

2

Luft

Det stigende energiforbrug og samfundets udslip af drivhusgasser kan ikke undgå at påvirke Jordens klima i dette århundrede. Luftforureningen er ellers mindsket mærkbart i de seneste årtier. Luftkvaliteten i byerne er generelt forbedret, og svovlforureningen er væsentligt reduceret. En undtagelse er sundhedsrisikoen knyttet til den øgede partikelforurening fra den voksende trafik.





Foto: CDanmark

2.1 Indledning

Luftforurening som miljøproblem

Forureningen af atmosfæren er ikke noget nyt fænomen knyttet til den industrialiserede verden. Den tidlige historieskrivning og litteraturen vrimer med hentydninger til den dårlige luft i byerne. Men problemerne er vokset i både geografisk og tidsmæssig skala i takt med den globale befolkningsudvikling og industrialiseringen. Samtidig er der ved udviklingen og væksten i trafik og industri kommet nye stoffer til.

Det er velkendt, at menneskelige aktiviteter har betydelig indflydelse på luftkvaliteten i byområder og her har haft skadelige virkninger på mennesker, dyr, planter, bygninger og materialer. Især har forureningen med partikler i de senere år givet anledning til bekymring, på grund af de sundhedsskadelige effekter der er knyttet til – især – de små partikler.

Luftforurening er ikke kun et lokalt problem. Vinden kan transportere skadelige stoffer over lange afstande. I Danmark kommer en stor del af luftforureningen langvejs fra – også fra kilder, der ligger op til flere tusinde ki-

lometer væk (afsnit 2.4). På regionalt niveau fører det til negative påvirkninger som fx forsuring af skovøkosystemer, søer og vandløb samt eutrofiering af havet. Forurening med ammoniak, der i det væsentlige stammer fra landbrugsaktiviteter, er et voksende problem, ikke kun for vandmiljøet, men også for en række sårbare naturtyper på land.

De menneskelige aktiviteter har efterhånden nået et omfang, hvor udslip til atmosfæren ændrer dens globale sammensætning – ikke i de basale komponenter, men for koncentrationen af en række væsentlige sporstoffer. Det giver anledning til to problemer:

- En nedbrydning af ozonlaget, der skyldes anvendelsen af en række – i det væsentlige industrielt fremstillede – forbindelser (CFC mv.).
- En forøgelse af den naturlige drivhuseffekt, der er afgørende for Jordens og atmosfærens varmebalance og dermed for det globale klima. Her er årsagen de såkaldte drivhusgasser – i det væsentlige kuldioxid, metan og lattergas.

Det er karakteristisk, at der i begge tilfælde er tale om helt ugiftige forbin-

delser – altså om mere indirekte miljøpåvirkninger end ved de "klassiske" luftforureninger.

En nedbrydning af ozonlaget (afsnit 2.5) vil føre til forøget UV-stråling ved jordoverfladen og vil dermed have en række skadelige virkninger på natur og menneskelig sundhed. Virkningerne vil ikke være ens overalt, men de vil alle steder være negative. Hovedårsagen – anvendelsen af CFC og lignende forbindelser – er identificeret, stoffernes udfasning er mulig, og er i mange tilfælde iværksat som følge af internationale aftaler.

Forøgelsen af drivhuseffekten og de deraf følgende klimaændringer (afsnit 2.6) er et langt mere kontroversielt problem. Selvom der efterhånden stort set er videnskabelig enighed om årsagsmekanismene, er omfanget og fordelingen af effekterne endnu ikke afklaret. I spillet vil der både blive vindere og tabere, og en bekæmpelse vil kræve globale omstruktureringer i både energi- og fødevarerektoren. Dette skal ske samtidigt med at verdensbefolkningen fortsat stiger, og udviklingslandene får en højere materiel levestandard. Til trods for internationale bestræbelser for at begrænse udslippet af drivhusgasser og en forventet udvikling i retning af mere bæredygtige teknologier, må det derfor anses for overvejende sandsynligt at et vist mål af klimaændringer er uundgåeligt.

Det overordnede mål er stadig en opbremsning af udviklingen, men samtidigt er det nødvendigt at forberede sig på uundgåelige ændringer.

Både på det videnskabelige og det samfundsmæssige plan hænger de to globale problemstillinger sammen – og sammen med andre luftforureningsproblemer:

- Flere forbindelser kan både nedbryde ozonlaget og forøge drivhuseffekten.
- En nedbrydning af ozonlaget kan modvirke den globale opvarmning, og omvendt kan en global opvarmning påvirke nedbrydningen.
- Luftforurening i troposfæren med ozon forøger drivhuseffekten, mens svovlforurening modvirker opvarmningen.

De forskellige miljøpåvirkninger vekselvirker således med hinanden, og vil antagelig i mange tilfælde forstærke hinanden – i andre tilfælde det modsatte.



2.2 Luftforurening – kilder og udslip

Virkningen af forurenende stoffer i atmosfæren er uafhængig af, om der er tale om menneskeskabte eller naturlige udslip. Det er selvfølgelig umiddelbart lettere at regulere menneskeskabte udslip, men grænsen mellem det naturlige og det menneskeskabte er ikke skarp. Fx udsender nåleskove og anden vegetation flygtige kulbrinter (isoprener og terpener), og moser og andre vådområder udsender metan. Udslippet af disse stoffer afhænger derfor af vores arealanvendelse. Således skønnes det at en stor del (ca. 30%) af de samlede udslip af kulbrinter stammer fra skovområder og landbrug i Europa. Det har en væsentlig betydning for dannelsen af fotokemisk luftforurening.

Menneskeskabte udslip

Hovedkilden til den menneskeskabte luftforurening er anvendelsen af de fossile brændsler kul-, olie- og gasprodukter. Ved forbrændingen dannes forskellige stoffer, nogle er direkte forbrændingsprodukter andre skyldes urenheder i brændslet. Fra trafik domine-

rer fx kvælstofoxider (NO_x), forskellige flygtige organiske forbindelser (VOC), kulilte (CO) og partikler. Industrien udsender de samme stoffer, men ofte i væsentligt andre blandingsforhold, typisk flere kulbrinter, end trafikken. Fra fx de danske kulfyrede kraftværker er der et vist indhold af svovldioxid (SO_2), selvom diverse tiltag har medført en væsentlig reduktion. Fra landbrugets husdyr er der store emissioner af ammoniak (NH_3). Forbruget i husholdningen af flygtige organiske forbindelser såsom forskellige opløsningsmidler, maling, lakker, osv., der indeholder flygtige organiske forbindelser (VOC), er desuden væsentligt. Eksempler på flygtige organiske forbindelser er: ethen, propen, ethyn, benzen og toluen, som har gode egenskaber som opløsningsmidler for fedt og lim.

Opgørelser og usikkerheder

Det er vanskeligt at opgøre udslip af luftforurening præcist, fordi kilderne er så forskelligartede og mangfoldige. Fx afhænger en bils udslip af dens type og alder, indstillingen af motoren, om den har katalysator, og af temperaturen i luften. Desuden er kørsels-

mønsteret af betydning – såvel kørselens type som førerens temperament. Ved specielle undersøgelser kan man måle udslip fra en konkret kilde – fx en bil eller en skorsten – direkte. Man kan også foretage direkte trafiktællinger. Men i de fleste tilfælde beregnes udslip ved anvendelse af såkaldte emissionsfaktorer, der er eksperimentelt bestemte gennemsnitsværdier for udslip som funktion af brændstofforbrug, eller omfanget af en given aktivitet.



Nationale udslip

De Europæiske lande er forpligtede til at lave opgørelse over udslippet i det enkelte land.

Typisk vil resultatet være ét samlet tal pr år pr land for hvert stof. Nogle lande opgiver imidlertid tallene i et gitternet, der i bedste tilfælde har en opløsning på 50 km x 50 km. Det anvendes til beregning af langtransporteret luftforurening, men det er for upræcist, hvis man i lokalskala vil beregne, hvordan niveauerne varierer med årstiden

og tiden på døgnet og hvilke typer af kilder, der fører til de forskellige udslip. Hertil kræves detailundersøgelser.

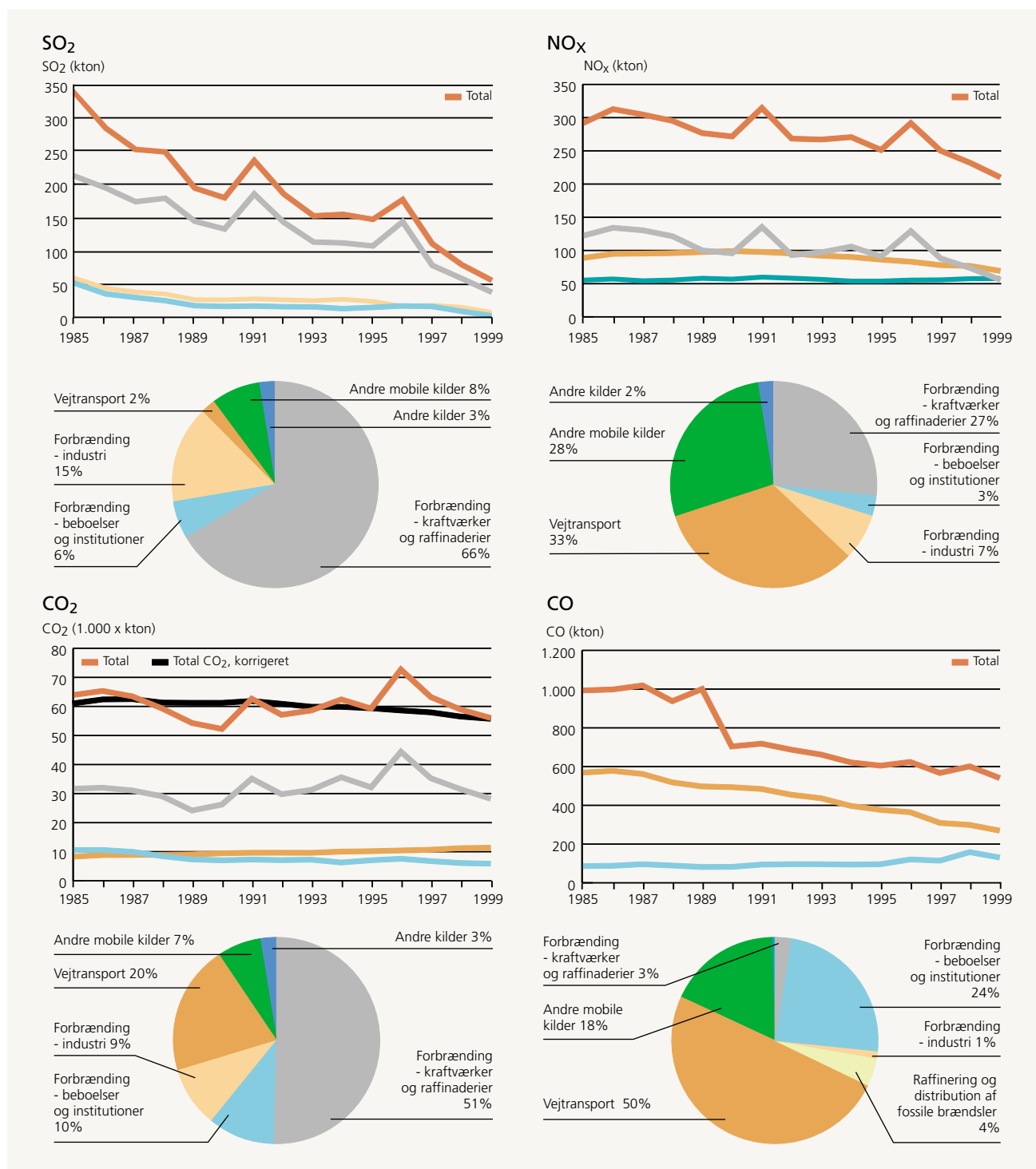
Udviklingen i danske udslip

De danske udslip af de væsentligste luftforureninger opgøres både fordelt på sektorer og med forløb i tid (figur 2.2.1).

Figur 2.2.1

Udviklingen i danske udslip af de væsentligste luftforureninger for perioden 1985-1999 samt fordelingen på sektorer.

(Kilde: Illerup et al., 2001).



SO₂

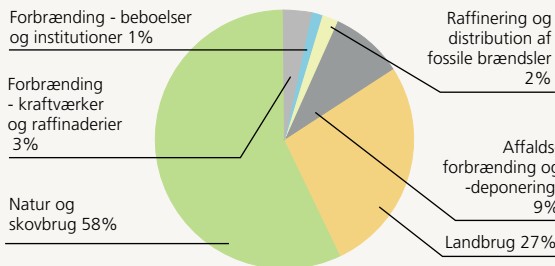
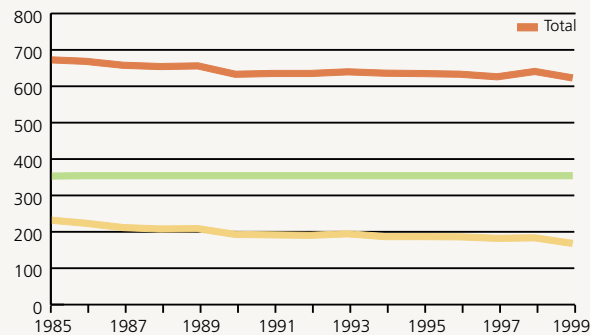
Langt den største del af SO₂-udslippet stammer fra forbrænding af fossile brændsler – hovedsageligt kul og olie – på kraft- og fjernvarmeværker. Udslippene er faldet markant gennem 1980'erne og 1990'erne. Det skyldes anvendelse af brændsler med lavere indhold af svovl samt stigende anvendelse af afsvovlingsanlæg på de større værker. Fra 1998 til 1999 er SO₂-udslippet faldet med 27%. Det er et resultat af reduceret forbrænding af kul, mens anvendelsen af naturgas og vedvarende energi er forøget. Faldet skyldes også forsat udbygning med afsvovlingsanlæg. De relativt store udsving i udslippene skyldes handel med elektricitet på tværs af landegrænser, og de store udslip i 1991 og 1996 er et resultat af stor eleksport.

delse af afsvovlingsanlæg på de større værker. Fra 1998 til 1999 er SO₂-udslippet faldet med 27%. Det er et resultat af reduceret forbrænding af kul, mens anvendelsen af naturgas og vedvarende energi er forøget. Faldet skyldes også forsat udbygning med afsvovlingsanlæg. De relativt store udsving i udslippene skyldes handel med elektricitet

på tværs af landegrænser, og de store udslip i 1991 og 1996 er et resultat af stor eleksport.

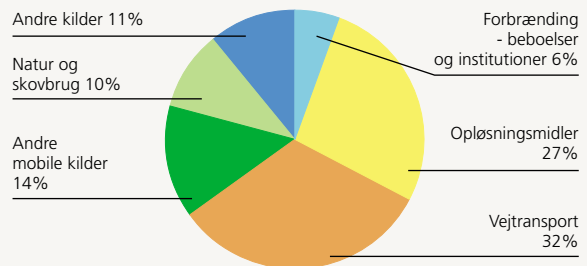
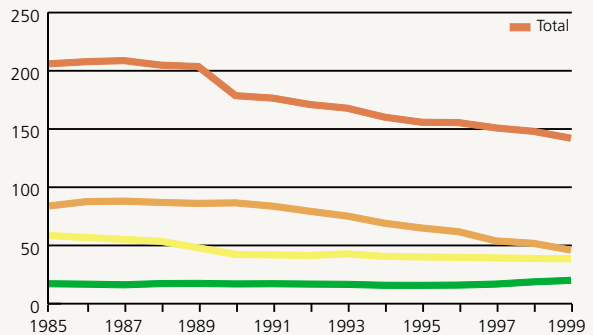
CH₄

CH₄ (kton)



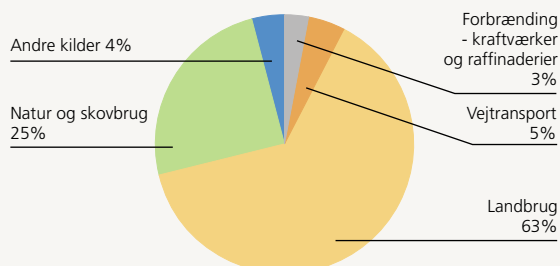
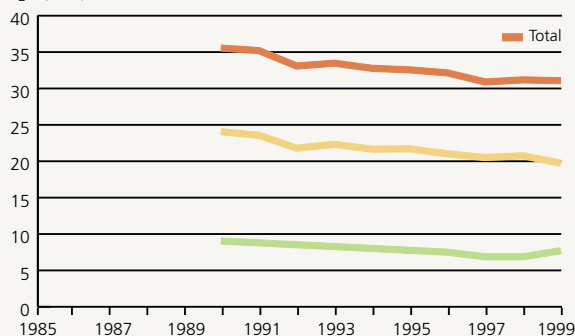
NMVOG

NMVOG (kton)



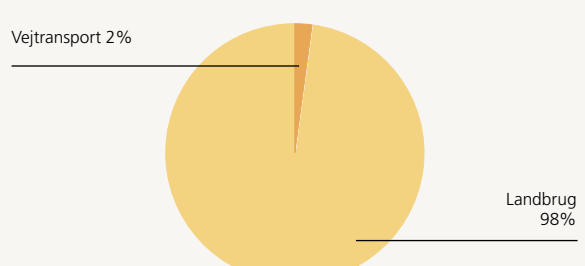
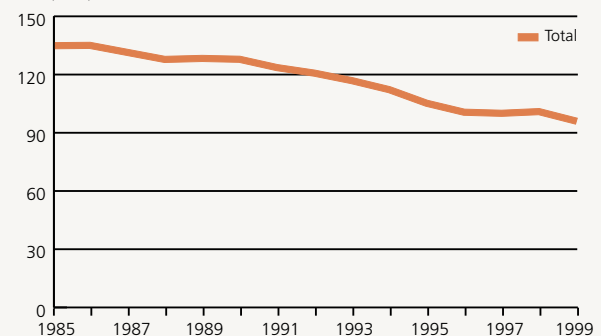
N₂O

N₂O (kton)



NH₃

NH₃ (kton)



NO_x

Omkring halvdelen af de danske NO_x-udslip stammer fra vejtrafik og andre mobile kilder. En anden stor kilde er kraftværkerne. I de senere år er der sket et fald i det samlede udslip af NO_x og, som for SO₂-udslippet er NO_x-udslippet faldet markant fra 1998 til 1999. Det skyldes at emissionerne er reduceret fra såvel kraftværker som vejtrafik. Mindre eksport af elektricitet er sammen med mindre anvendelse af kul årsagen til en reduktion på 24% fra kraftværkerne. Selvom vejtrafikken er steget, er dens udslip faldet siden 1990. Det skyldes indførelsen af katalysatorbiler fra dette år.

CO₂

CO₂-udslippet stammer altovervejende fra forbrænding af kul, olie og naturgas på kraftværker samt i beboelses- ejendomme og industri. Danmarks totale udslip af CO₂ har siden 1985 varieret omkring de 60 millioner tons, men kan svinge med op til 15 millioner tons om året som følge af import eller eksport af elektricitet. Udslippet alene som følge af vort hjemlige forbrug har været støt faldende siden slutningen af 1980'erne (jf. afsnit 1.3.1). Det aktuelle CO₂-udslip er faldet med 5% fra 1998 til 1999. Det skyldes hovedsagelig mindre eksport af elektricitet og højere udendørstemperatur i 1999 i forhold til 1998. Men også ændret brændsels-anvendelse fra kul til naturgas og vedvarende energi har bidraget til det lavere udslip. Som et resultat af de seneste års lavere forbrug af kul stammer hovedparten af CO₂-udslippet nu fra forbrænding af olie.

CO

På trods af at alle nye benzinbiler siden 1990 er udstyret med katalysatorer, er vejtrafikken stadigvæk den dominerende CO-kilde. Men som det ses for NO_x-udslippet har der været et signifikant fald i udslippet fra 1998 til 1999. Det skyldes at en stadig stigende andel af bilerne er udstyret med katalysatorer. Også andre mobile kilder og ikke-industrielle forbrændingsanlæg giver betragtelige bidrag til det samlede udslip.

CH₄

Der er to store kilder til udslip af metan: Natur og landbrug. De naturlige kilder bidrager med mere end halvdelen af det samlede udslip, og dette bidrag kommer hovedsageligt fra iltfri nedbrydning af organisk stof. Udslippet fra landbruget skyldes dannelse af metan i husdyrenes fordøjelsessystem samt håndteringen af husdyrgødning.

NMVOG

Udslippet af NMVOG kommer fra mange principielt forskellige kilder – både menneskeskabte og naturlige – og kan inddeles i to hovedtyper: Ufuldstændig forbrænding og fordampning. Vejtrafik og andre mobile kilder, såsom skibe og arbejdsredskaber, er hovedkilderne til NMVOG-udslippet fra ufuldstændig forbrænding. Vejtrafik er stadig den største kilde, selvom udslippene er faldet siden indførelse af katalysatorbiler i 1990. Af væsentlige emissionskilder fra fordampning af NMVOG'ere skal især nævnes udsendelsen af terpener og andre flygtige organiske forbindelser fra nåleskove, samt udslip som stammer fra industriens og husholdningernes brug af organiske opløsningsmidler.

N₂O

Landbruget udgør langt den vigtigste kilde til udslip af lattergas (N₂O), da dette kan dannes i jord ved bakteriel omdannelse af kvælstof udbragt med handels- og husdyrgødning. Andre væsentlige kilder er drænvand og kystnære vandområder, hvor der ligeledes sker en bakteriel omdannelse af kvælstof. Dette kvælstof stammer dog i vid udstrækning også fra landbrugets gødskning.

NH₃

Landbruget tegner sig for næsten alt atmosfærisk udslip af ammoniak. Kun en mindre del (2%) stammer fra trafiksektoren. Denne del er dog stigende som følge af stigende brug af katalysatorer, mens landbrugets andel er faldende.

Hovedparten af ammoniakemissionen fra landbruget stammer fra husdyrgødningen (76%). Herudover er der bidrag fra tilførslen af handelsgødning (7%), afgrøder (15%) og ammoniakforbruget ved halmludning (2%). Der er også et bidrag fra tilførslen af spildevandsslam, men det er forsvindende (<1%).

Tabel 2.2.1

Danmarks udslip af tungmetaller for årene 1990 og 1999.

(Kilde: Illerup et al., 2001).

(kg)	Arsen	Kadmium	Krom	Kobber	Kviksølv	Nikkel	Bly	Selen	Zink
1990	1.447	1.125	6.211	10.036	3.171	26.474	126.788	4.236	34.569
1999	846	713	2.650	9.609	1.976	15.200	7.337	3.514	22.887
Procent reduktion	42	37	57	4	38	43	94	17	34

Tungmetaller

De vigtigste kilder til udslip af tungmetaller er afbrændingen af fossile brændsler og affaldsforbrænding. På trods af et øget brændselsforbrug fra 1990 til 1998, er der sket et markant fald i tungmetaludslippet (tabel 2.2.1). Reduktionen ligger mellem 4% og 94% for henholdsvis kobber og bly. De mindskede udslip skyldes i vid udstrækning øget anvendelse af røgrensningsudstyr på kraft- og fjernvarmeværker, herunder affaldsforbrændingsanlæg. For bly skyldes faldet dog overvejende indførsel af blyfri benzin. De mindskede udslip af tungmetaller over de seneste ti år har ført til et parallelt fald i tungmetalfaldet og i luftens koncentration af tungmetaller (jf. afsnit 2.4, figur 2.4.6).

Forsurende gasser

Udslippet af forsurende gasser kan omregnes til syreækvivalenter, hvorved stoffernes potentielle syrevirkning kan sammenlignes (figur 2.2.2). Den største forsurende faktor i Danmark er kvælstof som stammer fra landbrugets ammoniakudslip. Udslippene fra alle de forsurende gasser er faldet siden 1990. Specielt er udslippet af SO₂ faldet markant, og bidraget fra ammoniak er steget i relativ betydning fra 39% til 47%.

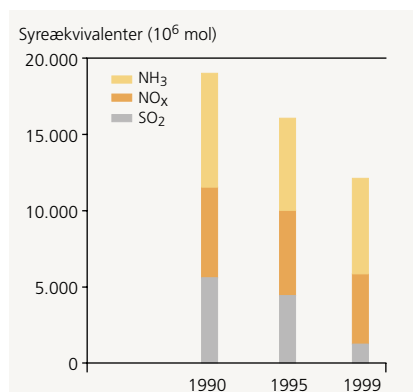
Drivhusgasser

Udslippet af danske drivhusgasser fordelt på menneskeskabte udslip og omregnet til CO₂-ækvivalenter viser at CO₂ er den vigtigste drivhusgas efterfulgt af CH₄ og N₂O (figur 2.2.3). De øvrige drivhusgasser HFC, PFC og SF₆ har en samlet andel af det totale udslip på mindre end 1%. I modsætning til de forsurende gasser er reduktionen i drivhusgasudslip meget mindre udtalt (jf. afsnit 1.3.1).

