

# Naturens tålegrænser for luftforurening

---

Morten Strandberg  
Lisbeth Mortensen

Danmarks Miljøundersøgelser 1996

TEMA-rapport fra DMU, 1996/7,  
Naturens tålegrænser for luftforurening

Forfattere: Morten Strandberg<sup>1</sup>, Lisbeth Mortensen<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Terrestrisk Økologi

<sup>2</sup> Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Atmosfærisk Miljø

Udgiver: Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser®

Layout: Kathe Møgelvang, Juana Jacobsen

Forsidefoto: Knud Vittrup Bak, Fotofly Luftfotografering

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Tryk: Silkeborg Bogtryk

Papir: Cyclus Print

Sideantal: 40

Oplag: 1500

ISSN: 0909-8704

ISBN: 87-7772-282-5

Pris: 60,- kr.

Klassesæt á 30 stk: 900,- kr.

Abonnement (5 numre): 225,- kr.

(Alle priser er incl. moms, excl. forsendelse)

Købes hos:

Danmarks Miljøundersøgelser

Vejsøvej 25, Postboks 314

DK-8600 Silkeborg

Tlf. 89 20 14 00

Fax 89 20 14 14

Miljøbutikken

Information og bøger

Læderstræde 1

DK-1201 København K

Tlf. 33 92 76 92 (Information)

Tlf. 33 37 92 92 (Bøger)

Forord	5
Indledning	7
Problemer som følge af luftforurening	9
Begrænsning af luftforurening	17
Tålegrænser	20
Forskning	23
Kortlægning	29
Fremtiden	31
Sammenfatning	35
Litteratur	36

Danmarks Miljøundersøgelser

Tidligere udgivelser i serien TEMA-rapporter fra DMU

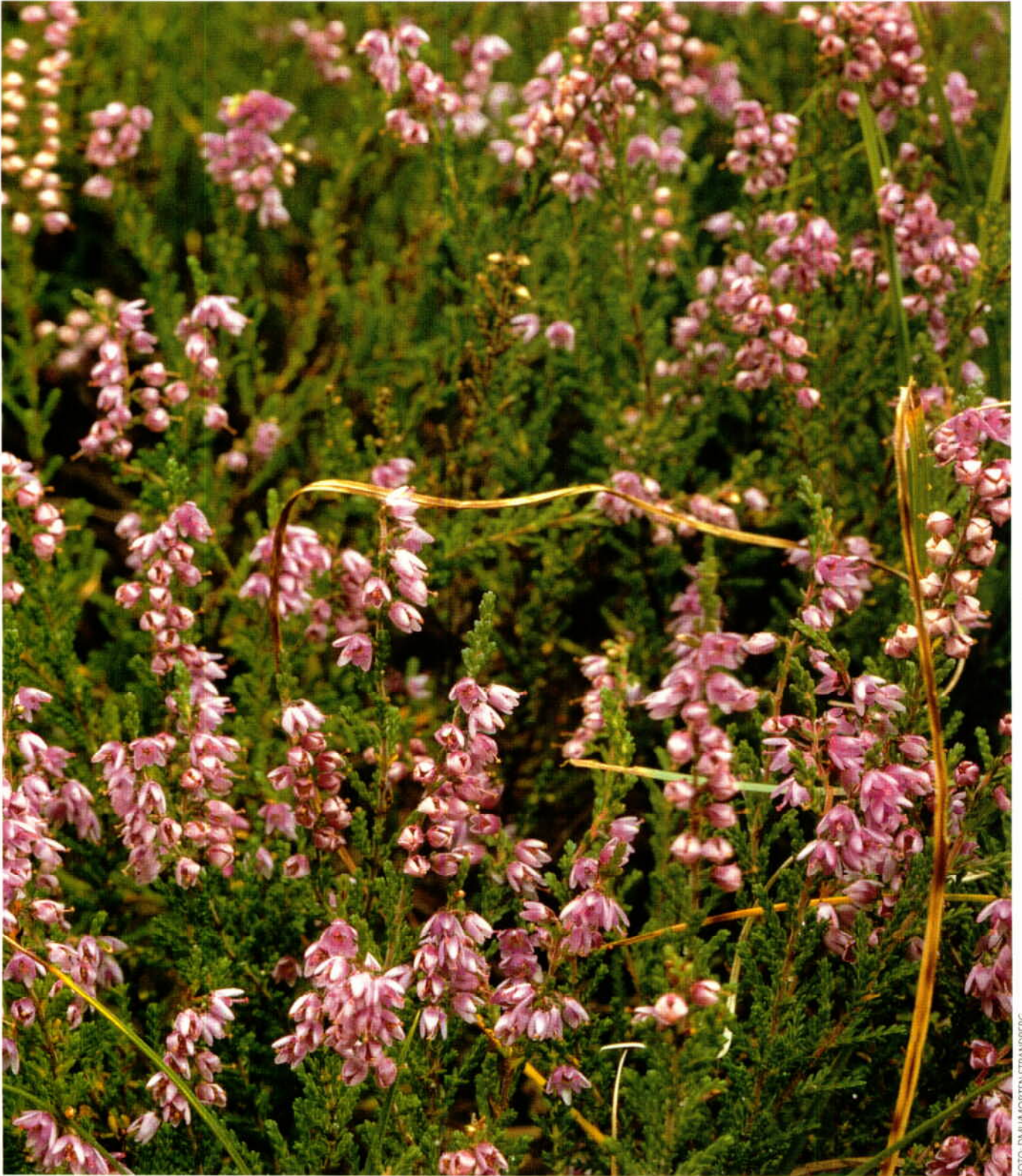


FOTO: DANUMORTEN STRANDBERG

# Forord

Temarapporten "Naturens tålegrænser for luftforurening" handler om de nationale og internationale aktiviteter, der er i gang for at beskytte naturen mod uønskede ændringer på grund af luftforurening. Den handler først og fremmest om det internationale samarbejde for begrænsning af luftforureningen og den forskning og vidensopbygning, der er nødvendig for dette arbejde. Rapporten forklarer begrebet "tålegrænser", som i de senere år er blevet en væsentlig del af grundlaget for hele arbejdet med naturbevaring. Endelig indledes med en kort gennemgang af de vigtigste typer af luftforurening og de dertil hørende effekter.

Med en samlet fremstilling af den historie, organisation og forskning, som ligger bag nutidens bestræbelser på at opnå begrænsning af luftforureningen, henvender rapporten sig nok så meget til læsere med en samfundsfaglig baggrund, som til læsere med en naturfaglig baggrund.

Rapporten er blevet til i et samarbejde mellem bidragydere fra to af Danmarks Miljøundersøgelses afdelinger; Afdelingen for Terrestrisk Økologi og Afdelingen for Atmosfærisk Miljø.

Rapportens indhold er blevet diskuteret med bidragerne:

*Helle Vibeke Andersen*  
*Willem A.H. Asman*  
*Annemarie Bastrup Birk*  
*Mads Hovmand*

fra Afdelingen for Atmosfærisk Miljø

*Jesper Bak*  
*Knud Erik Nielsen*  
*Knud Tybirk*

fra Afdelingen for Terrestrisk Økologi

Derudover har rapporten modtaget kommentarer fra *Per B. Suhr* fra Miljøstyrelsen. Ovennævntes støtte har været af stor betydning for det færdige produkt.



# Indledning

## Dansk natursyn

I Danmark lægger vi stor vægt på naturoplevelser og på bevarelse af naturen. Hvad vi forstår ved natur spænder meget vidt. I daglig tale er natur store områder, der er så uberørte af mennesker som muligt f.eks. skov, strandenge, klitter eller sø og hav. Men naturen kan også være mere eller mindre kulturbetinget. Derfor kan det menneske-påvirkede landskab, plantager, heder, parker og haver også inkluderes i en bred dansk naturopfattelse. Denne opfattelse af natur er god, fordi den viser at naturen er overalt; selv i byen er der natur. Det er bare ikke altid vi opfatter det sådan. Undertiden kalder vi ligefrem naturen for forurening, selvom vi kun ser effekten af forureningen. F.eks. kan det være svært at opfatte opblomstring af blågrønalger i en sø som natur. I stedet siger vi, at søen er forurennet med blågrønalger. I virkeligheden har søens natur tilpasset sig de fysiske og kemiske forhold, som er fremkaldt af forurening med næringsstoffer.

## Naturen forandres

De danske naturområder er under stadig forandring, fordi de er skabt i et samspil mellem menneskelig aktivitet og naturlige forandringer i form af *biogeokemiske* processer, det vil sige samspillet mellem biologiske, jordbundsmæssige og kemiske processer. Derfor vil det man umiddelbart lægger i udtrykket *naturens tålegrænser* vel snarere kunne udtrykkes som: Hvor hurtigt og hvor meget kan det accepteres, at naturområderne ændres? *Ændringshastigheden* afhænger både af luftforurening og af andre menneskeskabte påvirkninger. Eksempler på sådanne andre påvirkninger der kan føre

til ændring af naturen er: anlægsvirksomhed, råstofindvinding, fiskeri og jagt, landbrug, skovdrift, rekreation, havbrug, naturrestaurering, naturanlæg m.m. Nogle af disse påvirkninger medfører hurtigt en uoprettelig skade på naturen; andre medfører en ændring som kan være langsom eller hurtig, midlertidig eller uoprettelig, positiv eller negativ. Ovennævnte aktiviteter er regulerede via lovgivning, så det sikres at påvirkningen af miljøet sker inden for acceptable rammer. Når vi taler om beskyttelse af naturen, mener vi, at vi ønsker at beskytte de dele af naturen som vurderes særlig højt. Begrundelserne for naturbeskyttelse kan være meget forskellige. Udseende, sjældenhed og artsrigdom er eksempler, som kan være af betydning, når der tages beslutninger om naturbeskyttelse.

## Hvad kan naturen tåle?

Begrebet "Naturens tålegrænse" er en skandinavisk oversættelse af det engelske "Critical Load" og "Critical Level", som anvendes i forbindelse med det internationale samarbejde om at reducere den grænseoverskridende luftforurening med henblik på beskyttelse af landjordens økosystemer. Ved "Naturens tålegrænse" forstår man, populært sagt, den luftforurening naturen kan klare uden at blive påvirket. Hvis luftforureningen overskrider tålegrænsen, vil det føre til at økosystemerne ændres på en måde og med en hastighed, som er uacceptabel. Arbejdet med at regulere luftforureningen bygger på, at naturen kun kan tåle en maksimal årlig belastning enten i form af *deposition* eller *koncentration* i luften, uden at økosystemerne ændres. Denne maksimale belastning svarer til tålegrænsen.

Luftforureningen kan påvirke træer og andre planter direkte, og den kan påvirke dem indirekte ved en påvirkning af jordbunden, så planterne ikke trives. Ændringerne vil ofte først vise sig mange år efter, at påvirkningen begyndte. Derfor kan man i stedet for synlige forandringer af naturen vælge at måle på forskellige kemiske stoffer i jorden og i jordvandet for at se, om der sker forandringer. Det kan dreje sig om jordbundsforurening, næringstofberigelse (eutrofiering) og udvaskning af næringsalte. Parametre der kan fortælle, om balancen i økosystemet er – eller med tiden vil blive – ændret.

Problemet er blot, at mange naturtyper ikke passer sig selv – de bliver plejet. En pleje der forsøger at fastholde naturen på et bestemt stadium i en udvikling, der uden menneskelig indblanding ellers ofte vil føre til skov. Et andet problem er, at man ikke kan fæstne én tålegrænse til en bestemt type økosystem. Tålegrænsen for et givet økosystem er afhængig af lokale jordbunds-kemiske forhold. For eksempel har det vist sig, at tålegrænsen for nedfald af eutrofiende kvælstofforbindelser fra luften på heden, afhænger af, hvor i Danmark heden findes og af jordbundens fosforindhold. Jordbundens fosforindhold er efter alt at dømme afgørende for, hvor store effekter en ekstra tilførsel af kvælstof vil have.

For økosystemer som landbrug og skovbrug bruges produktionen som tålegrænse. Det vil sige, at tålegrænsen er overskredet, hvis der sker en udbyttenedgang som skyldes luftforurening.

## Formålet med tålegrænser

Formålet med at bestemme naturens tålegrænser over for luftforurening er derfor at fastlægge de grænser for forurening, der skal overholdes, for at sikre at landjordens økosystemer ikke ændres på en måde, der er uacceptabel i forhold til de planer, som lovgivning og lokale myndigheder udstikker for et givet område.

