

NATURENS
TÅLEGRENSE

Miljøverndepartementet

Fagrapport nr. 9

KART OVER ATMOSFÆRISK
AVSETNING AV SVOVEL- OG
NITROGENFORBINDELSER
I NORGE

U. Pedersen, S.E. Walker og A. Kibsgaard



NILU

NORSK INSTITUTT FOR LUFTFORSKNING
Norwegian Institute for Air Research
POSTBOKS 64 — N-2001 LILLESTRØM — NORWAY

NATURENS TÅLEGRENSER

Programmet Naturens Tålegrenser ble satt igang høsten 1988 i regi av Miljøverndepartementet.

Programmet skal blant annet gi innspill til arbeidet med Nordisk Handlingsplan mot Luftforurensninger og til pågående aktiviteter under Konvensjonen for Langtransporterte Grenseoverskridende Luftforurensninger (Geneve-konvensjonen). I arbeidet under Geneve-konvensjonen er det vedtatt at kritiske belastningsgrenser skal legges til grunn ved utarbeidelse av nye avtaler om utslippsbegrensning av svovel, nitrogen og hydrokarboner.

En styringsgruppe i Miljøverndepartementet har det overordnede ansvaret for programmet, mens ansvaret for den faglige oppfølgingen er overlatt en arbeidsgruppe bestående av representanter fra Direktoratet for naturforvaltning (DN), Norsk Polarinstitut (NP) og Statens forurensningstilsyn (SFT).

Arbeidsgruppen har følgende sammensetning:

Jon Jerre	-	SFT, sekretær
Tor Johannessen	-	SFT
Terje Klokk	-	DN
Else Løbersli	-	DN, sekretær
Fridtjof Mehlum	-	NP

Styringsgruppen i Miljøverndepartementet har følgende sammensetning:

Jan Abrahamsen	-	Avdelingen for naturvern og kulturminner
Håvard Holm	-	Avdelingen for vannmiljø
Jan Thompson	-	Avdelingen for internasjonalt miljøvernssamarbeid og polarsaker

Henvendelser vedrørende programmet kan rettes til:

Direktoratet for naturforvaltning
Tungasletta 2
7004 Trondheim
Tel: (07) 58 05 00

eller

Statens forurensningstilsyn
Postboks 8100 Dep
0032 Oslo 1
Tel: (02) 57 34 00



Miljøverndepartementet

Fagrapport nr. 9

KART OVER ATMOSFÆRISK
AVSETNING AV SVOVEL- OG
NITROGENFORBINDELSER
I NORGE

U. Pedersen, S.E. Walker og A. Kibsgaard

NATURENS TÅLEGRENSER

Programmet Naturens Tålegrenser ble satt igang høsten 1988 i regi av Miljøverndepartementet.

Programmet skal blant annet gi innspill til arbeidet med Nordisk Handlingsplan mot Luftforurensninger og til pågående aktiviteter under Konvensjonen for Langtransporterte Grenseoverskridende Luftforurensninger (Geneve-konvensjonen). I arbeidet under Geneve-konvensjonen er det vedtatt at kritiske belastningsgrenser skal legges til grunn ved utarbeidelse av nye avtaler om utslippsbegrensning av svovel, nitrogen og hydrokarboner.

En styringsgruppe i Miljøverndepartementet har det overordnede ansvaret for programmet, mens ansvaret for den faglige oppfølgingen er overlatt en arbeidsgruppe bestående av representanter fra Direktoratet for naturforvaltning (DN), Norsk Polarinstitut (NP) og Statens forurensningstilsyn (SFT).

Arbeidsgruppen har følgende sammensetning:

Jon Jerre	-	SFT, sekretær
Tor Johannessen	-	SFT
Terje Klokk	-	DN
Else Løbersli	-	DN, sekretær
Fridtjof Mehlum	-	NP

Styringsgruppen i Miljøverndepartementet har følgende sammensetning:

Jan Abrahamsen	-	Avdelingen for naturvern og kulturminner
Håvard Holm	-	Avdelingen for vannmiljø
Jan Thompson	-	Avdelingen for internasjonalt miljøvernssamarbeid og polarsaker

Henvendelser vedrørende programmet kan rettes til:

Direktoratet for naturforvaltning
Tungasletta 2
7004 Trondheim
Tel: (07) 58 05 00

eller

Statens forurensningstilsyn
Postboks 8100 Dep
0032 Oslo 1
Tel: (02) 57 34 00

INNHold

	Side
1	INNLEDNING 2
2	DATAGRUNNLAG 2
	2.1 Målinger 3
	2.2 Modell 6
3	METODIKK 6
	3.1 Interpolasjon 6
	3.2 Nedbørfeltet 8
	3.3 Tørravsetning 8
	3.4 Isolinjer 13
4	RESULTATER 13
	4.1 Svovel 13
	4.2 Nitrogen 19
5	REFERANSER 29

KART OVER ATMOSFÆRISK AVSETNING AV SVOVEL- OG NITROGENFORBINDELSER I NORGE

1 INNLEDNING

Norsk institutt for luftforskning (NILU) har på oppdrag fra Direktoratet for Naturforvaltning (DN) og Statens Forurensningstilsyn (SFT) utarbeidet kart over atmosfærisk totalavsetning av svovel og nitrogenforbindelser i Norge. Avsetningen er framstilt grafisk som isolinjer og som verdier i et rutenett. For beregningene er det benyttet et rutenett på 50 km x 50 km, men resultatet er også presentert ved bruk av rutestørrelsen 150 km x 150 km, som er den samme som benyttes innen EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme).

Kartene er basert på målinger og er for svovel sammenlignet med modellberegninger. Målingene er fra året 1985, da det for dette året også er tilgjengelige modellberegninger.

Konsentrasjonsfeltene som ligger til grunn for avsetningstallene er beregnet ut fra målingene ved hjelp av den statistiske interpolasjonsmetoden Kriging.

2 DATAGRUNNLAG

Avsetning av svovel og nitrogenforbindelser i Norge skjer på flere måter:

Våtavsetning (med nedbør):

- Sulfat (SO_4)
- Nitrat (NO_3) og ammonium (NH_4)

Tørravsetning (i luft):

- Svoveldioksid (SO_2) og sulfat (SO_4)
- Nitrogenmonoksid (NO), nitrogendioksid (NO_2), salpetersyre (HNO_3) og nitrat (NO_3)
- Ammoniakk (NH_3) og ammonium (NH_4)

Det er beregnet (modell) avsetningsfelt for Norge av både svovel og nitrogen, samtidig er det også målinger av en del av stoffene som er nevnt ovenfor.

2.1 MÅLINGER

Målingene er utført av NILU som et ledd i arbeidet med kartlegging av langtransportert forurenset luft og nedbør i Norge. Målingene gjøres hovedsakelig på oppdrag fra SFT som et ledd i Statlig program for forurensningsovervåking (SFT 1985). Målingene gjelder

Nedbør: SO_4 , NO_3 og NH_4

Luft : SO_2 og SO_4
 NO_2 , $\text{NO}_3 + \text{HNO}_3$ og $\text{NH}_3 + \text{NH}_4$

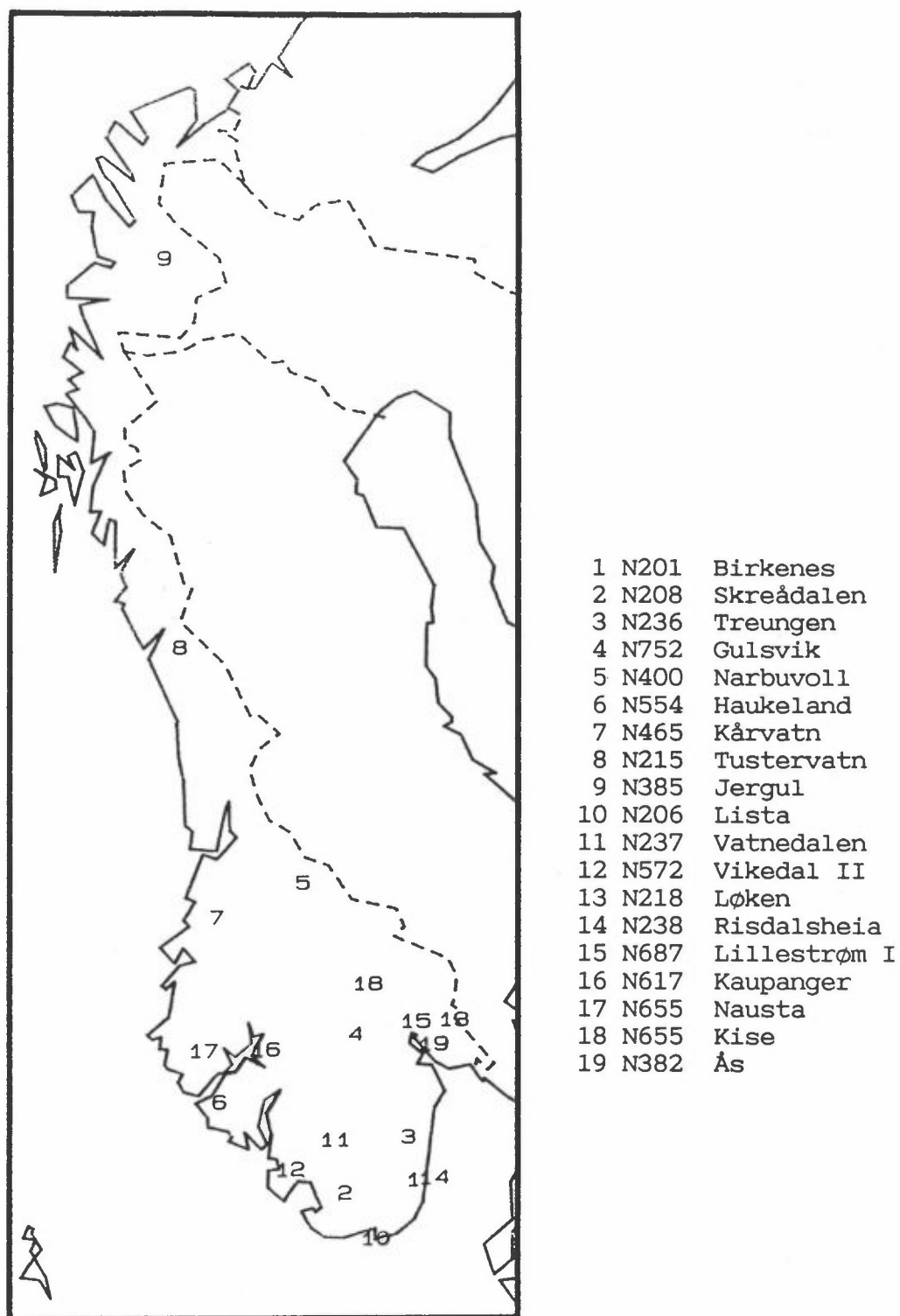
Det er benyttet 19 målestasjoner i Norge. Målinger av nedbørkomponentene er gjort ved alle stasjonene, mens målinger av svoveldioksid og sulfat i luft er gjort ved seks av stasjonene. Ingen av stasjonene har målte nitrogenforbindelser i luft i 1985.

