

Atmosfærisk deposition på danske skove

Datarapport 1992/93

Faglig rapport fra DMU, nr. 122

Mads F. Hovmand

Lone Grundahl

Ole H. Manscher

Axel Egeløv

Helle V. Andersen

*Afdeling for Forureningskilder og
Luftforurening*

Miljø- og Energiministeriet
Danmarks Miljøundersøgelser
November 1994

Datablad

Titel:	Atmosfærisk deposition på danske skove	
Undertitel:	Datarapport 1992/93	
Forfattere:	Mads F. Hovmand, Lone Grundahl, Ole H. Manscher, Axel H. Egeløv, Helle Vibeke Andersen	
Afdeling:	Afdeling for Forureningskilder og Luftforurening	
Serietitel og nummer:	Faglig rapport fra DMU, nr. 122, 1994	
Udgiver:	Miljø- og Energiministeriet Danmarks Miljøundersøgelser©	
Udgivelsestidspunkt:	November 1994	
Feltundersøgelser: Laboratoriemålinger:	Mads F. Hovmand, Axel H. Egeløv Lone Grundahl, Susanne Matthiesen	
ETB:	Bodil Chemnitz	
EDB:	Niels H. Bastholm, Ole H. Mancher	
EDB-grafik:	Ole Manscher, Werner Aistrup, Mads F. Hovmand	
Bedes citeret:	Hovmand, M.F., Grundahl, L., Mancher, O. H., Egeløv, A., Andersen, H.V., (1994): Atmosfærisk deposition på danske skove. Datarapport 1992/93. Danmarks Miljøundersøgelser 63 s. Faglig rapport fra DMU nr. 122.	
	Gengivelse tilladt med tydelige kildeangivelse	
Frie emneord:	Atmosfærisk deposition, kvælstofforbindelser, svovlforbindelser, ozon, skov, rødgran.	
ISBN:	87-7772-179-9	
ISSN:	0905-815x	
Tryk:	Grønager's Grafisk Produktion	
Sideantal:	63 s	
Oplag:	500 eks.	
Pris:	70 kr. (incl. 25% moms, excl. forsendelse)	
Salg:	Danmarks Miljøundersøgelser Afdeling for Forureningskilder og Luftforurening 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
	Summary in English	7
1	Introduktion	9
2	Målenet	11
3	Ozonmålinger på Ulborg og Frederiksborg Skovdistrikter	12
4	Kvælstof	16
5	Svovl	29
6	Våd- og tørdeposition af svovl- og kvælstofforbindelser	37
7	Basekationer	39
8	Sammenfatning og konklusion	41
	Referencer	45
	Bilag	47
	Danmarks Miljøundersøgelser	57

Forord

Atmosfæren er et transportmedium for gasser, partikler, nedbør samt for de stoffer, der er opløst i nedbøren. En betydelig del af stoftilførslen til skov og naturarealer sker via atmosfæren. Kortlægning af denne mekanisme er i særlig grad blevet aktuel efter den kraftige stigning af luftforureningsniveauerne, der fandt sted mellem 1950 og 1980.

Nærværende rapport fremlægger en del resultater fra de sidste 8 års målinger af atmosfærisk deposition til skov. Viden om den tidsmæssige udvikling i koncentrationen af luftforurenede stoffer samt i den atmosfæriske deposition er en vigtig forudsætning for at beskrive vilkårene for skovdyrkning i Danmark. Dette gælder i særlig grad skov på de sandede og næringsfattige jorde i Vestjylland.

Projekterne bag denne rapport er gennemført i nært samarbejde med Forskningscenter for Skov og Landskab (FSL). Projekterne har gennem årene modtaget støtte fra Skov og Naturstyrelsen, Miljøstyrelsen, Statens Jordbrugs- og Veterinærvidenskabelige Forskningsråd, FTU-programmet, SMP-programmet (NECO) samt fra EF- og EU-kommissionens division for "Forest and Forestry".

Summary in English

Atmospheric deposition to Danish forest

Data report 1992/93

National Environmental Research Institute

*Mads F. Hovmand, Lone Grundahl, Ole H. Manscher,
Axel Egeløv, Helle V. Andersen.*

Atmospheric deposition

Atmospheric deposition is the main input of plant nutrients as well as acidifying elements to Danish forest ecosystems. The aim of the present project is to continue and extend already ongoing research on air pollution and the element balance in ecosystems, in order to improve the basis of understanding. Further the project aims at improving the understanding of the significance of acid deposition and deposition of base cations to forest, which may be of importance for the health of the forest, especially in the western part of Denmark.

Monitoring stations

Three monitoring stations for various atmospheric components are operating in three Danish forest districts; Frederiksborg, Ulborg and Lindet. In every district one stand with Norway spruce and European beech is investigated. These stands form a part of a larger tree species trial. At Ulborg an old Norway spruce stand is included in the research, in order to make extrapolations to Danish forestry in general. All stands are instrumented with soil water samplers, litter traps, throughfall collectors and stemflow collectors. In every district bulk precipitation, gas and aerosol measuring equipment has been placed in immediate vicinity of the investigated stands. Only results from air measurements and throughfall measurement are reported here.

Ozone levels

The ozone levels are highest in the summer period, which also is the season when the conifers are most sensitive to ozone. One-hour maximum values exceed the 75 ppb-level, the critical level, in episodes of a few days duration. The corresponding critical level for the 7-hour daily mean is 25 ppb. This level was almost constantly exceeded during the month of April, May and June. "An hourly excess above 40 ppb, is calculated for data obtained during the years 1986-1993. The index "excess 40 ppb ozone" exceeds the proposed critical level for forest trees at 10 ppmxh > 40 ppb. The measured

ozone concentrations are thus at levels where effects on trees can be expected.

Sulphur depositions

Atmospheric sulphur deposition was in 1992/93 measured and estimated to 0.8 - 1.1 g S/m² per year at Ulborg, at Frederiksborg to 1.1 - 1.6 g S/m² per year and at Lindet to 1.1 - 1.3 g S/m² per year. The first figure in the given range is measured and estimated from wet plus dry deposition, the second figure is the measured through-fall value.

Nitrogen deposition

In a major part of the country atmospheric nitrogen deposition is affected by ammonia, emitted by local agricultural activity. The sum of wet and dry deposition of nitrogen compounds was in 1992/93 measured and estimated to 2.2 g N/m² per year at Ulborg, to 2.1 g N/m² per year at Frederiksborg and 4.3 g N/m² per year at Lindet (table 6). These estimates might be too high, since preliminary results have shown a reemission of ammonia from the forest area. A possible reemission is not taken into account in the N-deposition figures given here.

Trends

Eight years of measurements make it possible to investigate trends in sulphur deposition at the two stations Ulborg and Frederiksborg. Throughfall is taken as the best estimate for atmospheric sulphur deposition to the forest. A regression analyses show a decreasing trend in sulphur throughfall. At Ulborg the average decrease over the eight years period is 0.10 g S/m² per year ($R^2 = 0.8$) and at Frederiksborg 0.11 g S/m² per year ($R^2 = 0.5$). Further investigations and analyses are needed to see the reliability of these results.

1 Introduktion

Denne publikation er den fjerde i rækken af datarapporter og årsrapporter til Skov og Naturstyrelsen i forbindelse med "Ionbalanceprojektet" og "Baggrundsovervågningsprojektet". Nærværende rapport indeholder resultater fra juni 1992 til juni 1993. I rapporten belyses endvidere tidsudviklingen i svovl-kvælstofdepositionen. Desuden gengives time og døgn koncentrationer af ozon i relation til internationale forslag til en "Critical Level". For nærmere beskrivelse af sammenhænge mellem luftforurening og effekter på skov, henvises til forrige rapport i serien "Luftforurening og skovøkosystemer" (Hovmand et al. 1994).

Integreret måling

Siden 1985 har der været målt atmosfærisk deposition på skov i projektet "Ionbalance i skovsystemer". Målestationerne Ulborg i Vestjylland og Frederiksborg i Nordsjælland var de første danske målestationer i baggrundsområdet, hvor der gennemførtes et måleprogram omfattende ozon, svovldioxid (SO₂), kvælstofholdige gasser nitrogendioxid og ammoniak (NO₂, NH₃), aerosoler og nedbørskemikemi. Sammen med stationen på Lindet, der blev oprettet i 1988, er det nogle af de få europæiske stationer, hvor der kontinuert gennemføres atmosfærekemiske målinger koordineret med målinger af jordvandskemi, forskellige jordparametre, trætilvækst og trækemi. Jord- og træparametre måles af Forskningscenter for Skov og Landskab.

Undersøgelsesarealer

Undersøgelsesarealerne på Ulborg og Frederiksborg er yderpunkter både med hensyn til jordbundsforhold, atmosfærisk deposition og geografisk afstand inden for Danmark.

Parcellerne på Frederiksborg stationen er kendetegnet af stort lerindhold i jorden og en deraf følgende høj vandkapacitet i jorden, disse forhold giver en høj jordbonitet og en stor trætilvækst. Parcellerne på Ulborg er kendetegnet ved et lille lerindhold i jorden og et tilsvarende stort sandindhold, dette medfører en lav vandkapacitet i jorden, et ringe indhold af plantenæringsstoffer udtrykt i en lav bonitet. Parcellerne på Lindet minder jordbundsmæssigt om Ulborg.

2 Målenet

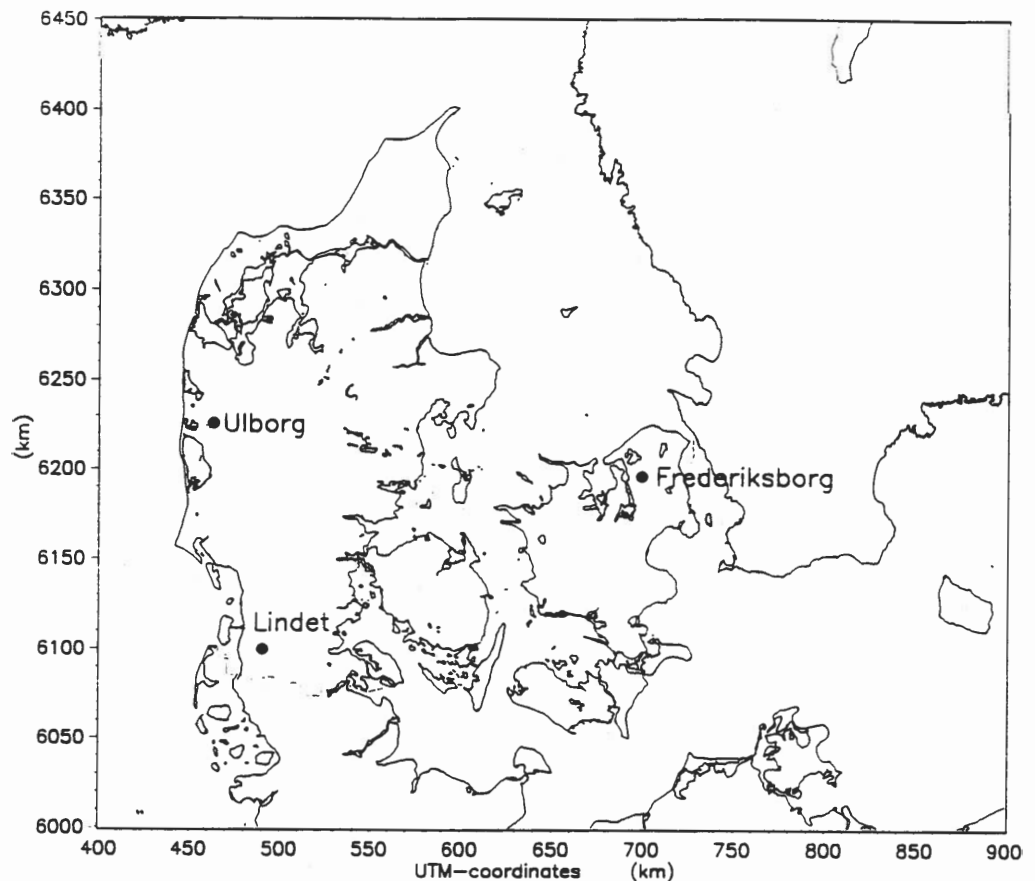
Målenet

Målenettet for "Ionbalance projektet" omfatter aktiviteter i tre skovdistrikter: Frederiksborg (Esrom) , Ulborg og Lindet Skovdistrikter.

Målestation

DMU's målestation, i hver af de 3 skovdistrikter, består af en gas- og aerosolopsamler som opsamler på døgnbasis, fire opsamlere af frilandsnedbør samt et større antal drypopsamlere som alle opsamler på ½ måneds basis. På Frederiksborg og Ulborg måles ozon på ½ times basis ved hjælp af monitører, og på Ulborg måles endvidere nitrogendioxid på døgnbasis. Beskrivelse af opsamlingsmetoder, analysemetoder og kvalitetskontrol af data er beskrevet i Hovmand et al. (1992). For ozons vedkommende i Hertel, Hovmand (1991). Alle prøver opsamles og analyseres af DMU-FOLU's kemilaboratorium. Målingerne er delvis finansieret af DMU's "Baggrundsovervågningsprogram".

Undersøelsesarealernes placering fremgår af figur 1.



Figur 1. Placeringen af de tre undersøelsesarealer for integrerede undersøgelser af atmosfærisk deposition og stofcirkulation i skov-økosystemer.

3 Ozonmålinger på Ulborg og Frederiksborg skovdistrikter

I forbindelse med projektet måles ozonkoncentrationen løbende, værdierne midles til halvtimes værdier, disse ses i *bilag 1*.

Critical level

I *figur 2 og 3* er der vist forløbet over året af henholdsvis 7-timers dagmiddelværdier regnet fra kl. 9 til 16 (dansk normaltid) samt den maximale timeværdi for hvert døgn. Forløbet af kurverne er sat i relation til "Critical level" værdier for ozonbelastning af vegetation. Critical level for 7 timers dag gennemsnit er sat til 25 ppb, for et times maximum pr. døgn er værdien 75 ppb. Disse værdier blev foreslået ved et møde i Bad Hazburg i 1988 (Derwent et al., 1990), men senere stærkt diskuteret ved efterfølgende møder i UNECE (UNECE, 1992). Grænseværdierne er lagt ind i figurene som vandrette linjer. "Critical Level" (CL) niveauerne fastlægges gennem feltforsøg og modelberegninger. CL er den faglige beregningsformel til administrative beslutninger forhandlet i et internationalt forum. Set i relation til CL, er det selvsagt afgørende vigtigt at kunne følge og dokumentere den i felten målbare atmosfæriske deposition, og den fysiologiske påvirkning af denne deposition.

Overskridelser af CL

Af kurveforløbet fra 1. juli 1992 til 30. juni 1993 fremgår det, at 25 ppb's niveauet er overskredet i hele sommerhalvåret fra marts til og med september. Et-times maxima overskrides i april og maj, hvilket er et tilbagevendende forårsmaximum. Desuden forekommer der i 1992 overskridelser i juni, juli og august. Målinger fra Ulborg og Frederiksborg har den samme tidsmæssige variation, men med en tendens til, at koncentrationsniveauet er lidt højere på Ulborg stationen, især i foråret 1993.

Tidsudvikling

Målinger af ozon på Ulborg stationen startede i efteråret 1985. *Tabel 1* viser nogle beregnede index-værdier for ozonbelastningen gennem årene. Spidsbelastningen med ozon er udregnet som antallet af dage i måleåret, hvor timemaximumsværdien er over 75 ppb. Et udtryk for den kumulerede eksponering med ozon er beregnet som koncentrationsværdien over 40 ppb pr. time summeret over en vækstsæson. Dette index kaldes "excess ozone" og enheden er $\text{ppb} \times \text{timer} \times 1000$ lig med $\text{ppm} \times \text{timer}$.

I 1992 (UNECE, 1992) blev Critical Level værdien sat til $0,3 \text{ ppm} \times \text{timer} > 40 \text{ ppb}$, således som refereret af Hovmand et al. (1994). Senere har denne værdi været diskuteret for forskellige vegetations typer (Skärby et al., 1994). Ozonskader eller plantefysiologiske ændringer kan erkendes ved noget højere niveauer end

0,3 ppm×timer>40 ppb, således reagerer følsomme afgrøder på niveauer på 2,6 ppm×timer>40 ppb mens et "Critical Level" for træer er sat til 10 ppm×timer>40 ppb summeret for en vækstsæson på 6 måneder. Det kan imidlertid ikke udelukkes at fysiologiske ændringer i træerne optræder ved lavere niveauer, således kan ændringer i et år gamle nåles chloroplaster observeres ved niveauer på 5 ppm×timer>40 ppb (Skärby et al., 1994). I de danske udregninger er vækstsæsonen regnet fra 1. april til 30. september.

Tabel 1. Kritiske niveauer for ozon koncentrationer. Antal dage i måleåret med en time-maxværdi på mere end 75 ppb. " Excess ozon" er summationen af den del af koncentrationsværdierne i vækstsæsonen, der ligger over et timegennemsnit på 40 ppb. Data fra målestationen i Ulborg Skovdistrikt.

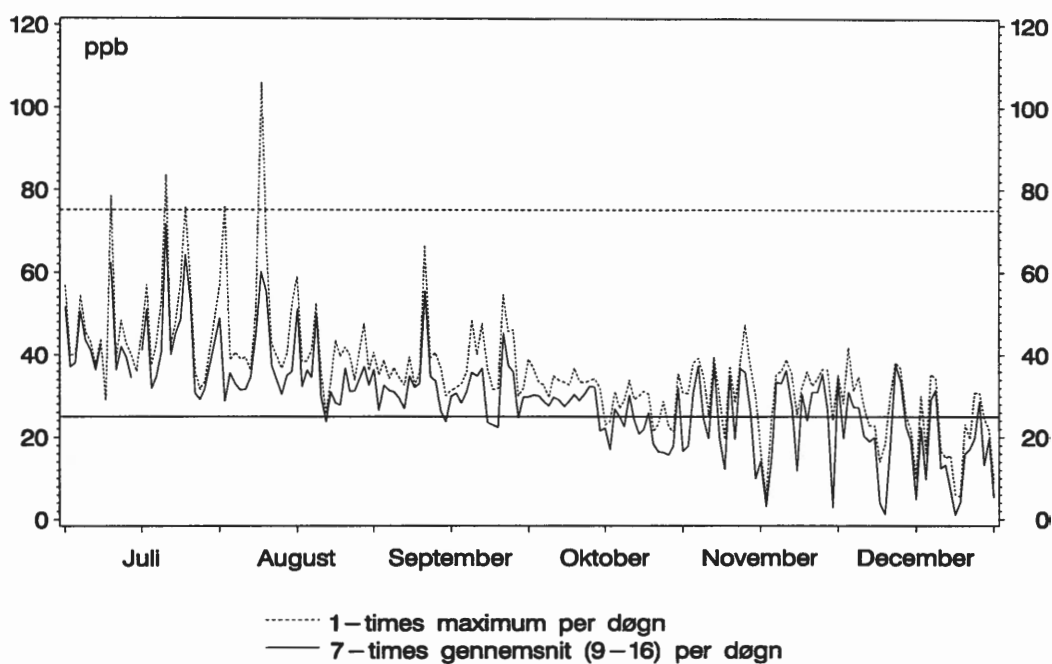
År	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993
Antal dage med time max > 75 ppb	0	6	11	11	3	7	18	11
"Excess Ozone" ppm×timer > 40 ppb	8	9	19	11	3	10	15	9

Af tabel 1 ses, at der er en sammenhæng mellem de to sæt index, skønt de er beregnet på vidt forskellig måde. Af sammenligningen mellem de forskellige år fremgår det, at 1988 og 1992 havde høje ozon-index. Dette bekræftes også af norske målinger hvor årene 1982, 1988 og 1992 viste de højeste antal døgn med høje ozon koncentrationer (episode-døgn) (Statens Forureningstilsyn, 1993).

