

BIBLIOTEKET
Danmarks Miljøundersøgelser
Kalø, Grenåvej 12, 8410 Rønde

Atmosfærens stofforførsel til danske skovøko- systemer

Faglig rapport fra DMU, nr. 98

Mads F. Hovmand

Helle Vibeke Andersen

Danmarks Miljøundersøgelser

Jørgen Bille-Hansen

Forskningscentret for Skov & Landskab

Helge Ro-Poulsen

Københavns Universitet

Miljøministeriet

Danmarks Miljøundersøgelser

Maj 1994

Datablad

Titel: Atmosfærens stoftilførsel til danske skovøkosystemer

Forfattere: M.F. Hovmand, H.V. Andersen, J. Bille-Hansen, H. Ro-Poulsen

Afdeling: Afdeling for Forureningskilder og Luftforurening

Serietitel og nummer: Faglig rapport fra DMU, nr. 98, 1994

Udgiver: Miljøministeriet
Danmarks Miljøundersøgelser

Udgivelsestidspunkt: Marts 1994

Feltundersøgelser: M.F. Hovmand, H.V. Andersen, A. Egeløv
Laboratoriemålinger: L. Grundahl, H.V. Andersen

ETB: P. Johnsen
EDB: N.H. Bastholm, O.H. Manscher
EDB-grafik: H.V. Andersen

Bedes citeret: Hovmand, M.F., Andersen, H.V., Bille-Hansen, J., Ro-Poulsen, H. (1994): Atmosfærens stoftilførsel til danske skovøkosystemer. Danmarks Miljøundersøgelser. Faglig rapport fra DMU, nr. 98. 59 s.

Gengivelse tilladt med tydelige kildeangivelse

Frie emneord: Atmosfærisk deposition, svovl, kvælstof, ozon, skov, økosystemer undersøgelse

ISBN: 87-7772-137-3
ISSN: 0905-815X
Tryk: Grønager's Bogtryk & Offset
Sideantal: 59 s
Oplag: 500 eks.

Pris (incl. 25% moms, excl. forsendelse): 75,- kr.

Salg: Danmarks Miljøundersøgelser
Afdeling for Forureningskilder og Luftforurening
Frederiksborgvej 399
Postboks 358
4000 Roskilde
Tlf.: 46 30 12 00

Indhold

1	Indledning	5
2	Måleprogram	9
	2.1 Målenet	9
	2.2 Atmosfærekemiske målinger	9
3	Størrelse og virkning af atmosfærisk deposition	13
	3.1 Tørdeposition, mekanismer og målemetoder	13
	3.2 Plantetoxiske gasser	17
	3.3 Forsurende forbindelser	20
	3.4 Plantenæringsstoffer	21
	3.5 Havsalts påvirkninger	25
4	Tidsudviklinger	27
	4.1 Ozon 1985-92	27
	4.2 Svovldioxid og ammonium 1978-92	28
	4.3 Havsalt-deposition 1985-92	29
	4.4 Jordvæskens kemiske sammensætning 1985-92	31
	4.5 Udvaskning 1985-92	33
5	Måleresultater for 1991/92	37
	5.1 Ozon	37
	5.2 Svovl- og nitrogenforbindelser	42
	5.3 Deposition af havsalt	50
6	Sammenfatning og konklusion	53
7	Referencer	55
	Summery in English	57
	Danmarks Miljøundersøgelser	59

1 Indledning

Skovøkosystemer

Træernes trivsel i skovøkosystemer styres af en række fysiske og kemiske parametre, så som temperatur, lysindstråling, vindpåvirkning, vandtilførsel og næringsstofforsyning. Hertil kommer tilstedeværelsen af stoffer, der påvirker næringsstofforsyningen som f.eks. ammoniak, eller stoffer med direkte toksiske effekter på træerne, som f.eks. ozon.

I modsætning til landbrugsarealer er skovøkosystemer karakteriseret ved en begrænset jordbearbejdning og en ringe tilførsel af plantenæringsstoffer, jordforbedringsmidler og kunstvanding. Det medfører, at skovens vækst er begrænset af de næringsstoffer, som jorden afgiver ved forvitring og mineralisering samt tilførslen fra atmosfæren (deposition). For en række stoffer, især svovl- og kvælstofforbindelser, er den atmosfæriske deposition større end tilførslen ved forvitring og mineralisering. Andre atmosfæredeponerede forbindelser kan medvirke til forurening af jordbunden og til udvaskning af jordens næringsstofindhold til skade for skovvæksten.

Den betydning, atmosfærisk deposition tillægges, har været baggrunden for iværksættelsen af en række videnskabelige undersøgelser af den atmosfæriske depositions indvirkning på stofkredsløbet i udvalgte skovøkosystemer i udlandet og herhjemme (se f.eks. *Rasmussen, 1988; Hovmand, Bille-Hansen, 1988*).

Vestjyske plantager

Begrundelsen for at foretage omfattende undersøgelser herhjemme er, at især de vestjyske plantagers vækstforhold på en række punkter afviger fra hovedparten af andre europæiske skovøkosystemer. Ud fra et videnskabeligt, administrativt og produktionsmæssigt synspunkt gør disse afvigelser det nødvendigt at undersøge depositionens påvirkning af især disse plantagers vækstforhold.

De mest markante forhold, der adskiller vestjyske plantager fra andre typer af europæiske skovøkosystemer, er:

- Vestjyske jorde er "gamle", forvitrede og grovstrukturerede jorde overlejret af flyvesand, med et ringe næringsstofindhold og beskedent forvitringspotentiale. Jorderne har endvidere en ringe vandkapacitet, hvilket medfører, at de let udtørres.
- En stor del af plantagerne er beliggende mindre end 50 km fra kysten, hvilket medfører kraftig vindpåvirkning samt en stor atmosfærisk tilførsel af havsalt ved vestlige vindretninger. Havsalt har en svidningseffekt, men tilfører samtidig vigtige plantenæringsstoffer.
- De vestjyske plantager er domineret af nåletræ-arter, som ikke naturligt er hjemmehørende i Danmark (d.v.s. rødgran, sitka-gran, lærk, forskellige fyrrearter etc.).

Med hensyn til luftforurening gælder det generelt for danske skove:

- Danmarks geografiske placering gør, at de fremherskende vinde medfører langtransporteret luftforurening fra de central- og vesteuropæiske industri- og befolkningscentre.
- Danske skove er opdelt i relativt små arealer omgivet af intensivt drevne landbrugsarealer med store dyrehold. Til de fleste skovarealer transporteres derfor betydelige mængder atmosfærisk ammoniak fra landbrugsarealer.

Disse faktorer, enkeltvis og i kombination, gør skovdyrkning vest for den midtjyske højderyg usikker. Ved hjælp af en grundig forskningsindsats i kombination med forstlig erfaring og registrering er det derfor vigtigt at afdække, hvilke fysisk-kemiske forhold, der er afgørende for skovvækst idag. Det er endvidere vigtigt at undersøge hvilke forhold, der på lidt længere sigt vil påvirke skovdyrkingen i Vestjylland.

Atmosfæren

Atmosfæren er transportmedium for stoffer af både naturlig og menneskeskabt (antropogen) oprindelse. Afhængig af den specifikke stofforbindelse, udgør de antropogene kilder en varierende mængde af den totale emission. Den antropogene andel af den totale emission for nedenstående forbindelser er:

Svovl- og kvælstofforbindelser	60-95%
Ozon	30-60%
Havsalte	1%

Depositionen på skoven af stoffer med antropogen oprindelse omtales i den offentlige debat som "sur regn" (acid rain). Dette udtryk omfatter også stoffer som ozon og tungmetaller, selvom disse stoffer ikke har nogen forsurende virkning.

Stofferne fra atmosfæren tilføres økosystemet på forskellig vis. Vand og vandopløste luftforureningskomponenter tilføres i form af nedbør, dug og tåge. Denne type tilførsel benævnes traditionelt "våddeposition". Kuldioxid, ozon samt andre gasser optages af træerne gennem spalteåbninger eller direkte gennem løvets overflader. Dette benævnes "tørdeposition" og omfatter også afsætning af partikler på træerne.

Virkingen af stoftilførslen til skoven afhænger af flere faktorer. Koncentrationen af stof i atmosfæren er kun en parameter, større betydning har transporten af stof fra atmosfæren ind i økosystemet (fluxen). Stoffet eller stofgruppernes biologiske virkning sammenholdt med fluxens størrelse er det, der afgør, om økosystemets påvirkes og eventuelt skades.

Denne rapport beskriver et projekt hvis formål er at kvantificere atmosfæriske stoftilførsler og at måle virkingen af disse tilførsler i relation til økosystemets generelle tilstand; samt at vurdere den

tidsmæssige udvikling og om muligt at fremskrive virkningerne af de nuværende og kommende tilførsler.

Nærværende rapport indeholder diskussion af atmosfæretransporterede forbindelser opdelt i fire grupper:

- Plantetoxiske gasser
- Forsurende forbindelser
- Plantenæringsstoffer
- Havsalt

Rapporten viser måleresultater for perioden 1/7 1991 til 30/6 1992 foretaget på danske skovmålestationer. Der er især lagt vægt på beskrivelsen af de atmosfæretransporterede forbindelser, der har betydning for trævækst. Resultater fra den effektforskning, der startede i 1991, omtales, ligesom resultater fra jordbundsundersøgelser og træernes mineraloptagelse er gengivet i det omfang, de kan relateres til direkte eller indirekte effekter af atmosfærisk deposition. Oplysninger om jordbundsforhold er tildels et resumé fra slutberetningen: "Ionbalance og luftforurening i skovøkosystemer" (*Forskningscentret for Skov & Landskab, 1993*).

2 Måleprogram

Et måleprogram til vurdering af luftforureningens betydning for skovenes sundhed blev i Danmark påbegyndt i 1985. Et samarbejdsprojekt blev på det tidspunkt iværksat af Statens Forstlige Forsøgsvæsen (nu Forskningscentret for Skov & Landskab, FSL) og Miljøstyrelsens Luftforureningslaboratorium (nu en del af Danmarks Miljøundersøgelser, DMU). Samarbejdet omfattede stofcirkulation i skovøkosystemer. Målinger blev indledt på fire forsøgsparaceller på Frederiksborg og Ulborg skovdistrikter. Der blev påbegyndt måling af atmosfærens og nedbørens kemiske sammensætning som forløber for en samlet kvantificering af den atmosfæriske stoftilførsel til skovøkosystemet.

Den biogeokemiske stof-flow i skovøkosystemet blev bestemt ved analyser af træproduktion, løvtab samt af jordens sammensætning og jordvandets sammensætning og nedsivning. Programmet fra 1985 er udvidet på en række punkter. Der er oprettet en luftmålestation til atmosfærekemiske målinger i Lindet skovdistrikt og i Ulborg skovdistrikt gennemføres intensive målekampanjer til bestemmelse af tørdeposition. Desuden foretages der målinger i en gammel bøgebevoksning i Store Dyrehave, Nordsjælland, og i en gammel rødgranparcel på Ulborg Skovdistrikt.

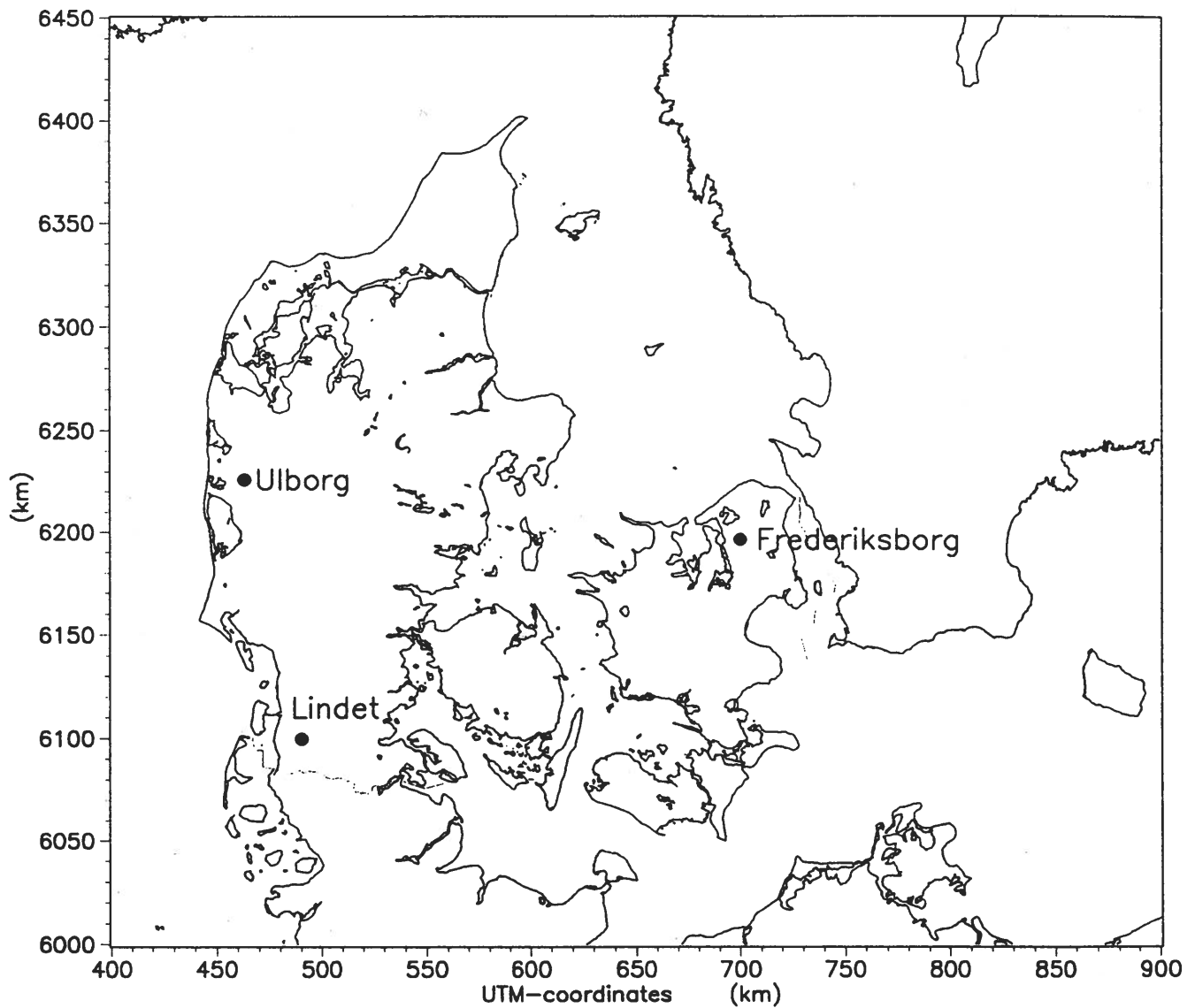
2.1 Målenet

Stationsplacering

Der er opstillet atmosfærekemisk måleudstyr i tre skovdistrikter i Danmark: Ulborg, Frederiksborg og Lindet skovdistrikter. *Figur 1* viser den geografiske placering af undersøgelsesarealerne. Disse arealer omfatter skovparceller, hvor et skovøkosystem undersøges i kombination med måling af luftforureningsniveauet og den atmosfæriske deposition. På stationerne måles koncentrationer og kemisk sammensætning af gasser, partikler (aerosoler), nedbør og dryp fra træerne. Målestationerne indgår samtidig i et større dansk overvågningsprogram for atmosfærekemiske målinger (*Hovmand et al.*, 1993).

2.2 Atmosfærekemiske målinger

Luftmåleprogrammet omfatter målinger af koncentrationer og kemisk sammensætning af gasser, partikler og nedbør. En nærmere beskrivelse af indsamlingsapparat og analysemetoder anvendt ved basismålingerne findes i *Hovmand et al.*, (1992). Ozonmålemetoder er beskrevet af *Hertel, Hovmand*, (1991), mens ammoniakmålinger i forbindelse med tørdepositionshastighedsmålinger er beskrevet af *Andersen et al.* (1993).



Figur 1. Undersøgelsesarealer hvor skovøkologiske målinger og luftforureningsmålinger gennemføres sideløbende.

De målte gasser omfatter:

Svovldioxid	SO ₂
Nitrogendioxid	NO ₂
Ammoniak	NH ₃
Ozon	O ₃

Partikelfractionen analyseres for:

Ammonium	NH ₄ ⁺
Nitrat + salpetersyre	NO ₃ ⁻ + HNO ₃
Sulfat (svovl)	SO ₄ ²⁻
Natrium	Na ⁺
Magnesium	Mg ²⁺
Kalium	K ⁺
Tungmetaller og andre grundstoffer	

Nedbør og dryp fra træerne analyseres for:

Ammonium	NH_4^+
Nitrat	NO_3^-
Sulfat	SO_4^{2-}
Klorid	Cl^-
Natrium	Na^+
Magnesium	Mg^{2+}
Kalium	K^+
Kalcium	Ca^{2+}
"Syre"	H^+

De ovenfor nævnte forbindelser måles på alle tre stationer med få undtagelser; således måles ozon kun på Ulborg og Frederiksborg skovdistrikter, mens nitrogendioxid efter 1991 kun måles på Ulborg skovdistrikt.

3 Størrelse og virkning af atmosfærisk deposition

Stoftilførsel

For en række stoffer er den atmosfæriske stoftilførsel den betydeligste tilførselsvej til skovøkosystemet. Andre nettotilførsler omfatter forvitring af jordens mineraler, samt eventuelle tilførsler af slam, kompost eller gødning. Tilførsel af slam, kompost og gødning er ikke almen praksis i dansk skovbrug og forekommer i øvrigt ikke på de her undersøgte parceller.

Stofcirkulation

I sammenligning med nettotilførslen af stof foregår der en stor intern stofcirkulation i økosystemet. Især plantenæringsstoffer optages af træerne og tilbageføres til jorden i form af blade, kviste, rødder m.m. I jorden foregår der en nedbrydning af organisk stof (mineralisering), med frigivelse af uorganisk stof til jordvæsken til følge. Opløste uorganiske forbindelser optages enten af planterne eller af jordens mikroflora eller adsorberes til forskellige jordfraktioner eller udvaskes.

I et vist omfang fjernes stof ved udvaskning til dybere liggende jordlag eller fjernes fra skoven i form af tømmer. Denne form for stoftransport kan betegnes nettotab for økosystemet.

Virkingen af atmosfærisk deposition består derfor dels i depositionens eventuelle direkte toksiske virkning, dels i stoftilførselns betydning for økosystemets næringsstofforsyning set i relation til den interne cirkulation og økosystemets stoftab. Endelig har depositionen afledede virkninger som følge af akkumulering af stoftilførslen eller ved en forøget udvaskning af de stoffer, der er nødvendige for plantevæksten.

I de efterfølgende afsnit gennemgås de foreliggende resultater for den atmosfæriske tør- og våddeposition, både med hensyn til kilder og virkninger, desuden beskrives foreløbige resultater af målinger af plantetoxiske gasser.

3.1 Tørdeposition, mekanismer og målemetoder

Tørdeposition

Tørdeposition omfatter gassers og partiklers transport og tilførsel til land- og vandoverflader. Tørdepositionen til en overflade er afhængig af en lang række faktorer, der varierer i relativ betydning afhængigt af meteorologiske forhold, den eksponerede overflades fysiske-kemiske egenskaber samt stoffernes fysiske egenskaber og kemiske sammensætning. Disse forhold bevirker, at tørdepositionen er meget varierende i tid og sted. Effektiviteten af tørdepositionen der beskrives som tørdepositionshastigheden, V_d , er defineret som forholdet mellem stoftransporten per tidsenhed til overfladen (fluxen) og den atmosfæriske stofkoncentrationen.

