



Luftbåren Kvælstof- forurening



Ole Hertel er seniorforsker og gruppeleder i Danmarks Miljøundersøgelser. Er ph.d. i atmosfærekemiske modeller og arbejder med luftforureningseksponering af mennesker og natur.

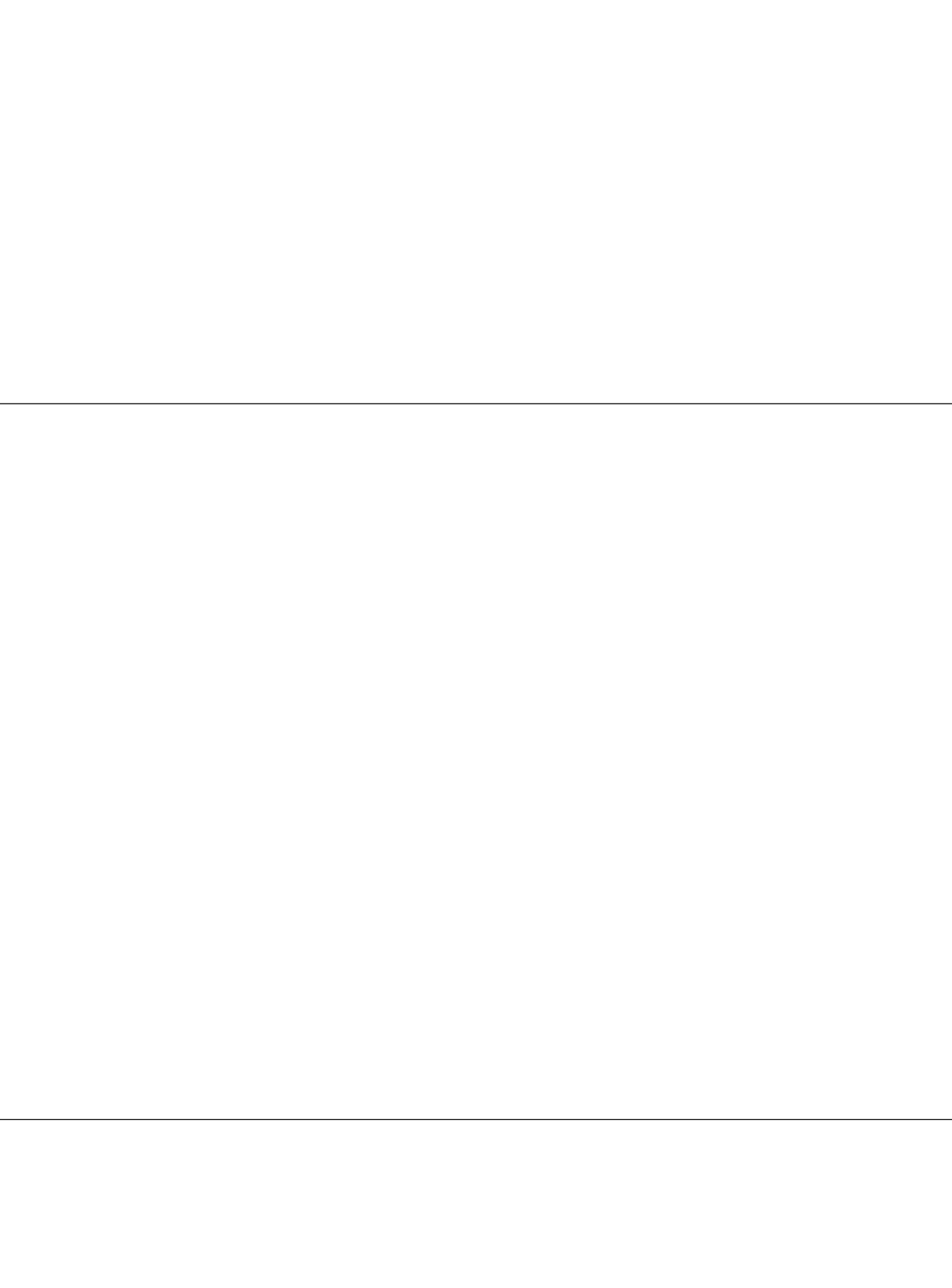
Jes Fenger er adjungeret seniorforsker ved Danmarks Miljøundersøgelser. Er oprindeligt dr.phil. i kernekemi, men har i mange år arbejdet med luftforurening. Han har specielt beskæftiget sig med virkninger af menneskeskabte klimaændringer og har skrevet eller redigeret flere bøger om emnet.

Stiig Markager er lic. scient. og seniorforsker ved Danmarks Miljøundersøgelser, hvor han er gruppeleder i Afdeling for Marin Økologi med matematiske modeller for marine økosystemer og effekter af tilførsler af næringsstoffer til havet som fagområde. Desuden underviser han på Københavns Universitet, hvor han er adjungeret professor i planteplanktons økologi og økologisk modellering.

Knud Tybirk var seniorrådgiver ved Danmarks Miljøundersøgelser, Kalø, med miljøpåvirkninger af natur som arbejdsfelt. Er ph.d. i botanik/biologi og arbejder i dag som rådgiver og projekt-udvikler i Dansk Landbrugsrådgivning.

Jesper Bak er civilingeniør ved Danmarks Miljøundersøgelser, hvor han i en årrække har arbejdet med luftforureningens virkninger. Er ansvarlig for kortlægning af luftforureningens virkninger i Danmark og dansk repræsentant i det internationale samarbejde om luftforureningens virkninger i UNECE.





Luftbåren kvælstofforurening

Redigeret af:
Thomas Ellermann

Med bidrag af:
Thomas Ellermann
Jes Fenger
Ole Hertel
Stiig Markager
Knud Tybirk
Jesper L. Bak



Luftbåren kvælstofforurening

Thomas Ellermann, Jes Fenger, Ole Hertel, Stig Markager, Knud Tybirk
og Jesper L. Bak

© 2007 Danmarks Miljøundersøgelser, forfatterne og Forlaget Hovedland

Alle rettigheder forbeholdes.

Ingen del af denne bog må gengives, lagres i et søgesystem eller transmitteres i nogen form eller med nogen midler grafisk, elektronisk, mekanisk, fotografisk, indspillet på plade eller bånd, overført til databanker eller på anden måde, uden forlagets skriftlige tilladelse.

Enhver kopiering af denne bog må kun ske efter reglerne i lov om ophavsret af 12. marts 2003 med evt. senere ændringer. Det er tilladt at citere med kildeangivelse i anmeldelser.

Forlagsredaktion: Ole Jørgensen

Illustrationer, ombrydning og scanning: Britta Munter, Grafisk værksted,
Danmarks Miljøundersøgelser

Omslagsfoto: Knud Erik Nielsen

Tryk og indbinding: Nørhaven Book, Viborg

Denne bog er trykt på 130 g Cyclus Print

Overskydende papir er genbrugt

ISBN 978-87-7739-793-6

1. udgave, 1. oplag 2007



Forlaget Hovedland

www.hovedland.dk

E-mail: mail@hovedland.dk

Forord 6



Indledning 9



Fra udslip til afsætning 19



Måling og beregning af kvælstofafsætningen 35



Virksomheden på vandmiljøet og danske naturområder 53



Før, nu – og i fremtiden 69

Litteratur 82

Stikordsregister 85

Forord

Over tre fjerdedele af Jordens atmosfære er kvælstof. Det kan derfor umiddelbart virke mærkeligt at tale om "luftbåren kvælstofforurening". Det skyldes imidlertid en sproglig forenkling. Den rene atmosfæres kvælstof findes som kvælstofmolekyler (N_2), der er ganske uskadelige. Forureningen består derimod af en række kvælstofholdige kemiske forbindelser, som hovedsageligt stammer fra udslip af kvælstofoxider (NO og NO_2) og ammoniak (NH_3), og som har en række, fortrinsvis uønskede, virkninger. Disse uønskede virkninger omfatter overgødskning (eutrofiering) og forsurening af natur og miljø samt materialenedbrydning og sundhedsskader på mennesker.

Af praktiske grunde vil vi i denne bog generelt tale om luftbåren kvælstofforurening, når vi mere korrekt mener forurening med kvælstofforbindelser. Bogen giver en populær fremstilling af kilderne til forurening, af hvordan forureningen spredes i atmosfæren og hvordan den igen afsættes på vand, jord eller vegetation. Desuden fortæller den om de skader, der kan ske som følge af afsætningen. Vi vil fokusere på de skader, der opstår som følge af kvælstofforureningens medvirken til "overgødskning" af natur og miljø, idet dette udgør et af de største luftforureningsproblemer for dansk natur og miljø. Bogen handler derfor om ammoniak og de to kvælstofoxider. Menneskets aktivitet fører imidlertid også til et stort udslip af en anden type kvælstofoxid, nemlig lattergas (N_2O), som medvirker til drivhuseffekten. Lattergas medvirker imidlertid ikke til "overgødskning" og vil derfor ikke blive behandlet i denne bog.

Bogen fortæller endvidere om, hvordan man overvåger den luftbårne kvælstofforurening i Danmark, og om, hvordan man på nationalt og internationalt plan forsøger at begrænse forureningen og dens virkninger. En litteraturliste til sidst i bogen giver forslag til videre læsning, som kan uddybe problemstillingen for den interesserede læser.

Forfatterne takker alle, som har givet værdifuld hjælp ved udarbejdelsen af bogen.



Heder er nogle af de naturområder, som forandres ved luftbåren kvælstofforurening. Billedet viser hede ved Nordby på Fanø.

Foto: Ole Malling.



Indledning

1

Selv om atmosfæren over os er fuld af kvælstof, taler man alligevel om luftbåren kvælstofforurening. Dette tilsyneladende paradoks forklares her i kapitel 1, hvor forureningsproblemets baggrund og initiativer til at begrænse det også præsenteres.

Foto: Ole Malling.



Figur 1-1

Lyng på strandheden ved Ellinge Lyng i Vestsjællands Amt. Lyng kræver kun lidt næring. Hvis der kommer for meget kvælstof, vil græsset vinde over lyngen.

Foto: Ole Malling.

Forurening af atmosfæren med kvælstofforbindelser har en række – i det væsentlige – uønskede virkninger: skader på menneskelig sundhed og velvære, nedbrydning af materialer og belastning af naturlige økosystemer gennem forurening og gennem overgødsning (eutrofiering). Det sidste er denne bogs hovedemne.

En aprildag, hvor man kører på landevejen efter en gyllevogn med en ram lugt i næsen, er der ingen tvivl: Foråret lugter. Afgrøderne skal have masser af kvælstof, for at de kan vokse over ukrudtet og give stort udbytte. Og en del af kvælstoffet gives som ammoniak i gylle (at det man lugter faktisk slet ikke er ammoniakken, men en række andre kemiske stoffer i gyllen, er en anden sag).

På heden er situationen anderledes (figur 1-1). De planter, der vokser her, fx lyng, kræver kun lidt næring. Hvis der kommer for meget kvælstof, vil græs vinde over lyngen. Her skal naturen ikke have for meget kvælstof, for så vil den forandres drastisk.