Figur 2.2.2

Fordelingen af Danmarks udslip af forsurende gasser for 1990, 1995 og 1999 omregnet til syreækvivalenter.

(Kilde: Illerup et al., 2001).

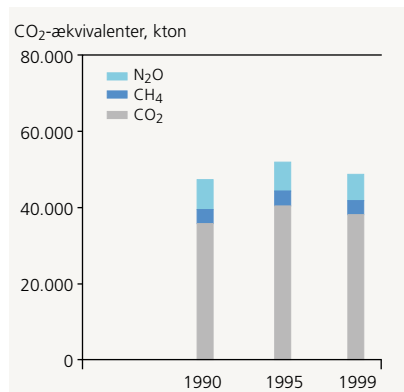


Figur 2.2.3

Danmarks udslip af drivhusgasser for 1990, 1995 og 1999 omregnet til CO₂ ækvivalenter.

Tallene er beregnet på basis af det faktiske udslip, som ikke er korrigeret for elimport.

(Kilde: Illerup et al., 2001).



Tabel 2.2.2

Status for Danmarks udslip af stoffer målsat i henhold til de internationale konventioner om globale og grænseoverskridende luftforureninger.

(Kilde: Illerup et al., 2001).

Protokol	Stoffer	Basisår	Målar	Reduktionsmål i procent	Reduktion i 1999 i procent
CLRTAP svovl-protokol	SO ₂	1980	2000	80	88
CLRTAP NOx-protokol	NO _x	1987	1994	0	11(1994) 31
CLRTAP VOC- protokol	VOC	1985	1999	30	35
UNFCCC Kyoto-protokol ¹⁾ (endnu ikke ratificeret)	CO ₂ , CH ₄ , N ₂ O HFC'ere, PFC'ere, SF ₆	1990: CO ₂ , N ₂ O, CH ₄ 1995: HFC'ere, PFC'ere, SF ₆	2008-2012	21 ²⁾	5

1) EUs byrdefordelingsaftale om en EU reduktion på 8% under Kyotoprotokollen.

2) Baseret på CO₂-udslip korrigeret for import af elektricitet i 1990.

Status i forhold til målsætninger

Den grænseoverskridende luftforurening reguleres bl.a. gennem en række internationale konventioner under FN. De vigtigste konventioner er "Convention on Long Range Transboundary Air Pollution" (CLRTAP) (jf. afsnit 2.4), samt FN's konvention om klimaændringer (UN Framework Convention on Climate Change, UNFCCC) under IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) (jf. afsnit 2.6, 1.3.1). Status for Danmarks udslip af stoffer som er målsat i henhold til disse konventioner er samlet i tabel 2.2.2.

Reduktionsmålet i VOC-protokollen er en reduktion af de antropogene udslip på 30% fra 1985 til 1999. Dette er opfyldt med en reduktion på 35%. I svovlprotokollen (Osloprotokollen 1994) under UNECE-konventionen er Danmark forpligtet til at reducere SO₂-udslippet med 80% fra 1980 til 2000. Dette mål vil sandsynligvis blive nået. Det generelle mål i NO_x-protokollen er en stabilisering af NO_x-udslippet på 1987-niveau i 1994. I denne periode opnåede Danmark en reduktion på 11% og i 1999 var reduktionen 31%. Derimod må Danmark iværksætte nye tiltag hvis målet i henhold til Kyotoprotokollen skal nås (afsnit 1.3.1).

Den sidste nye protokol under CLRTAP er Gøteborg Protokollen. Den har til formål at reducere udslippene af SO₂, NO_x, NMVOC og NH₃ (tabel 2.2.3). I modsætning til de tidligere protokoller er de enkelte lande ikke blevet pålagt reduktionsmål, men er blevet tildelt "udslipslofter" med henblik på at reducere overskridelsen af økosystemernes kritiske belastningsgrænser. Protokollen er ved at blive ratificeret i Danmark.

Stoffer	Udslipslofter i 2010 (tons)	Udslip i 1999 (tons)
SO ₂	55.000	55.911
NO _x	127.000	210.171
NMVOC	85.000	128.000
NH ₃ *	69.000	74.751

* NH₃-udslip i Gøteborg Protokollen er eksklusiv udslip fra halmludning og afgrøder

Tabel 2.2.3

Danmarks udslipslofter for SO₂, NO_x, NMVOC og NH₃

i henhold til Gøteborg Protokollen.

(Kilde: Illerup et al., 2001).



Foto: 2. maj/Sonja Iskov

2.3 Lokale effekter af luftforurening

2.3.1 Udvikling i luftkvaliteten lokalt

Indledning

Det er velkendt at menneskelig aktivitet har en betydelig indflydelse på luftkvaliteten i byområder og har skadelige effekter på mennesker, dyr og planter, bygninger og materialer. Især har forureningen med partikler (støv) i de senere år givet anledning til en stigende bekymring. Luftforurening i byerne er imidlertid ikke kun et lokalt skabt problem. Vinden kan transportere skadelige stoffer over lange afstande. I Danmark stammer således en stor del af luftforureningen fra kilder, der ligger op til flere tusinde km væk. Denne fjerntransporterede luftforurening bidrager sammen med den lokale forurening til den aktuelle luftkvalitet.

Luftkvaliteten i de danske byer følges igennem det landsdækkende LuftkvalitetsMåleProgram (LMP), som omfatter København, Odense, Aalborg samt Århus. Programmet omfatter tillige to baggrundstationer i landdistrikterne: Keldsnor på Langeland og Lille Valby ved Roskilde. Den valgte målestrategi giver mulighed for adskille trafikens forurening fra byens forurening i øvrigt, samt mulighed for at adskille byernes forurening fra den naturlige baggrund og den fjerntransporterede luftforurening. I måleprogrammet undersøges

koncentrationen af de mest betydende luftforurenende stoffer: kvælstofoxider, svovldioxid, kulmonoxid, ozon og partikler. Disse stoffer er gennemgået nedenfor – partikelforureningen dog i et særligt uddybende temaafsnit (afsnit 2.3.2).

Figur 2.3.1

Målestation på Jagtvej i København. Stationen indgår i det landsdækkende Luftkvalitetsmåleprogram LMP III. (Kilde: Palmgren et al., 1997).



Foto: DWU/Finns Palmgren

Udvikling i luftkvaliteten

De senere års målinger i danske byområder har vist en generel forbedring af luftkvaliteten i vore byer. Bly er stort set forsvundet som luftforurening med indførelsen af blyfri benzin, og det målte niveau er lavere end 5% af de nyeste EU-grænseværdier (tabel 2.3.2).

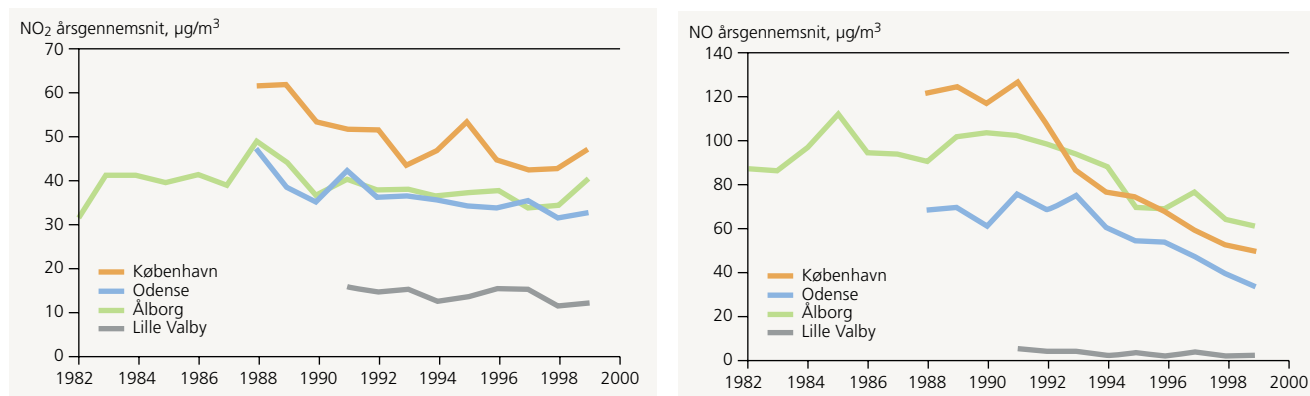
Forureningen med svovldioxid er drastisk reduceret som følge af de generelle reduktionsbestrebelselser som omfatter renere brændsler, naturgas, røggasrensning og overgang fra individuelle små fyringsanlæg til fjernvarme). Svovldioxidniveauet er også langt under de nyeste EU-grænseværdier (tabel 2.3.2). Også niveauerne af kulmonoxid og kulbrinter, herunder benzen er blevet reduceret, hvilket især skyldes indførelsen af katalysatorer på benzinbiler.

Kvælstofoxider og ozon

Det samlede udslip af kvælstofoxider ($\text{NO} + \text{NO}_2$) er faldet, og det samme gælder niveauerne af NO . Faldet i NO_2 , der er den mest sundhedsskadelige kvælstofoxid, er dog beskedent (figur 2.3.2). Det skyldes at NO_2 kun i beskedent omfang udsendes direkte fra biler. Det meste dannes ved reaktioner mellem NO og ozon, hvor koncentration af disse gasser bliver bestemmende for hvor meget NO_2 der kan dannes. På landet er der stort set ingen NO . Det er blevet omdannet på vej ud fra byen. Koncentrationen af NO_2 er omtrent ens for Ålborg og Odense, men højere for København, formodentlig pga. højere direkte udslip af NO_2 i København. Kvælstofmonoxid niveauet er ens i Ålborg og København, men lavere i Odense.

I Danmark har vi generelt ikke problemer med ozon i byerne, fordi ozondannelsen under danske forhold er beskedent (tabel 2.3.1). Ozonniveauet har været næsten konstant i Danmark over en tiårig periode. Mange steder i Syd- og Mellemeuropa opstår episoder med meget høje ozonkoncentrationer i og omkring de store byer. Sådanne ozonepisoder kan opstå i Danmark, når ozon dannet i Centraleuropa breder sig til Danmark.

I almindelighed er ozonniveauet lavere i byerne end i landdistrikterne, fordi ozon reagerer med NO og danner NO_2 . Derfor vil summen af NO_2 og ozon være næsten konstant når man bevæger sig land til by; kun det direkte udslip af NO_2 (5-10% af NO_x) vil give anledning til en større sum af NO_2 og ozon i byerne.



Figur 2.3.2

Koncentrationen af kvælstofoxider i danske byer og på en enkelt landdistriktstation 1982 – 1999.

(Kilde: Kemp og Palmgren, 2000).

Benzen

Frem til midten af 1990'erne var benzenkoncentrationen i luften i trafikerede gader ret høj, og de nyeste EU-grænseværdier ville ikke kunne overholdes på de mest trafikerede og smalle gader (tabel 2.3.2). Kilden hertil var benzinbiler, som udsendte benzen både gennem udstødningsskeden og som fordampning fra tank og motor. De følgende år reducerede olieselskaberne benzenindholdet i benzinen fra 3-4% til 1% i 1998 på de danske raffinaderier. Fra 1. januar 2000 indførtes 1% i hele

EU. Også fornyelsen af den danske bilpark har reduceret benzenudslippet, idet nyere biler har et mere lukket system, som reducerer fordampningen.

Luftforureningen med benzen er således faldet drastisk, både fordi indholdet i benzin er reduceret, men også fordi katalysatorerne fjerner benzen. I dag har alle benzinbiler katalysatorer, hvis de er indregistreret første gang efter oktober 1990. De udgør mere end 60% af bilparken, og på stærkt trafikerede gader er procentdelen oftest endnu større.

Grænseværdier for luftkvalitet

I EU har man siden 1980 fastsat grænseværdier for luftkvalitet. De er derefter blevet overført til dansk lov i form af bekendtgørelser. Hidtil er grænserne blevet fastsat på basis af effektivurderinger kombineret med en afvejning af tekniske, økonomiske og politiske hensyn.

Grænseværdierne er under revision og nye grænseværdier vil gælde fra år 2005 eller 2010, afhængigt af det stof det drejer sig om (tabel 2.3.2). Revisionen udspringer af at EU i 1996 vedtog et nyt såkaldt rammedirektiv for luftkvalitet, som skal udfyldes med datterdirektiver for enkelte stoffer.

Tabel 2.3.1

Årligt gennemsnit og maksimum værdier for ozon i 1999, sammenlignet med tærskelværdier.

(Kilde: Miljøministeriet 1994, EEC 1992).

O ₃ (µg/m ³)	Gennemsnit	Maksimum 24 timer	Maksimum 8 timer	Maksimum 1 time
Bybaggrund:				
• Odense	51	107	146	180
• Aalborg	51	98	125	142
Landdistrikter:				
• Lille Valby	59	118	174	188
• Keldsnor	66	113	130	154
Trafik:				
• København	33	77	92	119
Tærskelværdi	-	65	110	200
Gennemsnitlige antal af overskridelser af tærskelværdier	-	100	10	0

Tabel 2.3.2

Grænseværdier ifølge datterdirektiverne af EUs rammedirektiv for luftkvalitet.

(Kilde: EC 1996, 1999, 2000).

Stof	Grænseværdi, µg/m ³	Prøvetagningstid i timer	Statistik	Beskyttelse af	Skæringsdato
NO ₂	200	1	18 gange pr. år	Mennesker	2010
	40	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010
NO _x	30	-	Gennemsnit, år	Vegetation	2010
	350	1	24 gange pr. år	Mennesker	2005
SO ₂	125	24	3 gange pr. år	Mennesker	2005
	20		Gennemsnit, år og vinter	Vegetation	2101
	50	24	35 gange pr. år	Mennesker	2005
Partikler (PM ₁₀)	40	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2005
	50	24	7 gange pr. år	Mennesker	2010
	20	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2005
	0,5	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2005
Benzen	5	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2005
CO	10.000	8 timer (glidende)	Maksimum	Mennesker	2005

Grænseværdierne skal nu fastsættes på grundlag af effektvurderinger, primært baseret på WHO's anbefalinger. Foruden grænseværdier der i de fleste tilfælde bliver skærpede, vil disse datterdirektiver indeholde krav til målemetoder, offentliggørelse af resultater

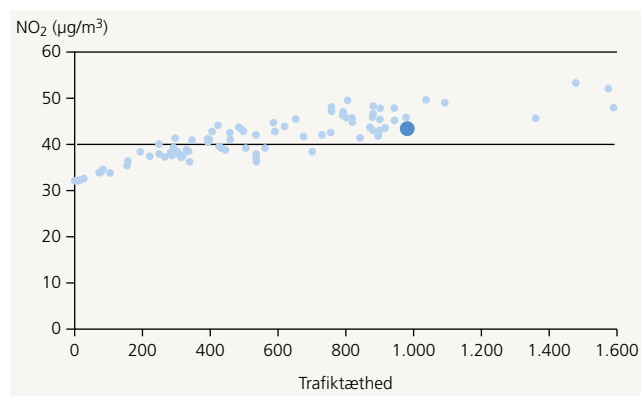
mv. Der er vedtaget et datterdirektiv for svovldioxid, nitrogendioxid, partikler (PM₁₀), bly og et datterdirektiv for benzen og kulmonoxid (tabel 2.3.2). Direktiver er under udarbejdelse for ozon, PAH, kviksølv, nikkel, kadmium og arsen.

Vurdering af luftkvalitet

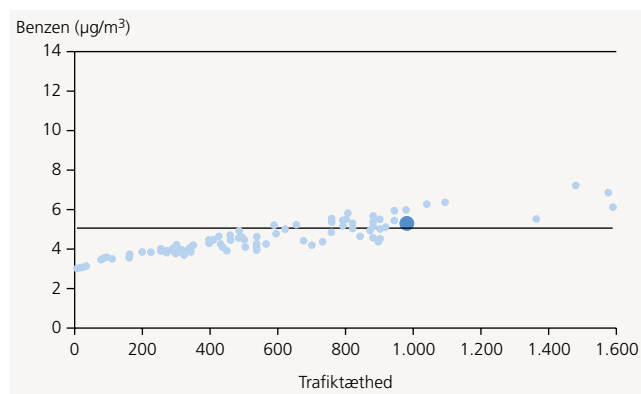
Boks 2.3.1
Implementering af
EU-direktiverne om
luftkvalitet.

I forbindelse med gennemførelse af EU-direktiverne om luftkvalitet skal der gennemføres en såkaldt indledende vurdering af luftkvaliteten i Danmark med henblik på at fastlægge et måleprogram. Princippet er at man skal finde de områder hvor der er fare for at grænseværdierne overskrides og så etablere luftmålestationer og gennemføre en mere omhyggelig vurdering af luftkvaliteten i sådanne områder (zoner). I overensstemmelse med disse anvisninger er det bl.a. blevet undersøgt hvorledes forureningen i en gade varierer med trafiktæthed og gadebredde. Forureningen med både NO₂ (figur 2.3.3) og benzen (figur 2.3.4) overskrider de nye grænseværdier på de mest trafikerede og smalle gader. I København viser scenarieberegninger dog at grænseværdierne vil kunne opfyldes 2010 som direktiverne kræver.

Udover den indledende vurdering på trafikens forureninger er der også foretaget vurdering af forureningen fra punktkilder. Resultatet er, at EU-grænseværdierne med stor sandsynlighed vil være opfyldt, hvis forureningskilderne overholder Miljøstyrelsens Luftvejledningen.



Figur 2.3.3
Modelberegninger af årsmiddelværdi af NO₂ i 2000 for 103 gader i København. Den vandrette akse er trafiktætheden angivet som antal biler pr. døgn pr. m gadebredde. Jagtvej er markeret med en lukket cirkel. EU-grænseværdien er vist som en vandret linie. (Kilde: Jensen et al., 2000).



Figur 2.3.4
Modelberegninger af årsmiddelværdi af benzen i 2000 for 103 gader i København. Den vandrette akse er trafiktætheden angivet som antal biler pr. døgn pr. m gadebredde. Jagtvej er markeret med en lukket cirkel. EU-grænseværdien er vist som en vandret linie. (Kilde: Jensen et al., 2000).

Forudsigelse af luftkvalitet

Et modelsystem gør det muligt at forudsige luftforureningen helt nede i de enkelte gader i byerne. Prognoserne bygger dels på en vejrodsigt, dels på et sæt af fysisk/kemiske computermodeller for spredning og kemisk omdannelse af luftforurening.

Man kan dagligt på hjemmesiden <http://luft.dmu.dk> finde en tredøgns prognose for luftforureningen for regionale områder i Danmark, for luftkvaliteten over tagniveau i København og i gadeniveau specifikt for Jagtvej i København. Ligeledes kan man få at vide hvordan forureningen med fx ozon, kvælstofilter, CO eller benzen ventes at udvikle sig de kommende dage på begge sider af Jagtvej eller over Danmark. Prognoserne er udvidet til at omfatte mange flere gader i København og andre større danske byer, og dette er allerede gennemført i Ålborg. Luftudsigten bliver beregnet fire gange i døgnnet.

Det er kun stofferne kvælstofdioxid (NO₂), kulilte (CO) og ozon der bliver brugt til meldingerne i luftudsigten. Alle kurver der viser tidsudviklingen i de følgende tre dage og den geografiske fordeling af luftforureningen over København og Danmark kan dog ses i detaljer i de underliggende sider på hjemmesiden.

Systemet vil kunne bruges til at informere og evt. advare befolkningen og myndighederne, når man kan forudsige en overskridelse af kritiske grænseværdier. Det er specielt mennesker med luftvejslidelser som fx astma og bronkitis der vil have nytte af at bruge luftudsigten. Det skal dog understreges at EUs nuværende grænseværdier for de enkelte stoffer meget sjældent eller aldrig bliver overskredet i Danmark, men disse grænseværdier er jf. ovenfor under revision og vil blive skærpet.

Boks 2.3.2
Luftforurenings-
udsigter.



	Søndag 25/07-01	Tirsdag 26/07-02	Fredag 29/07-03
Trøjteknit gade:			
Jagtvej - Øst	Over middel	Middel	Middel
Tegnehallen:			
Nørrebro	Middel	Middel	Middel
Søndagskøkken:			
Århus	Middel	Middel	Middel
Copenhagen	Middel	Middel	Middel
Ålborg	Middel	Middel	Middel
Århus	Middel	Over middel	Middel
Århus	Over middel	Middel	Middel

Figur 2.3.5
Eksempel på luftudsigten for 3 dage i september 2000, for Jagtvej i København, København som helhed og for forskellige regioner i Danmark. Der er 5 forskellige mulige meldinger: "under middel", "middel", "over middel", "høj" og "varsling". Luftudsigten kan findes på <http://luft.dmu.dk>



Foto: 2. maj/Sonja Iskov

2.3.2 Tema – Forurening med partikler

Luftforurening med partikler eller støv i byområder giver anledning til en række alvorlige sundhedsskadelige effekter: dels langtidseffekter som for eksempel cancer og hjertekar-sygdomme, og dels akutte effekter som allergi eller irritation af øjne, næse eller hals. Partiklerne har meget forskellig størrelse, lige fra støv og jord i synlig størrelse, til ultrafine partikler som er 1.000 gange mindre. Undersøgelser har vist, at korrelationen mellem partikelkoncentrationen og sundhedsskadelige effekter vokser med aftagende partikelstørrelse. Det er derfor vigtigt at undersøge specielt forekomsten af de meget små partikler.

Den grove fraktion af partikler er større end $2.5 \mu\text{m}$. De dannes typisk mekanisk ved trafikskabt turbulens, vind erosion, havsprøjt etc.. En anden fraktion af partikler er de fine partikler mellem $0,2 \mu\text{m}$ og $2,5 \mu\text{m}$, som typisk dannes ved kemiske reaktioner (fx omdannelse af SO_2 og NO_x til sulfat og nitrat i atmosfæren), koagulation, kondensation af gasser på partikler eller andre langsomme processer. Disse partikler er således bl.a. et resultat af udslip af NO_x og SO_2 fra forbrændingsanlæg og biler. Den tredje fraktion er der ultrafine partikler, som er mindre end $0,2 \mu\text{m}$. Partikler fra bilmotorer, benzin- såvel som dieselmotorer, dannes ved høje temperaturer i motorerne, i udstødningsrørene eller umiddelbart efter udslip til luften. Også andre forbrændingsprocesser og visse atmosfærekemiske processer giver anledning til dannelse af ultrafine partikler (figur 2.3.6).

Der findes forskellige mål for mængden af partikler i luft. Det hidtil mest anvendte er TSP (Total Suspended Particulate Matter – den totale mængde suspenderet materiale). Ellers bruges PM_{10} eller $\text{PM}_{2,5}$, som er mængden af partikulært materiale med en diameter på hhv. $10 \mu\text{m}$ eller $2,5 \mu\text{m}$. I Danmark er alle målestationer under ombygning til måling af PM_{10} , hvilket er tilendebragt i 2010. Endvidere foretages der kampagnemålinger af $\text{PM}_{2,5}$ på udvalgte stationer.

TSP i byluft er en blanding fra forskellige kilder, men de grove partikler fra vindophvirvlet støv af lokal oprindelse dominerer massen af denne del af partiklerne. De fine partikler stammer som nævnt især fra forbrænding af fossile brændsler i Europa. En meget stor del af disse partikler er (ammonium)-sulfat og -nitrat, som er dannet fra ammoniak, SO₂ og NO_x. De udgør en meget stor del af PM_{2,5} i Danmark. De er typisk dannet i løbet af nogle døgn under transport fra Centraleuropa til Danmark. Denne del forventes at aftage i fremtiden på grund af udslipsreduktioner. Det er et resultat af bedre rensning af røggasser fra kraftværker mv., krav om trevejs katalysatorer (TWC) på alle nye benzindrevne biler og begrænsninger i dieselmotorens udslip. Udslip af fine og især de ultrafine partikler sker specielt fra diesel- og benzindrevne biler.

Luftforureningen i fx en gade er en sum af bidrag fra trafikken i gaden, fra trafikken i de øvrige gader, andre kilder i byen, regionens kilder, det øvrige Danmarks kilder og udenlandske kilder. De enkelte bidrag varierer i tid som følge af udslippetenes størrelse, omdannelse af forureningen, afsætning på overflader og de meteorologiske forhold, fx vindretning, vindhastighed, stabilitet mv. Dette gælder naturligvis også for partikler. Imidlertid er beskrivelse og vurdering af forureningen med partikler mere kompliceret end de fleste øvrige luftforureninger, bl.a. fordi det er nødvendigt ikke kun at angive koncentrationen, men også den kemiske sammensætning og størrelsesfordelingen.