Vanskelighederne ved bestemmelse af tørdeposition består bl.a. i at skelne mellem forureningskomponenter der er deponeret tørt og vådt til planteoverflader. Måling af depositionen direkte på den aktuelle overflade er vanskelig, fordi vegetation kan indeholde betydelige mængder af den samme komponent optaget gennem rødderne. Visse forureningskomponenter kan endvidere trænge ind i vegetationsoverfladen. Gasser kan f.eks. optages gennem spalteåbninger, og derved umuliggøres en simpel overfladerensning til bestemmelse af depositionen. Udvaskning af visse stoffer fra vegetationen umuliggør ligeledes depositionbestemmelse på baggrund af overflade rensning. Endelig er der nogle forbindelser som f.eks. ozon, der destrueres ved afsætning.

For nogle stoffer, der kun i ringe grad indgår i planternes stofskifte, kan det lade sig gøre at bruge gennemdrøpsværdier som udtryk for deposition. Dryp er regnvand, der har passeret vegetationen og afvasket de stoffer, der er afsat på bladoverfladerne i perioden siden sidste "regnafvaskning". Drypopsamling af f.eks. natrium og klorid kan give et godt estimat for deposition af havaerosoler.

Kunstige overflader (surrogatoverflader) kan i nogle tilfælde anvendes til opsamling af tørdeposition. Dette gælder især for partikler. Men ved opsamling af gasser er denne metode ikke anvendelig, idet bladoverfladerne og spalteåbningerne spiller en aktiv rolle i depositionen.

Mikrometeorologi

Tørdeposition af gasser kan bestemmes ved samtidige målinger af mikrometeorologi og atmosfærens koncentrationer af gasser. Med disse metoder kan den aktuelle flux bestemmes, men metoderne stiller store krav til målestedets overfladekarakteristika og målingernes præcision. Metoderne kræver endvidere enten måleinstrumenter med meget hurtige responstider (størrelsesorden 1 sek. eller derunder, "eddy-correlation metoden") eller korttidsmålinger (størrelsesorden få timer) med præcision på få procent ("gradient metoden"). For mange komponenter kræves også målemetoder med meget lave detektionsgrænser p.g.a. de lave koncentrationer og de korte midlingstider.

Beskrivelsen af tørdepositionsprocessen opdeles ofte i tre trin: den turbulente transport fra den frie atmosfære ned til det laminære grænselag ved overfladen, diffusionen over det laminære grænselag og optag og/eller reaktion ved selve overfladen.

Depositionsprocesser

Forskellen i tørdepositionsprocesserne mellem gasser og små partikler ($<10 \mu\text{m}$), er hovedsagelig diffusionen over det laminære grænselag, hvor gasserne kan diffundere langt hurtigere end partiklerne. Større partikler er påvirket af tyngdekraften og sedimentation er en mekanisme i afsætningen. Forskelle i tørdepositionsprocessen mellem forskellige gasser er hovedsageligt knyttet til gassernes og overfladens karakteristika. De meget lidt vandopløselige gasser O_3 , SO_2 og NO_2 optages især gennem planternes spalteåbninger, mens de vandopløselige gasser NH_3 og HNO_3 også reagerer med selve overfladen eller den vandfilm, der ofte

sidder på overfladen. Sammensætningen af vandfilmen, som bl.a. vil afhænge af luftfugtigheden og forekomsten af allerede deponerede komponenter, kan ligeledes påvirke tørdepositionsprocessen. F.eks. menes det, at såfremt vandfilmen er tilstrækkeligt basisk p.g.a. deponeret NH_3 , kan SO_2 lettere opløses i vandet, et fænomen, der i litteraturen omtales som "co-deposition" af NH_3 og SO_2 .

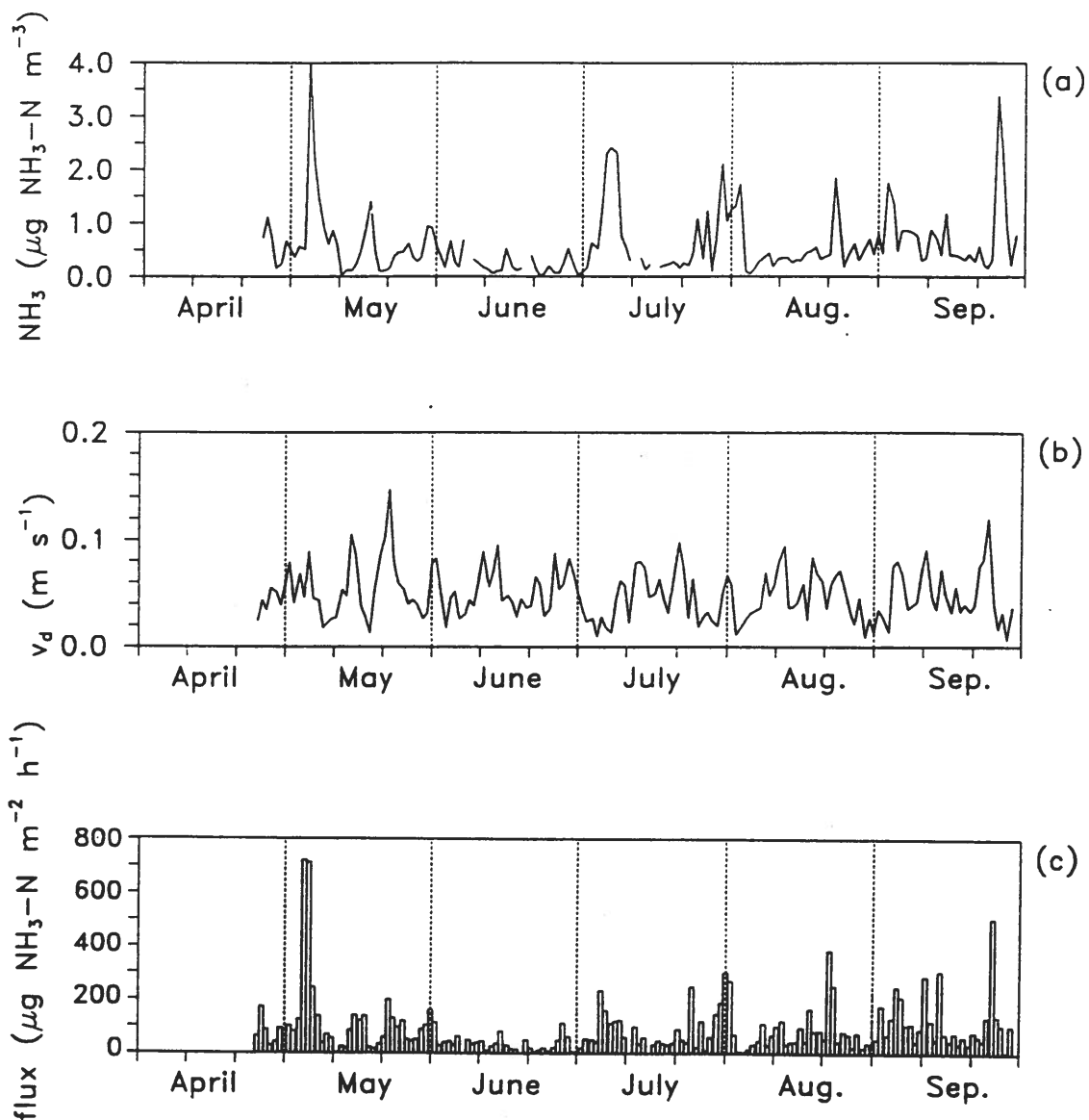
Tørdepositionen, fluxen F , estimeres ud fra produktet af tørdepositionshastigheden, v_d , og den atmosfæriske koncentration af stoffet c , $F = v_d \cdot c$. P.g.a. vertikale luftbevægelser og horisontale vinde ændres depositions-hastigheden, v_d , og stofkoncentrationen, c , hele tiden og indbyrdes uafhængigt. De bedste tørdepositionsestimater fås derfor ved at bestemme depositions-hastigheder og koncentrationer over så korte tidsintervaller som muligt. Koncentrationen af et stof kan oftest måles i korte tidsintervaller (timer) over længere perioder. Måling af tørdepositionshastigheden er som regel begrænset til kortere perioder p.g.a. af de omfattende og store krav til metoderne (jvf. ovenfor). et er ofte nødvendigt at estimere en tørdepositionshastighed på døgn, månedlig eller endog årlig basis og derved introduceres store usikkerheder på tørdepositionsestimaterne.

Ved vurdering af forskellige komponenters bidrag til tørdepositionen skal både koncentration og tørdepositionshastighed for den enkelte komponent tages i betragtning. For de reducerede kvæstofforbindelser som ammonium og ammoniak (NH_4^+ , NH_3) og de oxiderede kvæstofforbindelser nitrat og salpetersyre (NO_3^- , HNO_3) gælder det, at kvæstofforbindelser på partikelform forekommer i højere koncentrationer end de tilsvarende forbindelser på gasform, men tørdepositionshastigheden af gasserne er op til en størrelsesorden større end for de tilsvarende partikler. Disse forhold gør, at gasformen, trods sin ofte lavere koncentration, bidrager mere til den samlede tørdepositionen af kvæstofforbindelser end partikelformen.

Kvælstofdeposition

Tørdepositionens bidrag til kvælstofbelastningen under danske forhold bestemmes især af forekomsten af gasserne ammoniak, NH_3 , og salpetersyre, HNO_3 . NO_2 har en væsentlig lavere depositions-hastighed p.g.a. gassens ringe vandopløslighed. NO_2 og partikelformig kvælstof medvirker dog også til den samlede kvælstofdeposition, da de lave depositions-hastigheder for disse forbindelser til en vis grad kompenseres af højere koncentrationsnivauer.

På målestationen i Ulborg er der foretaget målinger af tørdepositionen af NH_3 til nåleskov. Tørdepositionshastighedsmålingerne er gennemført v.h.a. gradientmetoden. NH_3 -koncentrationen er målt i flere højder fra en meteorologimast, der rager mere end 20 m op over skoven. V.h.a. tilhørende, målte meteorologiske parametre estimeres depositions-hastigheder og fluxe. Ydermere skal der indenfor projektet udføres tilsvarende målinger af NO_2 , HNO_3 og O_3 , hvilket kræver optimering og videreudvikling af eksisterende metoder.



Figur 2. Variationen i målte døgnmiddelværdier af $\text{NH}_3\text{-N}$ koncentration (a), tørdepositions-hastighed (b) og flux (c), målt og beregnet for perioden maj-september 1990 på Ulborg (fra Andersen et al., 1993).

De hidtidige målinger af tørdepositions-hastigheden af NH_3 til skoven i Ulborg har vist en relation til meteorologiske parametre (Andersen et al., 1993). Målingerne er foretaget en uge i maj og i august/september 1991. Den fundne relation har gjort det muligt at estimere tørdepositions-hastigheden ud fra rutinemæssige meteorologiske målinger. Der er hermed åbnet mulighed for et langt bedre tørdepositionsestimat end hidtil, baseret på rutinemæssige døgnmålinger af NH_3 og estimerede tørdepositions-hastigheder på døgnbasis. Figur 2 viser for vækstsæsonen 1990 variationen af ammoniak-koncentrationen, depositions-hastigheden for ammoniak, estimeret ud fra den fundne relation og den resulterende deposition (flux). Af figuren fremgår det, at tørdepositions-hastigheden er meget

heden for vækstsæsonen maj til september 1991, er når relationen mellem depositions­hastighed og meteorologi tages i betragtning, estimeret til 4.5 cm s^{-1} . Beregnes gennemsnittet af tørdepositions­hastigheden for de to målte perioder maj og august fås 2.6 cm s^{-1} . Brug af depositions­hastigheder fra de målte perioder alene vil således underestimere tørdepositions­hastigheden med næsten en faktor to i forhold til beregninger for den samlede vækstsæson. De estimerede fluxe for hele vækstsæsonen gav en gennemsnitlig flux på $87 \mu\text{g NH}_3\text{-N m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ (ca. $7,6 \text{ kg NH}_3\text{-N ha}^{-1} \text{ år}^{-1}$). Dette estimat ligger ca. en faktor tre højere end hidtil antaget, idet tidligere anvendte tørdepositions­hastigheder har vist sig for lave.

3.2 Plantetoxiske gasser

Gasserne O_3 , NO , NO_2 , NH_3 , SO_2 er alle principielt toksiske over for planter. Hvorvidt de pågældende gasser under aktuelle danske forhold påvirker væksten forudsætter et indgående kendskab til planternes aktivitet i de perioder, hvor høje koncentrationer af de pågældende gasser forekommer. Ozon forekommer ofte i koncentrationer, der er plantetoxiske, mens de øvrige gasser kun forekommer i toksiske niveauer i danske baggrundsområder i meget korte tidsrum. Da virkningen af de pågældende gaskoncentrationer også er afhængig af eksponeringsvarigheden, vil den samlede påvirkning (dosis) oftest være lille. Specielt for svovldioxid og kvælstofdioxid gælder, at de højeste koncentrationer forekommer i vinterhalvåret, hvor planterne ikke er aktive og derfor ikke optager så meget af forureningen.

"Critical levels"

Det er blevet forsøgt at opstille såkaldte kritiske belastningsgrænser ("critical levels") for forskellige luftforureninger (UNECE, 1992, og WHO, 1987). De seneste anbefalinger er, at årsmiddelværdierne ikke overstiger værdierne listet på næste side, hvis man vil undgå direkte effekter på planternes stofskifte. Dette gælder vel at mærke, når gasserne ikke forekommer sammen; dette er imidlertid som regel tilfældet.

Kritiske belastningsgrænser på årsmiddelværdier.

	UNECE:	WHO:
NO_2	16 ppb ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	16 ppb ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
SO_2	11 ppb ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)	11 ppb ($30 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
O_3	300 ppb*h/ m^3 *år	30 ppb ($60 \mu\text{g}/\text{m}^3$)
NH_3	$8 \mu\text{g}/\text{m}^3$	-

* kumulativ dosis over 40 ppb i dagtimerne.

For korttidseksponeringer er værdierne væsentligt højere. Således er én-times værdien for ozon sat til 75 ppb.

Ammoniak og salpetersyre er gasser, der i væsentlig grad afsættes på planternes overflader. *Van der Eerden* (1992) vurderer, at årsmiddeldkoncentrationen for direkte skader er $75 \mu\text{g NH}_3 / \text{m}^3$. Langtidseffekter på stofskiftet indtræder dog sandsynligvis ved langt lavere niveauer. I *UNECE* (1992) anbefales således en månedsmiddel på $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Det anføres yderligere, at tærskelværdien for følsomme økosystemer antagelig er en størrelsesorden lavere. Virkningerne af gasformig salpetersyre og -syrling ved man stort set intet om.

Ozon

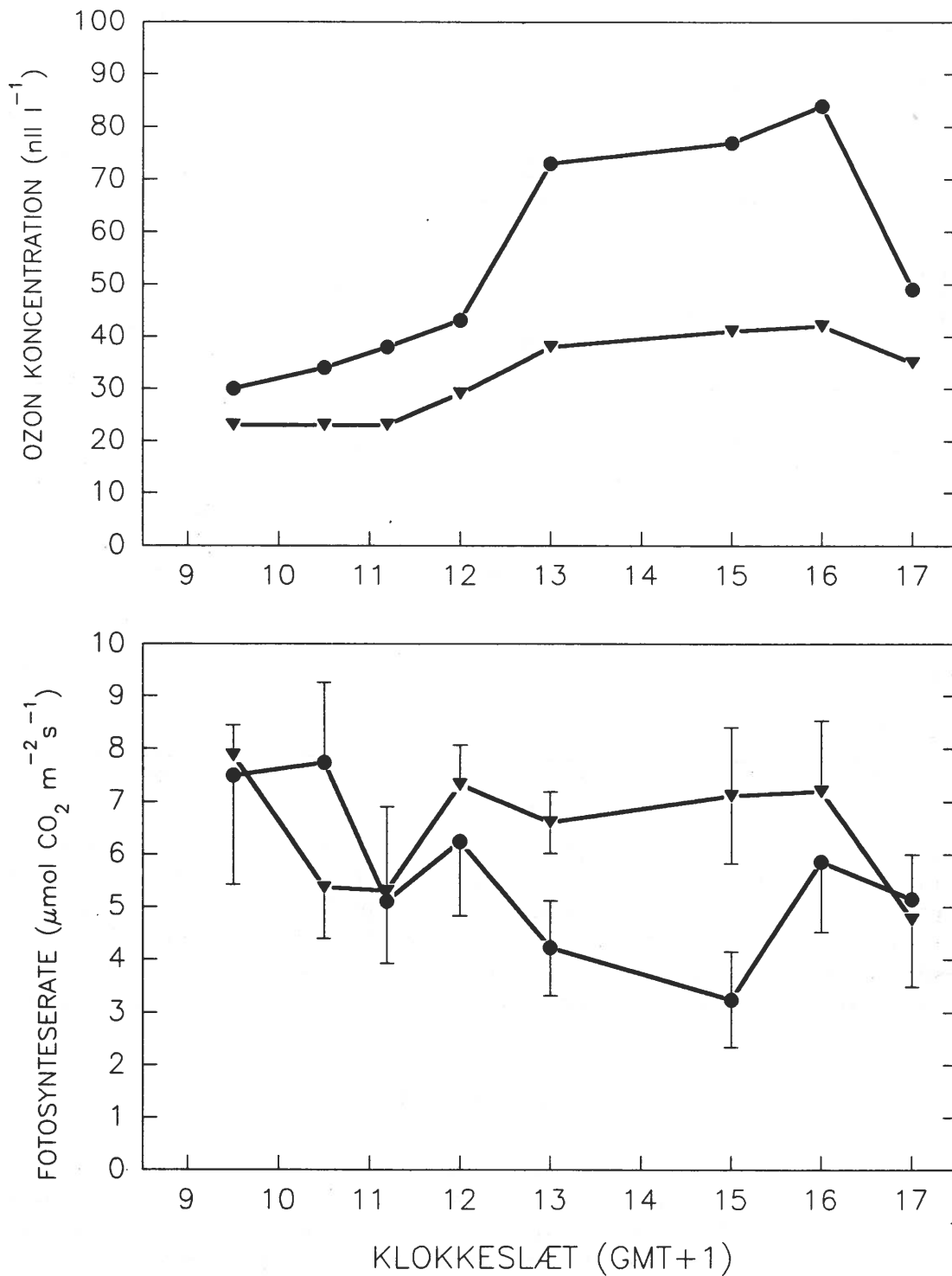
Ozon forekommer i de højeste koncentrationer i dagtimerne i foråret og i sensommeren, hvor træerne er aktive, og hvor bladenes og nålenes spalteåbninger er åbne. *UNECE* (1988) anbefalede i lighed med *WHO* (1987) en max. timemiddel på 75 ppb, og en årsmiddelværdi på 25 ppb i dagtimerne. Dette blev i 1992 ændret til det i tabellen anførte dosisbegreb 300 ppb-timer i dagtimerne.

I Danmark ligger dagtime-ozonværdierne i sommerhalvåret på et niveau, der generelt betragtes som tærskelniveauet for direkte effekter på træer, d.v.s. 40 - 70 ppb (*Fenger et al.*, 1983 & *Christensen et al.*, 1985). Der forekommer imidlertid vigtige regionale variationer. Sammenligner man f.eks. Ulborg i Vestjylland med Ll. Valby nord for Roskilde ses, at såvel maximum - som minimum - værdierne er højere i Ulborg end i Ll. Valby (*Figur 14*). Begge dele skyldes antagelig, at lokal kvælstofmonoxid-emission fra trafikken, som nedbryder ozon ($\text{O}_3 + \text{NO} \rightleftharpoons \text{NO}_2 + \text{O}_2$), er større på Sjælland end i Vestjylland.