Kvælstof på godt og ondt

I byområder er kvælstofoxider et ubetinget onde, og der er fastsat sundhedsmæssige grænseværdier for det tilladelige indhold i luften. Også materialer kan nedbrydes af kvælstofforbindelserne. Uden for byerne er situationen imidlertid



tid mere kompliceret, og her spiller kvælstofforbindelserne som nævnt ovenfor en dobbeltrolle.

Kvælstofforbindelser er nemlig naturlige gødningsstoffer og som sådan umiddelbart gunstige for plantevækst. På visse levesteder, der fra naturens hånd er næringsrige (fx strandvolde og steder med næringsrig jordbund), har der da også udviklet sig planter, som er gode til at udnytte meget næring. Men de fleste naturtyper og plantearter er udviklet under forhold med meget lidt kvælstofgødning. Det gælder fx heder, skove, overdrev, moser og ikke mindst højmoser, der får al deres næring fra luften (figur 1-2). I alle disse naturtyper vil tilførsel af ekstra kvælstof give mere kvælstofkrævende plantearter mulighed for at indvandre og udkonkurrere de naturligt forekommende arter. Herved kan hele økosystemers struktur, funktion og tilhørende arter blive truet.

Kvælstof i luften

Atmosfærens hovedbestanddel er som nævnt i forordet kvælstof (ca. 78 %), men det findes i såkaldt fri form, som N_2 , der kun i særlige tilfælde kan indgå direkte i de biologiske processer. Kun ganske langsomt gennem Jordens udvikling er noget af kvælstoffet blevet omdannet til biologisk aktive former ved at blive bundet til brint, ilt eller kulstof.

Figur 1-2
Højmoser, her Lille Vildmose, får al deres næring fra luften. De er derfor særligt følsomme over for luftbårne kvælstofforbindelser.

Foto: Ole Malling.

Omdannelsen til biologisk aktiv form skete indtil for et par hundrede år siden stort set kun naturligt takket være bakteriers, algers og svampes virksomhed. Gennem 1900-tallet har vi mennesker imidlertid sluppet store mængder biologisk aktive kvælstofforbindelser ud i atmosfæren – fortrinsvis kvælstofoxider og ammoniak. Det er disse forbindelser, som under ét er årsag til den luftbåren kvælstofforurening.

Kvælstofoxiders forurenende betydning blev erkendt i løbet af det 20. århundrede, og betydningen af ammoniak blev tidligt erkendt i Holland. Men på generelt europæisk plan skete det først omkring midten af 1980'erne, hvor det blev opdaget, at den ammoniak, der anvendes som gødning på marker, direkte kan give afsvidning af skov nær ved staldanlæg. Først de seneste par årtier har der i den industrialiserede verden været et svagt fald i kvælstofforureningen på grund af stigende begrænsninger af udslippet (figur 1-3).

Figur 1-3

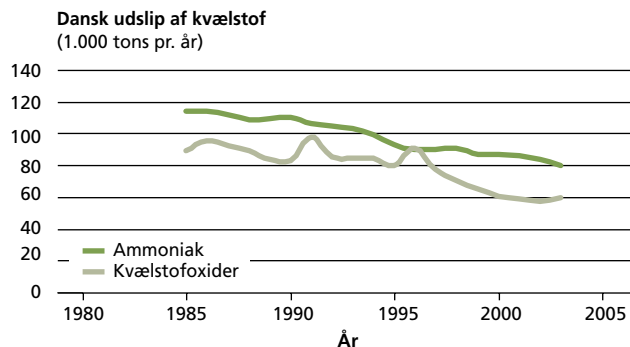
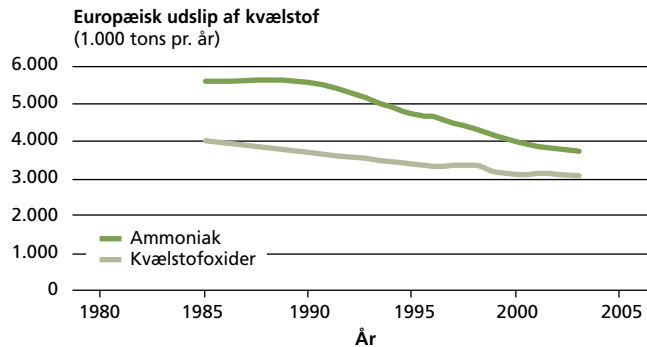
Øverst:

EU's udslip af kvælstof i form af kvælstofoxider og ammoniak.

Nederst:

Tilsvarende danske udslip. Der er i Danmark sket et fald på ca. 30 % siden udslippene toppede omkring 1990. De to toppe på kvælstofoxidkurven i hhv. 1991 og 1996 skyldes ekstra stor elproduktion som følge af eksport af el til bl.a. Sverige.

Kilder: EMEP og DMU.



Det europæiske udslip af kvælstofoxider toppede i begyndelsen af 1980'erne. EU's udslip af kvælstof, som i det væsentligste er kilde til afsætning af kvælstofoxider i Danmark, lå i begyndelsen af 1980'erne på ca. 5.500.000 tons, men udslippet var i 2003 reduceret til ca. 3.700.000 tons, svarende til et fald på ca. 34 %. I Danmark toppede udslippet i slutningen af 1980'erne med et udslip på ca. 95.000 tons kvælstof, som i dag er reduceret med ca. 37 %, svarende til et udslip på ca. 60.000 tons i 2003.

Det europæiske udslip af kvælstof bundet i ammoniak toppede i midten af 1980'erne med ca. 4.000.000 tons og er nu nede på omkring ca. 3.000.000 tons svarende til et fald på ca. 25 %. Her har Danmark været mere effektiv til at reducere. Det danske udslip toppede i midten af 1980'erne med omkring ca. 114.000 tons og er nu reduceret til ca. 81.000 tons svarende til et fald på ca. 30 %. Nye undersøgelser på Dansk JordbrugsForskning og DMU peger endda på, at det danske ammoniakudslip er endnu lavere og at faldet fra midten af 1980'erne til 2003 er lidt større end hidtil antaget.

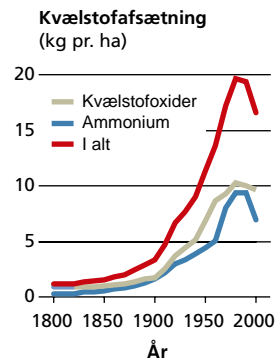
Det kvælstof, som slipper ud i atmosfæren, afsættes på et eller andet tidspunkt igen på land- og havoverflader. Den afsatte mængde følger i store træk udslippets størrelse.

Forskere har forsøgt at rekonstruere kvælstofudslippets historiske udvikling, og på basis heraf har de med modeller beregnet den historiske udvikling i kvælstofafsætningen. Resultaterne viser, at denne afsætning før den industrielle revolution, dvs. i begyndelsen af 1800-tallet, var omkring 1-2 kg kvælstof pr. ha (figur 1-4). Dette er 10-20 gange mindre end afsætningen er i dag (se nærmere i kapitel 3, side 48).

Hvor kommer forureningen med kvælstofforbindelser fra?

Kvælstofoxiderne (kvælstofmonoxid, NO, og kvælstofdioxid, NO₂) kommer fra forbrændingsprocesser, idet de dannes ved enhver form for afbrænding – fx i bilmotorer eller på kraftværker. Det sker ved iltning af forbrændingsluftens kvælstof ved høj temperatur, men også fordi evt. kvælstof i selve det afbrændte materiale iltes.

Ammoniak derimod kommer næsten udelukkende fra landbrug, idet 98 % af det samlede danske udslip af ammo-



Figur 1-4
Den historiske udvikling i afsætningen af kvælstof i Danmark.

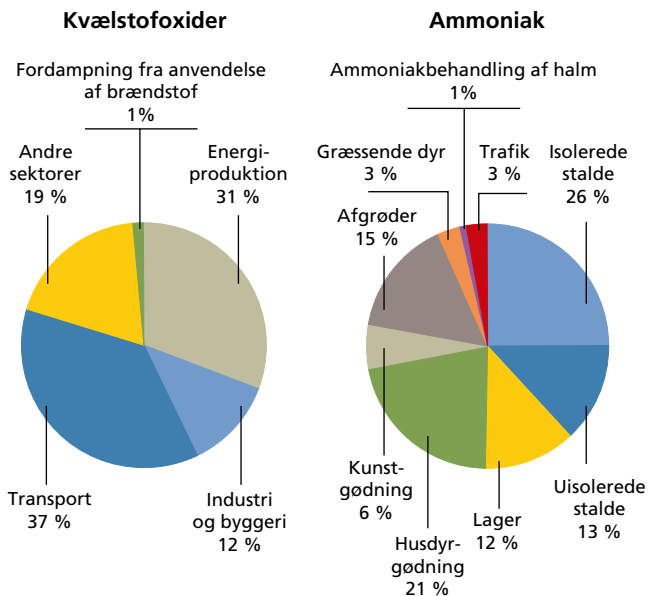
Kilde: Alveteg m.fl. 1998 og DMU.

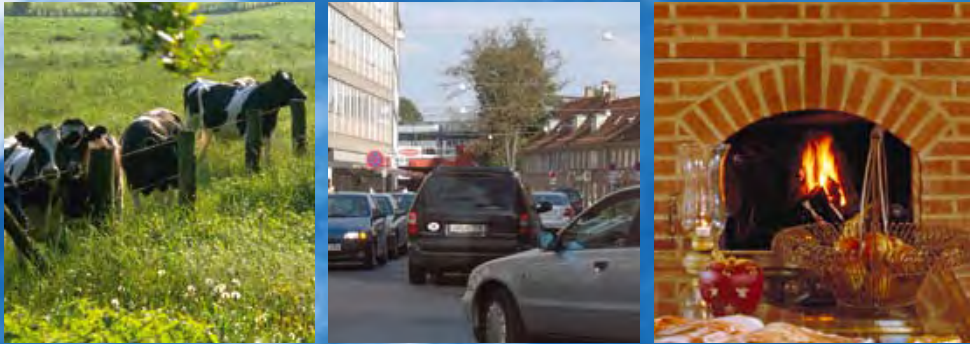


Figur 1-5

Kvælstofoxid- og ammoniakudslip fra forskellige kilder i Danmark 2003. Lidt over en tredjedel af kvælstofoxiderne kommer fra transport, som omfatter vejtransport, jernbaner, skibe og fly. Godt en tredjedel kommer fra kraftværker og raffinaderier. Stort set al ammoniak kommer fra landbrug, hvor navnlig husdyrproduktion er en væsentlig kilde. Isolerede stalde anvendes hovedsageligt til fjerkræ- og svineproduktion. Uisolerede stalde anvendes hovedsageligt til kvægproduktion.

Kilde: DMU.





Figur 1-6

Helt dagligdags aktiviteter som disse er anledning til kvælstofudslip.

Fotos:

Skorsten: High-lights.

Køer på mark: Ole Malling.

Biltrafik: Britta Munter.

Pejs: High-lights.

niak kommer herfra. De resterende 3 % kommer fra trafik. I landbruget er det navnlig husdyrproduktionen, som bidrager med store udslip pga. afdampning af ammoniak fra dyrestalde og udbringning af husdyrgødning på markerne. Fordelingen på danske kilder er vist i figur 1-5.