Mange kilder giver anledning til udslip af forskellige typer af partikler, med forskellige størrelser og kemisk sammensætning. Vejtrafikken er et eksempel på, at den samme kilde skaber partikler af vidt forskellig art afhængigt af dannelsesprocesserne. En del af partiklerne dannes i motoren, i udstødningssystemet el-

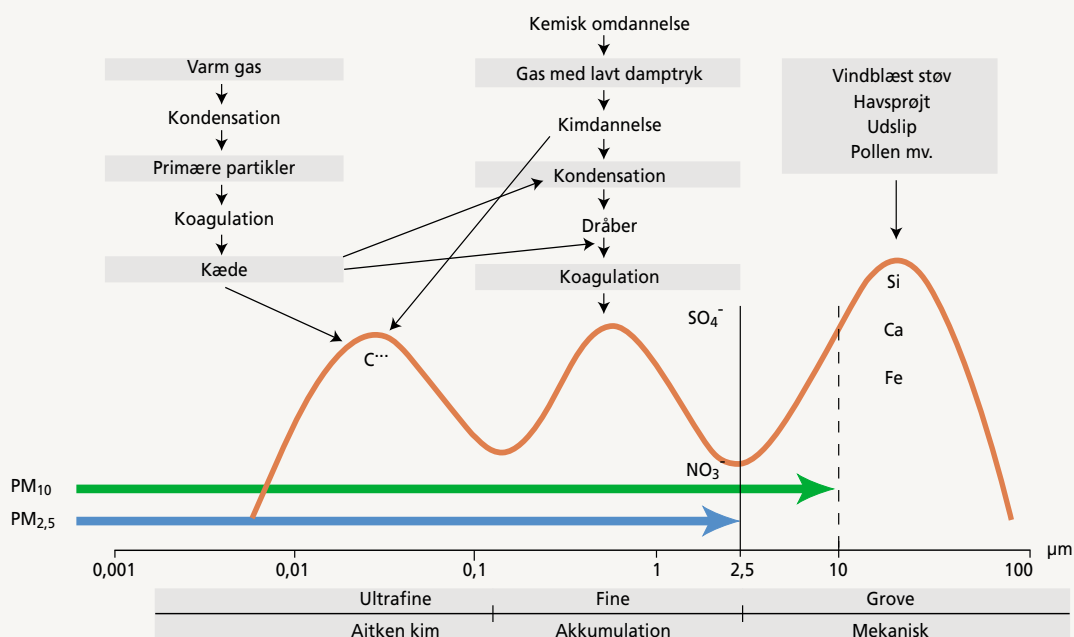
ler umiddelbart udenfor udstødningsrøret; disse partikler udgør for en stor del de fine og ultrafine partikler. Andre partikler dannes som ophvirvlede partikler fra kørebanen, kørebaneslid, dækslid samt slid på bremses, koblinger mv.; det er oftest de grovere partikler. Udslip af NO_x fra biler i Centraleuropa giver anledning til dannelse af partikler under langtransporten til Danmark – en transport hvor partiklerne undervejs også optager ammoniak udsendt bl.a. fra landbruget.

Nedbringelse af partikeludslip fra trafik kan fx ske ved at sætte partikelfiltre på dieselmotorens. Der findes mange forskellige typer og fabrikater af filtre til dieselmotorens, og målinger i Danmark samt undersøgelser andre steder i Verden viser, at mange af filtrene har stor effektivitet (> 90%) overfor partikler, også de ultrafine partikler. Nogle motorfabrikater er desuden i gang med at udvikle nye teknologier, som skulle reducere partikeludslippet væsentligt. Katalysatorer på benzindrevne biler viser sig at have stor effektivitet (> 90%) overfor partikler, også de ultrafine partikler.

Niveauer og udvikling

TSP bliver målt i det Landsdækkende Luftkvalitetsmåleprogram (LMP). TSP måles som 24 timers gennemsnitsværdier i København, Odense, Aalborg og Lille Valby (tabel 2.3.3). Grænseværdierne blev ikke overskredet, og målingerne viser også at koncentrationen på baggrundsstationen Lille Valby ligger på et niveau mellem en tredjedel og halvdelen af niveauet for gadestationerne i byerne (figur 2.3.7).

Kontinuerte målinger af PM₁₀ blev startet i juli 1998 på Jagtvej i København. TSP viste sig generelt at være ca. 35% højere end PM₁₀. Dette svarer til, hvad man finder i andre byer. Denne forskel udgøres altså af meget store partikler.



Figur 2.3.6
Skematisk tegning af størrelsesfordelingen af partikler i byluft. Den lodrette akse har en arbitrær skala. (Kilde: Danmarks Miljøundersøgelser).

EU direktivernes nye grænseværdier (fx årsmiddelværdien på 40 µg/m³ målt som PM₁₀ der skal opfyldes i 2005) er formodentlig overskredet flere steder, når TSP omregnes til PM₁₀. Grænseværdien for 2010 (20 µg/m³) er klart overskredet, og det er tvivlsomt om den vil kunne overholdes, bl.a. fordi en del af PM₁₀ forureningen er af naturlig oprindelse eller ophvirvlet støv fra forskellige aktiviteter, bl.a. byggerier og jordbrug.

Koncentrationen af de fine partikler varierer kun lidt over Danmark (figur 2.3.8). I byområder (bybaggrund) er forureningen med partikulært svovl (og nitrat) næsten den samme som i det åbne land. Kun i trafikerede gader er denne forurening lidt højere (20-40%) på grund af trafikens bidrag. I de seneste 10 år er det sket et klart fald i koncentrationen af svovlholdige partikler over Danmark. Det skyldes først og fremmest reduktionerne i svovldioxid udslippet i Europa, specielt Østeuropa.

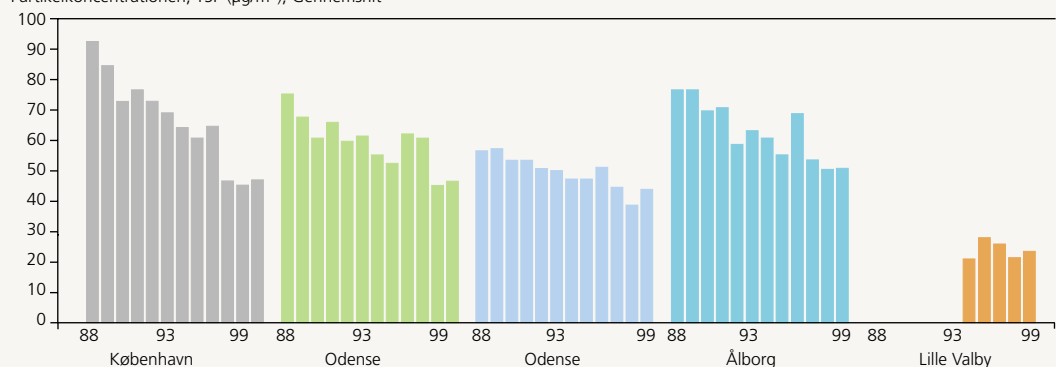
Målinger af ultrafine partikler fordeling på størrelse er blevet gennemført på stærkt trafikerede gader i København (Jagtvej) (figur 2.3.9) og i Odense (Albanigade) (figur 2.3.10). Bidragene til partikelforureningen fra benzin- og dieseldrevne biler er næsten den samme på Jagtvej, fordi andelen af dieslbiler her er meget lille. Bidraget med ultrafine partikler fra dieslbiler på Albanigade i Odense, som er en mere typisk gade, var meget højere end fra benzinbiler.

I sommeren 1999 gik Danmark over til dieselolie med lavere svovlindhold, fra maksimum 500 ppm til under 50 ppm. I samme periode blev der målt ultrafine partikler i København. På grundlag af målinger i vintrene 1999 og 2000 viste det sig klart, hvorledes antallet af nanopartikler fra dieslbiler blev stærkt reduceret ved overgang til dieselolie med lavere svovlindhold. Det viser sig, at svovlmængden ikke er tilstrækkelig til at forklare mængden af disse partikler. Årsagen er, at de ekstremt små svovl(syre) partikler danner kim for

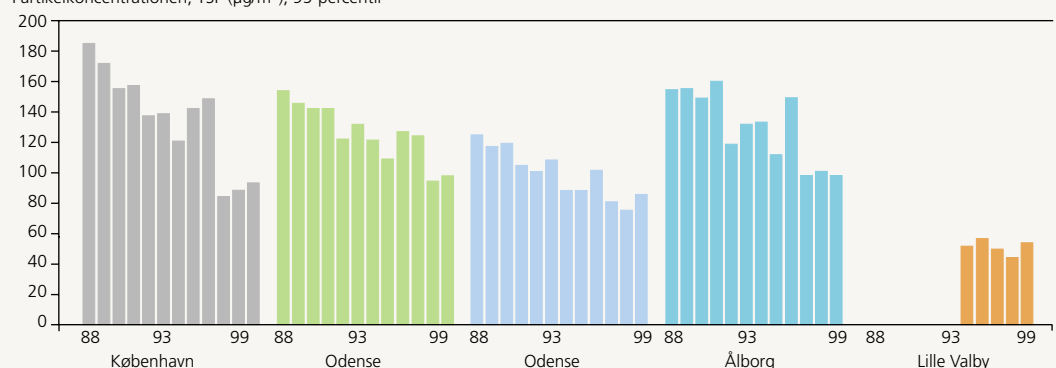
Tabel 2.3.3
Gennemsnitsværdier, 95-percentiler og maksimum værdier for TSP i 1999. Dataene er baseret på 24 timers gennemsnit. (Kilde: Kemp og Palmgren, 2000).

Station	TSP (µg/m ³)			
	Antal målinger	Gennemsnit for året	95-percentiler	Maks. værdi
København	356	47	97	159
Odense	359	49	104	269
Odense	362	44	89	125
Aalborg	358	51	99	153
Lille Valby	360	24	54	79
Grænseværdi	Min. 100	150	300	-

Partikkelkoncentrationen, TSP (µg/m³), Gennemsnit



Partikkelkoncentrationen, TSP (µg/m³), 95-percentil



Figur 2.3.7
Udviklingen i partikkelkoncentrationen (TSP) vist som årlige gennemsnitsværdier og 95-percentiler i Danmark fra 1988-1999. (Kilde: Kemp og Palmgren, 2000).

partikler der udvikles ved absorption af forskellige andre stoffer, bl.a. organiske forbindelser. En yderligere reduktion af svovlindholdet vil ikke nødvendigvis nedsætte partikeludslippet, men der kan være andre grunde til at nedsætte svovlindholdet, bl.a. længere holdbarhed af katalysatorer eller korrosion på motor og udstødningssystem.

Partiklers helbredseffekter

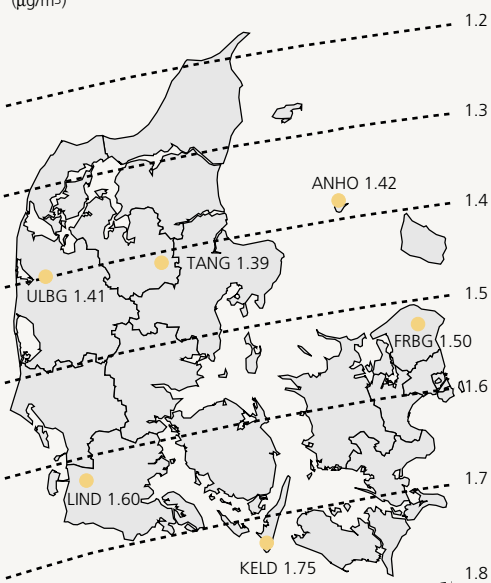
Undersøgelser i USA og Europa har vist at partikler (PM_{10} samt $PM_{2.5}$) har negative helbredseffekter. Det er dog uklart, hvilke egenskaber ved partiklerne der er skadelige, men nogle undersøgelser peger dog på at de meget små (ultrafine og fine) partikler er de farligste.

Disse undersøgelser, hvor der er påvist en sammenhæng mellem dødsrate og partikelforureningen i USA og Europa, er alle gennemført på grundlag af en meget forenklet vurdering af befolkningens eksponering: man har anvendt den årlige gennemsnitlige koncentration af PM_{10} den såkaldte bybaggrund, dvs. det forureningsniveau der kan registreres i en vis afstand fra gader og forureningskilder som man fx finder i parker, i boligkvarterer uden væsentlig trafik, over hustagene eller bag husrækker langs gader. Det er sket ud fra den betragtning at befolkningen er eksponeret svarende til luften udenfor deres boliger, men ikke i gaderne. Der blev således

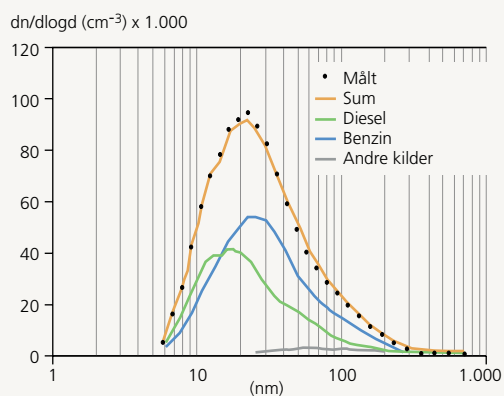
ikke taget hensyn til, at en stor del af befolkningen er udsat for stærk forurening fra trafikken under transport i fx trafikerede gader mellem hjem og arbejdsplads. Der blev heller ikke taget hensyn til at kortvarig høj eksponering kan være mere skadelig end tilsvarende lavere eksponering over lang tid.

Partikelforureningen betyder at eksponerede personer dør tidligere end de ellers ville have gjort. Udenlandske vurderinger peger på, at den gennemsnitlige levealder falder med 0,4-0,6 år pr. $10 \mu g/m^3$ (PM_{10}) i luften. En arbejdsgruppe for udendørs luftforurening har således vurderet, at en reduktion af det gennemsnitlige partikelniveau i danske byer med ca. 1/3 ville medføre et fald i dødeligheden svarende til ca. 400 dødsfald pr. år blandt 1 million indbyggere. Hertil kommer, at et betydeligt antal personer må antages at have en forringelse af sundhedstilstanden og øget sygelighed. En analyse af de seneste udenlandske undersøgelser konkluderer, at en stigning i det gennemsnitlige partikelindhold på $10 \mu g/m^3$ (PM_{10}) fører til 2% stigning i antallet af hospitalsindlæggelser og skadestuebesøg pga. luftvejslidelser, en 2% nedsættelse af lungefunktionen og en øget forekomst af bronkitis på 10-25% i befolkningen samt kronisk hoste (figur 2.3.11).

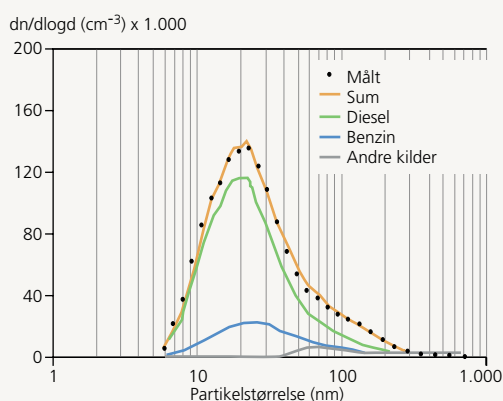
Partikulært svovl
1991-1997
($\mu g/m^3$)



Figur 2.3.8
Den geografiske fordeling af partikulært svovl målt på en række baggrundsstationer i Danmark.
(Kilde: Kemp og Palmgren, 2000).



Figur 2.3.9
Partikel antalsfordeling på Jagtvej i København i morgenmyldretiden målt på hverdage mellem 8.30-9.00.
(Kilde: Wählin et al., 2001).



Figur 2.3.10
Partikel antalsfordelingen på Albani-gade i Odense i morgenmyldretiden målt på hverdage mellem 8.30-9.00.
(Kilde: Wählin et al., 2001).

Samlet vurderes det at den aktuelle partikelforurening i Danmark medfører betydelige sundhedsskadelige effekter. Endnu kan man ikke fuldt ud forklare hvorfor partikler har de nævnte effekter. Bl.a. savnes der en afklaring af, i hvor høj grad det er koncentrationen af de helt fine partikler (ultrafine partikler mindre end 0,05 μm), der er ansvarlig for de sundhedsmæssige effekter, og hvilken rolle den kemiske sammensætning af partiklerne spiller.

De tilgængelige epidemiologiske undersøgelser af ultrafine partikler og eksisterende viden om mekanismer peger på at den ultrafine fraktion af trafikrelaterede partikler og deres antal er væsentlig for helbredseffekter. Det er således helt overvejende sandsynligt at ultrafine partikler fra dieseludslip bidrager væsentligt mere til negative helbredseffekter end deres masse antyder. Det gælder forværring af luftvejs sygdomme og hjertesygdom, herunder risiko for død. For raske der bliver eksponeret, tyder undersøgelser af personer som erhvervsmæssigt er udsat for dieseludslip ikke på væsentlig risiko for udvikling af luftvejs- og hjertesygdomme, men peger kun på risikoen for kræft.

Hvor stor en del af de beregnede helbredseffekter der alene kan tilskrives de trafikrelaterede ultrafine partikler, kan ikke fastslås. Den øverste grænse for effekt af ultrafine partikler må antages at svare til den andel af PM_{10} der kan tilskrives trafik, dvs. op til 40-60%, afhængigt af trafiktætheden som vurderet af WHO. Af de ultrafine partikler stammer ca. 40% fra tunge køretøjer. Man kan derfor forvente en effekt af fjernelsen af 80% af denne emission på op til ca. 33% af de samlede effekter som tilskrives PM_{10} .

Konklusion

Partikelforureningen er et af de største sundhedsmæssige luftforureningsproblemer i Danmark. Der mangler megen viden internationalt på området, men der er også sat mange ressourcer ind på at forbedre denne viden. Der er klare tegn på, at især de fine og ultrafine partikler er de mest skadelige, og at det måske er deres antal der er afgørende. Vi kender dog endnu ingen klare årsagssammenhænge mellem partiklernes egenskaber og de helbredsmæssige skadevirkninger.

Der er derimod ingen tvivl om, at trafikken er den væsentligste kilde til (især) ultrafine partikler i Danmark, og at mennesker især udsættes for dem i trafikerede gader når vi færdes der eller bor eller arbejder i huse langs gaderne. Trafikken giver også anledning til forurening med grove partikler fra kørebane, dæk, bremses mv. Der findes effektive filtre til fjernelse af disse partikler, men de fjerner kun dem der udsendes via udstødningsrøret og ikke de gasformige stoffer som kan føre til partikeldannelse. Katalysatorerne på benzinerbiler synes også at være effektive.

For at kunne gennemføre en effektiv indsats overfor skadevirkninger af partikelforureningen er det nødvendigt både at kende partiklernes egenskaber, og at kunne sætte disse egenskaber i relation til skadevirkningerne. Det nytter således ikke at reducere udslippet af partiklerne målt som masse, hvis det er antallet der er det væsentlige, eller at reducere antallet af partikler hvis det er visse kemiske stoffer der er væsentlige. Disse forhold ventes at blive afklaret i de kommende år i et omfattende internationalt samarbejde.

Figur 2.3.11

Til venstre: Afsætning af partikler i forskellige områder af luftvejene hos en voksen mand. Sandsynligheden for afsætning afhænger af partiklernes størrelse og er generel størst for små partikler. En høj totalafsætning for store partikler skyldes, at disse afsættes i de øvre luftveje, hvor de formentlig har mindre helbredsmæssige virkninger. Til højre: Størrelsesfordeling af luftbårne partikler i byluft. TSP er den samlede partikelmængde angivet som vægt. PM_{10} er partikler under 10 μm og $\text{PM}_{2,5}$ er partikler under 2,5 μm .

(Kilde: Palmgren et al., 1997).

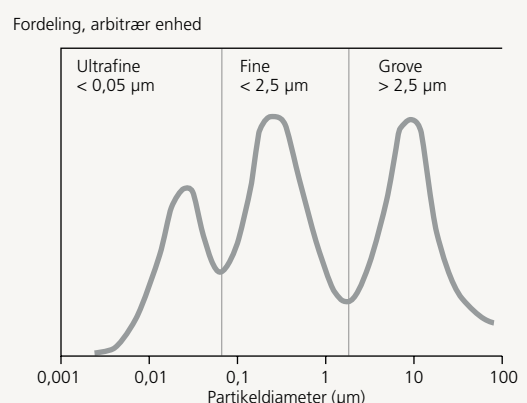
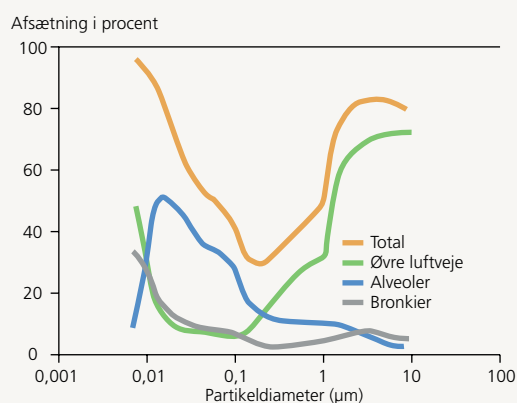




Foto: Jørgen Kjems

2.4 Regional luftforurening

2.4.1 Status og udvikling

Indledning

Luftforurenende stoffer som spredes over landegrænserne til et større geografisk område indgår i den såkaldte grænseoverskridende luftforurening. De regionale effekter af denne forurening kan groft indeles i direkte effekter, som opstår ved direkte kontakt med de luftbårne stoffer ved en given koncentration i luften, og indirekte effekter som først udvikles efter at stofferne gennem nedfald påvirker jord- og vandområder. Direkte effekter optræder fx som skader på træer eller afgrøder der har optaget høje koncentrationer af gasformige luftforurening gennem bladernes spalteåbninger. De indirekte effekter ytrer sig oftest som forsurnings- eller eutrofieringseffekter fremkaldt gennem luftdeponeret svovl- og kvælstofforbindelser.

Det har i flere årtier været kendt, at langtransporterede kvælstof- og svovlforbindelser har ført til forsuring af nedbøren i fx Sverige og Norge, selv om langt de største udslip finder sted

i andre dele af Europa. Geneve Konventionen om "Langtrækkende Grænseoverskridende Luftforurening" var det første instrument til regulering af denne regionale luftforurening på et internationalt bindende plan. Den trådte i kraft i 1983 under FNs Økonomiske Kommission for Europa (UN-ECE). Også EU har iværksat en række initiativer på området af betydning – bl.a. et rammedirektiv om luftkvalitet.

Effekter af den regionale luftforurening

Luftforureningen kan afsættes på jord eller vegetationsflader (tørdeposition), eller stofferne kan afsættes med nedbøren (våddeposition). De direkte effekter optræder når træer, afgrøder eller naturlig vegetation skades ved direkte kontakt med en given luftforureningskomponent. Indirekte effekter opstår fx når stofferne afsættes på jorden og ændrer dennes tilstand og kvalitet, eller når grundvand, vandløb og søer påvirkes efterfølgende gennem udvaskning eller afstrømning.

Arbejdet med at regulere luftforureningen bygger på at naturen kun kan tåle en samlet maksimal belastning, enten i form af et maksimalt kritisk

nedfald eller koncentration i luften uden at økosystemerne ændres, eller planter påvirkes. Når koncentrationen af et stof i luften bliver så høj at stoffet skader planter, defineres koncentrationen som kritisk, og dermed er det kritiske niveau (critical level) for stoffet overskredet. Tilsvarende defineres overskridelsen af den kritiske belastning (critical load) som størrelsen af den tilførsel af luftforurening hvor et økosystem ikke længere kan omsætte eller tolerere stoffet, uden at der sker funktionelle eller strukturelle ændringer af systemet. "Tålegrænsen" er en fælles betegnelse for critical level og critical load.

Tålegrænsen for indirekte effekter (critical loads) er forskellig for forskellige økosystemer. Følsomheden overfor en given luftforurening afhænger bl.a. af plantesamfundets artssammensætning og af jordtypen. Typisk vil der være lave tålegrænser for sure jorde på sandbund eller tørvejorder. For skove kan en tålegrænse fastsættes ud fra et kriterium om en belastning som udløser en nitratudvaskning og jordforsuring, men der kan også opstilles tålegrænser ud fra kriterier om bundvegetationens diversitet, eller

skovens/økosystemets stabilitet. Tålegrænser for skov og overdrev er beregnet med modeller, mens tålegrænser for næringsfattige naturtyper som hede, højmoser og fattigkær er baseret på ekspertvurderinger, og dermed mere usikre eller kvalitative.