Bestemmelsen af tålegrænserne kræver en stor forskningsindsats, fordi det er vigtigt, at tålegrænserne fastsættes korrekt. Både for lavt og for højt fastsatte tålegrænser kan medføre at miljøet ikke beskyttes. Forskningen og overvågningen finder sted i netværk spredt ud over Europa. Der arbejdes med intensive studier af økosystemer, som forventes at være særligt følsomme overfor luftforurening. I Danmark studeres fortrinsvis økosystemer på fattig jordbund, højmoser, heder og nåleskove. Men der finder også studier sted i andre naturtyper i Danmark.

Tålegrænserne knytter sig således både til tid og sted. De er et af de redskaber, man kan bruge for at sikre en bæredygtig udvikling på lang sigt, så samfundets naturgrundlag bevares til de kommende generationer. Derfor er forskningen og det øvrige arbejde, der understøtter bestemmelsen af naturens tålegrænser for luftforurening, vigtige samfundsrelevante aktiviteter.



# Problemer som følge af luftforurening

## Mennesket og miljøet

Luftforureningens påvirkning af miljøet er en del af den pris, der i dag betales for opretholdelsen af en høj levestandard. Vores ønske om et rent miljø – ren luft, uspolet natur med mere er til en vis grad uforeneligt med den fremgang i materiel velstand, vi også ønsker. Hvis ikke kravene til velfærdsfremgang ændres, så må den måde, velfærden opnås på undergå forandringer, sådan at forureningen fra produktion og transport reduceres mest muligt. Konflikten er aktuell for os alle! Vi vil nødigt give afkald på vores "livsnødvendige" luksus, samtidig mener vi, at forurening af naturen er uacceptabel.

## Luftforurening

Naturen påvirkes af flere typer af stoffer som transporteres i luften. Nogle af disse er ikke fremmede stoffer i luften. Alligevel er der tale om luftforurening, fordi stofferne optræder i større koncentrationer end man normalt finder i uforurenede luft. Ozon ( $O_3$ ), kuldioxid ( $CO_2$ ), metan ( $CH_4$ ), lattergas ( $N_2O$ ), kvælstofoxider ( $NO_x$ ), ammoniak ( $NH_3$ ), svovldioxid ( $SO_2$ ), kulbrinter og metaller er eksempler på stoffer, som normalt findes i luften i små koncentrationer – men på grund af luftforurening fra industri, trafik og landbrug, kan de forekomme i

forhøjede koncentrationer, som kan være problematiske for naturen (Tabel 1). Derudover tilføres atmosfæren miljøfremmede stoffer, f.eks. freon og beslægtede stoffer, organiske forbindelser, sprøjtegifte og tungmetaller (Tabel 1).

## Luftforurening kan både have positive og negative effekter

Mange af de stoffer, der findes som luftforurening, kan virke både positivt og negativt på miljøet. Eksempelvis virker ozon ved jordoverfladen skadeligt på planter. Samtidigt er ozon ved jordoverfladen medvirkende til at mindske den skadelige ultraviolette stråling, omend i mindre grad end den ozon der findes i stor højde. Svovl i form af  $SO_2$  virker stærkt forsurende i jorder med ringe bufferkapacitet. På den anden side er svovl et vigtigt næringsstof for planterne. Efter at svovludslippene fra forbrænding af kul og olie er blevet begrænset, må enkelte af landbrugets afgrøder som f.eks. raps, have tilført ekstra svovl for at trives. Kvælstof virker ligesom svovl både forsurende og som næringsstof. Kuldioxid virker vækstfremmende på planter – men medvirker også til en opvarmning af atmosfæren med ukendte følger for fordelingen af vegetationen på jordkloden. Mange tungmetaller er nødvendige mikronæringsstoffer for planter, men i for store koncentrationer virker de giftige.

**Table 1.**

Luftens sammensætning og effekterne af de enkelte stoffer. Bemærk at mange af de stoffer, der findes i luften kan virke både positivt og negativt på miljøet (efter Saxe (1989) og Fenger og Tjell (1994)).

Stoffer i luft	Vigtige kilder		Effekter
	Naturlige	Menneskeskabte	
<b>Konstant indhold</b>			
Kvælstof, N <sub>2</sub> Ilt, O <sub>2</sub> Argon, Ar Neon, Ne Helium, He Krypton, Kr	Biosfæren		
<b>Variabelt indhold</b>			
Vand, H <sub>2</sub> O Kuldioxid, CO <sub>2</sub>	Fordampning Biosfæren	Afbrænding	Klimaændring, vækstfremmende
Kulilte, CO	Havoverfladen	Trafik	Giftig for dyr og mennesker
Metan, CH <sub>4</sub> Lattergas, N <sub>2</sub> O	Vådområder, dyr Dannes ved denitri- fikation i skove og vådområder	Husdyr	Klimaændring Klimaændring
Ammoniak, NH <sub>3</sub>	Biosfæren	Husdyr, landbrug	Eutrofiering, forsuring
Kvælstofmonoxid, NO	Biosfæren	Forbrænding, trafik	Eutrofiering, forsuring ozondannelse
Kvælstofdioxid, NO <sub>2</sub>	Biosfæren	Forbrænding, trafik	Eutrofiering, forsuring ozondannelse
Ozon, O <sub>3</sub>	Dannes ud fra O <sub>2</sub> og UV-lys i stratosfæren	Trafik og industri	Klimaændring, Giftvirkning i biosfæren
Svovldioxid, SO <sub>2</sub>			Giftvirkning i biosfæren, forsuring, næringsstof
Svovlbrinte, H <sub>2</sub> S	Biosfæren		
Kulbrinter CFC'ere (freon og lign.)		Energi, trafik Produktion	Ozondannelse Ozonlags- nedbrydning
Sprøjtegifte Tungmetaller		Landbrug m.m. Miner, energi	Giftig Giftig (eks. Pb, Cd, Hg) mikronærings- stoffer (eks. Cu, Zn)

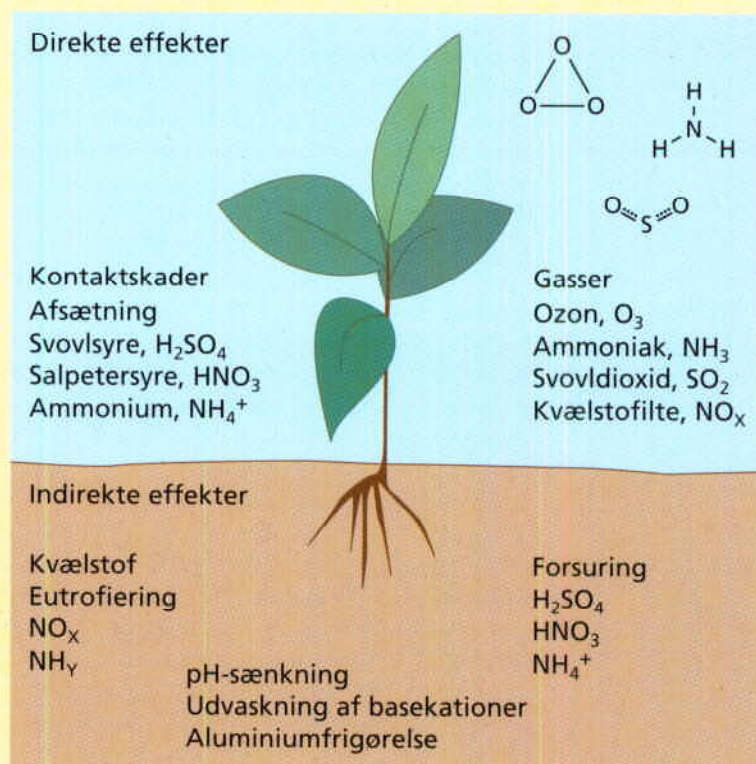
### Box 1. Direkte og indirekte effekter af luftforurening

Direkte effekter opstår, når et stof på gasform findes i en koncentration, som er giftig for planterne. Ozon optræder ofte i koncentrationer, der er skadelige for planter. Som gas trænger ozon ind i planterne gennem spalteåbningerne. Når ozon er kommet ind i planten, kan det forårsage skader ved at reagere med molekyler i planternes indre. Herved skades funktionerne i planternes celler. Resultatet af skaden kan være, at planternes evne til at omdanne sollys og kuldioxid til sukkerstoffer nedsættes (fotosyntese).

En anden form for direkte effekter opstår ved kontaktskader. Disse opstår ved at stoffer, der findes i luften, lægger sig på overfladen af bladene. Her kan de ætse eller svide løvet. Resultatet kan være at løvet dør, eller dets funktion skades, så fotosyntesen påvirkes. Nogle stoffer kan også opløses og trænge ind i planten, efter at de har lagt sig på bladet.

Indirekte effekter forekommer når kvælstof- og svovlforbindelser trænger ned i jordbunden. Her kan de afhængig af jordtypen ændre jordens egenskaber. Der kan ske en pH-sænkning, som medfører udvaskning af basekationer  $\text{Ca}^{++}$ ,  $\text{Mg}^{++}$  og  $\text{K}^{+}$ , som er vigtige plantenæringsstoffer. Der kan også ved et pH-fald ske en frigørelse af aluminium, som i fri form er giftigt for planter.

Ekstra tilførsel af næringsstof i form af kvælstof kan føre til en næringsstofberigelse (eutrofiering), der bl.a. ændrer konkurrenceforholdene, således at mere næringsstofkrævende arter får mulighed for at indvandre.



Den samlede effekt af forsuring kan altså opsummeres til følgende:

- Jordbundens pH falder.
- Der frigøres aluminium som er giftigt for planter.
- Jordens pulje af basekationer udvaskes med deraf følgende næringsstofmangel for planterne.

Den samlede effekt af eutrofiering i følsomme økosystemer kan opsummeres i følgende punkter:

- Forøget følsomhed over for stressfaktorer (vandmangel, insekt- og svampeangreb, frost).
- Udvasning af basekationer.
- Indvandring af arter med større kvælstofbehov, hvorved de oprindelige arter udkonkurreres.
- Øget N-deposition kan bringe andre næringsstoffer i minimum.

### Direkte og indirekte effekter

Luftforureningen kan virke på forskellige måder. På økosystemniveau drejer det sig oftest om giftige, forsurende og eutrofierende virkninger af luftforurening. Men der er også andre eksempler på effekter af luftforurening: Miljøfremmede stoffer som sprøjtegifte og deres nedbrydningsprodukter kan forårsage en utilsigtet påvirkning af frugtbarheden hos dyr og mennesker. UV<sub>B</sub>-stråling er ultraviolet lys, der skader planter og dyr. Hos mennesker kan ultraviolet lys forårsage hudkræft. Luftforureningen kan medvirke til en opvarmning af atmosfæren. Herved kan klimaet ændres og økosystemerne blive påvirket.

Luftforureningens effekter kan være *direkte*, ved at stoffet på gasform virker giftigt på planter og dyr, eller ved at stoffet virker ætsende eller på anden måde skadeligt, når det kommer i berøring med planter og dyrs overflade. Den *indirekte* påvirkning sker, når stoffet ikke umiddelbart giver anledning til synlige forandringer i økosystemet. Der sker i stedet en ophobning af stoffet, som langsomt ændrer de fysiske og kemiske betingelser for økosystemet. Forsuring og eutrofiering er eksempler på indirekte effekter af luftforurening (se Box 1).

### Ozon som eksempel på direkte effekter

#### Dannelse af ozon

Ozondannelse er tæt forbundet med forureningen med kvælstofoxider fra trafik og industri, idet ozon dannes ved fotokemiske reaktioner mellem kvælstofoxider, organiske forbindelser og kulbrinter. Ozon er en meget reaktiv gas, som nedbrydes under afgivelse af et iltatom. Ozon angriber umættede kemiske forbindelser, hvorved der dannes meget reaktive forbindelser (radikaler) som peroxider, aldehyder m.m. Disse forbindelser kan reagere videre med andre forbindelser ofte under dannelse af

nye radikaler og derved give anledning til en række af kemiske reaktioner.

#### Ozons skadevirkning

Det er veldokumenteret, at ozon alene og i kombination med andre luftforureningskomponenter medfører økologiske og økonomiske skader på vegetation. Skaderne optræder særligt, når koncentrationen af ozon er over 40 ppb i luften (parts per billion = milliardtedele). Derfor har man, for at kunne opgøre den potentielle skade på en ensartet måde, valgt at bruge det tidsrum, hvor ozonkoncentrationen er over 40 ppb som udtryk for den potentielle skadevirkning af ozon. Udtrykket benævnes *AOT40*. Dette er en forkortelse af "Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb ozone".

