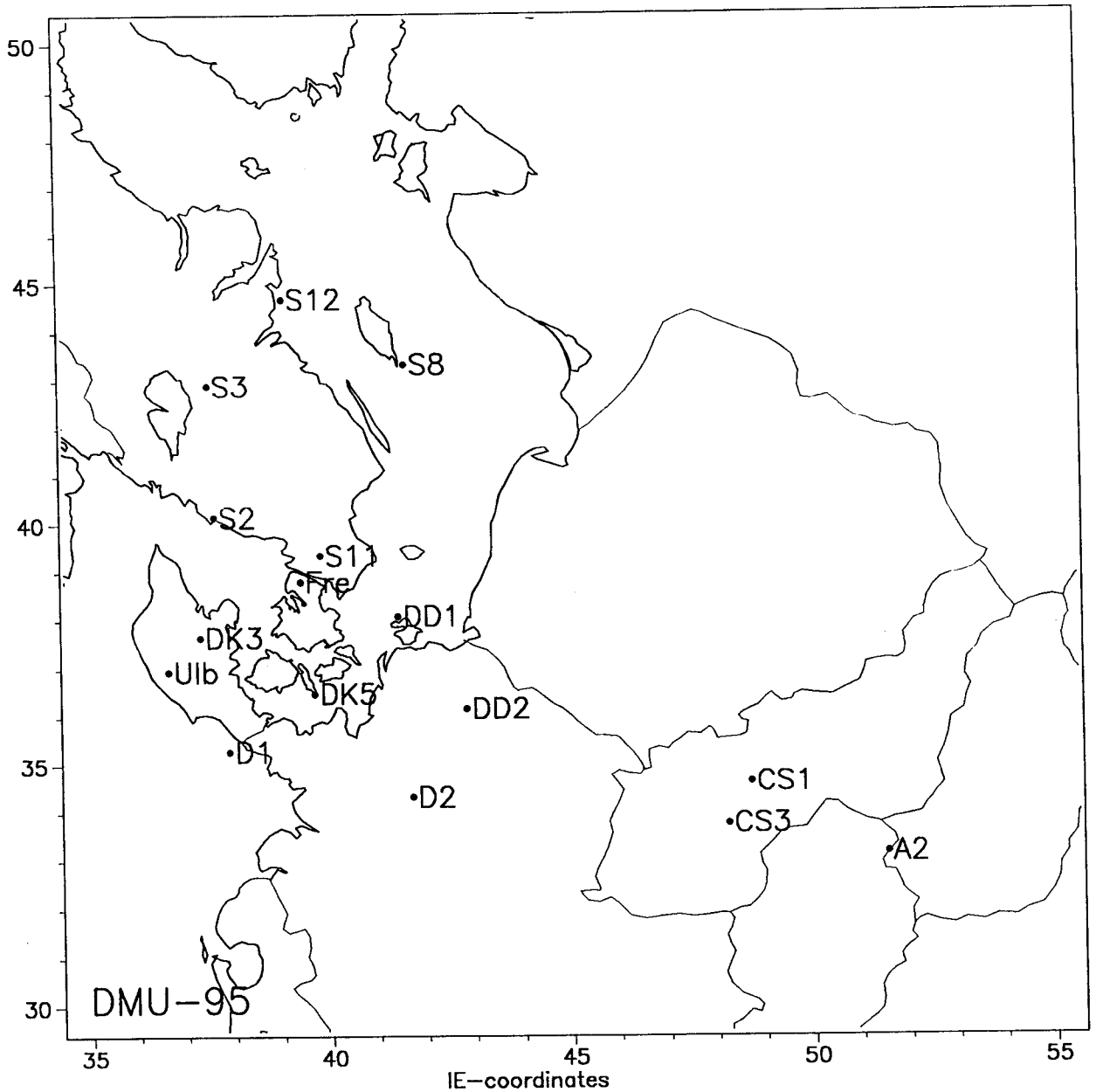
For at checke modellen udvalgte stationer på en akse fra områder med en stor emissionstæthed (Tjekkoslavakiet) til områder med en lav emissionstæthed (Sverige) (jvf. figur 5). Målinger for 1990 blev betragtet. Det viste sig i øvrigt at disse måleresultater ikke var mere end ca. 20-30% forskellige fra måleresultater for andre år.

Anvendt meteorologi

Meteorologiperioden brugt i modelberegningerne var gennemsnittet for Kastrup for 1979-1989. Der blev også udført modelberegninger med meteorologi for Kastrup for 1990. Resultaterne for disse kørsler er ikke vist her, fordi de ikke er meget anderledes end dem med meteorologi for perioden 1979-1989.

Sammenligning med
målinger

Sammenligningen blev kun udført for et helt år, dvs. ikke for sæsoner. Der er benyttet data fra EMEP for Europa (Pedersen *et al.*, 1990) og danske data for yderligere stationer (Mads Hovmand, DMU). Resultaterne er præsenteret i tabel 4 og figurerne 6-8.



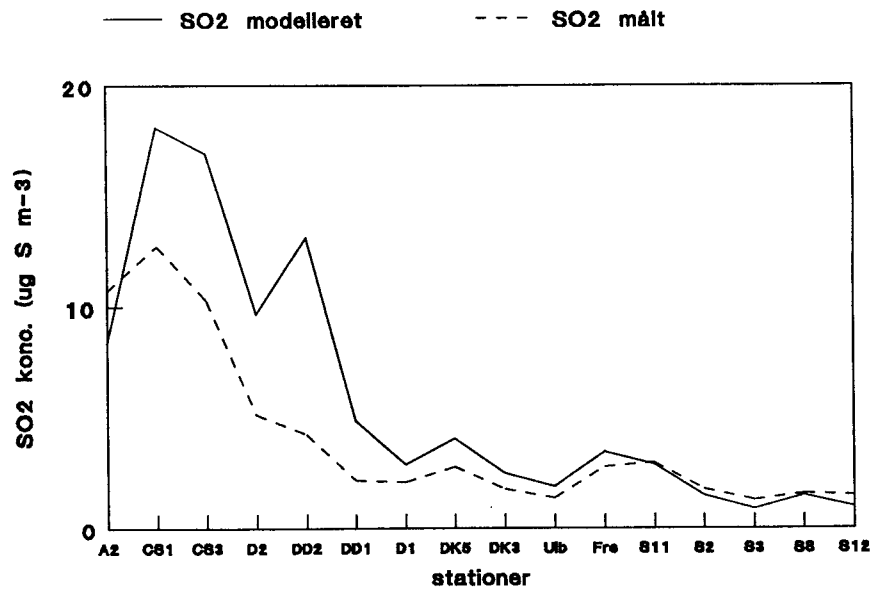
Figur 5. Positioner af målestationer, hvis resultater er benyttet ved verifikation af modelresultater.

Table 4. Højden på stationen, modellerede og målte koncentrationer, depositioner og nedbørmængden for stationer i Europa gående fra et område med en høj emissionstæthed til et område med en lav emissionstæthed. Stationens højde er i m, koncentrationerne er i $\mu\text{g S m}^{-3}$, depositionerne er i $\text{mol S ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ og nedbørmængden er i mm.

Kode	Station	Højde	SO ₂ model	SO ₂ målt	SO ₄ aerosol model	SO ₄ aerosol målt	SO ₄ våddep. model	SO ₄ våddep. målt	nedbør målt	SO _x tørdep. model
A2	Illmitz, Østrig	117	8.2	10.7	1.99	2.83	214	234	334	701
CS1	Svratouch, Tjekkoslaviet	737	17.7	12.7	2.79	2.12	363	281	604	1515
CS3	Kosetice, Tjekkoslaviet	633	16.5	10.3	2.61	2.58	335	219	551	1425
D2	Langenbrügge, Vesttyskland	74	9.4	5.2	2.27	1.62	306	219	588	857
DD2	Neuglobsow, Østtyskland	62	12.7	4.3	2.60	2.43	419	302	612	1225
DD1	Arkona, Østtyskland	42	4.6	2.2	1.91	2.17	233	304	567	458
D1	Westerland, Vesttyskland	12	2.7	2.1	1.48	1.20	151	167	692	261
DK5	Keldsnor, Danmark	9	3.8	2.8	1.70	2.00	190	181	511	373
DK3	Tange, Danmark	13	2.3	1.8	1.22	1.47	130	168	703	227
Ulb	Ulborg, Danmark	-	1.8	1.4	1.19	1.46	120	218	874	178
Fie	Frederiksborg, Danmark	-	3.3	2.8	1.44	1.74	166	241	676	324
S11	Vavíhill, Sverige	172	2.7	3.0	1.44	1.30	163	315	826	273
S2	Rörvik, Sverige	10	1.4	1.8	1.05	1.56	108	261	854	140
S3	Velen, Sverige	127	0.8	1.3	0.82	0.95	82	118	334	88
S8	Hoburg, Sverige	58	1.4	1.6	1.17	1.18	122	203	527	142
S12	Aspvreten, Sverige	20	0.9	1.5	0.82	0.77	82	124	473	90

SO₂-koncentrationer

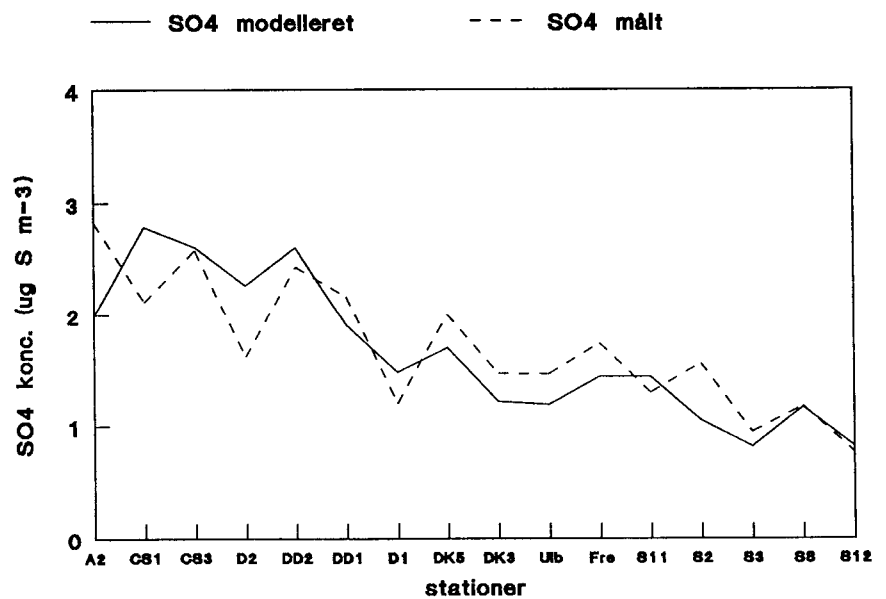
Som ventet er de modellerede SO₂-koncentrationer større end de målte for stationer i Tjekkioslovakiet og Østtyskland, mens de er i rimelig overensstemmelse for de andre stationer inklusive de danske (figur 6).



Figur 6. Modellerede og målte SO₂-koncentrationer i Europa. Stationerne er arrangeret som beskrevet i teksten.

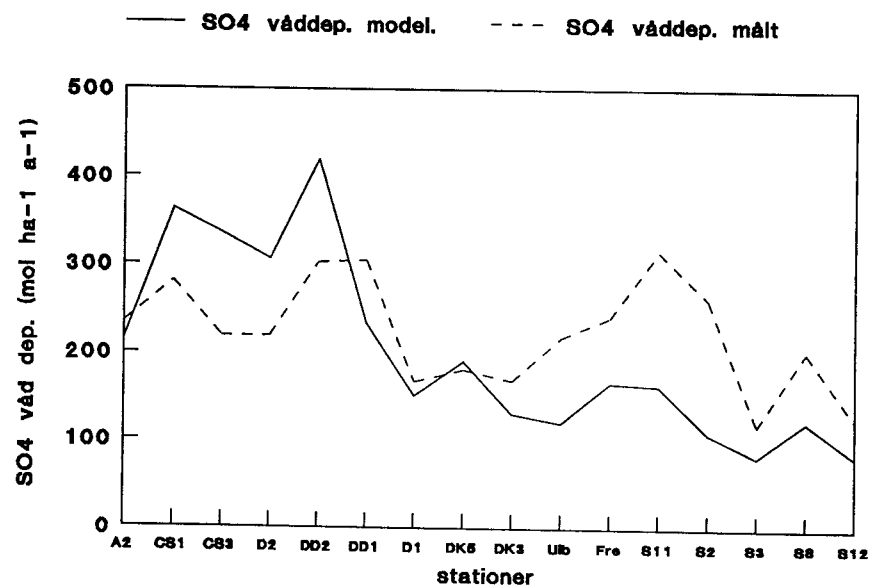
SO₄-koncentrationer

For SO₄-aerosolkoncentrationen er resultatet meget fint for alle stationer. De målte koncentrationer er ikke korrigerede for havsprøjt fordi dette bidrag er meget ringe (figur 7).