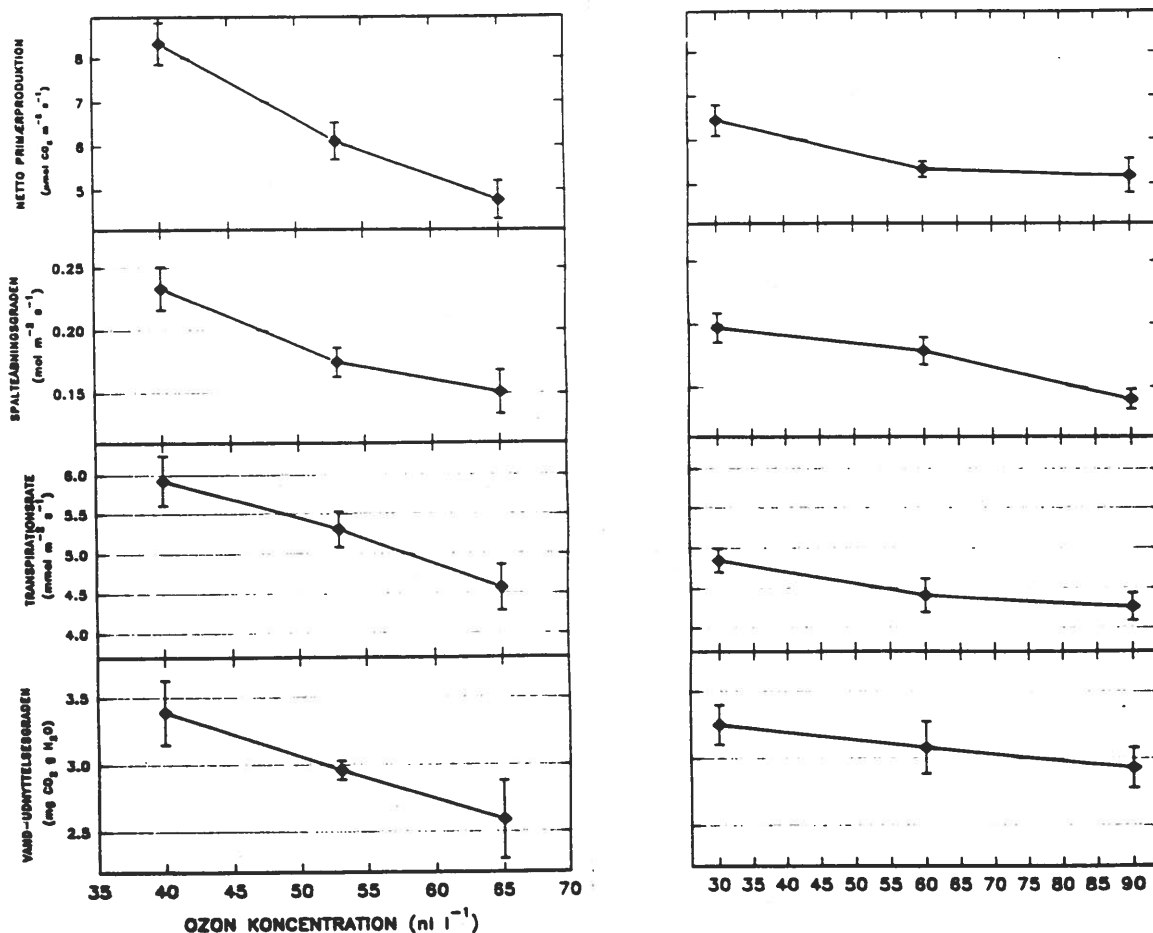
Dosis

Den totale *dosis* (koncentration \cdot tid) et træ er udsat for i Ulborg, er derfor højere end i Ll. Valby. Det svarer til forskellene mellem højlend og lavland i udlandet, hvor de mest omfattende skader på træer netop er iagttaget i højlend/bjerge (f.eks. Schwartzwald, Appalacherne). Det kan diskuteres, hvor meget et relativt højt ozonniveau om natten betyder i betragtning af, at træernes spalteåbninger er lukkede. For direkte reaktioner mellem ozon og bladoverflade, der medfører kutikulaerosion, har det givet en betydning.

I forsøgskamre, de såkaldte "open-top kamre", er der udført målinger af ozons plantefysiologiske effekter på bøg og rødgran (*Figur 3 og 4*). Det er målt, at en forhøjelse af ozonkoncentrationen fra 40 til 70 ppb ($80 \text{ til } 140 \mu\text{g}/\text{m}^3$) medfører en reduktion af nettofotosynteseraten i størrelsesordenen 30-50% hos begge arter. Endvidere ses det, at tidspunktet for bøgeløvet's visnen fremrykkes (tidlig senescens). Effekten hænger tilsyneladende sammen med en generel påvirkning af fotosynteseapparatet målt som chlorophyllfluorescens og ændringer i pigment-omsætningen (*Mikkelsen*, 1993).



Figur 3. Ozoneffekter på Rødgran. To grupper træer er samtidigt blevet udsat for to forskellige ozonniveauer gennem dagen (øverst): Et lavt, næsten konstant niveau på 20-30 ppb (trekanterne), samt en kunstigt frembragt ozonepisode om eftermiddagen på 70-80 ppb (cirklerne). Nederst ses de to grupper træers gennemsnitlige fotosynteserate (netto-primærproduktion). Det ses, at ozonepsiden reducerer primærproduktionen med op til 50%.



Figur 4. Ozoneffekter på bøg. Tre grupper unge bøge er blevet udsat for tre forskellige ozonkoncentrationer i juli (til venstre) og august (til højre). Fra oven og nedefter er afbildet nettoprimærproduktionen, spalteåbningsgraden, transpirationen og vandhusholdningen (forholdet mellem produktion og transpiration) målt om eftermiddagen som funktion af de tre ozonkoncentrationer. I juli er effekterne større end de i figur 3 viste effekter på rødgran, medens bøgene i august ikke reagerer nær så kraftigt, selvom koncentrationsforskellene er højere.

3.3 Forsurende forbindelser

Skovøkosystemet tilføres forbindelser, der virker forsurende på jord og planteoverflader. Disse forbindelser omfatter bl.a. gasserne svovldioxid, nitrogendioxid, salpetersyre, svovlsyre, saltsyre samt ammoniak, såfremt ammoniakken i økosystemet iltes til nitrat.

Partikler

Aerosoler emitteret fra industrielle kilder bliver ofte sure, fordi atmosfærens indhold af syredannende gasser i et vist omfang adsorberes af især små partikler. Depositionen af sure partikler betyder imidlertid ret lidt i forhold til den samlede atmosfæriske syretilførsel til skoven.

Nedbør

Nedbøren indeholder stærke syrer, især svovlsyre og salpetersyre, men i meget fortyndet form. Syren udgør få millionte dele af nedbørens samlede vægt, men da nedbørsmængden er 600 til 1000 l per

Tilførslen af forsurende forbindelser med hel eller delvis antropogen oprindelse omfatter en række direkte forsurende forbindelser, som svovldioxid, gasformig salpetersyre eller syre opløst i nedbør og en række potentielt forsurende forbindelser som ammoniak og ammonium. Ammonium virker forsurende, hvis det iltes til nitrat, og hvis denne nitrat udvaskes fra skovøkosystemet, således som det er tilfældet på landbrugsjord.

En anden indirekte forsurende forurening kan ske ved atmosfærisk tilførsel af havsalt. Kationer i havsaltet kan ombyttes med brintioner (syre), hvorved jordvæsken forsures (se afsnit 3.5).

Potentiel forsurende forurening er knyttet til tilstedeværelsen af svage og til dels udissocierede syrer. Under særlige forhold kan disse erstattes af stærke syrer ved tilførsel af klorid, sulfat eller nitrat. Stærke syrer kan med den nedadgående vandtransport fjerne plantenæringsstoffer (baser) fra skovøkosystemet, hvorved systemet taber plantetilgængelige næringsstoffer og samtidig forsures jordvæsken i rodzonen.

3.4 Plantenæringsstoffer

Plantenæringsstoffer

De plantenæringsstoffer, der tilføres skovøkosystemet via atmosfæren, inkluderer både metaller som magnesium, kalium og kalcium samt forbindelser af kvælstof og svovl. Desuden tilføres en række mikronæringsstoffer som klor, brom, selen m.fl. I princippet forekommer alle grundstoffer i atmosfærisk nedfald, men kun de færreste forekommer i sådanne mængder, at nedfaldet har betydning for stofcirkulationen i de berørte økosystemer. Denne rapport beskriver kun stoffer med betydelig atmosfærisk tilførsel.

Betydningen af den atmosfæriske tilførsel af de enkelte plantenæringsstoffer kan tildels udtrykkes ved tilførselens størrelse i forhold til skovens netto forbrug, hvor begge størrelser er udtrykt i gram stof per kvadrat meter per år. *Tabel 1* viser en række makronæringsstoffer målt på Ulborg-parcellen. Den atmosfæriske deposition er set i relation til netto-planteoptaget.

Planteoptag

Netto-planteoptaget er beregnet ud fra den forudsætning, at nålemassen kan anses for at være konstant. Netto-planteoptaget er således lig den mængde næringsstoffer, der skal optages, for at den fundne tilvækst i stammer og grene har kunnet finde sted. Den volumetriske tilvækst (tilvæksten i vedmasse) beregnes ud fra målinger, der foretages hvert tredje år. Tilvæksten i kronemassen måles ikke rutinemæssigt for nåletræer, men er beregnet ved en regression mellem indvejede kronemasser og træernes grundflade. Kemisk er træerne analyseret i forskellige fraktioner: Stammerne er delt i en ved- og en barkdel og i øvrigt opdelt ved udtagning af skiver for minimum hver løbende meter. Kronerne er kun opdelt i nåle, mindre grene og primære sidegrene. I opgørelsen indgår resultater fra 15 træer. Metoden fører antagelig til en underesti-

mering af de næringsstofmængder, der medgår til væksten i kronen. Hele problemkomplekset om træernes optagelse af næringsstoffer på Ulborg vil blive behandlet yderligere i perioden 1993-1994 i et parallelt projekt.

Tabel 1. Atmosfærisk tilførsel af makronæringsstoffer til rødgran i Ulborg skovdistrikt set i relation til træernes netto-optag og den gennemsnitlige udvaskning. Gennemsnit for perioden 1985-92.

Stof	Tilførsel		Fraførsel	
	Atmosfærisk deposition	Forvitring (estimeret)	Planteoptag netto	Udvaskning fra rodzonen
	$\text{g/m}^2 \cdot \text{år}$			
Kvælstof	2,0	-	1,6	0,06
Svovl	2,2	-	0,3	2,3
Natrium	7,8	0,2	0,2	5,9
Magnesium	0,95	0,1	0,3	0,61
Aluminium	0,11	2,4*	0,1	2,4
Kalium	0,50	0,3	0,8	0,24
Kalcium	0,37	0,05	1,1	0,23

* Aluminium er brugt som referenceelement, og forvitringen er sat lig udvaskningen.

Udvaskning

I *tabel 1* er desuden vist udvaskningsraten, altså den mængde stof der fjernes fra økosystemet ved nedadgående vandbevægelser. I de tilfælde, hvor summen af netto-planteoptaget og udvaskningen er mindre end den atmosfæriske tilførsel, vil der ske en akkumulering i økosystemet, det er f.eks. tilfældet for kvælstof og tilsyneladende også for magnesium.

Atmosfærisk tilførsel af svovl og natrium er lige så stor som udvaskningen, men nettoplante-optaget af disse stoffer er meget lille. Den atmosfæriske tilførsel af kalium kan kun lige akkurat dække netto-planteoptaget, men da der også fjernes stof ved udvaskning, bliver resultatet et nettotab for økosystemet af kalium, dette gælder også kalcium.

Jorden indeholder store mængder plantenæringsstoffer bundet i primærminerale eller sekundært omlejret i forskellige jordfraktioner. Stof i primære mineraler er ikke umiddelbart tilgængelige for planteoptagelse. En meget lille del frigøres hvert år ved forvitring, hvilket kan opfattes som en tilførsel til økosystemet.

Forvitring

Hvis jordens indhold af mineraler ved forvitring ikke kan frigøre disse stoffer i tilstrækkelig omfang, vil den plantetilgængelige pulje hurtigt reduceres. Forvittringsraten er undersøgt dels på Ulborg skovdistrikt (*Raulund Rasmussen, 1991*) dels i laboratoriet. Det er vanskeligt at kvantificere hvor stor en del af det forvitrede materiale, der optages af planter og hvor meget der efter forvitring fastlægges i jorden.

Akkumulering

I skovøkosystemet akkumuleres plantenæringsstoffer i den organogene jordfraktion. Det formodes, at der på længere sigt indstiller sig en ligevægt, d.v.s. stoftilførsel med nålefall modsvares af en lignende stoffrigørelse ved mineralisering af den organiske jordfraktion. Denne ligevægt er i forsøgsparcellen i Ulborg næppe opnået endnu. Udfra en akkumulering på 1 kg tørstof per m², år kan det beregnes, at der de sidste 20 år er akkumuleret 75 g N/m².

Nettotilførsel af stoffer til skovøkosystemet er dermed 1) atmosfærisk deposition og 2) forvitring. Fraførsel af stof fra skovøkosystemet er 1) udvaskning, 2) nettoplanteoptag og 3) akkumulering i de øverste jordlags organiske fraktion eller i andre jordfraktioner. I *tabel 1* er størrelsen af stoftilførslen i form af atmosfærisk deposition sat i relation til økosystemets "tab" af stof i forbindelse med fjernelse af vedmasse og som følge af udvaskning.

De foreløbige resultater af forvittringsforsøgene viser, at aluminium er det metal, der frigøres i størst mængde (personlig meddelelse fra *Raulund-Rasmussen, 1993*). Dette er i overensstemmelse med målinger af "udvaskning" fra overjorden; kalium er den metal-ion der forekommer i størst mængde efter aluminium. Et estimat af tilførslen af alkalimetaller ved forvitring er gennemført ved at beregne de enkelte metaller koncentration i forvittringsproduktet i relation til aluminium. Dette er et forsimplet billede af den lange række jordbundskemiske reaktioner der påvirker opløseligheden og plante tilgængeligheden af metaller i jord. Estimatet, der må tages med store forbehold, viser en tilførsel af kalium på 0,2-0,3 g/m², år, hvilket er meget tæt på den kaliummængde, der "manglede" i tilførsel/fraførselsregnskabet. Tilførslen af magnesium og kalcium ved forvitring er derimod ret beskeden i forhold til fraførslen, man må forvente, at mængden af plantetilgængelig kalcium vil formindskes som følge af en stadig fraførsel af dette element. I *tabel 1* er der opstillet en massebalancen, stoftilførslen ved forvitring er estimeret, den midlertidige stofdeponering i de forskellige jordfraktioner indgår derimod ikke i tilførsel/fraførselsregnskabet.

Kilder

Den relative store stoftilførsel via atmosfærisk deposition gør det interessant at vurdere kilderne til disse stoffer. Dette kan i grove træk lade sig gøre ved at sammenholde oplysninger om stofsammensætningen i aerosoler og nedbør med stofsammensætning i emitterede stoffer fra industri, jordoverflade og hav. Et forsøg på kildeidentifikation er gennemført i *tabel 2 og 3*.

Table 2. Kildeidentifikation af en række stoffer, der helt eller delvis emitteres fra havet eller i form af jordstøv.

	Havaero- soler	Jordstøv	Aerosoler	Nedbør	
Relativ til stoffet:	Na	Fe	Fe	Fe	Na
Lokalitet:				Ulborg	
Svovl	0,084	-	-	7,3	0,29
Natrium	1,0	0,11	(0,57)*	25,4	1,0
Magnesium	0,12	0,15	0,42	3,1	0,12
Kalium	0,038	0,38	0,52	1,6	0,06
Kalcium	0,036	1,10	0,73	2,0	0,08
Jern	0,000001	1,0	1,0	1,0	0,04

- mest som organisk svovl.

* vandopløseligt natrium.

Table 3. Atmosfærisk deposition af makronæringsstoffer fordelt på forskellige kilder. Gennemsnit for perioden 1/6 1985 til 1/6 1992.

Kilder:	Havsalt	Jordstøv og landbrug	Industri og transport	Sum
Stof	g/m ² * år			
Kvælstof	~0	1,1-1,3	0,99	2,1-2,3
Svovl	0,65	~0	1,52	2,17*
Natrium	7,8	~0	-	7,83*
Magnesium	0,92	0,02	0,001	1,22
Kalium	0,28	0,16	0,03	0,47
Kalcium	0,29	0,05	0,02	0,36

*Udregnet på basis af drypmålinger.

Tilførslen af magnesium (Mg), kalium (K) og kalcium (Ca) fra havsalt kan kvantificeres ret nøje, fordi tilførslen af natrium (Na) med havsalt lader sig bestemme som gennemdryp, og fordi forholdet mellem Na og de nævnte metaller i havaerosoler er velkendt. De samme metaller tilføres også med jordstøv, men denne tilførsel bestemmes imidlertid unøjagtigt.

Tilførslen af jordstøv kan især i Vestjylland være betydelig og er især tilknyttet hændelser med jordfygning fra bar eller nytilsået agerjord. Jordfygning har ikke en forurende virkning på skov-

jordene, idet jordstøvet indeholder neutraliserende forbindelser, blandt andet karbonater. En oversigt over den atmosfæriske tilførsel fordelt på kilder er vist i *tabel 3*.

I *tabel 4* sammenstilles målte og beregnede værdier af depositionen. Frilandsmåling af bulk deposition er som tidligere nævnt et estimat for våddepositionen. Drypmålingerne er for de nævnte stoffer større end frilandsmålingen. Forholdet mellem drypmålingen og frilandsmålingen er relativt konstant (2,1-2,5) for stofferne sulfat-S, klorid, natrium og magnesium, mens forholdet for kvælstof er mindre og for kalium og kalcium er større.

Det lille forhold mellem dryp/friland indikerer, at trækrønen optager kvælstof, mens et stort forhold viser at der udskilles (leacher) kalium og kalcium.

Tabel 4. Depositionsestimater på basis af forskellige måle- og beregningsmetoder.

Stof	Sum fra tabel 3	Dryp-måling	Frilands-målinger	Dryp/Friland
		g/m ² * år		
Kvælstof	2,06-2,30	1,71	1,02	1,7
Svovl	2,17	2,17	1,04	2,1
Klorid		13,8	6,52	2,1
Natrium	7,83	7,83	3,63	2,2
Magnesium	1,22	1,09	0,44	2,5
Kalium	0,47	1,90	0,23	8,2
Kalcium	0,36	0,92	0,28	3,3
Jern	0,143*		0,143*	

* Målt i anden sammenhæng (*Hovmand, 1984*).

3.5 Havsalts påvirkninger

Atmosfærisk tilførsel

Havsaltilførslen til skovøkosystemer sker i forbindelse med nedbør og som havaerosoler. Ved en kombination af store vindhastigheder og vindretning fra vest tilføres især de vestjyske plantager store mængder havsalt. Aerosoldannelsen over hav er en funktion af vindhastigheden i tredje potens, hvilket medfører, at episoder med høj vindhastighed dominerer den samlede årlige havsaltilførsel til land. Mere end halvdelen af havsalt "indblæsningen" sker ved få stormepisoder i vintersæsonen, medens resten er jævnt fordelt over året (se *figur 6*).

Den atmosfæriske tilførsel af havsalt til skov er vanskelig at kvantificere alene ud fra kemiske bestemmelser af nedbør og luftbårne partikler. Den mængde salt, der kan bestemmes ud fra opsamling i nedbørstragte, udgør kun en del af den totale tilførsel, idet mere end halvdelen af salt-tilførslen sker som partikulært salt, "saltnedslag" (tabel 4).

Havsaltpartikler, der ved kraftige vinde føres ind over land, er så store (5-100 μm), at de kun i mindre udstrækning opsamles med almindelige aerosolsamlere. Nogle af de større partikler omfanges i nedbørstragten og bestemmes sammen med nedbøren som bulknedbør (bulk precipitation).

Havsalt sammensætning

Havsalt består for 90% vedkommende af natrium og klorid. Disse stoffer optages kun i små mængder i planterne. Det betyder, at natrium og klorid, tilført skoven enten med nedbør eller som aerosoler, ved efterfølgende nedbørsepisoder skylles af træerne som gennemdryp. Det målte gennemdryp giver mulighed for ud fra den kendte sammensætning af havsalt, at måle og beregne hvor meget havsalt der er tilført bevoksningen, og dermed også hvor meget magnesium, kalium og kalcium der tilføres af denne vej. Bevoksningerne tilføres også magnesium, kalium og kalcium med luftbåret jordstøv samt ved forvitring af jordens mineraler.