Ozon virker skadeligt på vegetation, når det trænger ind i plantecellerne. Ozon transporteres ved diffusion fra luften omkring planterne, hovedsageligt gennem planternes spalteåbninger og ind til plantecellerne. Levende celler er omgivet af en cellemembran opbygget af fedtstoffer med dobbeltbindinger (lipider) og proteiner med svovlgrupper. Ozon kan angribe dobbeltbindingerne og svovlgrupperne med det resultat, at cellemembranen nedbrydes. Ozon og de førnævnte radikaler kan trænge ind i cellen og reagere med de indre strukturer. Det er uvist hvilken mekanisme, der har den største betydning. Det meget reaktive ozon ophobes nemlig ikke i levende væv og kan derfor ikke påvises efterfølgende. Planterne har udviklet forskellige mekanismer, der kan udbedre eller neutralisere skadevirkningen af ozon. Dette kan dog kun ske, hvis ozonkoncentrationen ikke overstiger et vist niveau.

Ozon kan medføre udvikling af synlige bladskader bestående af celledøde bladområder (nekroser) og er typisk et udtryk for irreversible forgiftninger af planteceller efter en luftforureningsepisode med høje

koncentrationer af ozon. Der kan også forekomme synlige bladskader, når vegetationen udsættes for længerevarende luftforurening med lavere koncentrationer (kloroser). De økologisk og økonomisk mest betydningsfulde effekter af ozon er påvirkningen af planternes vækst og frøsætning.

#### Arternes følsomhed

Nogle plantearter er mere følsomme over for ozon end andre. En engelsk undersøgelse af forskellige vilde planters følsomhed viste, at nogle plantefamilier (f.eks. ærteblomstrede) indeholdt flere ozonfølsomme arter end andre (f.eks. kurvblomstrede). Man fandt desuden, at arter på kalkrige voksesteder og det dyrkede land synes at være mere følsomme end arter på sure og næringsfattige voksesteder.

## Indirekte effekter, et resultat af nedfald af svovl- og kvælstofforbindelser

#### Forsuring

Nedfald af svovl- og kvælstofforbindelser fra industri, trafik og landbrug kan føre til forsuring af jordbunden. Hovedparten af den forsurende virkning af forbindelserne skyldes syrerne svovlsyre og salpetersyre. Kvælstof kan i form af ammoniak og ammonium omdannes og udvaskes som nitrat under afgivelse af brintioner (syre). Jordbundens syreneutraliserende kapacitet og det pH, hvor buffervirkningen sker, er afgørende for om nedfald af de forsurende forbindelser får en effekt. Dette sker, hvis tilførslen af syre til systemet overskrider



FOTO: DMU/MORTEN STRANDBERG

**Figur 1.**

På vores højmoser vokser der typisk klokkeling. Denne naturtype er i fare for at forsvinde p.g.a. eutrofierende luftforurening.



FOTO: DMU/MORTEN STRANDBERG

systemets syreneutraliserende kapacitet. På jordbund med et lavt pH (3 – 5) vil neutraliseringen af syre finde sted ved forvitring af silikat og aluminiumsholdige forvittringsprodukter med frigørelse af aluminium til følge. Frit aluminium er giftigt for planter. Samtidigt sker der en udbytning med basekationer, således at jordens pulje af basekationer formindskes. Basekationerne er de positivt ladede ioner  $K^+$ ,  $Mg^{++}$  og  $Ca^{++}$ , som er vigtige for planter.

### Eutrofiering

Eutrofiering er en forøget tilførsel af næringsstoffer i form af kvælstof-, fosfor- og/eller kaliumforbindelser til økosystemet. Eutrofiering som følge af luftforurening skyldes hovedsagelig nedfald af kvælstof. Det kan dog ikke udelukkes, at svovl tidligere har været det begrænsende næringsstof i nogle økosystemer. Terrestriske økosystemer kan ophobe kvælstof i jorden som organisk stof og i vegetationen i form af forøget biomasse. Forøget optag i vegetationen kan føre til, at balancen i næringsstofferne forskubbes i planter og jordbund. Dette kan yderligere medføre, at planternes trivsel og modstandsdygtighed overfor stress forringes. Stress kan f.eks. være høje koncentrationer af luftforurening, salt, tørke og frost. I næringsfattige økosystemer som højmose og ekstremfattigkær kan den aktuelle danske kvælstofbelastning medføre, at de oprindelige arter udkonkurreres af arter med et større kvælstofbehov. Der er en grænse for, hvor meget kvælstof økosystemerne kan ophobe, uden at der

### Figur 2.

Skovdød i form af døde og døende rødgraner. Skovdøden skyldes formentlig effekten af flere samtidigt virkende faktorer som luftforurening, klima og skovdrift.

sker en udvaskning af nitrationer ( $\text{NO}_3^-$ ), hvilket medfører en tilsvarende udvaskning af de positivt ladede basekationer.

## Sammensatte effekter

De forskellige typer af luftforurening påvirker ikke blot naturen hver for sig, men også i samspil med hinanden og i kombination med andre faktorer, der påvirker naturens sundhed og stabilitet.

I Danmark er langt den største del af naturarealerne kulturpåvirkede i større eller mindre grad. Naturområderne er forholdsvis små og ligger spredt i et landskab, der enten er tæt befolket eller domineret af landbrug. En del naturområder udnyttes f.eks. til træproduktion eller som rekreative områder, medens andre som f.eks. heder og overdrev kræver en form for naturpleje, da de er opstået som følge af en nu opgivet landbrugspraksis. Mange naturområder er opstået på tidligere opdyrket jord og er derfor endnu ikke i balance med jordbunden. En del skove er desuden beplantninger af ikke hjemmehørende træarter, hvoraf nogle endda er første generation i Danmark. Således er rødgranen ikke naturligt tilpasset det danske klima, og måske er de danske rødgranplantager derfor ekstra følsomme (Figur 2).

Hvor der kan iagttages skader på naturen, er årsagen typisk en generel svækkelse af modstandsdygtigheden som følge af den samlede påvirkning af forskellige faktorer, herunder luftforurening. Den konkrete årsag til en akut dårlig sundhedstilstand kan være salt, tørke, frost, insektangreb etc. Det kan derfor være svært at fastslå entydige sammenhænge mellem en given luftforurening og sundheden og stabiliteten af de forskellige naturtyper. Dette kan kun gøres ved at sammenligne den aktuelle tilstand med en (model)beregnet reference-situation uden de forskellige luftforurenings-påvirkninger.

## Andre effekter af luftforurening

Lufttransporteret forurening kan have en del andre effekter på naturen end de, som denne rapport omhandler. De vigtigste er:

**Drivhusgasser** – den stigende koncentration af kuldioxid, metan m.fl. i atmosfæren forventes at kunne påvirke det globale klima ved at øge atmosfærens drivhuseffekt. Herved sker der en forøgelse af temperaturen i jordens atmosfære med ukendte konsekvenser for biosfæren. I dette århundrede er atmosfærens gennemsnitstemperatur steget med en halv grad. Det diskuteres stadig, om dette skyldes luftforurening eller andre fænomener. Ændringer i solens aktivitet i form af solpletter kan også relateres til atmosfærens temperaturforøgelse.

**CFC-gasser** – Freon og lignende stoffers tilstedeværelse i de øvre dele af jordens atmosfære har ført til, at det stratosfæriske ozonlag nedbrydes, hvorved en større mængde ultraviolet stråling når ned til jordens overflade. CFC-gasserne virker også som drivhusgasser. Ultraviolet stråling ( $\text{UV}_B$ ) kan forårsage hudkræft og er generelt skadeligt for det meste liv, selv havets planteplankton. Der er truffet international aftale om udfasning af CFC-gasserne.

**VOC** – Flygtige organiske kulbrinter påvirker, via deres tilstedeværelse i atmosfæren, naturen på mange måder. Først og fremmest indgår VOC'er i fotokemiske reaktioner i atmosfæren, så der dannes reaktive stoffer, som er skadelige for planter, dyr og mennesker. Ozon, som er det vigtigste produkt af den fotokemiske luftforurening, blev grundigt beskrevet i Temarapporten "Ozon som luftforurening" som DMU udgav i 1995. Andre væsentlige stoffer er peroxider, aldehyder og peroxyacetylnitrat. En protokol der sætter reduktionsmål for europæiske udslip af VOC'er er blevet godkendt og vil være gældende fra efteråret 1996.

**Pesticider** – Anvendelse af sprøjtegifte påvirker først og fremmest naturen lokalt. Nogle pesticider fordamper imidlertid, og små dråber som dannes under udsprøjtningen, kan blive transporteret over meget lange afstande i atmosfæren. Der er således målt et årligt nedfald af det klorholdige insektmiddel *lindan* på ca. 500 kg pr. år i Danmark, selvom stoffet ikke længere må anvendes her i landet. Det atmosfæriske nedfald på naturarealer ligger langt under de niveauer, som enten anvendes på den dyrkede jord eller skyldes afsætningen i landbrugsnære områder. De langsigtede virkninger af små doser af pesticider på flora og fauna på landjorden og i ferskvand er ikke kendt.

**Tungmetaller** – Menneskelig aktivitet i forbindelse med minedrift, forbrænding af fossile brændstoffer og affald m.m. kan føre til afgivelse af tungmetaller til atmosfæren. Ved afsætning i miljøet kan de give anledning til effekter. Deciderede effekter er dog sjældne og må forventes overvejende at optræde lokalt f.eks. omkring særligt forurenende virksomheder. Kviksølv og bly er eksempler på tungmetaller der har givet effekter på miljøet ud over det lokale. En UN-ECE-protokol, der fastsætter reduktionsmål for udslip af tungmetaller, ventes at træde i kraft i efteråret 1996. Forekomsten af tungmetalforurening i naturen er tidligere blevet behandlet i Temarapporten "Tungmetaller i danske jorder" som er udgivet af DMU i foråret 1996.

**Radioaktiv stråling** – Udslip af radioaktive stoffer i forbindelse med uheld eller prøvesprængninger kan via atmosfærisk nedfald føre til en påvirkning af naturen. Forskellige organismer har forskellig følsomhed. På længere sigt kan man også tænke sig, at denne påvirkning kan have betydning for de ramte økosystemers udvikling.



# Begrænsning af luftforurening

## Historisk baggrund

Luftforurening er et gammelkendt fænomen, som kendes fra tidligere tiders udvinning af metaller og afbrænding af kul og tørv. Man har tidligere især været opmærksom på luftforurening på grund af de fysiske gener, der har kunnet knyttes til fænomenet. Disse førte allerede i middelalderens England til restriktioner i brugen af kul. I 1306 blev det under trussel om strenge straffe forbudt at anvende pulveriseret kul i smelteovne. Senere (i 1500-tallet) blev det forbudt at anvende kul i London medens parlamentet var samlet.