Tålegrænser for direkte effekter er under danske forhold relevant for ozon. Skader forårsaget af ozon optræder særligt, når koncentrationen er over 40 ppb i luften (ppb = parts pr. billion, eller milliardendedele). Internationalt har man valgt at bruge et indeks kaldet AOT₄₀ (Accumulated exposure Over a Threshold of 40 ppb ozone), som er den akkumulerede eksponering over 40 ppb ozon. Har man eksempelvis målt tre timemiddelværdier af ozon på en dag, der overstiger 40 ppb, fx 45, 50 og 55 ppb, bliver dagens AOT₄₀ = 5 + 10 + 15 = 30 ppb*timer. Forskellige vegetationstyper har forskellig følsomhed overfor ozon, bl.a. som følge af forskelle i vækstperiode. For træer er den kritiske koncentration 10.000 ppb*timer i sæsonen april til september.

Forsuring

Nedfald af svovl- og kvælstofforbindelser kan føre til forsuring. Den forsurende virkning skyldes syrerne svovlsyre og salpetersyre. Kvælstof i form af ammoniak og ammonium kan ved biologiske processer i jorden omdannes og udvaskes som nitrat og dermed virke forsuren.

Økosystemer har forskellig stabilitet overfor nedfald af forsurende stoffer. Nogle af de mest følsomme er de næringsfattige søer og vandløb i Norge, Sverige og Canada, hvor jordbunden har en lav bufferkapacitet over for syre. I løbet af vinteren ophobes der syreholdig nedbør i form af sne, som om foråret under afsmeltningen pludseligt kan frigives i store mængder ledsaget af et fald i pH, med følger for dyrelivet i floden eller søen.

I Danmark startede man i midten af 1980'erne en undersøgelse af forsuring af skove. På det tidspunkt var der observeret skovdød forskellige steder i Europa, og årsagerne til disse skader blev kædet sammen med påvirkninger

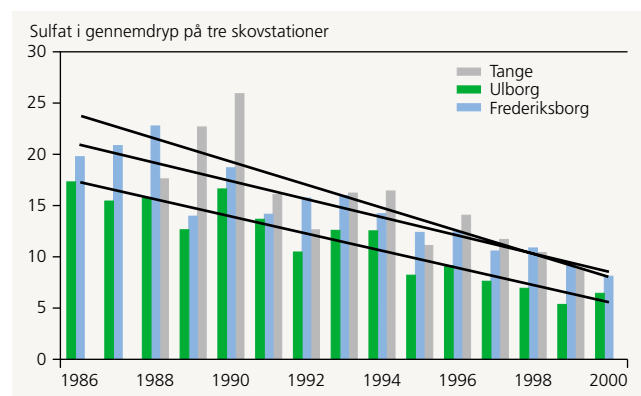
fra luftforurening (figur 2.4.1). Gennemdrøpsdepositionen kan benyttes som indikator for det samlede nedfald af svovldioxid, svovlholdige partikler og svovl tilført med nedbøren. I takt med reduktionen af svovludslippet i Danmark og det øvrige Europa er svovlnedfaldet reduceret siden begyndelsen af 1990'erne og denne udvikling synes at forløbe nogenlunde parallelt på de tre stationer.

Eutrofiering

Eutrofiering kan defineres som tilstandspåvirkninger af økosystemer som følge af tilførsel af næringstoffer i større omfang end systemerne naturligt kan omsætte. I dette afsnit beskrives luftforureningens bidrag til tilførslen, med hovedvægten lagt på nedfald af kvælstof. Terrestriske økosystemer kan ophobe organisk bundet kvælstof i jorden og i vegetationen i form af øget biomasse. Der er grænser for hvor meget kvælstof der kan ophobes i økosystemet som helhed, og overskrides denne grænse vil kvælstof blive



Foto: DMU/Morten Strandberg



Figur 2.4.1

Svovlnedfaldet, målt som gennemdrøp under rødgran (kg SO₄-S/ha pr. år). Målingerne er fra Ulborg, Frederiksborg og Lindet skovdistrikt. Målingerne registrerer det antropogene svovlnedfald, dvs. der er korrigeret for den svovlbelastning som havsalte bidrager med.

(Kilde: Hovmand, 2001).

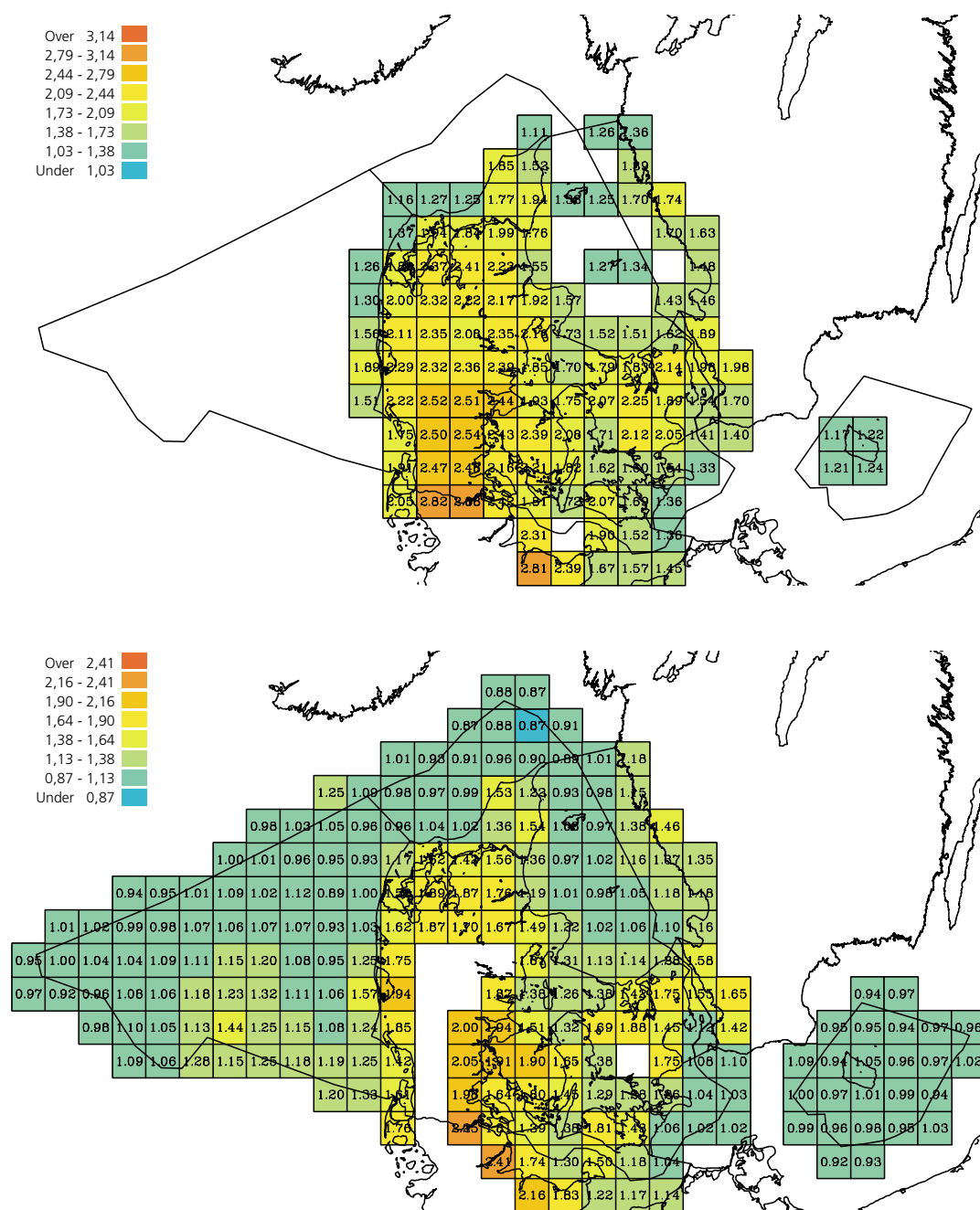
udvasket. En udvaskning af kvælstof i form af nitrat er ledsaget af en udvaskning af de positivt ladede basekationer, som resulterer i en jordforsuring og et tab af plantenæringsstoffer. Forøget kvælstofoptag i vegetationen kan påvirke økosystemets stabilitet, og fx medføre øget følsomhed overfor stressfaktorer som tørke, frost og insektangreb samt påvirke plantesamfundenes udvikling og artssammensætningen.

Høje koncentrationer af næringssalte i de kystnære farvande har ført til øget

algevækst. Denne vækst er generelt begrænset af tilførslen af kvælstof. Nedbrydning af døde alger forbruger store mængder ilt og kan i alvorlige tilfælde føre til stor iltmangel i vandet ved bunden. I de seneste årtier har iltmangel og efterfølgende død blandt fisk og bunddyr været et almindeligt fænomen i danske kystfarvande. Et andet alvorligt fænomen har været episoder med høje koncentrationer af alger, som kan være giftige for mennesker og dyr. Begge disse fænomener menes at hænge

sammen med stigende tilførsler af næringstoffer fra menneskeskabte kilder.

Vurderingen af belastningen ved nedfald sker på basis af målinger eller modelberegninger. Modelberegninger åbner mulighed for en finere rumlig opløsning end målingerne. Modelberegninger anvendes til at bestemme nedfald af atmosfærisk kvælstof til alle danske farvandsområder og foretages for 212 receptorpunkter i et gitternet med en opløsning på 30 km x 30 km (figur 2.4.2). Ud fra geografiske infor-



Figur 2.4.2
 Det totale nedfald (tør+våd) af kvælstofforbindelser beregnet for 1999 til hhv. de danske farvande (nederst) og de danske landområder (øverst).
 Enhed: tons N/km².
 (Kilde: Ellermann et al., 2000).

mationer foretages efterfølgende en fordeling på hoved- og underfarvande. Disse resultater bliver løbende rapporteret og ligeledes præsenteret på internettet.

To grupper af forbindelser bidrager til det atmosfæriske nedfald af kvælstof til havområder: Ammoniak og ammonium (NH_x), samt kvælstofoxiderne og deres reaktionsprodukter (NO_x). Medens ammoniak især stammer fra husdyrgødning i landbruget, er kvælstofoxiderne et resultat af de forbrændingsprocesser der er knyttet til bl.a. trafik, industri og energiproduktionen (jf. afsnit 2.2). Ammoniak afsættes i stort omfang tæt ved kilden, men kan som partikulært bundet ammonium langtransporteres og afsættes meget langt fra kildeområderne (jf. afsnit 2.4.2). For kvælstofoxiderne er billedet noget anderledes. Kvælstofdioxid bliver i et begrænset omfang afsat på landoverflader, men den primære fjernelse finder først sted efter omdannelsen til salpetersyre og partikulært nitrat, og de afsættes derfor generelt relativt langt fra kildeområderne.

Beregninger viser at atmosfæren årligt bidrager med mellem 0,8 og 1,5 tons kvælstof pr. km^2 til de danske havområder. Det største absolutte bidrag er for områderne tættest ved danske landbrugsaktiviteter over land; det vil især sige fjorde, vige og bugter. Det er imidlertid også her at den største afstrømning fra vandløbene finder sted, og derfor er den atmosfæriske belastning generelt af mindre betydning for disse

områder sammenlignet med de mere åbne farvande som Kattegat og den danske del af Østersøen.

Beregningerne tyder på at kvælstofoxiderne bidrager med lidt over halvdelen af det samlede kvælstofnedfald til danske farvande. For de kystnære farvande, som fx Limfjorden, er billedet imidlertid anderledes pga. det store nedfald af ammoniak fra danske kilder.

For hovedfarvandene er det atmosfæriske kvælstofnedfald domineret af nedfald (våd) af nitrat og ammonium, som typisk udgør to tredjedele af det atmosfæriske bidrag. Da nedbøren til danske farvande er rimeligt jævnt fordelt over året, betyder det at det atmosfæriske kvælstofnedfald ligeledes er relativt jævnt fordelt over året. Afstrømningen af kvælstof via danske vandløb har et meget klart maksimum i foråret og er så noget mindre i sommerhalvåret. Det betyder, at det atmosfæriske nedfald af kvælstof er større end afstrømningen i sommerperioden, og derfor meget vel kan tænkes at spille en vigtig rolle for de før omtalte episoder med algevækst som ses i den-

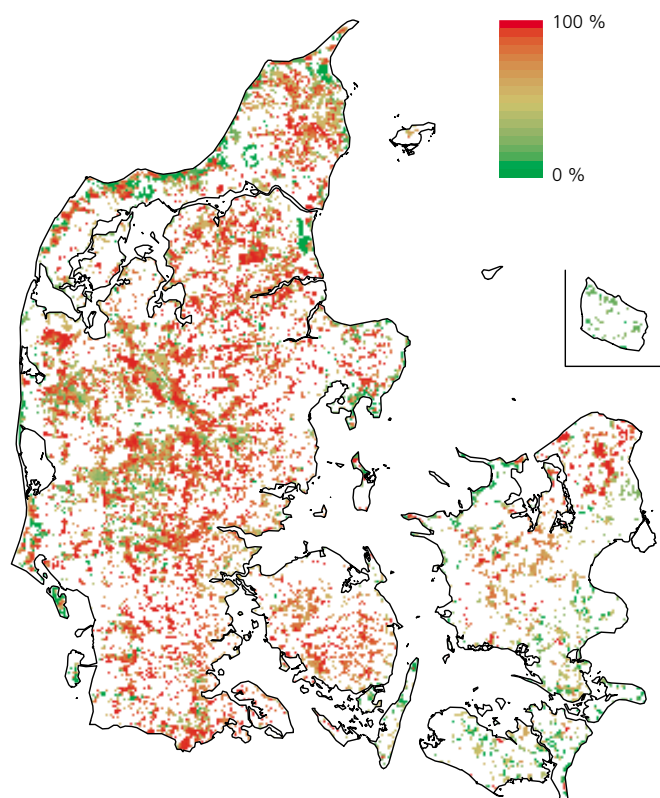
ne periode. Afsætning af atmosfærisk kvælstof har vist sig at bidrage med en betydelig del af tilførslen af kvælstof til de danske farvande.

Nedfaldet på landoverflader er generelt større end på vand og for land varierer nedfaldet mellem 1,5 og 2,5 tons kvælstof pr. km^2 . Det højere nedfald skyldes bl.a. ammoniak, der dominerer nedfaldet (tørt) af afsat kvælstof. Nedfald af reduceret kvælstof (NH_x) til de danske landområder udgør knap 60% af det samlede kvælstofnedfald. Danske ammoniak kilder bidrager til omkring 34% af det samlede kvælstofnedfald.

Overskridelser af tålegrænser

Det er ikke alle typer af skove og naturarealer der er følsomme over for forurening og atmosfærisk belastning med kvælstof. Af naturtyper som med sikkerhed vides at være følsomme over for en øget kvælstoftilførsel kan nævnes heder, overdrev, højmoser og lobeliesøer. Især overskridelsen af tålegrænserne for eutrofieringen har bidraget til at artssammensætningen er ændret i mange plantesamfund, og også med-

Figur 2.4.3
Andelen af naturarealet i Danmark hvor overskridelsen af tålegrænsen for forurening og/eller eutrofiering er overskredet. Arealet er opgjort for alle naturtyper som angivet i tabel 2.4.1, og angivet i % af arealklassens samlede arealdækning i et 1 km^2 kvadratnet for Danmark. Hvide celler betyder, at arealet med overskridelser er mindre end 1 ha. (Kilde: Bak, 2001).



Naturtype	Areal med overskridelse procent
Overdrev	57
Hede	42
Klithede	7
Kær	11
Lobeliesøer	100
Højmoser	100
Løvskov	63
Nåleskov	94

ført at antallet af arter er gået tilbage. Blandt de truede plantearter er der en overvægt af arter med tilknytning til næringsfattige og ofte stabile miljøer som fx højmoser. Nøjsomhedsplanter som førhen var meget almindelige er således gået tilbage, og omvendt er der arter, som tidligere har haft en begrænset udbredelse, der er blevet mere almindelige (jf. afsnit 4.3).

Aralet hvor tålegrænsen for forsurening og/eller eutrofiering er overskredet er opgjort for nåle- og løvskove samt forskellige naturtyper og angivet i % af arealklassens samlede arealdækning i et 1 km kvadratnet for Danmark (figur 2.4.3). Opgørelsen er udregnet på basis af det gennemsnitlige årsnedfald for årene 1997 og 1998.

Det overskredne areal er angivet for en række naturtyper i tabel 2.4.1. Den nuværende belastning overskrider i særlig grad tålegrænserne for følsomme naturtyper som lobeliesøer og højmoser. Højmoserne er den mest kvælstoffølsomme naturtype i Danmark. Overskridelserne af tålegrænserne og de største nedfald forekommer primært på arealer, hvor der er påvirkninger fra lokale og regionale kilder af ammoniak. Det forholdsvis lave tal for klitheder (7%) skyldes således at der ikke er så mange lokale kilder ved kysten, hvor denne naturtype er lokaliseret. Klitheder er i denne sammenhæng defineret som alle heder lokaliseret inden for en afstand af 3 km fra kysten, og ikke kun som en særlig følsom hedetype.

Kun de følsomme kær og søer (lobeliesøer) indgår i opgørelsen (tabel 2.4.1). Generelt er det således kun en mindre del af søerne, engene og tildels

Tabel 2.4.1

Arealandelen angivet i % for de naturtyper hvor tålegrænsen for forsurening og eutrofiering er overskredet i Danmark. NB! Tålegrænserne og overskridelsen af disse er baseret på modelberegninger. Der er ikke beregnet konfidensintervaller for overskridelserne, men usikkerheden er stor. Alene usikkerheden på tålegrænserne er af størrelsesordenen 30-40%. Beregningerne er bl.a. baseret på den gennemsnitlige årsdeposition for årene 1997 og 1998 og på opgørelser af ammoniakfordampningen fra dansk landbrug for 1996 i henhold til Ammoniakrederegørelse nr. 1 – et tal der blev revurderet i nedadgående retning i forbindelse med VMP II. (Kilde: Bak, 2001).

moserne i Danmark som forventes at være følsomme for atmosfærisk belastning med kvælstof. Dels fordi andre næringsstoffer kan være begrænsende faktorer, som fx fosforbelastningen af søerne, og dels fordi tilførslen af kvælstof fra andre kilder kan være større end det atmosfæriske bidrag.

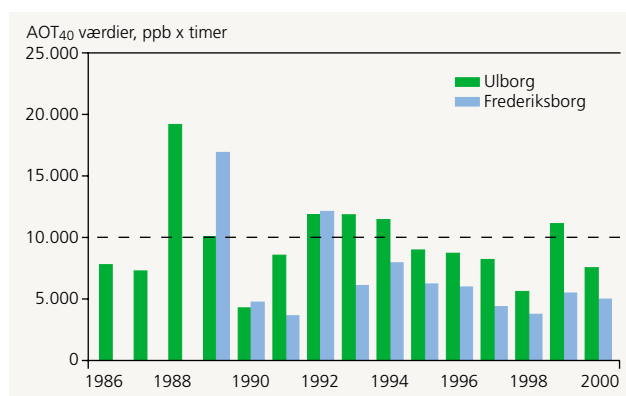
I temaet om ammoniak (afsnit 2.4.2) er overskridelser af tålegrænsen for forsurening og eutrofiering også omtalt, og det er endvidere angivet i hvilken grad en 50% reduktion af de danske ammoniakilder vil påvirke disse overskridelser.

Direkte effekter af ozon

Ozon er den luftforurening, der forekommer i de højeste koncentrationer i skov- og landområder i Danmark. Koncentrationerne er højest om sommeren ved sydøstlige vindretninger. Det skyldes at der om sommeren kan opbygges høje ozonkoncentrationer under højtryksepisoder i Øst- og Centraleuropa, hvorefter luftmasserne langtransporteres til Danmark. Ozon dannes i fotokemiske reaktioner mellem flygtige kulbrinter og kvælstofoxider under

påvirkning af sollys. Den såkaldte fotokemiske smog, hvor der opbygges høje ozonkoncentrationer, blev første gang registreret i Los Angeles i USA i 1940'erne, og senere bl.a. også i Syd-europa. Den fotokemiske smog er et rent byfænomen. I Danmark derimod vil der i byerne fortrinsvis ske en nedbrydning af ozon, når ozon reagerer med NO (afsnit 2.3). I byerne er der derfor generelt lavere ozonniveauer end på landet.

Ozon er den gasformige luftforurening, der har størst direkte skadelig virkning på vegetationen i de koncentrationsniveauer, der forekommer i Danmark. De vigtigste skadevirkninger af ozon optræder når ozon optages gennem bladernes spalteaåbninger. AOT₄₀-niveauer målt på de to skovstationer Ulborg og Frederiksborg viser at AOT₄₀-værdierne er højere på Ulborg end på Frederiksborg, og for denne vestjyske station ses det, at træerne i gennemsnit er eksponeret til ozonbelastninger lige omkring den kritiske belastning på 10.000 ppb × timer (figur 2.4.4).



Figur 2.4.4
AOT₄₀ værdier målt på de to baggrundsstationer Ulborg og Frederiksborg for årene 1986 til 2000. Det kritiske skadeniveau er på 10.000 ppb × timer. (Kilde: Hovmand, 2001).

Det er vedtaget internationalt, at det fremtidige arbejde omkring kritiske skadeniveauer for ozon skal koncentreres om at udvikle et fluks-baseret "critical level" indeks, som inddrager klimaforholdenes indflydelse på ozonoptagelsen. Eksempelvis har modelberegninger indikeret, at en sydsandinavisk skov optager den samme ozonmængde gennem en vækstsæson som en syd-europæisk, selvom koncentrationerne af ozon er væsentligt højere sydpå. Dette skyldes, at skovens vandforsyning er bedre i Nordeuropa, således at spalteåbningerne gennemsnitligt er mere åbne og at der derfor optages mere ozon.

Tungmetaller

Gennem de sidste ti år er der registreret et fald i nedfaldet af tungmetaller (figur 2.4.5a), og også koncentrationen af tungmetaller i luften har været kraftigt faldende (figur 2.4.5b). Denne udvikling er specielt markant for bly efter indførelsen af blyfri benzin, men også for en række andre metaller. Årsagen er her bedre røgrensning på kul-fyrede anlæg på europæisk plan, nedlæggelse af mindre ineffektive anlæg samt overgang til naturgasfyring. End-

videre har nedlæggelsen på europæisk plan af gamle anlæg til primær og sekundær metal fremstilling haft særlig betydning for nedgangen i tungmetaludslippet. Produktionen fra disse anlæg er overflyttet til få og moderne anlæg med forbedret røgrensningsteknologi.

Målsætninger og indsats

De nordiske miljøministre foreslog i 1976 en europæisk konvention med det sigte at nedbringe luftforureningen specielt af svovlforbindelser. De nordiske lande etablerede en arbejdsgruppe, der i 1978 kunne forelægge FNs Økonomiske Kommission for Europa (ECE) et udkast til en europæisk konvention om nedbringelse af langtrækkende grænseoverskridende luftforurening.

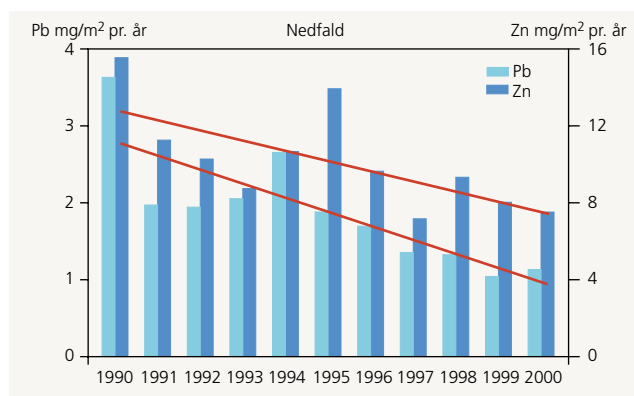
Efter forhandlinger i ECE underskrev 34 lande samt EF Kommissionen i november måned 1979 konventionen. Samtidig blev der underskrevet en resolution om – indtil konventionen var ratificeret – at implementere konventionen på interim basis, først og fremmest med hensyn til svovlforbindelser. Konventionen trådte i kraft den 16. marts 1983.

Konventionen er nu ratificeret/tiltrådt af 48 medlemslande, heriblandt alle Østersølande og De Europæiske Fællesskaber. Konventionen er en ramme-konvention, der skal udfyldes med mere operative bestemmelser. Der er nu udarbejdet og underskrevet otte protokoller, hvoraf de fem er ratificerede/tiltrådte.