Tabell 1 gir en oversikt over målingene, mens figur 1 viser stasjonenes plassering på kartet.

For de stasjonene som mangler målinger av svovel og nitrogenkomponenter i luft, er tørravsetningens bidrag til den totale avsetning beregnet på grunnlag av målinger gjort i 1986-1988 (Joranger, personlig kommunikasjon). Tørravsetningen i prosent av den totale avsetning er minst i sør og øker gradvis nordover til Finnmark.

Tabell 1: Nedbørmengder og veide årsmiddelkonsentrasjoner av svovel og nitrogen i nedbør på norske bakgrunnstasjoner i 1985.

Nr	Stasjon	H.o.h.	Lat.	Long.	Nedbør mm	SO ₄ -S mg/l	NO ₃ -N mg/l	NH ₄ -N mg/l
201	Birkenes	190	58 23	8 15	1409	0.98	0.58	0.57
208	Skreådalen	475	58 49	6 43	1895	0.59	0.32	0.33
236	Treungen	270	59 01	8 32	892	0.68	0.39	0.37
752	Gulsvik	260	60 22	9 39	689	0.73	0.35	0.72
400	Narbuvoll	768	62 21	11 28	671	0.40	0.17	0.28
554	Haukeland	204	60 49	5 35	2930	0.44	0.21	0.26
465	Kårvatn	210	62 47	8 53	1462	0.20	0.07	0.10
215	Tustervatn	439	65 50	13 55	1344	0.22	0.08	0.10
385	Jergul	255	69 24	24 36	406	0.43	0.12	0.34
206	Lista	13	58 06	6 34	996	1.11	0.80	0.68
237	Vatnedalen	800	59 28	7 23	794	0.43	0.22	0.18
572	Vikedal II	60	59 32	5 58	2223	0.63	0.30	0.33
218	Løken	150	59 48	11 27	894	0.86	0.47	0.51
238	Risdalsheia	340	58 24	8 19	1293	0.99	0.54	0.55
687	Lillestrøm I	100	59 58	11 02	801	0.84	0.43	0.90
617	Kaupanger	500	61 09	7 16	769	0.35	0.14	0.12
655	Nausta	265	61 35	5 54	1934	0.29	0.13	0.09
382	Kise	128	60 46	10 48	715	0.72	0.39	0.45
381	Ås	95	59 40	10 47	782	1.00	0.57	0.53



Figur 1: Bakgrunnstasjoner i Norge i 1985.

2.2 MODELL

De beregnede avsetningsfeltene er basert på Meteorologisk Instituttets EMEP-modell (Eliassen et al., 1988). Den beregner tilførsel og avsetning av svovel og nitrogen fra kilder i Europa til EMEP rutenettet (150 km x 150 km). Verdiene i hver rute regnes som middel over ruten.

Modellen er basert på utslippsdata av svoveldioksid, nitrogen dioksid og ammoniakk i Europa. Beregningene er utført som en del av arbeidet innenfor EMEP-samarbeidet.

3 METODIKK

Framgangsmåten som er benyttet for å komme fram til avsetningskart for svovel og nitrogen, kan deles inn i følgende trinn:

- a. Interpolasjon av målte konsentrasjonsverdier i nedbør til et 50 km x 50 km rutenett.
- b. Multiplikasjon av de fremkomne konsentrasjonsfeltene med et tilsvarende midlere nedbørfelt (50 km x 50 km). Dette gir et våtavsetningsfelt.
- c. Beregne et tørravsetningsfelt som kan adderes til våtavsetningsfeltet og gi totalavsetningen i det samme 50 km x 50 km rutenettet.

3.1 INTERPOLASJON

Interpolasjon av målingene er basert på Kriging interpolasjon (Journel og Huijbregts, 1978). Kriging er en statistisk interpolasjonsmetode som er basert på korrelasjon mellom måleverdier i rommet.

La C_k være målt verdi i et punkt k i rommet med koordinater (x_k, y_k) for $k=1, \dots, N$. Vi ønsker å prediktere en verdi i punktet 0 med koordinater (x_0, y_0) . Det etableres en lineær prediktor

$$C_0 = \sum_{k=1}^N w_k c_k$$

der w_k er vektorer som skal bestemmes. Vektene bestemmes på grunnlag av en såkalt variogramfunksjon $\gamma(h)$ der h betegner romlig avstand. Romlig korrelasjon $K(h)$ er knyttet til variogramfunksjonen $\gamma(h)$ ved uttrykket $K(h)=1-\gamma(h)$.

Vi tenker oss at måledataene er realisasjoner av et romlig stokastisk fenomen, hvor data som er samlet i avstand h i rommet har en korrelasjon $K(h)$ som er avhengig av avstanden h . Variogramfunksjonen bestemmes enten objektivt på grunnlag av måleverdiene, eller den blir subjektivt fastsatt.

Det finnes tre hovedtyper av Kriging-metoder: Simple Kriging, Ordinary Kriging og Universal Kriging.

Under Simple Kriging antas forventningen til måleverdien å være null, mens den under Ordinary Kriging antas å være konstant, og forskjellig fra null. Under Universal Kriging antas forventningen til måleverdien å følge et plan med ubestemte koeffisienter. Lokalt vil da metoden være tilnærmet forventningsrett, dersom de lokale måleverdiene tilnærmet ligger på et plan (f.eks. i forbindelse med lokal romlig trend). Vektene vil i alle tilfeller bli bestemt utfra kravet om forventningsretthet og minimum prediktor feilvarians.

Universal Kriging er benyttet her fordi de målte konsentrasjonsfeltene av både sulfat, nitrat og ammonium, har en tydelig geografisk gradient. Ut ifra det som er nevnt ovenfor, er da Universal Kriging den rette metoden å benytte.

3.2 NEDBØRFELTET

For å komme fram til et nedbørfelt som kan benyttes til direkte multiplikasjon av det interpolerte konsentrasjonsfeltet, har vi tatt utgangspunkt i Meteorologisk Institutts midlere nedbørkart for perioden 1931-60. Ut fra dette kartet er det så generert en midlere nedbørverdi i hver av de 50km x 50km rutene som dekker Norge, ved å beregne det aritmetiske middel for de stasjonene som ligger innenfor samme grid-rute. Tilslutt er det gjort korreksjoner for året 1985 i henhold til kart over prosent av normalen for 1985. Figur 2 viser det korrigerede nedbørfeltet for 1985, presentert som middelverdier i et 50 km x 50 km rutenett.

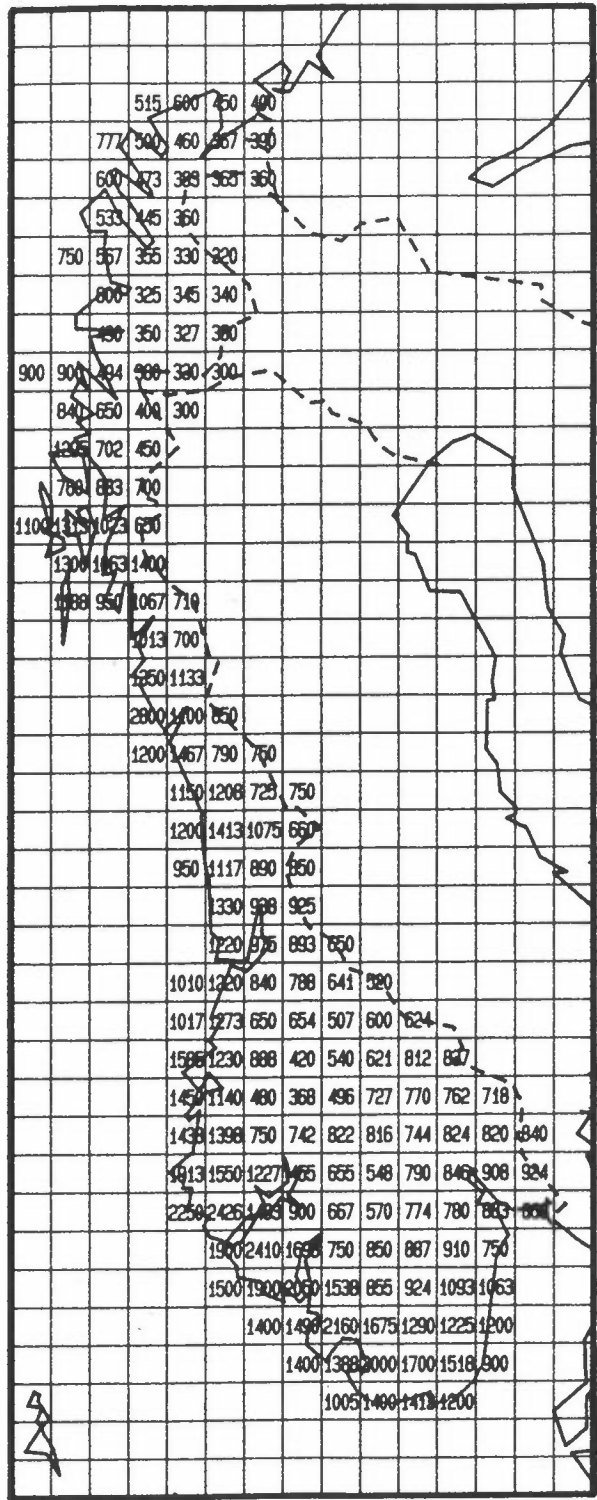
3.3 TØRRAVSETNING

Som tidligere nevnt ble det bare målt konsentrasjoner av sulfat og svovel på noen få stasjoner i 1985. For årene 1986, 87 og 88 er antallet målestasjoner øket, og det er også foretatt målinger av nitrogenoksid, $\text{sum}(\text{NO}_3^- + \text{HNO}_3)$ og $\text{sum}(\text{NH}_4^+ + \text{NH}_3)$.