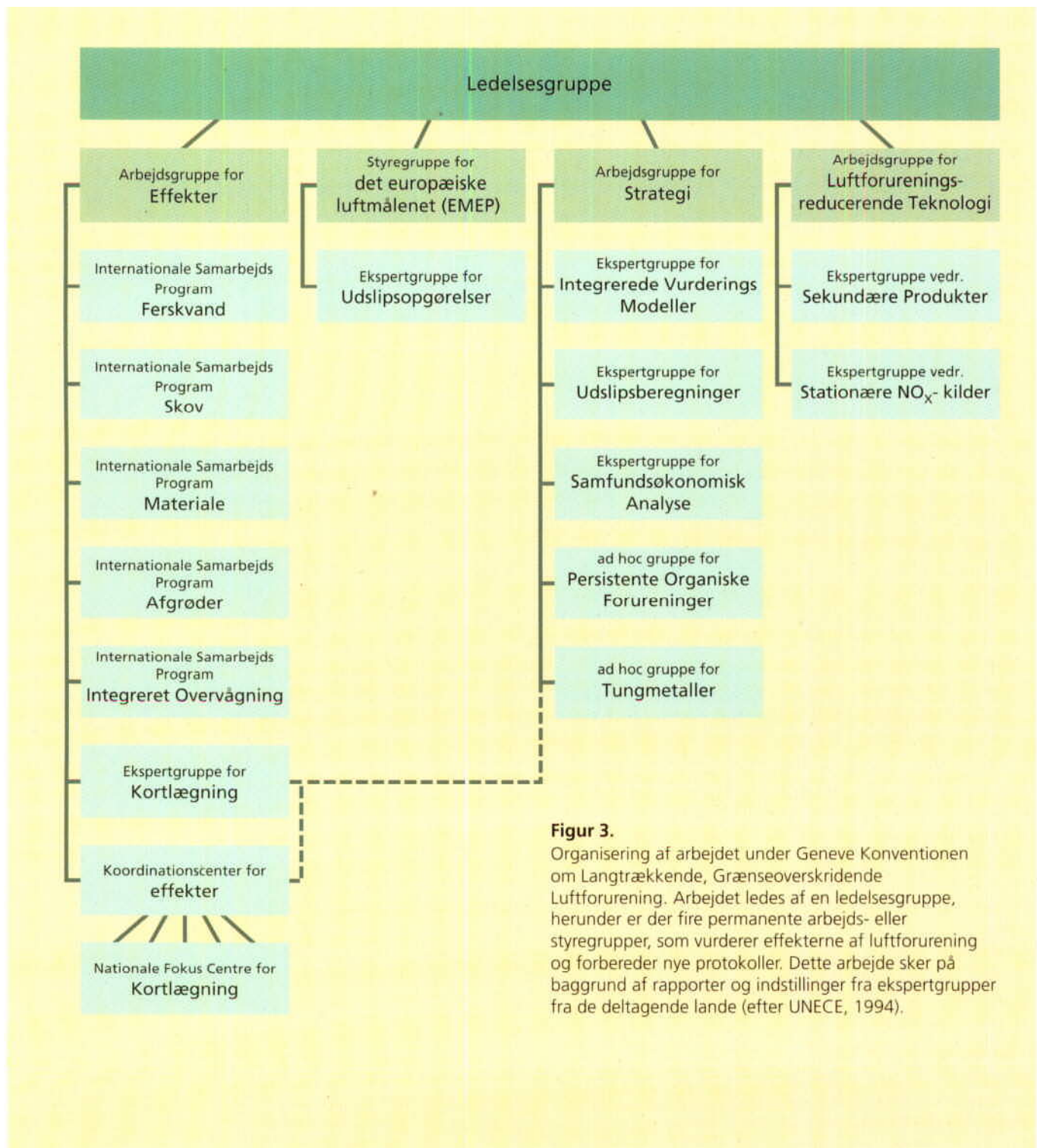
Med industrialiseringen, det hastigt stigende befolkningstal og udnyttelsen af olie og kul, øgedes også luftforureningen. Det var dog først i 1960'erne og 1970'erne man begyndte at se forsurende effekter af svovl langt fra kilderne. Man havde løst de lokale forureningsproblemer ved at bygge høje skorstene, som kunne sørge for en bedre spredning af luftforureningen. Opmærksomheden rettedes i begyndelsen mod forsuren af søerne i Sverige og Norge. På grund af disse søers kalkfattige vand førte tilførslen af svovlsyre til et stort fald i vandets pH-værdi. Da videnskaben samtidig påviste en forbindelse mellem svovludslippene i det centrale Europa og forsuren i Norge og Sverige, var vejen banet for et internationalt samarbejde til bekæmpelse af forsuren. Dette arbejde startedes i 1972 på en FN-arrangeret miljøkonference i Stockholm. Op gennem 70'erne bekræfte-

des det at udslip kunne transporteres flere tusind km inden nedfald. I slutningen af 70'erne mandede dette arbejde ud i den første internationale konvention med det formål at reducere den langtrækkende luftforurening.

## Genevekonventionen

“Konventionen om Langtrækkende Grænseoverskridende Luftforurening” var det første instrument til regulering af regional luftforurening på et internationalt bindende plan. Konventionen er indgået under FN's Økonomiske Kommission for Europa (UNECE). Den blev underskrevet i Geneve i 1979 og trådte i kraft i 1983, da den var ratificeret af 24 regeringer. I dag er Genevekonventionen ratificeret af USA, Canada og de fleste europæiske lande, ialt 38 regeringer. Arbejdet under Genevekonventionen er organiseret på flere niveauer (Figur 3).

I reguleringen af luftforureningen i internationalt regi forsøger man at finde frem til en fælles indsats med det formål at reducere den grænseoverskridende luftforurening. Dette sker i FN-regi blandt de lande, der har tilsluttet sig Geneve Konventionen om Langtrækkende, Grænseoverskridende Luftforurening. Også i EU er der omfattende initiativer, f.eks. rammedirektivet om luftkvalitet, der ventes vedtaget i efteråret 1996. Det omfatter 13 datterdirektiver om de enkelte typer af luftforurening. Derudover forberedes et direktiv, som sætter kvoter for udslippene fra store fyringsanlæg.



**Figur 3.** Organisering af arbejdet under Geneve Konventionen om Langtrækkende, Grænseoverskridende Luftforurening. Arbejdet ledes af en ledelsesgruppe, herunder er der fire permanente arbejds- eller styregrupper, som vurderer effekterne af luftforurening og forbereder nye protokoller. Dette arbejde sker på baggrund af rapporter og indstillinger fra ekspertgrupper fra de deltagende lande (efter UNECE, 1994).

Komponent	Referenceår	Målar	% reduktion
Svovldioxid, SO <sub>2</sub>	1980	1993	30
SO <sub>2</sub>	1980	1995	50
SO <sub>2</sub>	1980	2000	80
Nitrogenoxider, NO <sub>x</sub>	1987	1994	0
NO <sub>x</sub>	1986	1998	30
Flygtige organiske kulbrinter, VOC	1985	1999	30
Kuldioxid, CO <sub>2</sub>	1990	1999	0
CO <sub>2</sub> (EU)	1990	2000	5

**Tabel 2.**

Danmarks internationale forpligtelser for reduktion af luftforurening i henhold til Genevekonventionen.

Fra 1986 begyndte man under Genevekonventionen at basere arbejdet med nye initiativer til begrænsning af luftforurening på tålegrænsprincippet. Således ligger en stor del af UN-ECE-arbejdet i dag inden for området: bestemmelse og kortlægning af tålegrænser. Tålegrænsbegrebet har i dag opnået udbredt anvendelse og anerkendelse som et af de vigtigste værktøjer i reguleringen af den grænseoverskridende luftforurening.

For medlemslandene betyder tiltrædelsen af konventionen, at de forpligter sig til at styrke forskningen inden for de områder, som er omfattet af protokoller under forberedelse. Samtidig betyder en indsats i forberedelsesfasen, at man opnår indflydelse på protokollernes udformning. Efter vedtagelse af protokollen er de tiltrædende lande forpligtiget til at efterleve protokolens retningslinier for reduktioner af emissioner. For Danmark, der er nettoeksportør af luftforurening, medfører forpligtelserne som følge af protokollerne under Genevekonventionen store reduktioner i forhold til tidligere udslip (Tabel 2).

Foreløbig har Danmark mere end opfyldt svovlprotokollens krav om en 50% reduktion af udslippet af SO<sub>2</sub> jf. tabel 2.

På nationalt plan kan man derudover tage skridt til en yderligere reduktion af emissionerne med henblik på at beskytte særligt følsomme lokale naturtyper. I Danmark finder dette arbejde sted under Miljø- og Energiministeriet. Den administrative del ligger hos Miljøstyrelsen og Skov- og Naturstyrelsen, mens forskningsdelen ligger hos Danmarks Miljøundersøgelser og andre sektorforskningsinstitutioner.

# Tålegrænser

Arbejdet med at regulere luftforureningen bygger på, at naturen kun kan tåle en samlet maksimal belastning enten i form af deposition eller koncentration i luften uden at økosystemerne ændres. Denne maksimale belastning svarer til tålegrænsen.

Begrebet blev introduceret i Canada i 70'erne. Siden er begrebet videreudviklet i regi af bl.a. Nordisk Ministerråd og UN-ECE. I begyndelsen var arbejdet koncentreret om at bestemme tålegrænsen for forurening – med henblik på en regulering af svovl-emissionerne. Senere har man arbejdet med at fastsætte tålegrænser for ozon, VOC (Volatile Organic Compounds), POP (Persistent Organic Pollutants), kvælstofforbindelser og tungmetaller.

## Definition og fastsættelse af tålegrænsen

Definitionen af tålegrænser er:

*“En kvantitativ fastsættelse af det niveau for belastning med et eller flere forurenende stoffer, under hvilket væsentlige skadelige effekter på udvalgte, følsomme økosystemer ikke vil opstå, vurderet med den nuværende viden”.*

(efter Bak, 1996)

Tålegrænserne skal sikre, at økosystemet ikke påvirkes og ændres. Det betyder, at der hverken må være skadelige effekter på organismeniveau eller på økosystemniveau. Afhængigt af karakteren af økosystemet, der ønskes beskyttet, kan der anvendes forskellige typer kriterier. Jo mere naturlige

økosystemerne er, jo mere vil kriterierne være strukturelle. Det vil sige, at arts-sammensætningen og balancen mellem arterne i økosystemet søges beskyttet. I skove og på marker, hvor der er en produktion at tage hensyn til, bliver kriterierne mere funktionelle. Det vil sige, at man tager hensyn til produktionen og produktet samtidig med, at naturen søges beskyttet.

## Naturbeskyttelse ved anvendelse af tålegrænser

Tålegrænsen yder ikke en 100% beskyttelse af en given naturtype, men der sigtes mod at beskytte 95% af de relevante økosystemer. Det accepteres altså med tålegrænsen-begrebet, at man ikke kan beskytte alle lokaliteter af en given type. Ønsker man alligevel at være sikker på at beskytte en bestemt lokalitet, kan det i nogle tilfælde ske med lokale initiativer.

Fastsættes tålegrænsen for et økosystem for højt vil resultatet være, at økosystemet ikke bliver beskyttet fordi begrænsningerne vil være utilstrækkelige. Fastsættes tålegrænsen for lavt, kan det ske, at man opgiver at beskytte det pågældende økosystem, fordi den nødvendige reduktion af luftforureningen er for kostbar.

## Critical level og critical load

Når koncentrationen af et stof i luften bliver så høj, at stoffet skader planter, er koncentrationen kritisk, man siger, at *critical level* for stoffet er overskredet.

Hvis belastningen med et stof, der stammer fra luftforurening bliver så stor at økosyste-

met ikke længere kan omsætte eller tolerere stoffet, uden at der sker funktionelle eller strukturelle ændringer af økosystemet, er økosystemets tålegrænse (*critical load*) for stoffet overskredet.

Tålegrænsen er en fælles betegnelse for *critical load* og *critical level*.

## Tålegrænser for ozon samt svovl- og kvælstofforbindelser

På en serie møder afholdt af Nordisk Ministerråd og UN-ECE siden 1986 har man internationalt arbejdet frem imod fastsættelse af *critical load* og *critical level* for svovl, kvælstof og ozon.

### Svovl og kvælstof

Tålegrænsen for indirekte effekter af svovl og kvælstof blev første gang forsøgt fastsat i 1986. I begyndelsen koncentreredes indsatsen omkring de forurende effekter i skovøkosystemer. I 1988 enedes man om tålegrænser for både forurende og eutrofierende effekter af svovl og kvælstof. Siden er fokuseringen gledet over til eutrofiering. I den følgende periode er der blevet arbejdet på at fastsætte tålegrænser for økosystemer, som er følsomme for tilførsel af kvælstof (Tabel 3).

### Indirekte effekter

Tålegrænser for indirekte effekter (*critical loads*) er forskellige for forskellige økosystemer alt efter hvor følsomme de er over for den pågældende type af luftforurening (Tabel 3). Derudover afhænger tålegrænsen af den jordtype økosystemet findes på.

Når tålegrænsen i Tabel 3 i nogle tilfælde er angivet som et interval skyldes det, at økosystemerne findes på et bredt udvalg af jordbunde. Derfor er den laveste tålegrænse gældende for de jorder, som er mest følsomme overfor forurening og eutrofiering. Det vil oftest være sure jorder på sandbund eller tørvejorder.

Økosystem	Forsuring keq/ha/år	Eutrofiering kg N/ha/år	Metode
Plantet eg og bøg	0,8-2,7	17-28	beregnet v. model
Nåleskov	1,4-4,1	7-15	beregnet v. model
Hede		15-20	Ekspertvurdering
Højmose		5	Ekspertvurdering
Fattigkær		5-10	Ekspertvurdering
Overdrev	0,9-2,4		Beregnet v. model

I skov fungerer nitratudvaskningen som kriterium for, hvornår tålegrænsen er overskredet. Hvis udvaskningen overstiger 2 kg N/ha/år antages tålegrænsen at være overskredet. Denne værdi er valgt, fordi en udvaskning af denne størrelsesorden forventes at være gennemsnittet set over flere rotationsperioder med normal skovdrift.

**Tabel 3.**

Tålegrænser for forurening og kvælstof-eutrofiering i forskellige økosystemer.