Samarbejdsprogrammet EMEP

(The Cooperative Programme for Monitoring and Evaluation of the Long-range Transmission of Air Pollutants in Europe) blev etableret i 1977. Protokollen om finansiering af EMEP blev underskrevet i 1984 og trådte i kraft 1988. Hovedformålet med EMEP er at forsyne medlemslandene med informationer om nedfald og koncentration af luftforurenende stoffer såvel som mængden og betydningen af langtransporteret luftforurening. Programmet har tre hovedelementer:

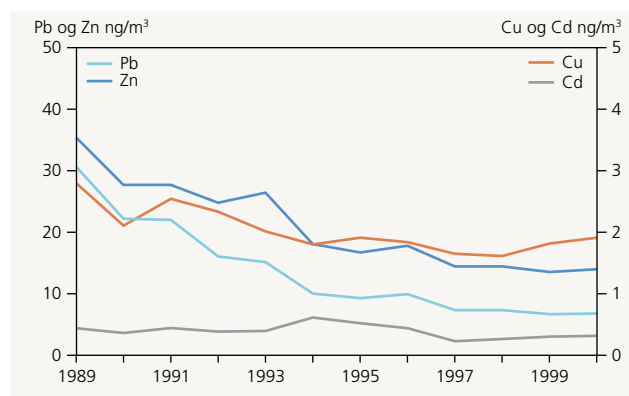
- Indsamling af emissionsdata
- Måling af luft- og nedbørskvaliteten
- Modellering og beregning af den atmosfæriske spredning af luftforureningerne.



Figur 2.4.5a

Tidsudviklingen i nedfaldet (vådt) over en 11-årig periode af bly (Pb) og zink (Zn) (hhv. venstre og højre akse). Enhed: mg metal/m² pr. år, hvilket svarer til kg/km² pr. år. De fuldt optrukne linier er beregnet ved simpel lineær regression.

(Kilde: Hovmand et al., 2001; Hovmand og Kemp, 2000).



Figur 2.4.5b.

Årgennemsnit for koncentrationerne af kobber (Cu), zink (Zn), bly (Pb) og kadmium (Cd) angivet i ng/m³. For Cu, Zn og Pb er de viste resultater gennemsnittet af årgennemsnittene for alle seks målestationer. For Cd er de viste resultater gennemsnittet af resultater fra Tange og Keldsnor. Da de fleste resultater for Cd er under detektionsgrænsen, er værdierne behæftet med stor usikkerhed.

(Kilde: Hovmand et al., 2001; Hovmand & Kemp, 2000).

• Helsingfors Protokollen

om reduktion af svovlemissionerne med mindst 30% i perioden 1980-1993 blev underskrevet i 1985. De 22 lande, der ratificerede protokollen, reducerede deres sammenlagte svovlemission med 52% i perioden 1980-1993. I samme periode reducerede Danmark med 65%. Danmark erklærede ved underskriften af protokollen, at man ville reducere emissionerne med 50% senest i 1995.

• Oslo Protokollen

om yderligere reduktion af svovlemissioner blev underskrevet i 1994. Den trådte i kraft august 1998 og er i dag ratificeret af 23 lande. Den er baseret på begrebet "kritisk belastning" og anvendelse af bedst tilgængelig teknologi som middel til at reducere svovludslip. Protokollen indeholder som basisforpligtelse udslipslofter på 30-87% af SO₂-udslippet for 1980. Mållåret var 2000, dog for nogle lande suppleret med måltal for 2005 og 2010. Protokollens langsigtede mål er at nå ned på nedfald der ikke overskrider den kritiske belastning. Danmark er efter Oslo Protokollen forpligtet til at reducere SO₂-udslippet med 80% i perioden 1980-2000. Danmark har i 1999 reduceres udslippene af SO₂ med 88% i forhold til 1980.

• Sofia Protokollen

om NO_x-emissioner blev underskrevet i 1988 og er nu ratificeret af 28 lande inkl. EU. Heraf har 18 lande, herunder Danmark, opfyldt protokollens krav om at stabilisere deres NO_x-udslip i 1994 i forhold til 1987. Danmark underskrev sammen med 10 andre lande en deklaration om yderligere reduktion. For Danmarks vedkommende drejer det sig om en 30% reduktion i perioden 1986-1998, som stort set er opfyldt med en reduktion på 28%.

• Geneve Protokollen

om reduktion af VOC-udslip (flygtige organiske forbindelser) blev underskrevet i 1991. Protokollen, der trådte i kraft i september 1997 er nu ratificeret af 20 lande. Den forpligter landene til at reducere deres VOC-udslip med 30%. For Danmarks vedkommende i perioden 1985-1999. Danmark har for den angivne periode reduceret VOC-udslippene med 32%. Baggrunden for denne protokol er først og fremmest at VOC'erne, ved samtidig tilstedeværelse af sollys og NO_x'er, medvirker til dannelsen af ozon.

• Århus Protokollen

om persistente organiske forbindelser (POP'ere) blev underskrevet i juni 1998 af 36 lande. Protokollen er endnu ikke trådt i kraft. Protokollens formål er at kontrollere, reducere eller eliminere udledninger af POP'ere til miljøet. For nogle stoffer forbydes produktion og anvendelse. For andre stoffer er der lagt store restriktioner på brugen, medens der for de POP'ere der dannes utilsigtet ved forbrændings- og industriprocesser, indføres emissionsbegrænsninger der relateres til et referenceår. Protokollen omfatter 16 POP'ere. I tilknytning til protokollen vedtog 18 lande og EU en deklaration der lægger restriktioner på to yderligere POP'ere.

• Århus Protokollen

om tungmetaller blev underskrevet i juni 1998 af 36 lande. Protokollen er endnu ikke trådt i kraft. Protokollens formål er at reducere udslippene af bly, kadmium og kviksølv fra en række industrielle processer og forbrændingsprocesser. Den fastsætter grænseværdier for stationære kilder og retningslinier for anvendelse af bedst tilgængelig teknologi. Herudover indeholder protokollen et krav om udfasning af tilsat bly i benzin samt virkemidler til reduktion af tungmetaller fra visse produkter, såsom fx kviksølv i batterier.

• Göteborg Protokollen

fra 1999 er underskrevet af 31 lande. Protokollens formål er at reducere forureningen og eutrofieringen samt at begrænse luftens indhold af ozon. I lighed med Oslo protokollen er målsætningerne baseret på princippet om kritisk belastning af økosystemerne og sundhed. En af de oprindelige målsætninger var således, at de arealer, hvor den kritiske belastning for forurening var overskredet i 1990 skulle reduceres til det halve. Dette mål blev ikke nået. I protokollen har de enkelte ECE medlemslande fået tildelt og accepteret udslipslofter i 2010 for fire stoffer: SO₂, NO_x, VOC og NH₃ (jf. afsnit 2.2). For Danmarks vedkommende vurderes det, at udslipslofterne kan holdes med allerede eksisterende eller planlagte tiltag.

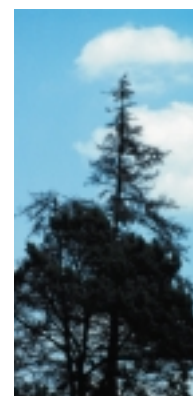


Foto: DMU/Morten Strandberg



2.4.2 Tema - Ammoniak

For mange naturlige plantesamfund i Nord-europa er kvælstof et vækstbegrænsende næringsstof, og øget tilførsel af kvælstof vil derfor i mange tilfælde ændre økosystemernes plantesamfund og deres artssammensætning. Ammoniak er et kvælstofholdigt næringsstof og tilhører derfor gruppen af eutrofierende stoffer. Ammoniak, der afsættes fra luften til vegetations- og vandoverflader, kan endvidere ved biologiske processer i jorden omdannes til nitrat, som ved udvaskning kan give anledning til forurening af de øvre jordlag.

Den væsentligste kilde og årsag til udledning af kvælstof til miljøet er knyttet til den aktuelle landbrugspraksis. En mindre mængde hidrører fra udledning af spildevand, men også nedfald af kvælstofoxider og andre oxiderede kvælstofforbindelser fra atmosfæren bidrager til kvælstofbelastningen. I 1998/99 tilførtes den danske landbrugssektor omkring 575 ktons N pr. år, mens fraførslen i form af afgrøder og animalske produkter var omkring 190 ktons N pr. år. Dvs. der er en differens mellem tilført og fraført kvælstof på omkring 385 ktons N – en differens som udgør det såkaldte kvælstofoverskud. Kvælstoftabet til omgivelserne i denne balance stammer dels fra udvaskning fra rodzonen, denitrifikation i jorden med fordampning af nitrogen- og lattergas (N_2 og N_2O) tilføje, samt bidraget fra fordampning af ammoniak (NH_3) til atmosfæren.

Kvælstoftabet er nettoresultatet af en kompliceret proces styret af sammenhængene mellem afgrødetype, jordbundsforhold, landbrugspraksis og klima, og tabet er derfor stærkt varierende i tid og sted. Det anslås, at der i 1999 fordampede omkring 94 ktons ammoniak svarende til 77 ktons ammoniak-kvælstof (NH_3-N), dvs. omkring 20% af det samlede kvælstoftab i landbruget skyldes ammoniakfordampning.

Fra miljøpolitisk side blev der i midten af 1980'erne taget initiativer til undersøgelser af udledningen af plantenæringsstoffer som kvælstof og fosfor samt af organisk stof. Det var erkendt, at der var behov for mere viden og bedre kendskab til sammenhængen

mellem udledninger og udviklingen i vandmiljøets tilstand. I 1985 vedtog Folketinget NPO-handlingsplanen (Nitrogen-Phosphours-Organic matter) og i 1987 fulgte Vandmiljøplan I. Senere er også tilførslen af kvælstof til "følsomme" terrestriske økosystemer kommet i fokus, bl.a. på grund af indflydelsen af den øgede kvælstof-tilførsel til skov- og naturarealerne. I 2000-2001 blev der udformet en ammoniakhandlingsplan, der har til formål at begrænse ammoniakfordampningen.

Ammoniaks atmosfæriske kredsløb

Ammoniak er en af de mange kvælstofholdige gasser i atmosfæren som bidrager til eutrofieringen, men ammoniak er også atmosfærens dominerende basiske gas. Det placerer denne gas meget centralt i den kemi der foregår i atmosfæren, idet ammoniakken neutraliserer en stor mængde af luftens oxiderede svovl- og kvælstofforbindelser og medvirker herved til dannelsen af atmosfærens ammonium-, sulfat- og nitratholdige partikler (jf. afsnit 2.3).

Modelberegninger viser, at ammoniakklender bidrager til lidt mere end 40% af den atmosfæriske kvælstof-tilførsel til de danske farvande, mens knap 60% af belastningen til de danske landområder udgøres af ammoniakklender. Ses der på den totale atmosfæriske kvælstofbelastning, udgør danske ammoniakklender ca. 11% af bidraget til de danske farvande, mens ca. 34% af den samlede atmosfæriske kvælstofbelastning til de danske landområder kommer fra danske ammoniakklender.

I Danmark (1999) kom der omkring 77 kt_{ons} NH₃-N pr. år til atmosfæren fra landbruget, som udgør hovedkilden (98%) til det samlede udslip. En stor del af dette ammoniak tørdeponeres, en meget lille del udvaskes med nedbør og en stor del omdannes til partikulært ammonium som især våddeponeres (jf. figur 2.4.6). Opholdstiden for ammoniak i atmosfæren er relativ kort sammenlignet med svovldioxid og nitrogenoxider, idet gassen er meget vandopløselig. Fælles for gasserne svovldioxid, nitrogenmonoxid/dioxid og ammoniak er at de i et vist omfang omdannes til partikelform. For

ammoniak gælder at alt partikulært ammonium i atmosfæren stammer fra ammoniak.

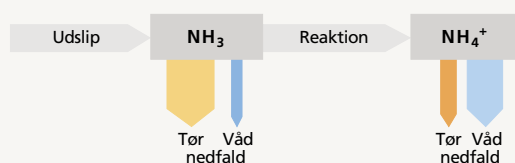
De små partikler af antropogen oprindelse holder sig nærmest "svævende" i luften pga. en meget lav afsætnings-hastighed. Denne egenskab gør, at reaktionsprodukterne af disse udslip bliver transporteret over meget store afstande og at forureningen dermed bliver grænseoverskridende. Levetiden for disse antropogene partikler er ca. 3-5 dage. Ved en vindhastighed omkring 5 m/s vil denne levetid i atmosfæren betyde en transport i størrelsesordenen 1.000 km.

Danmark udsendte omkring 77 kt_{ons} NH₃-N i 1999. Modelberegninger viser, at der blev afsat omkring 27 kt_{ons} NH₃-N til de danske landområder og heraf var 3 kt_{ons} med oprindelse i udlandet (tabel 2.4.2). Hertil kan lægges en afsætning på 22 kt_{ons} NH₄⁺-N til de danske landområder, dvs. afledede forbindelser af ammoniak i nedbør og partikler. Omkring 17 kt_{ons} af denne afsætning stammer fra udlandet. Danske landområder er således netto-eksportør af ammoniak og dens afledede forbindelser (28 kt_{ons} N), men indregnes nedfaldet til havområderne, er Danmark netto-importør af ammoniak og afledede forbindelser (22 kt_{ons} N).

Figur 2.4.6

Ammoniaks skæbne i atmosfæren. Gasformig ammoniak (NH₃) ledes ud, tørdeponeres eller omdannes til partikulært ammonium (NH₄⁺) og våddeponeres. Pilenes bredde indikerer den relative kvantitative fordeling af de forskellige processer.

(Kilde: Asman, 2001).



		Udenlandsk oprindelse	Dansk oprindelse	I alt
Nedfald, land	kt _{ons} NH ₃ -N	3,0	24,1	27,1
	kt _{ons} NH ₄ ⁺ -N	16,9	4,8	21,7
I alt	kt_{ons} N	19,9	28,9	48,8
Nedfald, hav	kt _{ons} NH ₃ -N	3,4	6,5	9,9
	kt _{ons} NH ₄ ⁺ -N	32,4	7,8	40,2
I alt	kt_{ons} N	35,8	14,3	50,1
Udslip, land	kt _{ons} NH ₃ -N	-	77	77
Danmark land: Netto eksport (77 – 48,8) kt_{ons} N = 28,2 kt_{ons} N				
Danmark land og hav: Netto import – (77 – (48,8 + 50,1)) kt_{ons} N = 21,9 kt_{ons} N				

Tabel 2.4.2

Nedfalds- og udslips-estimer for NH_x-balance for Danmark i 1999. Nedfaldet er dels opdelt i land/havandele, dels opdelt i ammoniak og ammoniumrelaterede forbindelser. (Kilde: Hertel, 2001).

Udslip

Atmosfærisk ammoniak stammer hovedsageligt fra landbruget, hvor fordampning fra husdyrgødning er langt den største kilde. En del af det kvælstof der er i foderet indbygges i mælk og kød, men en relativ stor del udskilles med urinen i form af urinstof. Med den faste gødning udskilles andre former for organisk kvælstof. Mikroorganismer kan vha. et enzym, urease, spaltes urinstof til ammoniak og kuldioxid.

Udslippene af ammoniak og NO_x er af samme størrelsesorden både på europæisk og dansk plan (tabel 2.4.3). Danmark bidrager med knap 2% til det samlede europæiske udslip af ammoniak, mens udslippet pr. arealenhed i Danmark hører til i den høje ende på europæisk plan. Der ses en klar geografisk fordeling med et udslipmaksimum i Jylland (figur 2.4.7).

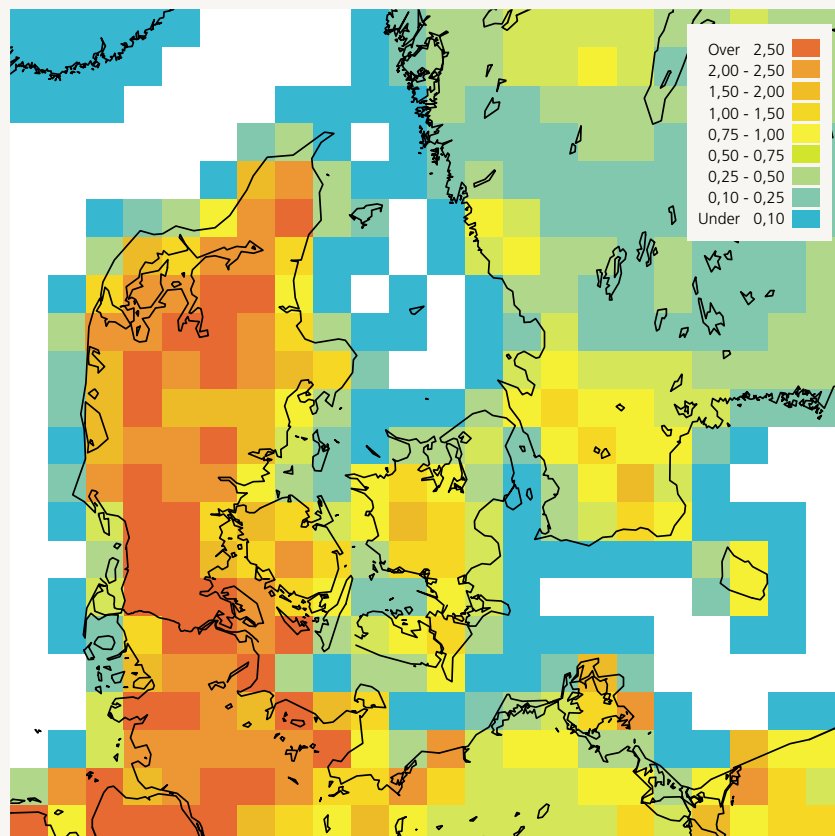
I 1999 udsendte dansk landbrug 77 ktons $\text{NH}_3\text{-N}$ til atmosfæren, hvilket er et fald på 34 ktons siden 1985, hvor det årlige udslip blev opgjort til 111 ktons $\text{NH}_3\text{-N}$.

Opgørelser viser, at 76% af den udsendte ammoniak fra landbruget stammer fra husdyrgødning, hvor ammoniakken fordampes fra stalde, ved udbringning af gødning på markerne, opbevaring af gødning samt dyr på græs (figur 2.4.8). Omkring 15% af udslippet af ammoniak stammer fra afgivelse af ammoniak fra afgrøder, mens handelsgødning er ansvarlig for 7% af udslippet. 2% af udslippet stammer fra halmludning, mens spildevandsslam og markafbrænding står for under 1/2% af ammoniakudslippet. Fordelingen af disse kildebidrag til ammoniakudslippet har ikke ændret sig væsentlig siden 1985.

Tabel 2.4.3

Udslip af reduceret kvælstof ($\text{NH}_x\text{-N}$) og oxideret kvælstof ($\text{NO}_x\text{-N}$) i Europa inkl. Rusland og Danmark for 1998. (Kilde: EMEP, 2000).

1.000 tons N pr. år	Europa	Danmark	Danmark andel af Europa
$\text{NH}_x\text{-N}$	6.205	86	1,4%
$\text{NO}_x\text{-N}$	6.923	70	1,0%



Figur 2.4.7
Ammoniakudslip for Danmark og nærmeste omkringliggende områder for 1998. Udslip er angivet i tons $\text{NH}_3\text{-N}/\text{km}^2$ pr. år på et 25km x 25km net. (Kilde: Brandt & Hertel, 2001).

I perioden 1985-1999 blev tabet af ammoniak fra husdyrgødning reduceret med 26 ktons $\text{NH}_3\text{-N}$, hvor en ændret udbringningspraksis alene bidrog med en reduktion på 20 ktons $\text{NH}_3\text{-N}$.

Kvælstofudskillelsen fra husdyrbruget er ændret, dels som følge af en reduktion i udskillelsen pr. dyreenhed forårsaget af optimeret fodersammensætning, og dels ved ændringer i antallet af dyr. En reduktion har fundet sted især på kvægbrugene, hvor såvel den animalske produktion som udskillelsen pr. produceret enhed er faldet. Udskillelsen af kvælstof er også faldet for svin, men dette fald opvejes stort set af en stigende svineproduktion. I 1999 er 34% af udslippet af ammoniak fra husdyrbrug opgjort til at stamme fra kvæg, mens 54% er fra grise. I 1985 var 42% af udslippet fra husdyrgødning fra kvæg, mens 52% var fra grise.

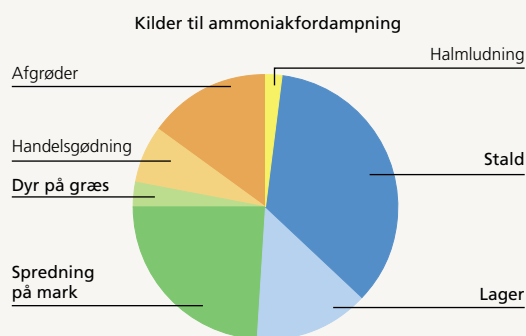
Ammoniaktabet fra afgrøder i vækst kan være betydeligt, men der er kun ganske få undersøgelser af dette i Danmark. Tabet synes især at afhænge af plantart, plantens modningsstadium og dens kvælstofstatus, således at højt kvælstofindhold i planterne medfører stigende tab til omgivelserne. Reduktionen af afgrødernes udslip er opgjort til 2 ktons $\text{NH}_3\text{-N}$ pr. år i perioden 1985-1999 og skyldes dels braklægningsordningen, som reducerer det gødske areal, dels stigningen i det økologisk drevne areal samt en generel reduktion i landbrugsarealet. Ammoniakudslippet fra handelsgødning er reduceret med 2 ktons $\text{NH}_3\text{-N}$ pr. år som følge af et lavere forbrug af handelsgødning i 1990'erne.

Nedfald af kvælstof til naturområder

Set i relation til de økologiske konsekvenser af kvælstofnedfaldet, er det udelukkende nedfald til skov og naturområder samt tilførslen til det akvatiske miljø, der har betydning. Den atmosfæriske tilførsel til landbrugsarealer har kun lille betydning i forhold til de øvrige kvælstoftilførsler til markerne. De danske målestationer til bestemmelse af atmosfærisk nedfald er derfor fortrinsvis placeret i skov- og naturområder. Nedfaldet benævnes også "fluks" og defineres som stofmængde pr. arealenhed pr. tidsenhed. Kvælstofluksen kan fx opgives i kg ammoniak-kvælstof pr. hektar pr. år.

Den regionale variation af kvælstofforbindelser i nedbør er for perioden 1990-1995 bestemt på basis af op til 17 målepunkter fordelt over Danmark. I nedbør opsamlet på danske baggrundsstationer er forholdet mellem ammonium-kvælstof og nitrat-kvælstof meget tæt på 1:1. Nedfaldet af kvælstof med nedbør er jævnt fordelt over landet med et relativt maksimum i den centrale og sydlige del af Jylland. Det mindre nedfald i kystregionerne og på havet skyldes dels et reduceret lokalt forureningsniveau samt den generelt mindre nedbør i disse områder. Den geografiske variation er lille, ca. $\pm 15\%$ i forhold til gennemsnittet.

Nedfald af kvælstofforbindelser kan også ske i tørt vejr og består af afsætningen af både gasser og partikler. Direkte bestemmelse af tørt nedfald er for de fleste stoffer en vanskelig opgave. Der er desuden stadig en begrænset viden om de forhold i omgivelserne, der bestemmer nedfaldet. For ammoniak er det især vegetationens evne til at optage eller afgive ammoniak, der er utilstrækkeligt undersøgt.



Figur 2.4.8
Kilder til ammoniakfordampning i Danmark i 1999. Udslip fra husdyrproduktionen er markeret med fede typer.
(Kilde: Andersen et al., 2001).

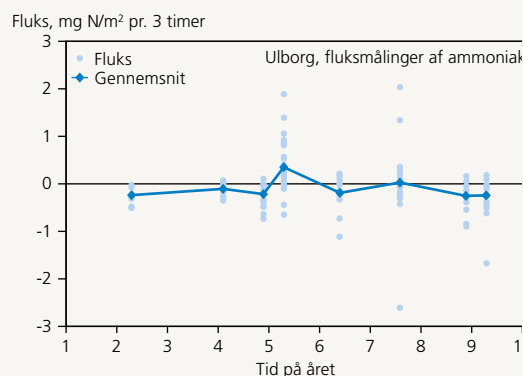


Foto: CDanmark

Tørt nedfald af ammoniak til skov har på eksperimental basis været målt i forskellige perioder i Ulborg Statskovdistrikt i Vestjylland (figur 2.4.9). Målingerne viste, at fluksen til skoven er meget varierende, dels foranlediget af varierende koncentrationsniveauer og meteorologiske forhold, men også fordi optaget på vegetationsoverfladerne udviser en stærk tidsmæssig variation.