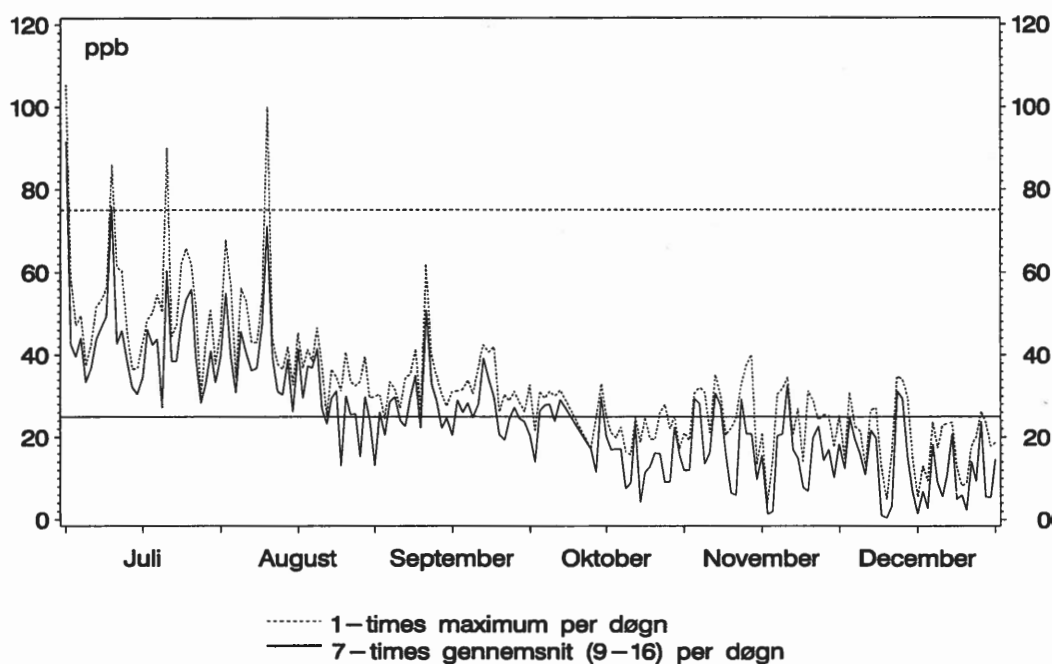
Provisoriske grænseværdier

Det skal bemærkes at "Excess Ozone" værdierne for alle årene ligger omkring den provisoriske grænseværdi sat for skov på 10 ppm×timer>40 ppb og nogle år overskrider værdierne dette niveau betydeligt. Dette forhold kan næppe tages som bevis for, at de danske skove er ved at lide "ozon-døden", men derimod tilskynde til nærmere in situ undersøgelse af skovtræernes fysiologiske respons på de aktuelt målte niveauer. Således, at man med større sikkerhed kan vurdere de aktuelle ozon niveaues langsigtede virkninger på træernes trivsel og produktivitet under danske forhold.

Ozon målt på Ulborg

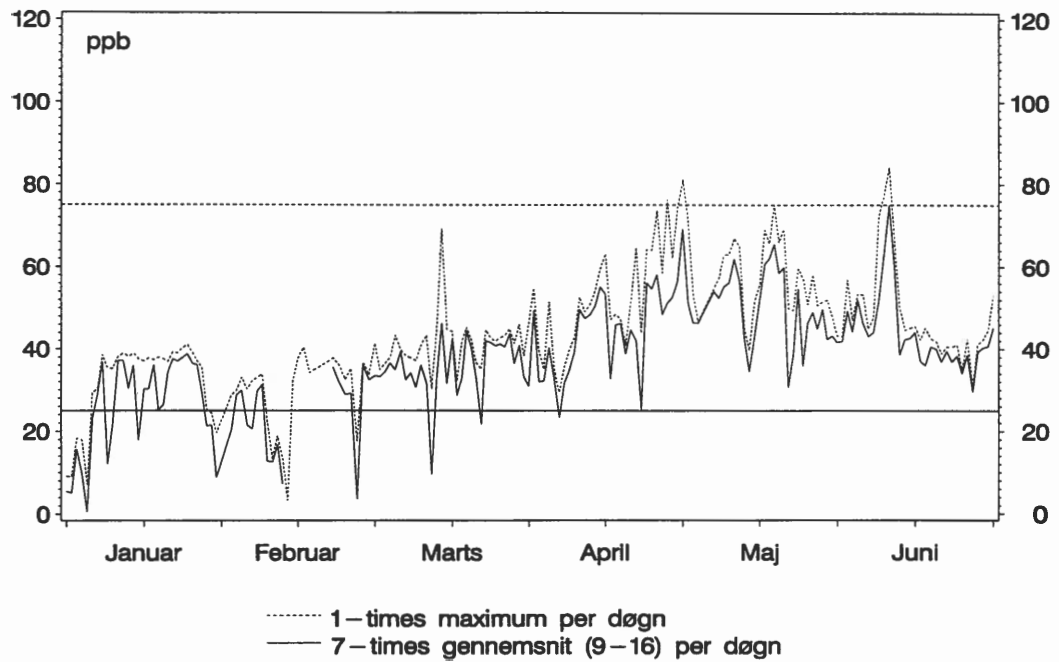


Ozon målt på Frederiksborg

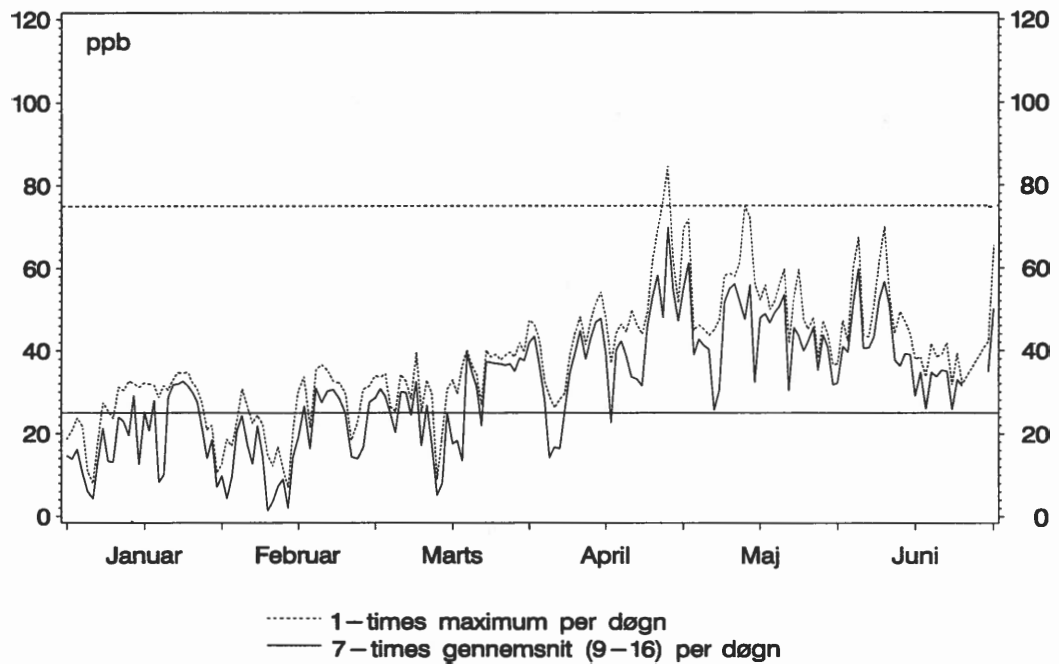


Figur 2. Ozon måling på Ulborg og Frederiksborg andet halvår af 1992. Den optrukne linje angiver dagmiddelværdien fra kl. 09-16. Den stiplede linje angiver et-times maksimum pr. døgn. De vandrette linjer angiver UNECE-grænseværdier for h.h.v. dagmiddel på 25 ppb og time maxima på 75 ppb.

Ozon målt på Ulborg



Ozon målt på Frederiksborg



Figur 3. Ozon måling på Ulborg og Frederiksborg første halvår af 1993. Den optrukne linje angiver dagmiddelværdien fra kl. 09-16. Den stiplede linje angiver et-times maksimum pr. døgn. De vandrette linjer angiver UNECE-grænseværdier for h.h.v. dagmiddel på 25 ppb og time maxima på 75 ppb.

4 Kvælstof

Plantenæringsstof

Atmosfærisk kvælstofdeposition tilføres skovarealerne i form af gasser, partikler samt opløst i nedbør. Kvælstof er et plantenæringsstof, der i naturlige uforurenede økosystemer er i underskud. Det vil sige, at planternes vækst øges ved ekstern tilførsel. Tilførsel af for store mængder af plantetilgængelige kvælstofforbindelser kan medføre eutrofiering af økosystemet eller på længere sigt forsure af jorden.

Ved forøget kvælstoftilførsel kan grundvandet under skovene på lang sigt blive mere nitratholdigt. Kortlægning og kvantificering af kvælstoftilførslen til akvatiske eller terrestriske økosystemer har i den sidste snes år været et centralt punkt i dansk miljøforskning og overvågning.

Nitrogenoxid, ammoniak

De kvælstofholdige gasser som nitrogenoxid (NO_2) og ammoniak (NH_3) kan give direkte planteskader, hvis de forekommer i høje koncentrationer. De koncentrationer, der registreres i danske landdistrikter, forekommer sjældent i direkte toksiske niveauer.

På de tre "skovmålestationer" måles NO_2 kun på Ulborg stationen, ammoniak måles med filterpack metoden (Hovmand et al., 1993), der for NH_3 er en semi-kvantitativ metode. Årets døgnmiddelværdier af NO_2 og NH_3 er vist i figur 4 og 5. På Ulborg stationen giver filterpack metoden næsten den samme gennemsnitværdi for ammoniak som denudermålemetoden, når der måles over længere perioder. Denudermetoden er en mere NH_3 -specifik målemetode, sammenligning på døgnbasis mellem de to metoder viser imidlertid betydelige variationer på enkeltdøgnmålinger (Andersen, Hovmand, 1994).

Ammoniak

Ammoniak-koncentrationerne svinger meget mellem de enkelte stationer. Lindet stationen fremviser de største NH_3 koncentrationer, der ofte ligger på over $5 \mu\text{g N/m}^3$, i enkelte tilfælde over $10 \mu\text{g N/m}^3$. Ulborg målingerne ligger lavere og Frederiksborg målingerne lavest. Disse niveauforskelle afspejler intensiteten af husdyrhold i områderne, idet husdyrbrug er den mest betydningsfulde kilde til NH_3 i atmosfæren. Foruden virkningen af en generel høj husdyrtæthed i Sønderjylland, påvirkes Lindet målestationen af en større "grisefarm", der ligger ca. 500 m øst for målepunktet. For perioden medio april til medio juni, følger de høje koncentrationer på alle stationerne hinanden, om end på meget forskellige niveauer.

Salpetersyre

Den tredje kvælstofholdige gas der har betydning for kvælstofdepositionen, er salpetersyre (HNO_3). Denne forbindelse kan ikke bestemmes med filterpack metoden, men bestemmes sammen med nitratholdige partikler som total-nitrat.

I de særlige målekampagner under projektet "Udvidet ionbalance" og i Overvågningsprogrammet er HNO_3 målt ved hjælp af denudermetoden. De tidlige HNO_3 målinger viser gennemsnitsniveauer på $0,20 \mu\text{g N/m}^3$ om sommeren og $0,13 \mu\text{g N/m}^3$ om vinteren (Hovmand et al., 1993).

Partikler

Kvælstofforbindelser bundet i partikler udgøres hovedsageligt af ammonium (NH_4^+) og nitrat (NO_3^-). Ammonium opsamlet på forfiltret er påvirket af absorption og fordampning af ammoniak fra filtret. Dette forhold spiller i praksis kun en lille rolle for ammoniumbestemmelsen på stationer hvor ammoniakkoncentrationen er lille i forhold til ammoniumkoncentrationen. De foreliggende nitratværdier er summen af nitrat og salpetersyre. Koncentrationen i atmosfæren af disse forbindelser over året er vist i figur 6 og 7. Det fremgår, at de største koncentrationer findes i vinterhalvåret med tydelige aftegnede samtidige hændelser af høje koncentrationer af NH_4^+ og NO_3^- . Høje koncentrationer ses i forbindelse med episoder med langtransport fra Centraleuropa.

Tørdeposition

Tilførslen af kvælstofholdige gasser og partikler til skov udgør tilsammen den såkaldte tørdeposition. Tørdepositionen af kvælstof bidrager med mere end 50% af den samlede atmosfæriske kvælstofdeposition. En nøje kvantificering af tørdepositionen, udtrykt som mg N/m^2 pr. år, forudsætter foruden koncentrationsmålinger også oplysninger om de enkelte stoffers depositions-hastighed.

Depositionshastighed

Depositionshastigheden for et givet stof er ikke konstant over tid, men varierer som en funktion af især meteorologiske og plantefysiologiske forhold, samt af terrænets ruhed. I denne rapport er den årlige tørdeposition imidlertid udregnet på basis af konstante gennemsnitlige tørdepositionshastigheder, fordi den nødvendige viden om depositions-hastighedernes variabilitet endnu ikke er til stede. Bestemmelse af den variable depositions-hastighed er genstand for videnskabelige undersøgelser i projektet "Udvidet ionbalance". Tabel 2 viser depositions-værdier fra andre rapporter. De anvendte tørdepositionshastigheder for kvælstofforbindelser i denne rapport er vist i tabel 3, samt de udregnede depositions-fluxe.

Tørdepositionsflux

Tørdepositionsfluxen er estimeret som produktet af den gennemsnitlige tørdepositionshastighed for et stof og den gennemsnitlige koncentration af stoffet i atmosfæren. For de hurtigt deponerende gasser som NH_3 og HNO_3 er denne beregningsmetode en uheldig

tider er inverst forbundet med depositions hastigheden. Det betyder, at når stofkoncentrationen i atmosfæren i en periode er lav, så kan det være en følge af en høj depositions hastighed. Til gengæld kan en høj stofkoncentration i atmosfæren være en følge af en lav depositions hastighed i den pågældende periode. Produktet af koncentration og depositions hastighed bør derfor udregnes med så stor tidsopløsning som mulig.

I dette projekt er de fleste koncentrationsmålinger foretaget som døgn gennemsnit, hvilket giver en mulig tidsopløsning for depositions beregningen på et døgn. For nærværende findes der få oplysninger om variabiliteten af depositions hastighederne; beregningerne er derfor gennemført som årgennemsnit. Tørdepositions estimater for Ulborg, Frederiksborg og Lindet Skovdistrikter er vist i tabel 3.

Tabel 2. Tørdepositions hastigheder, V_d for gasser og partikler refereret fra forskellige undersøgelser. Tabellen omfatter både kvælstof- og svovlforbindelser.

Referencer	Hovmand et al. 1994	Asman et al. 1994 ⁽¹⁾	Andersen et al. 1993
Enhed	mm/s	mm/s	mm/s
<i>Gasser</i>			
NH ₃	35	22	26-45
NO ₂	4	6-3	
HNO ₃	70	65	70 ⁽²⁾
SO ₂	8	11-6	
<i>Partikler</i>			
NH ₄ ⁺	2	1	
NO ₃ ⁻	2	1	
SO ₄ ²⁻	2	1	

⁽¹⁾ ved vindhastighed 5 m/s

⁽²⁾ H.V. Andersen (1994)

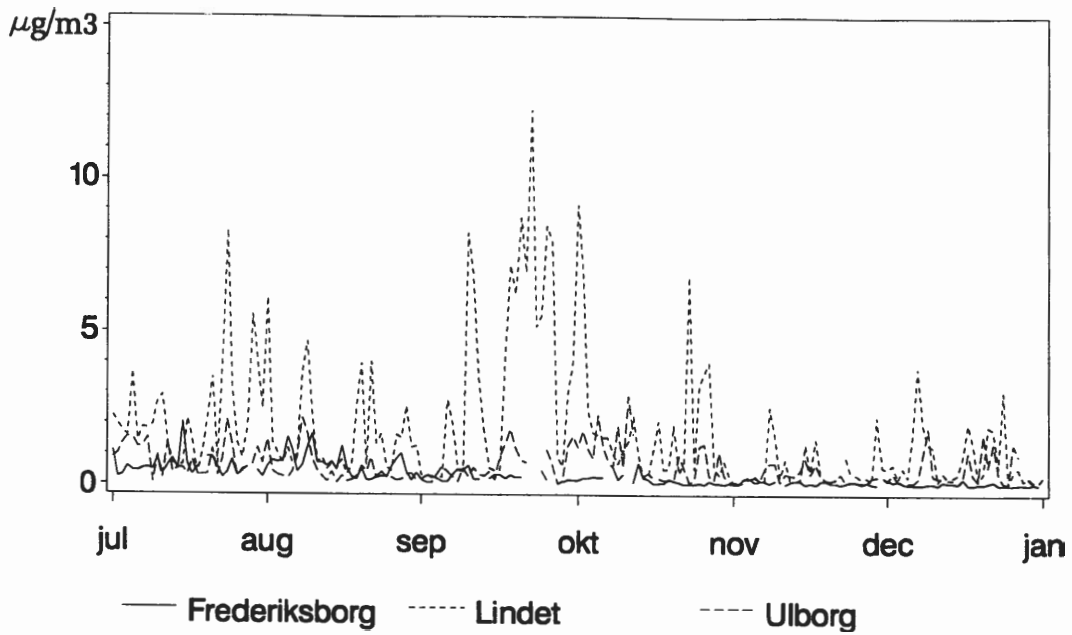
Table 3. Estimer for årlig tørdeposition til rødgran i Ulborg-, Frederiksborg- og Lindet Skovdistrikter 1992/93. Udregnet med gennemsnitlige tørdepositionshastigheder og gennemsnitlige gas og aerosolkoncentrationer. Tabellen omfatter både kvælstof- og svovlforbindelser.

	Ulborg			Frederiksborg		Lindet	
	V_d mm/s	konc. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	dep. mg/m^2	konc. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	dep. mg/m^2	konc. $\mu\text{g}/\text{m}^3$	dep. mg/m^2
<i>Gasser</i>							
NH ₃ -N	35	0,73	805	0,34	375	2,07	2285
NO ₂ -N	4	1,2	151	2,2*	278	1,8*	227
HNO ₃ -N	70	0,17**	375	0,17**	375	0,17**	375
SO ₂ -S	8	1,04	262	1,84	464	1,51	381
<i>Partikler</i>							
NH ₄ ⁺ -N	2	1,85	117	1,81	183	2,40	151
NO ₃ ⁻ -N	2	1,0	63	0,9	59	1,3	80
SO ₄ ²⁻ -S	2	1,60	101	1,7	107	1,87	118
Sum N			1511		1270		3118
Sum S			363		571		499

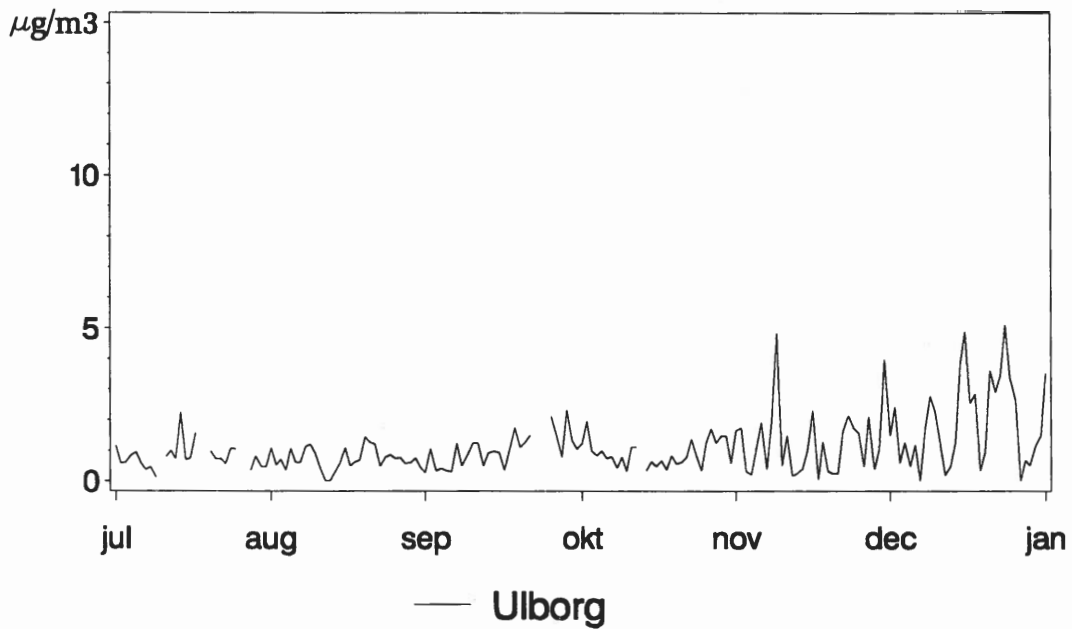
* NO₂ koncentrationer er ekstrapoleret ud fra målinger på Ulborg samt målinger fra tidligere år på Frederiksborg og Lindet.