Virksomheden af havsalttilførslen til skov sker i tre faser:

- 1) Den direkte svidningseffekt på blade og nåle. Her forårsager saltpålejringen på bladets overflade en osmotisk påvirkning af cellerne hvorved saltkoncentrationen i cellernes cytoplasma bliver så høj at cellerne skades eller dør.
- 2) Forhøjede saltkoncentrationer i jordvæsken bliver især udtalt, når stor saltdeposition efterfølges af en periode med ringe nedbør og/eller stor fordampning. Herved bliver de tilførte salte opkoncentreret i jordvandet i de øverste lag og ikke transporteret længere ned i jorden. Saltkoncentrationen forbliver derved høj i de øvre jordlag over en længere periode til skade for træernes finrødder (Pedersen, 1992).
- 3) Havsalt indeholder foruden natriumklorid bl.a. magnesium, kalium og kalcium, alle vigtige plantenæringsstoffer. Da disse næringsstoffer ofte er i mangel i de vestjyske skovjorde, vil de i vækstsæsonen blive optaget af træerne ved udbytning med brintioner (syredannelse). Man kan sige, at træernes vækstmuligheder forbedres ved denne ionbytning, men at jordvæsken forsures.

4 Tidsudviklinger

På Ulborg og Frederiksborg er der siden 1985 målt gasser, aerosoler, nedbør og dryp. Der findes således 7 års data for en række vigtige atmosfæretransporterede stoffer, hvoraf en del er resumeret her.

4.1 Ozon 1985-92

Ozonbelastning

Måling af ozon er på Ulborg-stationen gennemført siden foråret 1985. Års- eller månedsmiddel værdier egner sig som tidligere nævnt ikke som udtryk for skovens ozonbelastning. *Tabel 5* viser, hvor mange dage med time max > 75 ppb der ligger over den tidligere beskrevne grænseværdi på 75 ppb, desuden opgøres hvor mange dagmiddelværdier der ligger over 25 ppb for hvert år. Da der nogle år forekommer kortere perioder uden observationer opgives overskridelserne som procent del af de i året foretagne observationer. Et tredje udtryk for ozon-stress, der er foreslået af Simpson og Styve, referet i *UNECE (1992)*, er "excess ozone", defineret som den kumulerede eksponering i vækstsæsonens dagtimer af ozonkoncentrationer over 40 ppb, udtrykt som ppb x timer.

Tabel 5. Overskridelser af kritiske grænseværdier for ozon. Antal dage med 1-times overskridelser af 75 ppb. Dagmiddel (kl 9-16) værdier over 25 ppb angivet som procent af observationsdage i vækstsæsonen. Produktet af ozon-koncentrationer over 40 ppb og antal timer er lig "excess-ozone". Målinger for 1986 til 1992 på Ulborg.

År	1986	87	88	89	90	91	92
Antal dage med time maxima over 75 ppb	0	5	11	7	2	2	9
Dagsmiddel over 25 ppb Procent af observationer	93	88	69	91	88	99	96
40 ppb "excess ozone" 10 ³ ppb x timer	2,9	3,4	7,1	4,7	1,6	4,3	7,2

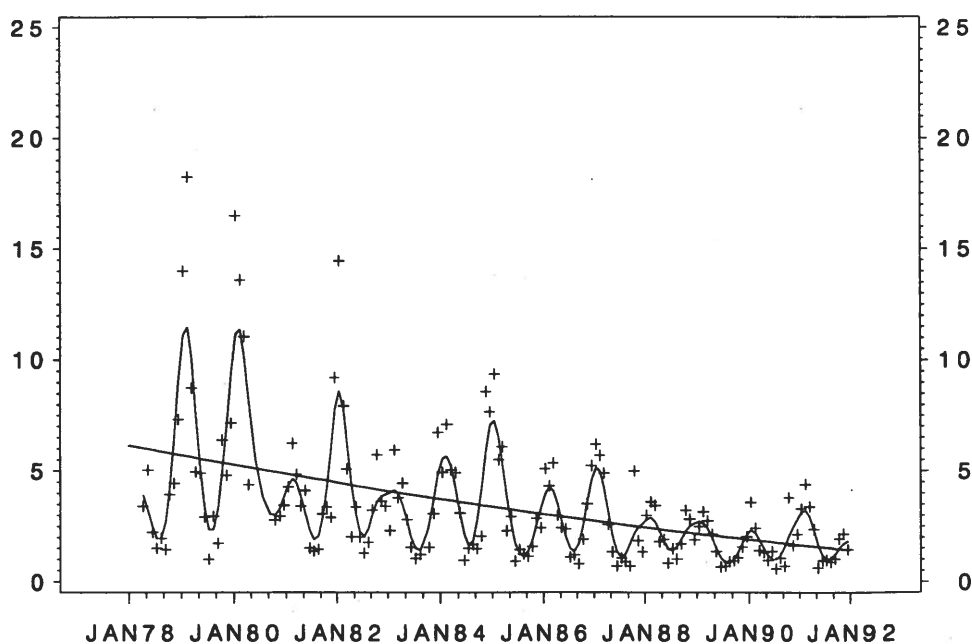
Af *tabel 5* fremgår det, at der er nogen lighed i variationsmønsteret mellem antal time maxima over 75 ppb og "excess ozone". Dage med middel over 25 ppb udgør for de fleste år 90% eller mere af vækstsæsonen. En undtagelse er 1988, et år hvor der til gengæld forekom korte perioder med usædvanlig høje koncentrationer. Hvilket "index" der giver den bedste beskrivelse af belastningen kræver yderlige fysiologiske undersøgelser, især forsøg under naturlige forhold. Med de forhåndenværende tal for syvårsperioden tyder det på, at den kritiske grænseværdi, der tidligere blev anvendt af *UNECE*, dagmiddel over 25 ppb, ikke giver så meget information om ozon-belastningen, ud over at den var overskredet det meste af tiden. De to andre index-beregningsmetoder, 75 ppb time maximum og "excess" 40 ppb*timer følges ad og udviser samtidig en større variationsbredde. Om disse indices beskriver ozons "skadepo-

tentiale" under danske forhold er endnu for tidligt at vurdere, men overskridelsen af grænseværdien for "excess ozone" på 300 ppb*timer er væsentligt overskredet på Ulborg se afsnit 2.

4.2 Svovldioxid 1978-92

SO₂-fald

Svovldioxidkoncentrationen i atmosfæren er faldet de senere år. Miljøstyrelsen og Danmarks Miljøundersøgelser har gennemført målinger siden 1978 på målestationen Tange og resultater fra denne station er derfor bedst egnet til at følge udviklingen af atmosfærens indhold af gasser og aerosoler. Stationen er beliggende i Midtjylland nord for Silkeborg og ca. 75 km øst for Ulborg. Figur 5 viser månedsmiddelværdierne for SO₂. De optrukne linjer angiver et udglattet forløb, beregnet ved hjælp af et statistisk program (SAS, 1990). Den bølgende kurve viser et udglattet forløb af årstidsvariationen; den jævne kurve variationen mellem årene. De anvendte værdier stammer for de første års vedkommende fra Heidam (1986). Af kurveforløbet kan det aflæses, at der er en kraftig årstidsvariation med høje værdier i vinterperioderne. Den rette linje i figuren angiver det gennemsnitlige fald i svovldioxid-koncentrationen over hele perioden. Nedgangen skyldes især, at de høje vinterværdier med månedsmiddelværdier op imod 20 µg SO₂-S/m³ er faldet markant, men også sommerværdierne er faldet. Det kraftige fald i svovldioxidkoncentrationen i Danmark skyldes delvis den generelle emissionsnedgang i Vesteuropa på 30-50%, men også et bortfald af lokale danske kilder med lav emissionshøjde (lave skorstene). En kraftig nedgang i nedbørens indhold af sulfat er også konstateret, idet nedgangen for sulfat er estimeret til 25-35% (Grundahl, Grønbeck, 1990). Det samlede fald i tør- og våddepositionen af svovlforbindelser er derfor betydeligt.

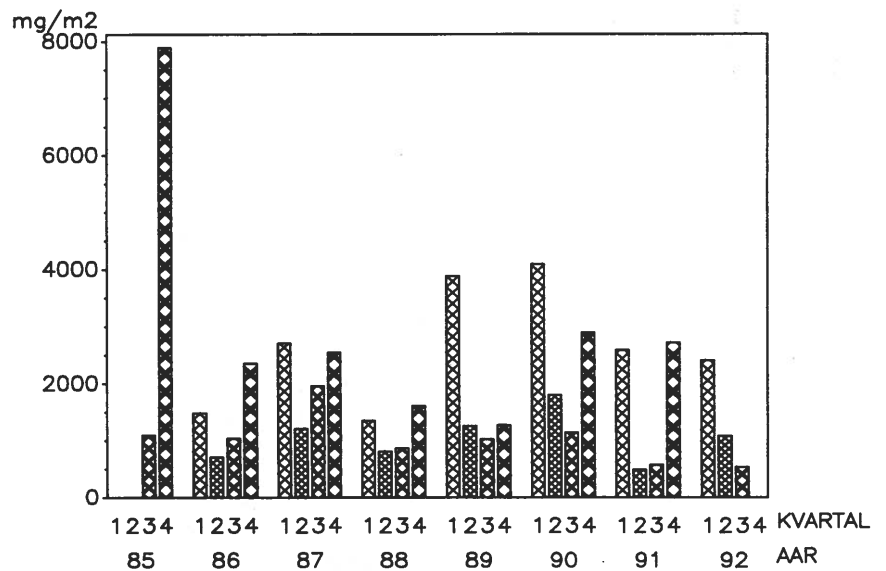
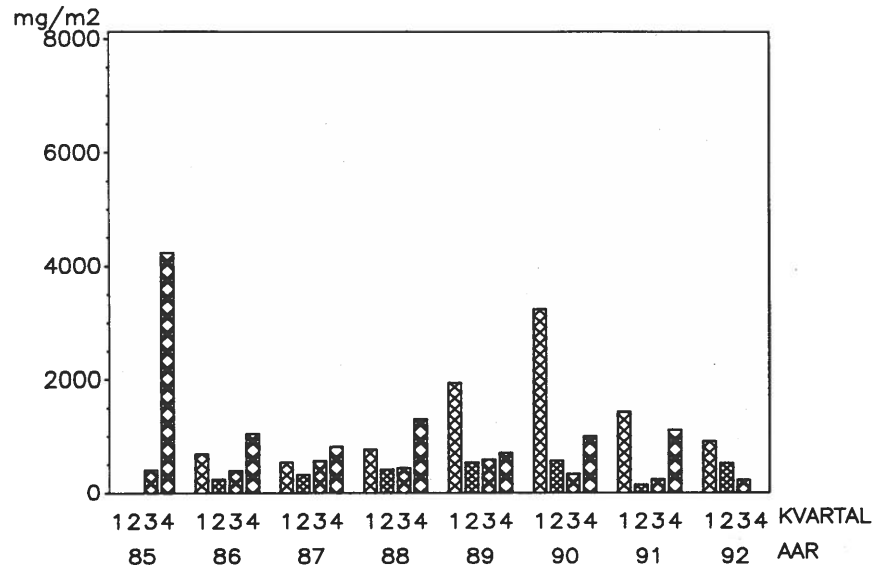


Figur 5. Svovldioxid koncentration beregnet som månedsværdier µg S/m³. Data er fra målestationen Tange i Midtjylland.

4.3 Havsalt-deposition 1985-92

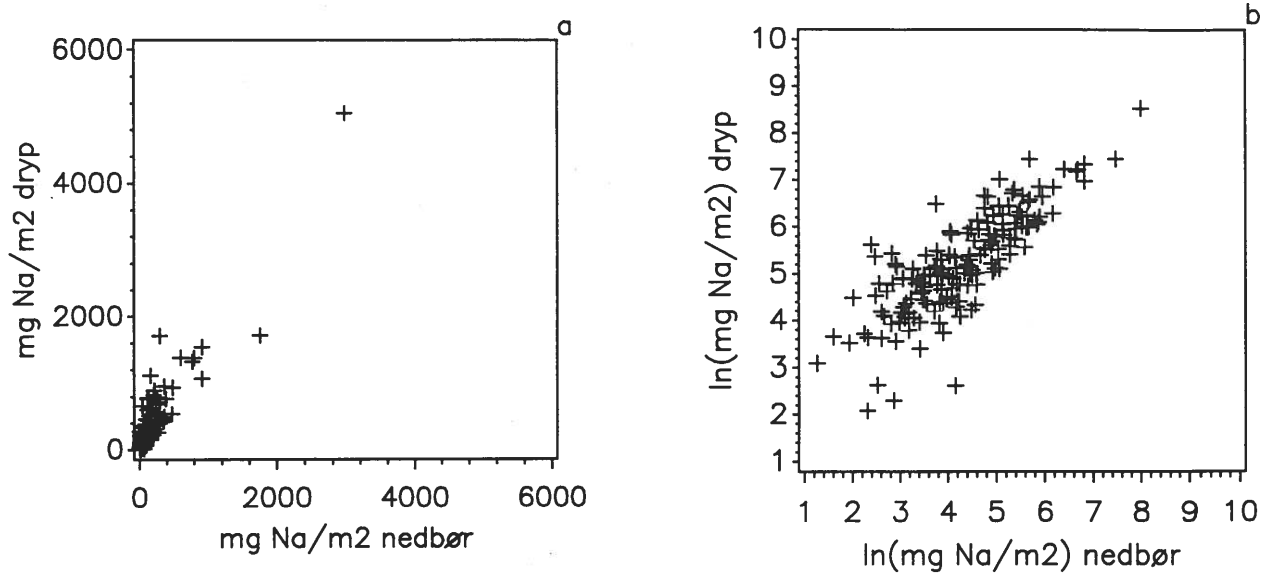
"Drypmåling"

For perioden 1985 til 1991 er natriumdepositionen vist i figur 6 for stationen Ulborg. 14-dages værdier for deposition er summeret til tremånedesværdier, perioderne er S=sommer 1/6 - 1/9, E=efterår 1/9 - 1/12, V=vinter 1/12 - 1/3 og F=forår 1/3 - 1/6. Enheden for deposition er mg Na/m² per 3 måneder. Øverst i figuren ses depositionen som bulk-nedbør, nederst depositionen målt som gennemdryp i rødgran.



Figur 6. Deposition af natrium på Ulborg. Øverst deposition med nedbør (bulk). Nederst deposition målt som dryp under rødgran. Perioderne: Sommer = 1/6 - 1/9; Efterår = 1/9 - 1/12; Vinter = 1/12 - 1/3; Forår = 1/3 - 1/6. Deposition er angivet som mg Na/m² per 3 måneder.

Da drypmålinger og nedbørsmålinger begge omfatter nedbør plus partikler, forventes en vis sammenhæng mellem saltdeposition målt som dryp og som bulk-nedbør. På grund af træernes store partikelopfangende overflade vil drypmålingerne give større værdier end måling af bulk-nedbør. *Figur 7* viser den parvise sammenligning mellem dryp-deposition og nedbørs-deposition. I måleperioder med megen nedbør og lille partikelaf sætning vil forholdet Dryp/Nedbør være tæt på 1; hvorimod perioder med stor partikeldeposition forud for drypopsamlingen vil give et Dryp/Nedbør forhold op imod 10.

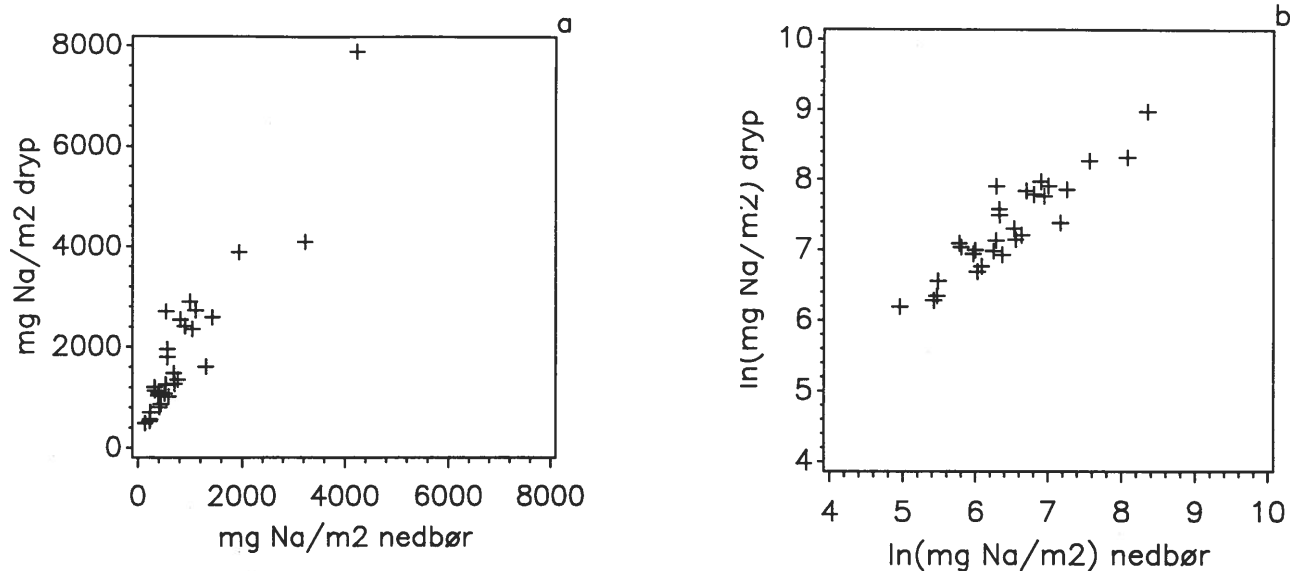


Figur 7. Sammenhæng mellem nedbørs-deposition (bulk) og dryp-deposition (rødgran) målt på Ulborg som 14-dags målinger. På figur a er akserne med de absolutte værdier, på figur b er akserne logaritmisk inddelt.

Som det fremgår af figuren, er spredningen meget stor. Dette skyldes især, at det salt, der afsættes på træerne, drypper ned til opsamlingsenhederne tidsforskudt i forhold til nedbørsopsamlingen. Det giver en systematisk tidsforskydning, men set over en længere periode, ikke nogen systematisk fejl. Observationer er tilnærmeth logaritmisk normalt fordelt, hvorfor korrelationen både er vist i et plot med absolutte værdier på akserne (*Figur 7a*) og i et plot, hvor akserne er logaritmiske (*Figur 7b*).

I *figur 8* ses et plot mellem drypdeposition og nedbørsdeposition på basis af kvartalsværdier. Herved elimineres i nogen grad virkningen af den tidsforsinkelse, der blev diskuteret i forrige afsnit.

Det kan konkluderes, at der er et næsten konstant forhold mellem Dryp/Nedbør, når længere perioder summeres f.eks. 3 eller 6 måneder. Mens forholdet Dryp/Nedbør varierer meget for de enkelte 14-dages observationer.