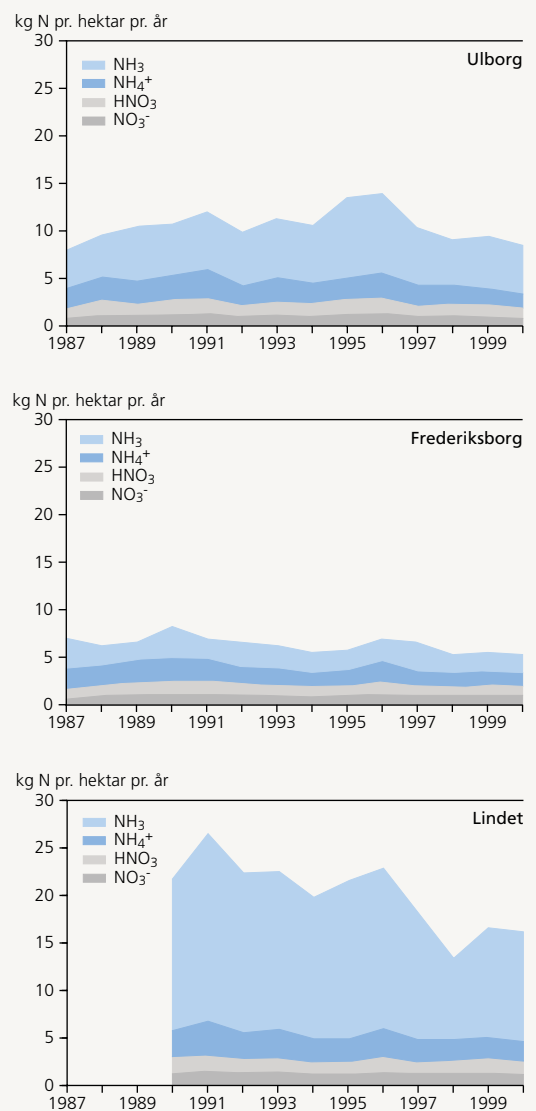
For et skovområde der ligger i nærheden af landbrugsområder, har det således vist sig, at fluksen af ammoniak går begge veje, dvs. ammoniakken ikke kun afsættes til skoven, men at skoven i visse situationer afgiver ammoniak. Generelt vil der være et nedfald under forhold med lav temperatur og fugtige forhold, mens varme og tørre forhold synes at begrænse nedfaldet eller endog lede til udslip. Økosystemets kvælstofstatus indgår også i processen, idet nogle af målingerne indikerer en ammoniakfordampning på samme niveau som observeret fra afgrøder. Lignende iagttagelser omkring ammoniaknedfald til skov er gjort i Holland og til andre typer naturområder i England.

Tørt nedfald af et stof estimeres ofte ud fra den atmosfæriske koncentration og nedfaldshastigheden, dvs. den hastighed, hvormed stoffet afsættes til overfladen. Koncentrationen kan i mange tilfælde måles, mens hastigheden estimeres, ofte ud fra meteorologiske observationer og antagelser omkring afsættningen til overfladen.



Figur 2.4.9
Fluksen af ammoniak til skov målt i Ulborg Statskovdistrikt på forskellige årstider i løbet af årene 1991-1996. Negative tal angiver nedadrettet fluks, dvs. nedfald, mens positive tal angiver opadrettet, dvs. udslip. Hver markering angiver én tretimers måling.
(Kilde: Andersen et al., 1999).

Et eksempel på regionale variationer af kvælstofnedfaldet på skovarealer fremgår af figur 2.4.10, som viser nedfaldet af forskellige kvælstofforbindelser på tre skovlokaliteter i Danmark. Estimaterne er baseret på målte koncentrationer på de tre skovmålestationer Ulborg, Frederiksborg og Lindet, meteorologiske parametre samt antagelser om nedfaldshastigheder for stofferne. Ammoniak udgør en stor og regionalt varierende post af kvælstofnedfaldet. Nedfaldet af de øvrige kvælstofforbindelser er relativt ens på de tre skovlokaliteter, som følge af et mere ensartede koncentrationmønster for disse forbindelser. Set over tid er der en vis variation fra år til år.



Figur 2.4.10
Tørt nedfald af forskellige kvælstofforbindelser angivet som kg NH₃-N/ha pr. år på de tre skovstationer.
NB! Det skal bemærkes at målepunktet i Lindet er flyttet 1 km længere væk fra den lokale kilde i starten af 1997.
(Kilde: Hovmand et al., 2001).

De tre områder, hvor målingerne er udført, er hver for sig karakteriseret af forskellige regionale intensiteter af udslippet af ammoniak. Et højt ammoniaknedfald afspejler, at udslippet i området er højt. Således ligger det årlige udslip i landbrugsområdet omkring Lindet skov på 30-40 kg N/ha pr. år. Skovparcellen i det sønderjyske skovdistrikt er yderligere påvirket af et større svinebrug, der ligger 1,5 km sydøst for stationen. Før 1997 lå målepunktet 0,5 km sydøst for svinebruget. Ammoniaknedfald er særlig stort på denne lokalitet. Det laveste ammoniakudslip ses på den nordsjællandske lokalitet, Frederiksborg, der ligger i et område med forholdsvis lille husdyrproduktion. Skovparcellen på Ulborg skovdistrikt i Vestjylland indtager en mellemposition og her er udslippet i det omkringliggende landbrugsområde omkring 20-40 kg N/ha pr. år.

Atmosfærens indhold af ammoniak, og det deraf afledede nedfald til skov og naturområder er i langt højere grad bestemt af lokale forhold, i modsætning til nedfaldet af partikler og nedbør. Trods den store variation i koncentrationsniveauerne af ammoniak, er der regioner i Danmark hvor det generelle koncentrationsniveau er højere end andre steder. I disse regioner er nedfaldet af ammoniak generelt også højere. Regioner med højt ammoniaknedfald til naturområder er således sammenfaldende med de dele af landet, hvor nedfaldet af ammoniak er højt som følge af en intensiv husdyrproduktion. Ofte vil det derfor ikke kun være en enkelt kilde, der på afgørende vis påvirker et naturområde med ammoniak, men summen af kilder i et større område, der ved forskellige vindretninger kan påvirke naturområdet.

Lokal koncentration/nedfald

Den atmosfæriske koncentration af ammoniak er lokalt tæt knyttet til det aktuelle ammoniakudslip i området, som vil være afhængig af tid og sted. Ammoniakkoncentrationen i luften afhænger således især af afstanden til stalde og gødningsopbevaringssteder og af udbringningen af gylle på markerne, men koncentrationen varierer også med luft- og jordfugtighed, temperatur, vindstyrke og i nogen grad partiklernes kemiske sammensætning. Koncentrationen af ammoniak har således også en variation inden for døgn og over året. Generelt observeres de højeste koncentrationer ved forårsudbringning af gylle og i sensommeren.

Spredningen af ammoniak lokalt er af stor betydning for vurderingen af effekten på naturområder. Når ammoniakholdig luft passerer ind over et område uden ammoniakilder, fx en skov eller et naturområde, så falder koncentrationen ind over området med afstanden fra kanten. En faldende koncentration vil alt andet lige også betyde et faldende nedfald. Hvor meget koncentrationen og dermed nedfaldet falder, er stærkt afhængigt af afstanden til og typen af kilder i det opland, der ligger opstrøms for det pågældende kildefri område. Således kan kilder i op til 10-30 km's afstand betyde noget for koncentrationen i området.

Den mere lokale variation af ammoniaknedfaldet omkring en punktkilde kan også have betydning for udviklingen af kvælstof-følsomme naturtyper. Store husdyrbrug medfører en lokal forøgelse af ammoniakkoncentrationen og dermed også af nedfaldet. Lokalt kan der forekomme direkte skader på vegetationen, og ifølge en hollandsk undersøgelse vurderes det at der ved udslip på 10.000 kg N pr. år er stor risiko for skader på planter inden for 100 m fra staldanlæggene uanset forholdene, og nogen risiko inden for 200 m afhængig af vindforholdene. En vegetationsundersøgelse fra Skotland af forskellige bevoksninger ved 4 husdyrbrug (kyllinger, svin og kvæg) med udslip på mellem 4.000 og 14.000 kg N pr. år viste klare sammenhænge mellem stigende ammoniakkoncentrationer og -nedfald og stigende koncentrationer af kvælstof i forskellige plantedele. En effekt på bevoksningernes bundvegetation var tydelig 50 – 300 m fra staldanlæggene svarende til depositioner over 20 kg N/ha pr. år.

Modelberegninger af kvælstofnedfald på lokal skala i et lille udsnit af Vejle Amt kan synliggøre sammenhængen mellem udslip, nedfald og naturområdernes lokalisering, og illustrerer samtidig vanskeligheden ved at bestemme nedfaldet til disse områder, som ofte består af små arealenheder i en mosaik af landbrugsarealer (figur 2.4.11). På kortet er staldanlæggenes beliggenhed indikeret med en angivelse af udslippets størrelse fra stald og lagre.

I den forenkledte modelberegning antages det, at nedfaldshastigheden er ens for dyrkede arealer og for naturområder. I virkeligheden vil skov- og naturarealer have en større "evne" til at optage ammoniak end intensivt dyrkede arealer, der i lange perioder vil udsende ammoniak. De anvendte udslipskoefficienter til beregningerne er overestimeret, idet den nationale opgørelse af ammoniakudslip blev revurderet i 2000; beregninger med de nye tal er endnu ikke tilgængelige. Som det fremgår af kortet beregner modellen, at der

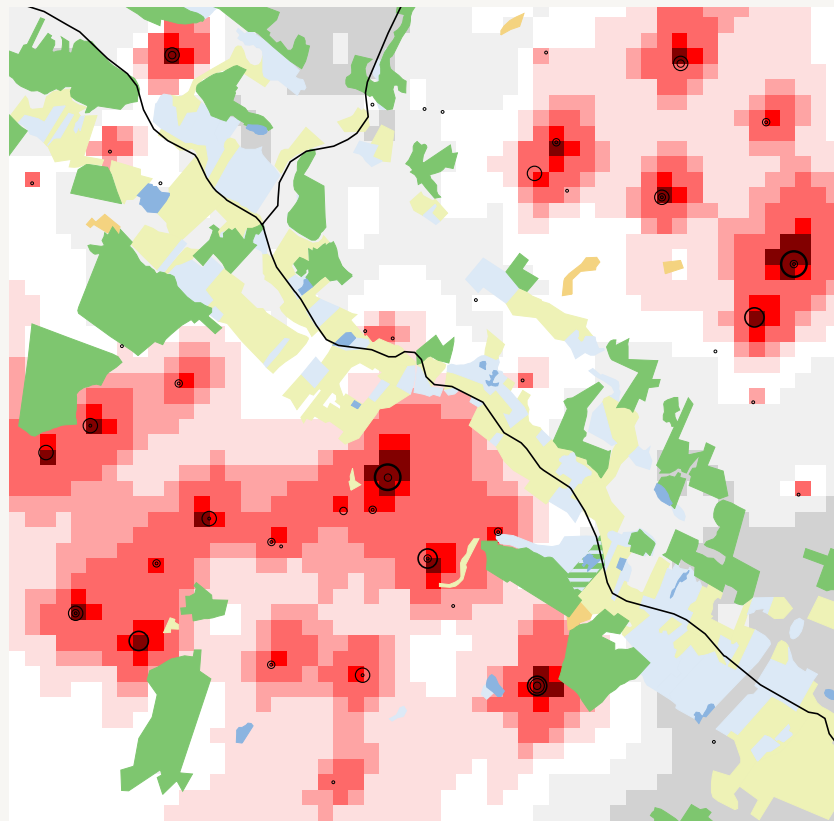
er en stor belastning i nærheden af kilderne som skyldes tørt nedfald af ammoniak. Naturområderne ligger spredt omkring kilderne. De som er beliggende tæt på kilderne udsættes for en forholdsvis større N-belastning, som tiltager med husdyrbrugets størrelse.

Tidsudvikling

Siden slutningen af 1980'erne er gasformig ammoniak og partikulært ammonium blevet målt på seks stationer i Danmark.

Koncentrationsniveauet af ammoniak er varierende i tid og sted (figur 2.4.12). Med undtagelse af luftmålestationen Tange i Midtjylland viser målingerne af ammoniakkoncentrationerne i perioden 1987 til 2000 ikke noget fald, selv om der har været et fald på 30% i de danske udslip (1985 til 1999) og ca. 17% (1985 til 1998) i de europæiske udslip. Et eventuelt fald kan være vanskeligt at spore pga. de store variationer fra år til år, men den manglende nedgang kan også skyldes

Figur 2.4.11
Udslippet og det totale årlige brutto kvælstofnedfald for 1995 i et udsnit af Vejle Amt.
(Kilde: Andersen et al., 2000).



des den ændrede karakteristik af atmosfæren i takt med nedgangen i svovludslippet, som meget vel kan have en indflydelse på omdannelsen af ammoniak til ammonium, således at denne reaktion foregår langsommere, fordi der er færre svovlsure partikler i luften. Ydermere har målemetoden i denne sammenhæng sine begrænsninger og bør kun vurderes på summen af gasformigt ammoniak og partikulært ammonium. For den del der måles som partikulært bundet ammonium, ses et tydeligt fald på lidt mere end 30% i koncentrationsniveauet, og således er summen af gasformigt ammoniak og partikulært ammonium ligeledes faldet. Det skal bemærkes at der med mere ammoniakspecifikke målemetoder heller ikke har kunne konstateres et fald i ammoniakkoncentrationen i Holland, selvom udslippet er reduceret. Nedfald af ammonium og nitrat med nedbør udviser et svagt fald over perioden 1987-2000 (figur 2.4.12).

Såfremt omdannelsen af ammoniak til ammonium er blevet langsommere i takt med svovlreduktionerne, får dette en konsekvens for spredningen lokalt af ammoniak, idet opholdstiden i atmosfæren bliver længere, og derved påvirkes et større område af de lokale udslip.

Overskridelse i procent

	Eg	Bøg	Gran	Fyr
Forsuring	38	30	44	47
Eutrofiering	51	40	81	81

Overskridelse i procent med 50 procent reduktion

	Eg	Bøg	Gran	Fyr
Forsuring	28	22	35	40
Eutrofiering	35	26	70	73

Tabel 2.4.4 (øverst)

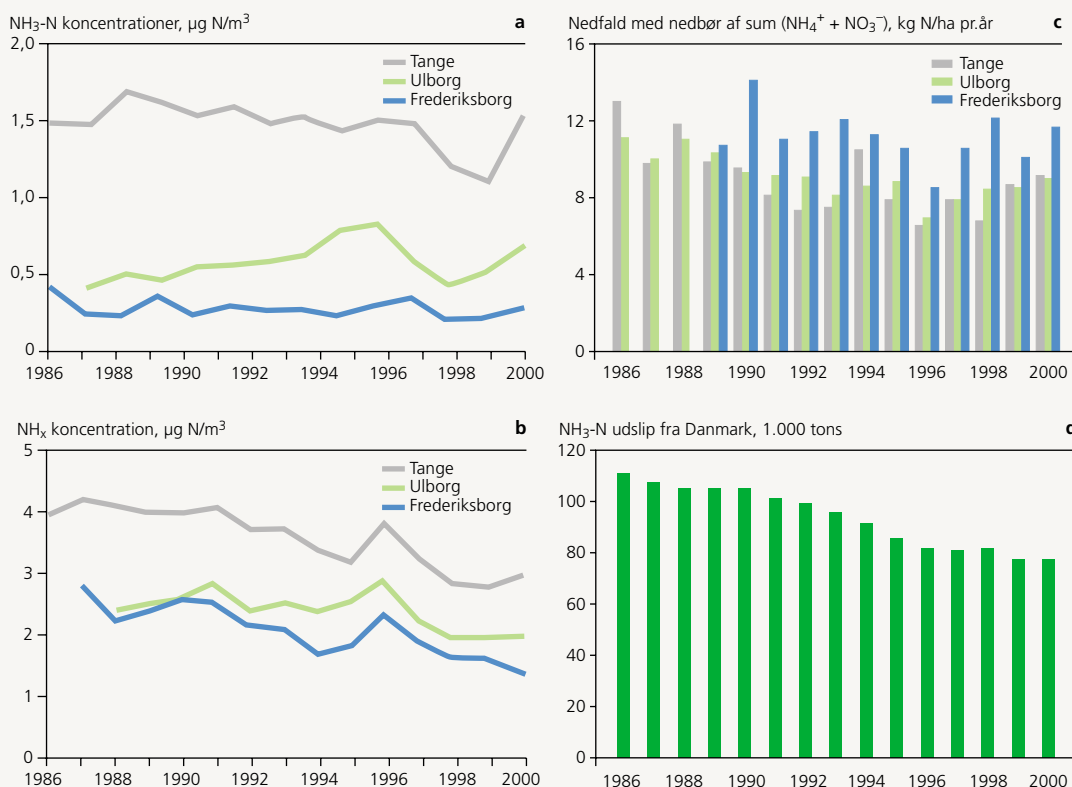
Opgørelse over skovarealer hvor tålegrænsen for forsuring og eutrofiering overskrides angivet i procent.

(Kilde: Bak et al., 1999).

Tabel 2.4.5 (nederst)

Opgørelse over skovarealer hvor tålegrænsen for forsuring og eutrofiering overskrides angivet i % under forudsætning af en 50% reduktion af ammoniakudslippet i procent.

(Kilde: Bak et al., 1999).



Figur 2.4.12
Årsmiddelkoncentrationer i perioden 1987-2000 af gasformigt ammoniak (NH₃) (a), summen af gas- og partikelformigt ammoniak (NH_x) (b), nedfald af ammonium og nitrat (NH₄⁺ + NO₃⁻) med nedbør (c). (Kilde: Hovmand, 2001 b). Endvidere er det årlige danske udslip af ammoniak vist (d). (Kilde: Andersen et al., 2001).

Reduktionsscenarier

I ammoniakredgørelsen (redegørelse nr. 3) er der lavet beregninger af overskridelsen af tålegrænserne for forsurening og eutrofiering af de danske skov- og naturområder. Beregningerne er ydermere gennemført for et scenario, hvor det danske ammoniakudslip reduceres med 50%.

For skov er arealer med overskridelser af tålegrænser for eutrofiering og forsurening angivet i *tabel 2.4.4* og *2.4.5*, sammen med værdierne efter en reduktion i det danske ammoniakudslip på 50%. Tålegrænserne og nedfaldet er modelberegnet og forventes at have en usikkerhed i størrelsesordenen 30-50%. Der beregnes en centralværdi og et 90% konfidensinterval baseret på de skønnede usikkerheder.

Beregningerne viser at overskridelsen af tålegrænserne for forsurening og eutrofiering ikke i væsentlig grad kan elimineres, da ikke mindst udenlandske bidrag stadig vil forårsage overskridelser af tålegrænsen. Overskridelserne er mindst markante for bøg og eg, og 50% reduktionsscenariet vil kunne reducere problemet væsentligt.

De danske tålegrænser for eutrofiering af terrestriske naturtyper er empirisk fastsat for følsomme økosystemer som heder, klitheder, højmoser og overdrev. Usikkerheden på tålegrænserne er kun kvalitativt vurderet, og de fastsatte grænser vurderes som enten "pålidelig" (heder) eller "temmelig pålidelig" (klitheder, højmoser og overdrev). Angivet i kg N/ha pr. år er der fastsat følgende tålegrænser:

Naturtype	Kg kvælstof pr. hektar pr. år
Indlandsheder:	15 – 20
Klitheder:	10 – 15
Overdrev:	10 – 15
Højmoser:	5 – 10

En reduktion af ammoniaktilførslen vil reducere andelen af de truede arealer, om end tålegrænsen for højmoser er så lav, at en 50% reduktion ikke vil forbedre situationen mærkbart, selv om overskridelsen beregnes for den højeste tålegrænse. For indlandsheder vil en 50% reduktion betyde, at arealerne stort set ikke vil være truet af eutrofiering. Hvor mellem 0- og 44% af hedearealerne nu er beregnet til at overskride tålegrænsen for højeste og laveste grænseværdi, vil arealet falde til < 1%. For klitheder vil det truede areal reduceres fra mellem 1- og 37% ned til 0-3%.

Det skal bemærkes, at disse modelberegninger som nævnt er behæftet med en del usikkerheder på såvel fastsættelsen af tålegrænser som beregninger af nedfaldet. Opgørelserne af udslip som ligger til grund for beregningerne, blev revurderet i 2000, men beregninger med de nye tal er endnu ikke tilgængelige.

Målsætninger og tiltag

I forbindelse med indgåelsen af aftalen om Vandmiljøplan II i 1998 blev det bestemt, at der skulle laves en handlingsplan for reduktion af ammoniakudslippet fra landbruget. Ammoniakhandlingsplanen blev fremlagt i maj 2001. Dens overordnede målsætning er at reducere kvælstoftabet til det danske vandmiljø, men målet med planen er også at medvirke til at bevare og beskytte sårbare danske naturtyper med tilhørende plante- og dyrearter. Ammoniakhandlingsplanen fokuserer på at optimere de forskellige led i gødningshåndteringen og indeholder bl.a. et forbud mod at benytte ammoniak til halmludning. Derudover vil man lave begrænsninger af lokal ammoniakfordampning fra husdyrbrug nær sårbare naturtyper. Effekten af handlingsplanens gennemførelse vil være et yderligere fald i ammoniakudslippet fra de nuværende 77 ktøns NH₃-N (1999) til 68,3 ktøns i 2003. Det såkaldte "Wilhelmudvalg", der har udarbejdet et forslag til en national handlingsplan for biologisk mangfoldighed og naturbeskyttelse, forslår udlægning af bufferzoner omkring sårbare naturtyper på op til 300 meter hvor ammoniakudslippet reduceres.

Ammoniakhandlingsplanen skal også ses i sammenhæng med Danmarks tilslutning til en række internationale forpligtigelser, sådan som disse er udtrykt med Biodiversitetskonventionen, Habitatdirektivet, EUs forsøringsstrategi og Geneve Konventionen om grænseoverskridende luftforurening. I forhold til EUs forsøringsstrategi og Geneve Konventionen om grænseoverskridende luftforurening (Gøteborg Protokollen) har Danmark forpligtet sig til et emissionsloft i 2010 på 69 ktøns ammoniak (svarende til 56,8 ktøns NH₃-N) fra husdyrgødning og handelsgødning samt spildevand. De igangsatte tiltag med Vandmiljøplan II og forslaget til Ammoniakhandlingsplan medfører et dansk udslip fra disse kilder på 55,8 ktøns NH₃-N. Danmark vil således allerede i 2003 opfylde de indgåede internationale forpligtigelser vedrørende ammoniakudslippet. Gøteborg Protokollen er ved at blive ratificeret i Danmark.



2.5 Nedbrydning af ozonlaget

Indledning

Menneskets udslip af ozonlagnedbrydende stoffer, især de såkaldte CFC'ere, har udtyndet atmosfærens ozonlag. Omkring 90% af ozonet er koncentreret i den øvre del af atmosfæren, eller stratosfæren, mellem 10 og 50 km over jordoverfladen. Ozonlaget absorberer det meste af den skadelige ultraviolette stråling fra solen (UV-B stråling), så når laget udtyndes vil mere UV-B stråling nå jorden. En øget ultraviolet stråling over længere tid kan hos mennesker øge risikoen for hudkræft, grå stær og

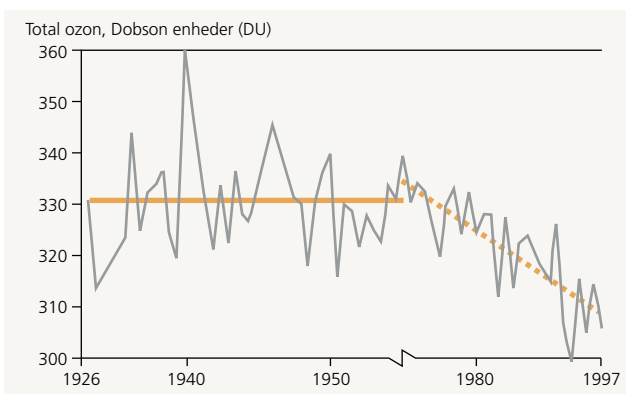
føre til en svækkelse af immunforsvaret. Også andre organismer end mennesket kan påvirkes: Produktionen og reproduktionen af havets planteplankton kan påvirkes, og en øget stråling har også en effekt på landbrugsafgrødernes vækst.