** Salpetersyre koncentrationer er ekstrapoleret ud fra kampagnemålinger i perioden 1991-1993.

NH₃ – N døgnværdier i 1992 Skovstationer

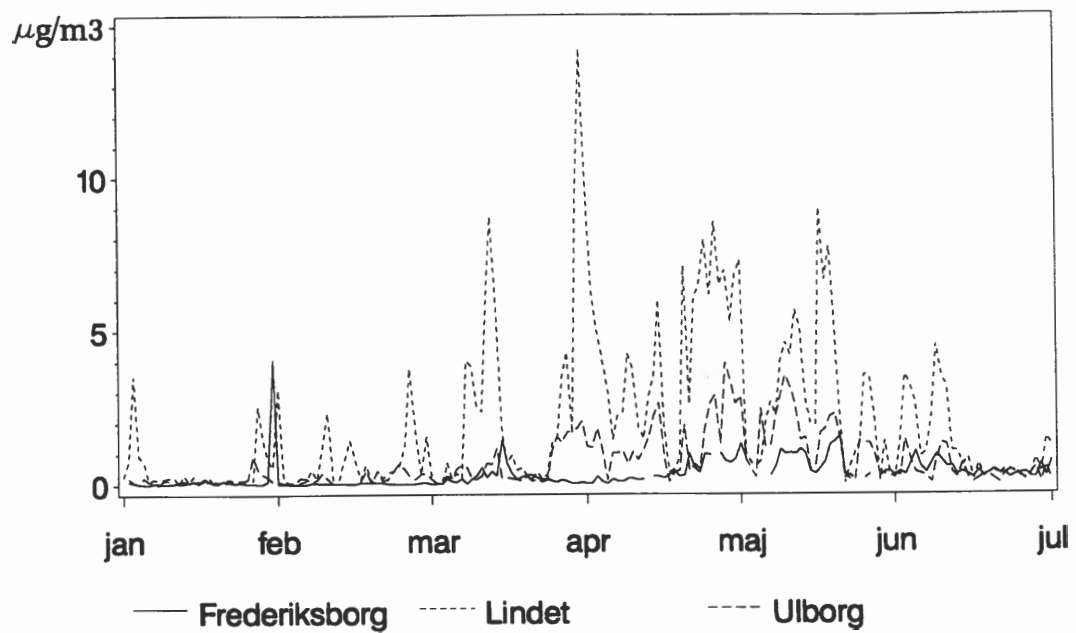


NO₂ – N døgnværdier i 1992 Skovstationer

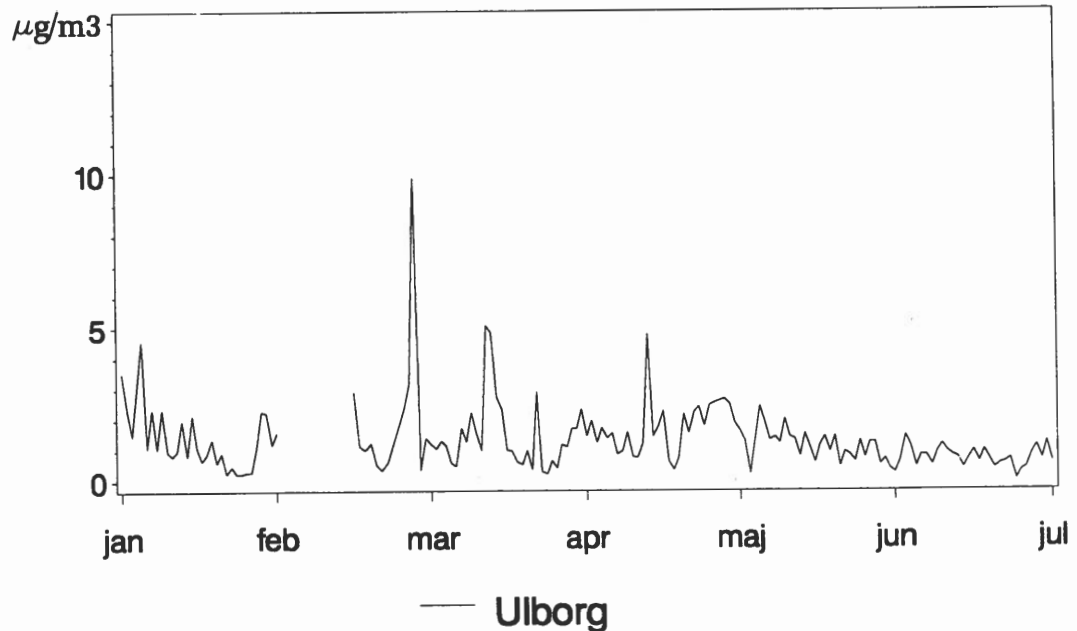


Figur 4. Koncentrationen af ammoniak (øverst) på stationerne Frederiksborg, Lindet og Ulborg og koncentrationen af nitrogendioxid (nederst) på Ulborg for sidste halvår af 1992.

NH₃ – N døgnværdier i 1993 Skovstationer



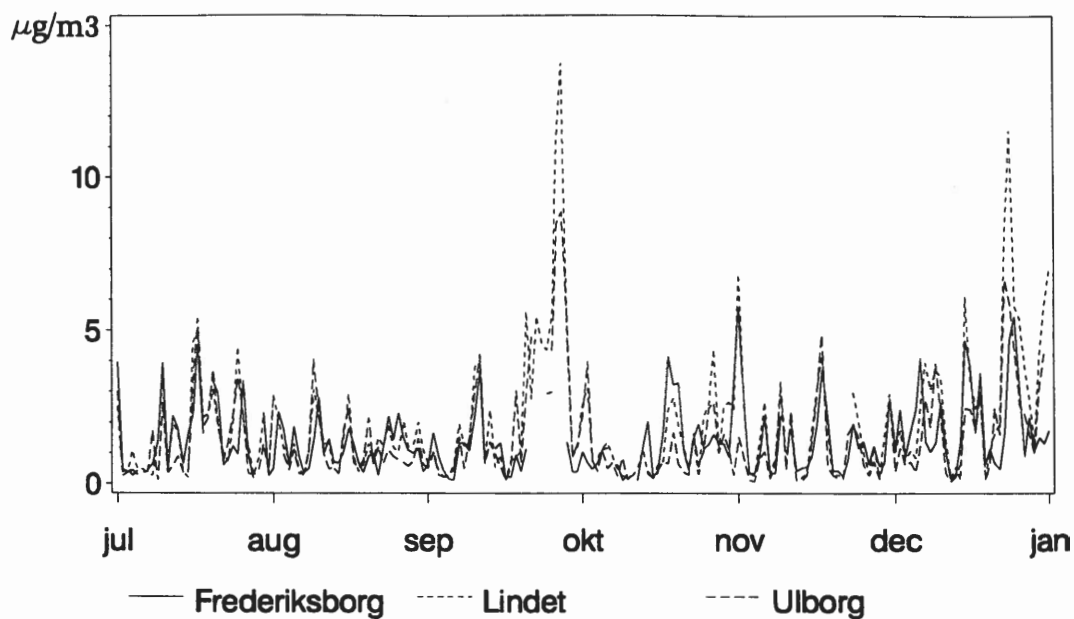
NO₂ – N døgnværdier i 1993 Skovstationer



Figur 5. Koncentrationen af ammoniak (øverst) på stationerne Frederiksborg, Lindet og Ulborg og koncentrationen af nitrogendioxid (nederst) på Ulborg for første halvår af 1993.

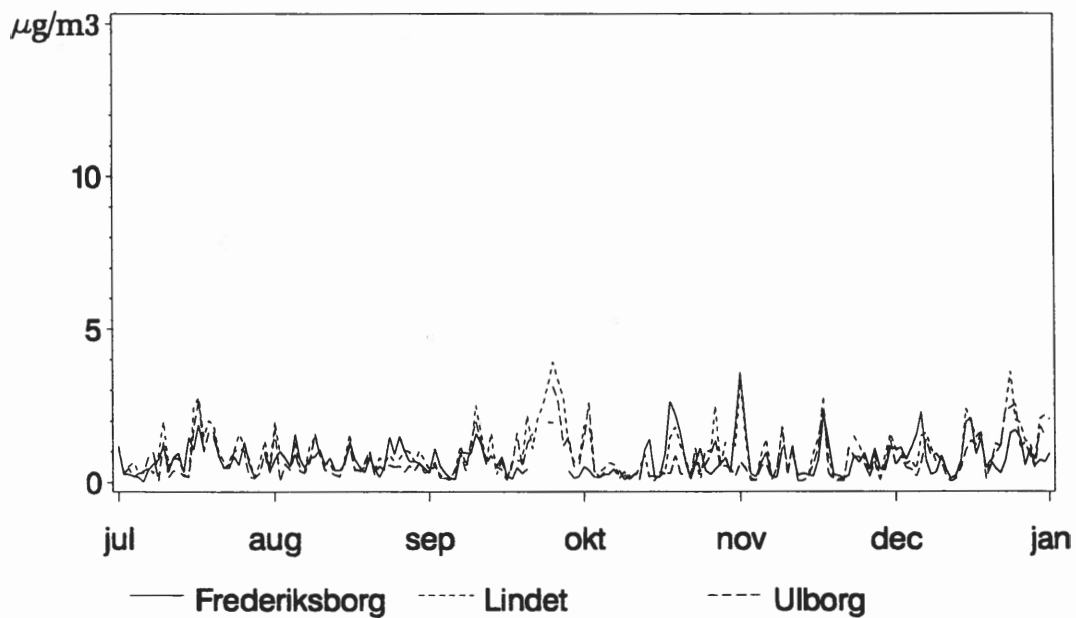
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ døgnværdier i 1992

Skovstationer



$(\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-) - \text{N}$ døgnværdier i 1992

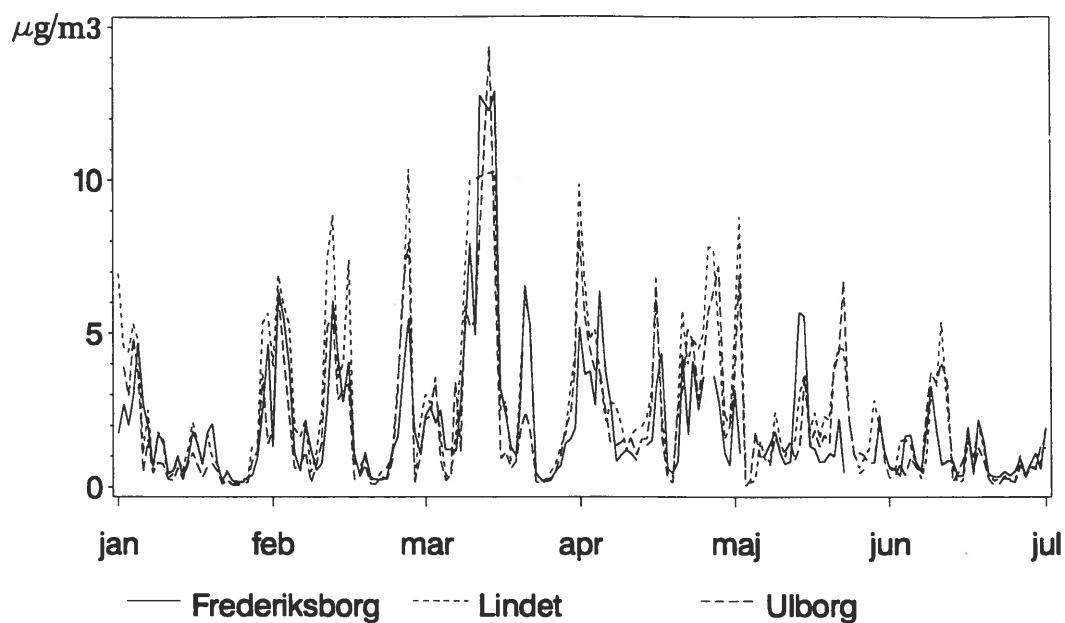
Skovstationer



Figur 6. Den atmosfæriske koncentration af de partikelbundne kvælstofforbindelser ammonium (øverst) og total-nitrat (nederst) målt på Frederiksborg, Lindet og Ulborg i sidste halvdel af 1992.

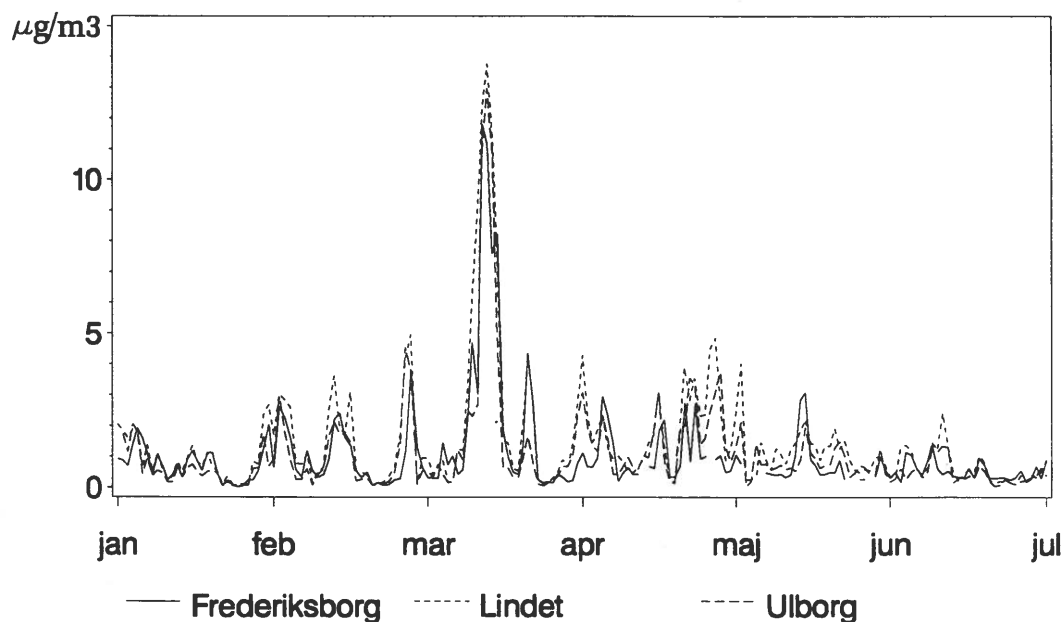
$\text{NH}_4^+ - \text{N}$ døgnværdier i 1993

Skovstationer



$(\text{HNO}_3 + \text{NO}_3^-) - \text{N}$ døgnværdier i 1993

Skovstationer



Figur 7. Den atmosfæriske koncentration af de partikelbundne kvælstofforbindelser ammonium (øverst) og total-nitrat (nederst) målt på Frederiksborg, Lindet og Ulborg i første halvdel af 1993.

Våddeposition

Kvælstofindholdet i nedbør består især af ionerne ammonium og nitrat. Våddepositionen er i denne undersøgelse målt som "bulk deposition", det vil sige, at nedbøren er opsamlet i et tragtflaske system, hvor partikler og gasser kan afsættes. Under danske klimaforhold og ved indsamling i skove udgør partikel og gasafsætningen i tragten kun en mindre andel, formentlig mellem 5 og 15% af depositions-værdien.

Våddepositionen er relativt konstant over Danmark (Hovmand et al. 1993). Våddepositionen bidrager med lidt under 50% af den atmosfæriske kvælstofdeposition til skov. Størrelsen af våddepositionen i 1992/93 er vist i *tabel 4*. Tabellen omfatter foruden kvælstof-forbindelser også sulfat og klorid. Sulfat mærket * er korrigeret for havaerosol bidrag, det vil sige den andel af sulfatmængden der stammer fra vindtransporterede havaerosolerne er ikke medregnet. Den kvartalsvise våddeposition er vist i Bilag II.

Tabel 4. Våddeposition opsamlet som "bulk deposition" på Ulborg, Frederiksborg og Lindet i perioden 1/6-1992 til 31/5-1993. $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}^*$ er den havaerosol korrigerede sulfat.

	Ulborg mg/m ²	Frederiksborg mg/m ²	Lindet mg/m ²
H ⁺	21	18	14
NH ₄ ⁺ -N	346	492	717
NO ₃ ⁻ -N	324	364	415
SO ₄ ²⁻ -S	689	592	828
SO ₄ ²⁻ -S*	405	519	560
Cl ⁻	6249	1458	5754
Nedbør i mm	766	585	744

Udviklingstendenser over 8 år

Den tidsmæssige udvikling af våddepositionen målt på Ulborg og Frederiksborg er vist for perioden 1985 til 1993 som årsmiddelværdier. Nedbørsmængden er vist i *figur 8* og våddepositionen af summen af ammonium og nitrat er vist i *figur 9*. Hvert årsgennemsnit er regnet fra 1/6 til 31/5 det følgende år. Nedbørsmængden er selvsagt varierende fra år til år, men uden nogen synlig udvikling i perioden (*figur 8*). Dette forhold har betydning for vurderingen af den tidsmæssige udvikling i våddepositionen af kvælstofforbindelser og svovlforbindelser.

Våddepositionen af kvælstofforbindelser har været stigende fra 1950'erne frem til begyndelsen af 1970'erne, herefter var niveauet næsten konstant indtil slutningen af 1980'erne (Hovmand, Grundahl, 1991). I de senere år spores en svag nedgang, dette gælder også værdierne for året 1992/93, der er lavere end de tidligere år, således som det fremgår af *figur 9*. Kvælstofdepositionen med nedbør synes at være aftagende på begge stationer. Nedgangen på Ulborg synes også påvirket af den ringe nedbørsmængde i 1992/93. Nedgangen i kvælstofdepositionen kan ikke umiddelbart forklares med nedsatte emissioner.

Gennemdryp

Den kvælstofmængde, der drypper fra træerne og når skovbunden, er bestemt som summen af tørdeposition og våddeposition samt af træernes stofomsætning. Træerne optager kvælstof direkte fra nedbør og tørdeposition, men der frigøres også kvælstof fra træerne i form af organisk kvælstof. Dette organiske kvælstof vil i nogen grad omdannes til ammonium. Gennemdryp fra rødgran er vist i *tabel 5* for de tre skovstationer.