Figur 7. Modellerede og målte SO₄-aerosolkoncentrationer i Europa. Stationerne er arrangeret som beskrevet i teksten.

For våddeposition af SO_4 er resultatet mindre godt end for de andre komponenter. Det skal her bemærkes at de målte værdier er korrigerede for bidraget fra havsprøjt og af denne grund udelukkende giver udtryk for det antropogene bidrag. I modellen er nedbørsmængden 559 mm. Ser man på måleresultaterne er det iøjnefaldende at værdierne for nogle danske og svenske stationer er lige så høje som for Tjekkiske og Østtyske stationer. Det virker ulogisk. Nok dannes selve SO_4 -aerosol først efter et stykke tid og bidraget fra SO_2 til våddeposition af SO_4 er ikke så stor, men alligevel kan der forventes en aftagende deposition, i hvert fald fra Nord-Tyskland til Sverige. Den vil i virkeligheden være lidt anderledes end forventet p.g.a. forskel i nedbørsmængde, men ikke meget. Det ser ud til at modelresultaterne for DK5 (Keldsnor) er i god overensstemmelse med målingerne, men i følge Mads Hovmand, DMU (personlig meddelelse) underestimeres den målte våddeposition på denne station. På de danske stationer DK3 (Tange), Ulb (Ulborg) og Fre (Frederiksborg) underestimerer modellen våddepositionen med respektive 23, 45 og 31 %. For nogle svenske stationer underestimerer modellen våddepositionen med mere end 50%. Det skal dog bemærkes at for alle disse stationer gælder at den aktuelle nedbørsmængde er betydelig større end i modellen. Modellen kan på nuværende tidspunkt og med den rimelige finjustering af parametre ikke give bedre resultater, i hvert fald ikke med meteorologi for Kastrup.



Figur 8. Modelleret og målt våddeposition af SO_4 i Europa. Stationerne er arrangeret som beskrevet i teksten.

Underestimering af tørdeposition til skove

Det skal her bemærkes, at modellen formodentlig underestimerer tørdepositionen til naturområder, mest fordi tørdepositions-hastigheden til skove i virkeligheden vil være større end den gennemsnitlige tørdepositions-hastighed anvendt i modellen. Tabel 5 viser at den modellerede tørdeposition er større end den modellerede våddeposition for alle stationer.

Table 5. Modelleret tør- og våddeposition af SO_x for danske og svenske stationer (mol S ha⁻¹ a⁻¹).

Station	Tørdeposition	Våddeposition
DK5	373	190
DK3	227	130
Ulb	178	120
Fre	324	166
S11	273	163
S2	140	108
S3	88	82
S8	142	122
S12	90	82

3.4 Følsomhedsanalyse

For at kunne finjustere modelparametrene er der udført mange modelkørsler som dog ikke er diskuteret nærmere i nærværende rapport. I dette afsnit diskuteres resultaterne af nogle andre følsomhedsanalyser.

Skorstenshøjde og røggastemperatur

Der blev udført modelberegninger for nogle hypotetiske kraftværker på samme position som Fynsværk (i UTM32-koordinater (km): x= 589, y = 6144) for kombinationer af en røggastemperatur på 70°C og 125°C og skorstenshøjder på 120 og 250 m. Røggasmængden er antaget at være den samme som for Fynsværk blok 7 (1.038.000 Nm³ time⁻¹; Nm³ = normal m³). Det giver for røggastemperaturer på 70°C og 125°C, et termisk output på henholdsvis 20.6 og 41.2 MW. Gennemsnitsmeteorologi for Kastrup 1979-1989 er anvendt ved beregningerne af den totale SO_x-deposition, som er præsenteret i figur 9-12. Resultaterne viser, at den totale SO_x-deposition tæt ved kilden er op til en faktor 2 forskellig, men at forskellen aftager med afstanden fra kilden. På ca. 400 km afstand er forskellen mindre end 20%. En højere røggastemperatur bevirker en lavere SO_x-deposition tæt ved kilden, antagelig nok fordi SO₂-koncentrationen og dermed tørdepositionen er mindre. En højere skorstenshøjde har samme effekt.

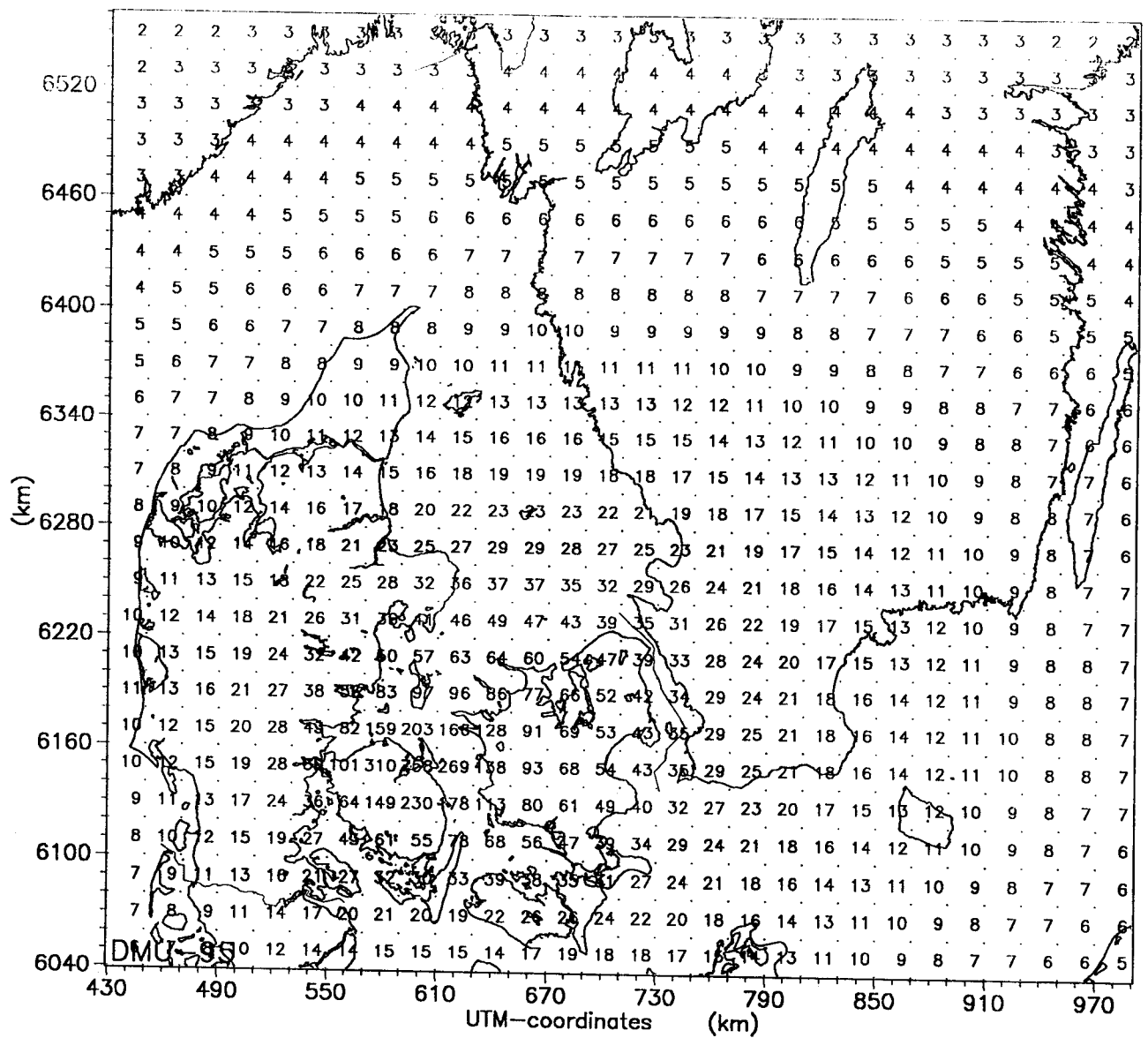
Kastrup/Karup meteorologi

En modelkørsel blev udført med Karup meteorologi for 1979-1988 for samme tværsnit over Europa som før er beskrevet for kørsler med Kastrup meteorologi. Det viste sig at den årlige nedbørsmængde for Karup for denne periode var langt større (854 mm vs. 559 mm). Det er sandsynligt at der er mere nedbør i Jylland, men denne værdi for Karup er så stor, at den skal undersøges nærmere, hvilket af tidsmæssige årsager ikke var muligt. Resultaterne viser (med forbehold), i forhold til kørslen med Kastrup meteorologi for 1979-1989 en større våddeposition (op til 50% større for danske og svenske

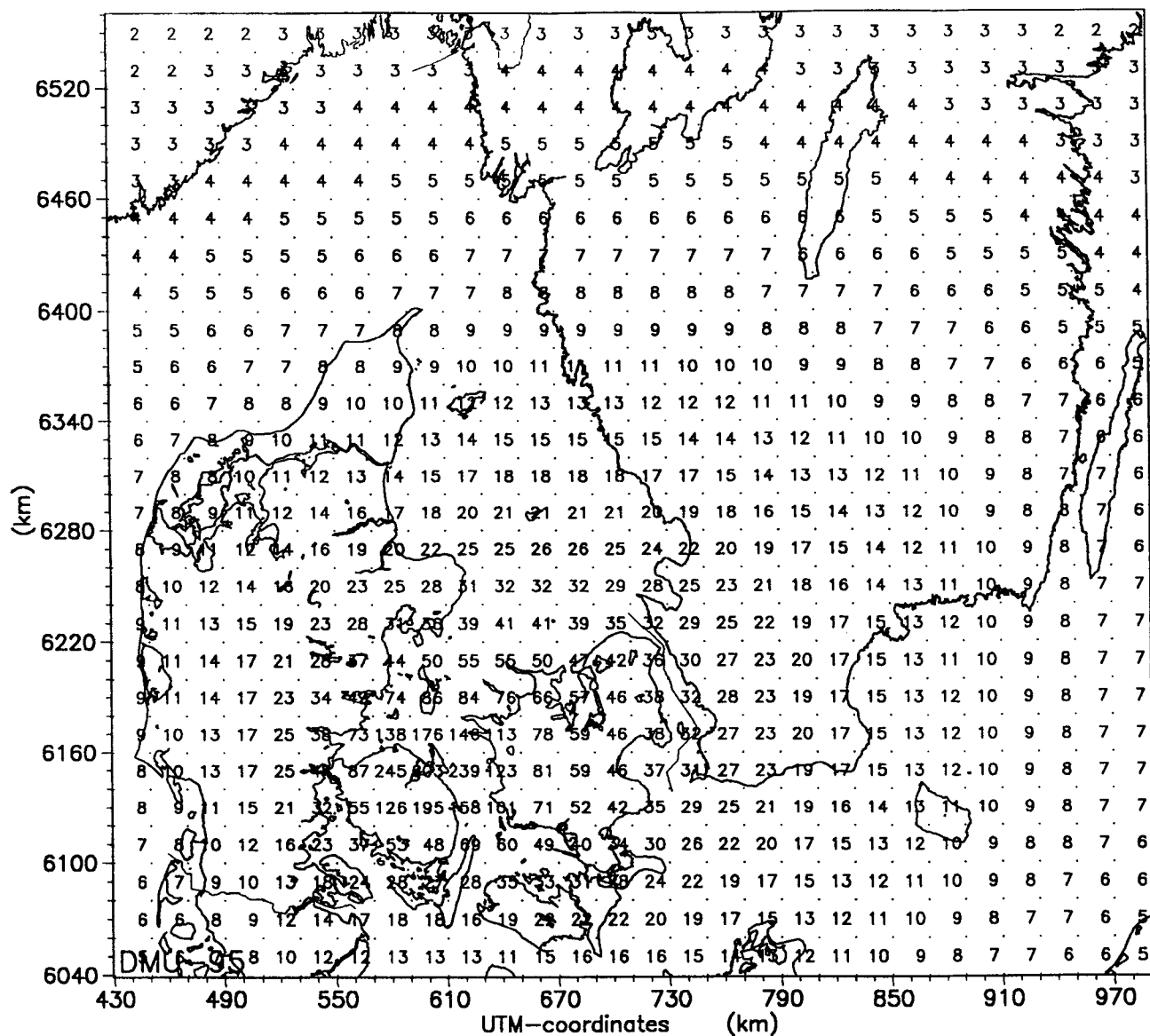
stationer) og en SO_2 -koncentration som er lidt lavere i Danmark, men lidt større i central Europa. For SO_4 -aerosol er koncentrationen generelt set større bortset fra i Sverige, hvor den er lidt mindre. Dette fænomen kan forklares ud fra den lidt større omsætningshastighed af SO_2 under nedbør i modellen, hvilket forårsages af vådkemiske processer.