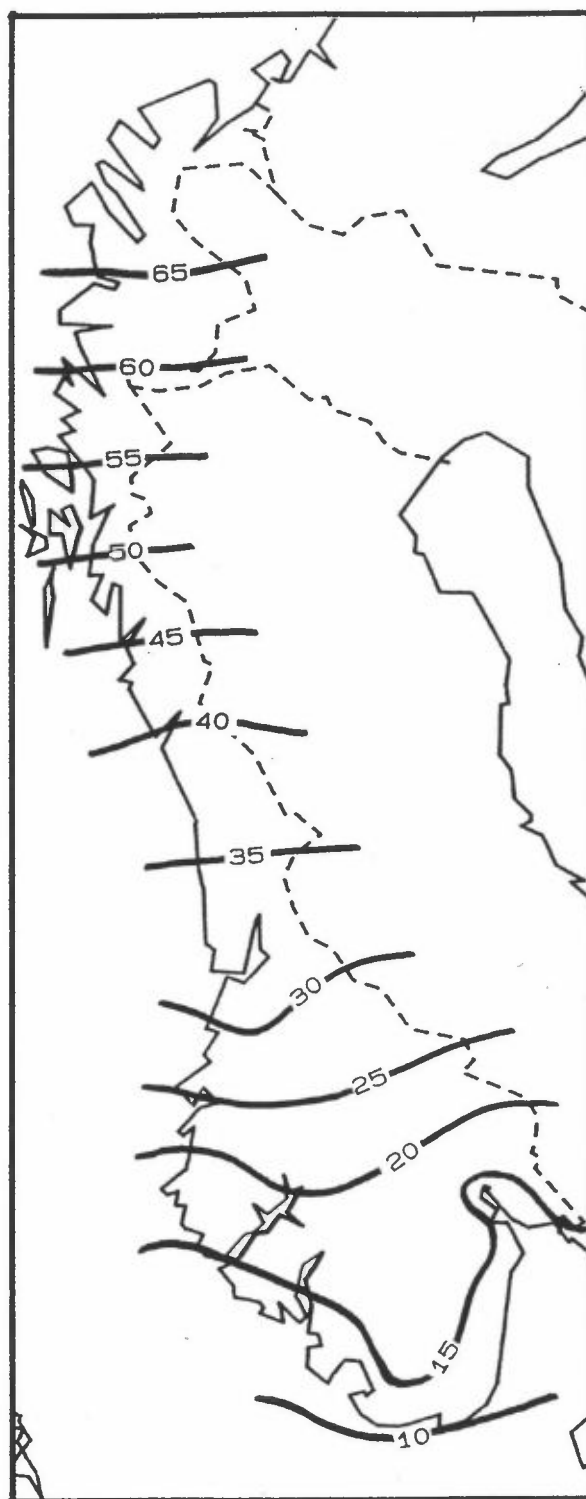
På bakgrunn av disse målingene og de foreliggende målingene for 1985, er det beregnet tørravsetning, sommer og vinter av svovel, oksidert nitrogen og redusert nitrogen, for hver enkelt stasjon. Tørravsetningen er kalkulert på basis av middelkonsentrasjonene i luft sammen med avsetningshastigheter gitt i litteraturen (Dovland og Eliassen, 1976; Dollard og Vitols, 1978; Fowler, 1980; Garland, 1978; Voldner og Sirois, 1986; Hicks et al., 1987). I $\text{sum}(\text{NO}_3 + \text{HNO}_3)$ antas NO_3 å bidra med 75% og HNO_3 med 25%. I $\text{sum}(\text{NH}_3 + \text{NH}_4)$, bidrar NH_3 med 8% og NH_4 med 92% (Ferm, 1988).

For hver stasjon er det deretter beregnet en midlere tørravsetningsprosent av totalavsetningen og verdien er så interpolert til hele feltet ved å benytte Kriging interpolasjon.

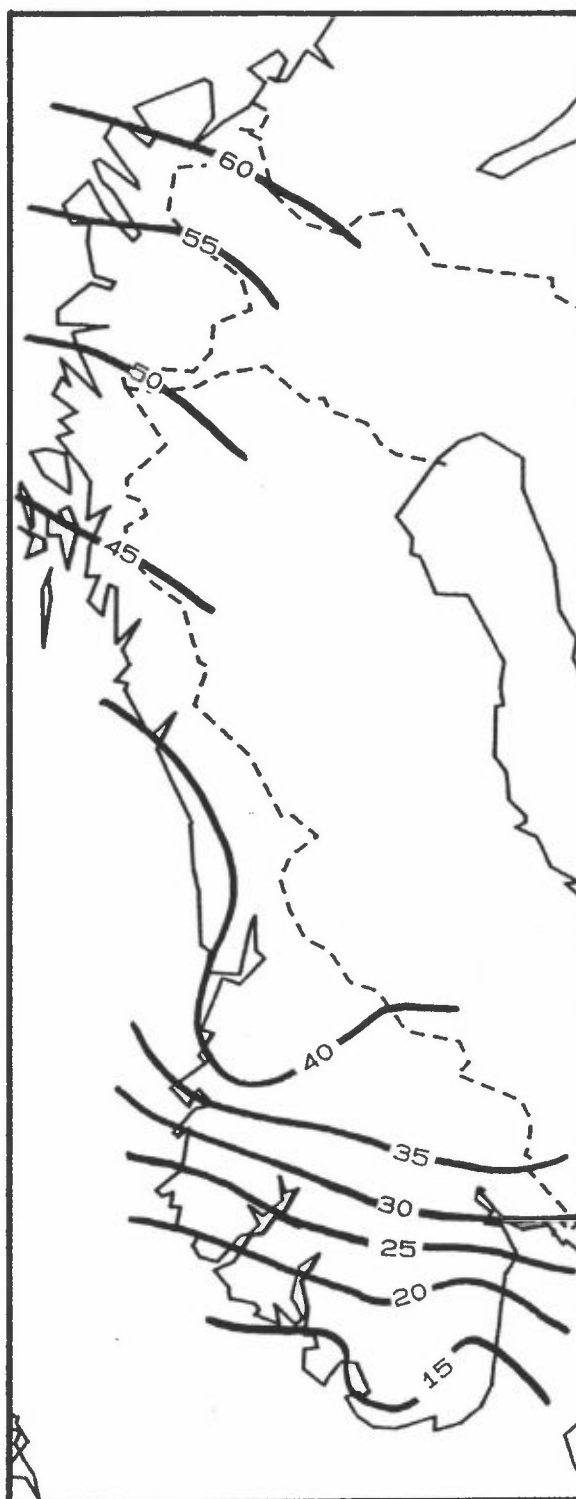
Figurene 3-5 viser tørravsetningens prosent av totalavsetningen for henholdsvis svovel, oksidert nitrogen og redusert nitrogen.



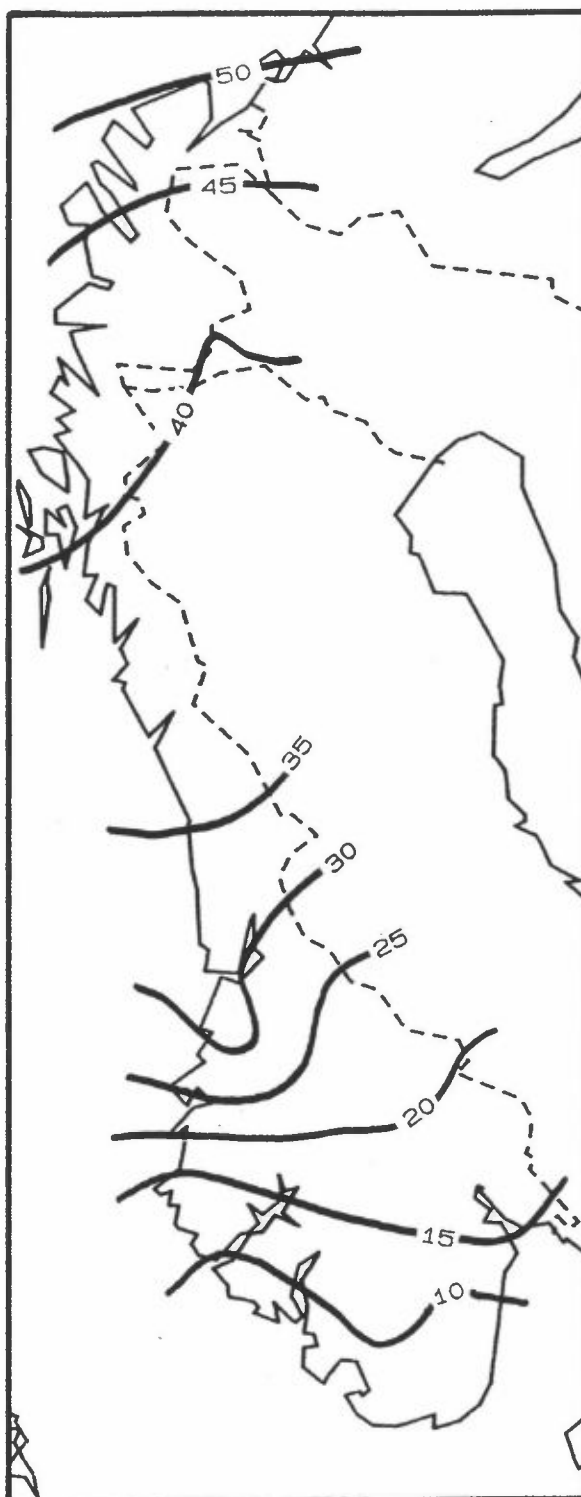
Figur 2: Korrigert nedbørfelt for 1985 (mm), gitt som middelverdier i et 50 km x 50 km rutennett.