Tålegrænsen for forurening opgives i kiloækvivalenter pr. hektar pr. år (keq/ha/år), fordi man herved gør tålegrænsen uafhængig af hvilken syre der forårsager forureningen. Et molekyle svovlsyre ( $H_2SO_4$ ) kan afgive dobbelt så mange forurende brintioner som et molekyle salpetersyre ( $HNO_3$ ).



**Figur 4.**

Undersøgelse af luftforureningens påvirkning af kvaliteten af grundvandsdannelsen under skov og hede.

FOTO: DMU/MORTEN STRANDBERG

Stof	Værdier	Vegetationstype	Bemærkning
SO <sub>2</sub>	30 µg/m <sup>3</sup>	afgrøder	1 års gennemsnit eller okt. – mar.
	20 µg/m <sup>3</sup>	træer og naturlig vegetation	1 års gennemsnit
	10 µg/m <sup>3</sup>	følsomme laver	1 års gennemsnit
NO <sub>x</sub>	95 µg/m <sup>3</sup> (4 timers snit)		som NO <sub>x</sub> i nærvær af SO <sub>2</sub> og O <sub>3</sub>
	30 µg/m <sup>3</sup> (1 års snit)		
NH <sub>3</sub>	3300 µg/m <sup>3</sup>		1 times gennemsnit
	270 µg/m <sup>3</sup>		24 timers gennemsnit
	23 µg/m <sup>3</sup>		1 måneds gennemsnit
	8 µg/m <sup>3</sup>		1 års gennemsnit
O <sub>3</sub>	200 ppb-timer	afgrøder	akut skade, ved lavt damptryk
	500 ppb-timer	træer	akut skade, ved højt damptryk
	3000 ppb-timer		(AOT40, ved kortlægning midles over 5 år)
	10000 ppb-timer		

µg/m<sup>3</sup> = milliontedele gram pr. kubikmeter.  
 ppb = parts per billion (milliardtedele).  
 AOT40 = Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb O<sub>3</sub>.

**Tabel 4.**

Critical levels for forskellige luftforureninger. Værdier for SO<sub>2</sub> og O<sub>3</sub> er differentieret for forskellige vegetationstyper.

### Ozon

Kritiske værdier for koncentrationen af ozon i luft blev første gang defineret i slutningen af firserne. Overskridelse af den kritiske koncentration medfører direkte effekter på planter og dyr. I foråret 1996 blev nye kritiske værdier defineret. Det er primært tålegrænserne for ozon, der har interesse. Værdierne for forskellige vegetationstyper skyldes forskelle i følsomhed og vækstperioder. Den kritiske koncentration for landbrugsafgrøder (AOT40C) beregnes for perioden maj til juli for dagtimer. Tilsvarende for skovtræer er den kritiske koncentration defineret til 10.000 ppb timer for perioden april til september (Tabel 4).

Der findes ikke særlig mange undersøgelser af naturlige eller semi-naturlige økosystemer, hvorfor det ikke har været muligt at definere værdier for beskyttelse af disse.

Man mener dog, at værdierne for afgrøder også vil kunne beskytte de naturlige og semi-naturlige økosystemer.

*Semi-naturlige økosystemer er:*

*“Menneskepåvirket natur som ikke er intensivt skovbrug eller landbrug”.*

*De fleste danske naturtyper kan karakteriseres som semi-naturlige.*

I critical levels for svovl- og kvælstofforbindelser er der taget højde for, at man ved de kritiske koncentrationer ikke vil overskride de kritiske værdier for stofferne i forbindelse med kontaktskader, fordi de modsat ozon både kan virke via koncentrationen i luften og ved kontakt med planternes overflade (Box 1).

# Forskning

Reguleringen af den grænseoverskridende luftforurening er baseret på et netværk af tværfaglig forskning. Arbejdet omfatter studier og overvågning af mekanismer bag udslip af de luftforurenende stoffer og deres spredning og nedfald samt direkte og indirekte effekter i naturen.

## Integreret overvågning

Det internationale forskningsprogram "Integreret Overvågning" (se også figur 3, ISP-integreret overvågning) indsamler løbende data om luftforureningens påvirkning af naturlige økosystemer. Programmet har godt 50 målestationer i Europa. Der findes søsterprogrammer (Figur 3) om overvågning af skovsundhed (ISP-skove), afgrøder (ISP-afgrøder) og ferskvand (ISP-ferskvand).

### Badekarsprincippet

Integreret overvågning opfatter i princippet et naturligt økosystem som et badekar (Figur 5). Ideen til denne form for studier er opstået i lande med grundfjeld, hvor man ikke har en lodret nedsvivning af stofferne gennem jorden til grundvandet. Områder af denne type med tæt bund benyttes, fordi alt hvad området opfanger kan måles inden for området. I Danmark er så ideelle forhold sjældne. I områder med ensartet jordtype i fladt landskab kan man ved at bestemme den lodrette stoftransport gennem jorden, udføre samme type beregninger som er udviklet til anvendelse i grundfjeldsområder.

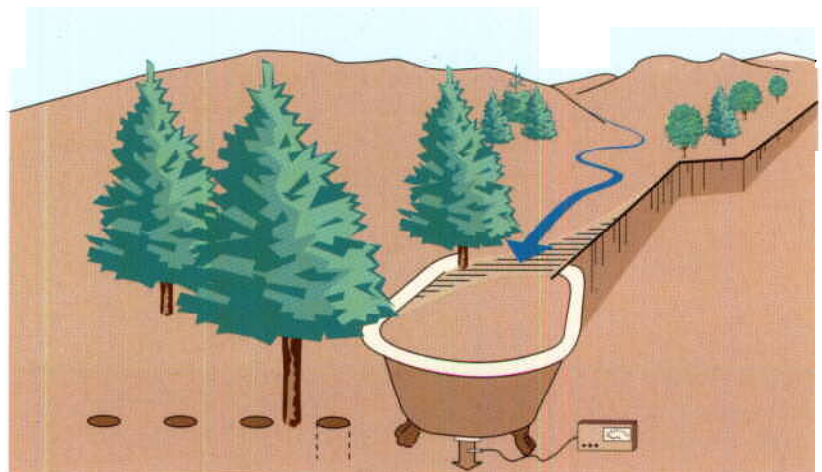
Hvad der kommer ind i dette system af næringsstoffer, vand og luftforurening kan enten ophobes eller føres væk med vand og luft. Der kan opstilles massebalancer for de

ind- og udgående strømme af næringsstoffer, vand og andre stoffer. Metoden kaldes massebalanceprincippet og er grundlæggende for arbejdet med naturens tålegrænser. F.eks. kan kvælstof tilført til et naturligt økosystem fra luften blive utilgængeligt for systemet igen på én af flere måder:

- det kan optages og eventuelt omdannes af vegetationen og cirkulere inden for økosystemet, indtil noget *afgives* fra vegetationen eller jorden og føres væk af vinden (som lattergas, ammoniak eller frit N)
- det kan *udvaskes* som nitrat i jordvandet og derfra forsvinde ud af badekarret som grundvand med forhøjet nitratindhold eller som nitratforurening i vandløb
- det kan *optages* i jord og vegetation og dermed ved akkumulation i biomasse øge den bundne kvælstofpulje i området. Hvis der er så meget kvælstof i økosystemet, at planterne og mikrofloraen ikke kan forbruge mere, vil tilførsel af kvælstof medføre, at der sker en netto-transport ud af systemet.

Figur 5.

Badekarsprincippet: Ideen om at se et område som et badekar, stammer fra lande med grundfjeld hvor der ikke er nogen nedsvivning – badekarret symboliserer grundfjeldet, og afløbet symboliserer den overfladiske afstrømning, som ofte ender i et vandløb.



I princippet kan man således beregne, hvor det tilførte stof (kvælstof, svovl m.m.) forsvinder hen, når man overvåger luftkemi, nedbør, vegetation, jordvandskemi, vandkredsløb og omsætning i økosystemet. Det er dog et meget stort arbejde og i praksis suppleres arbejdet ofte med ekspertvurderinger og modelberegninger for at få et komplet billede. Men man kan dog med integreret naturovervågning få et godt bud på, hvordan økosystemets kvælstofbalance ser ud – kan det tåle den nuværende belastning, eller udvaskes der kvælstof?

#### Integreret overvågning i Danmark

I Danmark findes i øjeblikket 2 målestationer under ISP-programmet Integreret Overvågning (se Figur 3), hvor der forskes i luftforureningens effekter på økosystemer: Hjelm Hede (DK01) og Hald Ege (DK03) (Figur 8). DK02 er en station på Færøerne, som ikke er startet endnu. På Hjelm Hede er økosystemet hede og egekrat og i Hald Ege er krattet udviklet til moden egeskov. På de

danske stationer indsamles kun dele af datasættet til en komplet massebalance, da økosystemerne ikke er afgrænsede 'badekar' med fast bund. I stedet suppleres der med undersøgelser af nedsivende regnvand under rodzonen, så man kan måle, hvad systemet eventuelt taber nenedud. På begge målestationerne satses specielt på overvågning af forandringer i vegetationen som indikator for luftforureningens påvirkning.

På Hjelm Hede kombineres overvågningen af vegetation og jordvandskemi med gødningsforsøg med kvælstofforbindelsen ammoniumnitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ ), for at undersøge om øget kvælstofdeposition har en effekt på økosystemet (Figur 6). Efter fire år har det ikke været muligt sikkert at påvise vegetationsforandringer som en direkte følge af forøget kvælstofbelastning. Dog synes de seneste observationer at antyde en konkurrencefordel for græsset Bølget Bunke. Derimod er der en indirekte effekt via Lyngens Bladbille som udelukkende

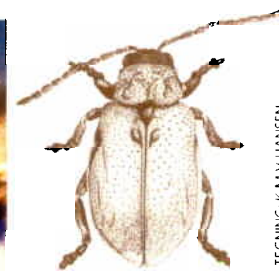


**Figur 6.** Udspredning af ammoniumnitrat til simulering af kvælstofnedfald på Hjelm Hede.

FOTO: DMUMKORTEN, STRANDBERG



FOTO: DMJUNIELS ELMEGÅRD



TEGNING: K.M.V. HANSEN

**Figur 7.**

Lyngens Bladbille *Lochmaea suturalis*. Billen og larven ses i lyngen når temperaturen stiger til over 9°C, ellers gemmer de sig i mosset under lyngen. På forsiden af rapporten ses Hjelm Hede fra luften med et stort område, hvor lyngen er død p.g.a. et angreb af bladbillen, der fandt sted i 1994. Billedet af heden er fra 1995.

lever af hedelyng (Figur 7). Den forhøjede næringsværdi af den kvælstofpåvirkede lyng kan gavne Lyngens Bladbille, så den formerer sig hurtigere.

På de gødskede arealer blev der iagttaget en højere tæthed af bladbillen end på de ugødskede. Dermed er lyngens konkurrenceevne blevet forringet. Med det nuværende årlige ammoniaknedfald på Hjelm Hede på 12 kg kvælstof pr. hektar har lyngens blade et kvælstofindhold, der er ca. 50% højere end i et uforurenede område. Udover denne umiddelbare effekt vil der være effekter, som først kommer til udtryk efter et længere tidsrum. Disse kan være kvælstofudvaskning, forurening og vegetationsforandringer som følge af ændrede konkurrenceforhold.

I Hald Ege blev vegetationen i underskoven undersøgt i 1916. Disse undersøgelser sammenlignes nu med den nuværende

vegetation. Sammenligningen viser at mange arter, der indikerer kvælstoffattige jorder, er forsvundet fra underskoven samtidig med at en del typiske skovbundsarter, der indikerer rigere jordbund, er vandret ind. Forandringer skyldes dog ikke kun påvirkning med luftbårne stoffer, men hænger også sammen med fredninger og pleje af skoven. Derfor er det vanskeligt at påvise en entydig sammenhæng med luftforureningen.

Man er dog i stigende grad begyndt at bruge forandringer i skovbundsvegetationen som indikator for luftforureningens påvirkning.

Især svenske, tyske og hollandske undersøgelser har påvist, at der i dag er flere surbundsplanter og kvælstofelskende planter i skovene end tidligere, det vil sige samme tendens som den nyeste forskning i Hald



**Figur 8.** Den geografiske placering af de danske stationer under EMEP-netværket og de internationale samarbejdsprojekter om skovsundhed og integreret overvågning.

Ege viser. Dette tyder på, at luftforureningen er en medvirkende årsag til forandringerne. For at kunne dokumentere sammenhænge med sikkerhed kræves dog eksperimenter, der for nærværende er for omfattende til at blive iværksat.