Kvælstofforureningen af luften stammer altså fra kun to slags kvælstof og i det væsentlige kun to slags kilder. Men både forbrændingsprocesser og landbrug griber så afgørende ind i vores hverdag, at udslippene i realiteten stammer fra næsten alle vores daglige aktiviteter. Hver gang vi fremstiller en bil og kører i den eller bare tænder lyset, skruer op for varmen, hygger os ved brændeovnen eller spiser en bøf i stearinlysets skær, giver det udslip af kvælstof til luften.

Skader på naturen

Den kvælstofafsætning, der rammer skovene og andre naturområder herunder næringsfattige søer (fx lobeliesøer) samt havet, har forureningsmæssig betydning.

Forurening af naturen på land

I Danmark er omkring halvdelen af skove og andre naturarealer belastet over kvælstoftålegrænsen. Tålegrænsen angiver et mål for den belastning med kvælstof, hvorunder skadevirkninger på udvalgte følsomme naturelementer ikke forekommer, vurderet på basis af den bedste, nuværende viden. Den slags skadevirkninger, som kan være, at et hedeområde omdannes til en græseng, er som regel længe om at vise sig. Der er derfor brug for en grundig overvågning, hvis de skal påvises. En sådan naturovervågning er etableret, og vi vil i kapitel 4 gå i dybden med nogle eksempler.

Forurening af de danske farvande

I mere end 30 år har forurening med kvælstof været en af de store trusler mod dyre- og plantelivet i vore farvande. De danske farvande modtager primært kvælstof fra vandløb, fra udveksling mellem de forskellige farvandsområder og endelig fra afsætning fra luften. Farvandene modtager altså kvælstof fra mange forskellige danske og udenlandske kilder og i forskellig kemisk form. Det giver anledning til megen debat om bidrag og virkninger.

De danske farvande kan deles i kystnære og åbne områder. I kystnære områder – specielt i fjorde – spiller udvaskning fra landbrug den største rolle. I den åbne del af de indre danske farvande udgør afsætning af atmosfærisk kvælstof derimod en relativt større og mere betydelig del af den samlede tilførsel.

Virkninger i vandmiljøet uddybes i kapitel 4.

Figur 1-7

For de danske fjorde spiller udvaskning fra landbrug den største rolle for tilførslen af kvælstof. Her Roskilde Fjord.

Foto: Britta Munter.



Aftaler om reduktioner i udslip til luften

Der er gennem årene blevet lavet en række aftaler om at nedbringe den generelle luftforurening i Europa. UNECE's (FN's økonomiske kommission for Europa) såkaldte Göteborgprotokol, der bl.a. omfatter kvælstof. Den blev underskrevet i 1999 og endeligt ratificeret i 2005. Her opererer man med faste mål for forbedring af miljøtilstanden i alle de omfattede områder. Reduktionerne foretages, hvor de er billigst at gennemføre, og således at virkningerne bliver størst muligt.

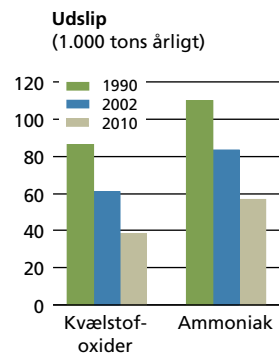
Når protokollen er fuldt gennemført i 2010, vil Europas udslip af kvælstofoxider være reduceret med ca. 41 % (i forhold til 1990) og ammoniakudslippet med ca. 17 %. Man regner med, at det areal, hvor kvælstoftålegrænsen overskrides, samlet nedbringes fra 165 til 108 mio. ha i Europa. Sideløbende har EU udarbejdet et direktiv, det såkaldte NEC-direktiv (National Emission Ceilings), som påbyder de enkelte EU-lande at reducere deres kvælstofudslip til fastlagte maksimumsværdier, de såkaldte udslipslofter.

Den danske indsats mod kvælstofforurening har rettet sig mod såvel luftbåren som vandbåren forurening. Der er således regler, som fastsætter grænser for udslip fra biler og kraftværker. Og siden midten af 1980'erne har Folketinget vedtaget en række planer og strategier, der inkluderer regulering af landbrugets belastning af vandmiljøet og atmosfæren. Dette drejer sig bl.a. om Ammoniakhandlingsplanen og Vandmiljøplan I, II og III, hvor den sidste blev vedtaget i 2004. Disse planer og regler skal ses i sammenhæng med Danmarks tilslutning til en række internationale forpligtelser udtrykt i Biodiversitetskonventionen, Habitatdirektivet, Vandrammedirektivet og ikke mindst Göteborgprotokollen og NEC-direktivet.

Den nationale og internationale indsats for at begrænse de negative virkninger af kvælstofforureningen er begyndt at vise sig. Evaluering af de hidtidige vandmiljøplaner har vist, at udledning af kvælstof til de danske farvande er reduceret betydeligt siden begyndelsen af 1990'erne. Målingerne af den atmosfæriske afsætning af kvælstof på land og i vand har ligeledes vist, at der er sket en reduktion på ca. 20 % i den tilsvarende periode.

I kapitel 5 uddybes disse udviklingstendenser, og fremtidsperspektiverne for kvælstofforureningen vurderes.

Figur 1-8
Danske udslip af kvælstof i 1990 og 2002 samt Göteborgprotokollens og NEC-direktivets udslipsloft gældende for Danmark i 2010.



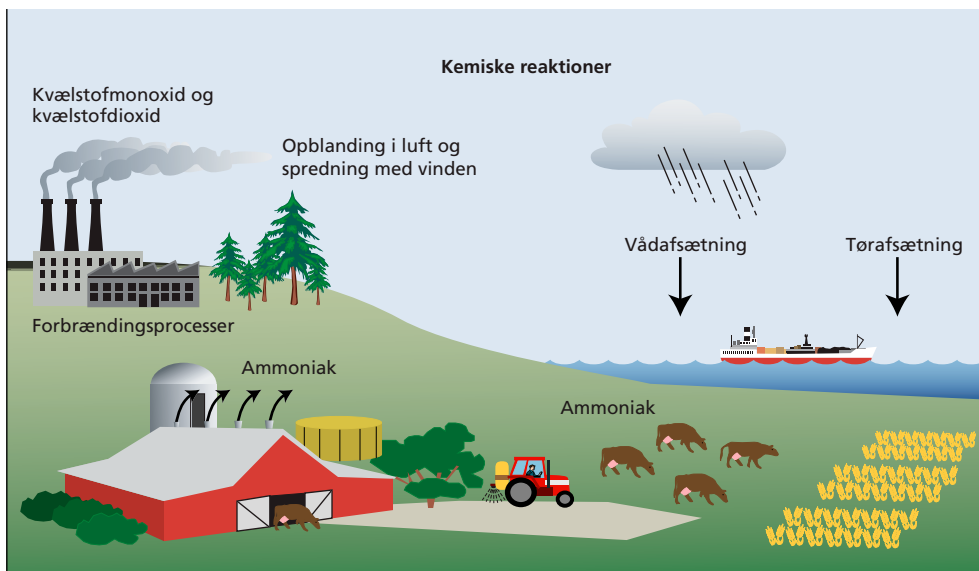


Fra udslip til afsætning



Der finder mange vigtige og spændende processer sted i de forurenende kvælstofforbindelsers kredsløb fra de dannes ved forbrænding og landbrugsproduktion til de afsættes på land og i vand. Disse processer og deres indbyrdes samspil beskrives nærmere i dette kapitel.

Foto: High-lights.



Figur 2-1

Kvælstofoxider og ammoniak udsendes henholdsvis fra forbrændingsprocesser (industri, transport, kraftvarme produktion) og fra husdyrproduktionen i landbruget. Efter udslippet bliver kvælstoffet transporteret med vinden, samtidig med at det fortyndes ved opblanding og omdannes til andre kvælstofforbindelser ved kemiske reaktioner. Til sidst afsættes kvælstofforbindelserne igen; enten ved at de fjernes fra luften med nedbøren, hvilket kaldes vådafsætning, eller ved at de afsættes ved direkte kontakt med overfladen, den såkaldte tørafsetning.

Ammoniak og kvælstofoxider gennemløber i atmosfæren en kæde af processer. Disse processer omfatter udslip, kemiske omdannelser, transport og spredning samt selve afsætningen på vegetation, jord- eller vandoverflader (figur 2-1). Processerne i atmosfæren indvirker bl.a. på, hvor meget kvælstof der bliver afsat, og på, hvor langt fra kilderne afsætningen finder sted.

I det følgende gives en kort introduktion til disse processer og deres indvirkning på kvælstofforbindelsernes skæbne i atmosfæren. Processerne beskrives enkeltvis i dette kapitel, men det er vigtigt at holde sig for øje, at mange af dem forløber samtidig.

Udslippene

Ammoniak

Mange mennesker forbinder udslippet af ammoniak med lugten på landet, når der bliver udbragt husdyrgødning på markerne. Det er dog ikke ammoniakken, man kan lugte, men en lang række andre kemiske forbindelser, som afgives samtidig med ammoniak. Kilderne til ammoniak i atmosfæren finder man da også helt overvejende i landbrugssektoren.

ren – for danske udslip er der som nævnt i kapitel 1 tale om ca. 97 % af det totale udslip. De resterende ca. 3 % kommer fra udstødningssasser fra personbiler med katalysator.

Udslippet fra landbrugssektoren finder sted ved ventilation af stalde og fordampning fra gødningsbeholdere, ved fordampning fra udbragt husdyrgødning og handelsgødning og endelig ved fordampning fra afgrøderne. Udslippet har en betydelig sæsonvariation, som både skyldes vejrforholdene og den lokale landbrugspraksis, ikke mindst tidspunkterne for udbringning af husdyrgødning på markerne.

Stalde og gødningsbeholdere, som betegnes punktkilder, bidrager med lidt over halvdelen af det samlede udslip. Resten stammer fra udbragt gødning og afgrøder, som går under fællesbetegnelsen fladekilder, fordi udslippet fra dem er fordelt over et større areal. Udslip fra fladekilder sker tæt ved jordoverfladen.

Hvorvidt udslippet stammer fra en punkt- eller en fladekilde er vigtigt for forholdene tæt ved kilden, idet udslip fra punktkilder spredes over længere afstand end udslip fra fladekilder. I en afstand af 500 til 1.000 m fra kilden kan man

Figur 2-2
Over halvdelen af udslippet af ammoniak i Danmark stammer fra husdyrproduktion.