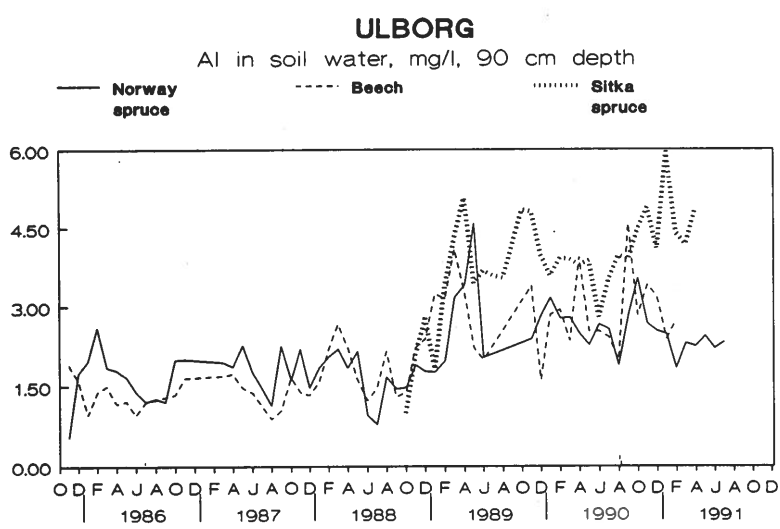
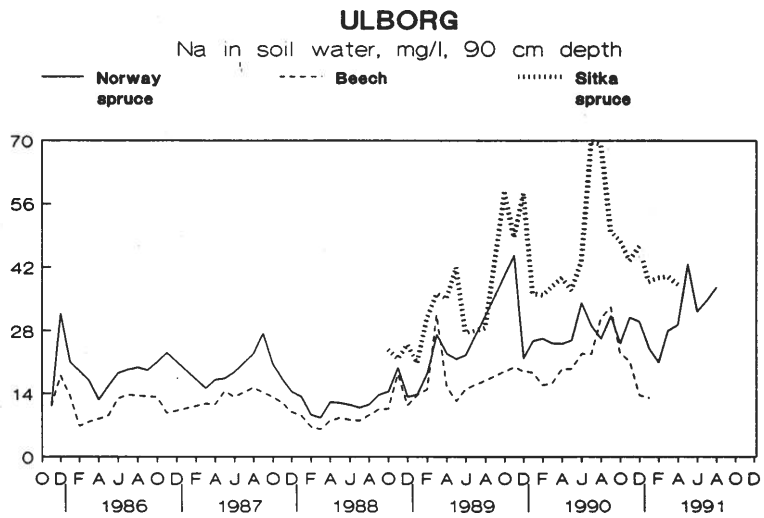
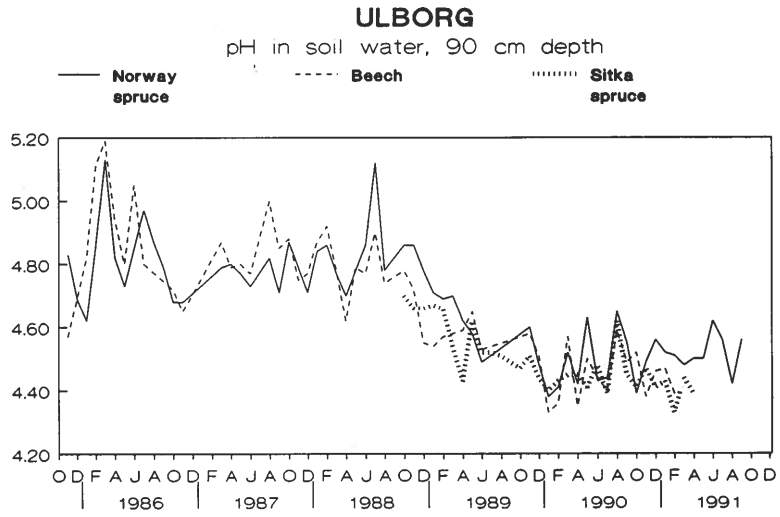
Figur 8. Sammenhæng mellem nedbørsdeposition og drypdeposition (rødgran). Værdierne er 14-dages målinger fra figur 7 summeret til kvartalsværdier. På figur a er de absolutte værdier vist, på figur b er akserne logaritmisk inddelt.

4.4 Jordvæskens kemiske sammensætning 1985-92

Jordvæske

Jordvæske er opsamlet hver måned gennem projektperioden på alle forsøgsarealerne på Ulborg, Lindet og Frederiksborg skovdistrikter. Jordvæsken er analyseret for 15 kemiske parametre, men kun 3 af disse parametre diskuteres her. På de jyske stationer, Lindet og Ulborg, er der registreret markante ændringer i pH over årene 1985-92 og ligeledes i koncentrationen af f.eks. natrium og aluminium, figur 9.

Forløbet illustreres bedst ved talmaterialet fra Ulborg, hvorfra den længste tidsserie findes. I nedsivningssæsonen 1988/89 er der registreret et kraftigt fald i pH i jordvæsken under både sitkagran-, rødgran- og bøgeparcellen, og faldet i pH er sket næsten samtidig i alle 3 bevoksninger. Den øgede forsurening er fulgt af udsving i aluminium-koncentrationen. Aluminium-koncentrationen er steget i jordvæsken under især sitkagranparcellen, men også under rødgran og bøg er registreret en stigning. Parallelt med det stigende indhold af aluminium er der registreret et stigende indhold af natrium i jordvæsken især under sitkagranparcellen, men også jordvæsken under rødgran udviser en stigning. Jordvæsken under bøgeparcellen har i 1988/89 større udsving i natrium-koncentrationen end registreret i de foregående år, men der er ikke tale om egentlige koncentrationsstigninger af længere varighed.



Figur 9. Udviklingen i pH, natrium- og aluminium- koncentrationen i jordvæsken under sitkagran, rødgran og bøgeparcellerne på Ulborg skovdistrikt.

De dominerende kationer, natrium og magnesium, tilføres skoven fra atmosfæren som havaerosoler. Udvasningen af magnesium og calcium har været særlig stor i 1985/86, hvilket kan være forårsaget af den ekstraordinære store deposition af havsalt i 1985 eller årene forud. Havsalt-episoderne i 1988/89 og 1989/90 har ikke forårsaget et ekstraordinært tab af de såkaldte basekationer (calcium, magnesium og kalium), hvilket kan være forårsaget af den meget lille nedsivning på 191 mm, der er beregnet for sæsonen 1989/90. Jordens buffersystem er domineret af aluminiumforbindelser, hvorfor en konstant høj udvaskning af aluminium er forventelig. Pedersen (1993) forklarer de fundne ændringer i jordvæskens kemiske sammensætning som en funktion af en høj deposition af havsalt i nedsivningssæsonen 1988/89 og 1989/90. En forhøjet koncentration af natrium i jordvæsken vil forårsage en udbytning af brintioner og aluminium på jordkolloiderne, hvorefter pH vil falde. De fundne relationer reflekterer de store udsving i koncentrationen af aluminium i perioden. I samme periode er den almene sundhedstilstand af rødgran i specielt Jylland rapporteret stærkt forringet ("røde rødgraner").

Den højeste deposition af havsalt til rødgranparcellen på Ulborg er registreret i efteråret 1985, hvor det registrerede nedfald, målt i gennemdryp, er dobbelt så stort som i nedsivningssæsonen 1988/89 respektiv 1989/90. Saltdepositionen i efteråret 1985 blev fulgt af et kortvarigt fald i pH og kortvarige mindre stigninger i jordvæskens koncentration af aluminium under bøge- og rødgranparcellen. Det kraftige pH-fald i jordvæsken efter 1988 under alle tre træarter kan ikke alene forklares som en funktion af en høj deposition af havsalt. En akkumuleret effekt af atmosfærisk syredeposition og en forsuring som følge af træernes optag af basekationer bidrager også til den faldende pH i jordvæsken, der er konstateret i perioden 1985-1992.

4.5 Udvasning 1985-92

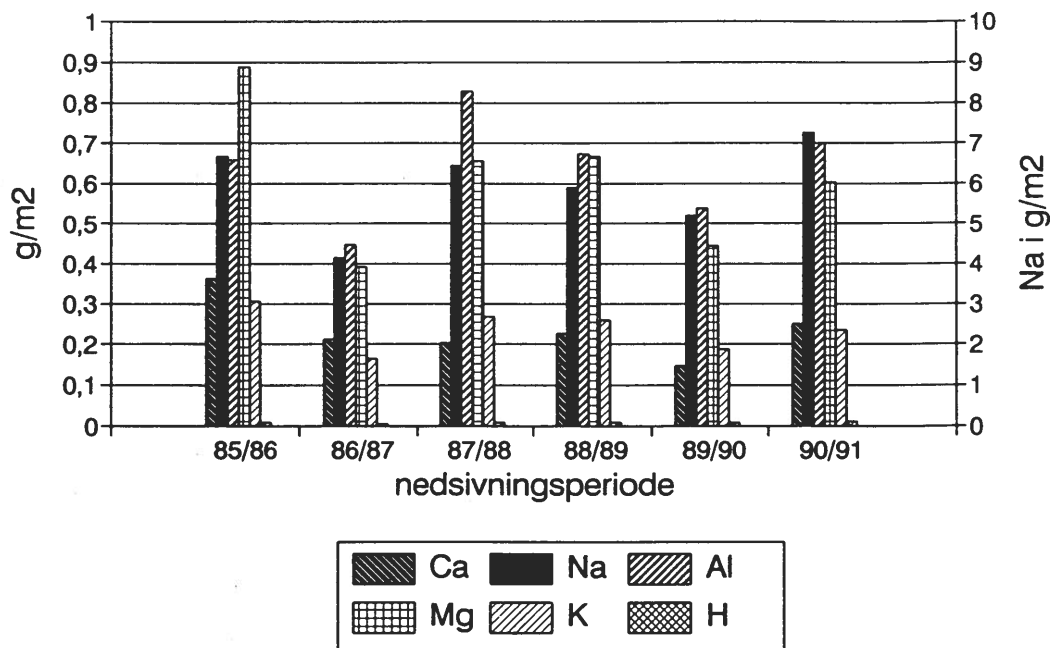
Nedsivning

Nedsivningen beregnes på basis af potentielle fordampningstal fra nærmeste meteorologiske station samt på basis af de målte nedbørs- og gennemdrypsmængder på feltstationerne. Beregningen af den aktuelle fordampning inkluderer størrelsen af jordens maximale plantetilgængelige vandkapacitet. Denne simple hydrologiske model er anvendt ved beregningen af udvasningen i perioden 1985-1992. Meteorologiske data fra 1992 er endnu ikke indgået i beregningerne, hvorfor udvasningen kun er beregnet til udgangen af 1991, figur 10.

Udvasning

Udvasningen af de forskellige kationer og anioner, jævnfør tabel 1, skal ses i relation til den atmosfæriske tilførsel og til jordens indhold af plantetilgængelige næringsstoffer, tabel 5. Størrelsen af udvasningen plus nettoplanteoptaget af calcium og kalium er større end den atmosfæriske tilførsel i perioden 1985-92. I gennemsnit vil jordens indhold af plantetilgængeligt kalium derfor reduceres med minimum 1% og for calcium med 1,3% pr. år, hvis ikke en tilsvarende mængde stilles til rådighed ved forvitring.

UDVASKNINGEN AF KATIONER i g per m² og nedslivningsperiode



Figur 10. Udvaskningen af kationer fra rødgran-parcellen på Ulborg skovdistrikt. Nedslivningen har for 85/86 andraget 366 mm, for 86/87: 229 mm, for 87/88: 434 mm, for 88/89: 348 mm, for 89/90: 191 mm og for 90/91: 272 mm.

De dominerende kationer, natrium og magnesium, tilføres skoven fra atmosfæren som havaerosoler. Udvaskningen af magnesium og kalcium har været særlig stor i 1985/86, hvilket kan være forårsaget af den ekstraordinære store deposition af havsalt i 1985 eller årene forud. Havsalt-episoderne i 1988/89 og 1989/90 har ikke forårsaget et ekstraordinært tab af de såkaldte basekationer (kalcium, magnesium og kalium), hvilket kan være forårsaget af den meget lille nedslivning på 191 mm, der er beregnet for sæsonen 1989/90. Jordens buffersystem er domineret af aluminiumforbindelser, hvorfor en konstant høj udvaskning af aluminium er forventelig.

Udvaskning af brintioner har været lille i hele perioden. Det vil sige, at jorden endnu evner at neutralisere det atmosfæriske forsuringsinput, især ved at ombytte brintioner med aluminiumsioner.

Tabel 5. Ulborg. Den unge rødgranparcel. Jordbundens indhold af ammoniumnitrat-ekstraherbart calcium, magnesium, natrium, kalium og mangan fordelt på forskellige dybder, LFM er det øverste delvis omsatte organiske lag. Gennemsnit fra 9 profiler. Rodzonen strækker sig til 90 cm. dybde. % var: Konfidensinterval på 95%-niveau i procent af gennemsnittet for hele profilen.

Horisont	Na	Mg	K	Ca	Mn
g/m ²					
LFM	1,4	2,1	2,9	10,4	0,4
0-40 cm	9,0	8,4	10,8	26,5	0,1
40-90 cm	5,7	1,4	12,6	5,2	~0
LFH-90	16,1	11,9	26,3	42,1	0,5
% var.	25,3	40,7	49,3	38,7	60,0

5 Måleresultater for 1991/92

I de efterfølgende afsnit gengives måleresultater af atmosfære- og nedbørskemiske parametre udført på Ulborg, Frederiksborg og Lindet skovdistrikter i perioden 1. juli 1991 til 30. juni 1992.

5.1 Ozon

På målestationerne Ulborg og Frederiksborg måles ozon kontinuert med en ozon-monitor, der foretager en måling hver tiende sek. Resultaterne lagres i en computer, der midler til 30 minutters værdier, der løbende eller sekventielt kan hjemtages via telefonnettet til DMU's database.

Ozonkoncentrationer

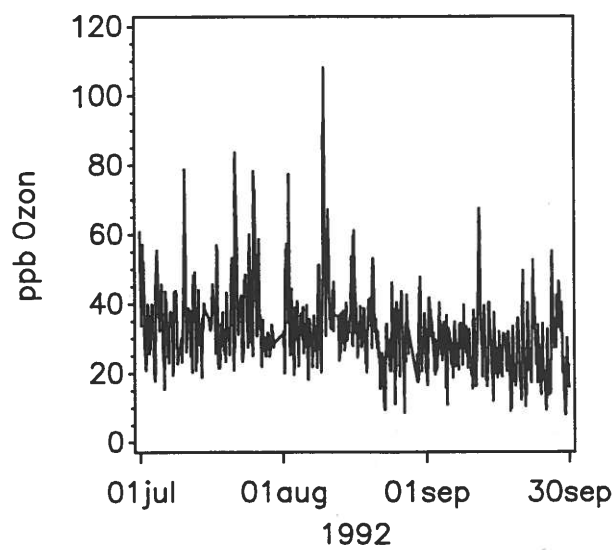
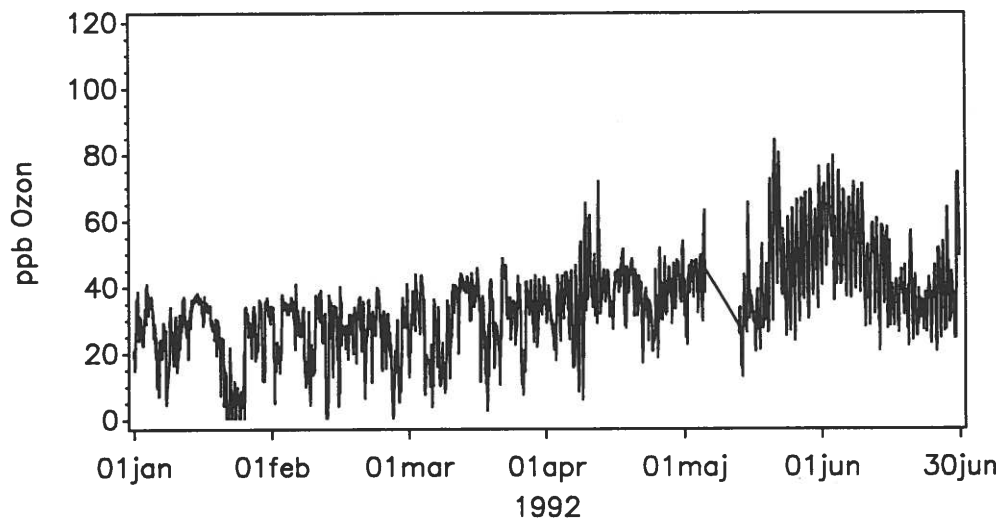
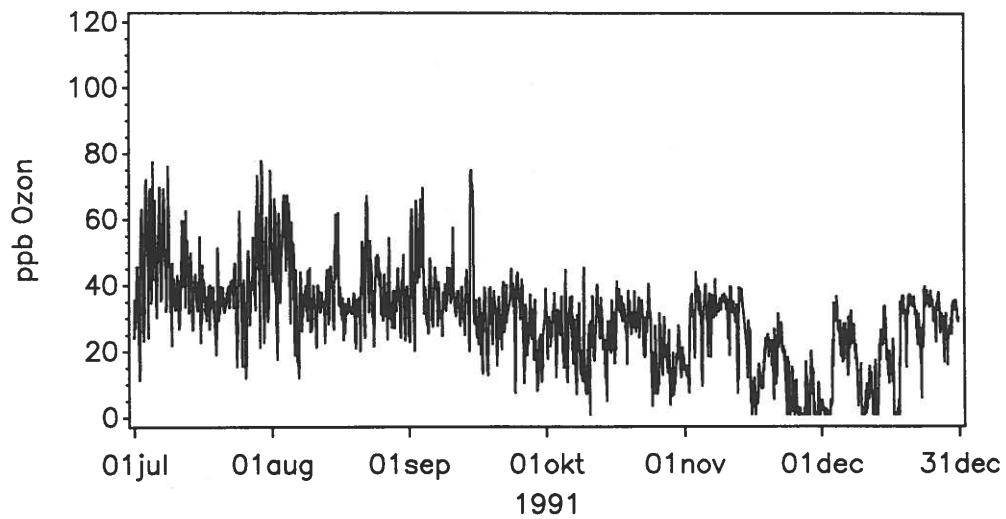
Halvtimes ozonkoncentrationer målt i Ulborg er gengivet grafisk i *figur 11*. Det kraftigt takkede forløb skyldes en døgnvariation med høje værdier midt på dagen, (max-værdier omkring kl. 15) og lave niveauer om natten. Af figuren fremgår det, at niveauet er højere i sommerhalvåret end i vinterhalvåret. Døgn- og årstidsvariationer for perioden 1985-89 er for danske stationer beskrevet af *Hertel, Hovmand* (1991).

Døgnfluktuationer

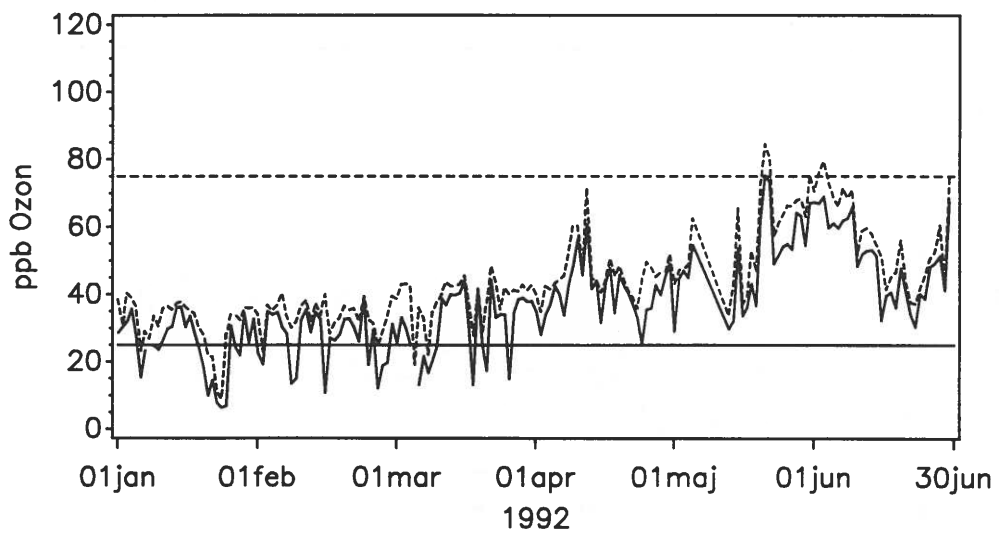
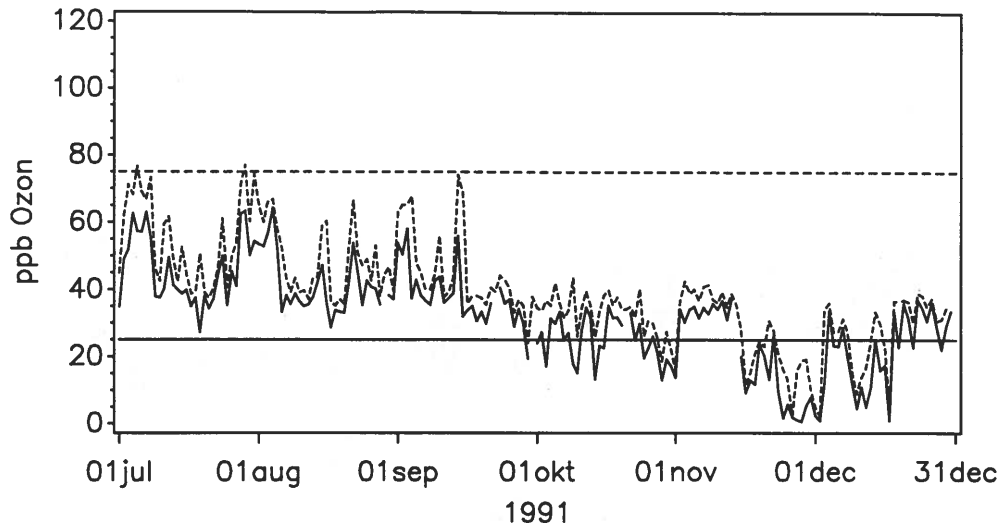
På grund af det stærkt fluktuerende forløb af ozonkoncentrationen beskriver døgmiddelværdier eller månedsmiddelværdier ikke særlig godt den belastning, der eventuelt kan påvirke træerne. Da fluktuationer i nogen grad er årstids- og døgnbestemt, er det muligt at beregne et "forureningsindex", der kan estimere eventuelle påvirkninger af vegetationen. Ved valget af midlingsperioder lægges der især vægt på koncentrationsforløbet i vækstperioderne, det vil sige dagtimerne i vækstsæsonen 1. maj til 1. oktober, jvf. *tabel 5, afsnit 4.1*.