Figur 3: Tørravsetningens bidrag i % til den totale avsetning av svovel i 1985.



Figur 4: Tørravsetningens bidrag i % til den totale avsetning av oksidert nitrogen i 1985.



Figur 5: Tørravsetningens bidrag i % til den totale avsetning av redusert nitrogen i 1985.

3.4 ISOLINJER

Isolinjekart benyttes vanligvis til å presentere punktverdier i f.eks. et målenett. I dette arbeidet, er resultatene gitt som middelveidier i et rutenett, hvor hver rute representerer et areal på 50 km x 50 km.

Isolinjene er i denne rapporten trukket ved hjelp av en datamaskinbasert grafisk rutine, hvor rutenettverdiene behandles som punktverdier lokalisert i den enkelte rutes midtpunkt.

Isolinjekartene inneholder således ingen ny informasjon i forhold til verdiene i rutenettet, og må av den grunn bare sees på som en alternativ presentasjonsform.

4 RESULTATER

På de følgende sidene er resultatene presentert, først for svovel og deretter for nitrogen. For nitrogen er beregnet avsetning av oksiderte forbindelser (NO_2 , NO_3 og $\text{NO}_3 + \text{HNO}_3$) og reduserte forbindelser (NH_4^+ og $\text{NH}_3 + \text{NH}_4^+$), vist som separate kart.

Konsentrasjon og avsetningsfeltene for svovel og nitrogen er framstilt både som verdier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer. Totalavsetningen blir også vist som gjennomsnittsverdier for EMEP-rutene (150 km x 150 km).

4.1 SVOVEL

Figur 6 viser sulfat-konsentrasjonen i nedbør i 1985. Kartet bygger på målte konsentrasjonsverdier på 19 målestasjoner. Figurene 7-8 viser våtavsetning og totalavsetning (våt og tørr) av svovel både som verdier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.

Den totale svovelavsetningen for hele Norge er vist som verdier i et 150 km x 150 km rutenett i figur 9 sammen med det tilsvarende modellberegnete feltet. Videre er disse to avsetningsfeltene sammenlignet i

et xy-diagram (figur 10), hvor hver gridrute er representert med et tallpar i diagrammet.

Ut i fra figurene 9 og 10 kan vi trekke følgende konklusjoner :

- Gjennomgående god overensstemmelse mellom det målte og det beregnede feltet. Overensstemmelsen er særlig god i Sør-Norge, hvor det også er god dekning med målestasjoner.
- I kystområdet fra Stad og nordover, gir ekstrapolasjonen av målte verdier signifikant lavere verdier enn beregningene.
- Øst-Finnmark er sterkt påvirket av utslipp på Kola-halvøya. Målinger av sulfat i nedbør og SO_2 i luft i Pasvik er ikke med i denne rapporten, men utslippene på Kola er tatt med i Meteorologisk Institutts beregninger.

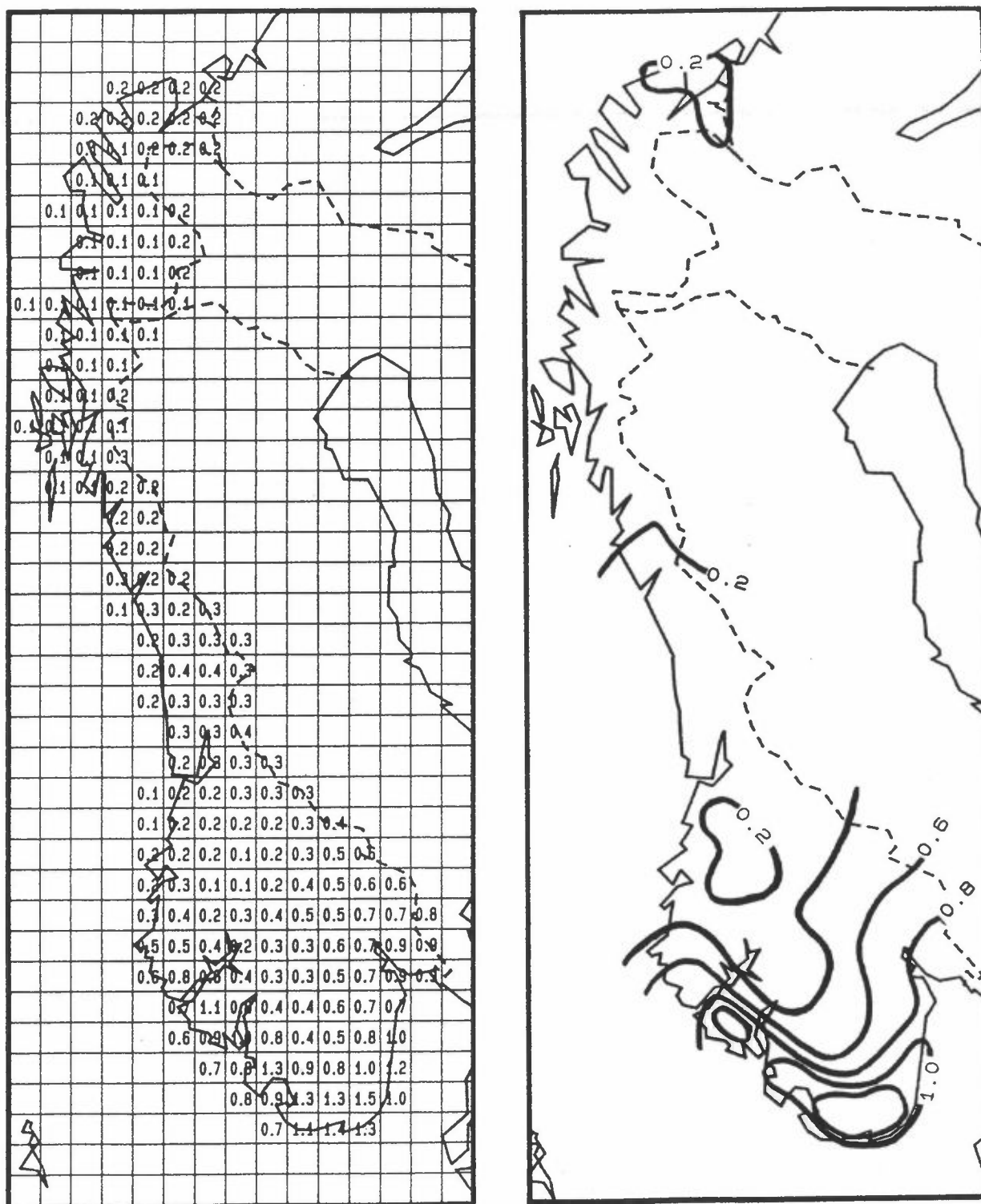
En mer fullstendig diskusjon av avvikene forutsetter at en også går inn på de tekniske detaljene i modellberegningene.

Dersom resultatene fra de målinger som nå foretas i Øst-Finnmark hadde vært tatt med, ville overensstemmelsen sannsynligvis vært bedre.

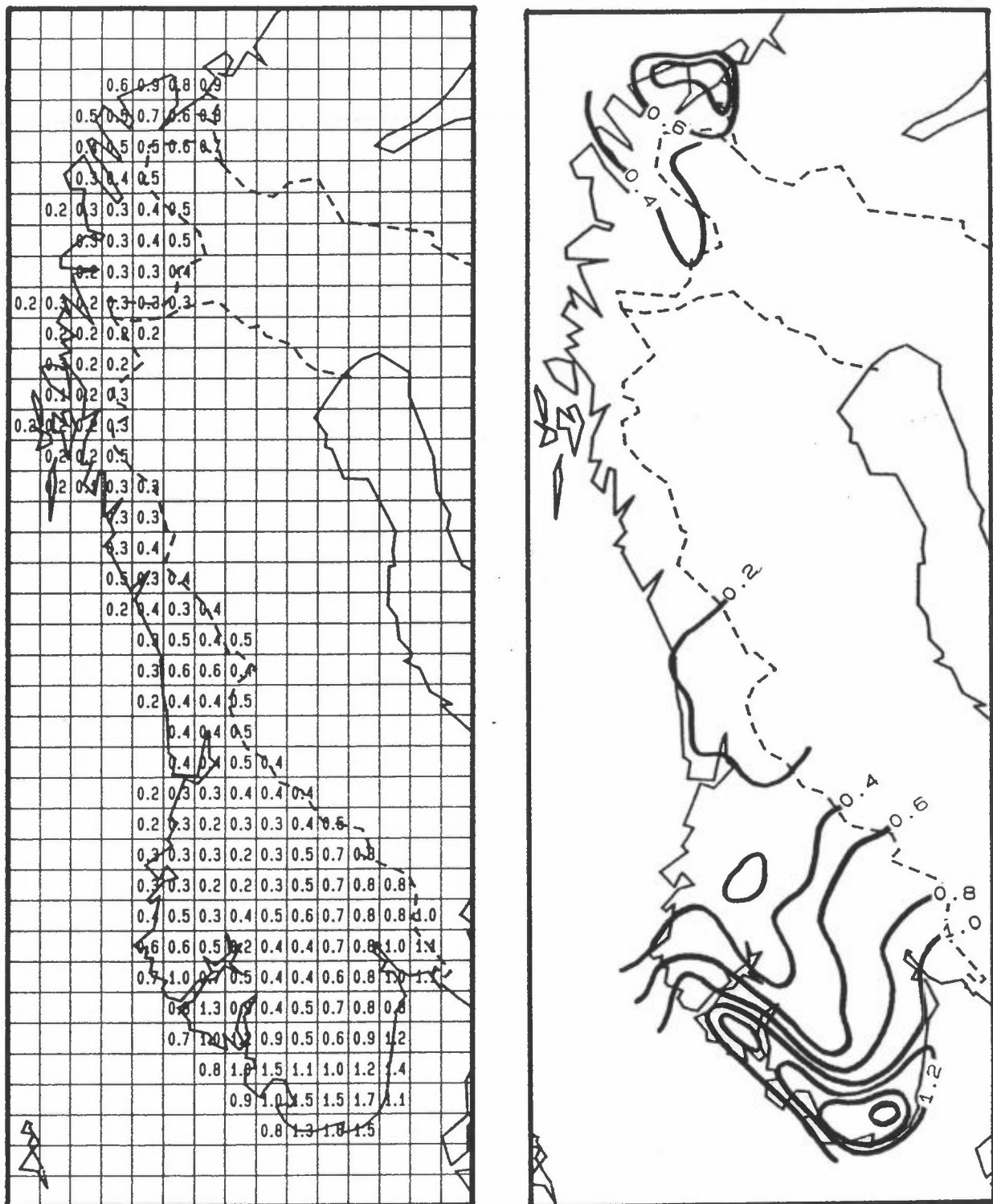
I tillegg ville en utfylling med data fra svenske og finske nedbørstasjoner vært med på å styrke analysen.