Dag/nat og sommer/vinter

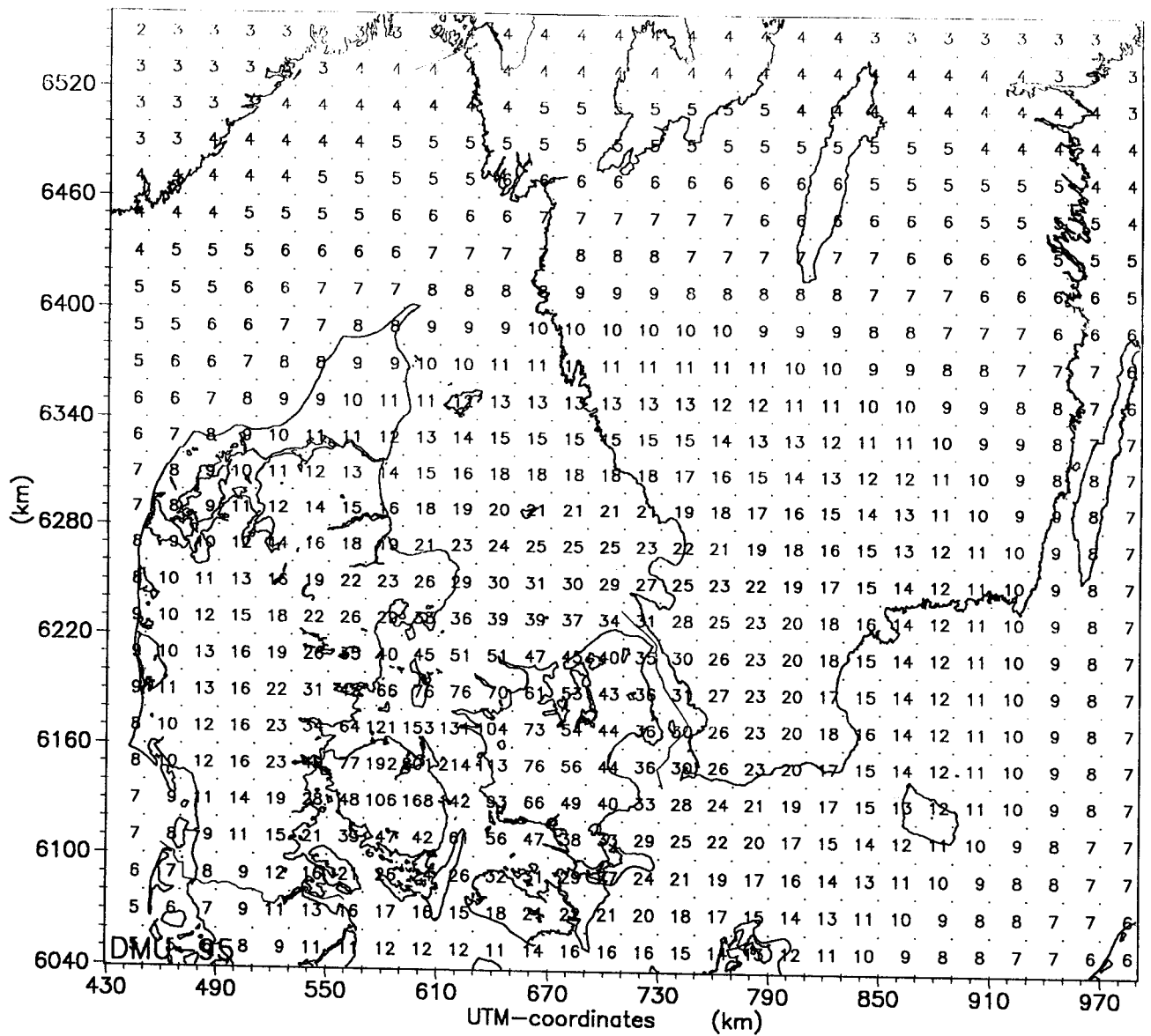
For Fynsværk blok 7 blev der udført modelberegninger med en enhedsemission på $1 \text{ ton SO}_2 \text{ år}^{-1}$ og Kastrup meteorologi for 1979-1989 for følgende situationer: sommer-dag, sommer-nat, vinter-dag, vinter-nat. Resultaterne præsenteres i figur 13-16. Som forventet er SO_x -depositionen tæt ved kilden, som antageligt nok primært er forårsaget af tørdeposition af SO_2 , større om dagen end om natten. Dette skyldes en bedre opblanding om dagen. SO_x -depositionen er også større om sommeren end om vinteren, hvilket nok skyldes samme årsag.



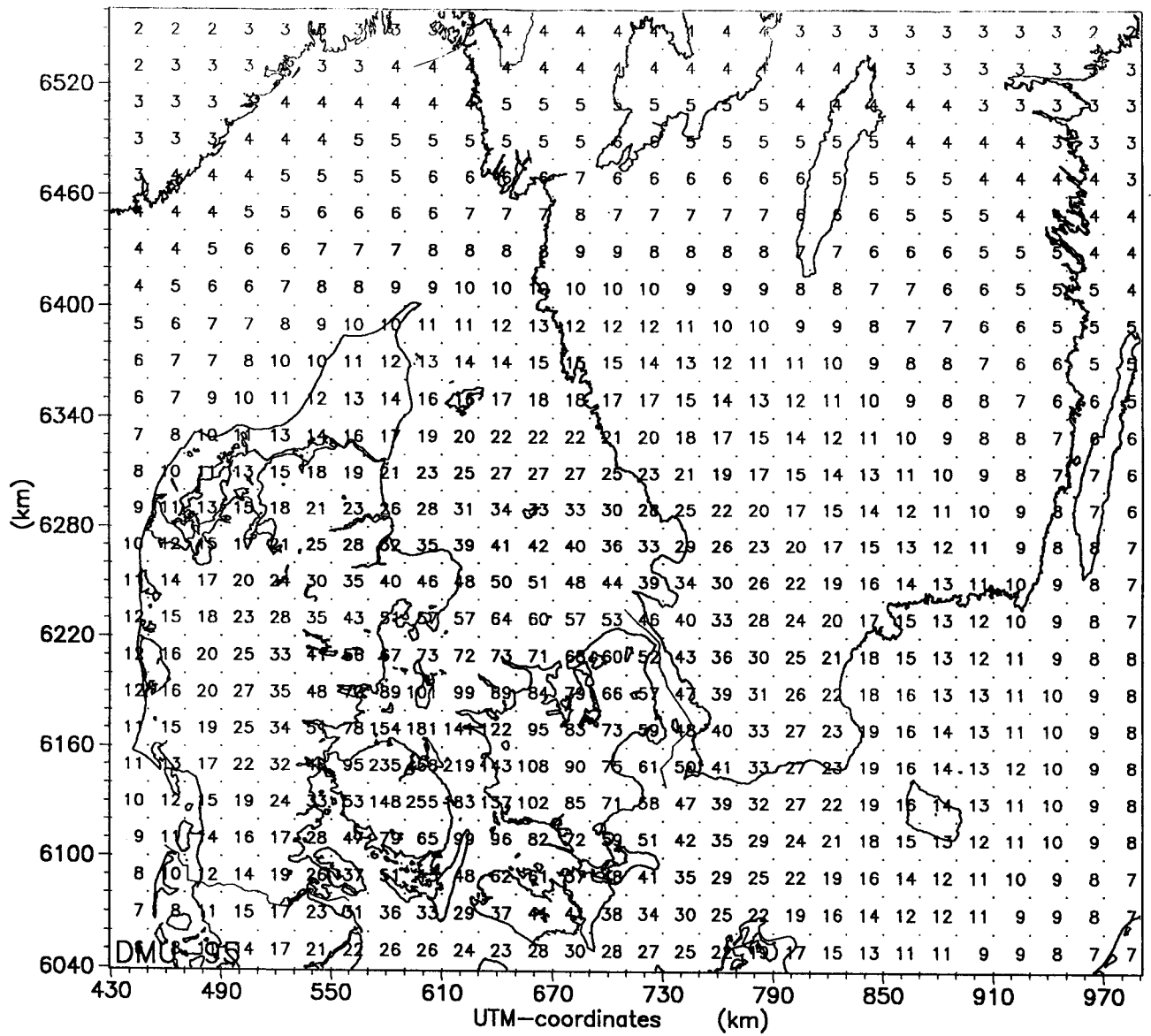
Figur 10. Total SO_x-deposition (10⁵ mol S ha⁻¹ år⁻¹) forårsaget af en punktkilde med samme position som Fynsværk. Kilden har en enhedsemission på 1 ton SO₂ år⁻¹, en røggastemperatur på 125°C og en skorstenhøjde på 120 m.



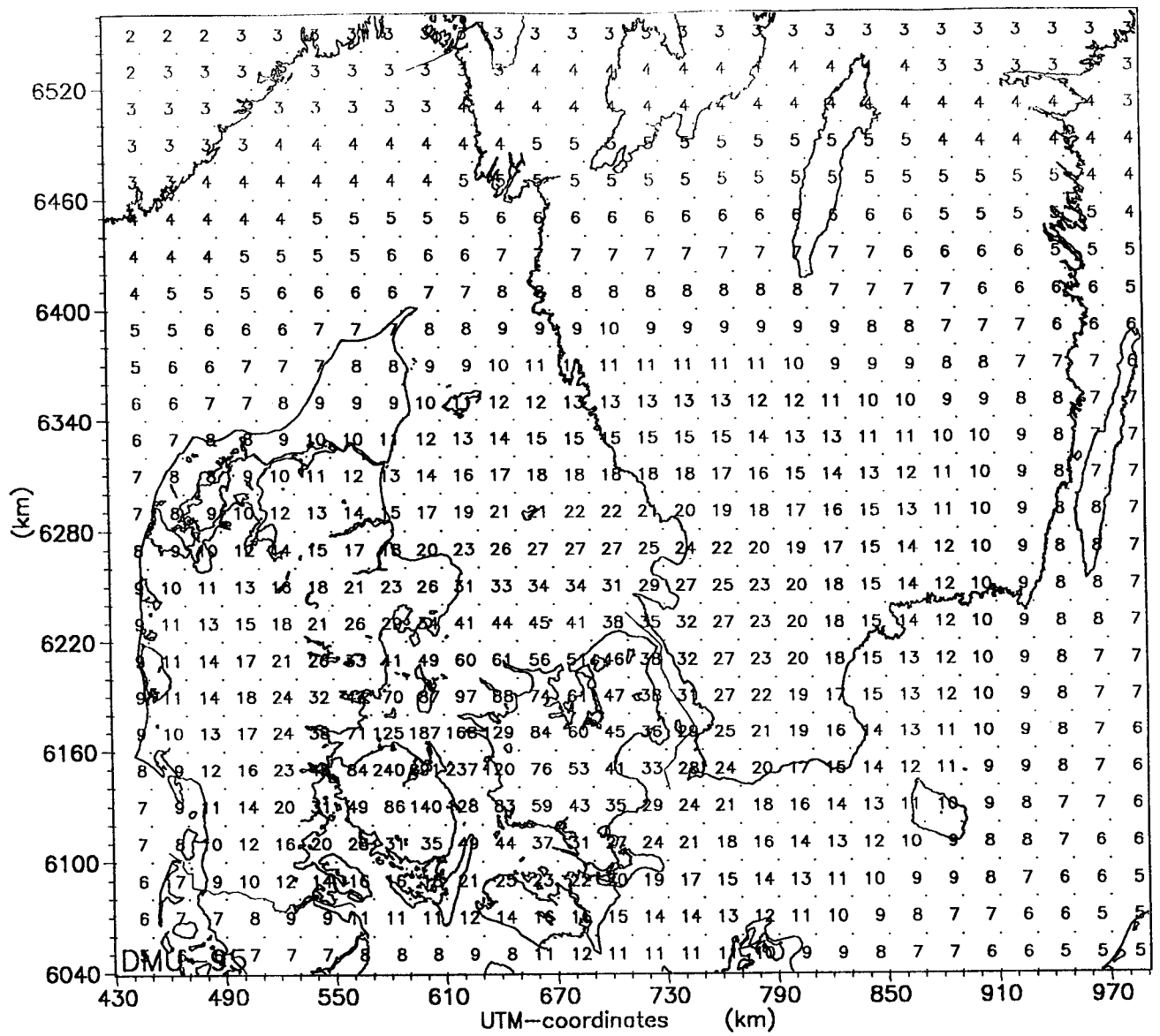
Figur 11. Total SO_x-deposition ($10^5 \text{ mol S ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) forårsaget af en punktkilde med samme position som Fynsværk. Kilden har en enhedsemission på 1 ton SO₂ år⁻¹, en røggastemperatur på 70°C og en skorstenhøjde på 250 m.