Figur 12 viser årsforløbet i Ulborg af den daglige middelkoncentration fra kl. 9 til 16 (den fuldt optrukne linje) samt de maximale 1-times koncentrationer per døgn (den stiplede linje). Disse værdier kan umiddelbart sammenlignes med "critical levels" gengivet i *afsnit 3.2*. Critical level for ozon for h.h.v. daglig middel (25 ppb) og 1 times maximum (75 ppb) er indlagt som en vandret linje i *figur 12*. *Figur 13* viser tilsvarende data fra Frederiksborg.

Ozonkoncentrationer målt i 1991 er på Frederiksborgstationen noget lavere end målingerne fra Ulborg. Dette skyldes bl.a. at luftindtaget i en periode har været for lavt placeret i forhold til de omgivne træer, der netop på denne station har en stor højdetilvækst. De høje træer absorberer en del af ozonen, før den når frem til målepunktet. Fra februar 1992 er luftindtaget i Frederiksborg hævet til trætophøjde, hvorefter koncentrationsniveauet ligger nærmere ved Ulborg-målingerne. Gennemsnitsniveauet på Frederiksborg er dog stadig lidt lavere end på Ulborg, givetvis som følge af et forhøjet NO-niveau i det nordsjællandske område.

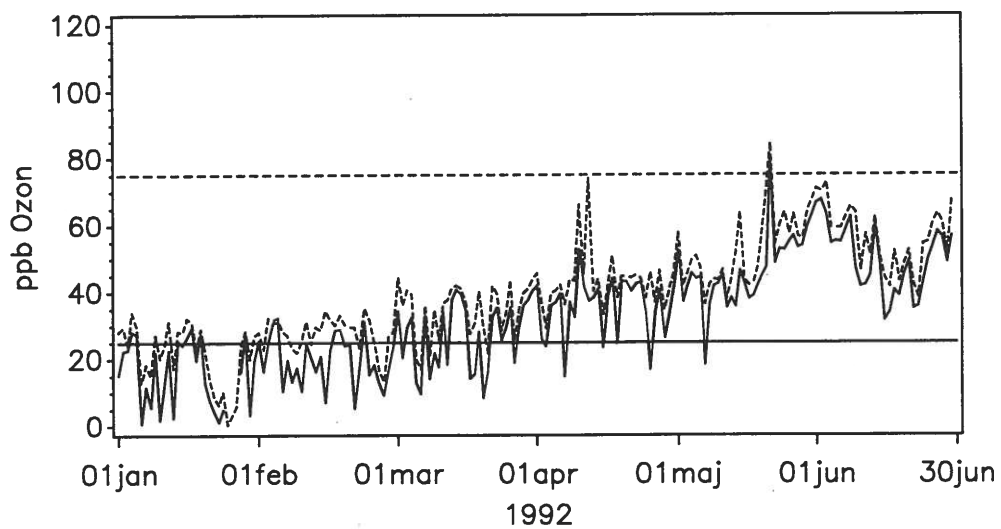
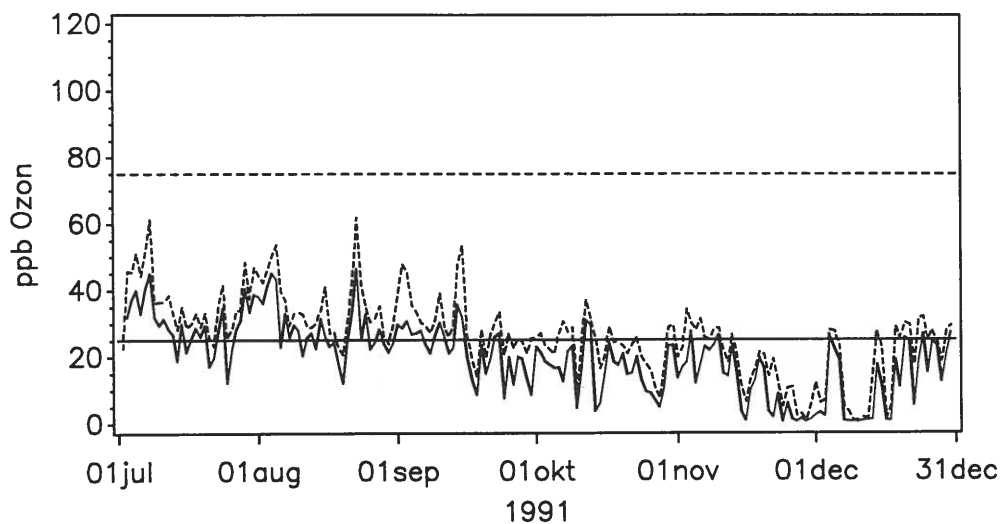


Figur 11. Ozonkoncentrationsforløbet udregnet som halvtimes middelværdier. Perioden 1/7 1991 til 30/9 1992, for stationen Ulborg.



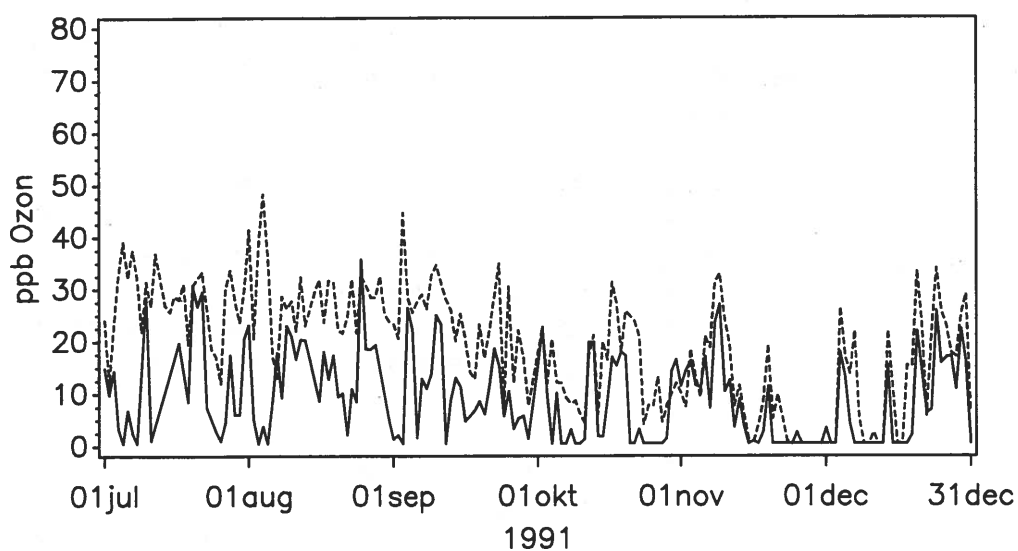
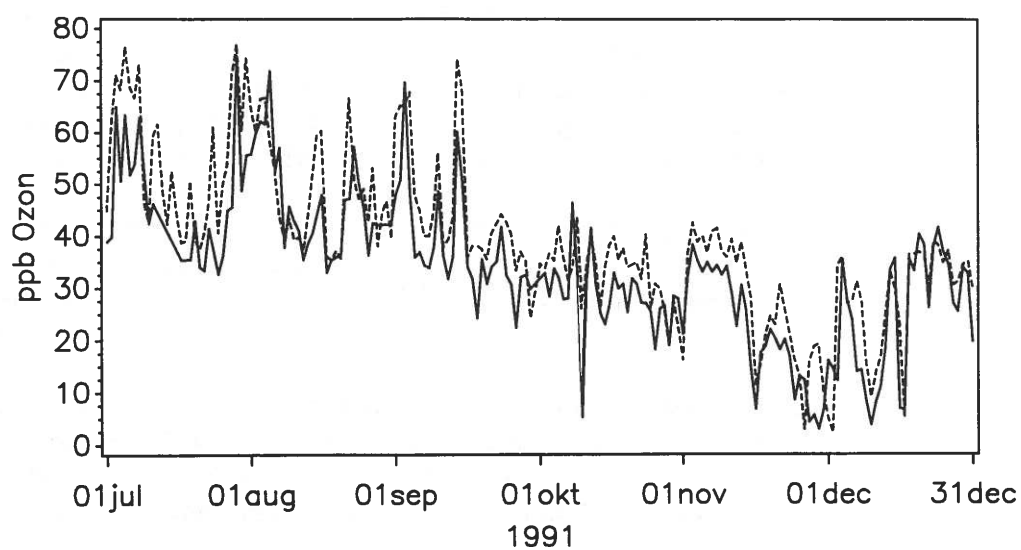
— 7-times gennemsnit (9–16) per døgn
 ---- 1-times maximum per døgn

Figur 12. Ozonkoncentrationsforløbet over året i Ulborg. Gennemsnitskoncentrationen per døgn beregnet fra kl. 9 til 16 ses som optrukken linje; et-times maximal-koncentrationer per døgn som stiplet linje. Som vandrette linjer er indlagt "den kritiske grænseværdi" for henholdsvis 7-timers middel (25 ppb fuldt optrukket linje) og 1-times max. per døgn (stiplet linje 75 ppb).



— 7-times gennemsnit (9–16) per døgn
 ---- 1-times maximum per døgn

Figur 13. Ozonkoncentrationsforløbet over året i Frederiksborg. Gennemsnitskoncentrationen per døgn beregnet fra kl. 9 til 16 ses som optrukken linje; et-times maximal-koncentrationer per døgn som stiplet linje. Som vandrette linjer er indlagt "den kritiske grænseværdi" for henholdsvis 7-timers middel (25 ppb fuldt optrukket linje) og 1-times max. per døgn (stiplet linje 75 ppb).



Lokalitet : — Lille Valby
 ---- Ulborg

Figur 14. Sammenligning mellem ozonkoncentrationer målt i Ulborg og i Lille Valby ved Roskilde. En-times max-værdier per døgn er sammenlignet mellem de to stationer (øverst), en-times min-værdier per døgn er gengivet nederst.

Det er desuden bemærkelsesværdigt, at de højeste koncentrationer optræder i den for nåletræerne kritiske periode, hvor strækingsvæksten af de nye skud og nåle foregår. I begyndelsen af juni er det årsskuddene fra sidste år, der står for størstedelen af primærproduktionen. De dannede produkter allokeres til de nye skud, der endnu ikke selv har nogen nævneværdig fotosyntese. Det er i flere udenlandske undersøgelser vist, at assimilationsprodukterne allokeres skævt, f.eks. målt som skud/rod - forhold, ved ozonpåvirkning.

For at sammenligne ozonkoncentrationer i det østlige Danmark med målinger fra det vestlige, er målinger fra Ulborg sammenlignet med målinger fra Lille Valby ved Roskilde (Kemp, Manscher, 1993), figur 14.

Af figur 14 fremgår det, at såvel maximum som minimum-værdierne er lavere på Lille Valby sammenlignet med Ulborg, som beskrevet i afsnit 3.2. Efter at luftindtaget er hævet på Frederiksborg, viser denne station næsten de samme niveauer som Lille Valby.

5.2 Svovl- og nitrogenforbindelser

Atmosfærens transport og deposition af svovl- og nitrogenforbindelser kan opdeles i gasformige, partikulære og nedbørsopløste forbindelser.

Gasser

Koncentrationsmålinger af svovldioxid og nitrogendioxid er vist i figur 15 og 16. Nitrogendioxid er i hele perioden 1991/92 kun målt på Ulborg-stationen. De største koncentrationer ses i vintersæsonen. Der nås sjældent plantetoxiske niveauer, således er den plantetoxiske virkning af svovldioxid og nitrogendioxid tilsyneladende ikke noget problem i danske landdistrikter i perioden 1991/92.

Døgnmiddelværdier af ammoniak er vist i figur 17. Lindet-stationen udviser de højeste toppe på op til 10 $\mu\text{g NH}_3\text{-N}$ per m^3 . Stationen med de næsthøjeste niveauer er Ulborg, mens Frederiksborg ligger lavest. Dette er en direkte følge af den aktuelle landbrugsaktivitet i de respektive områder. Den hyppigste forekomst af høje niveauer ses i perioden maj til juli 1992.

Partikler

Atmosfærens indhold af partikulært nitrat og gasformigt salpetersyre, er bestemt som summen af disse forbindelser, døgnmiddelværdier ses i figur 18. Niveauer af ammonium og nitrat målt på de forskellige stationer er meget ens, som følge af at disse forbindelser er storskala-transporteret. Episoder med høje niveauer ses især i de tidlige forårsmåned og i efterårskvartalet.

Tørdeposition

Tilførslen af gasser og partikler til vegetationen sker som tørdeposition. Tørdepositionen har stor betydning for tilførslen af svovl og kvælstof til skovøkosystemer, samt for skovjordenes forsyning, idet

kvælstof- og svovlholdige gasser i forbindelse med depositionen på og optagelse i planterne oxideres til stærke syrer.

For at beregne tørdepositionens størrelse kræves aktuelle målinger af koncentrationsforløbet over året, samt måling eller beregning af depositions-hastigheden af de pågældende stoffer. Det vil sige bestemmelse af den hastighed, hvormed gasformigt og partikulært stof afsættes på eller optages af vegetationen.

Måling af depositions-hastigheder er en meget vigtig arbejdsopgave i det her rapporterede projekt. Disse målinger udføres især på Ulborg-stationen (se afsnittet om kvælstofdeposition). Depositions-hastighederne af ammoniak og ozon er påbegyndt i 1991, for øvrige gasser og partikler haves kun litteraturopgivelser for tørdepositionshastigheder. Disse estimer er ikke blot usikre, men for lange perioders vedkommende direkte fejlagtige. Grunden hertil er, at depositions-hastighederne kan variere med en faktor 10 som funktion af meteorologiske og vegetationsmæssige forhold. *Tabel 6, 7 og 8* viser tørdepositionsestimater baseret på gennemsnitsværdier af aktuelt målte koncentrationer og litteraturværdier af depositions-hastighed, for stationerne Ulborg, Frederiksborg og Lindet.

Tabel 6. Tørdeposition på Ulborg 1991/92 målt og beregnet for svovl- og kvælstofforbindelser. G=gas, P=partikler.

Stof	Fraktion	Depositions hastighed cm/sek	Koncentration års-middel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Deposition $\text{mg}/\text{m}^2 \cdot \text{år}$	Deposition H^+ $\text{mmol}/\text{m}^2 \cdot \text{år}$
SO ₂ -S	G	0,8	1,18	297	19
SO ₄ ²⁻ -S	P	0,2	1,69	106	
NH ₃	G	2,5-4,0	0,53	425-680	
NH ₄ ⁺ -N	P	0,2	2,08	131	
NO ₂ -N	G	0,4	1,34	169	12
NO ₃ ⁻ -N	G+P	1,0	1,02	321	
Sum-S				403	25
Sum-N				1046-1301	75
SUM					100

Tabel 7. Tørdeposition på Frederiksborg 1991/92 målt og beregnet for svovl- og kvælstofforbindelser. G=gas, P=partikler.

Stof	Fraktion	Depositions hastighed cm/sek	Koncentration års-middel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Deposition $\text{mg}/\text{m}^2 * \text{år}$	Deposition H^+ $\text{mmol}/\text{m}^2 * \text{år}$
SO ₂ -S	G	0,8	2,01	529	33
SO ₄ ²⁻ -S	P	0,2	1,79	113	
NH ₃	G	2,5	0,28	221-353	
NH ₄ ⁺ -N	P	0,2	2,13	134	
NO ₂ -N	G	0,4	-	340*	24
NO ₃ ⁻ -N	G+P	1,0	1,09	343	
Sum-S				642	40
Sum-N				1038-1170	74
SUM					114

* Beregnet ud fra tidligere års målinger.

Tabel 8. Tørdeposition på Lindet 1991/92 målt og beregnet for svovl- og kvælstofforbindelser. G=gas, P=partikler.

Stof	Fraktion	Depositions hastighed cm/sek	Koncentration års-middel $\mu\text{g}/\text{m}^3$	Deposition $\text{mg}/\text{m}^2 * \text{år}$	Deposition H^+ $\text{mmol}/\text{m}^2 * \text{år}$
SO ₂ -S	G	0,8	1,69	426	
SO ₄ ²⁻ -S	P	0,2	1,78	112	
NH ₃	G	2,5	1,53	1205-1928	
NH ₄ ⁺ -N	P	0,2	2,55	161	
NO ₂ -N	G	0,4	-	340*	
NO ₃ ⁻ -N	G+P	1,0	1,32	416	
Sum-S				538	34
Sum-N				2122-2845	145
SUM					179

* Estimeret som for Frederiksborg.