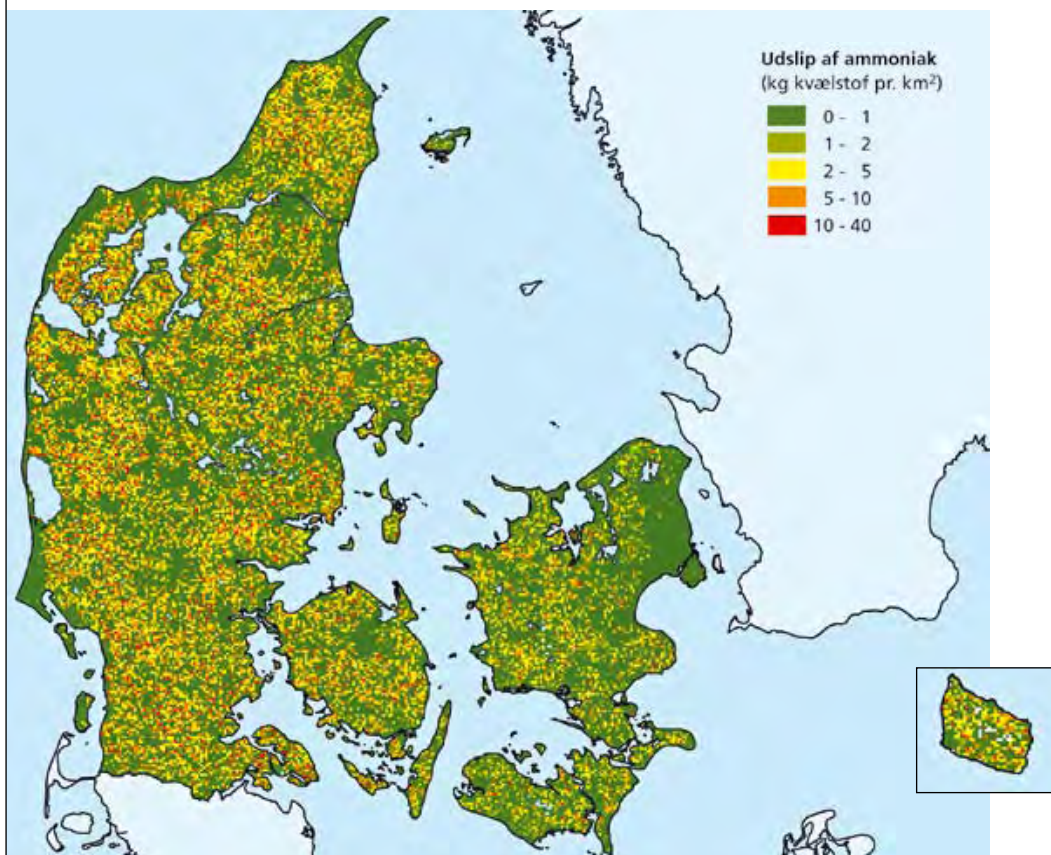
Foto: Ole Malling.



dog ikke længere se forskel på de to kildetyper, fordi der sker en meget hurtig opblanding af luften i de nederste 100 til 200 meter af atmosfæren.

Da afsætningen af ammoniak ofte kan være meget stor tæt ved kilden, er det vigtigt at have præcis information om kildernes placering. Her er de danske landbrugsregistre nyttige, idet de indeholder detaljeret information om bedriftens placering, dens tilhørende marker og antallet af husdyr. Dermed er det muligt at foretage en ganske præcis kortlægning af udslippenes geografiske placering og størrelse (figur 2-3). Denne kortlægning, også kaldet udslipsopgørelse, er et nødvendigt input til de luftforureningsmodeller, som anvendes til beregning af kvælstofafsætningen (se kapitel 3).

Figur 2-3
Det årlige danske udslip af ammoniak angivet som kg kvælstof pr. km² i år 2000. Fordelingen afspejler placeringen af de store husdyrbrug i Danmark.



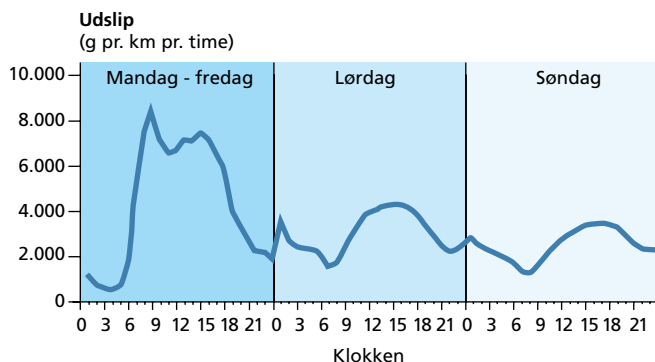
Kvælstofoxider

Kvælstofoxiderne dannes som nævnt helt overvejende ud fra atmosfærens frie kvælstof ved høje temperaturer i forbindelse med diverse forbrændingsprocesser. De vigtigste kilder til kvælstofoxiderne er derfor forbrændingsprocesser i forbindelse med trafik, kraft-varmeproduktion og industri (figur 1-5). I Danmark giver transport det største bidrag, idet 37 % stammer herfra.

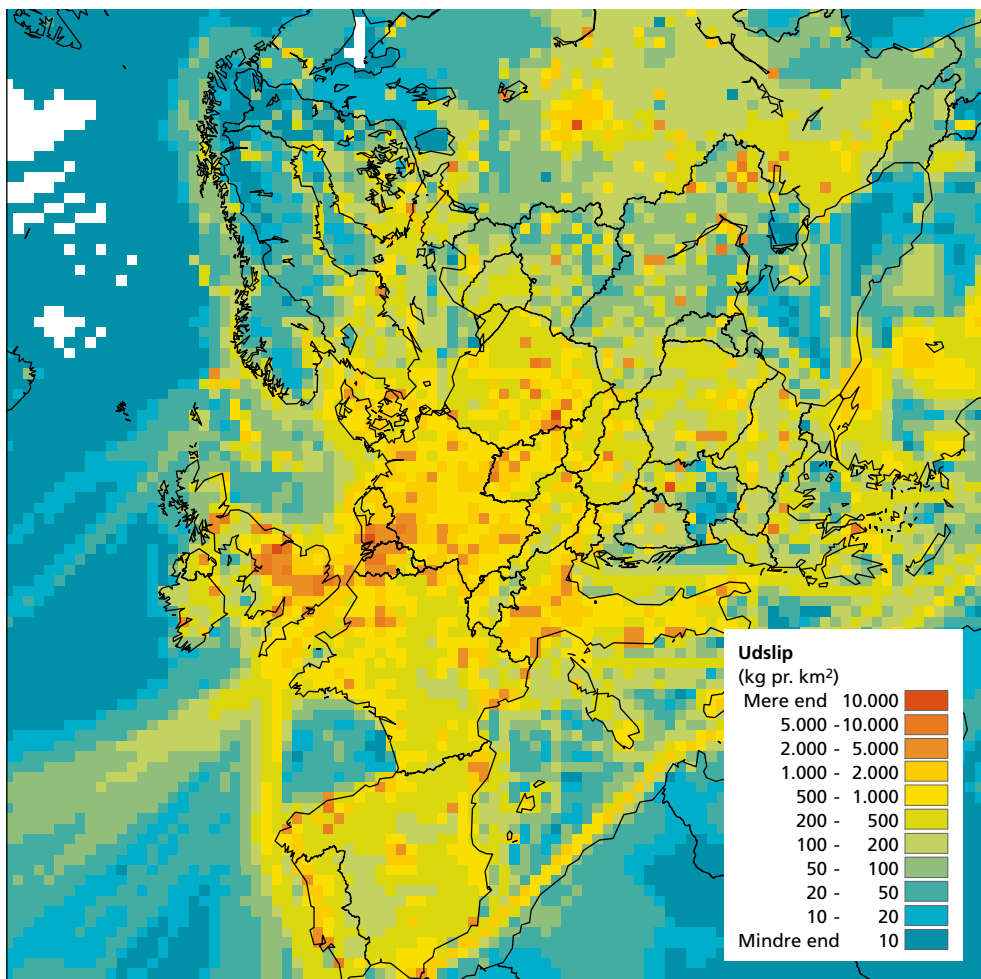
Hovedparten af udslippene fra industri og energi-/varmeproduktion sker fra høje skorstene. Derfor er koncentrationen af kvælstofoxider tæt ved disse punktkilder ofte meget lav ved jordoverfladen. Til gengæld spredes disse kvælstofoxider over store afstande, inden de afsættes. Det betyder, at danske kilder bidrager til forureningen i udlandet, og at selv kilder langt fra Danmark har betydning for afsætningen af kvælstofforbindelser i danske naturområder.

Udslippet fra trafikken sker derimod fra lav højde, og kvælstofoxiderne fra trafikken kan derfor give anledning til høje koncentrationer i luften tæt ved store veje og i byer. Dette ses navnlig i lukkede gaderum i de store byer, hvilket kan give sundhedsrisici i disse områder.

Udslip af kvælstofoxiderne fra trafik følger en fast ugentlig rytme med toppe i forbindelse med morgen- og eftermiddagsmyldretider på de almindelige ugedage og generelt lavere værdier i weekenderne (figur 2-4). Sæsonvariationen i udslippet af kvælstofoxider er derimod relativt lille, selv om kraftvarmeproduktionen toppe i vinterperioden. I skolernes sommerferie ændres trafikens rytme, og industriproduktionen sættes lidt ned.



Figur 2-4
 Døgnrytme i udslip af kvælstofoxider fra trafikken på H. C. Andersens Boulevard i København for henholdsvis en almindelig arbejdsdag og for en weekend i 2004.



Figur 2-5

Eksempel på samlet årligt udslip af kvælstofoxid i Europa i år 2000, vist i kg kvælstof pr. km². De store udslip over havet stammer fra skibstrafik. Bemærk, at kortet er drejet lidt, således at nord peger op mod øverste venstre hjørne.

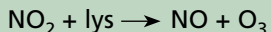
Ligesom for ammoniaks vedkommende laves der detaljerede opgørelser over udslippene af kvælstofoxider, bl.a. til brug for luftforureningsmodellerne. Et eksempel på sådan opgørelse ses på figur 2-5. Områder med store udslip skyldes typisk store byer, industriområder, skibstrafik m.m.

Udslippet af kvælstofoxider finder sted i form af en blanding af kvælstofmonoxid (NO) og kvælstofdioxid (NO₂), hvor førstnævnte typisk udgør den helt dominerende andel (90 til 95 %). I luften sker der imidlertid en relativt hurtig omdannelse. Det skal vi se nærmere på i det følgende.

Kemisk omdannelse

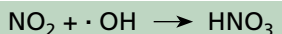
Størstedelen af de udsendte kvælstofforbindelser omdannes i kemiske reaktioner med andre stoffer i atmosfæren. Disse kemiske reaktioner forløber på vidt forskellige tidsskalaer – typisk fra brøkdele af sekunder til adskillige uger. Da vinden kan føre forbindelserne væk fra udslipsområdet inden en kemisk omdannelse kan nå at finde sted, har kun de hurtigste reaktioner betydning for forholdene tæt ved kilden.

Et eksempel på hurtige reaktioner kan man finde blandt kvælstofoxiderne, hvor kvælstofmonoxid (NO) reagerer meget hurtigt med luftens ozon (O₃) og danner kvælstofdioxid (NO₂); den reaktion forløber inden for få sekunder. Ved hjælp af sollys spaltes en del af kvælstofdioxiden igen, hvorved kvælstofmonoxid gendannes. Fordelingen mellem kvælstofmonoxid og kvælstofdioxid i luften afhænger af koncentrationen af ozon og mængden af solindstråling (lys):



I langt de fleste tilfælde er der rigeligt ozon til stede, således at hovedparten af kvælstofmonoxiden i løbet af få sekunder omdannes til kvælstofdioxid.