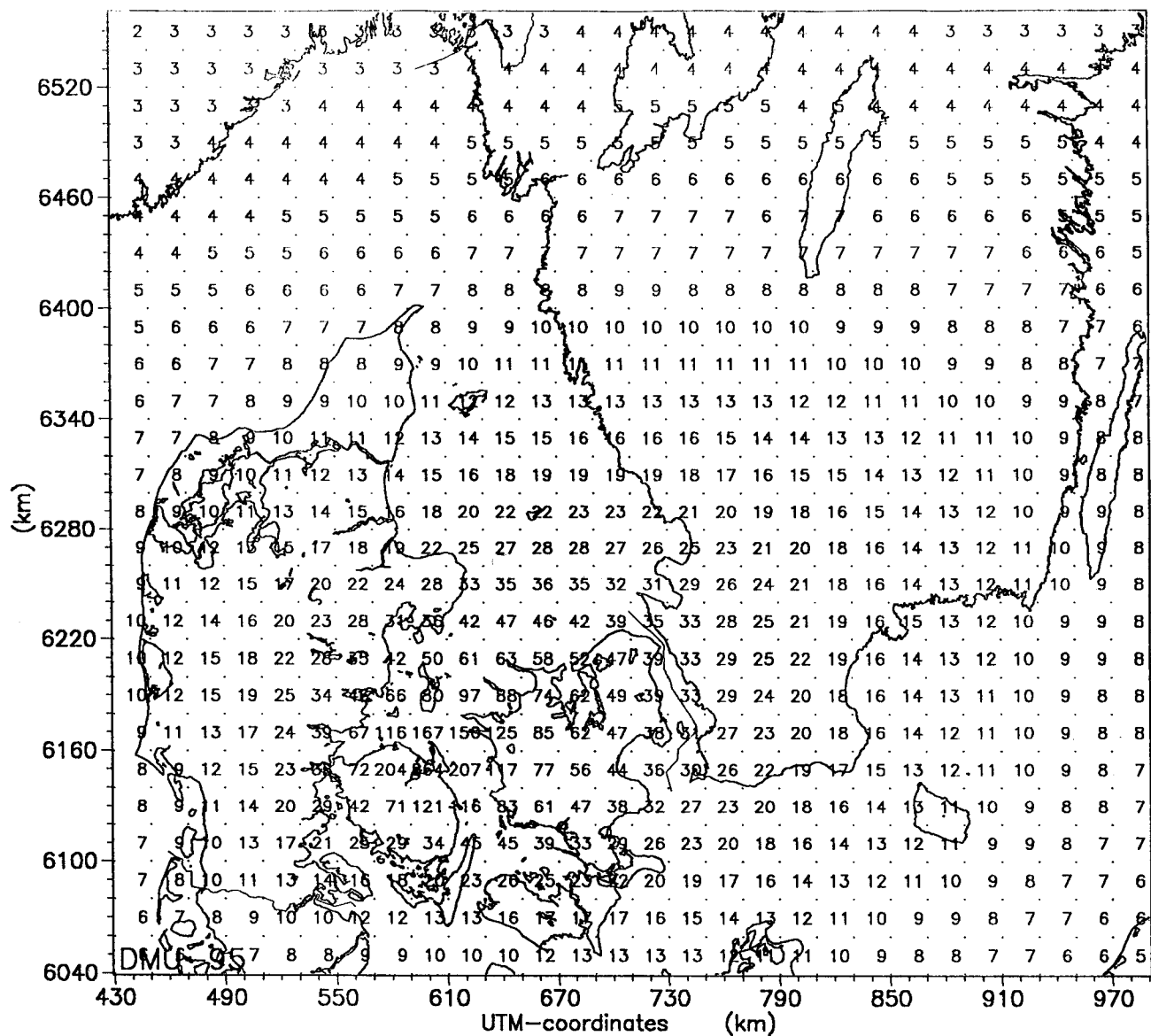
Figur 12. Total SO_x-deposition (10⁻⁵ mol S ha⁻¹ år⁻¹) forårsaget af en punktkilde med samme position som Fynsværk. Kilden har en enhedsemission på 1 ton SO₂ år⁻¹, en røggastemperatur på 125°C og en skorstenhøjde på 250 m.



Figur 14. Total SO₂-deposition (10^{-5} mol S ha⁻¹ år⁻¹) forårsaget af Fynsværk blok 7 med en enhedsemission på 1 ton SO₂ år⁻¹. Meteorologi: sommer-nat Kastруп 1979-1989.



Figur 15. Total SO_x-deposition (10^{-5} mol S ha⁻¹ år⁻¹) forårsaget af Fynsværk blok 7 med en enhedsemission på 1 ton SO₂ år⁻¹. Meteorologi: vinter-dag Kastrup 1979-1989.



Figur 16. Total SO_x-deposition ($10^5 \text{ mol S ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$) forårsaget af Fynsværk blok 7 med en enhedsemission på 1 ton SO₂ år⁻¹. Meteorologi: vinter-nat Kastrup 1979-1989.

4 MeMoS-modellen

4.1 Princippet

Antal af forskellige situationer

På basis af følsomhedsanalysen blev det besluttet at beregne overførselsmatricer med TREND-modellen til MeMoS-modellen for 5 komponenter (SO_2 -koncentration, SO_4^{2-} -koncentration, tørdeposition af SO_x , våddeposition af SO_x og totaldeposition af SO_x) for 4 meteorologiske situationer (sommer-dag, sommer-nat, vinter-dag, vinter-nat) med Kastrup 1979-1989 meteorologi, med i alt 72 kildeområder inklusive 58 danske kraftværkssituationer i $29 \times 27 = 783$ punkter (midtpunkter for $20 \times 20 \text{ km}^2$ -ruder). D.v.s. at overførselsmatricerne repræsenterer i alt 1.127.520 forskellige situationer. De gennemsnitlige koncentrationer og depositioner for hele året bliver beregnet ud fra værdierne for hver af de 4 meteorologiske situationer.

Emissioner

Brugeren kan selv ændre de danske og udenlandske emissioner, hvorefter MeMoS-modellen beregner koncentrationer og depositioner for alle $20 \times 20 \text{ km}^2$ -ruder.

Tålegrænser

I MeMoS-modellen er det muligt at sammenligne den beregnede totale SO_x -deposition med tålegrænsen (critical load) for forsurening for naturområder i Danmark og Sverige. Da forsureningen også er baseret på deposition af kvælstofforbindelser bliver forsureningen forårsaget af SO_x lagt oveni den forurening som forårsages af kvælstofforbindelserne. Depositionen af kvælstofforbindelserne er i modellen fastlagt til det nuværende niveau. Information om tålegrænser for Danmark stammer fra Jesper Bak (DMU-TERI) og information om tålegrænser for Sverige stammer fra Harald Sverdrup, Lunds Universitet, Sverige. Flere praktiske oplysninger om MeMoS-modellen kan findes i *ELSAMPROJEKT (1995)*.

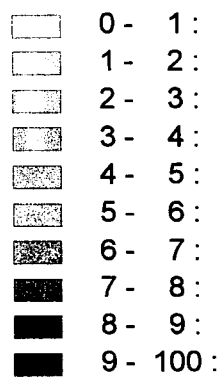
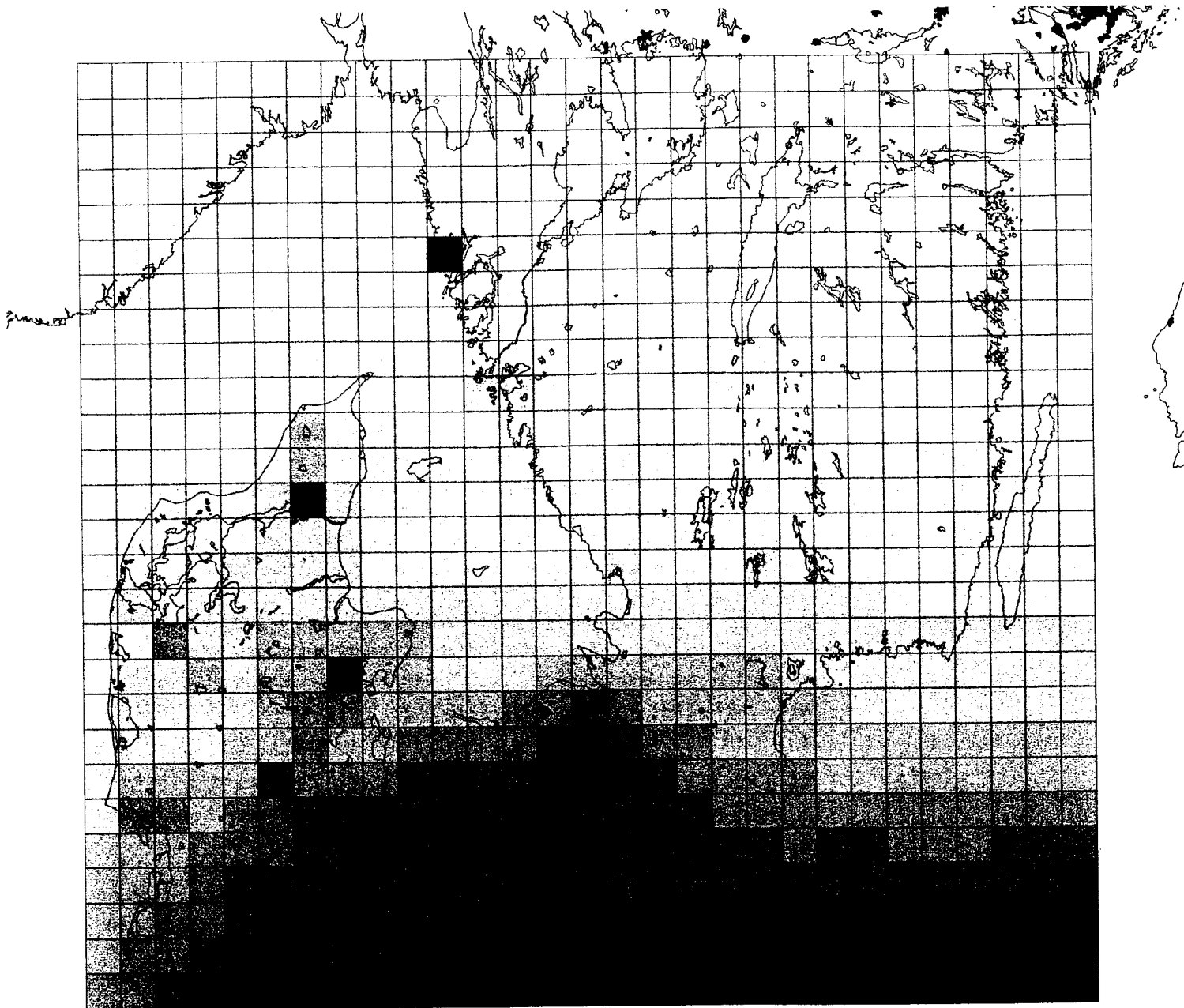
4.2 Eksempler

Nogle eksempler på beregning af deposition forårsaget af et enkelt kraftværk er præsenteret i figur 9-12. I de for neden præsenterede figurer er der vist resultater for alle danske kilder, udenlandske kilder eller en kombination af danske og udenlandske kilder. Figureerne for koncentrationer er blå, figureerne for depositioner er røde og figurene for overskridelse af tålegrænser har flere farver. På kortene kan byer uden for modelområdet i nogle tilfælde være røde og danske søer være blå. Disse farver har ikke noget at gøre med skalaen for koncentrationer, depositioner og overskridelser af tålegrænser.