Våddeposition

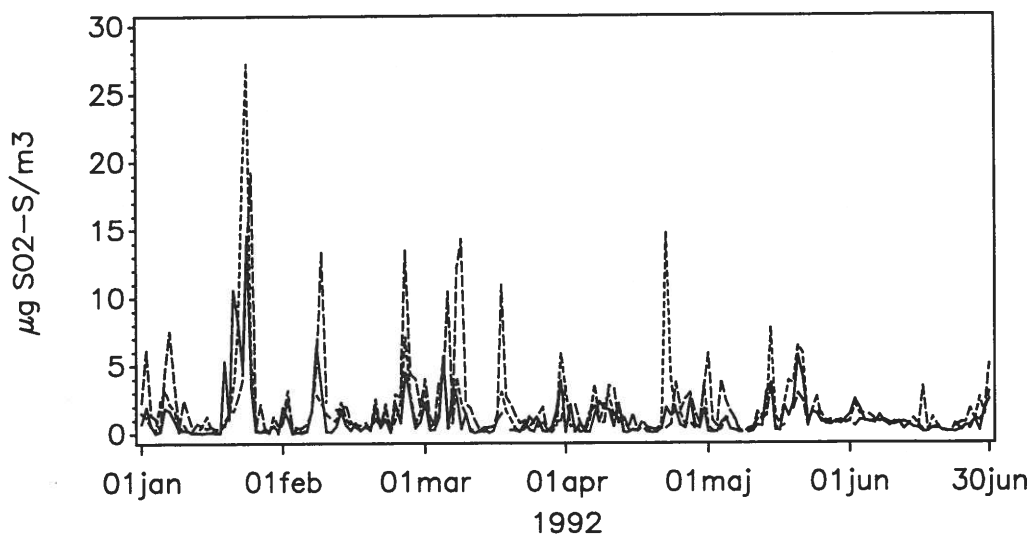
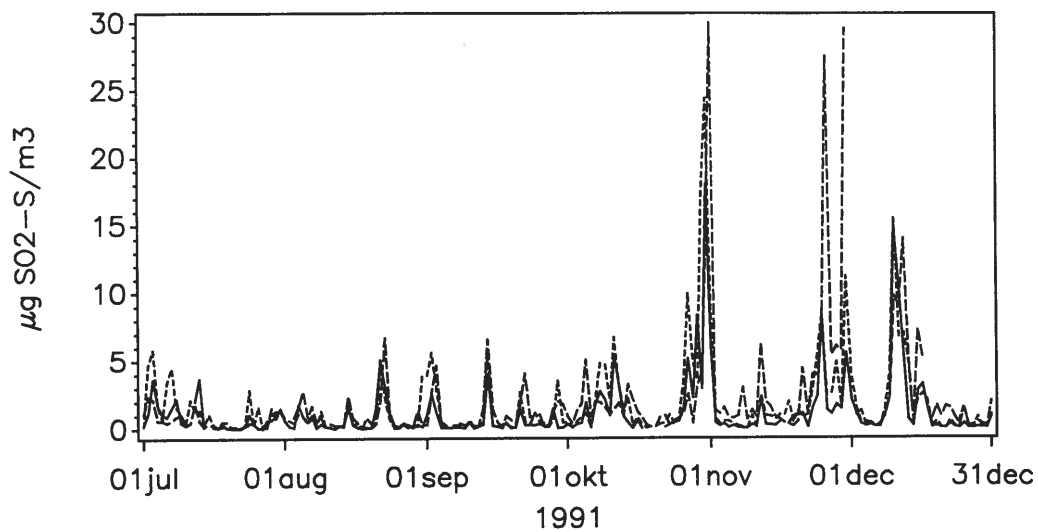
Våddeposition målt med tragtopsamlinger (bulk deposition) er vist i *tabel 9*, og summen af tør- og våddeposition er vist i *tabel 10*.

Tabel 9. Våddeposition (bulk deposition) målt på Ulborg, Frederiksborg og Lindet i perioden 1/7 1991 til 30/6 1992.

	Ulborg	Frederiksborg	Lindet
Stof	mg/m ² * år		
Nedbør	717	591	688
H ⁺	26	23	19
NH ₄ ⁺ -N	338	348	513
NO ₃ ⁻ -N	363	329	410
Sum-N	701	677	922
SO ₄ ⁻ -S	749	544	893

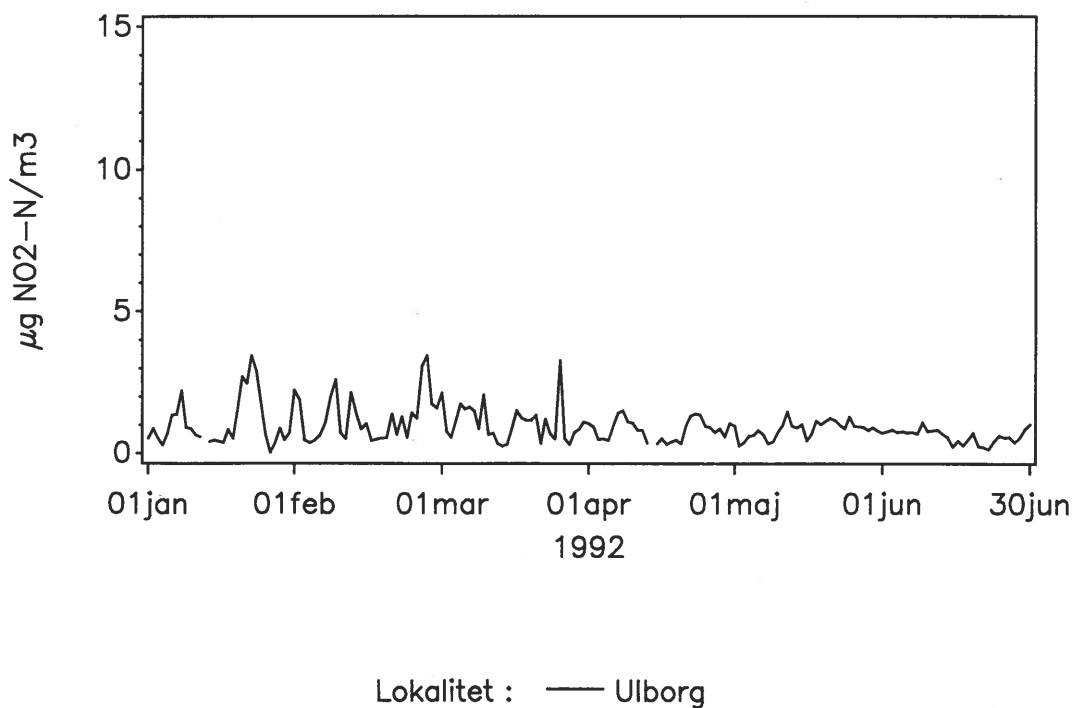
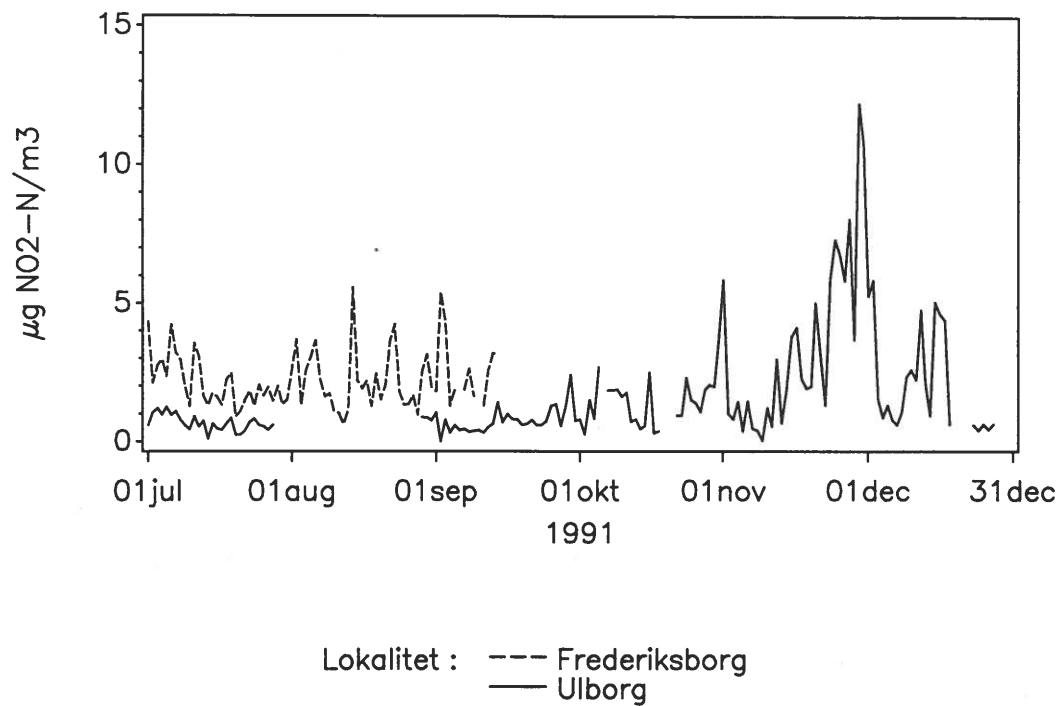
Tabel 10. Våd- plus tørdeposition målt på Ulborg, Frederiksborg og Lindet i perioden 1/7 1991 til 30/6 1992.

	Ulborg	Frederiksborg	Lindet
Stof	mg/m ² * år		
H ⁺ (syre)	57	80	70
Kvælstof	1900	1800	3400
Svovl	1200	1200	1400

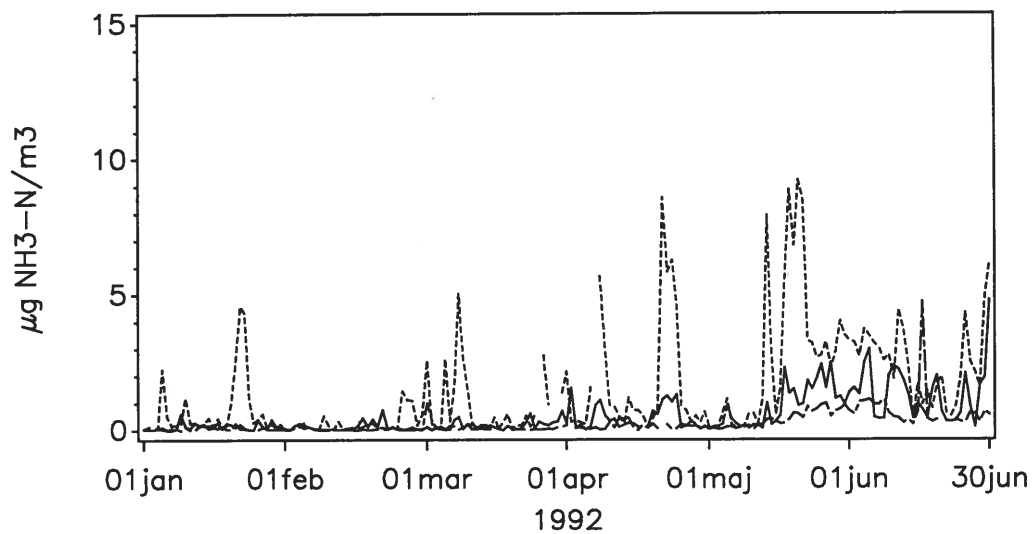
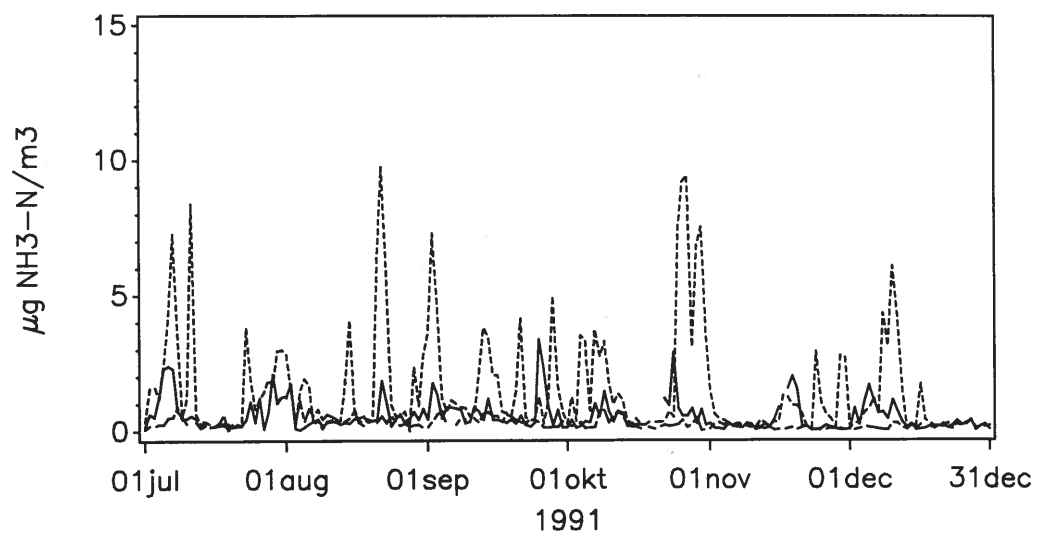


Lokalitet : --- Frederiksborg
 Lindet
 ——— Ulborg

Figur 15. Svovldioxid, døgnmiddel-koncentrationer i perioden 1/7 1991 til 30/6 1992, for stationerne Frederiksborg, Lindet og Ulborg. De højeste værdier måles på stationerne Lindet og Frederiksborg.

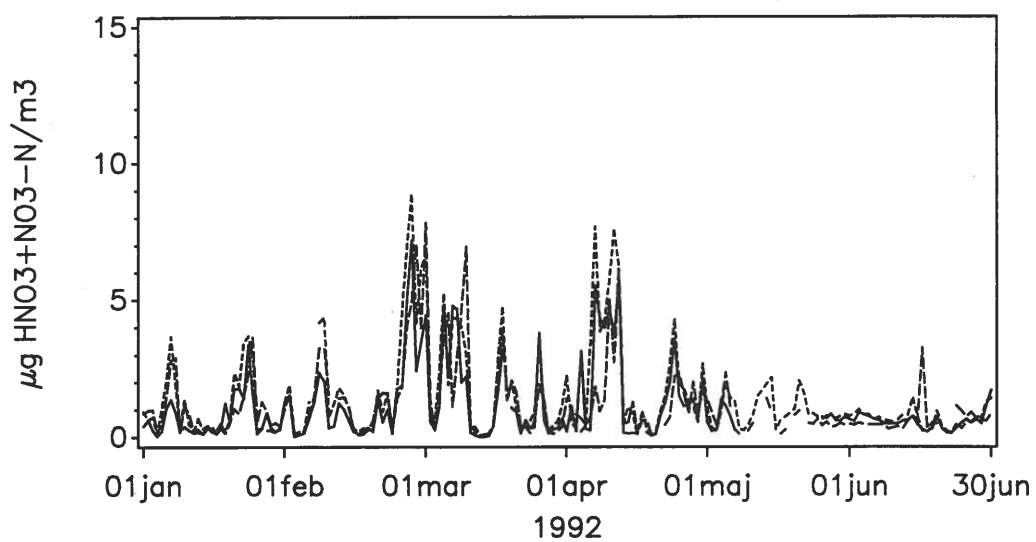
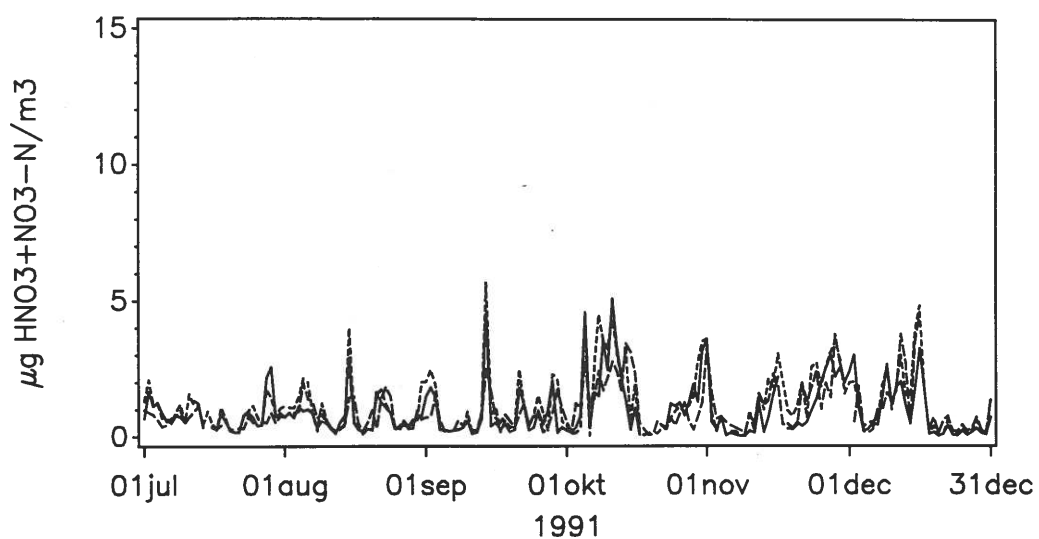


Figur 16. Nitrogendioxid, døgnmiddelkoncentrationer i perioden 1/7 1991 til 30/6 1992, målt på Ulborg.



Lokalitet : --- Frederiksborg
 Lindet
 ——— Ulborg

Figur 17. Ammoniak, døgnmiddelkoncentrationer i perioden 1/7 1991 til 30/6 1992, for stationerne Frederiksborg, Lindet og Ulborg.



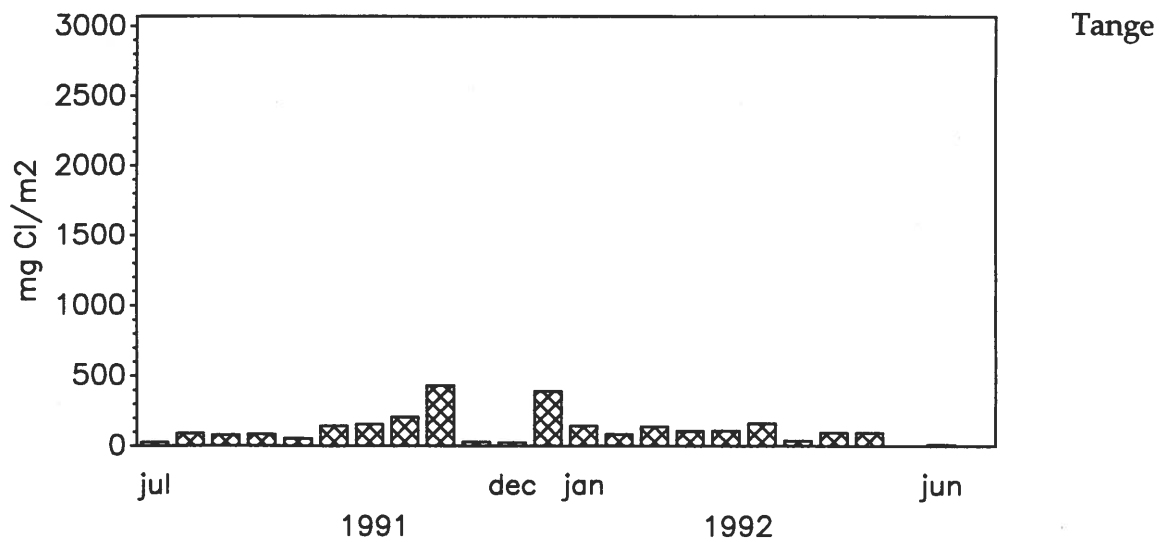
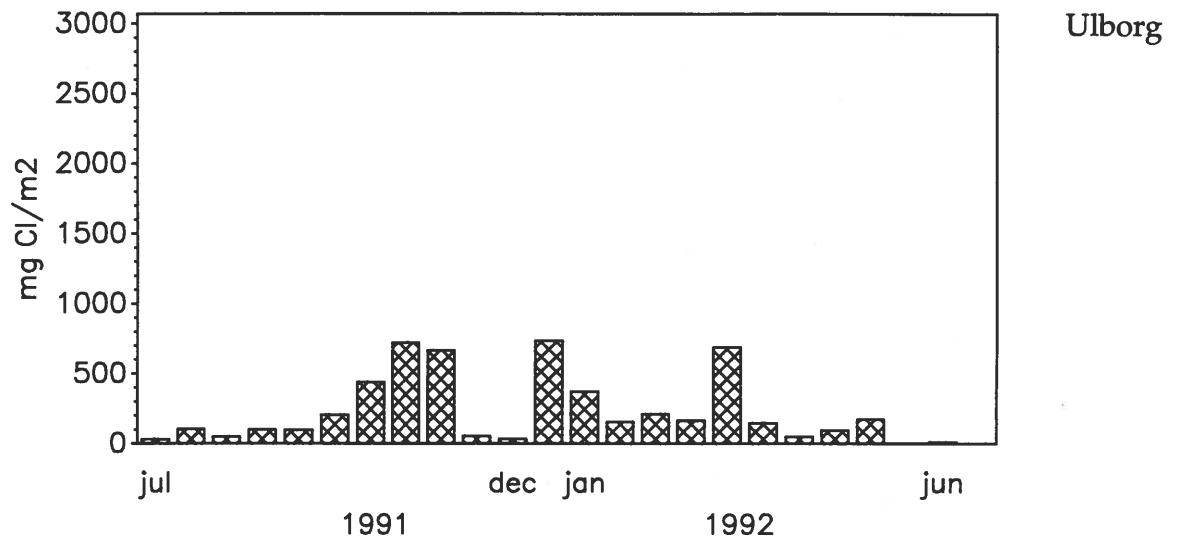
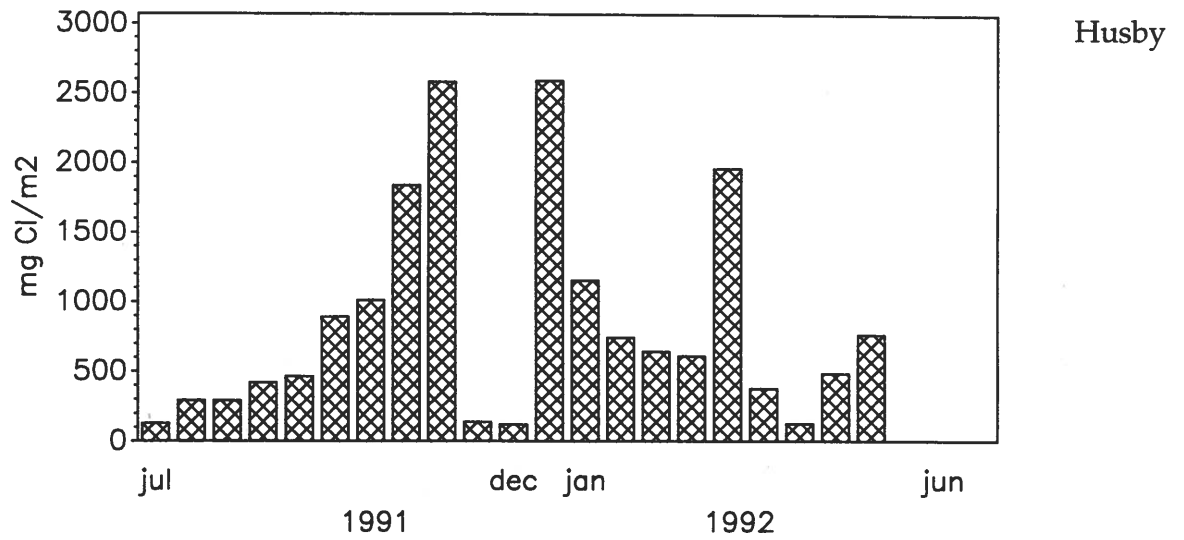
Lokalitet : --- Frederiksborg
 Lindet
 ——— Ulborg

Figur 18. Total-nitrat, døgnmiddel-koncentrationer i perioden 1/7 1991 til 30/6 1992, for stationerne Frederiksborg, Lindet og Ulborg.