I *naturlig løvskov* baseres tålegrænsen for kvælstof i dag på forandringer i underskogsvegetationen. Denne tålegrænse er internationalt fastsat til 15-20 kg N/ha/år.

For *plantet bøge- og egeskov* i Danmark er den beregnede tålegrænse på 17-28 kg N/ha/år og tilsvarende ligger tålegrænsen for *nåleskov* på 7-15 kg. Da tilførslen af kvælstof fra luften ligger på ca. 20-25 kg/ha/år, er der overskridelser af tålegrænsen i en stor del af de danske skove.

Overskridelse af tålegrænsen kan medføre en eller flere af følgende effekter på skovøkosystemet:

- Dårlig trivsel for træerne
- Indvandring af andre træarter
- Ændringer i underskogsvegetationen
- Udvaskning af kvælstof
- Udvaskning af basekationer
- Frigørelse af aluminium og jern

#### EMEP - målenettet

Det internationale arbejde med at reducere den grænseoverskridende luftforurening er bl.a. en følge af den dokumentation, som et fælles europæisk luftmålenet har leveret. Inden for "EMEP" (European Monitoring and Evaluation Programme) er der gennem næsten 20 år dagligt foretaget målinger af den kemiske sammensætning af gasser, partikler og nedbør.

Målenettet omfatter et stort antal europæiske stationer, hvoraf Tange og Keldsnor ligger i Danmark (Figur 8). EMEP-stationerne suppleres ofte med flere nationale målestationer med et mindre omfattende måleprogram. Dette sker dels for at beskrive den geografiske variation i luftforureningsniveauet inden for det nationale område, dels for at levere mere detaljerede data inden for det valgte undersøgelsesareal.

På grundlag af de indsamlede data, suppleret med meteorologiske oplysninger fra hele Europa og opgørelser af udslip fra de forskellige områder, har det været muligt at opstille beregningsmodeller for grænseoverskridende stoftransport af  $\text{NO}_x$ , ozon og svovl. Derfor er det i dag muligt at beregne, hvorfra nedfaldet i et givent område stammer, hvilket selvfølgelig er en vigtig forudsætning for at få gennemført internationale aftaler om at mindske udslippene.

I Danmark findes der tre skovmålestationer med tilknytning til UN-ECE's skovsundhedsprojekt ISP-skove (Figur 3), Frederiksborg, Lindet og Ulfborg (Figur 8). Her gennemføres en kontinuert overvågning af skovøkosystemernes udvikling og ændring som følge af luftforurening og variationen i de

naturlige processer. De tre skovmålestationer indgår også i et EU-netværk af europæiske undersøgelsesarealer, hvor skovsundhed og atmosfærisk nedfald registreres.

### Ulborg

Målestationen med det mest omfattende måleprogram ligger i Ulborg skovdistrikt i Vestjylland (Figur 9). Tidligere tiders skovrensning i dette område har været besværliggjort af sandede jorder med ringe næringsindhold og vandkapacitet samt af den kraftige vindpåvirkning.

I Ulborg er det især jordbundsforholdene, der sætter meget lave grænser for, hvad skoven kan tåle af forurende luftforurening. Her arbejder forskere fra forskellige forskningsinstitutioner hver med deres faglige specialer for at kunne vurdere de samlede virkninger af luftforurening på økosystemet. Forskningsindsatsen har i de

sidste år især været fokuseret på ammoniak, der blæser ind over naturarealerne fra landbrugsområderne samt på ozon, der kommer fra Centraleuropa.

Det er ikke nok at måle koncentrationsniveauer, man må også bestemme mængden af stof, der kommer i kontakt med- eller trænger ind i planterne. Samtidig må man registrere, hvilke umiddelbare effekter det har for træernes fotosyntese og vækst.

Korttidsmålingerne fortæller meget om årsagssammenhænge og supplerer således registreringer af mere langsomme påvirkninger, som f.eks. skyldes ændringer i jordens surhedsgrad og næringstilstand. Skovjorden og træerne indgår i et dynamisk samspil med atmosfæren, idet stoftransporten (fluxen) kan gå begge veje. Jorden afgiver således bl.a. kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ), ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) og nitrogenmonoxid ( $\text{NO}$ ), hvilket både har betydning for



FOTO: TES MIKKELSEN

**Figur 9.** Økofysiologiske undersøgelser af den direkte effekt af ozon på rødgrans fotosyntese.

økosystemets næringsstofftilstand og for den globale atmosfæres sammensætning (drivhusgasproblematikken). For at få et samlet billede af omgivelsernes påvirkning af skovsundheden fordres en integreret måleindsats af økosystemets funktion under naturlige stresspåvirkninger som tørke og frost samt af den menneskeskabte påvirkning med særlig henblik på den atmosfæriske stoftilførsel.

en bedre relation mellem skadevirkning og ozonbelastning, hvis man benytter 30 ppb ozon som tærskelværdi ved beregning af tålegrænsen. Altså vil AOT30 være mere egnet til at vise ozons skadevirkning under skandinaviske forhold. I Syd- og Mitteleuropa vil det stadig være bedst at anvende AOT40.

## Open-Top-Chamber / Tålegrænser for ozon

### Kontrollerede eksperimenter

Effekter af ozon kan undersøges ved dosis-respons eksperimenter, hvor vegetationen tilføres kendte koncentrationer af ozon. Disse eksperimenter kan udføres indendørs i klimastyrede vækstkamre og drivhuse eller under semi-kontrollerede forhold i vækstkamre, såkaldte åben-top-kamre. I indendørs eksperimenter vil planterne adskille sig morfologisk og fysiologisk fra almindelige udendørs voksende planter. I åben-top-kamre vil vækstbetingelserne være mere realistiske, men også sværere at kontrollere.

I Danmark er de fleste undersøgelser af ozons effekter lavet på hvede, hvidkløver, rødgran og bøg, som et led i et europæisk samarbejde. Det er fundet, at effekten af ozon på hvede er en nedgang i fotosyntesen og en accelereret nedvisnen. Dertil kommer nedsat højdetilvækst og mindre udbytte. Hos bøg ses nedsat fotosyntese som følge af ozon, øget nedvisnen og nedsat tykkelsesvækst i stammen. Hos rødgran er der set både forhøjet og nedsat fotosyntese. Disse danske data er sammen med udenlandske resultater blevet benyttet til fastsættelsen af tålegrænser for ozon.

Danske undersøgelser af sammenhængen mellem ozonkoncentrationen og skadevirkningen på planter har sammen med nordiske data vist, at man rent statistisk får

# Kortlægning

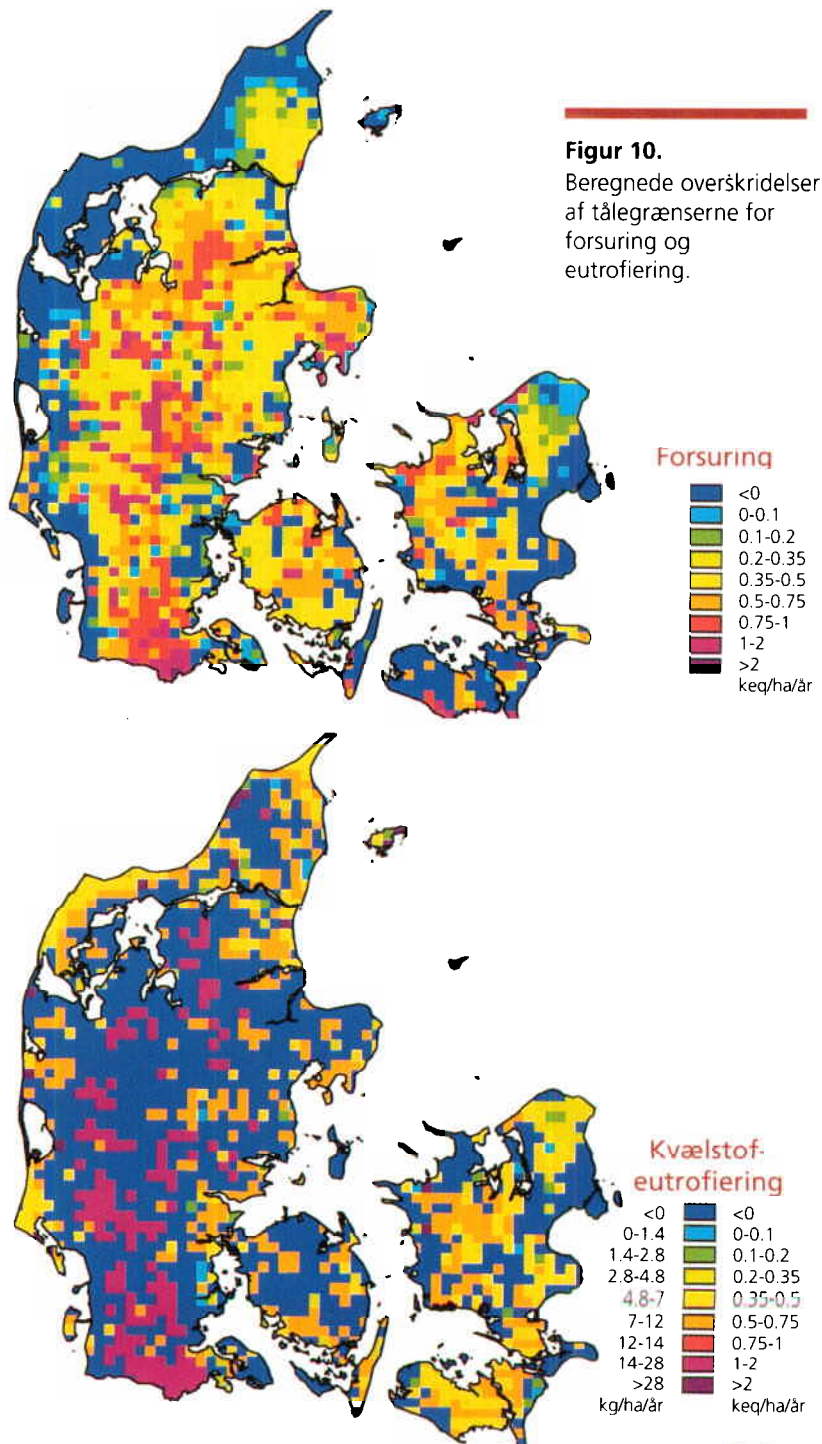
Tålegrænskortlægningen foregår dels i nationalt regi, dels i internationalt regi (UNECE) under konventionen om langtrækkende grænseoverskridende luftforurening (Genevekonventionen). Ved kortlægningen af tålegrænserne inddeles kortet i et kvadratnet med varierende sidelængde afhængig af formålet, informationsmængden og den type økosystem, der skal kortlægges.

## Kortlægning af overskridelse af critical load

Belastningen af forskellige naturtyper med luftforurening kan udtrykkes ved en beregnet overskridelse af tålegrænsen, dvs. størrelsen af den atmosfæriske deposition set i forhold til, hvad naturen kan tåle på lang sigt uden at skades. En stor overskridelse af tålegrænsen på et naturområde betyder, at der på længere sigt kan forventes en væsentlig skade på området. Omvendt vil en lille overskridelse betyde, at der kan forventes mindre skader, eller at væsentlige skader vil være længere om at opstå.

De aktuelle overskridelser af naturens tålegrænser er i Danmark beregnet på et 5 x 5 km kvadratnet af Danmarks Miljøundersøgelser.

Figur 10 præsenterer beregnede overskridelser af tålegrænsen for forurening med kvælstof og svovl, samt for eutrofierende effekter af ammoniak på naturarealer. Hvad angår critical load, er det største problem i Danmark gødningseffekter af kvælstof. Overskridelserne af tålegrænsen er specielt stor i den centrale del af Jylland, hvor husdyrtætheden er størst. Der er dog også store overskridelser af tålegrænsen for



**Figur 11.**

AOT40 (ppb-timer) for rødgranskove i 1992. Beregnet for 24 timers daglig eksponering og den aktuelle vækstsæson, der er defineret ved at den daglige gennemsnitlige temperatur er over 5°C (efter Lövblad et al., 1996).



forsuring, dels på særligt følsomme lokaliteter, dels hvor husdyrtætheden og dermed nedfaldet af ammoniak er stort.

Overskridelserne af tålegrænsen er så store og vidt udbredte, at der er tale om et af de største miljøproblemer i Danmark i dag. Den væsentligste årsag til overskridelserne er belastningen som følge af ammoniakfordampning fra landbruget.