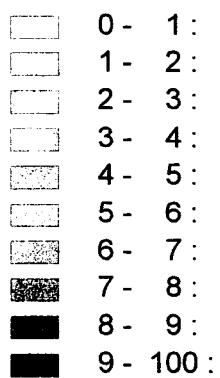
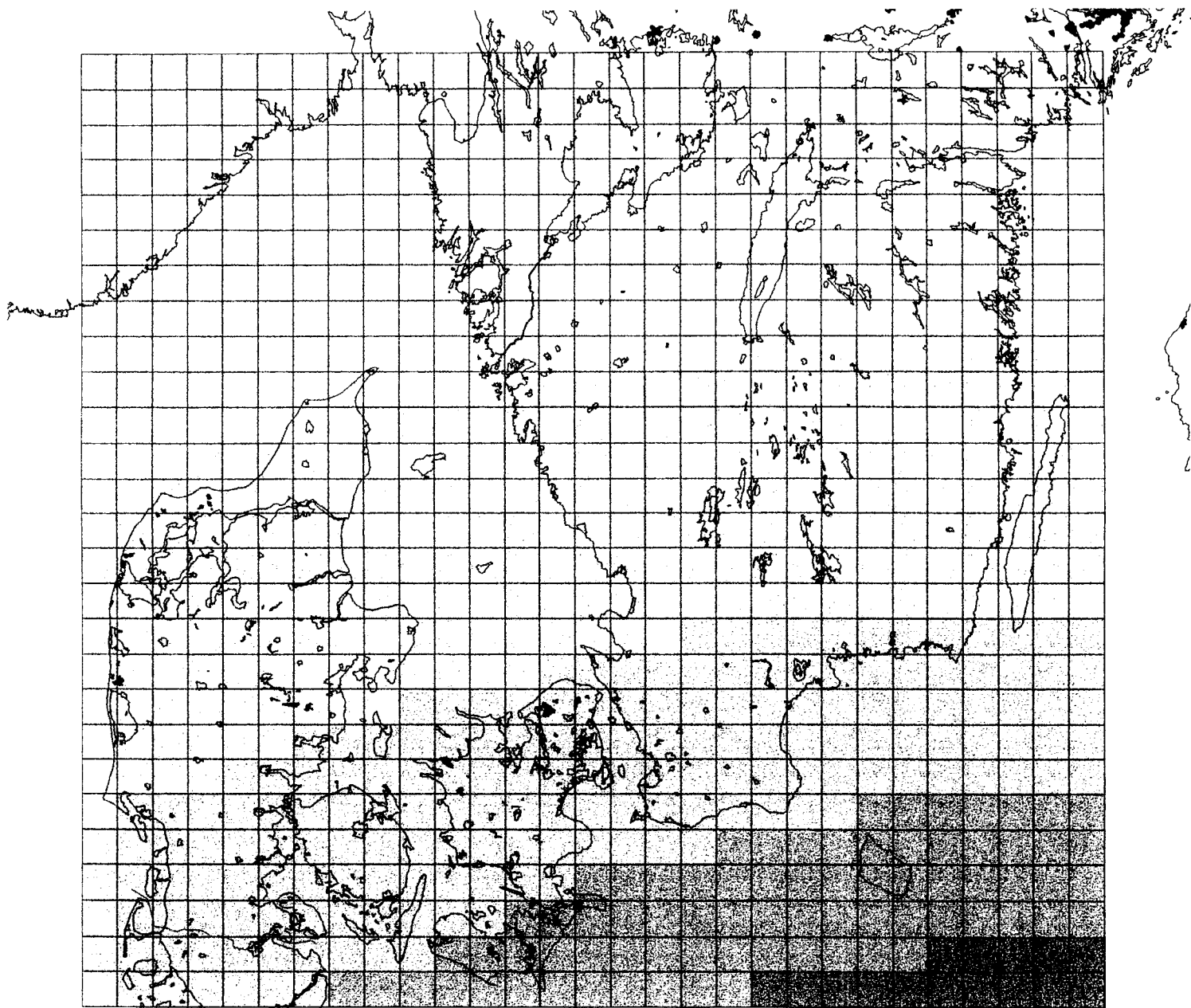
SO_2 -koncentration

Figur 17 viser den geografiske fordeling af SO_2 -koncentrationen forårsaget af udslip fra alle europæiske kilder. Det ses tydeligt, at koncentrationen er størst i Syd-Danmark, hvilket antageligt skyldes udenlandske kilder. Koncentrationen er også forhøjet i byområder, som København, Odense, Århus og Göteborg eller nær større kraftværker som Asnæsværket ved Kalundborg.

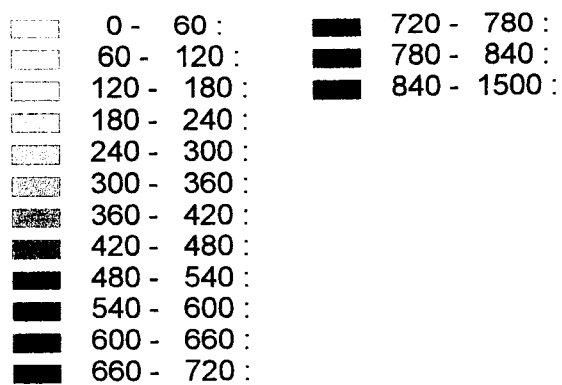
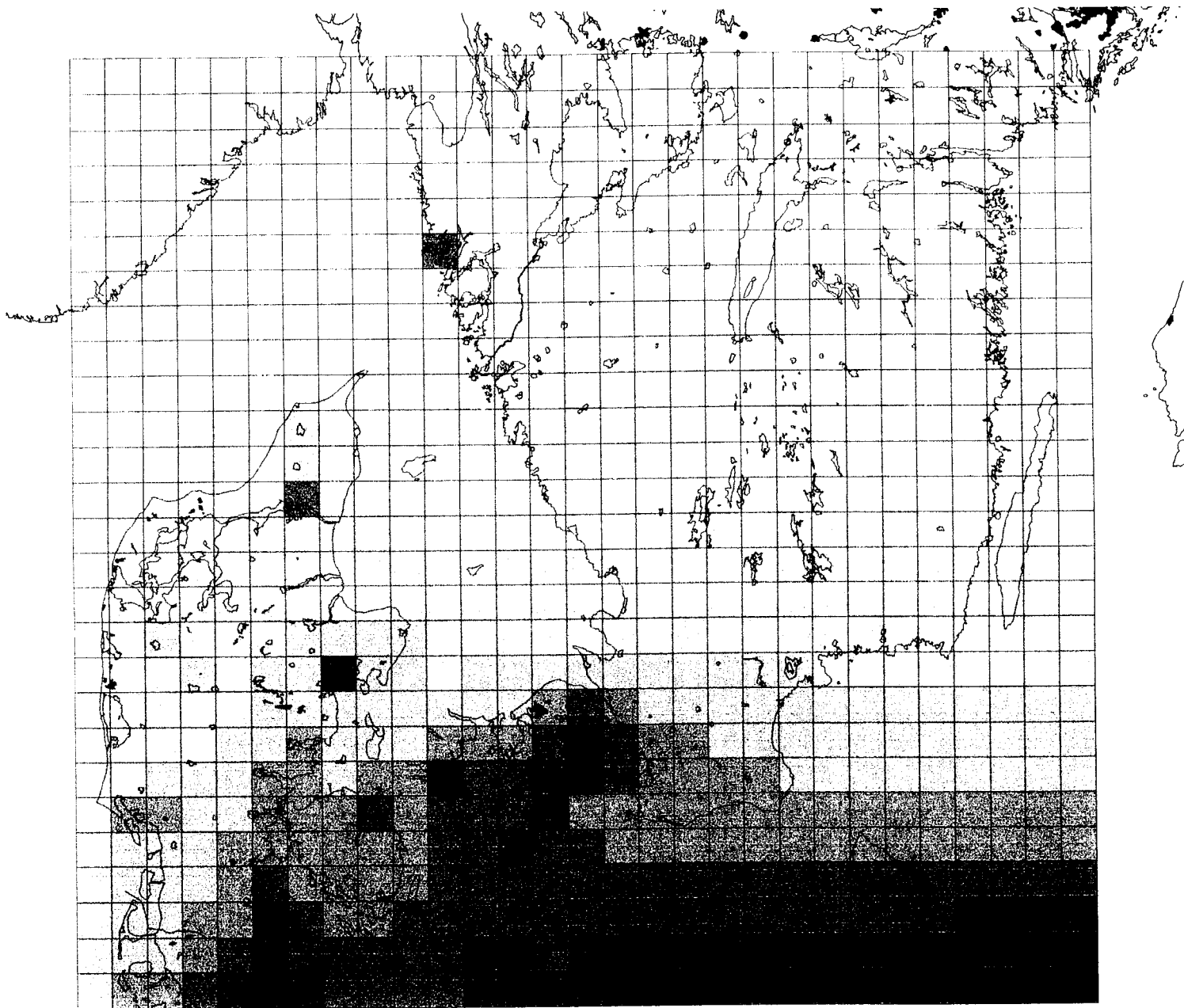
<i>SO₄-koncentration</i>	Figur 18 viser den geografiske fordeling af SO ₄ -koncentrationen forårsaget af alle europæiske kilder. Den viser også at koncentrationen aftager fra sydøst til nordvest, ligesom for SO ₂ . Koncentrationen er dog ikke forhøjet i byer eller i nær kraftværker. Denne, mere jævne fordeling, skyldes delvist at SO ₄ er et reaktionsprodukt, som først dannes efter røgfaner er spredt over hele blandingshøjden, hvilket finder sted i nogen afstand fra kilderne. Den skyldes også delvist at SO ₄ transporteres over store afstande p.g.a. dens lave tørdepositions-hastighed.
<i>Tørdeposition af SO_x</i>	Figur 19 viser den geografiske fordeling af tørdeposition af SO _x forårsaget af alle europæiske kilder. Fordelingen ligner meget denne for SO ₂ , da bidraget fra SO ₂ til tørdepositionen af SO _x er langt større end bidraget fra SO ₄ . Dette skyldes bl.a. at SO ₂ har en langt større tørdepositions-hastighed end SO ₄ .
<i>Våddeposition af SO_x</i>	Figur 20 viser den geografiske fordeling af våddeposition af SO _x forårsaget af alle europæiske kilder. Bemærk at figuren har samme skala som figur 19. Der eksisterer en sydøst-nordvest gradient og figuren ligner meget den for SO ₄ . Dette skyldes delvist, at størstedelen af våddeposition af SO _x forårsages af bidraget fra SO ₄ . Tørdeposition af SO _x er i Sydsandinavien ofte større end våddepositionen.
<i>Total deposition af SO_x</i>	Figur 21 viser den geografiske fordeling af totaldeposition af SO _x forårsaget af alle europæiske kilder. I denne figur kan de enkelte byområder og store kraftværker genkendes, fordi tørdepositionen er forholdsvis stor i disse områder. Figuren viser også at der findes en tydelig syd-nord gradient over Syd-Sverige.
<i>Bidrag fra danske kilder</i>	Figur 22 viser den geografiske fordeling af totaldeposition af SO _x forårsaget af danske kilder (kraftværker og andre kilder). Bemærk at figur 19-23 har samme skala og derfor kan sammenlignes.
<i>Bidrag fra udenlandske kilder</i>	Figur 23 viser den geografiske fordeling af total-deposition af SO _x forårsaget af udenlandske kilder. Sammenligning af figur 23 med figur 22 viser tydeligt at det danske bidrag generelt set er mindre end det udenlandske, undtagen tæt ved vigtige kilder. Sammenligningen viser også at det danske bidrag til totaldeposition af SO _x i Syd-Sverige er mindre end det bidrag fra andre kilder (inklusiv svenske).
<i>Overskridelse af tålegrænser forårsaget af kvælstof</i>	Figur 24 viser overskridelse af tålegrænser for forsurende udelukkende baseret på deposition af kvælstof. D.v.s. SO _x -deposition er slet ikke taget i betragtning i figuren. Det ses at tålegrænserne for forsurende allerede på mange steder er overskredet p.g.a. kvælstofdeposition! Hvis ruderne er hvide skyldes det, at der ikke forefindes information om tålegrænser for disse ruder.
<i>Overskridelse af tålegrænser forårsaget af svovl og kvælstof</i>	Figur 25 viser overskridelse af tålegrænser for forsurende baseret på deposition af både svovl og kvælstof. Figuren viser at tålegrænsen er overskredet overalt bortset fra i Vest-Jylland tæt ved kysten og enkelte andre steder.