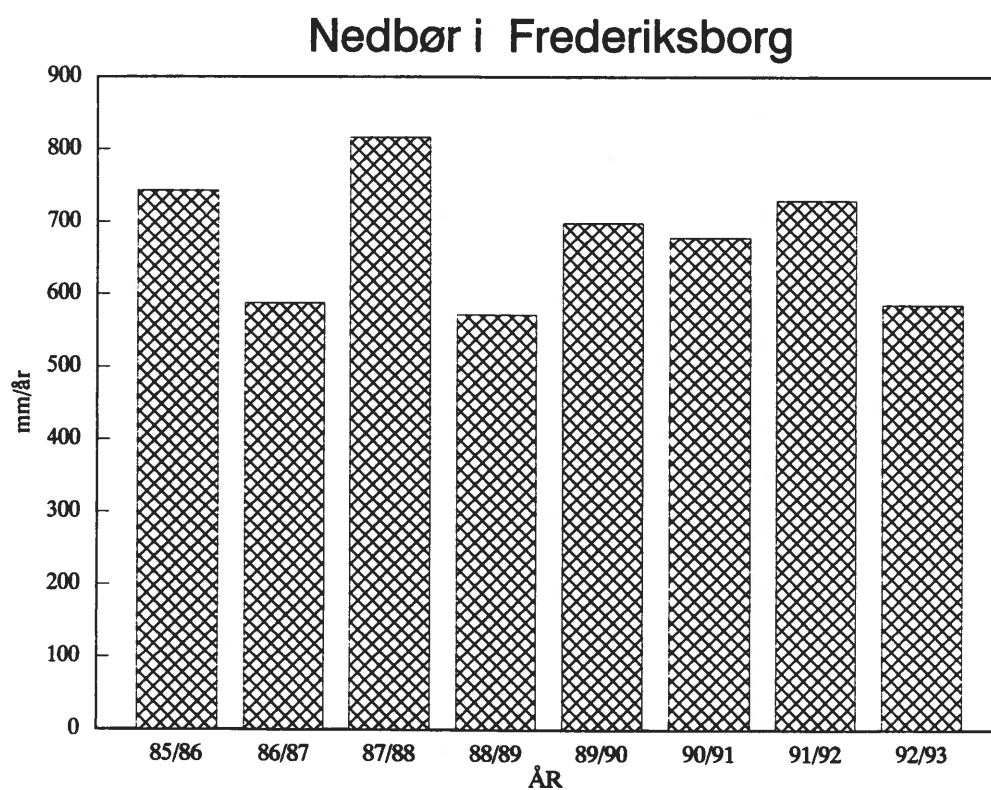
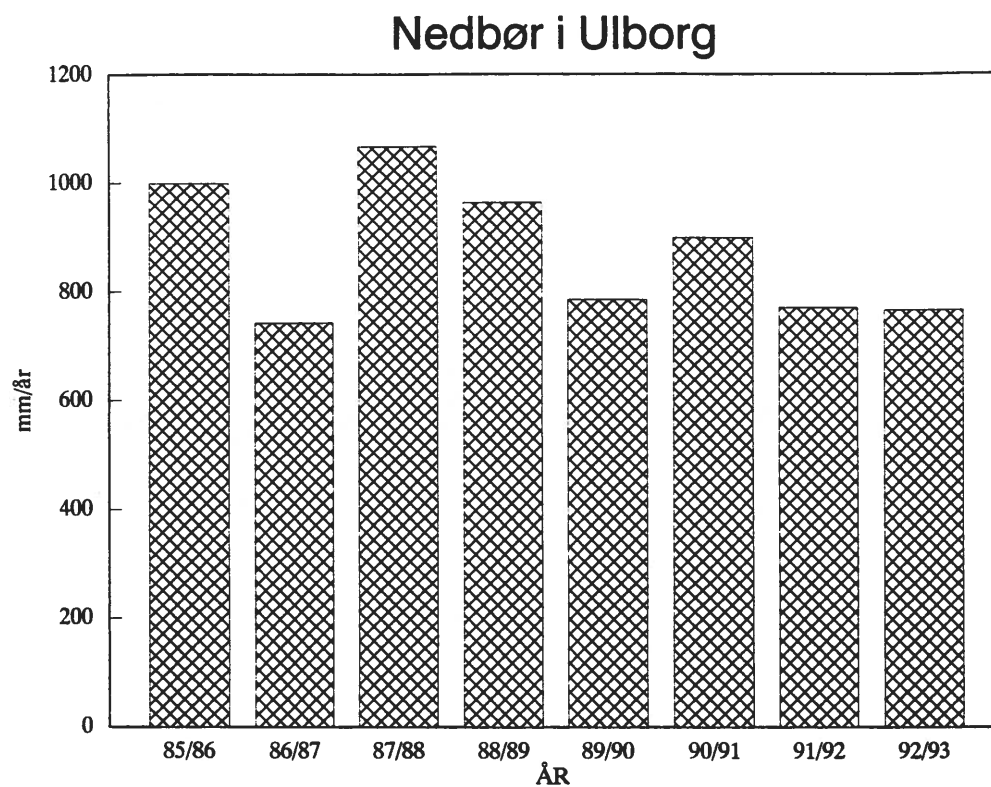
Målinger i "gammel" rødgran

På Ulborg måles gennemdryp på en granparcel plantet i 1962/63, denne parcel er ensaldrende med parcellerne på Frederiksborg og Lindet. Derudover måles der på en "gammel" ca. 80 årig rødgranparcel. Disse træer er ca. dobbelt så høje som træerne i den unge rødgran og muligheden for "indfangning" af gasser og partikler større. Mange faktorer kan påvirke gennemdryppets indhold af kvælstofforbindelse. Af *tabel 5* ses, at kvælstofgennemdryppet i den gamle parcel på Ulborg er mindre end i den nye. En forklaring kan være at de gamle træer har et større kvælstofoptag gennem nålenes overflade, fordi en dårlig kvælstofomsætning i skovbunden har induceret en forringet kvælstoftilførsel via rodnettet.

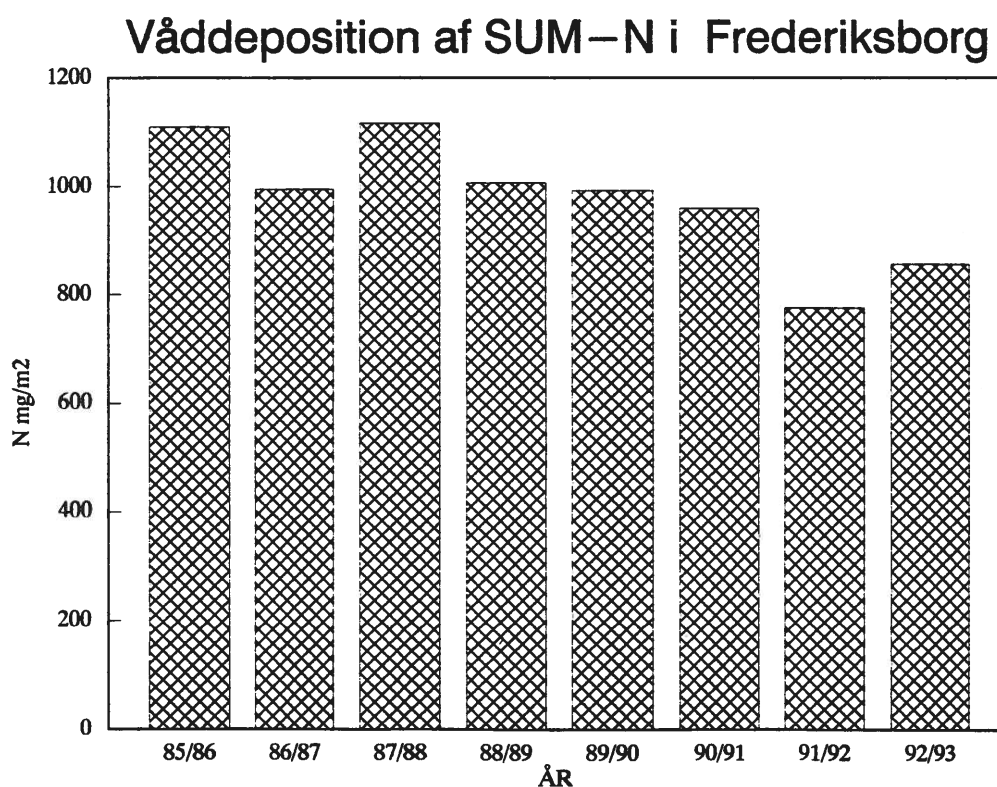
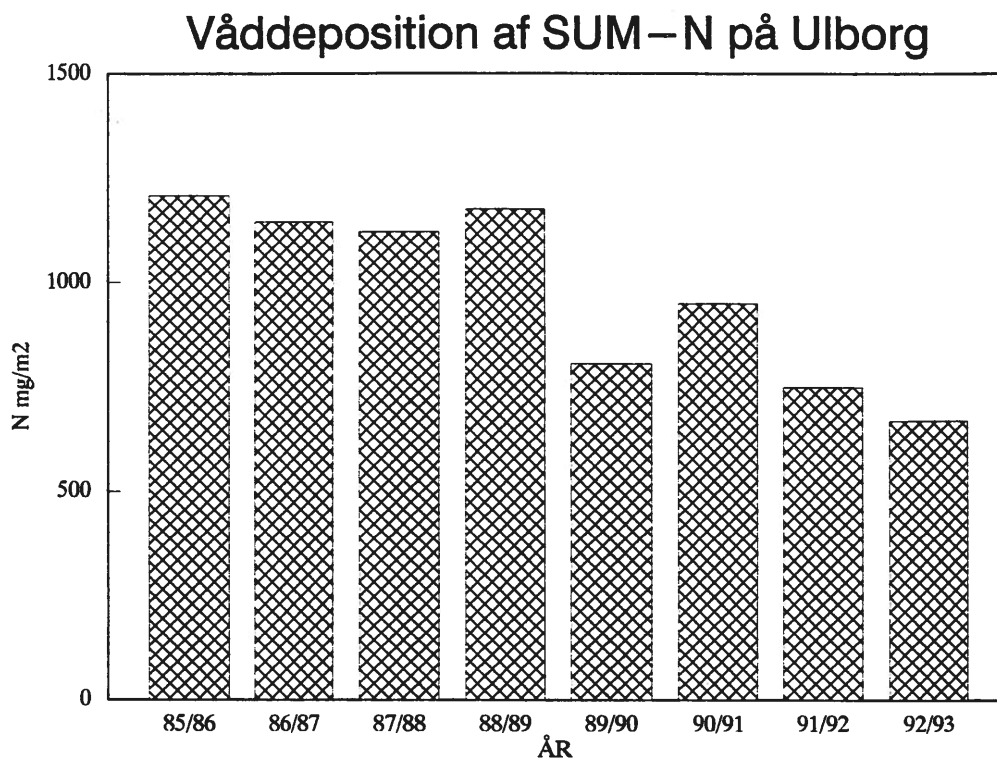
I *tabel 5* er forholdet mellem kationerne H^+ og NH_4^+ og anionerne NO_3^- og SO_4^{2-} i gennemdryppet angivet for de tre lokaliteter. Forholdet mellem kationerne ($H^+ + NH_4^+$) og anionerne ($NO_3^- + SO_4^{2-}$) er lavest på Frederiksborg på trods af, at de absolutte koncentrationer af ionerne er højest på denne lokalitet. Dette kan forklares ved at der på Frederiksborg udvaskes (leaching) kationer som kalium og kalcium fra nålene.

Table 5. Drypmålinger fra rødgranparceller på Ulborg, Frederiksborg og Lindet i perioden 1/6-1992 til 31/5-1993. $\text{SO}_4^{2-}\text{-S}^*$ er den havaerosol korrigerede sulfat.

Stof	Station	Ulborg		Frederiksborg	Lindet
		Ung	Gammel		
H^+	mg/m^2	7	21	16	6
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	mg/m^2	1078	896	1062	1609
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	mg/m^2	646	525	849	753
$\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$	mg/m^2	1668	1874	1850	1870
$\text{SO}_4^{2-}\text{-S}^*$	mg/m^2	1009	1108	1559	1316
Cl^-	mg/m^2	14600	17300	6400	12800
Nedbør	mm	495	464	352	497
$(\text{H}^+\text{+NH}_4^+)$	meqv/ m^2	84	85	92	121
$(\text{NO}_3^+\text{+SO}_4^{2-})$	meqv/ m^2	109	107	158	136
$(\text{H}^+\text{+NH}_4^+)/(\text{NO}_3^+\text{+SO}_4^{2-})$		0,8	0,8	0,6	0,9



Figur 8. Nedbør, årssum regnet fra 1/6 til 31/5 målt på Ulborg og Frederiksborg i perioden 1985 til 1993.



Figur 9. Våddeposition af kvælstof, årssum regnet fra 1/6 til 31/5, målt på Ulborg og Frederiksborg i perioden 1985 til 1993.

5 Svovl

Svovl deponeres i form af svovlholdige gasser, partikler og som sulfat opløst i nedbøren.

Gaskoncentrationer

Svovldioxid (SO₂) kan give planteskader, de såkaldte begasnings-skader. Det fordrer ret høje koncentrationer, UNECE Critical level er sat til 10 µg SO₂-S som årsmiddel og 35 µg SO₂-S/m³ som døgn-middel (UNECE, 1988). Begasningsskader er kendt fra de "gamle" in-dustriområder i Centraleuropa, Midtengland og Nordamerika, men det er næppe de skader, man kan forvente i Danmark, hvor døgn-middel koncentrationer af SO₂ ret sjældent når over 10 µg SO₂-S/m³. Kombinationsskader ved høje koncentrationer af SO₂, NO₂ og ozon kan dog ikke udelukkes under danske forhold, blot er det vanskeligt at erkende årsagen, når flere forbindelser indvirker samtidigt. Kon-centrationsforløbet i 1992/93 af sulfat (SO₄²⁻-S) på partikelform og gasformig SO₂ er gengivet som døgnmiddelværdier i *figur 10 og 11*. Som følge af at næsten al SO₂ er fjerntransporteret forekommer episoder med høje koncentrationer samtidig på alle stationerne. Gennemsnitlige kvartalsvise koncentrationer er vist i *bilag III*.

Virkning af SO₂

Den afgørende virkning af SO₂ på skovene er tørdepositionen af dette stof. Tørdeposition af SO₂ medfører forsuring af skovøko-systemet, idet der frigøres to protoner ved dannelsen af et molekyle svovlsyre udfra et molekyle SO₂. Den heraf dannede svovlsyre vil ved videre transport gennem økosystemet fjerne kationer som kalcium og kalium fra planter og jordpartikler.

Udvaskning af kationer

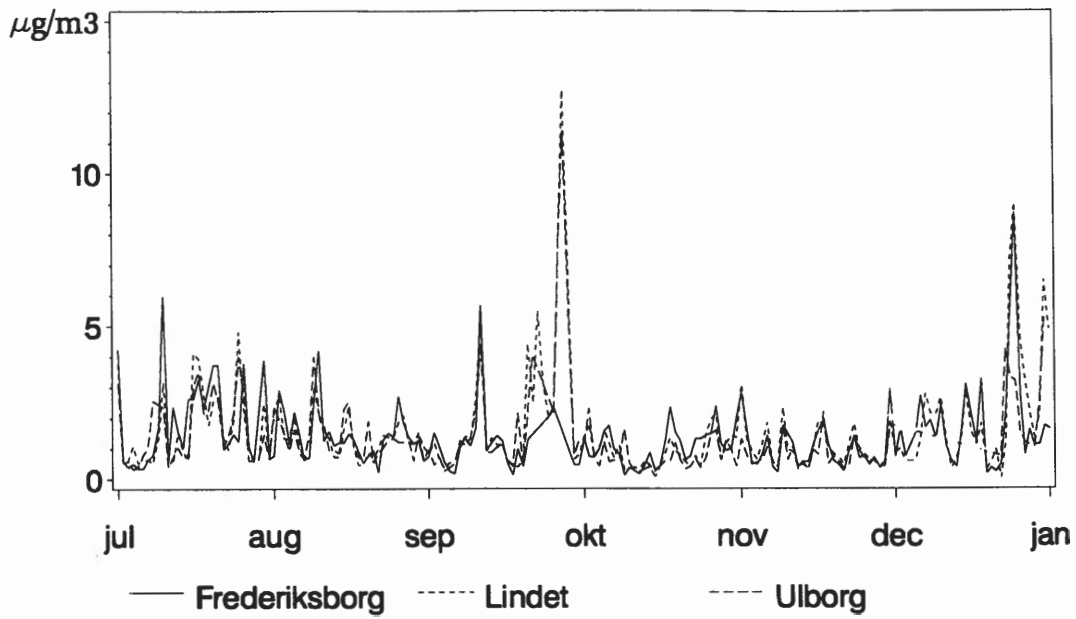
I de næringsfattige jorde på f.eks Ulborg Skovdistrikt vil der af mangel på ombyttelig kalcium og kalium istedet frigøres aluminium. SO₂-depositionen medfører forsuring, størrelsen af forsuringen afhænger af størrelsen af tørdepositionen. I forskningsprojektet "Udvidet ionbalance" er der gennemført prelimnære målinger af tør-depositionen af SO₂.

Tørdeposition

Koncentrationsmålinger af SO₂ på døgnbasis og registrering af meteorologiske og plantefysiologiske parametre vil muliggøre beregninger af den gennemsnitlige depositionshastighed pr. døgn af SO₂. I nærværende rapport foretages et estimat af SO₂-depositionen ud fra oplysninger om den gennemsnitlige tørdepositionshastighed og årsgennemsnittet af SO₂-koncentrationen, se *tabel 3*.

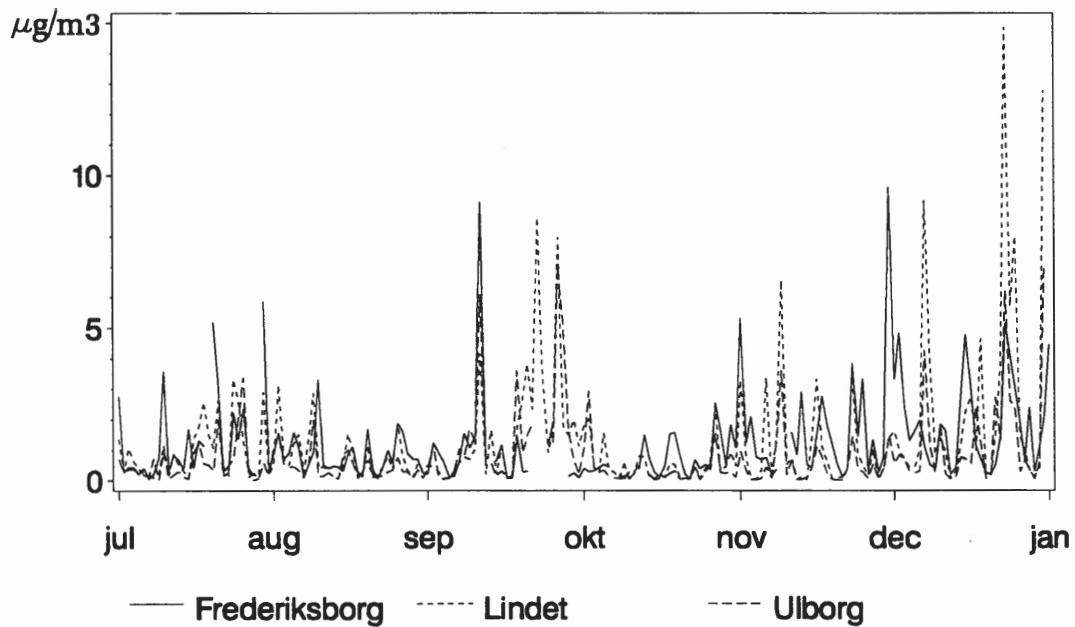
SO₄²⁻ - S Døgnværdier i 1992

Skovstationer



SO₂ - S døgnværdier i 1992

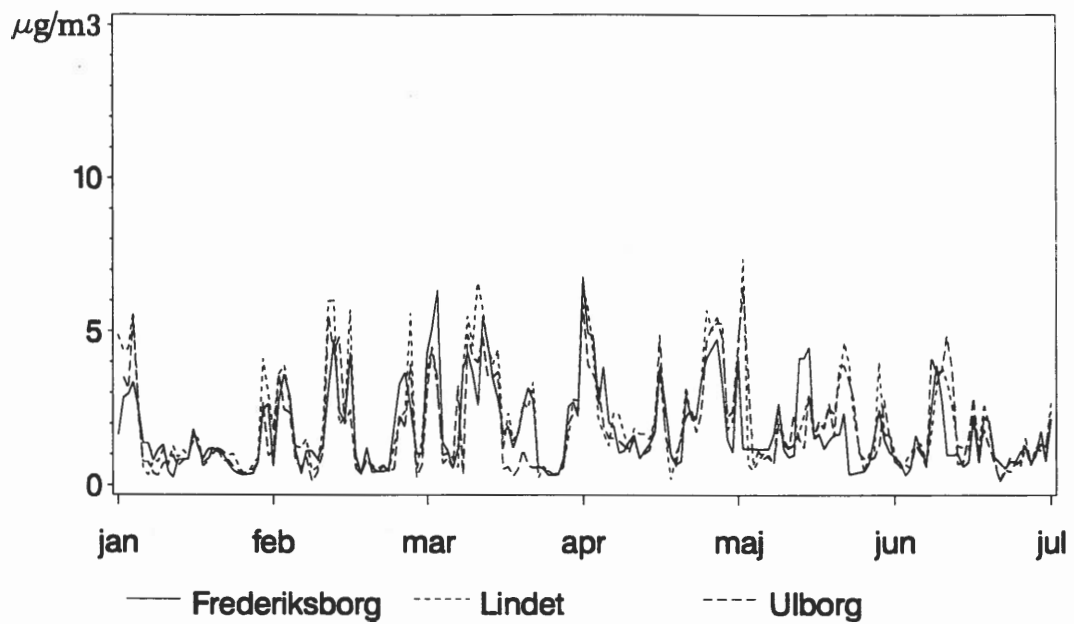
Skovstationer



Figur 10. Atmosfærisk koncentration af partikelbundet sulfat (øverst) og svovldioxid (nederst) målt på Ulborg, Lindet og Frederiksborg målt i sidste halvdel af 1992.