### Critical level kortlægning

Kort med en høj opløsning, der viser overskridelser af de kritiske koncentrationer for ozon for landbrugsafgrøder, skove og seminatural vegetation som heder og overdrev, er af stor nytte og interesse. Kortlægningen er et vigtigt redskab, som sætter de kritiske koncentrationer på en given lokalitet i relation til kilderne. Herved kan værdien af forskellige strategier til kontrol af luftforureningen vurderes. Ved brug af modeller, der vurderer langtransporten af luftforurening, kan man kortlægge ozonkoncentra-

tioner ved jordoverfladen. Det er også vigtigt at kende AOT40 niveauer skadevirkning på forskellige vegetationstyper for at kunne vurdere, om ozonkoncentrationen når niveauer, der kan skade vores natur.

I et nordisk samarbejde blev critical levels kortlagt for henholdsvis afgrøder og træer, hvor man tog hensyn til den aktuelle vækstsæson på de enkelte målestationer. I figur 11 er kortlægningen vist for rødgran. Det ses, at der er en klar gradient fra Syd til Nord, og at tålegrænsen er overskredet i Danmark, og i det sydlige Norge, Sverige og Finland.

# Fremtiden

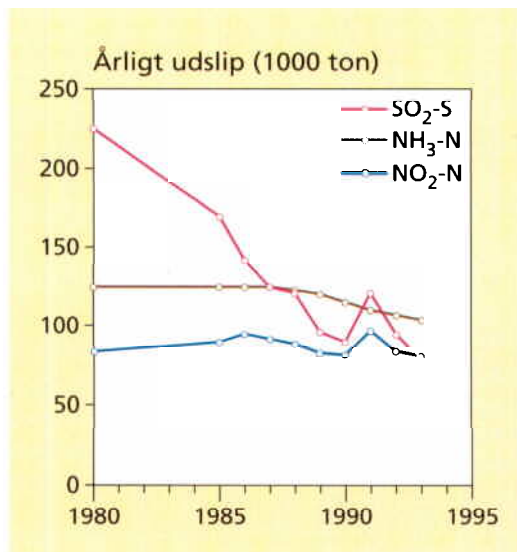
## Genevekonventionen – en succeshistorie

Samarbejdet om begrænsning af den grænseoverskridende luftforurening er en succeshistorie i det internationale miljøsamarbejde. Det er både lykkedes at få etableret bindende aftaler om begrænsning af udslippene og at Genevekonventionen om Langtrækkende Grænseoverskridende Luftforurening omfatter i dag protokoller om reduktioner af udslippene af svovlforbindelser, kvælstofilter og flygtige organiske forbindelser (VOC). Det første skridt er taget til at forberede en protokol, med henblik på at reducere de sammensatte effekter af luftforurening. Det vil i praksis sige den samlede effekt på økosystemerne fra forurening med svovl- og kvælstofforbindelser samt flygtige organiske forbindelser.

## Reduktionsmål

### Svovl; status i dag og fremtidige udslipsreduktioner

Reduktionsmålene for udslip af svovl er fastsat individuelt for de enkelte lande ved en afvejning af omkostningerne ved reduktionstiltag og effekterne af udslippene i de områder, hvor de afsættes. Med enkelte undtagelser er det lykkedes for de lande der har ratificeret svovlprotokollen fra 1983, at opnå de krævede reduktioner i  $\text{SO}_2$ -udslippene. En stor del af de danske udslip afsættes f.eks. i følsomme svenske, polske og russiske naturområder, og Danmark har derfor et stort reduktionsmål. Reduktionsmålene for de enkelte lande varierer mellem 30 og 87% af niveauet for udslippene i 1980. Disse mål skal opnås på forskellige tider mellem år 2000 og 2010. For Danmark er reduktionsmålet 80%, der skal



opnås år 2000. I dag har man allerede opnået en reduktion på mere end 50% i forhold til 1977, hvor de danske udslip toppede (Figur 12). Det forventes, at en samlet reduktion på 50 – 60% af udslippene for de europæiske lande vil være opnået inden år 2010. Samlet for Europa forventes det, at denne reduktion vil mindske overskridelserne af tålegrænsen med 60% i forhold til niveauet i 1990.

### Kvælstof – status i dag og fremtidige udslipsreduktioner

Den eksisterende protokol for kvælstofoxider har som målsætning at fastfryse udslippene på niveauet for 1987, eller hvor udslippene er steget siden at reducere udslippene til 1987-niveau. Denne målsætning blev stort set opfyldt som planlagt inden 1994. Danmark har sammen med 12 andre lande, bl.a. de nordiske, forpligtet sig til yderligere at reducere udslippene med 30% i perioden fra 1986 – 1998. Danmark har indtil nu opnået en reduktion på 10%.

**Figur 12.**

Udviklingen i indholdet af svovl og kvælstof i de danske udslip af luftforurening fra 1980 – 1993.

Lovgivning har ført til, at svovludslippet er blevet kraftigt reduceret. For kvælstof-forbindelserne har der ikke været den samme tendens. Det må forventes, at de kommende udspil i form af en ny kvælstof-protokol også på dette område vil føre til en betydelig formindskelse af de danske udslip (Efter Barrett et al., 1995).

**Figur 13.**

Fyrreskov med rensdyrlav der vokser på næringsfattig jordbund er blandt de økosystemer med den laveste tålegrænse overfor forurening og eutrofiering.



FOTO: DMUMØRTEN STRANDBERG

### VOC

For flygtige organiske forbindelser (VOC) er reduktionsmålene i dag en reduktion på mindst 30% senest i år 1999 i forhold til et basisår mellem 1984 og 1990, som landene selv kan vælge. For lande, hvor emissionerne i 1988 ikke overskred enten 500.000 ton, 20 kg pr. indbygger eller 5 ton pr. kvadratkilometer er reduktionskravet dog en fastfrysning på 1988 niveau. Reduktionskravene til flygtige organiske forbindelser forventes genforhandlet i 1997 i forbindelse med forberedelsen af en ny protokol, der også omfatter  $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_3$  og  $\text{O}_3$ . Det kan forventes, at reduktionskravene dermed strammes væsentligt.

Samlet kan det konstateres, at arbejdet med at begrænse svovludslippene har været en succes, selvom der stadig skal foretages yderligere begrænsninger. Svovl er altså

ved at forsvinde som trussel mod naturen, men for andre stoffer reterer der stadig en stor indsats. For kvælstofforbindelserne er der indtil videre kun opnået små begrænsninger i udslippene (Figur 12).

Øgningen i trafikken er med til at mindske virkningen af tiltag som indførelse af katalysatorer, der medfører en formindskelse af  $\text{NO}_x$ -udslippene. I øjeblikket arbejdes der i Danmark på at finde metoder til at mindske landbrugets fordampning af ammoniak fra husdyrgødning, som i dag udgør den største trussel mod vores næringsfattige økosystemer. Dette arbejde er en vigtig forudsætning for at vi kan leve op til kravene i den kommende UN-ECE-protokol, som også kommer til at indeholde reduktionsmål for udslip af ammoniak og ammonium.



Begrænsningen af udslippene af de flygtige organiske forbindelser er et område, hvor der i fremtiden vil blive stillet store krav til medlemslandenes evne og vilje til at gennemføre udslipbegrænsninger. Først hvis reduktionsmålene for kvælstof og flygtige organiske forbindelser nås, kan man konkludere, at arbejdet under UN-ECE med at begrænse truslerne mod naturen er en succes.

## Hvor kan tålegrænsearbejdet forbedres

Der er inden for tålegrænseforskningen en del områder, hvor der stadig er behov for en forbedring af vidensgrundlaget. Der er økosystemer, hvor man ikke har beregninger af tålegrænsen og i stedet har baseret tålegrænsen på ekspertvurderinger, dette gælder f.eks. højmoserne. Tålegrænsens afhængighed af den biogeokemiske variation inden for de enkelte økosystemtyper er et andet område, som er ret uudforsket. Dertil kommer, at beregningsmetoderne både af tålegrænsen og af de faktorer som indgår, stadig er under udvikling.

### Benovt modeller ved anvendelse af tålegrænser

Anvendelsen af tålegrænser ved beskyttelse af et givet økosystem vil næsten altid være forbundet med modelberegninger af nedfaldet. Idet nedfaldet ikke kan måles alle steder, er det nødvendigt at tage atmosfæriske transportmodeller i brug for at bestemme nedfaldet over hele Danmark og de tilgrænsende havområder. Målinger bruges i dette tilfælde til at checke om modelresultaterne er rigtige. Transportmodeller har desuden den fordel, at de også kan anvendes til beregning af bidraget fra udenlandske kilder, eller til at beregne nedfaldet i fremtiden ud fra fremskrivning af udslippenes størrelse.

I atmosfæriske transportmodeller indgår information om udslip, meteorologiske forhold, kemiske reaktioner og nedfald.

## Usikkerheder forbundet med anvendelse af tålegrænser

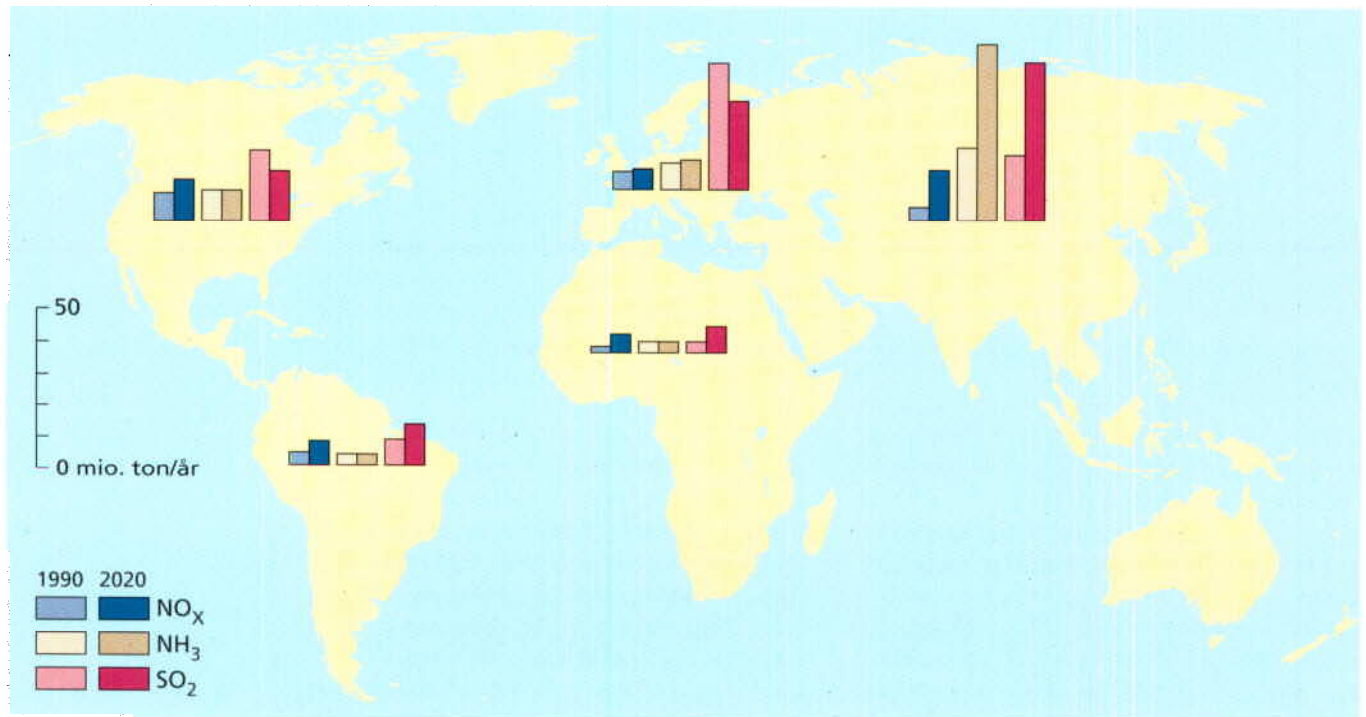
Målinger kan ikke give det samme overblik som matematiske modeller, der kan kombinere viden om variationer med geografiske oplysninger. Derfor er den første usikkerhed, der er forbundet med anvendelse af tålegrænser, den som er knyttet til beregningen af nedfaldet. Her afhænger usikkerheden af flere faktorer. De vigtigste er knyttet til stoffet og om nedfaldet kommer i form af tør eller våd deponering.

Andre usikkerheder er knyttet til den mængde af oplysninger, der har været tilgængelige ved beregningen af tålegrænsen. Man er nødt til at have et stort datamateriale ved tålegrænseberegninger, fordi der er en stor geografisk variation i de faktorer, der er betydende for et givet økosystems tålegrænse. I den forbindelse er klimaet og jordbunden de to vigtigste variable faktorer.