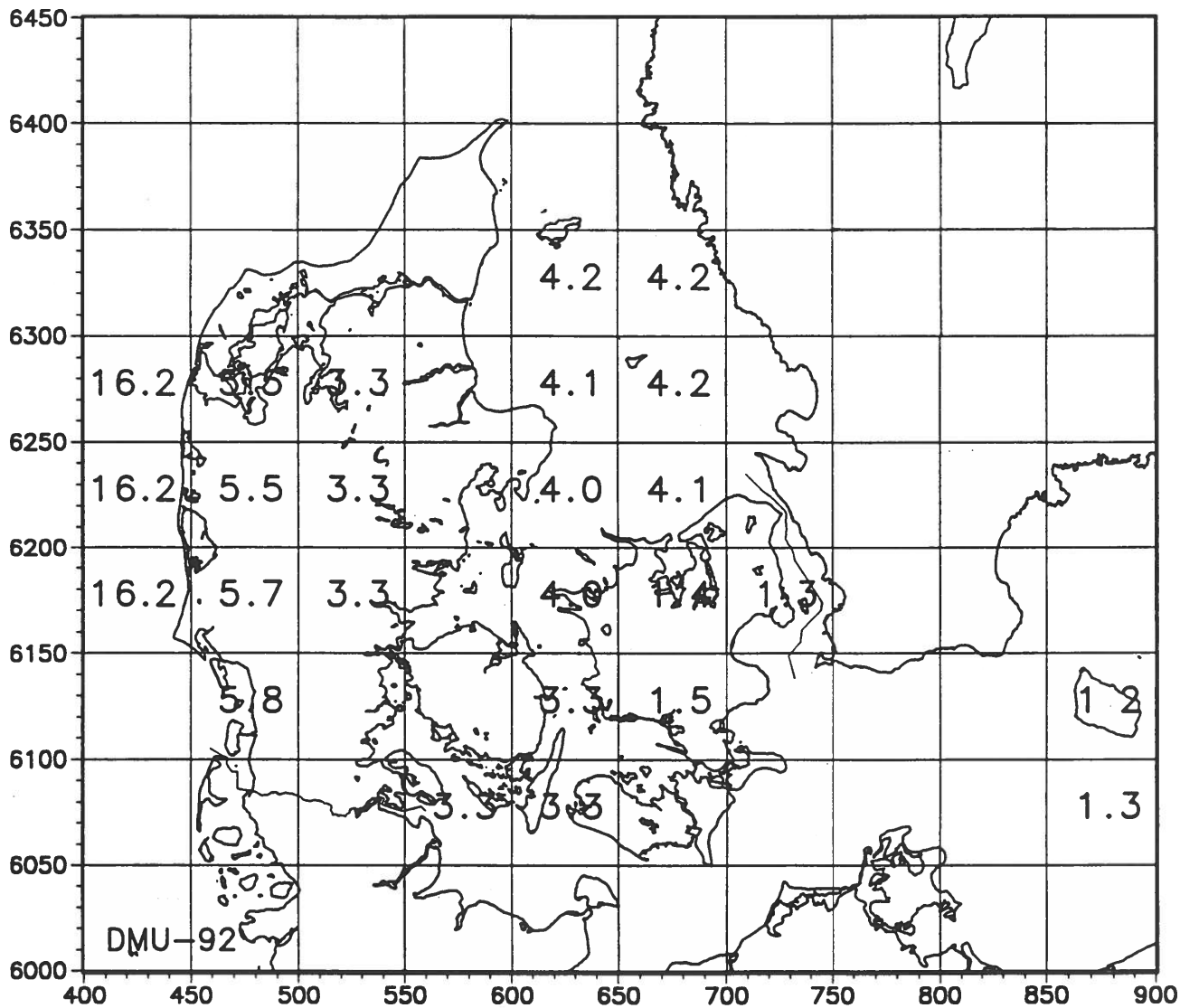
5.3 Deposition af havsalt

Der er i perioden 1991-1992 målt havsaltkomponenter i aerosoler, nedbør og dryp. *Figur 19* viser natriumdepositionen målt i nedbør (bulk deposition) på tre jyske stationer der ligger på en linje vest-øst med stigende afstand henholdsvis 2 km, 20 km og 70 km fra Vesterhavet. Det ses tydeligt på søjlediagrammet at saltdepositionen følger det samme tidsmæssige mønster i de 24 måleperioder, men at niveauerne er højere på de kystnære stationer. *Figur 20* viser det samme fænomen her gengives den landsdækkende fordeling af natriumdepositionen i kalenderåret 1991 (*Hovmand et al., 1992*).

Sammenlignet med saltdepositionen målt på Ulborg over en årrække *figur 6*, viser perioden 1991-1992 en normal deposition. Den resulterende saltkoncentration i jordvæsken afhænger dels af tilførslerne, dels af nedbørsmængden og endelig af evapotranspirationen. Disse størrelser er også målt, men ikke referet her.



Figur 19. Kloriddeposition per måned målt på stationerne Husby, Ulborg og Tange. Stationerne er placeret med stigende afstand fra den jyske vestkyst.



Figur 20. Kloriddeposition (bulkdeposition) for 1991 målt på kyst-, skov- og naturarealer. Værdierne er indlagt i et 50x50 km² kvadratnet. Koordinaterne angiver km i UTM-nettet. Enhed ton Cl/km², år. (Hovmand et al., 1992).

6 Sammenfatning og konklusion

På tre faste måleflader i Ulborg, Frederiksborg og Lindet skovdistrikter har DMU i 1991/92 målt atmosfærens indhold af en række gasser og aerosoler; desuden er den kemiske sammensætning af nedbør og gennemdryp fra rødgran målt. Måleprogrammet omfatter målinger af kemiske forbindelser med mulige virkninger for trævækst og stofcirkulationen i skovøkosystemet.

Ozon-målinger viste høje koncentrationer i august 1991 og i forår og sommer 1992. 1-times maxværdier overskred 75 ppb-niveauet (critical level) et par gange i løbet af foråret 1992. Critical level for 7 timers dagmiddelværdier er 30 ppb, dette niveau var næsten konstant overskredet i april, maj og juni; heri afveg første halvår ikke væsentligt fra de foregående år. De målte 7 timers dagmiddelværdier ligger i foråret 1992 i det meste af tiden på mellem 40 og 70 ppb, svarende til de niveauer hvor effekter på træer begynder at kunne identificeres. Danske målinger viser, at en fremskreden senescens hos bøg også kunne konstateres. Udenlandske målinger har vist, at træerne er særdeles ozonfølsomme i den for nåletræernes kritiske forårsperiode, hvor strækningsvæksten foregår. Denne periode udviser også for 1992 de højeste ozonkoncentrationer.

Svovldioxid og nitrogendioxid viste høje døgnværdier i november, december 1991 og januar 1992. Maximale døgn-koncentrationer var $20 \mu\text{g SO}_2\text{-S/m}^3$ henholdsvis $12 \mu\text{g NO}_2\text{-N/m}^3$. Årsmiddelmålinger er $1,5 \mu\text{g SO}_2\text{-S/m}^3$ henholdsvis $1,3 \mu\text{g NO}_2\text{-N/m}^3$ i Vestjylland og ca. dobbelt så høj i Østdanmark, hvilket er uændret i forhold til tidligere år.

Ammoniak koncentrationen målt på skovmålestationerne er højest på den sønderjyske station med maksimal-koncentrationer op til $10 \mu\text{g NH}_3\text{-N/m}^3$. Gennemsnittet for de jyske stationer ligger på mellem $0,5$ og $1,5 \mu\text{g NH}_3\text{-N/m}^3$, hvilket er uændret i forhold til de forrige år. Atmosfærens indhold af ammoniak, salpetersyre og nitrogendioxid og tørdepositionen af disse forbindelser bidrager med en stor andel af den samlede kvælstofdeposition til skovøkosystemer. For 1991/92 er kvælstoftørdepositionen målt og beregnet til 13 kg N/ha år på Ulborg. Stor usikkerhed knytter sig til bestemmelsen af tørdeposition, hvorfor en række forsøg, finansieret af Skov- og Naturstyrelsen-, EF's forskningsfonde og Det Strategiske Miljøforsknings Program, er iværksat. På lokaliteten i Ulborg skovdistrikt viste målinger gennemført i 1990-92, at tørdepositionen af ammoniak til nåleskov er ca. tre gange større end før antaget, nemlig omkring 7 kg N/ha år.

Våddepositionen af uorganisk kvælstof og antropogent emitteret svovl er relativt jævnt fordelt over landet. Summen af våd- og tørdeposition af henholdsvis kvælstof og svovl er for nåleskov målt og beregnet for 1991/92. Depositionerne var:

Ulborg	19 kg N/ha/år	11-23 kg S/ha/år
Frederiksborg	18 kg N/ha/år	12 kg S/ha/år
Lindet	34 kg N/ha/år	14 kg S/ha/år

Disse værdier afviger ikke meget fra de tidligere år. Der er dog en tendens til et fald i våddepositionen af svovl i perioden 1985 til 1992.

Havsalt transporteres via atmosfæren i stor mængde til alle danske skovdistrikter, men nedfaldet er størst på de vestjyske målestationer. I 1991/92 var kloriddepositionen målt som gennemdryp 106-157 kg Cl/ha/år på Ulborg og 104 kg Cl/ha/år på Lindet. Atmosfærisk deposition af havsalt har en direkte fysiologisk "saltstress" virkning på træerne, saltdepositionen har især på de sandede jorde en indirekte forsurende virkning på jordvæsken, idet bundne brintioner (syre) ved ombytning med havsaltioner sandsynligvis frigøres til jordvæsken.

Brintioner (stærk syre) tilføres skovøkosystemet dels med nedbør dels ved absorption og absorption af svovldioxid og nitrogendioxid og efterfølgende oxidation til syre. Herudover kommer der en indirekte forsurende virkning på jorden ved udvaskning af nitrat. Tilførslen af brintioner og indirekte forsurende virkning var i 1991/92 for Ulborg:

Direkte tilførsel.

Med nedbør	0,26 keqv/ha/år
Med gasser	0,31 keqv/ha/år

Sammenfattende kan det siges, at for sidste halvår 1991 og første halvår 1992, har der ikke været nogen markante ændringer i luftforureningssituationen i forhold til 1990/91. Men det kan konkluderes, at ozon-koncentrationerne stadig er høje set i relation til planteskadelige niveauer.

Deposition af svovlforbindelser og nitrogenforbindelser har en forsurende virkning på skovjorden, hvilket på længere sigt kan forringe trævæksten. Tilførslen af havsalt til skov kan især på næringsfattige sandede jorde tilføre plantenæringsstoffer men også medføre forsurende virkning af jordvæsken.

7 Referencer

Andersen, H.V., Hovmand, M.F.H., Hummelshøj, P., Jensen N.O. (1993): Measurements of Ammonia Flux to a Spruce Stand in Denmark. *Atmospheric Environment* 27A, 189-202.

Christensen, N., Fenger, J., Mortensen, L., Ro-Poulsen, H., Nielsen, P.Aa. (1985): Luftforurening med kvælstofoxider i Danmark. Miljøprojekt 62. Miljøstyrelsen. 162 pp.

Fenger, J., Johnsen, I., Mortensen, L., Ro-Poulsen, H. (1983): Fotokemisk luftforurening. Miljøprojekt 45, Miljøstyrelsen. 152 pp.

Forskningscentret for Skov & Landskab (1993): Ionbalance og Luftforurening. Slutberetning 9060-DK0020. Forskningscentret for Skov og Landskab, Skovbrynet 16, DK-2800 Lyngby.

Grundahl, L., Grønbeck, J. (1990): Atmosfærisk nedfald af næringssalte i Danmark. NPO-forskning fra Miljøstyrelsen. Nr. A6, Miljøstyrelsen.

Heidam, N.Z. (1986): DK-EMEP. Bulletin 1978-82. MST Luft-A102. Miljøstyrelsens Luftforureningslaboratorium, DK-4000 Roskilde.

Hertel, O., Hovmand, M.F. (1991): Rural ozone in Denmark, 1985-1989. NERI Technical Report No. 35. National Environmental Research Institute, DK-4000 Roskilde, Denmark.

Hovmand, M.F. (1984): Atmosfærisk metalnedfald i Danmark 1983. MST LUFT-B103. Miljøstyrelsens Luftforureningslaboratorium, DK-4000 Roskilde.

Hovmand, M.F., Bille-Hansen, J. (1988): Ionbalance i Skovøkosystemer, med Måling af Atmosfærisk Stoftilførsel. II. MST LUFT-A127. Miljøstyrelsens Luftforureningslaboratorium, DK-4000 Roskilde.

Hovmand, M.F., Grundahl, L., Kemp, K. (1992): Vandmiljøplanens overvågningsprogram, Atmosfærisk deposition. Faglig rapport fra DMU, nr. 59. Danmarks Miljøundersøgelser, DK-4000 Roskilde.

Hovmand, M.F., Grundahl, L., Runge, E.H., Kemp, K. Aistrup, W. (1993): Vandmiljøplanens overvågningsprogram, Atmosfærisk deposition af kvælstof og fosfor. Faglig rapport fra DMU, nr. 91. Danmarks Miljøundersøgelser, DK-4000 Roskilde.

Kemp, K., Manscher, O.H. (1993): Danish Air Quality Monitoring Program Annual Datareport 1992. Report LMP-5/93. National Environmental Research Institute, Department of Emissions and Air Pollution. 59 pp.

Mikkelsen, T.N. (1993): Ecophysiological studies of beech and Norway spruce exposed to low levels of ozone. Ph.D. thesis. University of Copenhagen, Botanical Institute, Department of plantecology. 147 pp.

Pedersen, L.B. (1992): Nåle-/løvfaldets variation i rødgran, sitkagran og bøgebevoksninger i relation til skovøkosystemers stabilitet. Dansk Skovbrugs Tidsskrift 4/92: 210-216.

Pedersen, L.B. (1993): Dieback of Norway spruce in Denmark and changes in soil water chemistry encouraged by high sea salt deposition. Forest & Landscape Research vol. 1. In press.

Rasmussen, L. (1988): Sur nedbørs effekt på ionbalancen og udvaskningen af metaller og anioner i danske nåleskovsøkosystemer i perioden 1983-1987. Energiministeriet: EM-Journal nr.:1323/86-16.

Raulúnd Rasmussen, K. (1991): Thesis. Kongelig Veterinær- og Landbohøjskole, København.

SAS (1990): SAS Institute Inc., SAS/Graph Software: Reference. Cary, N.C. 1,416.

UNECE (1988): ECE Critical levels workshop Bad Harzburg, FRG. UNECE, Geneva, Switzerland.

Van der Eerden, L. (1992): Fertilizing effects of atmospheric ammonia on semi-natural vegetations. G&C, Wageningen. 131 pp.

World Health Organisation (1987): Air Quality Guidelines for Europe, WHO-regional publications, European Serials No 23. 297-314. WHO-Copenhagen, Denmark.

Summery in English

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 forest ecosystems, in order to improve the basis of knowledge and understanding of the element balance and production of the forests under changing environmental conditions as well as the procurement of operational counter actions. The project further 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 forests, especially in the western part of Denmark.

Three monitoring stations for various atmospheric components are operating in three Danish forests districts; Frederiksborg, Ulborg and Lindet. In every district one stand with Norway spruce, Sitka 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, so that it is easier to make extrapolations to Danish forestry as a whole. 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 stands under investigation. Following main results have been found:

Ozone

The ozone levels are highest in the summer period, when the conifers are most sensitive to ozone. One-hour maximum values exceeded the 75 ppb-level, the critical level, in episode of a few days duration. The corresponding critical level for the 7-hour daily mean is 30 ppb. This level was almost constantly exceeded during the months of April, May, and June. The measured ozone concentrations are thus within the area where effects on trees can be identified.

Sulphur dioxide and nitrogen dioxide

High day and night values are found during the winter months. The annual mean concentration is about twice as high at Frederiksborg as at Ulborg. Danish values are relatively low compared to levels in Central Europe.

Sulphur

Sulphur deposition amounts to between 11 and 23 kg S/ha per year at Ulborg. A small decrease of sulphur deposition is seen in the period 1985 to 1992.

Ammonia

The concentration is highest at Lindet with $10 \mu\text{g NH}_3\text{-N/m}^3$ as the maximum concentration compared to $0.5 \mu\text{g/m}^3$ and $1.5 \mu\text{g/m}^3$ in the other districts. During the project period the dry deposition of ammonia to coniferous forest, Ulborg, is observed to be about 3 times larger that hitherto assumed: 7 kg N/ha.

Nitrogen

Nitrogen deposition to the forest area is in total between 17 and 20 kg N/ha per year at Ulborg.

Sea salt

The highest depositions of sea salt have been found in the middle and in the end of the 1980s. During the same period the health of especially the main tree species Norway spruce has generally been poor. In publications from the project on physiological salt stress have been connected with the health condition, since the episodes, especially in salt stress have been connected with the health condition, since the episodes, especially in the end of the 1980s, have occurred in years, when the precipitation surplus has been low.

Biogeochemistry

A marked decrease in pH of the soil water sampled from the Jutlandic districts, especially under the Sitka spruce plots, has been observed. The decrease in pH may be connected with the episodes of high sea salt deposition and the poor base status of the soil. The content of plant available base cations in the soil is lowest at Lindet and highest at Frederiksborg.

Element balances

The research has been most intensive at Ulborg and at Frederiksborg forest district. The element balances at Ulborg indicate that the atmospheric deposition of base cations is of major importance to the nutrient supply of the forest.

Danmarks Miljøundersøgelser

Danmarks Miljøundersøgelser - DMU - er en forskningsinstitution i Miljøministeriet. 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
Vejlsovej 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 Rønde

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.