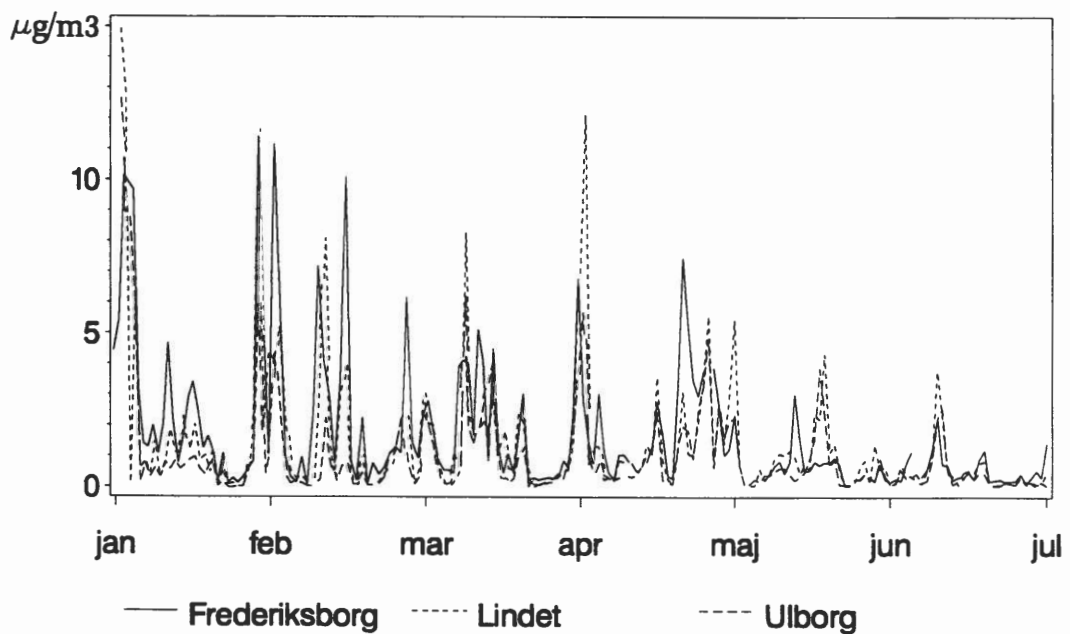
SO₄²⁻ - S Døgnværdier i 1993

Skovstationer



SO₂ - S døgnværdier i 1993

Skovstationer

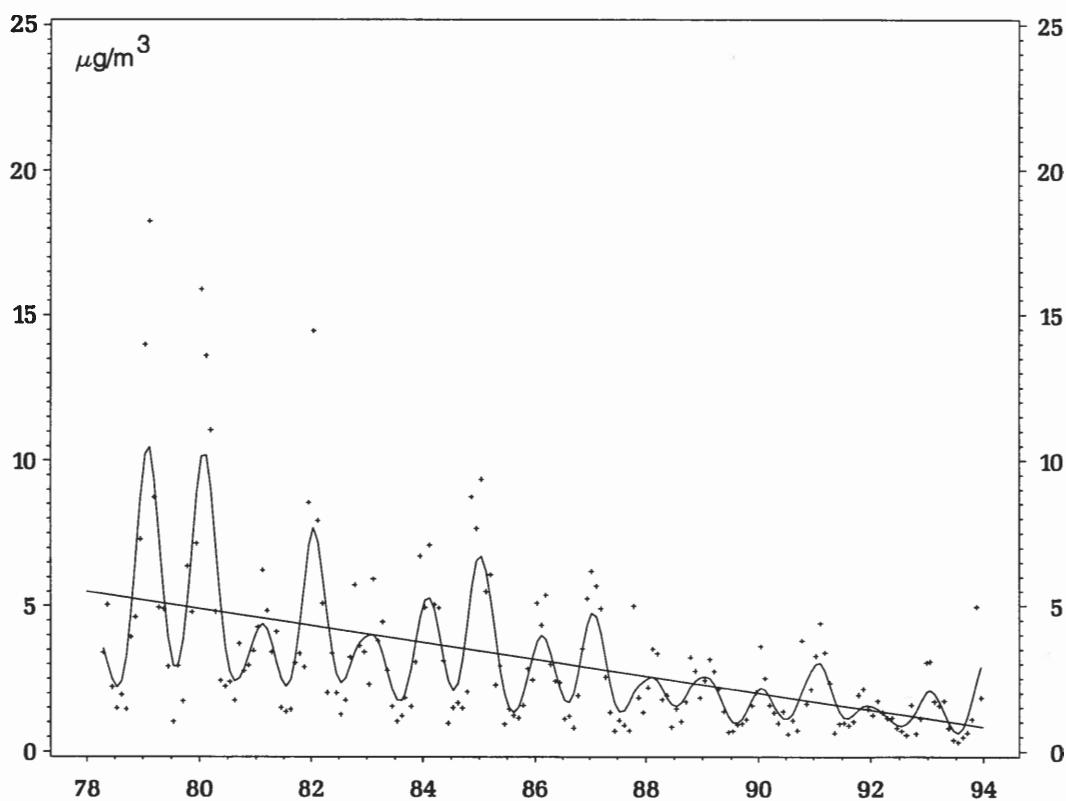


Figur 11. Atmosfærisk koncentration af partikelbundet sulfat (øverst) og svovldioxid (nederst) målt på Ulborg, Lindet og Frederiksborg målt i første halvdel af 1993.

Tidsudvikling i SO_2 koncentrationer

SO_2 koncentrationen i dansk baggrundsatmosfære er faldet meget igennem de sidste 15 år. Dette fremgår af målinger på den Midtjyske målestation på Tange *figur 12*. Værdierne er delvis rapporteret af Heidam (1986). De indlagte værdier er månedsmiddelværdier, ved hjælp af et udglatningsprogram bliver en årstidsvariation sandsynliggjort. Den bølgede linie viser at de højeste gennemsnitsværdier ligger om vinteren. Ved yderligere udglatning fremkommer en kurve der viser forløbet over flere år. Sulfat koncentrationen målt som partikler i atmosfæren, har tilsyneladende ikke ændret sig ret meget gennem årene, kvartalsgennemsnit er vist i *bilag IV*.

SO_2 – S månedsmiddel målt på Tange



Figur 12. Udviklingen af SO_2 koncentrationen i atmosfæren målt i Midtjylland (Tange) i perioden 1978 til 1992.

Våddeposition

Våddepositionen af sulfat for 1992/93 er vist i *tabel 4*. I tabellen er angivet sulfat og sulfat minus bidrag fra havsaltaerosoler. Denne korrigerede fraktion anses for at være lig med den industrielt emitterede andel af sulfatdepositionen. Havsalt aerosolernes bidrag til sulfatnedfaldet er størst på de vestjyske stationer. De kvartalsvise sulfatdepositioner er vist i *bilag V*.

Tidsudvikling i våddepositionen

Udviklingen i den havsaltkorrigerede sulfatdeposition fra 1985 til 1993 er vist i *figur 13*. Både på Ulborg og Frederiksborg synes der at være en tendens til en nedgang i våddepositionen af sulfat. Det sidste år i rækken af observationer (92/93) synes at være særlig lav. Variationen fra år til år gør det nødvendigt at foretage sammenligningen over flere år. Den store nedgang i SO_2 koncentrationen (*figur 12*) der er konstateret fra slutningen af halvfjerserne til begyndelse af firserne synes nu også at kunne spores i en nedgang i våddepositionen af sulfat. Der ses også en nedgang i depositionen af stærk syre (H^+) (*se figur 14*) men variationen fra år til år er meget stor.

Gennemdryp

Måling af sulfat i dryp fra træerne (throughfall) giver et omtrentligt billede af summen af svovldeposition fra svovldioxid, sulfat på partikler og sulfat i nedbør, idet svovl kun i ringe grad indgår i træernes stofomsætning. Dog må man påregne at træerne optager SO_2 via spalteåbningerne, ligesom nålene ved regnafvaskning kan afgive sulfat, der stammer fra rodoptaget sulfat. Den samlede virkning af dette optag er tildels ukendt, men kan ifølge analyser af plantevæv antages at være mindre end 10% af det samlede sulfatflux. Værdierne for sulfatflux via gennemdryp er for 1992/93 opgjort i *tabel 5*. I tabellen skelnes mellem total sulfat og sulfat korrigeret for havsalt bidrag. Havsaltspartikler der "blæser" ind over de vestjyske skove indeholder sulfat, men denne sulfat bidrager ikke direkte til forsurenningen således som industrielt emitteret SO_2 .

Af *Tabel 5* fremgår det, at drypværdierne af NO_3^- og SO_4^{2-} er større på Frederiksborg end på de øvrige stationer. Det afspejler en større tørdeposition af SO_2 , NO_2 og HNO_3 på denne station. De større værdier for NH_4^+ i dryp på de jyske stationer er en følge af NH_3 -depositionen i disse områder.

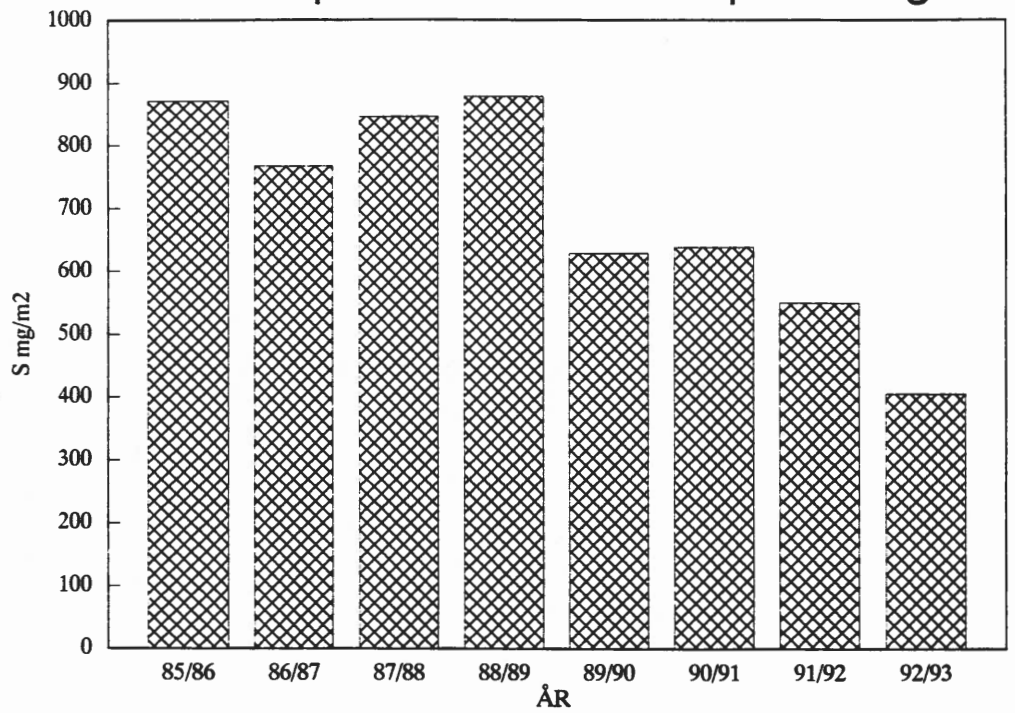
Tidsudvikling i gennemdryp

Der kan konstateres en tidsudvikling i gennemdryppet af sulfat, med faldende mængder fra 1985 til 1993. Dette er en følge af nedgangen i SO_2 -koncentrationen og i våddepositionen af sulfat. En nærmere gennemgang af den statistiske behandling er beskrevet et andet sted (Hovmand et al., 1995). En regressionsanalyse af foreliggende data viser at den gennemsnitlige nedgang i svovldepositionen, målt som gennemdryp, over en 8-årig periode er

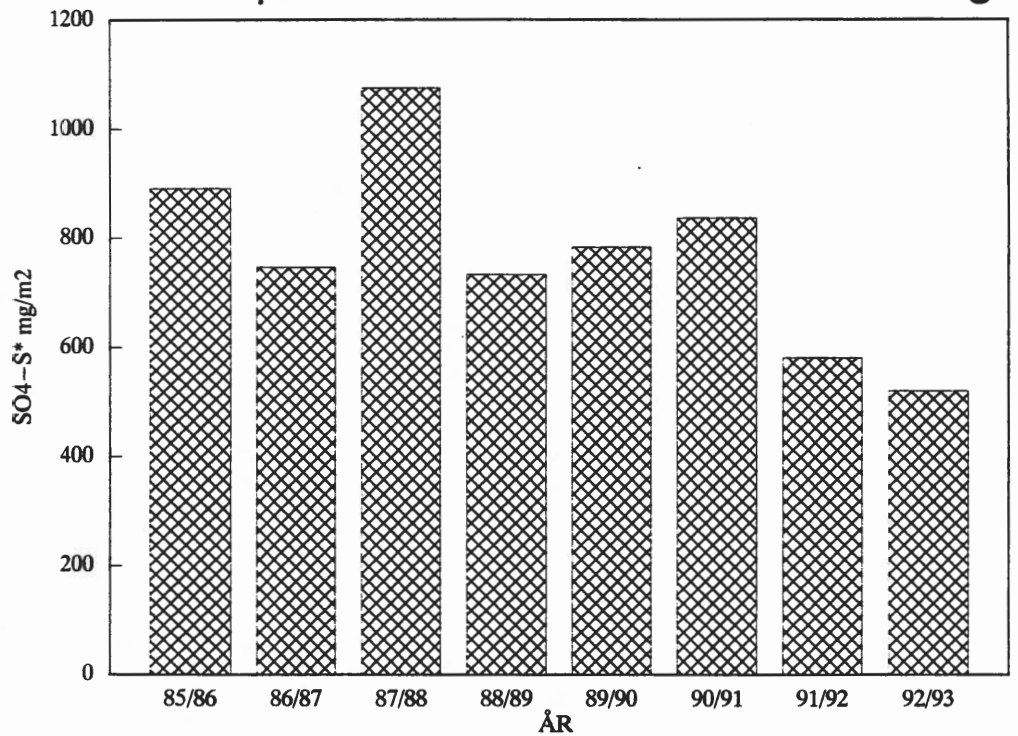
0,10 g S/m₂ pr. år i Ulborg (R=0,9) og 0,11 g S/m₂ pr. år i Frederiksborg (R=0,7) hvor R angiver korrelationskoefficienten for 8 observationer.

Selv om nedgangen i svovldepositionen synes veldokumenteret, så er variationen fra år til år betydelig. Ændringen i depositionsraten kan endnu ikke bestemmes med større nøjagtighed. Især det forhold at måleåret 1992/93 regnet fra 1. juni giver så lave værdier for svovl- og nitrogen-deposition påvirker statistikken.

Våddeposition af SO₄-S* på Ulborg

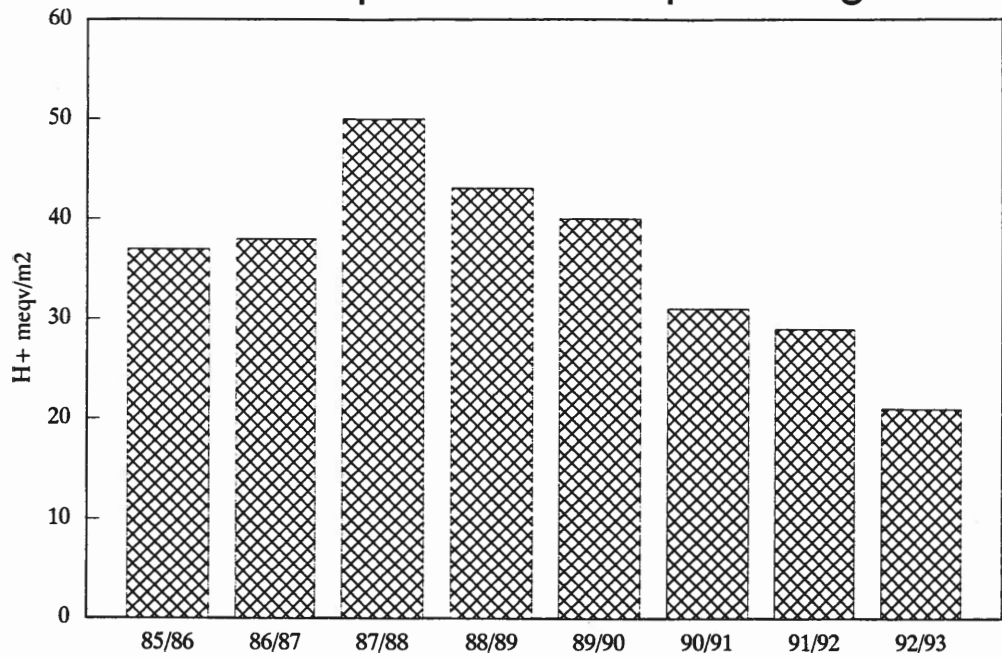


Våddeposition af SO₄-S* i Frederiksborg

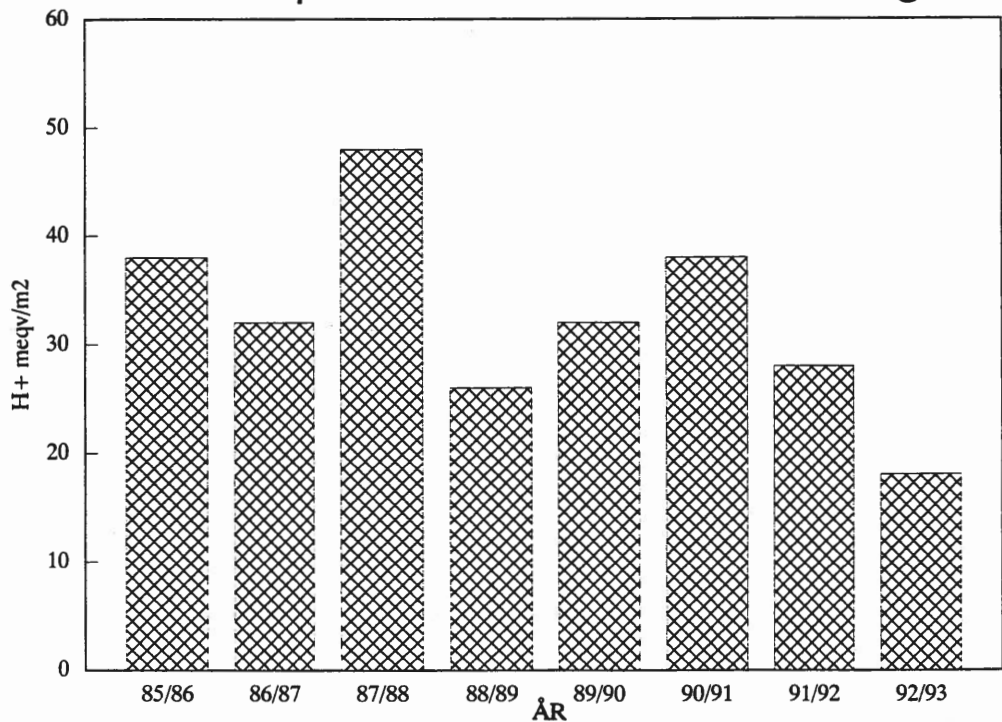


Figur 13. Våddeposition af sulfat-svovl korrigeret for havaerosolbidrag, årssum regnet fra 1/6 til 31/5, målt på Ulborg og Frederiksborg i perioden 1985 til 1993.

Våddeposition af H⁺ på Ulborg



Våddeposition af H⁺ i Frederiksborg



Figur 14. Våddeposition af brintioner (stærk syre), årssum regnet fra 1/6 til 31/5, målt på Ulborg og Frederiksborg i perioden 1985 til 1993.

6 Våd- og tørdeposition af svovl- og kvælstofforbindelser sammenholdt med gennemdrypsværdier.

I dette afsnit sammenholdes den totale deposition, bestemt ud fra våd- og tørdepositionen, med gennemdrypsværdien fra de tre lokaliteter.

Svovldepositionen er opgjort på to måder i perioden 1992/93, dels som summen af tørdeposition og våddeposition, dels som gennemdryp af sulfat. Tørdepositionen er estimeret ud fra koncentrationsmålinger i *tabel 3*, våddepositionen af sulfat-svovl og uorganiske nitrogenforbindelser, er opgjort i *tabel 4*. Summen af tør- og våddepositionen er gengivet i *tabel 6*. Gennemdryp af sulfat-svovl anses for et udtryk for svovldepositionen. Gennemdrypsværdier fra de fire rødgran parceller gengivet i *tabel 5* er også vist i *tabel 6*, således at en sammenligning er umiddelbart mulig.