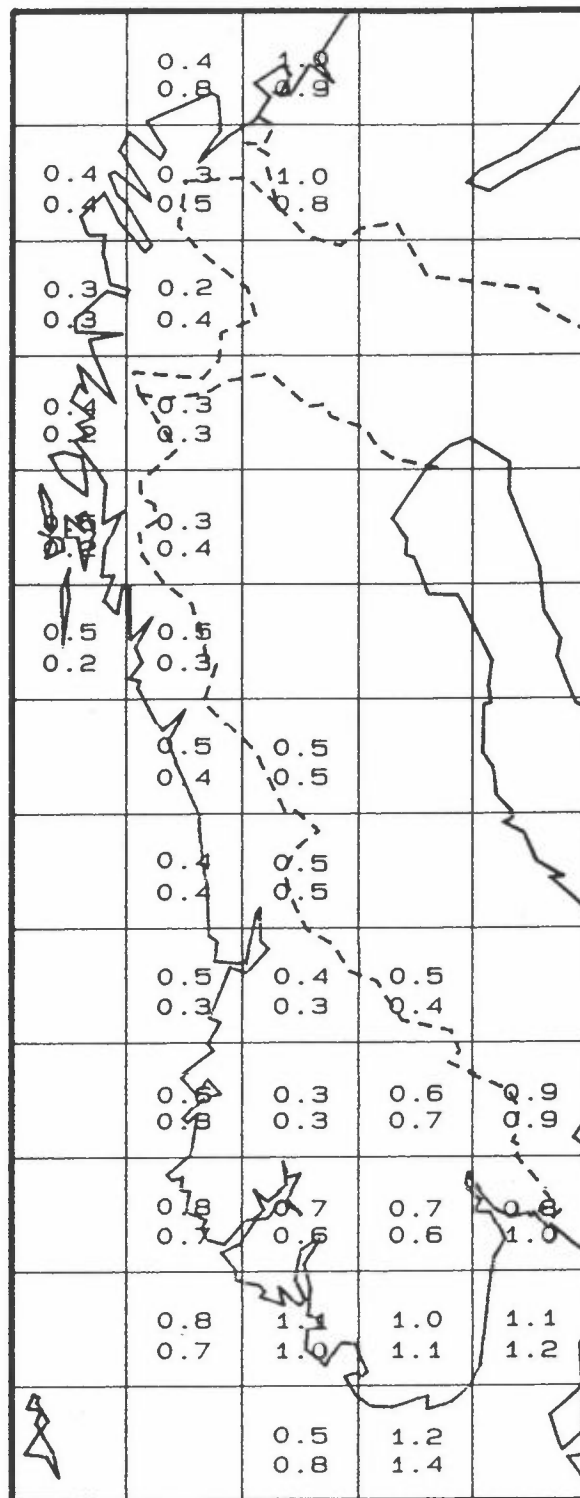
Figur 6: Sulfatkonsentrasjonen i nedbør 1985 (mg SO₄-S/l).



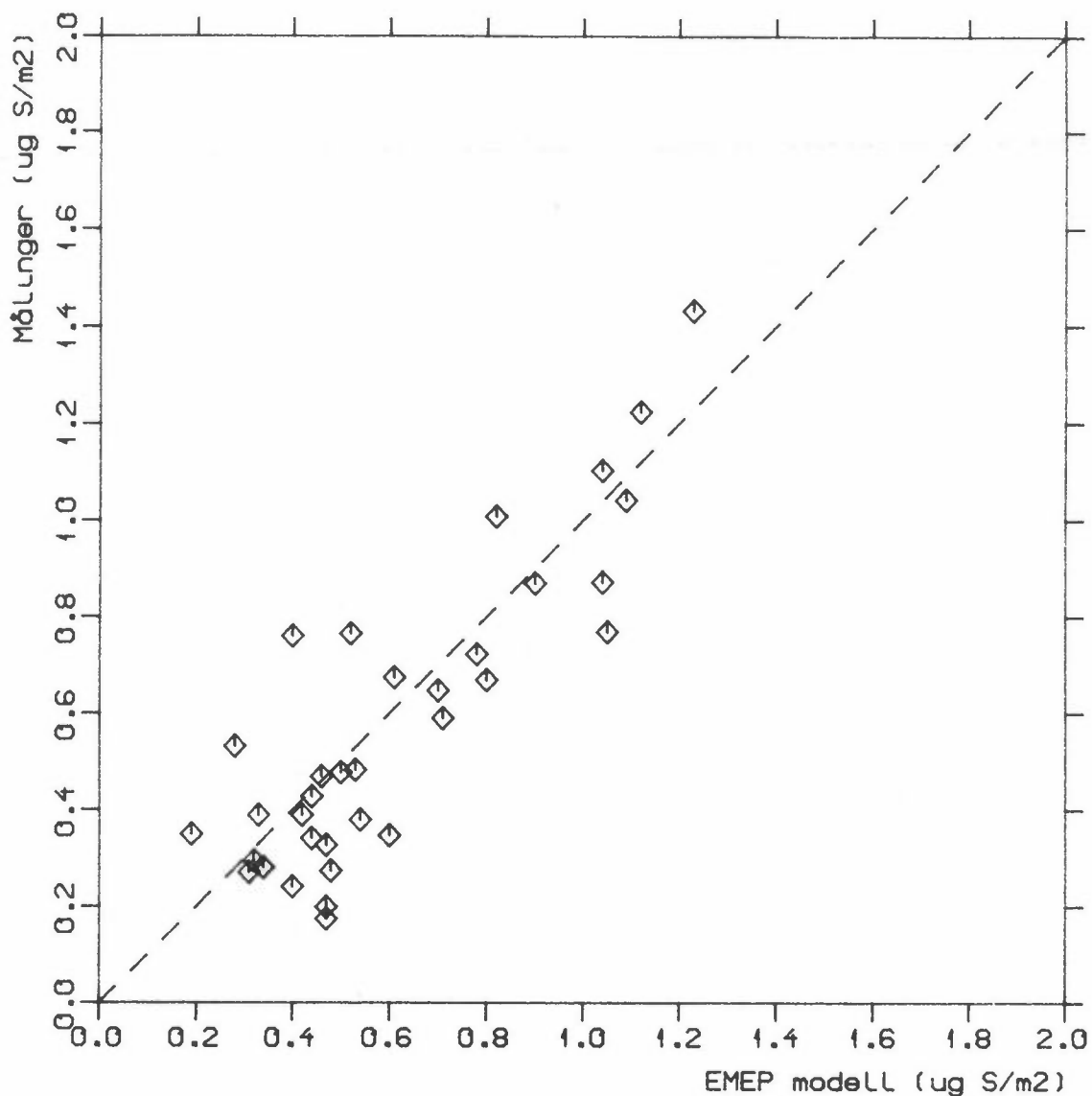
Figur 7: Sulfat i nedbør i 1985 (g SO₄-S/m²), gitt som middelveidier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.



Figur 8: Totalavsetning av svovel i 1985 (g S/m^2), gitt som middelverdier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.



Figur 9: Totalavsetning av svovel i 1985 (g S/m^2), gitt som middelverdier i et $150 \text{ km} \times 150 \text{ km}$ rutenett. Figuren viser modellberegninger (øverst) og resultater basert på målinger; (nederst).



Figur 10: Totalavsetning av svovel basert på målinger sammenlignet med modellberegninger ($\text{g S}/\text{m}^2$). Sammenligningen er gjort rute for rute i et $150 \text{ km} \times 150 \text{ km}$ nett.