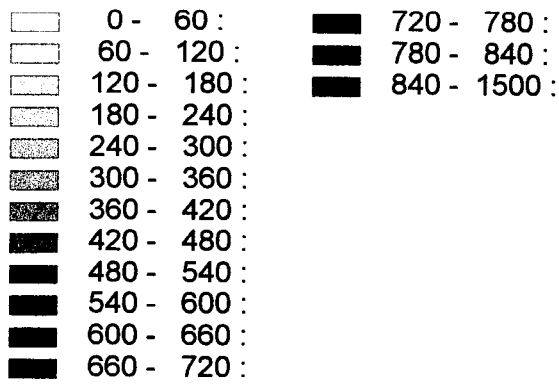
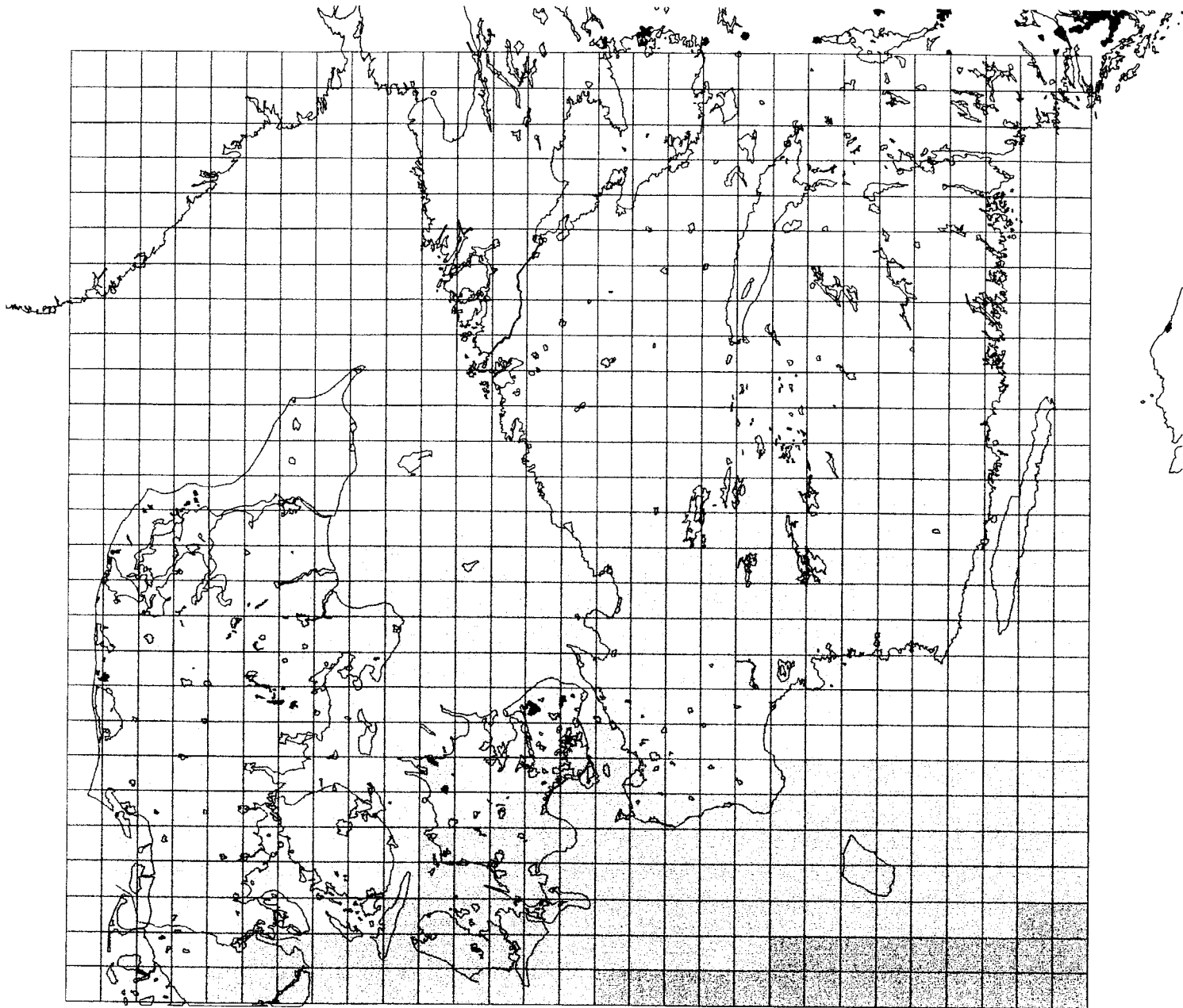
Figur 17. SO₂-koncentration forårsaget af emissioner for hele Europa for ca. året 1990 (µg SO₂ m⁻³).



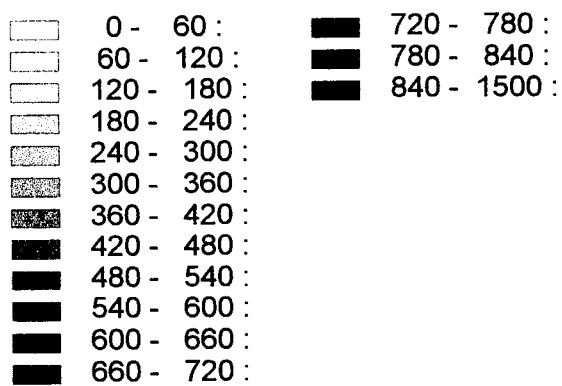
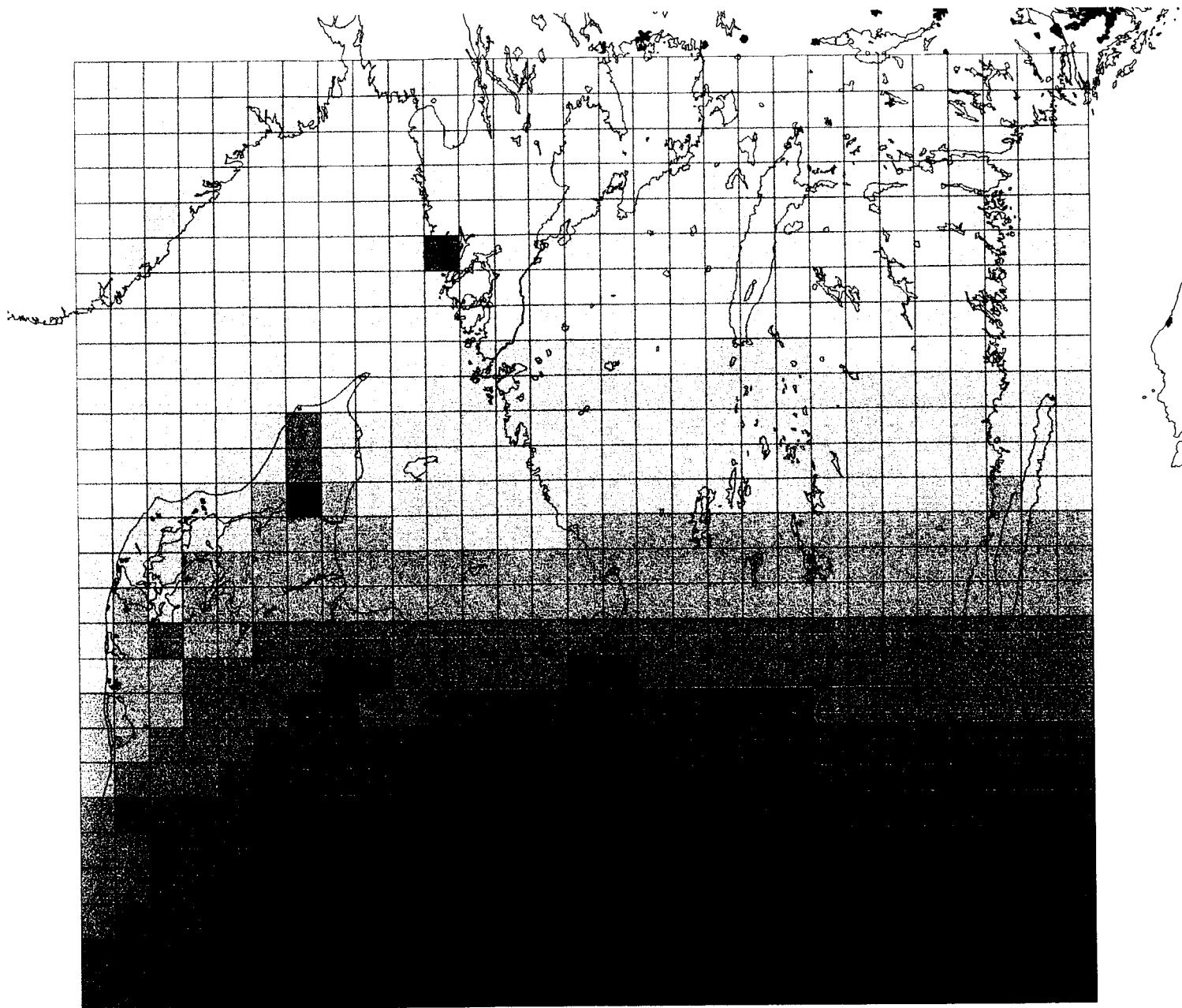
Figur 18. SO₄-koncentration forårsaget af emissioner for hele Europa for ca. året 1990 (µg m⁻³).



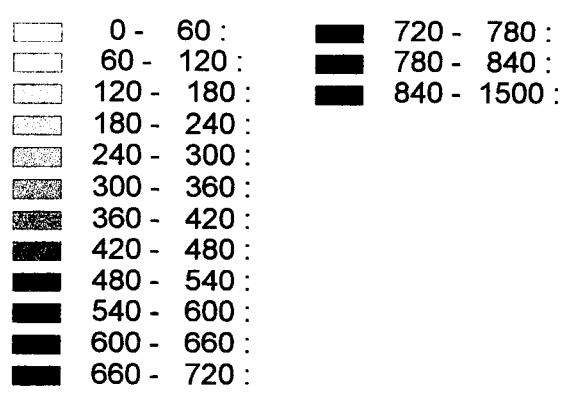
Figur 19. Tørdeposition af SO_x forårsaget af emissioner for hele Europa for ca. året 1990 ($\text{mol S ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$).



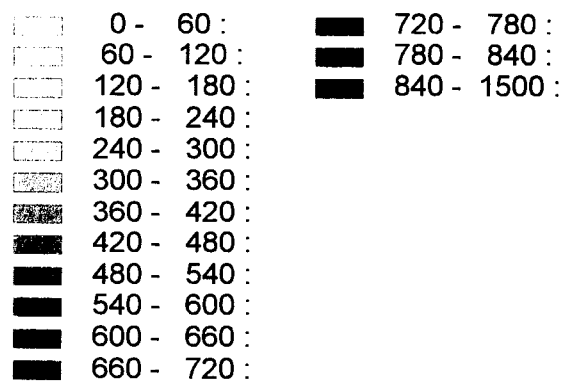
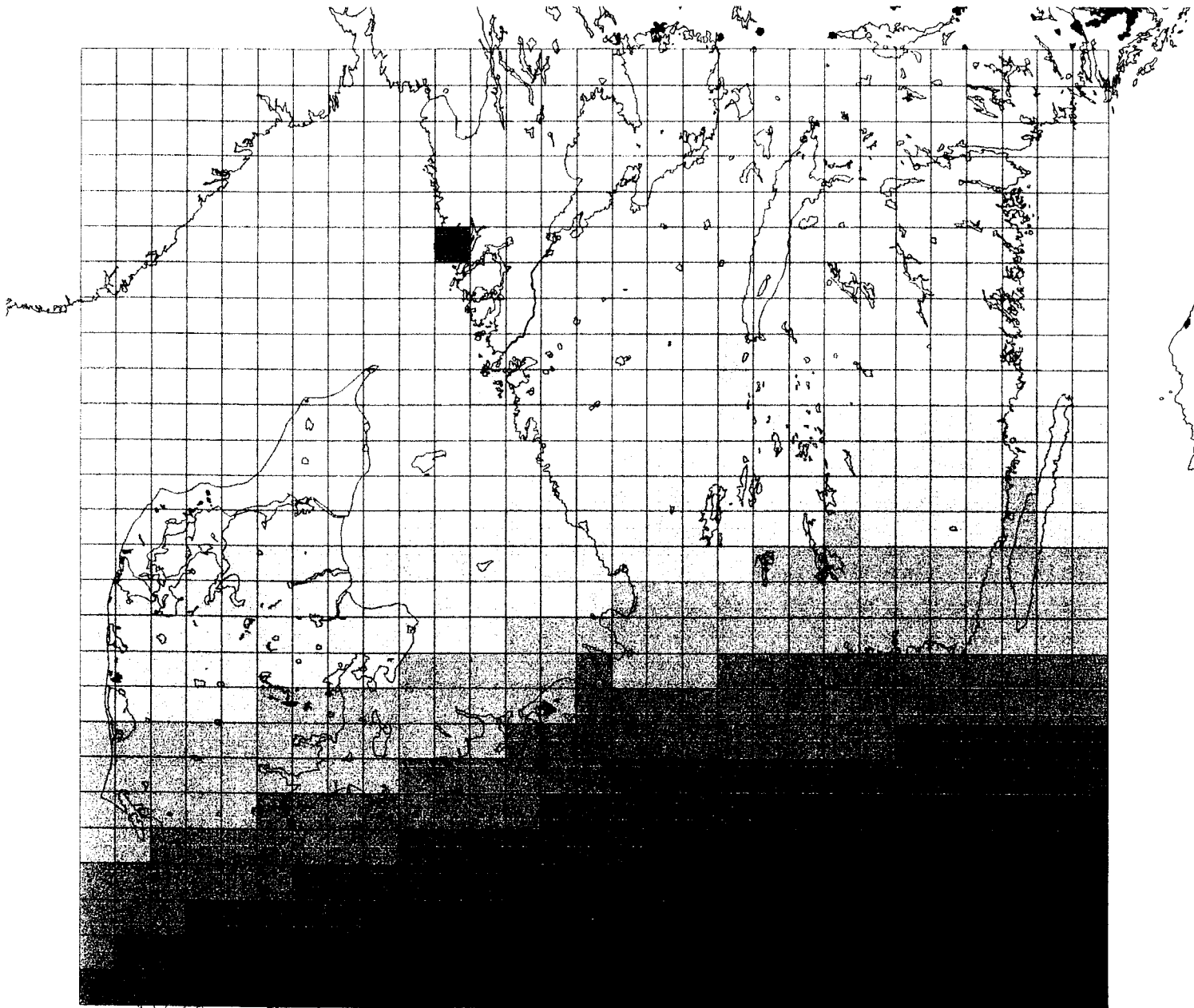
Figur 20. Våddeposition af SO_x forårsaget af emissioner for hele Europa for ca. året 1990 ($\text{mol S ha}^{-1} \text{a}^{-1}$).