Tabel 6. Våd- og tørdeposition af svovl- og kvælstof samt gennemdrypsværdier for sulfat-svovl og uorganiske kvælstofforbindelser for perioden 1992/93. Drypmålinger på Ulborg omfatter ung og gammel rødgran (værdierne er afrundede). Svovl* er havaerosol korrigeret.

Station	Ulborg		Frederiksborg	Lindet
	Ung	Gammel		
Stof	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²	mg/m ²
<i>Svovl*</i>				
- Våd+tørdep.	800	800	1100	1100
- Dryp	1000	1100	1600	1300
<i>Kvælstof</i>				
- Våd+tørdep.	2200	2200	2100	4300
- Dryp	1700	1400	1900	2400

Som det fremgår af tabellen, er der en betydelig forskel mellem våd- og tørdepositions værdierne og værdierne for dryp. Dette er tilfældet både for svovl og nitrogen, for svovl er våd- og tørdepositionen mindre end gennemdrypsværdien, mens det modsatte er tilfældet for kvælstof.

Estimaterne for tørdeposition af svovl er sandsynligvis for små, fordi depositions-hastigheden er sat for lavt især for svovldioxid, men muligvis også for sulfatpartikler.

Kvælstofdeposition

Træerne optager kvælstofforbindelser der deponeres på nåleoverfladerne. Dette vil formentlig formindske indholdet af uorganisk kvælstof målt i gennedryppet og dermed bliver gennedryp som estimat for kvælstofdeposition for lavt. Kvælstofoptaget fra nåleoverfladerne kan dog ikke alene forklare den store forskel mellem tør- og våddepositionsestimatet og gennedrypsværdien. Estimerne for tørdeposition af kvælstofdeposition er sandsynligvis for store for ammoniak-depositionens vedkommende. Igangværende undersøgelser tyder på en reemission af ammoniak fra skoven efter en periode med stor ammoniak-deposition (upubliceret materiale). Ammoniak-koncentrationen har været ca 50% højere i 1992/93 end de tidligere år, hvilket i sig selv forøger muligheden for reemission.

7 Basekationer

Plantenæringsstof

Basekationerne calcium, kalium, magnesium og natrium findes i jorden både i plantetilgængelig og planteutilgængelig form. Planterne forsyner sig via rodoptag fra disse lagre af plantenæringsstoffer. Set i relation til de næringsfattige vestjyske jorde er forsyningen med ovennævnte plantenæringsstoffer til skovvæksten ofte utilstrækkelige. Tilførslen af atmosfæretransporterede syrer og syredannende forbindelser bidrager til fjernelsen af basekationer fra overjorden. Endelig fastlægges basekationer i træmasse og i nedfaldne nåle (førn), hvilket permanent eller midlertidigt fjerner basekationerne fra økosystemets stofcirkulation.

Atmosfærisk deposition

Den atmosfæriske depositions rolle i basekation cirkulationen er foruden den i forrige afsnit nævnte udvaskning, at atmosfæren tilføres basekationer. Der er principielt tre kilder til basekationer i atmosfæren: Industrielt emitterede partikler, jordstøvpartikler og havaerosoler.

Havsaltaerosolernes påvirkning af skoven

For det vestjyske plantageområde er det formentlig havaerosolerne, der har den største betydning, idet der især tilføres magnesium, kalium og calcium via havaerosoler, se næste afsnit. Jordstøv synes ikke at have den store betydning, bortset fra skovenes randzone, hvor næringsholdigt jordstøv fra nabomarkerne kan fyge ind. Det er i øvrigt vanskeligt at kvantificere jordstøvbidraget. Finpartikulært materiale stammer især fra industrielle emissioner, deposition af denne partikelfraktion betyder kvantitativ kun ret lidt, idet depositions hastigheden af disse aerosoler er lille.

Tilførslen af havaerosoler sker dels ved direkte tørdeposition i forbindelse med storm episoder, dels med nedbøren. Tørdepositionen er betydelig i kystegnene, mens salttilførslen med nedbør er mere jævnt fordelt over landet. I perioden 1992/93 faldt den største del af saltdepositionen i vintermånederne november og januar. Det samlede saltnedfald var på niveau med de forrige år. *Tabel 7* viser mængden af kationerne natrium, magnesium, kalium og calcium der tilføres bevoksningerne via deposition af havsalt. I hvor høj grad træerne evner at udnytte disse plantenæringsstoffer er endnu uvist. Træerne er ikke aktive i vintermånederne og den store salttilførsel kan meget vel transporteres videre ned gennem jorden med overskudsnedbøren.

Tabel 7. Gennemdryp af elementer tilført med havaerosoler og nedbør opsamlet under rødgran på Ulborg, Frederiksborg og Lindet i perioden 1/6-1992 til 31/5-1993. * andel hidrørende fra deposition af havsalt.

Station		Ulborg	Frederiksborg	Lindet
Stof	Enhed			
Na	g/m ²	7,8	3,5	6,6
Mg*	mg/m ²	976	528	854
K*	mg/m ²	306	134	268
Ca*	mg/m ²	291	128	255

8 Sammenfatning og konklusion

Atmosfærisk deposition på skov har i projektet "Ionbalance i skovsystemer" været målt siden 1985. Med nærværende rapport fremlægges der tal for en 8 årig periode, samt i større detaljer for perioden 1992/93.

Målestationerne Ulborg i Vestjylland og Frederiksborg i Nordsjælland har siden 1985 haft et måleprogram omfattende ozon, svovldioxid (SO_2), kvælstofholdige gasser nitrogendioxid og ammoniak (NO_2 , NH_3), aerosoler og nedbørskemi. Sammen med stationen på Lindet, der blev oprettet i 1988, er det nogle af de få europæiske stationer, hvor der kontinuert gennemføres atmosfærekemiske målinger koordineret med målinger af jordvandskemi, forskellige jordparametre, trætilvækst og trækemi.

Undersøgelses arealerne

Undersøgelsesarealerne på Ulborg og Frederiksborg er yderpunkter både med hensyn til jordbundsforhold, atmosfærisk deposition og geografisk afstand inden for Danmark.

Parcellerne på Frederiksborg stationen er kendetegnet af stort lerindhold i jorden og en deraf følgende høj vandkapacitet i jorden. Disse forhold giver en høj jordbonitet og en stor trætilvækst. Samtidig er der på Frederiksborg målt den højeste svovldeposition, især i form af tørdeponeret SO_2 og en høj deposition af NO_2 . Målingen af gennemdryp fra træerne (dryp depositionen) bekræfter i nogen grad den høje deposition, idet sulfat (SO_4^{2-}) og nitrat (NO_3^-) i dryp er noget højere end målt på Ulborg arealet. Syretilførslen til bevoksningen er også størst i Frederiksborg, hvilket afspejles i protonindholdet i gennemdryppet.

Parcellerne på Ulborg er kendetegnet ved et lille lerindhold i jorden og et tilsvarende stort sandindhold, dette medfører en lav vandkapacitet i jorden, et ringe indhold af plantenæringsstoffer udtrykt i en lav bonitet. Parcellerne på Lindet minder jordbunds-mæssigt om Ulborg.

Havsalt tilførsel via atmosfæren

De vestjyske arealer har en stor tilførsel af havsalt, hvilket både ses på nedbørsprøverne og gennemdrypsprøverne. Havsalt kan have en afsvidende virkning, men med havsalt tilføres skovøkosystemet også vigtige plantenæringsstoffer som kalium, magnesium og kalcium. Størrelsen af denne tilførsel kan indirekte aflæses ved måling af natrium (Na^+) og klorid (Cl^-) indholdet i gennemdryp fra bevoksningerne. Gennemdryp fra træerne af disse stoffer indeholder både tørdeposition (partikler) og våddeposition (nedbør).

Svovl og kvælstof

På Ulborg og Lindet i Vestdanmark er depositionen af svovl (non marin) og af oxiderede kvælstofforbindelser mindre end på Frederiksborg i Østdanmark, til gengæld er depositionen af reducerede kvælstofforbindelser som ammoniak større. Den større tilførsel af ammoniak medfører en større mængde ammonium samt en lavere mængde brintioner (højere pH) i gennemdryppet. Ammoniak depositionen er tydelig nok en funktion af afstanden til større ammoniak kilder, den største deposition ses på den sønderjyske station, Lindet. På Ulborg og Lindet er kvælstoftilførslen større end det skovøkosystemet kan forbruge. Dette medfører at kvælstof akkumuleres i jordens øvre lag med mulighed for senere udvaskning og forsuring til følge. En nøjagtig bestemmelse af kvælstofdepositionens størrelse er en forudsætning for at kunne vurdere, om den aktuelle kvælstofdeposition vil medføre ophobning af kvælstof i overjorden eller om den svarer til skovens forbrug.

Ozon

Ozon måles på Ulborg og Frederiksborg stationerne. I sommerhalvåret når ozon koncentrationen så høje niveauer, at det kan være skadeligt for planter. Niveauerne for ozon er lidt højere på Ulborg end på Frederiksborg, men på begge stationer overskrides 40 ppb-niveauet så ofte at grænseværdien for "excess ozone" er overskredet.

Udvikling i svovl depositionen

Der kan konstateres en tidsudvikling i atmosfærisk tilførsel af svovl og kvælstof til danske skove. Udviklingen er selvsagt svag over så relativt kort en periode som 8 år og eftervisningen kræver stor nøjagtighed i indsamling og analyse. Det er især depositionen af svovl, der viser en lille nedgang. En nedgang i luftens indhold af SO₂ har kunnet konstateres siden midten af 80'erne, men det er kun i de aller sidste år at der kan konstateres en nedgang i tør og våddepositionen af svovl. Nedgangen er på ca. 50% over en 8-årig periode fra 25 kg S pr. ha (2,5 g S/m², år) til 12 kg S pr. ha (1,2 g S/m², år).

Deposition af plantenæringsstoffer

Den atmosfæriske deposition har flere indvirkninger på skovøkosystemet. Dels kan depositionen virke forsurende på overjorden hvilket medfører en udvaskning af plantenæringsstoffer. Dels tilfører depositionen plantenæringsstoffer, især kvælstof og via havaerosoler desuden magnesium, kalium og lidt calcium. De sandede og næringsfattige jorde i Vestjylland er særlig udsat for udvaskning, men samtidig modtager de via atmosfæren store mængder kvælstof og havaerosoler. Balancen mellem input og output i disse systemer er meget skrøbelig og en løbende dokumentation af tilvækst i skoven og især atmosfærisk stoftilførsel er en væsentlig forudsætning for en langsigtet strategi for skovvækst. De internationale overenskomster om begrænsninger i svovlemissionen synes at medføre et mindre fald i svovldepositionen. Målinger på Ulborg og

medføre et mindre fald i svovldepositionen. Målinger på Ulborg og Frederiksborg over en 8 årig periode indicerer et sådant fald i depositionen.

Referencer

- Andersen, H.V.* (1994) Datarapport til SMP. Danmarks Miljøundersøgelser, DK-4000 Roskilde.
- Andersen, H.V., Hovmand, M.F., Hummelshøj, P., Jensen, N.O.* (1993): Measurements of Ammonia Flux to a Spruce Stand in Denmark. *Atmospheric Environment* 27A, 189-202.
- Andersen, H.V., Hovmand, M.F.*, (1994): Measurements of $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ by denuder and filterpack. *Atmospheric Environment* (in press).
- Asman, W.A.H., Sørensen, L-L., Berkowicz, R. Granby, K., Nielsen, H., Jensen, B., Runge, E.H., Lykkelund, C., Gryning, S-E., Sempreviva, A.M.* (1994): Processer for tørdeposition. Havforskning Nr. 35 fra: Miljøstyrelsen, DK-1401 København.
- Derwent, R.G., Grennfelt, P., Hov, Ø.*(1990): Photochemical oxidants in the atmosphere. IVL-Report. P.O.Box 47086. Gothenburg, Sweden.
- Heidam, N.Z.* (1986): DK-EMEP. Bulletin 1978-82. MST luft-A 102. Miljøstyrelsens luftforurenings laboratorium, DK-4000 Roskilde.
- Hovmand, M.F., Andersen, H.V., Bille-Hansen, J., Ro-Poulsen, H.* (1994): Atmosfærens stoftilførsel til danske skovøkosystemer. Faglig rapport nr. 98,: Danmarks Miljøundersøgelser, DK-4000 Roskilde.
- Hovmand, M.F., Grundahl, L.* (1991): Atmosfærisk nedfald af kvælstof forbindelser. Faglig rapport nr. 36: Danmarks Miljøundersøgelser, DK-4000 Roskilde.
- Hovmand, M.F., Grundahl, L., Runge, E.H. Kemp, K., Aistrup, W.* (1993): Atmosfærisk deposition af kvælstof og fosfor. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1992. Faglig rapport nr. 91: Danmarks Miljøundersøgelser, DK-4000 Roskilde.
- Hertel, O., Hovmand, M.F.* (1991): Rural Ozone measurement in Denmark, 1985-89. NERI Technical Report No. 35: Danmarks Miljøundersøgelser, DK-4000 Roskilde.
- Hovmand, M.F., Kemp, K.*, (1995): Sulphur Deposition to Danish Spruce Forest, 1985-1993. (in prep.)

Statens Forurensningstilsyn, Joranger, E., Tørseth, K, Pedersen, U. mfl.
(1993): Overvåkning av langtransportert forurenset luft og nedbør,
Årsrapport 1992 nr 533/93, Postboks 8100 DEP. 0032 Oslo 1.

Skärby, L. et al. (1994): Critical Levels for Tropospheric Ozone.
TemaNord 1994:592.

UNECE (1992): UNECE Workshop on Critical Levels, Background
Papers. Egham, UK March 1992.

UNCEC (1988): ECE Critical Levels Workshop, Bad Harzburg, FRG.
UNECE, Geneva, Swizerland.

Bilagsoversigt

Bilag I

Halvtimes gennemsnit af ozon

Bilag II

Våddeposition af uorganisk kvælstof målt ved bulk opsamling.

Bilag III

SO₂ koncentrationer udregnet som kvartals gennemsnit.

Bilag IV

Partikulære svovlkoncentrationer udregnet som kvartals gennemsnit.

Bilag V

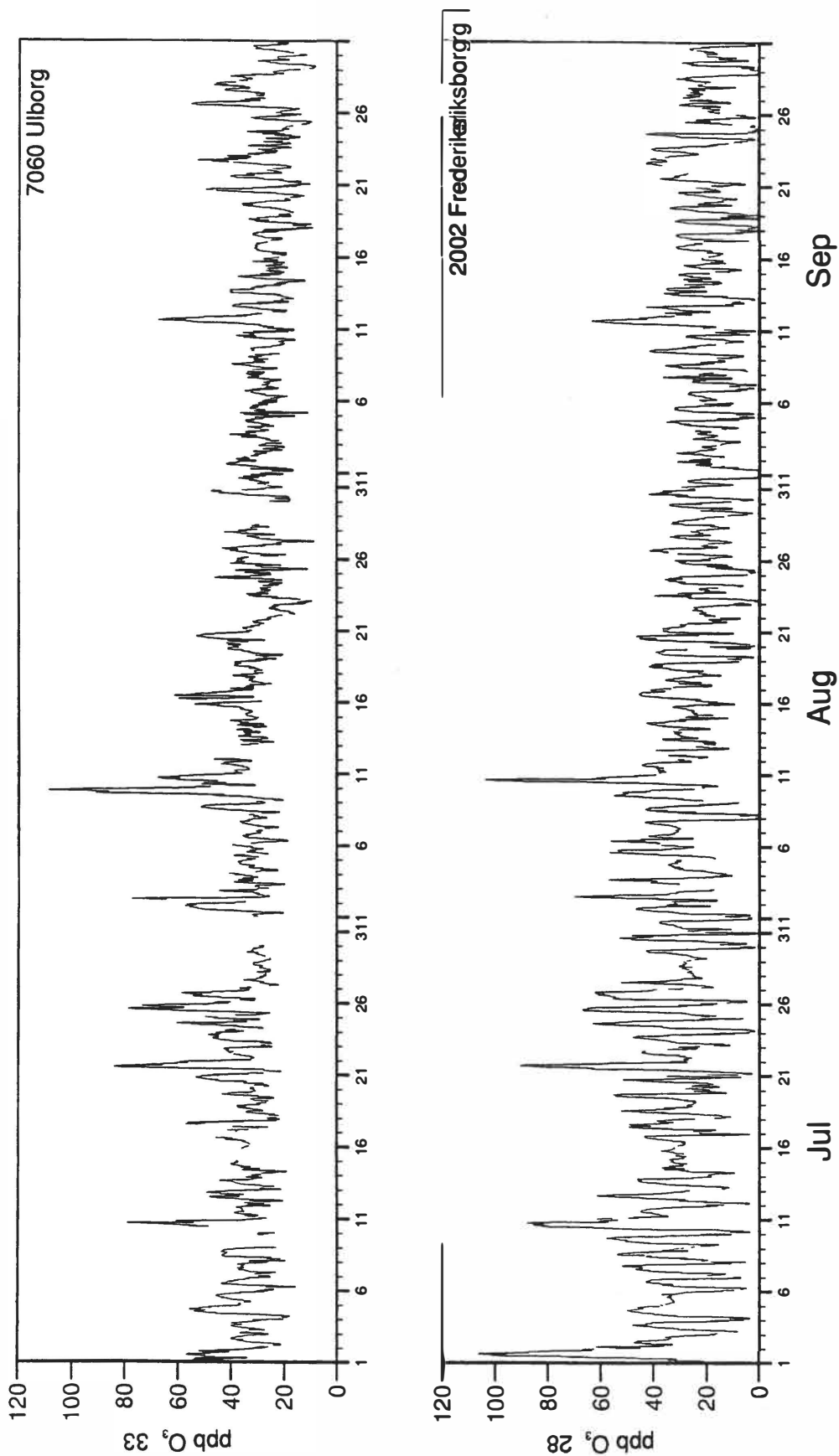
Våddepositionen af sulfat målt ved bulkopsamling. Kvartalssummer over en 5 årig periode.