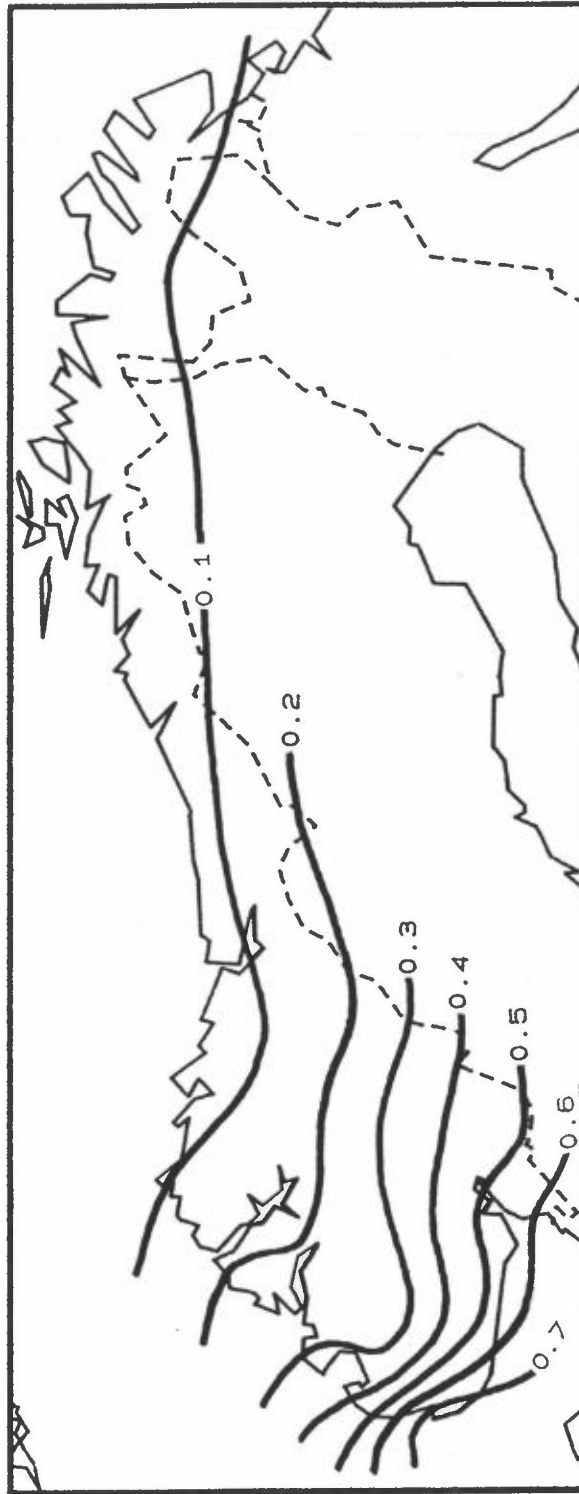
4.2 NITROGEN

Resultatene for nitrogen er delt i to, først vises resultatene som bygger på målinger av oksiderte nitrogenforbindelser (NO_2 , NO_3 og HNO_3). Deretter resultatene som bygger på de reduserte nitrogenforbindelsene (NH_3 og NH_4). Det er ikke foretatt sammenligning med modellberegnete verdier for nitrogen.

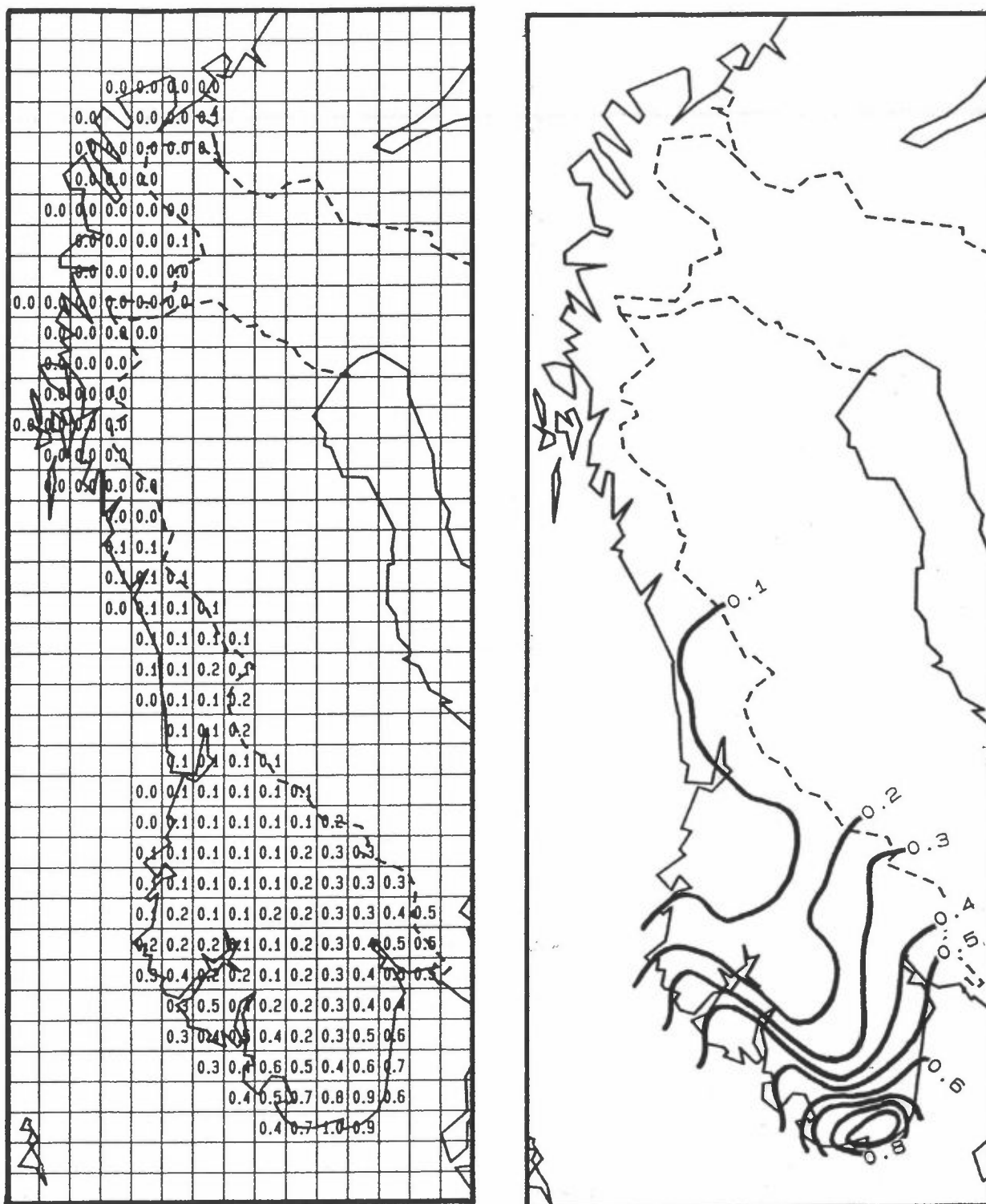
Figur 11 viser nitratkonsentrasjonen i nedbør i 1985. Kartet bygger på målte verdier på 19 stasjoner. Figurene 12-13 viser videre våtavsetning og totalavsetning av oksidert nitrogen som verdier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.

Den totale avsetning av oksidert nitrogen er vist i figur 14 som verdier i et 150 km x 150 km rutenett.

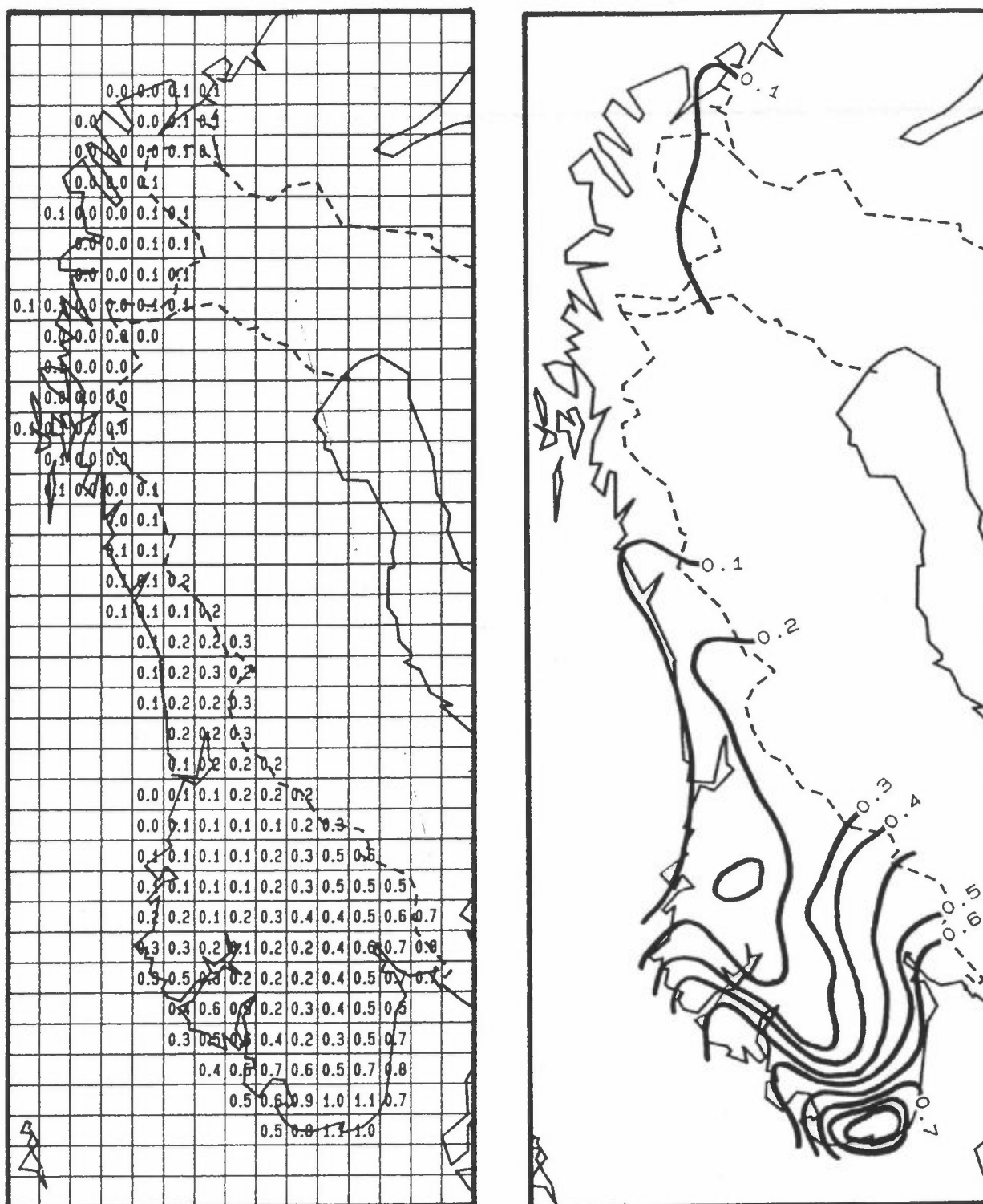
Tilsvarende resultater for redusert nitrogen er vist i figurene 15-18.