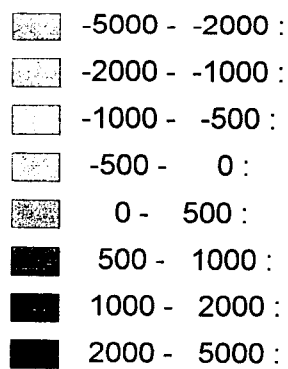
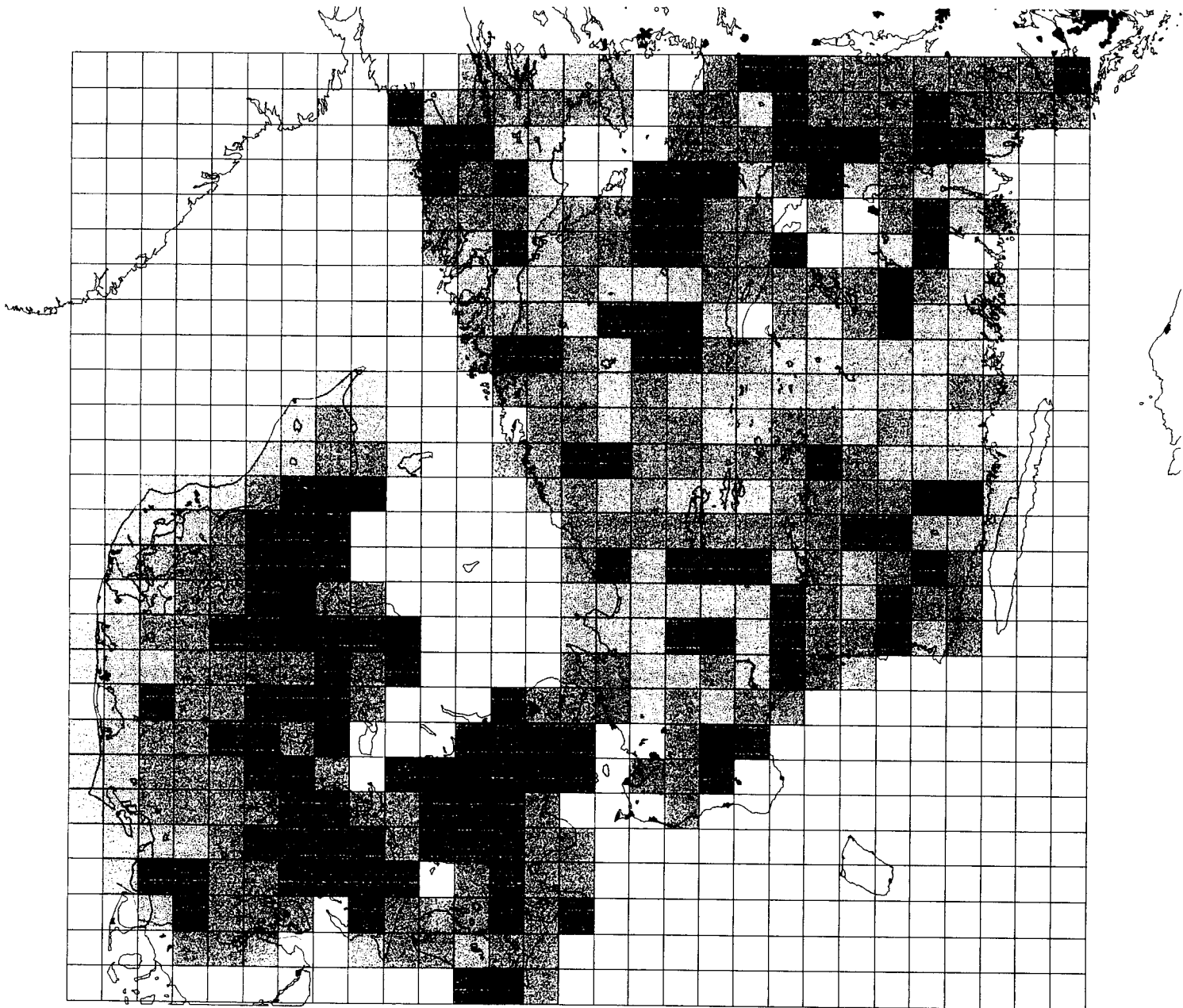
Figur 21. Totaldeposition af SO_x forårsaget af emissioner for hele Europa for ca. året 1990 (mol S ha⁻¹ a⁻¹).



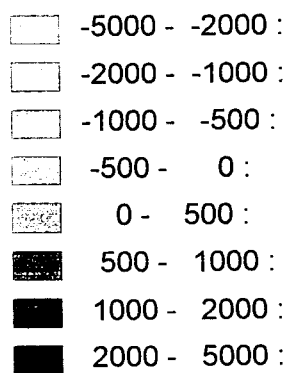
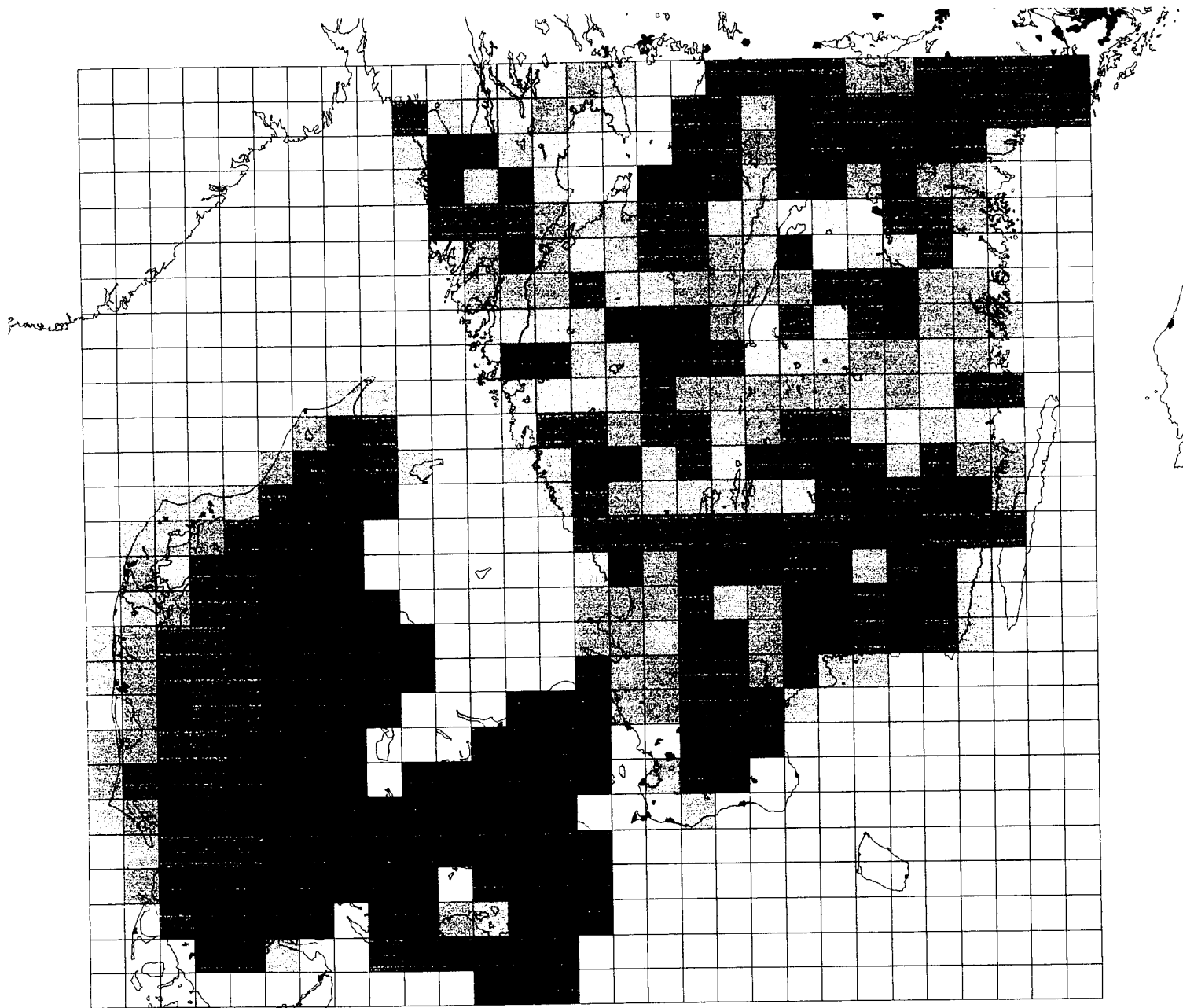
Figur 22. Bidrag fra danske emissioner til totaldeposition af SO_x for ca. året 1990 (mol S ha⁻¹ år⁻¹).



Figur 23. Bidrag fra udenlandske emissioner til totaldeposition af SO_x for ca. året 1990 ($\text{mol S ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$).



Figur 24. Overskridelser af tålegrænsen for forurening udelukkende forårsaget af kvælstofforbindelser (mol H^+ $\text{ha}^{-1} \text{år}^{-1}$). Alle positive værdier er overskridelser.



Figur 25. Overskridelser af tålegrensen for forsuring forårsaget af svovl- og kvælstofforbindelser ($\text{mol H}^+ \text{ha}^{-1} \text{år}^{-1}$). Alle positive værdier er overskridelser.

5 ELSAM's mulige behov for yderligere modeludvikling

5.1 Stoffer og modeltyper

Hvilke stoffer er vigtige for ELSAM?

I denne rapport beskrives en konsekvensmodel for svovl. ELSAM har også behov for at kende effekterne af kraftværker for andre stoffer end svovldioxid. I først omgang er kvælstofforbindelserne vigtige. Kraftværker er en vigtig kilde for kvælstofoxider (NO_x). Ved de internationale forhandlinger spiller ikke kun NO_x en rolle, men effekterne af alle kvælstofforbindelser betragtes samlet. Det er derfor også vigtigt at tage ammoniak (NH_3) med i fremtidige konsekvensmodeller. Desuden betragtes SO_2 , NO_x og NH_3 samlet når det gælder effekter af forurening, da alle disse stoffer bidrager dertil. Endvidere er det også vigtigt at vurdere effekter af ozon (O_3), som opstår ved reaktioner af bl.a. NO_x og kulbrinter under indflydelse af sollys.

Forskellige transportmodeller

Til beregning af koncentrationer og depositioner af ovennævnte stoffer, som kan indgå i konsekvensmodeller, kan der benyttes forskellige atmosfæriske transportmodeller. I nærværende afsnit henvises til følgende atmosfæriske transportmodeller:

- EMEP-modellen. Resultaterne af denne model indgår i RAINS-modellen. EMEP-modellen bruges for flere stoffer, bl.a. for SO_2 , NO_x , NH_3 og O_3 , men der eksisterer også versioner for tungmetaller. I nogle versioner af modellen indgår noget enkel fotokemi. EMEP-modellen er et etlagsmodel.
- TREND-modellen, der er brugt som grundlag for opstilling af MeMoS-modellen der er beskrevet i afsnit 2. TREND-modellen kan ikke håndtere mange kemiske reaktioner (fotokemi) og er brugt til SO_2 , NO_x , NH_3 , organiske stoffer og tungmetaller.
- ACDEP-modellen, som er et flerlags fotokemisk model udviklet på DMU. Modellen er brugt til SO_2 , NO_x , NH_3 og O_3 .

Alle disse modeller er lagranske, dvs. at de følger luftpakker på deres vej (trajektorie) til et ankomstpunkt. Undervejs bogholdes, hvor meget stof der emitteres til luftpakken, hvor meget der fjernes ved deposition, og hvor meget, der reagerer bort.

5.2 Krav der skal stilles til modeller

Depositionshastigheder

For at kunne estimere depositionen til et naturområde nøjagtigt, er det nødvendigt at modellen har mulighed for at have forskellige tørdepositionshastigheder for forskellige overflader og at nedbørsmængden og -hyppigheden er kendt langs hele transportvejen. For nogle stoffer, som f.eks. SO_2 stammer størstedelen af koncentrationen/depositionen fra fjerne kilder, og de lokale kilders

Detaljerede emissionsopgørelser

indflydelse er ikke så vigtig. For andre stoffer som f.eks. NH_3 bidrager lokale kilder til en betydelig del af depositionen og det er af denne grund vigtigt at have en stor rumlig opløsning i modellen, både hvad emission som deposition angår. Sidstnævnte er især vigtigt for Danmark og Syd-Sverige, hvor naturområderne er forholdsvis små og ligger i landbrugsområder.