Bilag I

Halvtimes gennemsnit af ozon

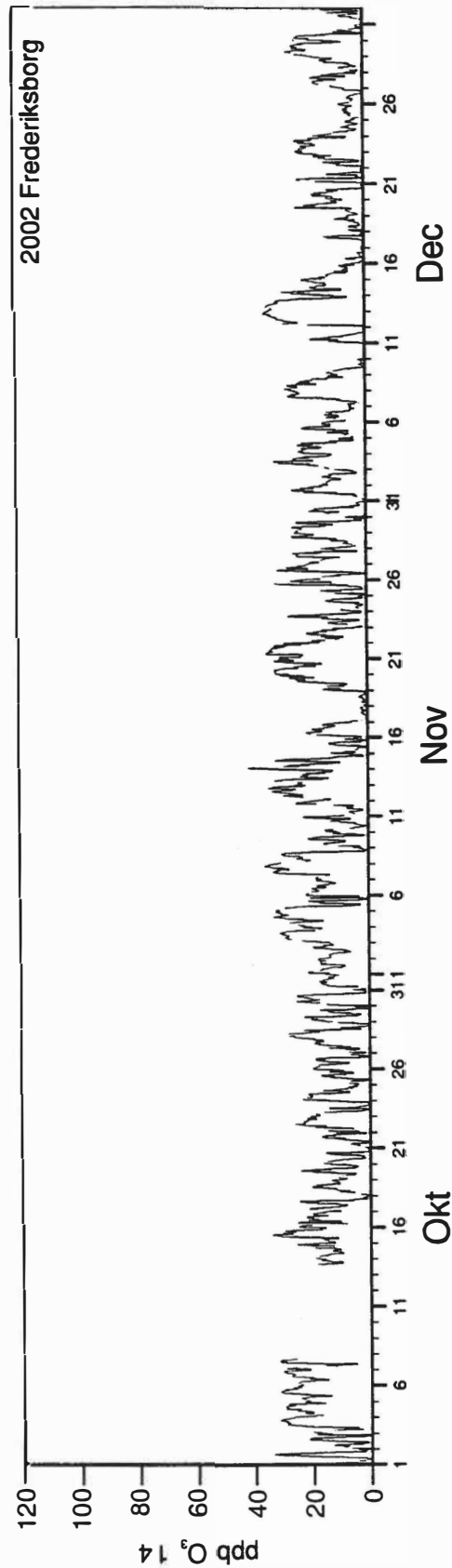
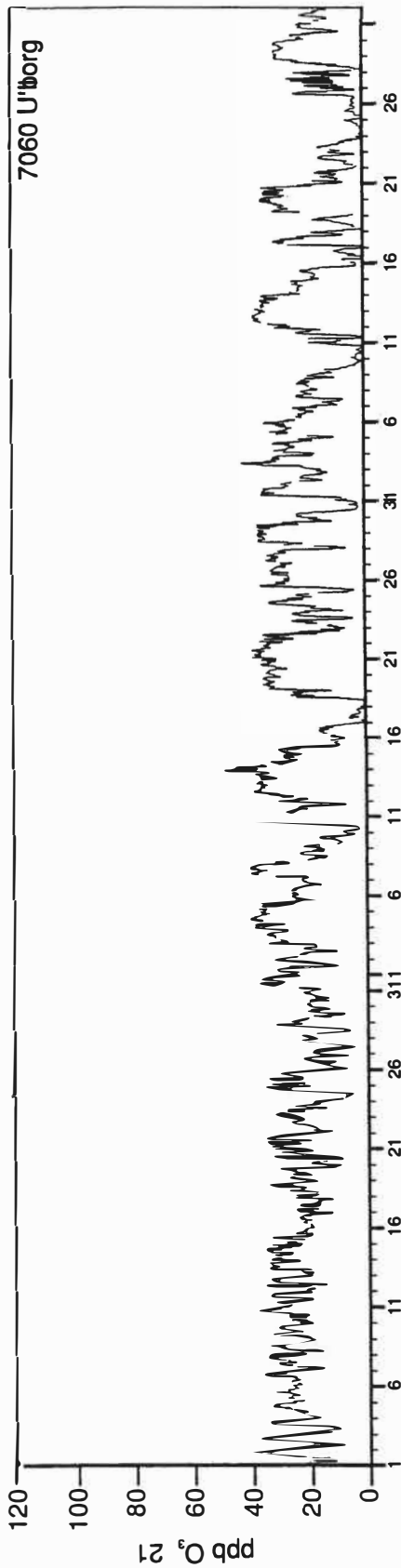
Halvtimesmiddelværdier for 920701-920930

Endelige data



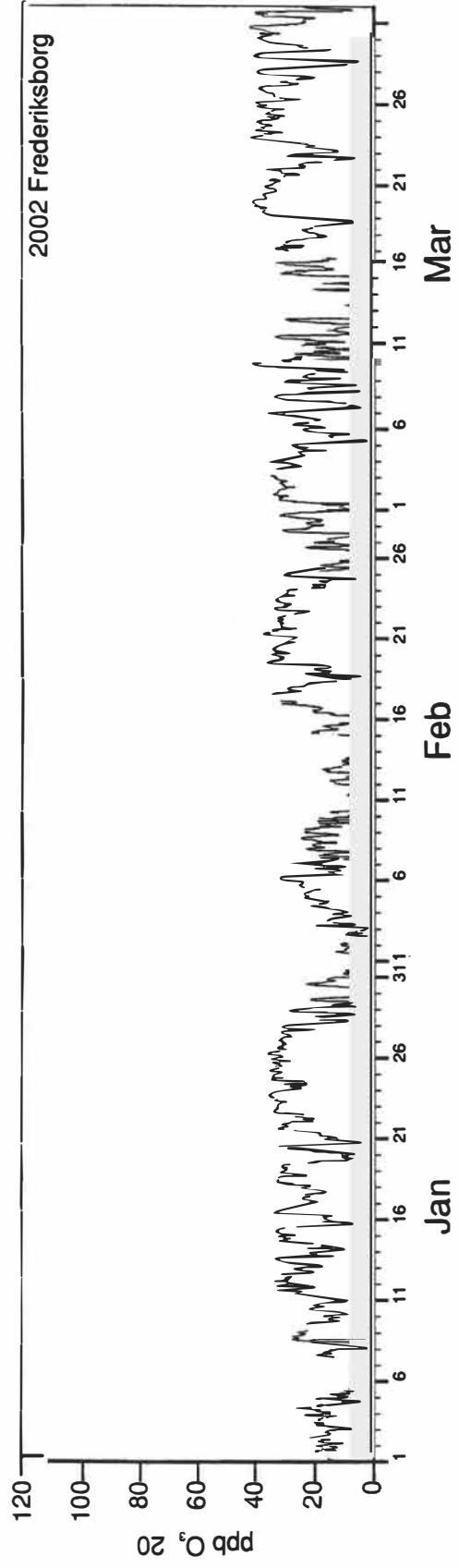
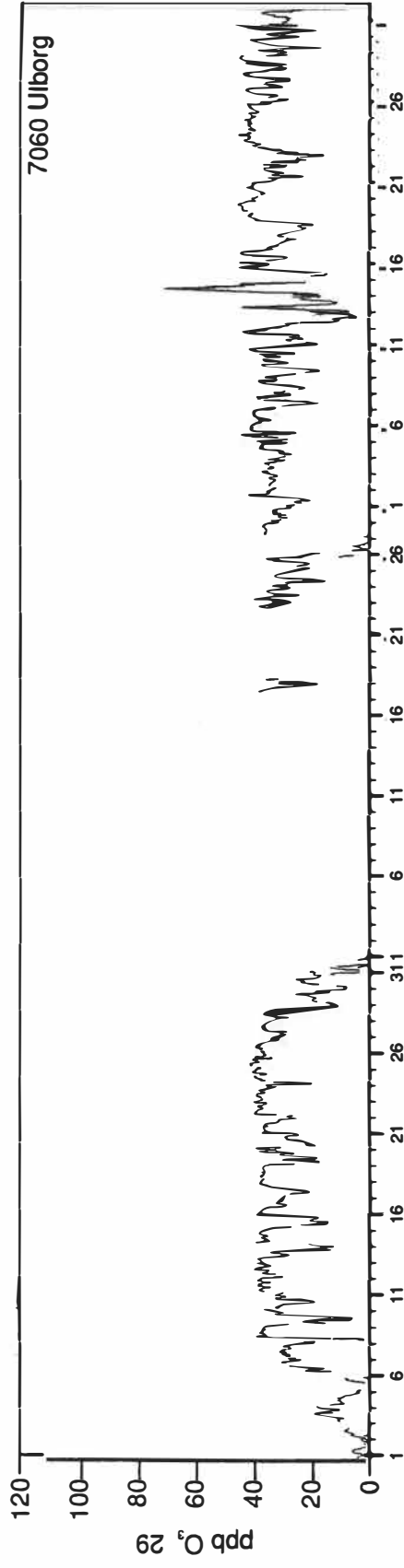
Halvtimesmiddelværdier for 921001-921231

Endelige data



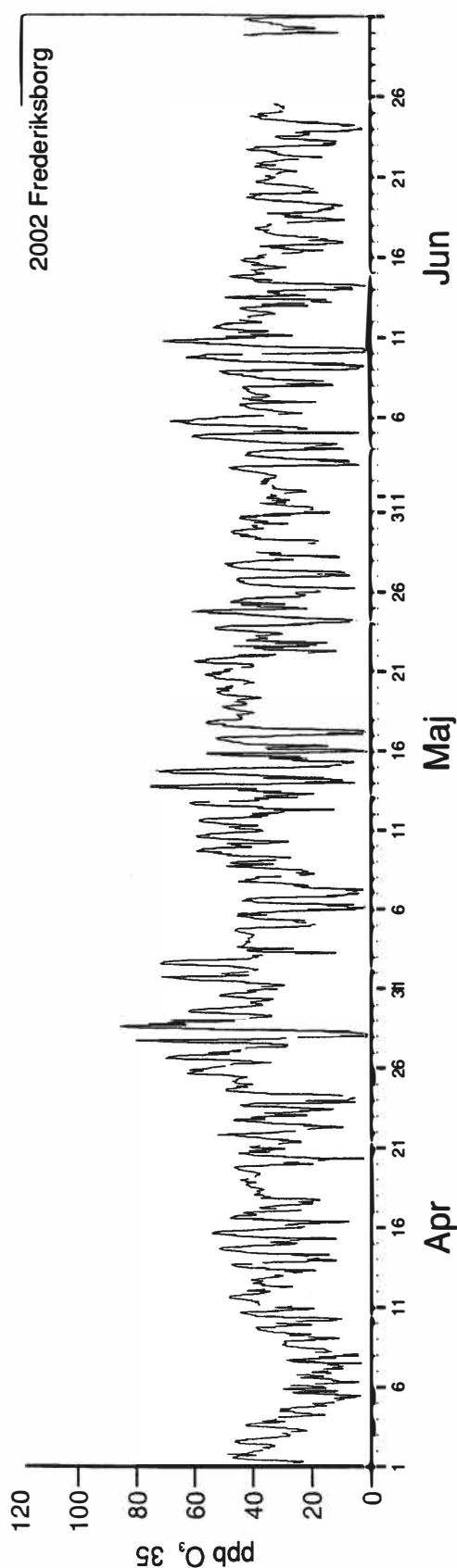
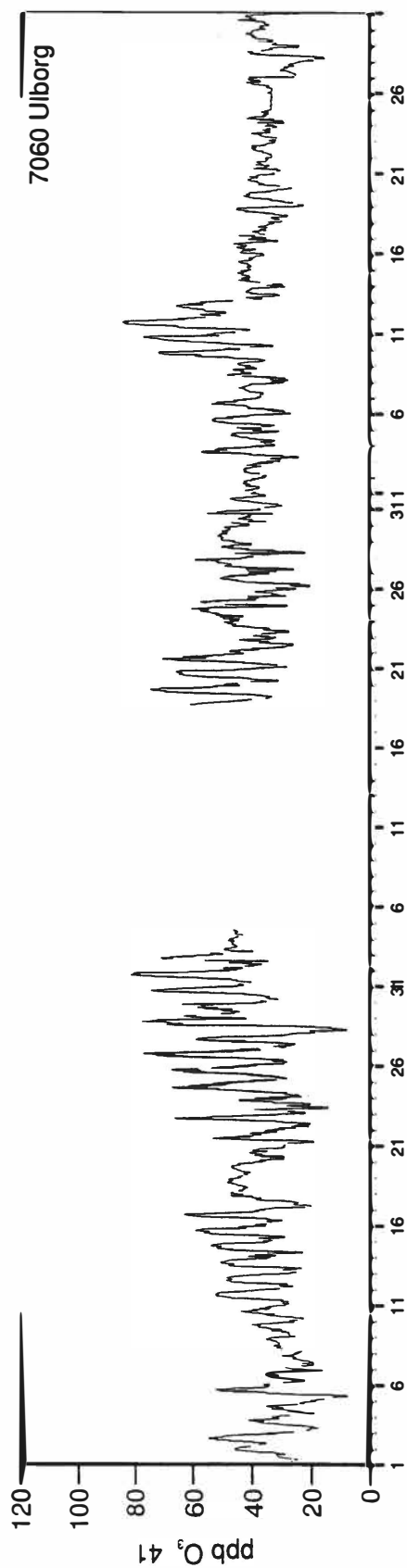
Halvtimesmiddelværdier for 930101-930331

Endelige data



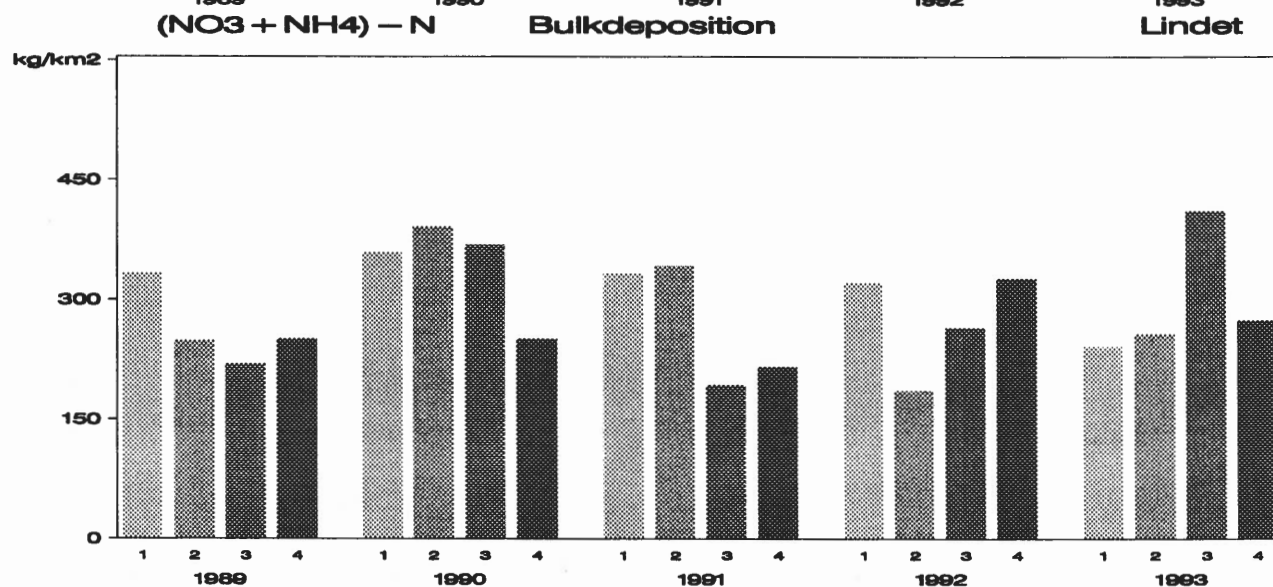
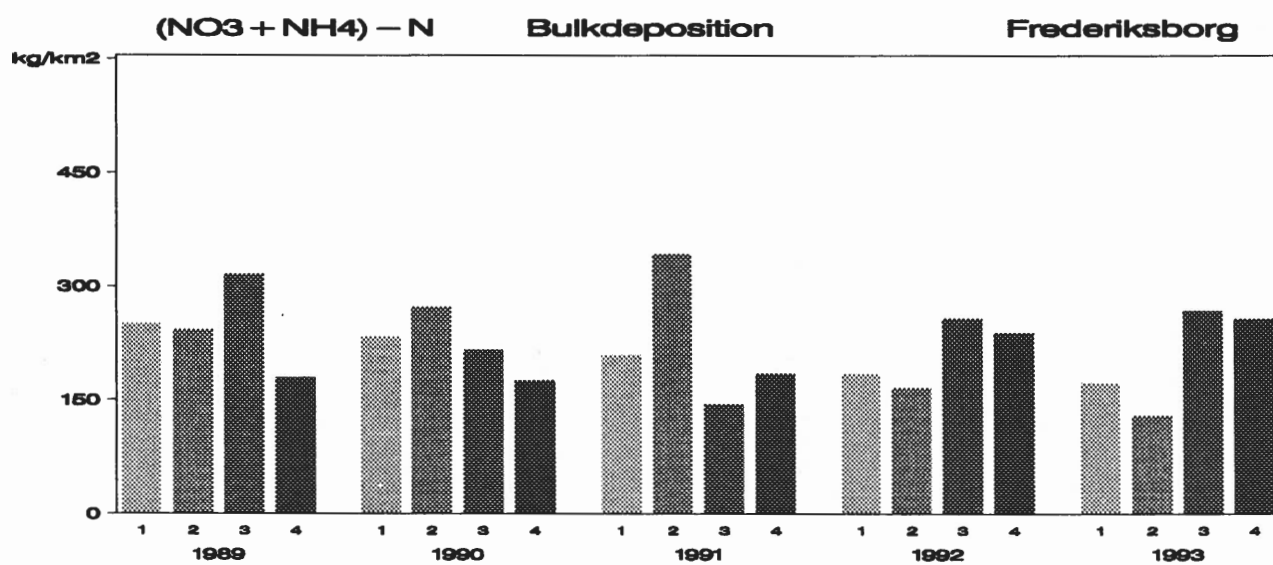
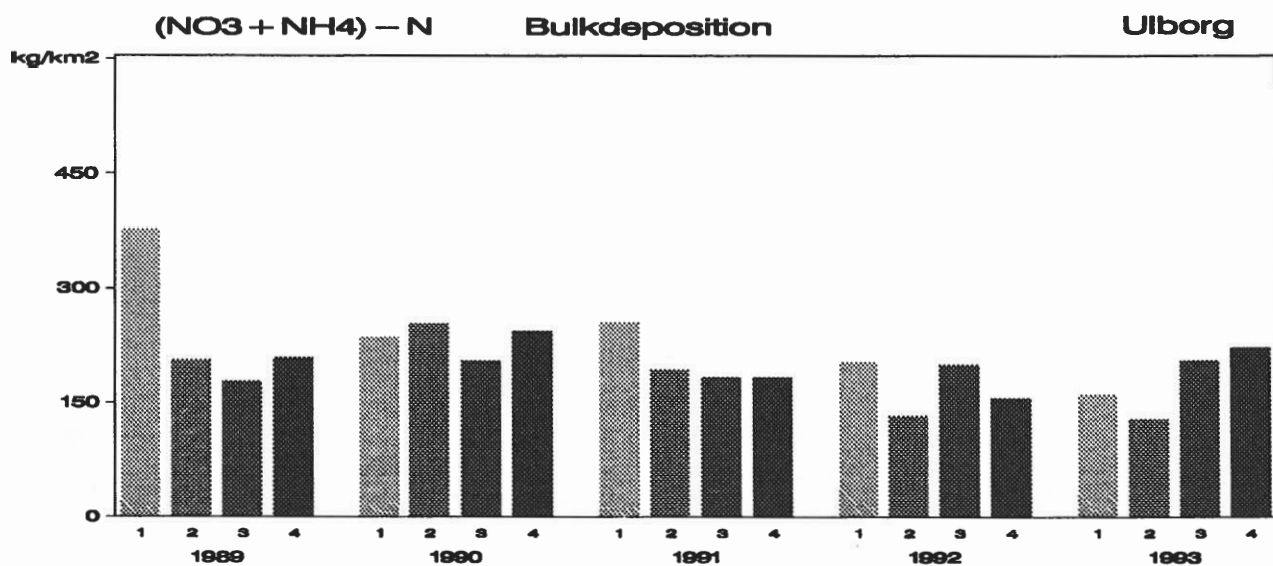
Halvtimesmiddelværdier for 930401-930630