Usikkerheden i de modellerede nedfaldsstørrelser afhænger bl.a. af disse faktorer. Desuden er usikkerheden også afhængig af udformningen af modellen, som altid er en forenkling af virkeligheden.

Usikkerheden ved udslipberegninger er i størrelsesordenen 5% for svovldioxid, 50% for kvælstofoxider og ammoniak og op til en faktor 5 for nogle tungmetaller. Modelresultaterne påvirkes ikke udelukkende af udslippets størrelse, men også af den rumlige fordeling af udslippene, nedbørmængden, og hvor hurtigt stofferne afsættes i tør form.

I mange modeller antages det, at disse faktorer er ens inden for større områder (150 x 150 km<sup>2</sup>), hvilket ikke er tilfældet. EMEP-kvadratnettet er ved at blive udviklet til 50 x 50 km<sup>2</sup> for at formindske den fejl, der begås ved at antage ensartethed inden for et kvadrat, men det er stadigvæk for



**Figur 14.** Kontinenternes årlige emissioner af NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> og SO<sub>2</sub> i år 1990 og 2020 beregnet i mio. ton N/år eller mio. ton S/år (efter Galloway, 1995).

groft til danske forhold. Ved „fejlplacering“ af udslip, tørdepositionshastigheder og nedbørsmængden i modellerne kan der nemt opstå en fejl på en faktor 4 i modelresultaterne for stoffer, som stammer fra lokale kilder, f.eks. ammoniak fra landbruget. Fejlen vil være væsentligt mindre for langtransporteret forurening. Disse fejl vil især kunne opstå ved beregninger for Danmark, fordi naturområderne er små. Således er der et stort behov for en langt større opløsning i de modeller, der anvendes til beregninger under danske forhold. Derfor støtter Miljøstyrelsen i dag arbejdet med at forbedre det vidensgrundlag, der er nødvendigt for at komme frem til en ammoniakhandlingsplan for landbruget.

### Arbejdet med effekter af luftforurening i fremtiden

Det er blevet beregnet, at udslippene af SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> og NH<sub>3</sub> fra de asiatiske lande i år 2020 vil være mindst lige så store som udslip-

pene fra Europa og Nordamerika. Dette skyldes dels at de europæiske og nordamerikanske udslip som følge af Genevekonventionen mindskes eller holdes konstante frem mod år 2020, dels at de asiatiske landes udslip ventes at stige til mindst det dobbelte af 1990-niveauet (Figur 14). Den globale fordeling af disse fremtidige emissioner er endnu ukendt. Derfor er en videre international tilslutning til protokollerne under Genevekonventionen af stor vigtighed i den fremtidige bekæmpelse af luftforureningen.

Der vil således stadig eksistere et behov for yderligere forskning omkring spredning og effekter af luftforurening. F.eks. kender vi i dag ikke meget til tålegrænser for arktiske økosystemer, men vi forventer, at der er tale om meget lave tålegrænser.

# Sammenfatning

Luftforurening er en negativ effekt af den velfærd og udvikling som er blevet opbygget med de industrielle og teknologiske fremskridt, som vi særligt har oplevet gennem den sidste halvdel af det tyvende århundrede. Effekterne af luftforurening er mangeartede, og i dag er der meget få områder af landjordens liv, som ikke er påvirket.

Bekæmpelsen af luftforureningen kræver en international indsats. Et sådant arbejde er igangsat med Genevekonventionen, der handler om reduktion af den grænseoverskridende luftforurening i Europa og Nordamerika. Det er her et grundlæggende princip, at der er en grænse for den belastning med luftforurenende stoffer, naturen kan tåle.

Dette arbejde omfatter i dag protokoller til begrænsning af udslip af svovl, kvælstof-forbindelser, flygtige organiske forbindelser og tungmetaller. Senest protokollerne for flygtige organiske forbindelser og tungmetaller der træder i kraft i efteråret 1996.

Udover tålegrænser er kortlægning af forureningen en vigtig ingrediens i det internationale samarbejde. Med kortlægning sættes nedfaldet på en given lokalitet i relation til udslippene både lokalt og langt væk. Denne viden er en nødvendig forudsætning for fastsættelsen af de forskellige landes reduktionsmål for udslip af luftforurenende stoffer.

Vi er på vej til en bedre beskyttelse af naturen. Først og fremmest er vi ved at have kontrol med den del af forureningen som skyldes svovldioxidudslippene. Kvælstof-oxiderne, som både medfører forurening og

eutrofiering, mangler vi endnu at få kontrol med. Fordampningen af ammoniak fra landbruget er i dag den største trussel mod vore følsomme økosystemer. Der arbejdes fra mange sider på at finde metoder til at begrænse dette problem.

Flygtige organiske forbindelser og kvælstofoxider indgår i den fotokemiske luftforurening, som bl.a. fører til dannelse af ozon. Denne del af luftforureningen er ligeledes stadig et problem, som både påvirker naturen og erhverv som skovbrug og landbrug.

Luftforurening har eksisteret længe, og selv om det internationale samarbejde har været en succes, er der ingen tvivl om, at der fortsat vil være problemer med en stigende luftforurening. Det må forventes at de dele af kloden, som i dag har en mindre levestandard, i fremtiden vil søge at forhøje velfærden. Dette vil utvivlsomt medføre en forøget luftforurening. Denne udvikling bliver fremover en stadig større udfordring for forskere og administratorer, der arbejder på at beskytte naturen.

# Litteratur

Listen er delt i en dansk- og engelsksproget del. Referencerne vil enten være citeret i rapporten, eller der er tale om centrale udgivelser inden for området.

## Danske

*Bak, J. (1996):* Kortlægning af tålegrænser for svovl og kvælstof. Faglig rapport fra DMU, nr. 159 1996.

*Christensen et al. (red.) (1993):* Miljø og samfund – en status over udviklingen i miljøtilstanden i Danmark.

*Fenger, J. (1995):* Ozon som luftforurening. Temarapport fra DMU 1995/3.

*Fenger, J. og Tjell, J.C. (1994):* Luftforurening. Polyteknisk Forlag, 1994.

*Henriksen, L.H., Bak, J., Asman, W.A.H. og Andersen, H.V. (1995):* Ammoniakfordampning fra landbruget. Miljøstyrelsens Miljøprojekt nr. 283.

*Hovmand, M.F., Andersen, H.V., Bille-Hansen, J. og Ro-Poulsen, H. (1994):* Atmosfærens stoftilførsel til danske skovøkosystemer. Faglig rapport fra DMU nr. 98.

*Hovmand, M.F., Grundahl, L., Manscher, O., Egeløv, A. og Andersen, H.V. (1994):* Atmosfærisk deposition på danske skove. Faglig rapport fra DMU, nr 122.

*Jensen, J. og Bak, J. og Larsen, M.M. (1996):* Tungmetaller i danske jorder. Temarapport fra DMU 1996/4.

*Johnsen, I. Ro-Poulsen, H., Søchting, U. og Mortensen, L. (1991):* Gasformige luftforureningers effekter på danske plantesamfund. EM-Journal nr. 1323/86-20.

*Saxe, H. (1996):* Ozon og skovtræer. Skoven 6-7:306-309.

*Strandberg, M. (red) (1996):* Ammoniak og naturforvaltning. Rapport fra seminar i Silkeborg d. 30/11-1995. Faglig rapport fra DMU nr. 161.

## Udenlandske

*Andersen, H.V. and Hovmand, M.F. (1994):* Measurements of ammonia and ammonium by denuder and filter pack. Atmospheric Environment 28:3495-3512.

*Ashmore, M.R. (1984):* effects of ozone on vegetation in the United Kingdom. In: (Grennfelt ed.) Ozone, Gothenburg: IVL, 92-104.

*Barrett, K. et al. (1995):* European transboundary acidifying air pollution. EMEP/MSC-W report 1/95. The Norwegian Meteorological Institute. Research Report No. 17.

*Falkengren-Grerup, U. (1995):* Long-term changes in flora and vegetation in deciduous forests of southern Sweden. Ecological Bulletins 44:215-226, Copenhagen, 1995.

*Fuhrer, J. and Achermann, B. (1993):* Critical Levels for ozone – a UN-ECE workshop report. FAC-Liebefeld 16.

*Galloway, J.N. (1996):* Acid deposition: Perspectives in time and space. In 'Grennfelt, P., Rodhe, H., Thörnelöf, E. and Wisniewski, J. (eds.) (1996) Acid Reign – Proceedings from the 5th international conference on acidic deposition. Göteborg, Sweden, 26-30 June 1995.

*Grennfelt, P., Rodhe, H., Thörnelöf, E. and Wisniewski, J. (eds.) (1996):* Acid Reign – Proceedings from the 5th international conference on acidic deposition. Göteborg, Sweden, 26-30 June 1995.

*Grennfelt, P. and Thörnelöf, E. (eds.) (1992):* Critical loads for nitrogen – a workshop report. Nord 1992:41.

- Hovmand, M.F. and Kemp, K. (199-):* Downward trends of sulphur deposition to Danish spruce forest. *Atmospheric Environment* (in press).
- Lövblad, G., Grennfelt, P., Kärenlampi, L., Laurila, T., Mortensen, L., Ojanperä, K., Pleijel, H., Semp, A., Simpson, D., Skärby, L., Tuovinen, J.P. and Tørseth, K. (1996):* Ozone mapping in the Nordic countries. *TemaNord* 1996:528.
- Toppari et al. (1995):* Male reproductive health and environmental chemicals with estrogenic effects. *Miljøstyrelsen, Miljøprojekt nr. 290.*
- Mortensen, L. and Bastrup-Birk, A. (1996):* Critical levels for biomass in White clover (*Trifolium repens* L. cv. Menna) NMP-report in press.
- Nagel, H.-D.(ed.) (1995):* Modellgestützte bestimmung der ökologishen wirkungen von emissionen. Deutscher beitrag zum UN-ECE projekt mapping critical loads & levels in Europe. Abschlussbericht zum F/E-vorhaben 104 01 005. Umweltbundesamtes Berlin, Prädikow, Dezember 1995.
- Nilsson, J. (ed) (1986):* Critical loads for nitrogen and sulphur. Nordisk Ministerråd. Miljørapport 1986:11.
- Nilsson, J. and Grennfelt, P. (1988):* Critical loads for sulphur and nitrogen. Report from a workshop held at Skokloster – Sweden, 19 – 24 of March, 1988. Nord 1988:15.
- Saxe, H. (1989):* Air pollution, primary plant physiological responses, and diagnostic tools. Dr. agro thesis from The Royal Veterinary and Agricultural University – June 1990. Available from the KVL library, Thorvaldsensvej 40, DK-1871 Frederiksberg C, Denmark.
- Selldén, G. and Pleijel, H. (1996):* Photochemical oxidant effects on vegetation – response in relation to plant strategy. *Water, Air and Soil pollut.* 85:111-122.
- Strandberg et al. (1996):* Mapping effects of ozone on yield of agricultural crops and forest production in Denmark. Arbejdsrapport fra DMU nr. 24.
- UN-ECE (1994):* Convention on Long-Range Transboundary Air Pollution. UNECE June 1994, ECE/ENHS/NONE/94/14.

## Danmarks Miljøundersøgelser

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

Henvendelser kan rettes til:

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

\* Indtil der er etableret faciliteter i Roskilde:  
Tagensvej 135, 4. sal, DK-2200 København N  
Tlf. 35 82 14 15, Fax 35 82 14 20

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

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

DMU udgiver følgende publikationer:

Faglige rapporter  
Tekniske anvisninger  
TEMA-rapporter  
R&D Projects  
Årsberetninger

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

## Tidligere udgivelser i serien TEMA-rapporter fra DMU

- Nr. 1994/1: **Kvælstoftilførsel til Limfjorden**  
Brian Kronvang m.fl., 16 sider, Kr. 50,-.
- Nr. 1994/2: **Luftforurening i danske byer**  
Kåre Kemp og Finn Palmgren, 42 sider, Kr. 100,-.
- Nr. 1995/3: **Ozon som luftforurening**  
Jes Fenger, 48 sider, Kr. 80,-.
- Nr. 1996/4: **Tungmetaller i danske jorder**  
John Jensen m.fl., 40 sider, Kr. 100,-.
- Nr. 1996/5: **Forureningsbekæmpelse med mikroorganismer**  
Ulrich Karlson m.fl., 32 sider, Kr. 30,-.
- Nr. 1996/6: **Status og jagttider for danske vildarter**  
Jesper Madsen m.fl., 112 sider, Kr. 110,-.