Punktkilder For at kunne estimere bidraget fra kraftværker korrekt, er det nødvendigt at kunne beskrive spredning af røgfaner fra punktkilder nøjagtigt.

Linearitet Til udvikling af konsekvensmodeller er det en fordel at den anvendte atmosfæriske transportmodel er lineær, men resultaterne bliver dårligere når andre stoffer har også har reagerer med det pågældende stof (som f.eks. for NO_x). For O_3 er det umuligt at arbejde med lineære modeller. Nedenfor diskuteres fordele og ulemper ved ovenstående modeller.

5.3 EMEP-modellen

Fordele Fordele: Relativ enkel model, kræver ikke så meget regnetid, kan også beskrive fotokemiske reaktioner og O_3 -dannelse. I modelberegningerne indgår nedbørsmængder på et $150 \times 150 \text{ km}^2$ gitter, dvs. at nedbørsmængden ikke er ens overalt. Resultaterne kan beregnes med en høj tidsopløsning (f.eks. 6 timer), men dette er dog ikke nødvendig for critical load beregninger.

Ulemper Ulemper: Er et etlagsmodel, kan ikke beskrive spredning fra punktkilder nøjagtigt. For at beskrive spredningen antages at stofferne spredes med det samme over hele blandingslaget, beregnede koncentrationer/depositioner korrigeres med en korrektionsfaktor, således at modellen på større afstand fra kilden ($> 50 \text{ km}$) giver samme resultat som en røgfanespredningsmodel. Men på kortere afstand fra kilden kan korrektionen ikke tilpasses. For tiden udføres beregningerne på et $150 \times 150 \text{ km}^2$ regelmæssigt gitter, men fra slutningen af 1995 vil beregningerne også kunne udføres på et $50 \times 50 \text{ km}^2$ regelmæssigt gitter.

Tørdepositionshastigheder Tørdepositionshastigheden er, bortset fra en nord-syd gradient ikke forskellig for forskellige overflader, men der arbejdes nu på at bygge tørdepositionshastigheder i modellen, som er overfladeafhængig. Desuden arbejdes der på at indbygge korrektionsfaktorer i modellen, som er afhængig af den lokale depositionshastighed.

Vindretningen Vindretningen og vindhastigheden er ikke en funktion af højden men repræsenterer en slags gennemsnit for hele blandingslaget.

Løbende udvikling Det skal påpeges her at der findes forskellige versioner af EMEP-modellen. Desuden bliver modellerne løbende udviklet, hvilket betyder at modellerne forbedres hele tiden.

5.4 TREND-modellen

Fordele

Fordele: Relativ enkel model, kræver ikke megen regnetid, fordi det er en statistisk model, som giver gennemsnit for en bestemt periode (> 1 uge). Modellen har en stor rumlig opløsning, ikke for hele Europa, men for f.eks. Danmark og Sverige. Spredningen af punktkilder beskrives godt ved hjælp af modellen. Vindretningen og -hastigheden er en funktion af højden i modellen.

Ulemper

Ulemper: Tørdepositionshastighederne og nedbørsmængder og -hyppigheder er ens for hele modelområdet, men der tages hensyn til en døgnvariation, som så også er ens for hele modelområdet. Den kemiske beskrivelse i modellen er meget enkel (fra et udgangsstof til et reaktionsprodukt). Dette gør modellen uegnet til beregninger for O_3 og mindre egnet til beregninger for NO_x .

5.5 ACDEP-modellen

Fordele

Fordele: Kan tage hensyn til udviklede (foto-)kemiske reaktioner og vekselvirkning af forskellige stoffer ved emissionsreduktioner. Er af denne grund egnet til beregninger for NO_x og O_3 . Tager hensyn til at nedbørsmængder og (delvis) tørdepositionshastigheder viser en rumlig variation. Resultaterne kan beregnes med en høj tidsopløsning (f.eks. 6 timer), men dette er ikke nødvendigt for critical load beregninger.

Ulemper

Ulemper: Er p.g.a. den udviklede kemi meget regnetung og vil af denne grund kun kunne give resultater for et begrænset antal receptorpunkter (størrelsesorden 5 timer cpu-tid på en hurtig arbejdsstation for et års beregninger for et receptorpunkt). P.g.a. numeriske problemer bliver emissionerne med det samme fordelt over de nederste 80 m i atmosfæren, hvilket for NO_x og NH_3 's vedkommende giver urealistiske resultater da kildehøjden for disse stoffer er meget lav. Tager ikke hensyn til at vindhastigheden og -retningen er en funktion af højden. Det er muligt at bruge en forøget rumlig opløsning (< $30 \times 30 \text{ km}^2$) men det vil betyde, at antallet lag i ACDEP-modellen skal øges, hvilket vil medføre øget regnetid.

5.6 Modelstrategi

Modeludvikling kræver tid og det er sandsynligt, at der i forbindelse med NO_x -protokollen snart er brug for modeller til at kontrollere beregninger udført med f.eks. EMEP-modellen og RAINS-modellen. Dertil foreslås følgende:

- a) TREND-modellen benyttes i første omgang også til at lave beregninger for NO_x og NH_3 . Det kræver nogle ændringer, bl.a. skal de svenske emissioner bruges med $20 \times 20 \text{ km}^2$ opløsning. Forskellen mellem Kastrop- og Karup-meteorologi undersøges nærmere, især hvad nedbør angår, evt. sammen med DMI (DMU

har arbejdet sammen med DMI vedr. nedbørsstatistik). For NO_x laves en konsekvensmodel i samme stil som for SO_2 (MeMoS-modellen), d.v.s. at bidraget fra hvert kraftværk kan beregnes. Evt. kan Miljøstyrelsen spørges om der er brug for en mere detaljeret kilde-opdeling. Da NH_3 næsten ikke stammer fra kraftværker, nytter det ikke meget at bruge samme opdeling for kraftværker som for SO_2 og NO_x . Her vil det evt. være godt at have en underfordeling af kilderne med mulighed for at studere reduktionsmuligheder. DMU har et beslægtet projekt i gang, men mulighederne for at gøre det godt med inddragelse af landbrugskendskab er begrænset af økonomiske grunde. Men alt nødvendigt kendskab er til stede i Danmark (DMU, Statens Planteavlsvforsøg, Landbrugets Rådgivningscenter) og endda på internationalt niveau. For NH_3 er det nødvendigt at lave nogle "eksempel-beregninger" på en mindre skala for at se indflydelsen af emissioner tæt ved naturområder.

- b) Samtidig med a. skal der med ACDEP-modellen laves studier angående ikke-linearitet, således at usikkerheden p.g.a. ikke-linearitet kendes.
- c) For O_3 skal der laves beregninger med ACDEP-modellen.
- d) Senere kan en fotokemisk transportmodel (måske ACDEP-modellen, måske en anden model) (videre)udvikles for at opnå bedre beregningsresultater. Det kræver dog at de krav der stilles til en sådan model beskrives grundigt i forvejen.
- e) Det ville være nyttigt at tage kontakt med SMHI for at se i hvilken omfang der kan samarbejdes. Det vil ydermere have den fordel, at der er lettere adgang til meteorologiske data.

6 Diskussion og konklusioner

En konsekvensmodel for svovl for Danmark og Syd-Sverige er udviklet. Modelresultaterne er i rimelig overensstemmelse med målinger. Modellen giver specielt detaljeret information om depositioner og de relaterede effekter forårsaget af svovludslip fra kraftværker. Da effekten af svovl er forsurende, ville det være hensigtsmæssigt at udvide konsekvensmodellen med de andre forsurende stoffer (kvælstofoxider og ammoniak og reaktionsprodukter). Denne udvidelse stiller nogle krav til de transportmodeller, som i dette tilfælde ville blive benyttet til at beregne overførselsmatricer. Desuden er der brug for en mere detaljeret information omkring inddata til modellen.

Referencer

ELSAMPROJEKT (1995) MeMoS, Mesoskala model for Sydskandinavien, Dataindsamling og programdokumentation. ELSAMPROJEKT, Fredericia.

Pedersen U., Schaug J., Skjelmoen J.E. (1992) Data report 1990. Part 1: Annual summaries, EMEP/CCC-Report 2/92, NILU, Lillestrøm, Norge

Van Jaarsveld J.A. (1995) Modelling the long-term atmospheric behaviour of pollutants on various spatial scales. Thesis State University Utrecht, The Netherlands.

Summary in English

On the basis of a collaboration between the Danish National Environmental Research Institute (NERI), ELSAMPROJEKT and ELSAM, an integrated assessment model, simulating emission, deposition and exceedences of the critical loads for acidifying components over southern Scandinavia has been developed. This model has been named the MeMoS model.

In the report, special emphasis has been put on the contribution of NERI to the model development and implementation. This contribution included emissions from Danish area sources, meteorological data and the relation between emissions and depositions. MeMoS can be used to test schemes for reducing the sulphur load on the environment due to power plants and other source categories. It is easy to tune the emissions in the model and thereby test various scenario's. The geographical area covered by MeMoS is Denmark and the part of Sweden south of Stockholm.

The relation between emissions and depositions in the MeMoS model is calculated with the so-called TREND model, that has been developed at the National Institute of Public Health and Environmental Protection (RIVM), Bilthoven, The Netherlands. The model has been adjusted to Danish conditions, i.e. by incorporating detailed Danish emissions and meteorology.

Emissions

The MeMoS-model simulates emissions from all different power plants (without and with desulphurization), other Danish sources and foreign sources (in total 72 source categories). The meteorology used in the model is based on the measurements of the Danish Meteorological Institute at Kastrup, Denmark.

Comparison with measurements

Results calculated with the TREND model were compared with measurements in Denmark and other parts of Europe. The model results for sulphur dioxide show a reasonable agreement with measurements at Danish stations. For central-European stations there are differences, which are likely to be caused by the position of the monitoring station relatively to the sources. For particulate sulphate there is a good agreement for whole Europe. For wet deposition the differences are larger. The model underestimates the wet deposition of sulphur at Danish stations by 25-45%, which partly can be explained from variations in the amount of precipitation between the stations.

Stack height and the flue gas flow

A sensitivity analysis was made to evaluate the effects of changes in stack height and the fluegas flow for a power plant. The results show that differences occur near the stack, but that the differences at 400 km from the source are less than 20%.

Deposition in the MeMoS-model

Concentrations and depositions of sulphur compounds were calculated with the following separate meteorological situations: day and night time for the summer and winter season. In the MeMoS model also annually averaged concentrations and depositions are calculated from

the above mentioned calculations. The total calculated acid deposition caused by sulphur and the actual acid deposition caused by nitrogen compounds are added, so that the model can calculate the exceedence of the critical load for acid deposition.

ELSAM's possible needs

An overview over the needs for developing integrated assessment models for other compounds, e.g. nitrogen oxides, ammonia and ozone, are discussed at the end of the report.

Danmarks Miljøundersøgelser

Danmarks Miljøundersøgelser - DMU- er en forskningsinstitution i Miljø- og Energiministeriet. DMU's opgaver omfatter forskning, overvågning og faglig rådgivning inden for natur og miljø.

Henvendelse kan rettes til:

Danmarks Miljøundersøgelser	<i>Direktion og Sekretariat</i>
Postboks 358	<i>Forsknings- og Udviklingssektion</i>
Frederiksborgvej 399	<i>Afd. for Systemanalyse</i>
4000 Roskilde	<i>Afd. for Atmosfærisk Miljø</i>
Tlf. 46 30 12 00	<i>Afd. for Miljøkemi</i>
Fax. 46 30 11 14	<i>Afd. for Havmiljø og Mikrobiologi</i>

Danmarks Miljøundersøgelser	<i>Afd. for Terrestrisk Økologi</i>
Postboks 314	<i>Afd. for Vandløbssøkologi</i>
Vejlsøvej 25	<i>Afd. for Sø- og Fjordøkologi</i>
8600 Silkeborg	
Tlf. 89 20 14 00	
Fax. 89 20 14 14	

Danmarks Miljøundersøgelser	<i>Afd. for Landskabsøkologi</i>
Grenåvej 12, Kalø	<i>Afd. for Kystzoneøkologi</i>
8410 Rønde	
Tlf. 89 20 14 00	
Fax. 89 20 15 14	

Danmarks Miljøundersøgelser	<i>Afd. for Arktisk Miljø</i>
Tagensvej 135, 4.	
2200 København N	
Tlf. 35 82 14 15	
Fax. 35 82 14 20	

Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger, særtryk af videnskabelige og faglige artikler samt årsberetninger.

I årsberetningen findes en oversigt over det pågældende års publikationer. Årsberetning samt en opdateret oversigt over årets publikationer fås ved henvendelse til telefon: 46 30 12 00.