Kvælstofdioxid kan i luften blive omdannet videre til gasformig salpetersyre (HNO₃) ved reaktion med det såkaldte hydroxylradikal (·OH):

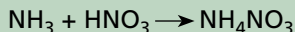


Hydroxylradikalet dannes ved, at sollyset starter en kemisk reaktion mellem luftens ozon og vanddamp.

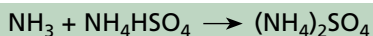
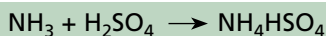
Omdannelse af kvælstofdioxid til salpetersyre er en langsom proces, hvor kun ca. 5 % af kvælstofdioxiden omdannes til salpetersyre inden for en time. Derfor har vinden transporteret hovedparten af de danske udslip af kvælstofoxider ud af landet, inden de når at blive omdannet til salpetersyre. Til gengæld modtager Danmark salpetersyre fra de omgivende lande.

Salpetersyre reagerer hurtigt med ammoniak og har samtidig stor tilbøjelighed til at klistre sig til overfladen af partikler i luften. Herved dannes partikelbundet nitratforbin-

delser. Vigtigst blandt disse er ammoniumnitrat (NH_4NO_3), men dannelse af natriumnitrat (NaNO_3) ud fra reaktion med havsalt (NaCl) spiller også en rolle:



Ammoniak reagerer også relativt hurtigt med andre gasser og med partikler i luften. Derved dannes partikelbundet ammoniumforbindelser. Den vigtigste reaktion finder sted med svovlsyre (H_2SO_4), som findes i luften i form af små partikler, og som stammer fra afbrænding af fossile brændsler. Herved dannes ammoniumbisulfat (NH_4HSO_4), der igen kan reagere med ammoniak og danne ammoniumsulfat, $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$:



Omdannelsen af ammoniak afhænger i sagens natur af mængden af sure gasser og partikler, men den kan forløbe inden for minutter til timer. Typisk vil kun en lille del derfor nå at blive omdannet helt tæt ved kilden.

Når først kvælstofforbindelserne er blevet omdannet til partikelbundet nitrat og ammonium, har de lang levetid i atmosfæren – op til en uge eller mere. Det betyder, at de kan transporteres over lang afstand – op til flere tusind kilometer.

Transport og opblanding

Transport

Lidt forenklet kan man sige, at luftforurening flytter sig med vinden. Transport og opblanding af luftforurening finder imidlertid sted på alle skalaer – lige fra små tilfældige bevægelser af enkelte molekyler over turbulens til transport styret af store vejrsystemer som fx høj- og lavtryk, der kan have en udbredelse på flere tusinde km^2 . Resultatet er derfor, at udslip af luftforurening fra en given kilde både transporteres af sted med vinden og bliver blandet op med den omgivende luft.

I sagens natur kan de kemiske forbindelser, som omdannes og afsættes langsomt (og som med andre ord lever længe i luften) transporteres over store afstande i atmosfæren. Det gælder for ammonium og nitrat bundet til luftens partikler. Som ovenfor nævnt har de en levetid på en uge eller mere, og med en typisk gennemsnitlig vindhastighed på 5 meter pr. sekund kan de derfor blive transporteret mere end 1.000 km i atmosfæren. Det forudsætter dog, at det er tørvejr. I forbindelse med nedbør vil de kemiske forbindelser hurtigt blive "vasket" ud af luften, og i disse tilfælde er transporten via atmosfæren typisk kun på 50-100 km.

Partikelbundet nitrat og ammonium hører til de kemiske forbindelser, som kan transporteres langt i atmosfæren. En stor del af det partikelbundne nitrat og ammonium, som måles i luften her i Danmark, er således transporteret hertil fra kilder i andre lande, bl.a. fra Tyskland, England og Holland.

De kemiske forbindelser, som omdannes eller afsættes hurtigt, bliver derimod kun transporteret over korte afstande og påvirker derfor fortrinsvis lokalområderne ved kilderne. For ammoniak regner man almindeligvis med en levetid i atmosfæren på 3 til 6 timer, hvilket svarer til, at stoffet kun kan nå at blive transporteret 60-120 km væk fra kilden. Tilsvarende har kvælstofdioxid en typisk levetid i atmosfæren på ca. et døgn, hvilket svarer til en typisk transport på ca. 400 km.

For både ammoniak og kvælstofdioxid gælder, at en del af det vil blive omdannet kemisk til fx partikelbundet ammonium og nitrat. Dette ændrer de kemiske egenskaber, således at kvælstoffet efter omdannelsen vil kunne blive transporteret langt via atmosfæren.

Opblanding

Forureningens opblanding med den øvrige luft sker ved turbulens, der kan opfattes som små og store hvirvler i luften. Man kan fx se disse hvirvler i røgen fra et bål eller ved bladenes flugt i efterårsvinden. Turbulens er meget effektiv til at opblande luftforurening i fx en røgfane fra en skorsten med den omgivende luft. Der er typisk meget turbulens i den nederste del af atmosfæren, som er direkte

påvirket af Jordens overflade. Dette lag kalder man grænselaget, og det når normalt op i en højde på 300-1.000 m. I grænselaget fører to forskellige processer til dannelse af turbulens og dermed opblanding af luften.

Den første af disse processer er vindens opbremsning mod overfladen, som fører til små kaotiske hvirvler, som vi kender det fra det tidligere nævnte eksempel med bladene i efterårsvinden. Opbremsningen er i sagens natur væsentligt større over en ru overflade, som fx et skovområde, end over en glat overflade, som fx en vandoverflade.

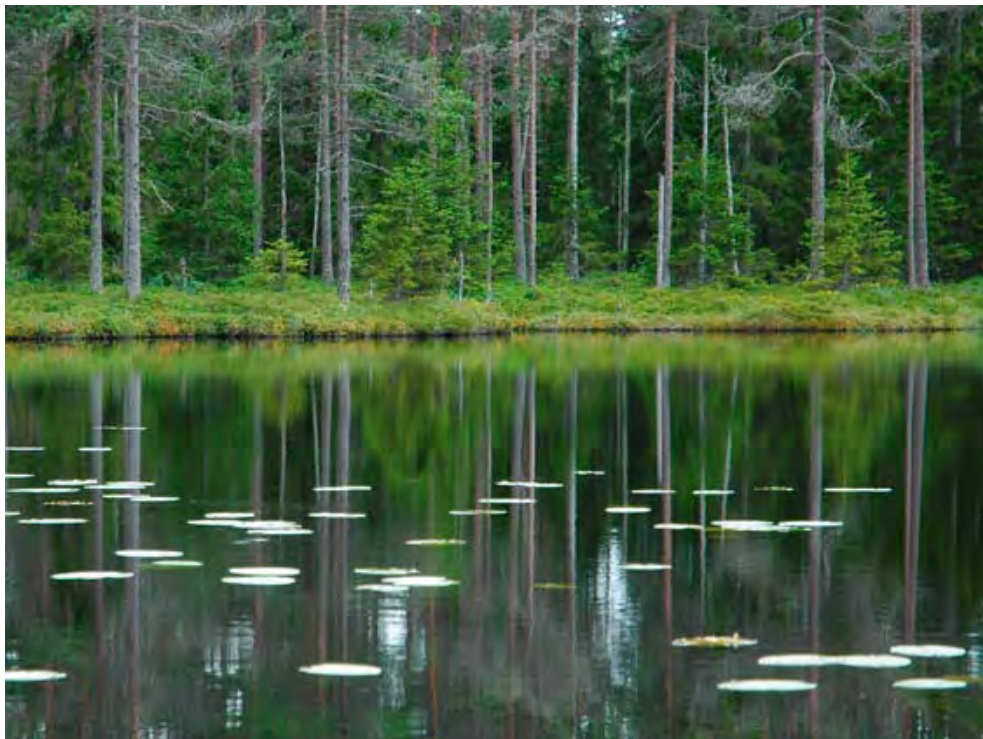
Den anden proces til dannelse af turbulens optræder, når Solen opvarmer jordoverfladen. Den opvarmede overflade vil efterfølgende opvarme den luft, som ligger umiddelbart over. Varm luft er lettere end kold luft, og derfor sker der en opstigning af den nu opvarmede luft. Kold luft synker til gengæld ned og erstatter den opstegne luft, og der opstår en såkaldt turbulenscelle af op- og nedstigende luft. Det tilsvarende fænomen kan iagttages i vand, når man koger det i en gryde. Det er i øvrigt den opstigende luft i disse turbulensceller, som svæveflyverne kan anvende på varme sommerdage til at holde sig i luften gennem længere tid.

Figur 2-6

På en varm sommerdag skabes kraftig turbulens i luften, hvilket er årsag til røgfanens svingninger.

Foto: Thomas Ellermann.





Afsætning

De biologisk aktive kvælstofforbindelser, der findes i atmosfæren, ender på et eller andet tidspunkt på en overflade (jord, planter, vand, bygninger m.m.). Det kaldes afsætning og kan foregå på to forskellige måder. Den første skyldes den direkte kontakt med overfladen (tøraftsætning), og den anden sker ved udvaskning med nedbøren (vådafsætning).

Tøraftsætning

For at en gas eller en partikel skal kunne afsættes ved tøraftsætning, skal der først ske en transport ned til selve overfladen. Denne transport sker i første omgang ved turbulente bevægelser i atmosfæren og derefter i et tyndt lag lige over overfladen ved diffusion. Tøraftsætningen afhænger derfor af vindhastighed, solopvarmning og overfladens ruhed, der alt sammen skaber turbulens.

Den endelige tøraftsætning afhænger af overfladens karakter. Over en ru overflade sker der almindeligvis en hurti-

Figur 2-7

Søen har en glat overflade hvilket giver lille ruhed. Den bagvedliggende skov bremser vinden og har en stor ruhed. Den store ruhed i skoven skaber stor turbulens, hvilket giver en stor tøraftsætning i skoven.

Foto: Maria Mikkelsen.

gere afsætning end over en glat overflade, fordi der er mere turbulens. Er der tale om en vandoverflade afhænger afsætningen i sagens natur også af forbindelsernes opløselighed i vand. Ammoniak og salpetersyre er eksempler på stoffer, som afsættes meget hurtigt pga. deres store opløselighed i vand. Er der tale om et plantedækket område, vil en del af afsætningen foregå ved optagelse gennem planternes spalteåbninger – kvælstofdioxid er et eksempel på en kvælstofforbindelse, som afsættes på denne måde.

En særlig problemstilling vedrører tørafsætningen af ammoniak. I natur- og landbrugsområder tæt ved store kilder kan indholdet af ammoniak i planterne være så stort, at planterne afgiver mere ammoniak til luften end de modtager. Om der netto sker en afsætning eller frigivelse af ammoniak afhænger af forholdet mellem luftkoncentrationen og koncentrationen i luften i planternes spalteåbninger.

Figur 2-8

Tørafsætning af kvælstof sker, når luftens gasser og partikler er i direkte kontakt med en overflade, fx en planteoverflade.

Foto: Knud Erik Nielsen.