Endelige data



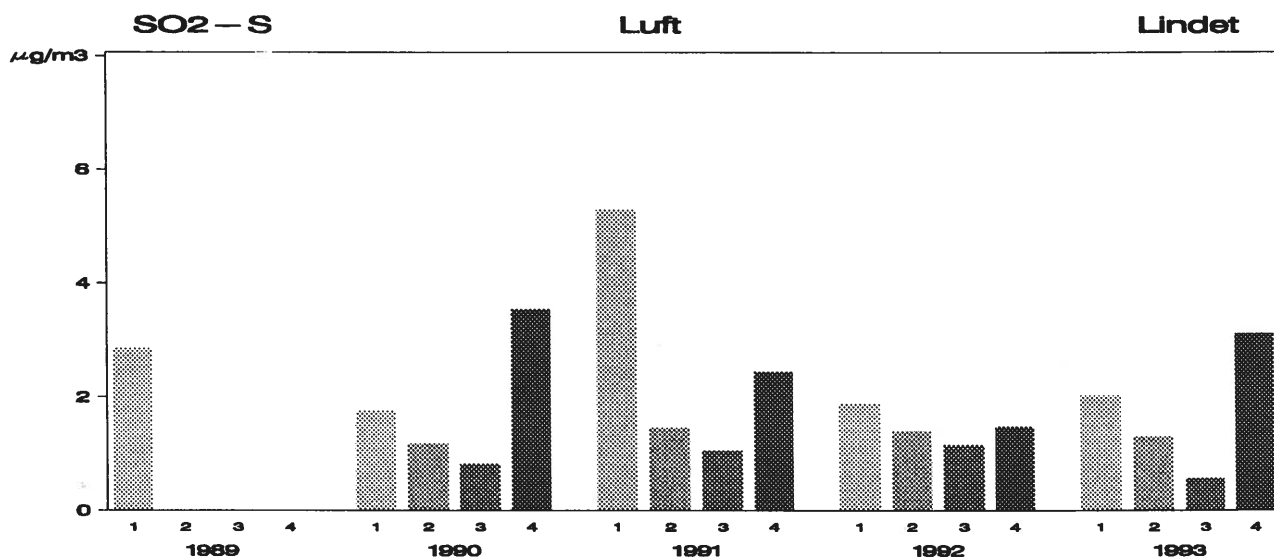
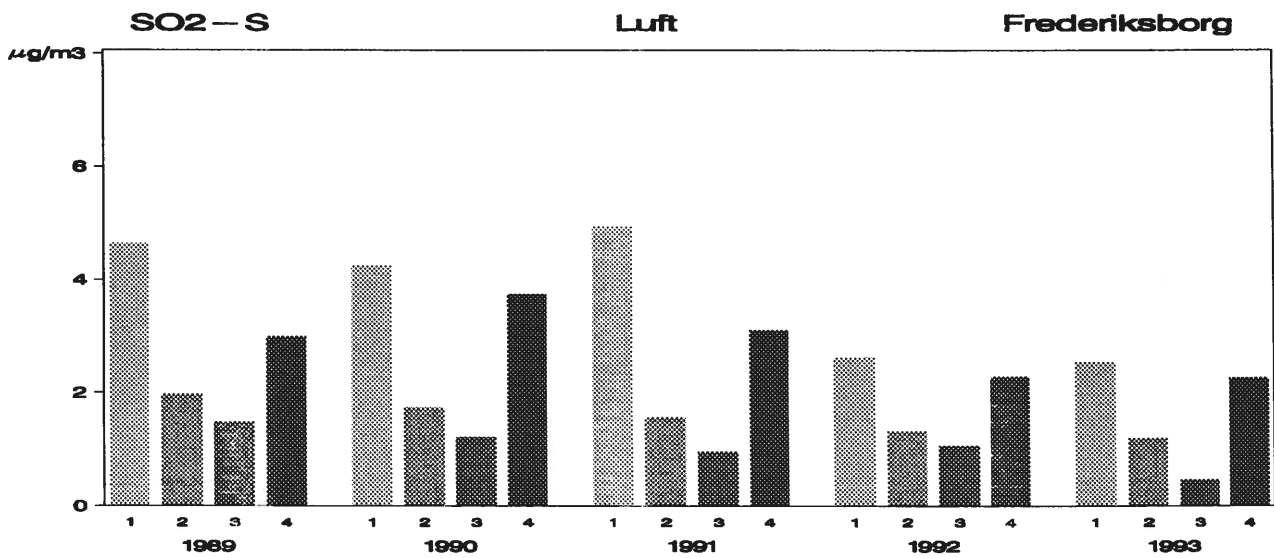
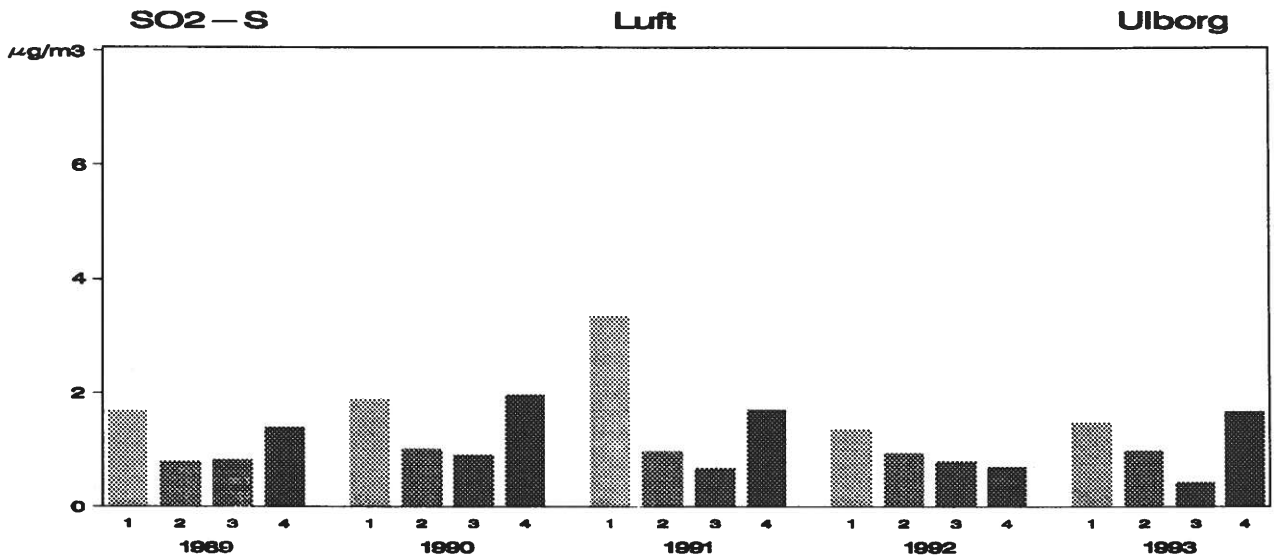
Bilag II

Våddeposition af uorganisk kvælstof målt ved bulk opsamling.



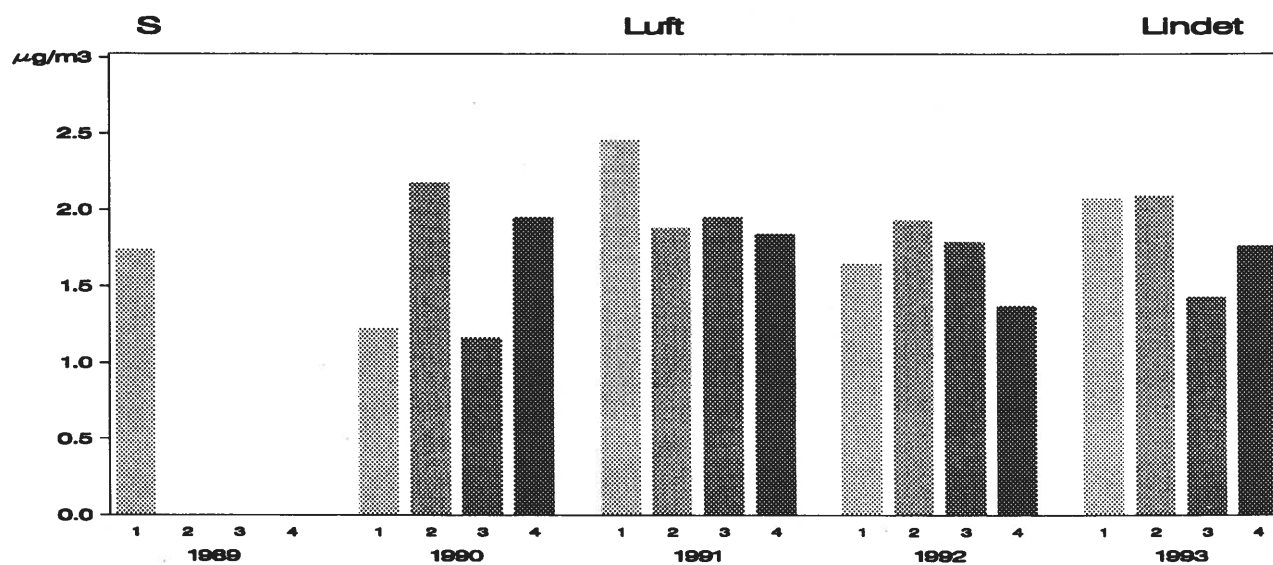
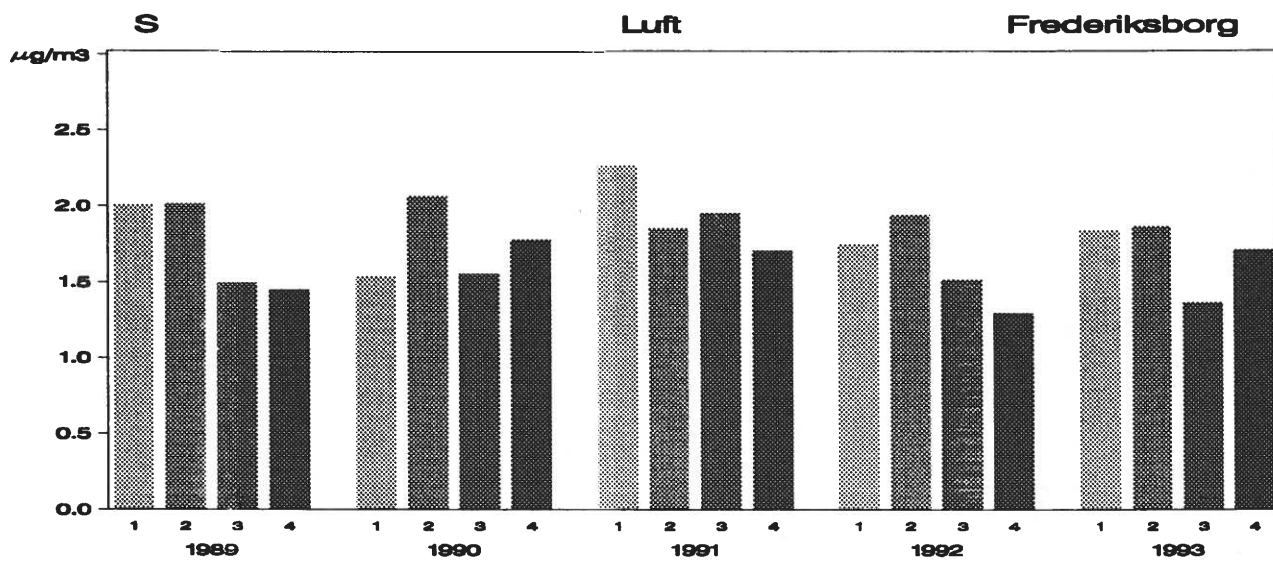
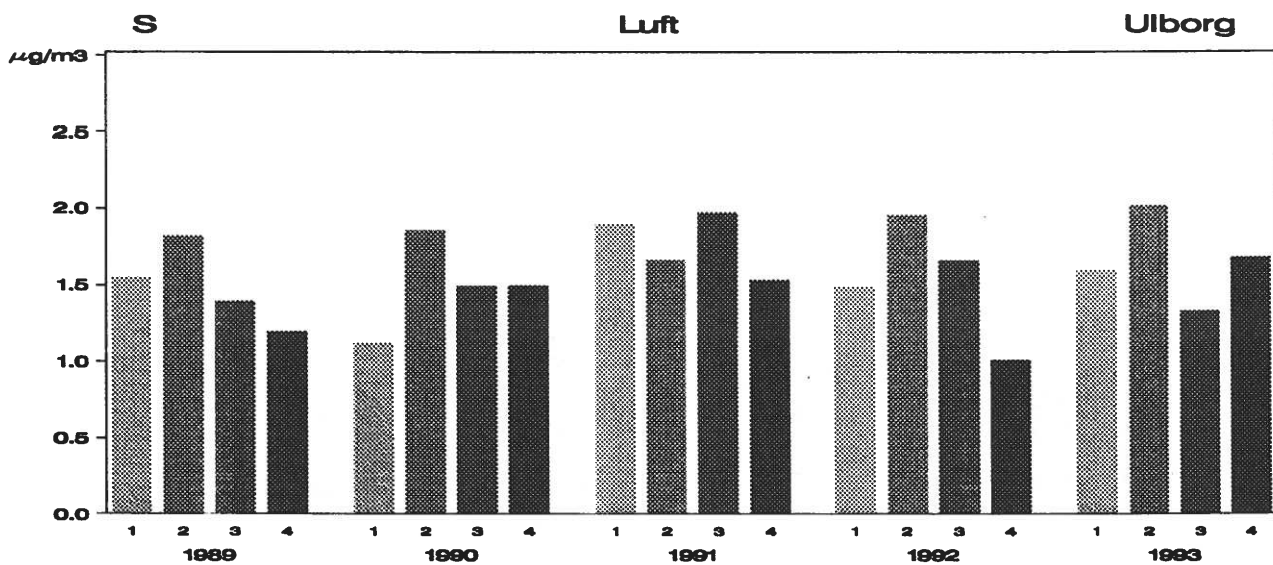
Bilag III

SO₂ koncentrationer udregnet som kvartalsgennemsnit.



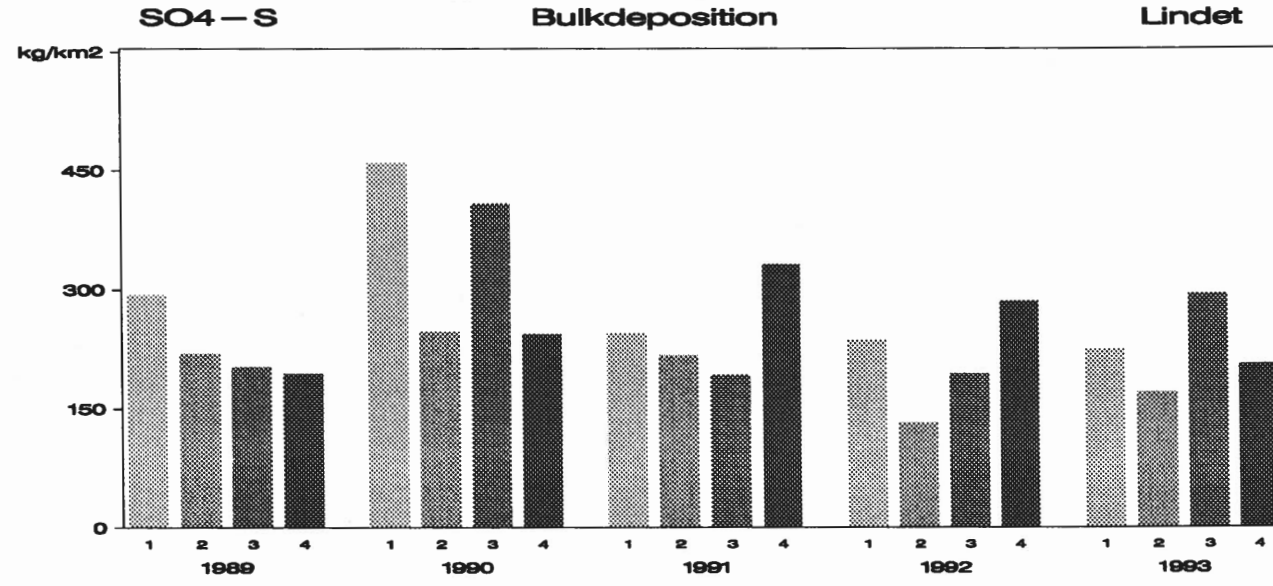
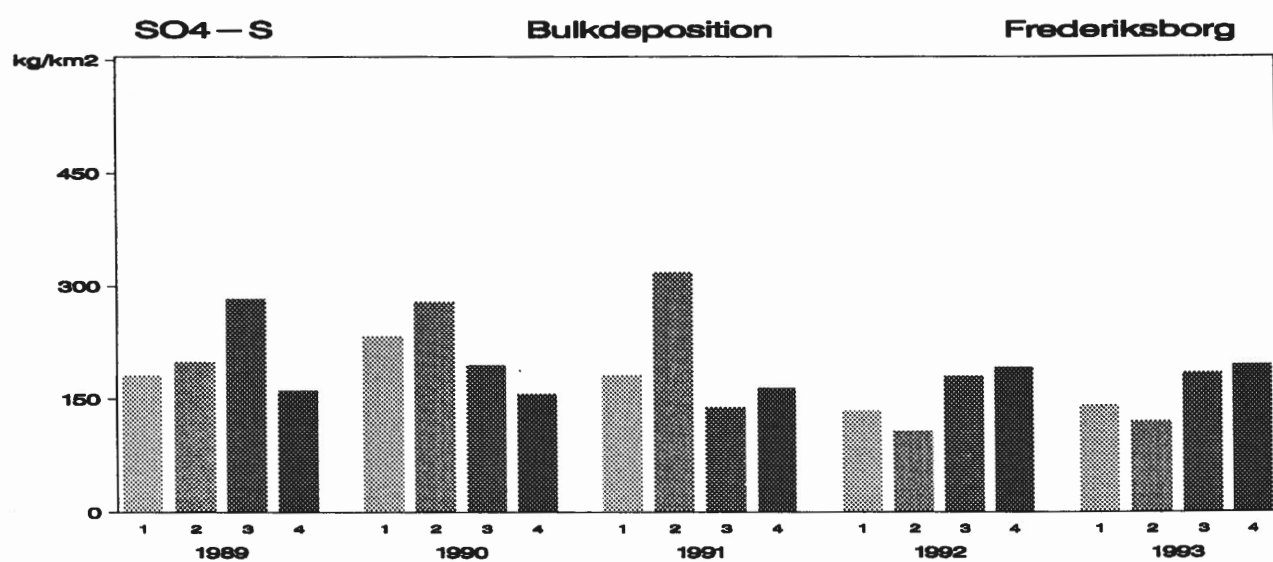
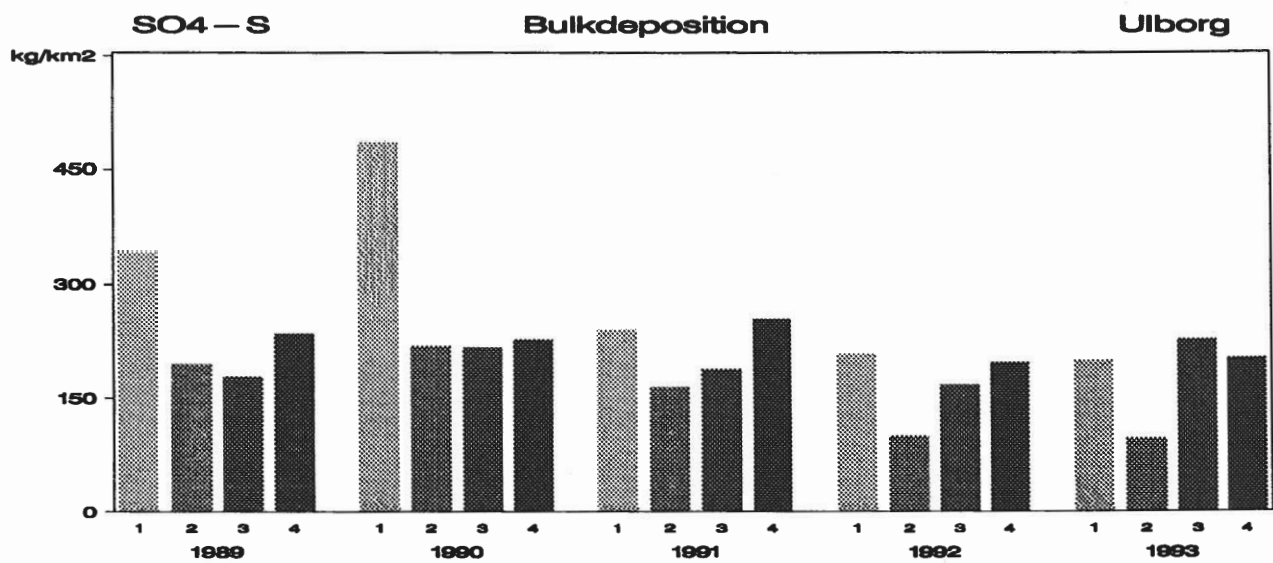
Bilag IV

Partikulære svovlkoncentrationer udregnet som kvartals gennemsnit.



Bilag V

Våddepositionen af sulfat målt ved bulkopsamling. Kvartalssummer over en 5 årig periode.



Danmarks Miljøundersøgelser

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

Henvendelser kan rettes til:

Danmarks Miljøundersøgelser
Postboks 358
Frederiksborgvej 399
4000 Roskilde

Tlf.: 46 30 12 00
Fax: 46 30 11 14

Direktion og Sekretariat
Forsknings- og Udviklingssekretariat
Afd. for Forureningskilder og
Luftforurening
Afd. for Havmiljø og Mikrobiologi
Afd. for Miljøkemi
Afd. for Systemanalyse

Danmarks Miljøundersøgelser
Postboks 314
Vejløvej 25
8600 Silkeborg

Tlf.: 89 20 14 00
Fax: 89 20 15 14

Afd. for Ferskvandsøkologi
Afd. for Terrestrisk Økologi

Danmarks Miljøundersøgelser
Grenåvej 12, Kalø
8410 Rønne

Tlf.: 89 20 14 00
Fax: 89 20 15 14

Afd. for Flora- og Faunaøkologi

Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger, særtryk af videnskabelige og faglige artikler, Danish Review of Game Biology 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.