Den menneskelige påvirkning af ozonlaget

Selvom eksistensen af et ozonlag i stratosfæren havde været kendt længe, var det først med en målekampagne i det geofysiske år 1957 at der blev foretaget grundigere undersøgelser, og at man blev opmærksom på et muligt fald i ozonmængden (figur 2.5.1). Det havde

længe været kendt at ozonlaget periodisk kunne udtyndes, men man betragtede det som et kortvarigt fænomen hvor ozon naturligt blev regenereret, og hvor koncentrationen over en årrække var konstant.

I 1974 blev det, som en videnskabelig teori, første gang foreslået at stratosfærisk ozon kunne nedbrydes af klor frigjort ved fotolyse af CFC-gasser. CFC'ere er kemisk inerte forbindelser med et højt damptryk ved stuetemperatur, og dette forhold betyder at de ved udslip overgår direkte til gasfasen. Brom frigjort ved fotolyse af haloner har samme effekt. Disse egenskaber gør stofferne velegnede til en række



Figur 2.5.1

Måling af ozon over Arosa i Schweiz fra 1926 til 1997, hvor der indtil 1973 kun var mindre udsving fra et gennemsnit på 326 DU. Den totale mængde ozon over et givet sted kaldes ozonsøjlen. Den er højden af ozonmængden omregnet til standard betingelser (dvs. 0°C og 1.013 hPa.) og angivet i hundrededele millimeter - såkaldte Dobsonenheder (DU). I daglig tale anvendes ofte "millimeter" angivet ved samme betingelser. Typiske værdier er omkring 300 DU. I 1973 begyndte mængden af ozon imidlertid at falde med gennemsnitligt ca. 0,3% om året. (Kilde: IACETH, 2001).

tekniske anvendelser, men er også afgørende for deres miljøskadelige effekter. Den lange atmosfæriske levetid (40-150 år) betyder, at de kan transporteres til stratosfæren, hvor de udsættes for det UV-lys der katalyserer nedbrydning af ozon, specielt i en højde af 35-45 km over Jorden. Da den største mængde ozon findes i lavere højde (15-25 km), ventede man derfor kun at se et mindre fald i den totale mængde ozon pga. CFC-gasser. Det skulle vise sig at være en fejltagelse!

Ozonhullet over Antarktis

I begyndelsen af 1980'erne blev det klart at effekten var langt alvorligere. Overraskende nok skete det på Antarktis, hvor det viste sig at op til 50% af den totale mængde ozon var forsvundet over få uger i forårsperioden. Det skyldes at der er tale om såkaldte heterogene kemiske reaktioner på overfladen af partikler i stratosfæren.

I vinterperioden dannes der over Antarktis et vindsystem, hvor vindene cirkulerer omkring Sydpolen. I det indre af denne såkaldte vortex er der meget lave temperaturer, og der dannes skyer af partikler, der virker som et reservoir for ozonnedbrydende forbindelser. Når temperaturen stiger om foråret (efteråret hos os) frigøres forbindelserne og fører til det såkaldte ozonhul over Antarktis, som nu er en årligt tilbagevendende begivenhed. På internettet kan man få adgang til de nyeste måleresultater vedrørende ozonlaget over Antarktis samt opdaterede dokumenter om emnet.

Ozon over Arktis

Umiddelbart skulle man tro, at ozonnedbrydningen var størst på den nordlige halvkugle, hvor der er de fleste forureningskilder, men rent faktisk nedbrydes ozon ikke lige så hurtigt i stratosfæren over Arktis som over Antarktis. Det skyldes at Jordens to polære områder er forskellige: Antarktis er et kontinent omgivet af oceaner, medens Arktis er et hav omgivet af kontinenter. Det betyder at der ikke bliver så koldt over Arktis om vinteren, varigheden af et ozonhul er oftest kun nogle få uger, og koncentrationen på årsbasis er 7-8% mindre. Der er endnu ikke registreret en væsentlig øget gennemsnitlig UV-stråling, hvilket bl.a. skyldes at den naturlige variation i UV-B stråling varierer så meget som med en faktor 10 fra Lofoten i Norge til Kenya ved Ækvator.

Ozonlaget over Danmark

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) måler løbende den totale mængde ozon (ozonsøjlen) over Danmark. Gennemsnitsværdien for Danmark er 350 DU, men dækker over udsving mellem 200 og 450 DU. Som tidligere nævnt er der store variationer i mængden af ozon i stratosfæren (figur 2.5.2). Mængden er størst om foråret og mindst om efteråret. Ozonsøjlen over Danmark mindskes i gennemsnit med ca. 0,4% pr. år, lidt mere om foråret og lidt mindre om efteråret.

Regulering af CFC'ere

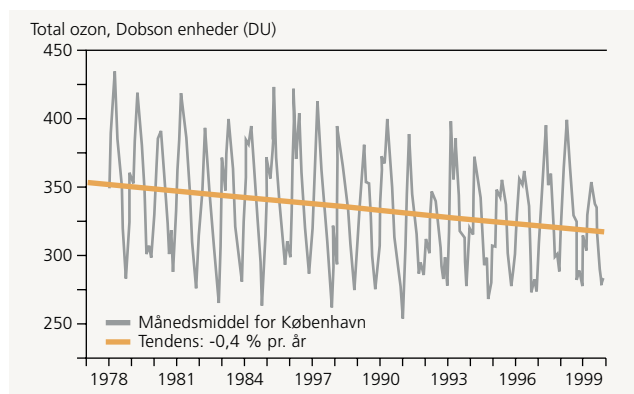
Den første internationale aftale om at regulere de ozonlagnedbrydende stoffer, Wienkonventionen, blev indgået i 1985. 161 lande har tilsluttet sig Montrealprotokollen, som efterfulgte Wien konventionen i 1987.

Montrealprotokollen omfatter regulering af syv grupper af ozonlagnedbrydende stoffer.

- Siden 1995 har det kun været tilladt at anvende CFC'ere i medicinske produkter og til laboratorieanalyser.
- Haloner har ikke måttet produceres og importeres i industrilandene siden 1995.
- Tetraklorkulstof har siden 1995 været begrænset til laboratoriebrug. Det samme gælder for triklorethan.
- Der har været et forbud mod anvendelsen af HBFC'ere siden 1996.
- HCFC'ere og methylbromid skal afvikles over en årrække.

Danmark har været langt fremme med afviklingen af ozonlagnedbrydende stoffer. I år 2000 var den eneste tilladte anvendelse således HCFC'ere i køleanlæg samt særlige undtagelser for andre stoffer til medicinsk brug eller i laboratorier.

På samme måde som man kan tillægge drivhusgasser en relativ effektivitet i forhold til kuldioxid i form af et global warming potential (GWP), kan man tillægge ozonlagnedbrydende stoffer et "ozone depletion potential" (ODP). Det regnes i forhold til virkningen af CFC-11 (CFCl₃), der er – eller var – det væsentligste stof i denne sammenhæng. Set i forhold til 1986 var Danmarks forbrug af ozonlagnedbrydende stoffer i 1998 faldet med ca. 98% (figur 1.5.28). Internationalt har afviklingen også været succesfuld. Parallelt med faldet i verdens produktionen af CFC'ere ses en stigende produktion af CFC-substitutter som HCFC'ere og HFC'ere (jf. afsnit 1.5).



Figur 2.5.2

Ændringen i ozonsøjlen over Danmark siden slutningen af 1970'erne. (Kilde: DMI, 2001).



Foto: Ukendt

2.6 Drivhuseffekt og menneskeskabte klimaændringer

Den historiske baggrund

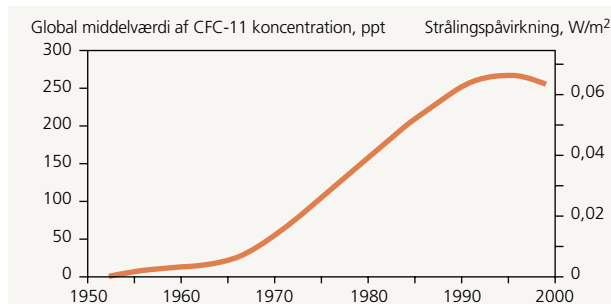
Allerede fra midten af 1800-tallet var man klar over, at atmosfærens indhold af kuldioxid var afgørende for Jordens varmebalance, og i slutningen af 1930'erne foretog man de første beregninger af konsekvenserne af de menneskeskabte udslip af kuldioxid. Det vakte dog ikke den store interesse – dels anså man virkningerne for overvejende gunstige, dels var Verden mere optaget af økonomiske kriser og den truende verdenskrig. Først i midten af 1950'erne vågnede den videnskabelige opmærksomhed, og som led i det Internationale Geofysiske År i 1958 begyndte de systematiske målinger af luftens indhold af kuldioxid.

En egentlig politisk erkendelse af at der kunne være tale om et problem kom først i slutningen af 1980'erne efter udsendelse af den såkaldte Brundtland-rapport fra Verdenskommissionen for Miljø og Udvikling nedsat af de Forenede Nationer. Det førte til oprettelsen af det mellemstatslige klimapanel (IPCC), der samler og vurderer al den viden-

skabelige litteratur om klimaændringer og med jævne mellemrum udsender rapporter.

I 1992, 1996 og 2001 udsendte IPCC store samlede vurderinger – de såkaldte assessments, der danner grundlag for det internationale arbejde med klimakonventionen. Selvom der har været en stigende sikkerhed i IPCCs vurderinger, har det basale budskab været uændret: Uden en kraftig opbremsning og efterfølgende reduktion i de globale udslip af drivhusgasser risikerer vi alvorlige menneskeskabte klimaændringer. Samtidigt er det dog erkendt at et vist mål af klimaændringer ikke kan undgås, og at de skal vurderes i sammenhæng med andre miljøpåvirkninger og de samfundsøkonomiske konsekvenser.

Figur 2.6.1
Den globale gennemsnitlige koncentration af CFC-11 i atmosfæren, samt strålingspåvirkningen angivet i watt pr. m².
(Kilde: IPCC, 2001a).



Klimapåvirkningen

De drivhusgasser som er ansvarlige for den menneskeskabte påvirkning af varmebalancen er først og fremmest kuldioxid, hvis koncentration siden industrialiseringen i det nittende århundrede er steget med ca. 30% fra 280 til 370 ppm. Hovedårsagen er anvendelsen af fossile brændsler, men også ændret arealanvendelse, herunder skovrydninger har spillet en rolle. Koncentrationerne af drivhusgasserne metan og lattergas, der i høj grad er knyttet til landbrugsproduktion, er steget med henholdsvis 150 og 16%. Gruppen af CFC og beslægtede forbindelser, der både nedbryder ozonlaget og er drivhusgasser, var stort set ukendte før 2. verdenskrig (figur 2.6.1).

Svovlforurening spiller en dobbeltrolle. På den ene side giver den anledning til forsurening (afsnit 2.4). På den anden side kan sulfataerosoler i atmosfæren gennem refleksion af solstråling modvirke drivhuseffekten. Der er tale om en mere lokalt præget effekt, der derfor er svær at kvantificere. At der også er virkninger på regional skala fremgår af målinger på borekerner af grønlandsk is. Her er koncentrationen af sulfat steget fra 50 mg/tons i slutningen af 1800-tallet til over 200 mg/tons omkring 1980. Herefter er det faldet igen. Mønsteret svarer rimeligt til udviklingen i det globale svovludslip. Tilsvarende viser nyere undersøgelser fra Nordamerika og Europa, at svovldepositions mængderne er faldende i disse områder, primært som følge af bedre rørgrensning og renere brændsler. Den afkølede effekt fra svovlforbindelser i atmosfæren forventes på længere sigt at blive yderligere reduceret som følge af generelle miljøtiltag på området.

Der er imidlertid ikke nogen enkel sammenhæng imellem ændringer i drivhusgassernes koncentrationer og deres påvirkning af energibalancen, fordi de absorberer strålingen ved forskellige bølgelængder og med forskellig effektivitet. Desuden er koncentrationen af nogle gasser så høj, at stråling ved nogle bølgelængder allerede nu absorberes næsten fuldstændigt; en forøgelse af koncentrationerne vil derfor kun have begrænset effekt. Det skal der tages hensyn til, når man skal vurdere virkningen af ændringer i de forskellige gassers koncentrationer. Endvidere må man tage hensyn til gassernes levetid i atmosfæren – jo længere gasserne lever i atmosfæren, jo større er deres samlede virkning.

For at kunne sammenligne og sammenveje de enkelte stoffers klimapåvirkning har man defineret et såkaldt globalt opvarmningspotentiale, på engelsk Global Warming Potential (GWP), der udtrykker virkningen af en vægtenhed af et givet stof relativt til

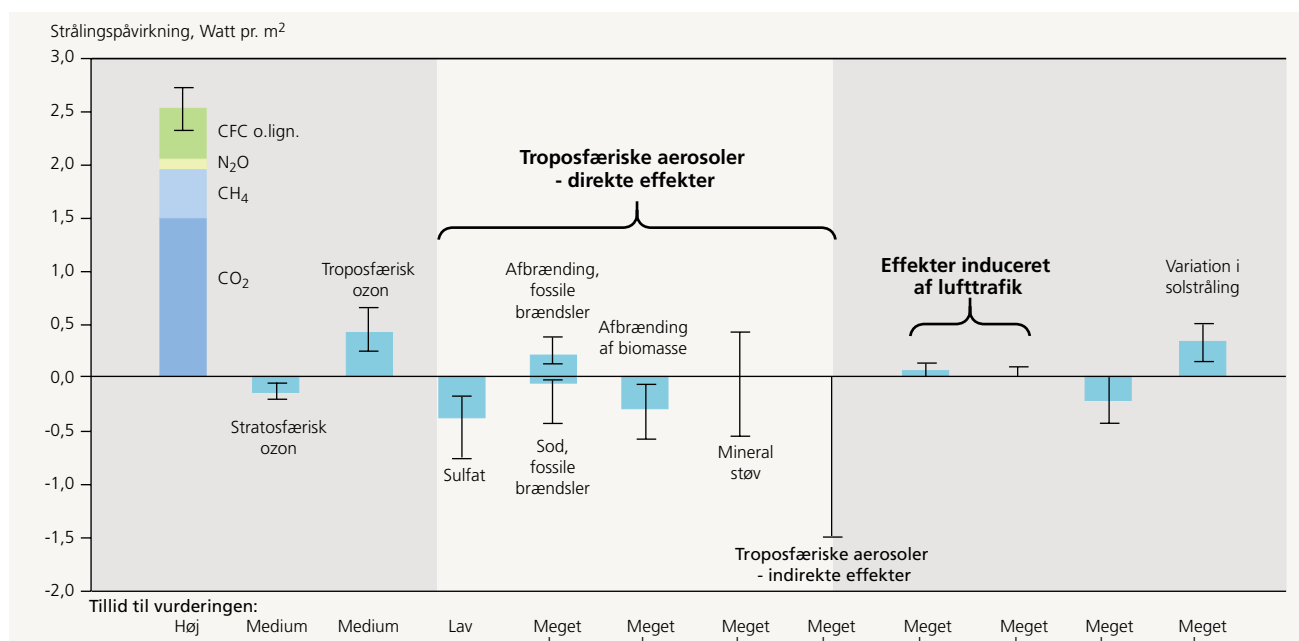
carbondioxid. Med karakteristiske levetider på af størrelsesordenen 100, 10 og 300 år for henholdsvis kuldioxid, metan og lattergas er det klart at tidshorisonten spiller en afgørende rolle. Typisk vælger man 100 år. Herefter kan man omregne effekten af de forskellige drivhusgasser til en ækvivalent mængde kuldioxid, dvs. til den mængde kuldioxid der vil give samme strålingspåvirkning. De seneste GWP-værdier for en 100-årig tidshorisont er i følge IPCC:

- Kuldioxid, CO₂: 1
- Metan, CH₄: 21
- Lattergas, N₂O: 310

Regnet efter vægt og over en 100-årig periode er metan således ca. 21 og lattergas ca. 310 gange så effektive drivhusgasser som kuldioxid. Nogle af de øvrige drivhusgasser (HFC, PFC, SF₆) har væsentlig højere GWP værdier, som fx SF₆, der har en beregnet værdi på 23.900. Med den store spred-

Figur 2.6.2

De globale klimapåvirkninger som årlige middelværdier fra 1750 til nu. Klodserne angiver middelværdier og de lodrette linier det anslåede usikkerhedsinterval. Endvidere er angivet den videnskabelige forståelse af de underliggende mekanismer, der kan være høj (H), middel (M), lav (L) eller meget lav (ML). De enkelte bidrag har forskellig natur. Det skal derfor understreges, at man ikke uden videre kan addere de forskellige bidrag og på den måde få et nettoresultat. (Kilde: IPCC, 2001a).



ning i GWP kan enkelte stoffer således få en målelig virkning, selvom de optræder i forsvindende koncentrationer. Deres samlede andel af det totale udslip af drivhusgasser er dog beskedent (jf. afsnit 2.2).

Jorden modtager gennem solstrålingen i gennemsnit 342 watt pr. m², der ved ligevægt skal returneres som stråling til verdensrummet. Påvirkninger af denne energibalance kaldes "thermal forcing" og udtrykkes ligeledes i watt pr. m². IPCC har opgjort globale middelværdier af påvirkningerne på grund af ændringer i koncentrationer af drivhusgasser og aerosoler fra før industrialiseringen til nu, samt virkningen af ændringer i solens udstråling siden 1850 (figur 2.6.2). Højden af blokkene angiver anslåede gennemsnitsværdier, mens bjælkerne viser usikkerheden på gennemsnitsværdierne. Det at den direkte positive påvirkning fra CO₂, CH₄, N₂O og halocarboner der dominerer. Nedbrydningen af ozon i stratosfæren giver et negativt, men usikkert bidrag, og væksten af ozonkoncentrationen i den nederste del af atmosfæren et tilsvarende positivt. Bidrag fra forskellige typer af partikler er meget usikre. Virkningen fra ændringer i arealanvendelse formodes at være ne-

gativ, og ændringer i solstrålingen at være positiv, men også disse bidrag er dårligt forstået. Samlet er der kun tale om få procent af den naturlige påvirkning, men alligevel kan det få afgørende betydning for Jordens klima. Kortvarige påvirkninger fra fx vulkanudbrud, der medfører udsendelse af partikler med en afkølede virkning, er ikke medtaget.

Klimaændringer indtil nu

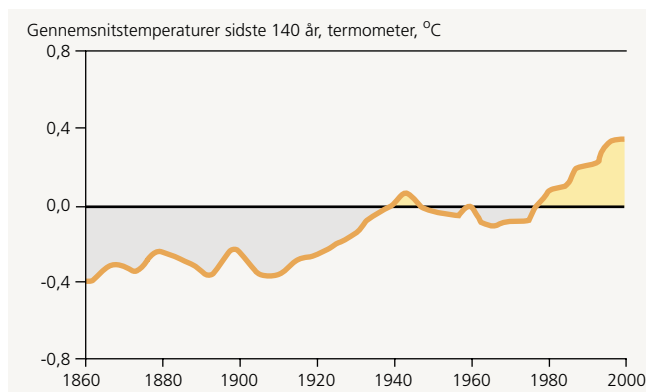
Temperaturmålinger har været foretaget siden 16-1700 tallet, men først efter ca. 1860 er der systematiske og pålidelige målinger, som dækker hele Jorden. Hvis man skal vurdere om klimaet har ændret sig, er det dog et problem at mange stationer, der oprindeligt var placeret i landlige omgivelser, nu ligger i byområder, hvor temperaturen kan være et par grader højere. Marine temperaturmålinger er ligeledes udsat for ændringer i målebetingelserne i form af større og hurtigere skibe. Tidligere måltes vandtemperaturen i en pøs der blev halet op på dækket, mens moderne målinger foregår i kølevandsindtaget. Efter passende korrektion for disse menneskeskabte effekter finder man en udvikling i den globale middeltemperatur (figur 2.6.3). Temperaturen er ste-

get signifikant i to perioder: fra 1920-40 og igen siden midt i 1970'erne; 1998 blev det varmeste år i perioden. Opvarmningen har ikke været jævnt fordelt over kloden, og nogle områder omkring Nordatlanten har endog oplevet afkøling. Det er ikke muligt at forklare alle variationerne fra år til år. Dog tilskrives en kortvarig afkøling i 1992 og 1993 virkningerne af vulkanen Mount Pinatubos udbrud i 1991.

Klimaet i bredeste betydning er afgørende for naturen og for en række menneskelige aktiviteter. Gennem det 20. århundrede har man set en global temperaturstigning på 0,6°C med tilhørende miljøændringer, enten positive eller negative, i form af afsmeltning af is, forskydninger af plantevækst og dyreliv mm. Flere af disse forandringer kan tilskrives menneskelig påvirkninger af klimaet og de må formodes at blive forstærket i fremtiden.

Temperaturmålinger fra Danmark, Færøerne og Grønland viser at temperaturen er steget mellem 0,3 og 0,6°C siden slutningen af det 19. århundrede, men der er store variationer fra år til år (figur 2.6.4). Man bemærker specielt, at temperaturen faldt mellem 1950 og 1970.

Figur 2.6.3
Den globale middeltemperatur 1860 - 2000, udtrykt som afvigelsen fra gennemsnittet for perioden 1961-90, angivet som løbende 10-årsmiddelværdier. (Kilde: IPCC, 2001b).



I Nuuk viser temperaturen en faldende tendens også i de seneste år. For Tórshavn på Færøerne er de årlige variationer i temperaturen mindre på grund af havets varmekapacitet, der virker dæmpende.

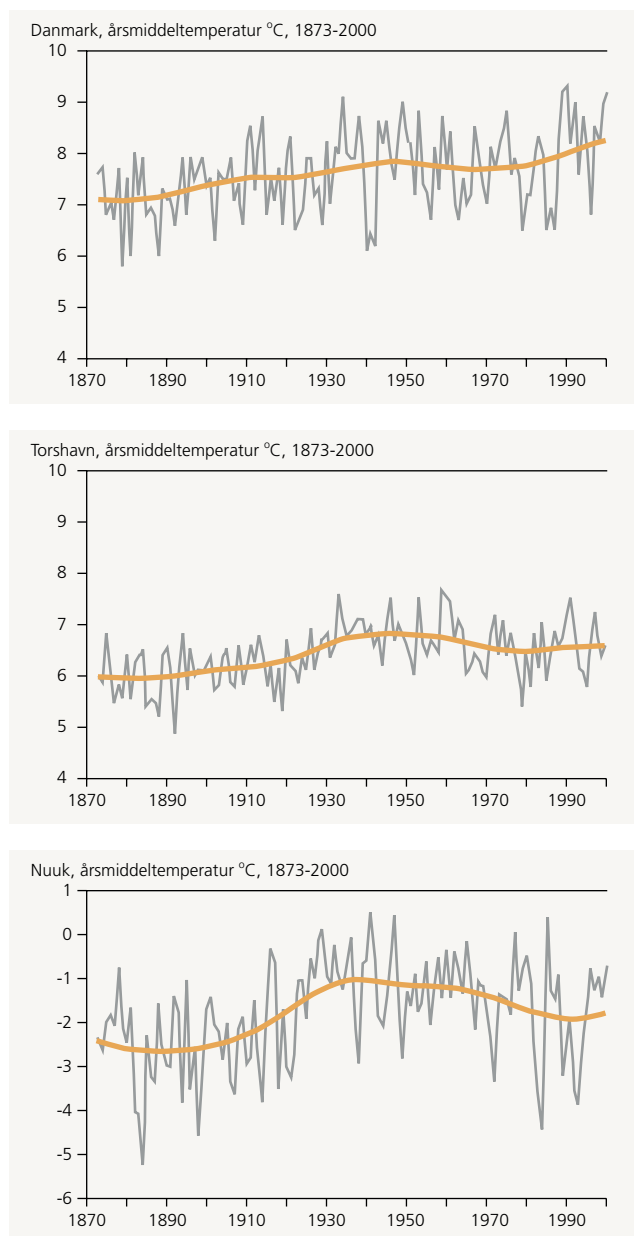
Globalt set er udviklingen i nedbør dårligt kortlagt på grund af mangel på observationer over oceanerne og vanskeligheder med at måle nøjagtigt

over land. Den observerede nedbør er steget fra århundredskiftet og indtil omkring 1960; siden 1980 er den igen aftaget. I Danmark er den observerede nedbør, som det fremgår af figur 2.6.5, steget ca. 10% siden slutningen af 1800-tallet. Udviklingen i årssummer kan dog dække over forskydninger inden for året. 1999 var det hidtil vådeste år i Danmark.