Tørafsætning af luftens partikler afhænger endvidere meget af partiklernes størrelse. Årsagen er, at de største af partiklerne har stor nok masse til, at tyngdekraften også medvirker til afsætningen. Dette gælder navnlig for partikler med en diameter over ca. 1 μm . Endvidere kan luftfugtigheden indvirke på størrelsen af partiklerne i atmosfæren. Det gælder ikke mindst i luften over en havoverflade, hvor den fugtige luft fører til, at der afsættes vanddamp på partiklerne. Derved vokser de, og den øgede størrelse fører til en hurtigere afsætning ved tyngdekraftens indvirkning.

Vådafsætning

Gasser og især partikler i atmosfæren kan i mange tilfælde vådafsættes meget effektivt. Mange kender sikkert følelsen af, at luften virker ren umiddelbart efter en regnbyge. Denne oplevelse er ganske reel – selv ved ganske korte byger fjernes

Figur 2-9

Når det regner, sker der en vådafsætning af den kvælstof, som er optaget i regndråberne.

Foto: Peter Brandt.



en meget stor del af partiklerne og gasserne fra luften og afsættes med nedbøren på overfladen. Den hastighed, hvormed gasser og partikler vådafsættes, afhænger af:

- 1) deres opløselighed i vand,
- 2) den hastighed, hvormed de omdannes ved kemiske reaktioner i dråber og
- 3) nedbørens intensitet.

Udvaskning med nedbøren sker ved to forskellige processer. Dels ved at gasser og partikler optages i dråberne oppe i skyerne, og dels ved at de optages i dråberne, mens disse falder ned som regn. Optagelsen i skydråber er langt den vigtigste proces, fordi disse dråbers opholdstid i atmosfæren er væsentligt længere end regndråbernes. Langt de fleste skyer afgiver imidlertid ikke nedbør, men fordamper på et eller andet tidspunkt igen. Derved frigives en stor del af de forbindelser, som er optaget i skydråberne, tilbage til atmosfæren.

Kvælstofforbindelsernes skæbne i atmosfæren

I indledningen til dette kapitel blev det understreget, at alle de nævnte processer – udslip, omdannelse, transport, spredning og afsætning – forløber samtidigt og til en vis grad i konkurrence med hinanden. Det er således ikke muligt at få et overblik over kvælstofforbindelsernes skæbne i atmosfæren ved blot at betragte processerne enkeltvis – det kræver at alle de styrende processer betragtes som et hele.

Et sådant overblik er netop, hvad man forsøger at opnå inden for de danske overvågningsprogrammer. Vi vil her give nogle eksempler på forskellene i de processer, som bestemmer de forskellige kvælstofforbindelsernes skæbne i atmosfæren. En mere uddybende beskrivelse af processerne kan findes i kapitel 3.

Danske udslip af kvælstofoxider, dvs. af kvælstofmono-oxid og kvælstofdioxid, bidrager kun meget lidt til afsætningen af kvælstof til dansk natur. Kvælstofmono-oxid afsættes nemlig meget langsomt, og denne afsætning er derfor uden betydning for kvælstofbelastningen af naturen. Til gengæld omdannes kvælstofmono-oxid hurtigt til kvælstofdioxid, som kan tørafsættes på beplantningen. Denne af-

sætning sker dog relativt langsomt og har derfor kun ringe betydning for belastningen af naturen. Kvælstofdioxid omdannes i atmosfæren til salpetersyre som hurtigt tørafsættes på overfladen. Denne omdannelse til salpetersyre sker imidlertid langsomt, og derfor transporteres hovedparten af kvælstofoxiderne fra danske kilder ud af landet, inden de afsættes på overfladen.

Danske udslip af ammoniak bidrager derimod med en stor del af det kvælstof, der afsættes i vores natur. Ammoniak tørafsættes hurtigt, og udslippet sker endvidere fra lav højde. Derfor afsættes en stor del af ammoniakken tæt ved kilderne. For natur i danske landområder bidrager danske kilder således med lidt under halvdelen af den kvælstof, som afsættes fra luften. Helt tæt ved kilderne kan bidraget imidlertid være betydeligt større. Beregninger har således vist, at omkring 20 % af ammoniakudslippet fra en stald afsættes inden for en afstand af 2.500 m. Det lyder måske ikke umiddelbart af så meget, men lokale kilder kan helt dominere afsætningen af kvælstof fra luften. Tæt ved kilden kan der således være tale om en kvælstofafsætning på 50-100 kg pr. ha pr. år.

Under transporten i atmosfæren omdannes en væsentlig del af kvælstofoxiderne og ammoniakken til nitrat og ammonium. Nitrat og ammonium er bundet til små partikler, som kun meget langsomt tørafsættes på overfladen. Hvis en luftpakke med disse forbindelser ikke møder skyer og/eller nedbør, kan de transporteres over store afstande (mere end 1.000 km) i atmosfæren. En meget stor del af den nitrat og ammonium, vi måler i Danmark, er således transporteret hertil fra udlandet.

Figur 2-10
Jordens store vejsystemer kan transportere luftforureninger flere tusinde kilometer.





Måling og beregning af kvælstofafsætningen



Man skal måle en række forskellige kvælstofforbindelser, der afsættes på flere forskellige måder, for at kunne overvåge afsætning af kvælstof. Derefter skal man bruge omfattende computerberegninger for at finde ud af, hvor meget kvælstof, der bliver afsat forskellige steder. Dette er emnet for kapitel 3, hvor vi også fortæller om resultaterne af disse beregninger.

Foto: Lone R. Christensen.

En sommerdag efter regn fornemmes luften som nævnt i forrige kapitel friskere end før regnen begyndte. Luften er faktisk vasket renere. Og en del af den luftforurening, som vaskes ud, er netop de kvælstofforbindelser, der bidrager til overgødskning af naturen. Men selv om det er nemt at konstatere, at regn kan vaske kvælstofforbindelser ud af luften, er det ikke så nemt at bestemme, hvor meget kvælstof der afsættes (se kapitel 2). Det hænger bl.a. sammen med, at der også afsættes kvælstofforbindelser i tørvejr – den såkaldte tørafsætning. I dette kapitel fortæller vi om, hvordan man anvender en kombination af målinger og modelberegninger til at bestemme den atmosfæriske kvælstofafsætning på landjordens natur og i vandmiljø.

Overvågning af luftforurening

På nationalt og internationalt plan er der vedtaget en række handlingsplaner for at reducere udslippet af kvælstof til atmosfæren og virkningerne på landjordens natur og i vandmiljøet. Danmark har endvidere et overvågningsprogram for bl.a. at kunne vurdere, om tiltagene i handlingsplanerne har den ønskede virkning.

Overvågningen i Danmark begyndte allerede i slutningen af 1970'erne. I forbindelse med den første vandmiljøplan fra 1987 blev målinger af kvælstofforureningen intensiveret, og i midten af 1990'erne blev måleprogrammet udvidet med modelberegninger. I dag indgår denne overvågning i Det Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur (NOVANA).

Formålet med overvågningen er, som antyd det overfor, at følge luftforureningens udvikling. Det gøres ved at bestemme koncentrationen af de forskellige luftforureningskomponenter og ved at måle og beregne, hvor meget luftforurening, der tilføres natur- og vandområder fra atmosfæren. Samtidig øger vi vores forståelse af de processer, som bestemmer luftforureningens omfang og belastning af naturen. En stor del af overvågningsprogrammet fokuserer på problemstillingen med kvælstof, men programmet inkluderer også svovl, tungmetaller, ozon, pesticider, partikler mv.

Resultater fra overvågningsprogrammet indgår også i det store fælleseuropæiske overvågningsprogram EMEP (Cooperative programme for monitoring and evaluation of

Figur 3-1
Udstyr til overvågning af luftforurening ses i toppen af stilladset. Billedet er fra målestationen Lindet, hvor orkanen i 1999 væltede det meste af skoven.

Foto: DMU.



the long range transmission of air pollutants in Europe). EMEP blev startet i slutningen af 1970'erne med det formål at overvåge transporten af luftforurening mellem de forskellige europæiske lande.

Bestemmelse af kvælstofafsætning

Det er som nævnt ikke nogen enkel sag at bestemme den atmosfæriske afsætning af kvælstof til natur- og vandområder. Der skal måles en lang række forskellige kvælstofforbindelser, hvoraf nogle afsættes i forbindelse med nedbør, mens andre afsættes som gasser eller partikler i tørvejr (kapitel 2). Samtidig hermed skal man dække et meget stort geografisk område og tage højde for, at nogle kvælstofforbindelser kan transporteres tusinder af kilometer, mens andre kommer fra fx en lokal husdyrproduktion.

På DMU er der derfor gennem årene udviklet en strategi, som bygger på en kombination af målinger ved ni luftmålestationer (figur 3-2) og beregninger med omfattende luftforureningsmodeller.

Målingerne anvendes til at bestemme luftens indhold af kvælstof og afsætningen af de forskellige stoffer i området ved målestationerne. De fleste af målestationerne blev etableret for mere end 15 år siden, og man kan derfor i dag vur-



Figur 3-2
Målestationerne i det såkaldte Baggrundsovervågningsprogram er placeret i danske baggrundsområder, fx i et skovområde, på en hede eller på en lille ø som Anholt. Herved minimeres risikoen for, at målingerne er alt for påvirket af en enkelt kilde tæt på målestationen.

dere, om der i løbet af årene er sket ændringer i kvælstofforureningen som følge af de handlingsplaner, der skulle reducere kvælstofudslippene.

Målingerne er derfor uhyre nyttige, men i mange tilfælde fortæller de kun noget om området ved den enkelte målestation. Vil man vide noget om situationen på kommuneplan, landsplan eller evt. for bestemte farvandsområder, må man regne sig frem ved hjælp af luftforureningsmodeller. Det er matematiske modeller af de processer, som finder sted i atmosfæren, og med dem kan man beregne udvekslingen af kvælstof mellem luften og de forskellige natur- og vandområder, der er dækket af modellen.

Modelberegningerne kan også anvendes til at forstå de fysiske og kemiske processer, som påvirker størrelsen af kvælstofafsætningen. Endelig kan man bestemme de forskellige kilders indflydelse. Man kan fx "slukke" for alle de danske kilder; ændringen i kvælstofafsætningen angiver så den del af luftforureningen, som stammer fra danske kilder.

Modelberegningernes resultater sammenlignes løbende med måleresultater for at kvalitetssikre modelberegningerne og for herved at kunne bestemme usikkerheden på resultaterne.

Målemetoder

Kvælstofafsætningen er summen af våd- og tørafsætning af mere end fem forskellige former for kvælstof (se kapitel 2). Det er endnu ikke muligt at bestemme den totale kvælstofafsætning med én enkelt metode, og derfor anvendes en række forskellige metoder.

Vådafsætningen af kvælstof – hovedsageligt som ammonium og nitrat – måles ved hjælp af en simpel nedbørsopsamler (figur 3-3), som opsamler regnvand og evt. sne igennem en 14-dages periode. I laboratoriet måles koncentrationen af ammonium og nitrat, og nedbørsmængden bestemmes ved vejning af det opsamlede regnvand. På baggrund af disse to sæt oplysninger kan man beregne vådafsætningen af ammonium og nitrat.