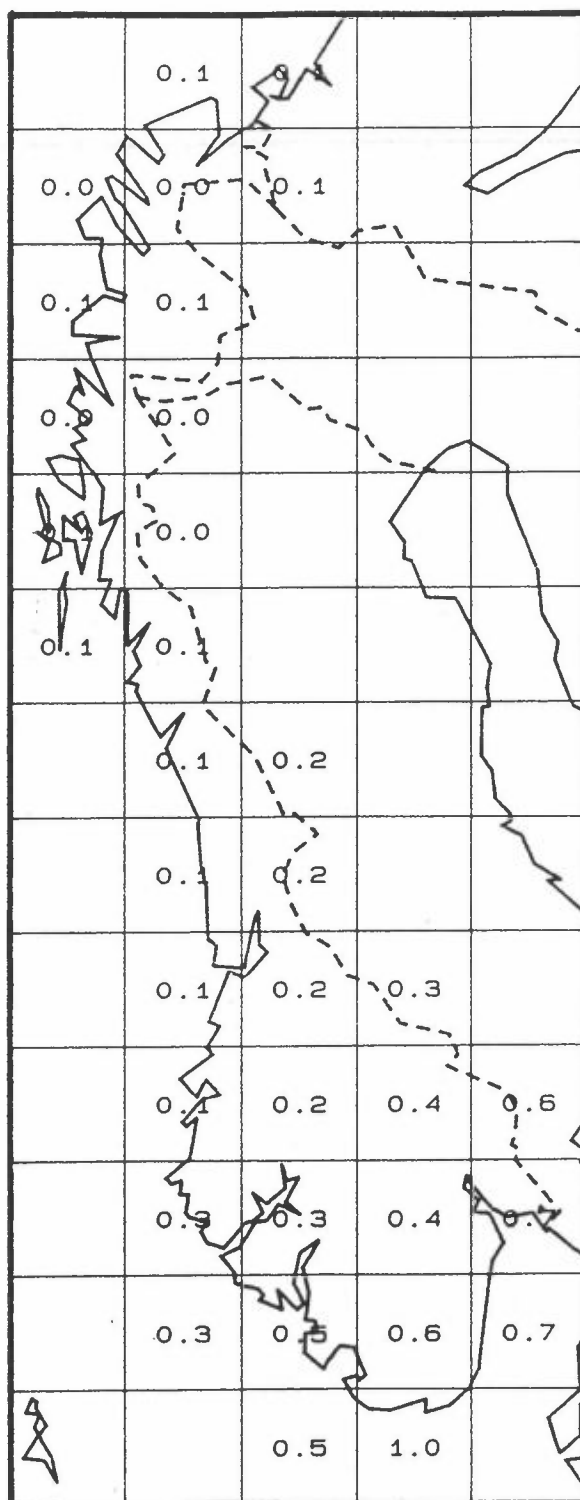
Figur 11: Nitratkonsentrasjonen i nedbør 1985 (mg NO₃-N/l).



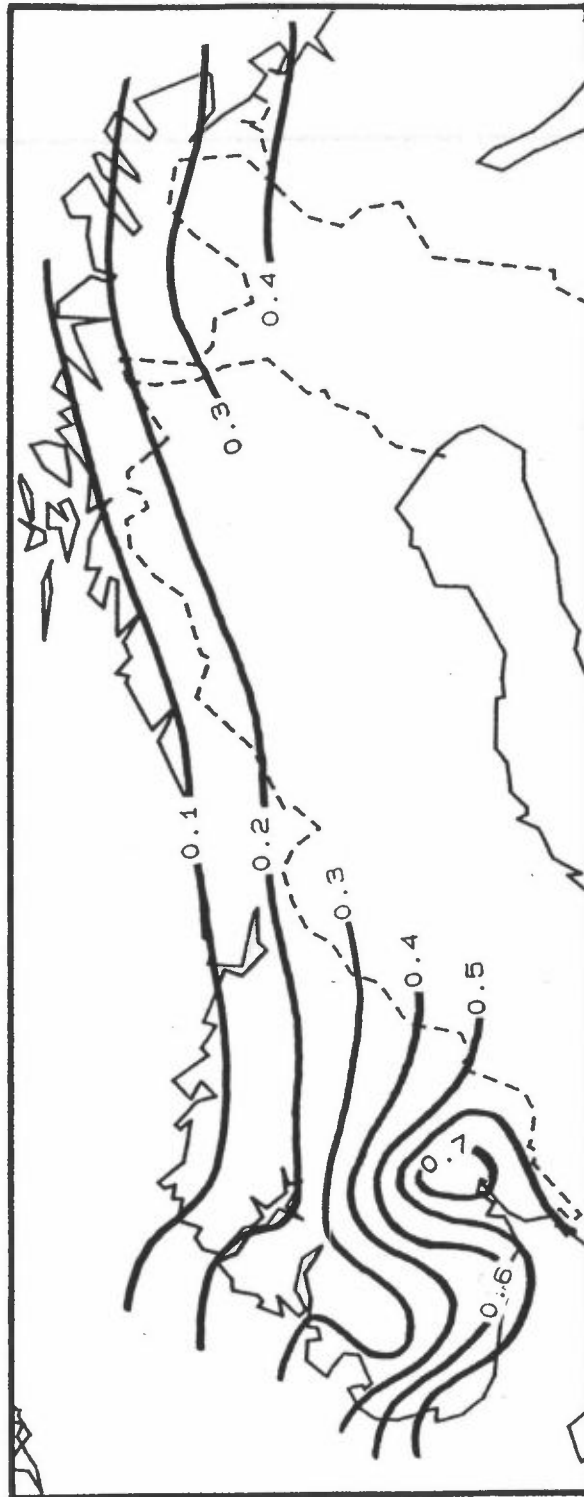
Figur 12: Nitrat i nedbør i 1985 ($\text{g NO}_3\text{-N/m}^2$), gitt som middelveier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.



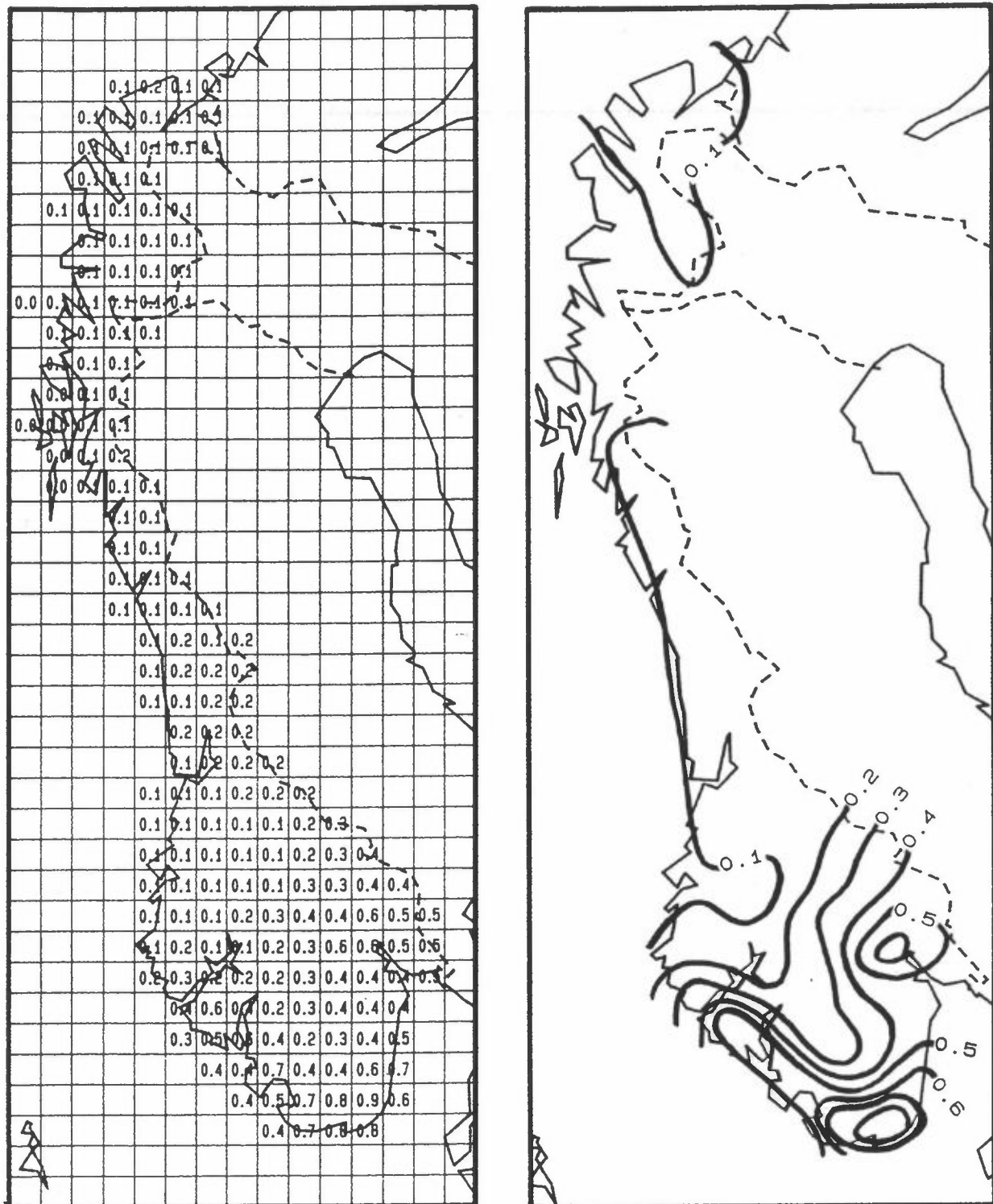
Figur 13: Totalavsetning av oksidert nitrogen i 1985 (g N/m²), gitt som middelverdier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.