Stigning i vandstand

Som en konsekvens af den globale temperaturstigning er den globale vandstand steget, dels på grund af vandets varmeudvidelse, dels på grund af afsmeltning af gletschere og iskapper. På basis af vandstandsmålinger vurderer IPCC, at vandstanden er steget mellem 10 og 25 cm de seneste 100 år. Det relativt store usikkerhedsinterval skyldes ændringer på grund af landets vertikale bevægelser, der skal filtreres væk fra målingerne.

Vandstanden i de danske farvande er generelt steget de sidste 100 år og især de seneste 30 år. Da Danmark vipper, sker den største relative stigning i den sydlige del af landet med omkring 1 mm pr. år.



Figur 2.6.4
Temperaturudviklingen for Danmark, i Tórshavn og i Nuuk siden 1873. Der er vist udglattede årsmiddelværdier. De enkelte år kan afvige mere end 1°C.
(Kilde: DMI).

Fremtidens klima

I den tredje hovedrapport fra IPCC er det konkluderet at omkring halvdelen af den observerede temperaturstigning sandsynligvis skyldes menneskelig påvirkning, og der er fremlagt en forstærket argumentation for at den menneskeskabte forøgelse af drivhus-effekten uundgåeligt vil medføre et vist mål af klimaændringer. Hvor store ændringerne vil blive, hvor hurtigt de vil forløbe, og hvordan de vil blive fordelt på Jorden er endnu usikkert - og det vil i alle tilfælde afhænge af, i hvilket omfang det lykkes at få begrænset det globale udslip af drivhusgasser.

Generelt forventes det at blive varmere, men med store regionale forskelle. De største ændringer vil ske på høje breddegrader. Samtidigt forventes ændringer i nedbørsforholdene. Da varmere luft kan indeholde mere vanddamp, vil den samlede globale nedbør antagelig forøges. Nedbørens fordeling henover året er af større betydning end de absolutte mængder. Flere modeller peger på en større hyppighed af tørre somre og vådere vintre. Dertil kommer en forventet, og til dels observeret, stigning i antallet af kraftige nedbørhændelser.

En fortsat global opvarmning vil ledsages af en stigning i havenes vandstand. Også her vil der blive tale om regionale forskelle på grund af ændringer i vindsystemerne. I praksis er det den lokale, relative vandstand og risikoen for ekstreme værdier, der har betydning for virkningerne af en global vandstandsstigning.

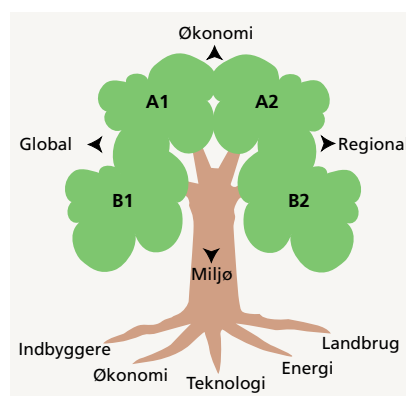
Udslipsscenarioer

Når vi bevæger os fra observationer i fortiden til scenarier for fremtiden bliver konklusionerne mere hypotetiske og må baseres på komplicerede modelberegninger. Hvor store ændringerne vil blive, hvor hurtigt de vil forløbe, og hvordan de vil blive fordelt på Jorden er endnu usikkert - og det vil i alle tilfælde afhænge af, i hvilket omfang det lykkes at få begrænset det globale udslip af drivhusgasser.

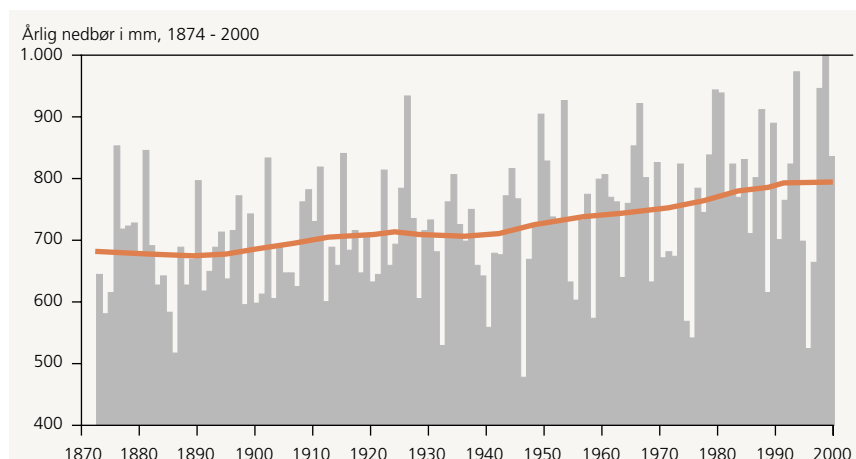
I forbindelse med udarbejdelsen af den seneste IPCC-vurdering (2001) er der derfor opstillet en række scenarier for udviklingen i Verden frem til år 2100. De er opdelt i fire familier af "historier" alt efter om hovedvægten lægges på økonomisk eller miljømæssig udvikling, og globalt eller regionalt orienteret udvikling (figur 2.6.6) og beskriver henholdsvis:

- **A1.** En fremtidig verden i meget hurtig økonomisk vækst, med en verdensbefolkning der kulminerer i midten af århundredet og en hurtig introduktion af nye mere effektive teknologier.
- **A2.** En mere heterogen verden med fortsat stigning i verdensbefolkningen og en teknologisk udvikling i et mere langsomt tempo.
- **B1.** En verden der i visse henseender minder om A1, men i højere grad satser på service og informationsbaseret økonomi og bæredygtige teknologier.
- **B2.** En verden der har fortsat befolkningsvækst, men dog mindre end A2 samt, langsomt, en mere og mere forskelligartet teknologisk udvikling end A1 og B1.

Figur 2.6.6
IPCCs fire scenariefamilier
og deres drivende kræfter.
(Kilde: IPCC, 2001c).



Figur 2.6.5
Observeret årlig nedbør i Danmark siden 1874. Der er store variationer fra år til år, men den udglattede kurve, som svarer til et 30-års glidende gennemsnit, viser en generel tendens i retning af mere nedbør.
(Kilde: DMI).



Tilsammen dækker scenarierne forskellige kombinationer af vækst i verdensbefolkning (ca. 7 - 15 milliarder), vækst i globalt bruttonationalprodukt (ca. 11-26 gange), fordeling af energiproduktion på fossile og ikke fossile energikilder mm.

Selvom nogle få urealistisk optimistiske scenarier indebærer et fald i udslippet af CO₂, indebærer alle en stigning i koncentrationen spændende fra det nuværende 370 ppm til fra ca. 500 til 1.000 ppm frem mod år 2100.

Globale klimascenarier

De tilsvarende stigninger i global middeltemperatur beregnes til 1,4 -5,8 °C frem mod 2100 som globalt gennemsnit, men med store regionale forskelle. Der beregnes generelt forøget nedbør om vinteren og reduktion om sommeren uden for troperne. Specielt kan subtropiske områder blive ramt af reduceret nedbør. Endvidere vil nedbørens fordeling på årstider ændres.

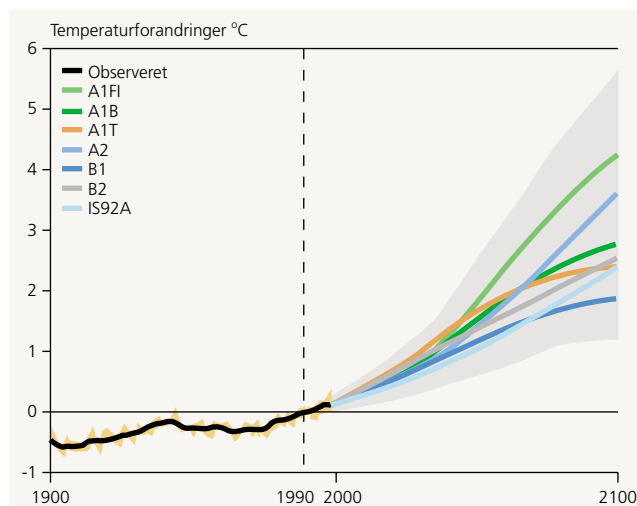
Endelig vil mere nedbør falde som regn og mindre som sne, hvorved afstrømningen – og dermed udnyttelsen af vandet ændres. Helt specielle forhold gør sig derfor gældende i områder, hvor en del af vandressourcerne kommer fra sommerafsmeltning af gletsjere. Spændet i fremskrivningerne af globale middeltemperaturer, og de mulige deraf følgende miljøeffekter er stort (figur 2.6.7).

Hvis det lykkes at få stabiliseret koncentrationen af CO₂ og andre drivhusgasser vil klimaet formentlig finde en ny ligevægt i løbet af et par hundrede år. Anderledes stiller det sig imidlertid med vandstandsstigningerne. De forskellige scenarier giver globale middelværdier mellem 9 og 88 cm frem mod år 2100, men på grund af en langsom gletsjerafsmeltning - og i særdeleshed en meget langsom opvarmning af oceanerne - vil vandstanden fortsætte med at stige i flere hundrede år efter at jordens opvarmning er begyndt.

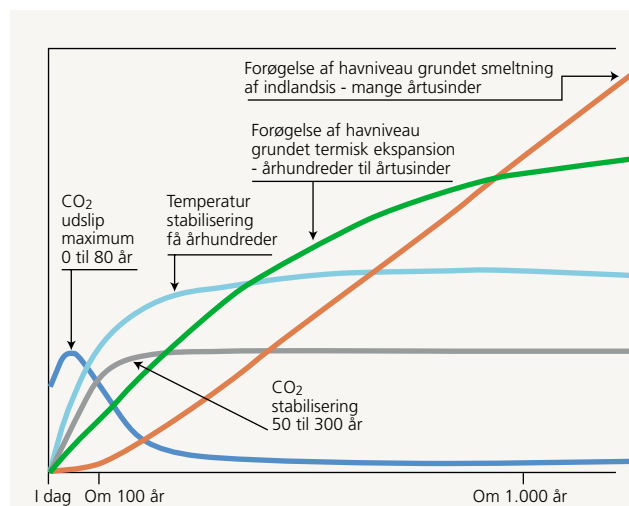
Selvom en fuldstændig afbødning af klimaændringer således ikke kan undgås, vil enhver opbremsning lette en tilpasning. Et muligt forløb er en ny klimalignevægt efter et par hundrede år (figur 2.6.8).

Det har i forskellige sammenhænge været diskuteret om en forøgelse af drivhuseffekten kunne udløse større, hurtige klimaændringer, fx gennem en ændring af de store havstrømme. Umiddelbart er det ikke sandsynligt, og de fleste klimaberegninger viser, at der næppe bliver tale om mere end en afsvækkelse af fx den Nordatlantiske strøm. Det kan betyde at Nordeuropa ikke oplever en så kraftig drivhusopvarmning som ellers. På grund af klimamodellernes fortsat manglende evne til at reproducere allerede observerede ændringer i klimaet, kan det ikke udelukkes, at dybvandsdannelsen i de nordiske have vil blive påvirket i hidtil uset grad.

Figur 2.6.7
Fremskrevne temperaturstigninger i IPCCs scenarier. Det grå felt dækker den samlede spredning for alle kombinationer af mange modeller og scenarier
(Kilde: IPCC, 2001d).



Figur 2.6.8
Tidshorisonter i drivhusproblematikken. Figuren er rent kvalitativ, men kunne fx vise en stabilisering på det dobbelte af det nuværende CO₂-niveau og en global temperaturstigning på ca. 4°C. Den endelige vandstandsstigning kunne blive flere meter.
(Kilde: IPCC, 2001e).



Et scenario for Danmark

Når man skal vurdere virkningerne af menneskeskabte klimaændringer i Danmark er udgangspunktet usikkert. Først og fremmest fordi der er mange muligheder for, hvordan verden vil udvikle sig. Man er derfor først nødt til at gøre nogle antagelser (et såkaldt udslips-scenario), som er realistiske, men som man dog ikke har sikkerhed for vil blive realiseret. Hertil kommer imidlertid at klimamodellerne stadig har en række usikkerhedsmomenter, og specielt er deres opløsningsevne på grænsen af hvad der er nødvendigt, hvis man skal se på mindre områder som fx Danmark.

Globale modelberegninger har kun en opløsningsevne på 300-500 km, men den kan forbedres ved kørsel af modeller med høj opløsning for et mindre område, hvor randbetingelserne dog fortsat styres af de globale modelresultater. Beregninger af denne type er foretaget for Skandinavien af flere Nordiske kli-

macentre. I en kørsel har forskerne anvendt IPCCs emissionsscenario IS92a, der giver en global opvarmning på ca. 4°C frem mod 2100, og sammenligner klimaet omkring 1990 med klimaet omkring 2075 – man ser altså på udviklingen over små 100 år (figur 2.6.9). Der findes en generel opvarmning på omkring 4°C, der er størst i nordlige områder, om vinteren og om natten. Det betyder at døgn- og årstidsvariationer generelt bliver mindre.

Som nævnt ovenfor er større, umiddelbare ændringer i de store havstrømme ikke sandsynlige. DMIs modelberegninger viser en svækkelse i løbet af de næste hundrede år efterfulgt af en regenerering. Det vil antagelig ikke give en nettoafkøling af Danmark, men kun en opbremsning af opvarmningen.

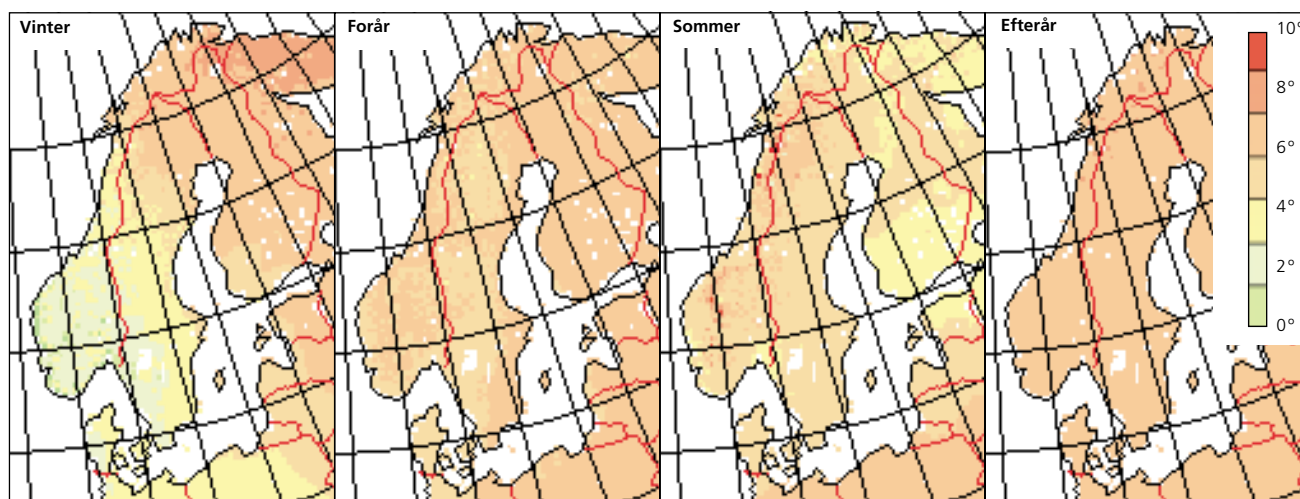
En analyse af den simulerede nedbør viser tendens til et vådere klima med hyppigere forekomst af kraftig nedbør. For Danmark beregnes en stigning i nedbør på 5-10% med den største vækst om

vinteren og mulighed for et svagt fald om sommeren. Alt i alt vil det ikke regne hyppigere, men når det regner vil det regne kraftigere. For Danmark beregnes det således at den nedbørmængde, der falder i kraftige byger med en intensitet på over 15 mm/dag stiger med ca. 50%.

Der forventes en samlet effekt på afstrømningen til vandløbene, der for Danmark for perioden december – april forventes at stige yderligere ca. 10%. Ændringer i sommerafstrømningen omgærdes fortsat af stor usikkerhed.

Figur 2.6.9

Forskell i beregnet middeltemperatur i Skandinavien. Farverne angiver for hver sæson forskellen mellem klimaet i dag og det modellerede klima omkring år 2075. (Kilde: Christensen, 2000).



Konsekvenser af klimaændringer

De forventede klimaændringer svarer meget groft til at Jordens klimazoner forskydes nogle hundrede km mod polerne. I bjergene svarer temperaturstigningen til en tilsvarende forskydning i højden. Umiddelbart lyder disse ændringer ikke af så meget, men over hundrede år svarer det til mere end vandringshastigheden for mange træarter. Specielt i marginalområder kan nogle økosystemer derfor forsvinde og blive erstattet af andre.

Man kan dog af mange grunde ikke umiddelbart regne med, at et givet område på længere sigt får en vegetation som den, der findes lidt nærmere ækvator. Dels vil døgn- og årsrytmen i solindstråling være uændret, dels er de fleste planter allerede tilpasset det eksisterende variable vejr og klima. Der kan dog ske ændringer i solstrålingen på grund af ændret skydække. Muligvis kan visse plantearter få problemer med korterevarende snedække og en tidligere start på vækstsæsonen, især hvis det tidlige forår lokker blomster og knopper frem før risikoen for frost er ovre. Generelt forventes kulturland-

skaberne i de rige lande i den tempererede zone at være mest robust over for klimaforandringer. Ligeledes forventes de naturlige økosystemer i den maritime del af den tempererede zone at være mindst udsat for skadelige påvirkninger.

Når man skal vurdere klimaændringers betydning for vegetation, er temperaturstigningen ikke nødvendigvis den afgørende faktor. Et samspil mellem vegetation, jordbund, temperatur, vind og nedbør bestemmer via fordampningen den resulterende jordfugtighed. Her har også nedbørsmønstret betydning; kraftige enkeltbyger er mindre fordelagtige end jævn regn, og for landbrugsafgrøder skal nedbøren helst falde i vækstsæsonen og ikke under høsten.

Et væsentligt aspekt ved klimaændringer er deres indflydelse på landbrugsproduktionen og dermed på fødemidlerne til den voksende verdensbefolkning. IPCC vurderer, at det globale potentiale næppe ændres væsentligt, men der vil kunne ske væsentlige forskydninger, som kan medføre internationale konflikter.

Danmark synes umiddelbart at være gunstigt stillet, fordi det ligger pænt inde i det tempererede skovområde. Man forventer derfor ikke drastiske ændringer, men klimaændringerne som sådan kan give mulighed for andre – nu sydlige – afgrøder, og i kombination med den stigende koncentration af CO₂, der fremmer væksten for visse planter, vil udbyttepotentialet forøges. Ændringerne i forudsætningerne for landbrugsaktiviteterne kan forventes at ske med kort varsel.

Højere temperaturer kan forøge risikoen for skadedyr (fx Coloradobiller) og plantesygdomme, og dermed kan forbruget af pesticider blive forøget. Her kan det blive nødvendigt med ændring i miljølovgivningen for på en gang at sikre et omkostningseffektivt landbrug og en beskyttelse af miljøet under et ændret fremtidigt klima.

Til trods for omfattende skovrydninger i udviklingslandene synes Jordens terrestriske økosystemer for tiden at udgøre et dræn for CO₂. Dette forhold kan dog hurtigt ændres, hvis klimaændringer medfører reduceret skovvækst. Især den nordøstlige del af Sydamerika vil være truet.

Foto: DMU/ Jes Fenger



Foto: DMU/Peter Bondo Christensen



Danske skove er i det væsentlige stærkt styrede produktions-skove og opererer med omdriftstider af størrelsesordenen 100 år. De kræver derfor langsigtet planlægning. En omlægning fra den dominerende rødgran til mere varierede skovbevoksninger, herunder bøg, vil gøre skovene mere robuste og modstandsdygtige over for de forventede ændrede klimaforhold.

Der er væsentlig usikkerhed om, hvordan klimaændringer kan påvirke vandressourcerne, der primært er bestemt af et samspil mellem på den ene side fordampning og nedbør og på den anden side oplagingskapacitet og forbrug. Nogle områder (bl.a. i Afrika og i lavtliggende kystegne) har allerede alvorlige problemer med mængden og kvaliteten af vand, og de vil antagelig forværres i de kommende årtier. I andre (bjergrige) områder kan forøget nedbør i korterevarende kraftigere hændelser betyde større afstrømning og risiko for oversvømmelser. Risikoen for brud på dæmninger er reel i mange lande allerede i dag, og styring af vandressourcerne ser ikke ud til at blive lettere i fremtiden med de forventede ændringer i nedbørs-mønstret.

Allerede nu har over 1 milliard mennesker ikke adgang til vand af tilstrækkelig kvalitet. Dette problem forventes at vokse. Dog næppe så meget på grund af klimaændringerne i sig selv, der kan medføre øget nedbør. Snarere som følge af et øget behov i en varmere verden og fra en større befolkning.

Der er ikke gennemført systematiske beregninger over hvorledes fremtidige klimaændringer vil påvirke grundvandsdannelsen i Danmark, men den kan være følsom overfor klimavariationer, og dette bør tages i betragtning ved dimensionering af vandforsyningsanlæg.

Mængden af vandressourcer påvirkes af såvel tilgængeligheden af vand fra naturens side og forbruget af vand til forskellige formål. Med udsigten til somre, som kan blive både varmere og mere tørre, kan der forventes at komme en øget dansk efterspørgsel efter vand til flere formål. For det første vil husholdningsforbruget øges på grund af havevanding, med mindre der indføres restriktioner herimod. For det andet vil landbrugets behov for markvanding stige markant. Allerede i dag er der flere steder i landet et stort ønske fra landbrugets side om tilladelser til

øget markvanding. Fordi kunstvanding har stor indflydelse på sommervandføringen, vil der fortsat være problemer med at overholde vandløbsmålsætningerne. Problemerne i dag i form af interessekonflikter mellem landbrug og miljø kan forventes at stige i takt med at behovet for kunstvanding stiger. For det tredje vil naturens behov for vand til opretholdelse af bl.a. vådområder blive påvirket. Det er vanskeligt at sige, hvorledes vådområdernes vandbalance vil udvikle sig, fordi den påvirkes af mange faktorer, og fordi de enkelte vådområdelokaliteter kan forventes at opføre sig forskelligt afhængig af bl.a. lokale geologiske forhold.



Foto: DMU/Morten Strandberg

En stigende vandstand kan i kystnære områder betyde at saltvand trænger ind i grundvandet. Herved forringes kvaliteten.

I Danmark udnyttes grundvandet til produktion af stort set alt ferskvand af drikkevandskvalitet. Salt (NaCl) i vandet skyldes normalt aflejringer i undergrunden. Kun i få områder som mindre øer (fx Langeland og Samsø) og på lokaliteter nær lavtliggende kyster (fx ved Køge Bugt) spiller indtrængning af havvand en rolle. Med et stigende havniveau vil saltvandsindtrængningen blive forstærket og kan forventes at blive begrænsende for vandindvinding flere steder end tilfældet er i dag.

Den stigende vandstand vil for en række kystområder og mindre øer verden over blive et alvorligt problem. Uden ekstra beskyttelse vil en ikke usandsynlig stigning på 40 cm. betyde, at antallet af personer der årligt ram-

mes af oversvømmelse stiger fra godt 30 millioner til næsten en kvart milliard.

Den danske kystlinje har ændret udseende siden sidste istid for 10.000 år siden som følge af relative havspejlsændringer. Kystlinjen er relativt lang – 7.400 km i forhold til arealet på ca. 42.000 km². I Danmark bor 80% af befolkningen i byområder med tilknytning til kysterne. De sårbare områder udgøres i det væsentlige af hævet havbund, marskområder og inddæmmede arealer, hvor der i alt ligger 60-80.000 ejendomme. Disse ejendomme trues dog ikke alle af den forventede globale vandstandsstigning på af størrelsesordenen 33-46 cm i løbet af de næste 100 år. Den største trussel mod liv og ejendom forventes i den sydvestlige del af Danmark, hvor ændringer i stormretning, hyppighed og stormenes varighed kan bidrage til at forøge problemets omfang.

Omkring 1.100 km af kystlinjen er beskyttet af diger og 700 km med fast opbygning. Bløde løsninger - i særdeleshed kystfodring - anvendes i stigende omfang.

Indtil nu har en direkte planlægning efter en vandstandsstigning udover de nuværende sekulære bevægelser været af yderst beskedent omfang. Det samme gælder den kystnære infrastruktur, hvor den uofficielle holdning har været "vent og se!".

Et vigtigt aspekt er virkningerne på kystnære økosystemer, i særdeleshed marine forlande, saltvandsmarsk og klitter. Her står man over for et valg mellem en beskyttelse af arealet på bekostning af de naturlige økosystemer, eller en naturlig kystudvikling på bekostning af arealbeskyttelsen, men hvor også nogle af de naturlige økosystemer på sigt vil forsvinde.