Koncentrationen af ammonium og nitrat er lav; nedbørsprøverne indeholder i gennemsnit kun ca. 1-2 mg kvælstof pr. liter regnvand, og det er vigtigt at undgå, at prøverne bliver forurenede. Et hyppigt problem er forurening af prø-



Figur 3-3

Nedbørsopsamleren består af en tragt med en diameter på 20 cm. Regn eller sne falder ned i tragten og ledes videre til en opsamlingsflaske. To gange om måneden skiftes flasken, som sendes til DMU's laboratorium til analyse for nitrat og ammonium.

Foto: Thomas Ellermann.

Figur 3-4

Luftens indhold af ammoniak, salpetersyre og kvælstof bundet til partikler opsamles ved hjælp af den såkaldte filterpack-opsamler med tre forskellige filtre.

Foto: Lone R. Christensen.

verne med fugleklatter, som indeholder meget kvælstof. Disse prøver sorteres fra i forbindelse med kvalitetssikringen for at undgå fejlagtige resultater.

Tøraftsætningen derimod kan kun måles direkte ved anvendelse af meget komplicerede metoder, som endnu ikke kan bruges rutinemæssigt. I stedet måles koncentration af de forskellige kvælstofkomponenter i atmosfæren. På basis af koncentrationerne, vejret og en såkaldt tøraftsætningshastighed kan man herefter beregne tøraftsætningen. Tøraftsætningshastigheden angiver, hvor hurtigt en given kemisk forbindelse afsættes, og den bestemmes på baggrund af avancerede feltmålinger. Hastigheden afhænger af den kemiske forbindelses fysiske og kemiske egenskaber.

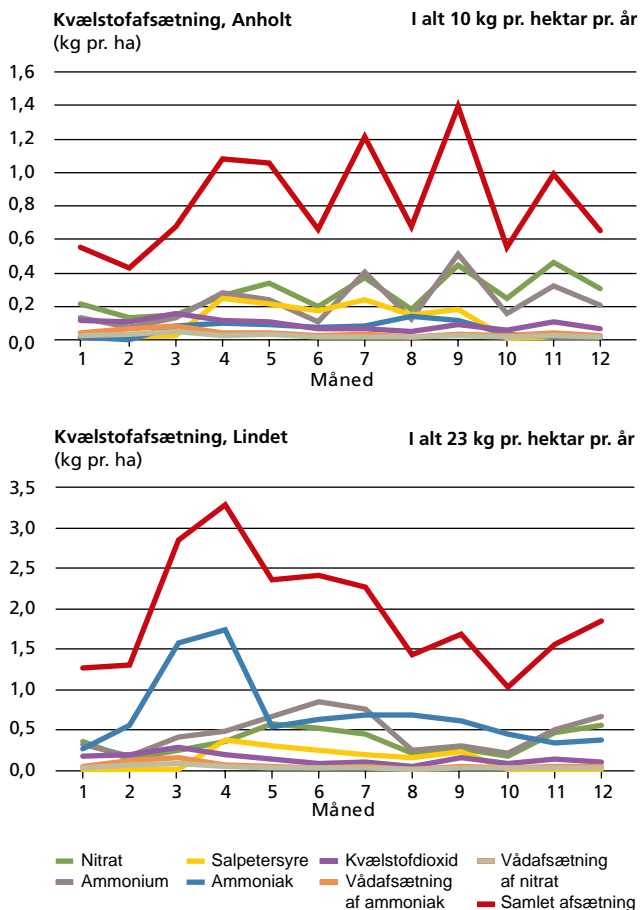
DMU anvender en lang række metoder til bestemmelse af luftens kvælstofindhold, hvoraf den vigtigste er den såkaldte filterpack-opsamler (figur 3-4). Denne består af en filterholder, hvori der sidder en række filtre. Når luften suges gennem filtrene, bliver partiklerne opsamlet på det første filter, mens luftens gasser passerer. Det næste filter er overfladebehandlet med base, så det binder gasformig salpetersyre. Det sidste filter er overfladebehandlet med syre, så det binder luftens ammoniak.

Figur 3-5

Afsætning af kvælstof består af syv forskellige komponenter: vådafsætning af ammonium og nitrat, tøraftsætning af salpetersyre, kvælstofdioxid og ammoniak samt tøraftsætning af partikulært bundet ammonium og nitrat. Kurverne viser den månedlige afsætning i 2003 ved Anholt (øverst) og Lindet (nederst). Anholt ligger langt fra kilderne, hvilket giver en lav afsætning med lille bidrag fra ammoniak. Lindet er placeret i et landbrugsområde, hvilket giver højt bidrag fra ammoniak; navnlig om foråret, når husdyrgødningen bringes ud på markerne. Den høje afsætning ved Lindet skyldes også store nedbørmængder. Bemærk forskellen på værdierne i den lodrette akse på de to figurer.

I løbet af et døgn suges 58 m^3 luft gennem filtrene, hvorefter de fjernes og analyseres for hver deres indhold af kvælstofforbindelser. Derved kan man bestemme luftens indhold af partikulært bundet ammonium og gasformigt ammoniak samt summen af partikulært bundet nitrat og salpetersyre.

Ved at lægge de enkelte bidrag sammen, får man den samlede afsætning af kvælstofforbindelser. Dette er illustreret i figur 3-5, som viser kvælstofafsætningen ved Lindet i Sønderjylland og på Anholt. Ved Lindet har man bestemt den samlede afsætning til at være på ca. 23 kg kvælstof pr. ha. Anholt er med sin placering midt i Kattegat langt fra stort set alle kvælstofkilder, hvilket giver en betydeligt lavere kvælstofafsætning på ca. 10 kg pr. ha.

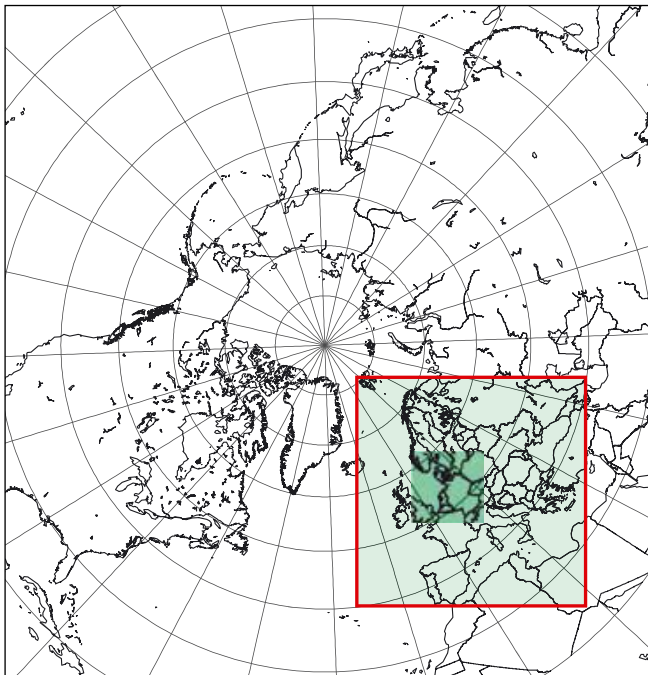


Beregninger

Overvågningsprogrammets beregninger af den luftbårne kvælstofforurening skal både dække store områder, fx hele Kattegat, og små områder, fx en hede eller en lille højmosé. Dette kan ikke lade sig gøre med én model, idet regnetiden ville blive alt for lang. Derfor anvendes i stedet for to modeller, som kan kobles sammen, så beregningsresultater fra den store skala anvendes som udgangspunkt for beregningerne på lokal skala.

Beregninger på stor skala

Den første model, kaldet DEHM, dækker hele det nordeuropæiske område (figur 3-6). Princippet er, at man beregner koncentrationen og afsætningen af kvælstofforbindelser i et stort antal gitterceller. Ved beregninger af kvælstofafsætningen i Danmark er der i det vandrette plan 96×96 celler med en kantlængde på 17 km. Tilsammen dækker de et område på 1.600×1.600 km placeret med Danmark i midten. I det lodrette plan er der 20 lag af sådanne celler, som tilsammen dækker de nederste 15 km af atmosfæren over Europa.



Figur 3-6

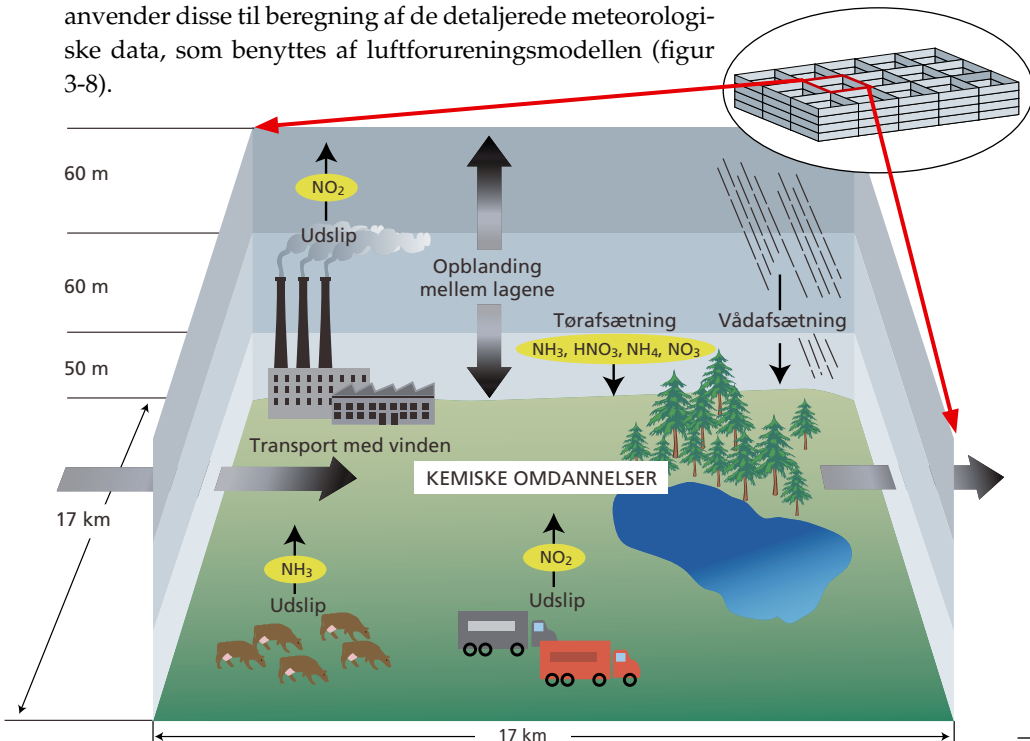
Hele det viste område (sort ramme) indgår ved beregninger med modellen DEHM. Man kan også zoome ind og få resultater med større geografisk opløsning for Europa eller Danmark. For Europa (rød ramme) laves beregningerne med en geografisk opløsning på 50×50 km og for Danmark og omegn (mørkere grønt område) med en geografisk opløsning på 17×17 km.