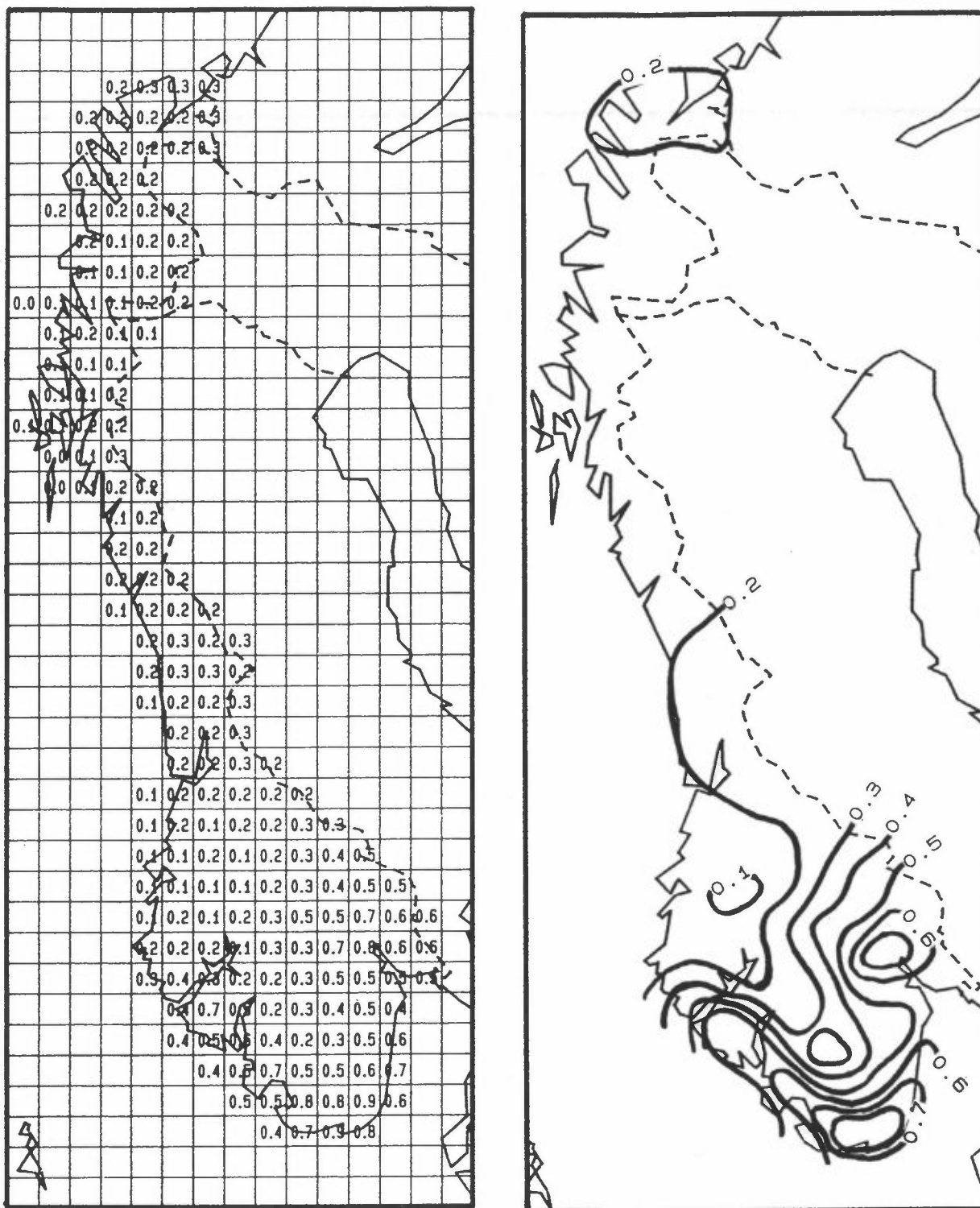
Figur 14: Totalavsetning av oksidert nitrogen i 1985 (g N/m²), gitt som middelerdier i et 150 km x 150 km rutenett.



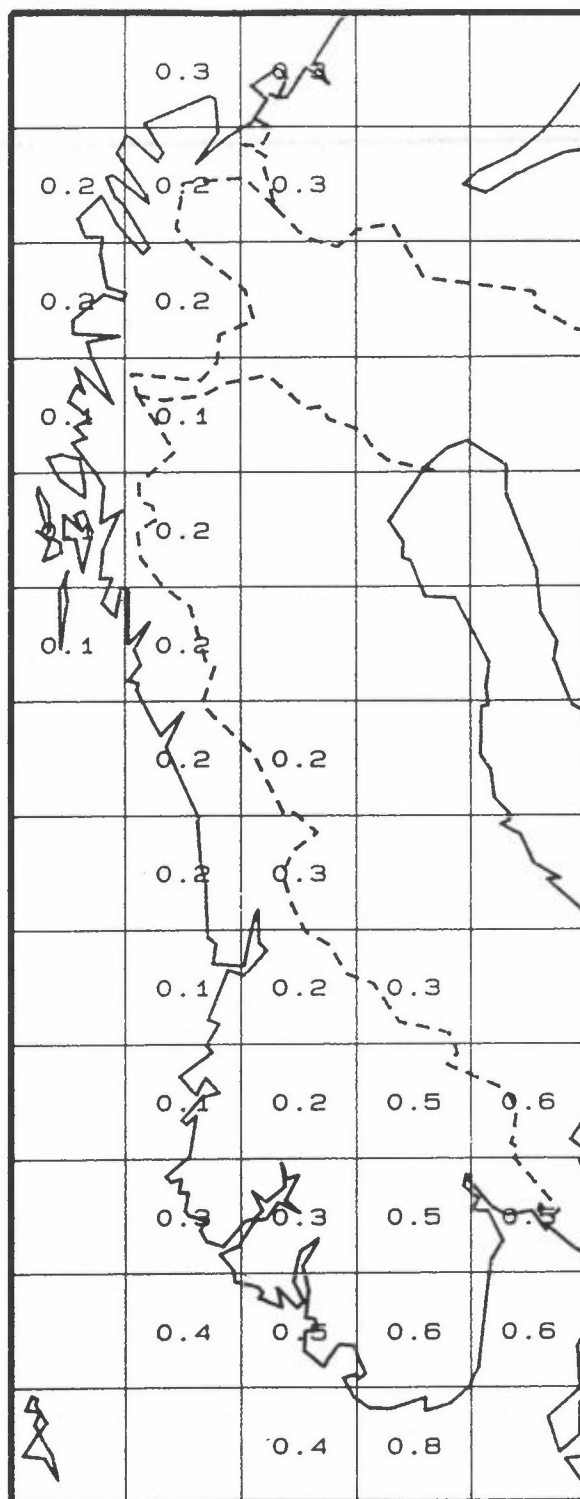
Figur 15: Ammoniumkonsentrasjonen i nedbør 1985 (mg NH₄-N/l).



Figur 16: Ammonium i nedbør i 1985 (g NH₄-N/m²), gitt som middelverdier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.



Figur 17: Totalavsetning av redusert nitrogen i 1985 (g N/m²), gitt som middelv verdier i et 50 km x 50 km rutenett og med isolinjer.



Figur 18: Totalavsetning av redusert nitrogen i 1985 (g N/m^2), gitt som middelerdier i et 150 km x 150 km rutenett.

5 REFERANSER

- Dollard, G.J., Vitols, V. (1980) Wind tunnel studies of dry deposition of SO₂ and H₂SO₄ aerosols. I: Internat. conf. on impact of acid precipitation. Sandefjord 1980. Ed. av D. Drabløs og A. Tollan. Oslo-Ås (SNSF-prosjektet), s. 108-109.
- Dovland, H., Eliassen, A. (1976) Dry deposition on snow surface. Atmos. Environ., 10, 783-785.
- Eliassen A., Hov Ø., Iversen T., Saltbones J. and Simpson D. (1988) Estimates of transboundary transport of sulphur and nitrogen over Europe. Oslo, Det norske meteorologiske institutt (EMEP/MSC-W Report 1/88).
- Ferm, M. (1988) Measurements of gaseous and particulate NH₃ and HNO₃ at a background station. Interpretation of the particle composition from the gas phase concentrations. Proceeding from COST 611 Workshop, Villefrance sur Mere, 3-4 May 1988.
- Fowler, D. (1980) Removal of sulphur and nitrogen compounds from atmosphere in rain and by dry deposition. I: Internat. conf. on impact of acid precipitation. Sandefjord 1980. Ed. av D. Drabløs og A. Tollan. Oslo-Ås (SNSF-prosjektet), s. 22-32.
- Garland, J.A. (1978) Dry and wet removal of sulphur from the atmosphere. Atmos. Environ., 12, 349-362.
- Hicks, B.B., Baldocchi, D.D., Meyers, T.P., Hosker Jr., R.P. and Matt, D.R. (1987) A preliminary multiple resistance routine for deriving dry deposition velocities from measured quantities. Water, Air and Soil Pollution, 36, 300-311.
- Hoem K., Joranger E. (1987) Precipitation and air chemistry at the Norwegian background stations, 1985. Lillestrøm (NILU TR 3/87).
- Journel A.G., Huijbregts Ch.J. (1981) Mining Geostatistics, London, Academic Press.
- SFT (1986) Overvåkning av langtransportert forurenset luft og nedbør. Oslo, Statens Forurensningstilsyn (Statlig program for forureningsovervåkning, Rapport 256/86).

SFT (1987) Overvåkning av langtransportert forurenset luft og nedbør. Oslo, Statens Forurensningstilsyn (Statlig program for forureningsovervåkning, Rapport 296/87).

Voldner, R.C., Sirois, A. (1986) Monthly mean spatial variations of dry deposition velocities of oxides of sulphur and nitrogen. Water, Air and Soil Pollution, 30, 179-186.