Til beregningerne kræves ikke alene en stor model, men også gigabites af data. En af årsagerne er, at det er nødvendigt at inddrage et meget stort geografisk område i beregningerne, fordi nogle af de kvælstofholdige partikler kan transporteres mere end 1.000 km, før de afsættes.

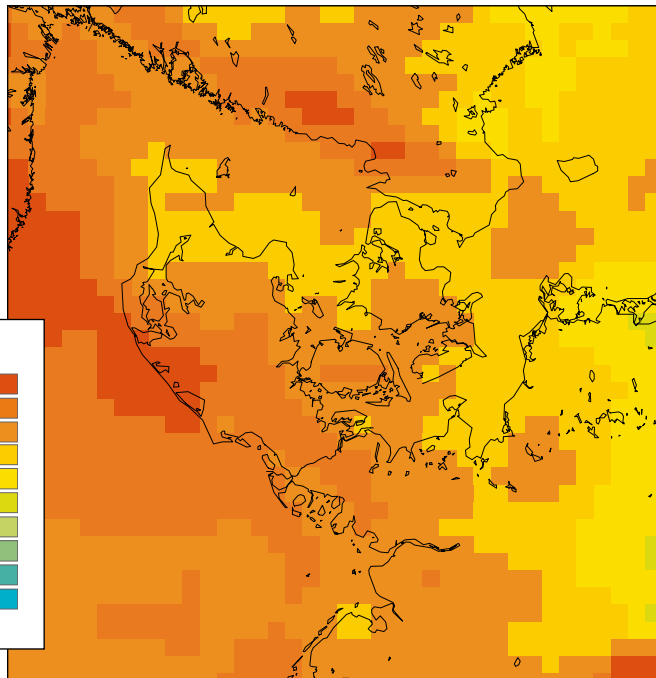
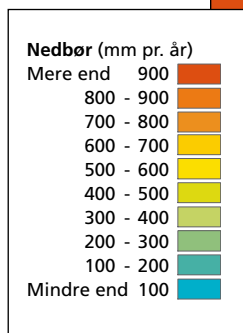
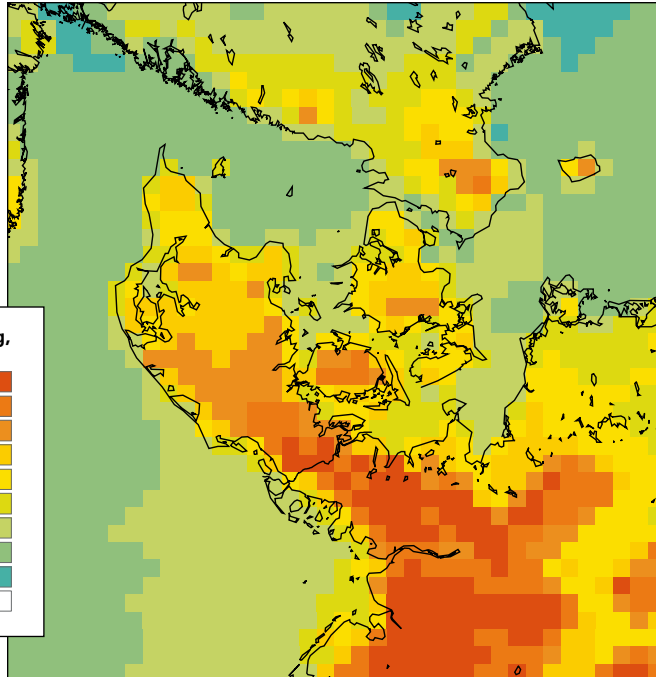
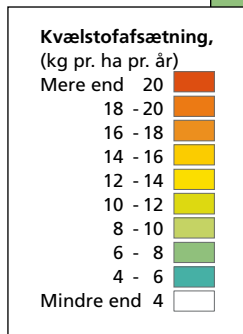
For at modellen kan "køre", skal den have informationer om udslippet af luftforureningen fra alle lande i modelområdet (se figur 3-7). Opgørelser af udslip fra kilderne skal ud over kvælstof også dække alle de andre kemiske forbindelser, som påvirker den kemiske omsætning af kvælstof i atmosfæren (svovl, kulbrinter m.m.). Udslippene skal endvidere være fordelt geografisk og tidsmæssigt.

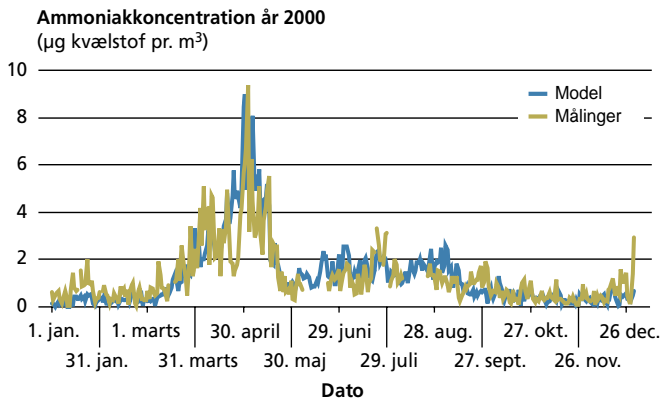
Og så skal modellen fodres med oplysninger om de meteorologiske forhold, dvs. hvordan luftmasserne bevæger sig, hvor varmt det er, hvor meget Solen skinner, hvor og hvor meget det regner. Alle disse informationer beregnes på DMU ved hjælp af en selvstændig meteorologimodel, kaldet MMS. Fra USA downloades dagligt informationer om de globale meteorologiske forhold. MMS-modellen anvender disse til beregning af de detaljerede meteorologiske data, som benyttes af luftforureningsmodellen (figur 3-8).

Figur 3-8
For hver enkelt modelcelle beregner modellen den ændring i de forskellige kvælstoffers koncentration, der indtræder som følge af udslip fra kilderne, transport med vinden, opblanding mellem lagene, kemisk omdannelse samt tør- og vådafsætning.



Figur 3-9
Afsætning af kvælstof i
år 2004 (øverst) sammen-
lignet med nedbør for
det samme år (nederst).




Figur 3-10

Sammenligning mellem beregnede og målte ammoniakkoncentrationer ved målestationen i Tange i år 2000. De høje koncentrationer i luften i forårsperioden skyldes udbringning af handels- og husdyrgødning, hvilket giver anledning til betydelige udslip af ammoniak til luften.

Kortet på figur 3-9 viser fordelingen af den årlige kvælstofafsætning til de danske landområder. Der ses en markant større kvælstofafsætning i de centrale dele af Jylland end i den øvrige del af landet. Det skyldes, at der er større husdyrproduktion og mere regn end i resten af landet. Den større husdyrproduktion giver mere ammoniak (se figur 2-2), og den større nedbør fører til større vådafsætning af ammoniak og nitrat.

Et vigtigt aspekt af arbejdet med modeller er, at man hele tiden vurderer kvaliteten af beregningsresultaterne. Derfor laves der ofte sammenligning mellem måleresultater og modelresultater. Figur 3-10 viser et eksempel på en sammenligning mellem målinger og modelberegninger af ammoniakkoncentrationen ved målestationen i Tange. Det er imidlertid ikke altid, at man finder en så god overensstemmelse som i dette tilfælde.

Generelt vurderes usikkerheden på den samlede årlige afsætning af kvælstof til at være på 30-50 %. Det kan forekomme at være en temmelig stor usikkerhed, men modellen er baseret på udslipberegninger for hele Europa, som ofte har en usikkerhed af samme størrelsesorden.

Beregninger på lille skala

Beregningerne på stor skala giver som nævnt gennemsnitsværdier for kvælstofafsætningen opdelt i felter på 17 × 17 km; dvs. for felter på små 300 km². Det er ikke detaljeret nok til at beskrive den afsætning, som vores forskellige naturområder modtager. I Danmark er mange naturområder be-

liggende spredt i landbrugslandet og ofte er de små. DMU har derfor udviklet en lokal-skala-model, kaldet OML-DEP, specielt designet til at lave beregninger på felter helt ned til 1 ha.

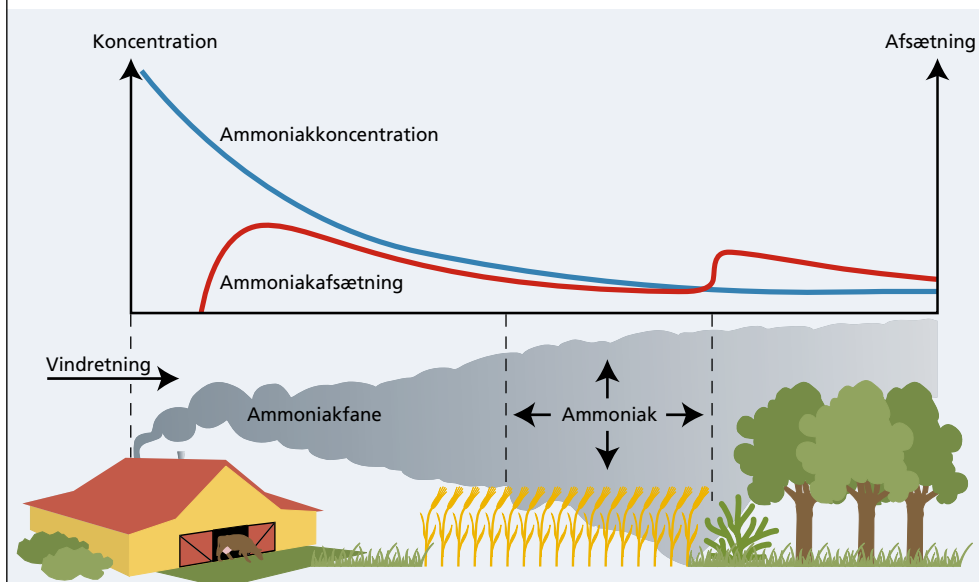
Hovedparten af kvælstofforbindelserne er rimelig jævnt fordelt i de forskellige egne af landet. Disse bliver derfor tilstrækkeligt godt beregnet med stor-skala-modellen. Ammoniakafsætningen derimod viser en meget stor geografisk variation som følge af de lokale variationer i landbrugsproduktionen (se figur 3-9). Lokal-skala-modellen beregner derfor kun afsætningen af ammoniak, mens afsætningen af de øvrige komponenter hentes fra stor-skala-modellen.

Lokal-skala-modellen er en såkaldt røgfane-model (figur 3-11). Beregningsområdet inddeles i felter, og for hver kilde i området (dvs. hver stald, gyllebeholder, mark m.m.) beregnes, hvordan en "røgfane" af ammoniak spredes med vinden, og hvordan ammoniakken afsættes i forskellig afstand fra kilden. Til sidst opsummeres bidragene fra de forskellige ammoniak-kilder og hertil lægges afsætningen fra de øvrige kvælstofkilder (beregnet med stor-skala-modellen).

Denne model kræver inputdata på samme måde som stor-skala-modellen og en meget detaljeret opgørelse over

Figur 3-11

Lokal-skala-modellen er en såkaldt røgfane-model, som beregner, hvordan en luftmasse spredes med vinden. Bemærk, at afsætningen på skoven er højere end på marken, fordi skoven har større ruhed end marken.





Figur 3-12

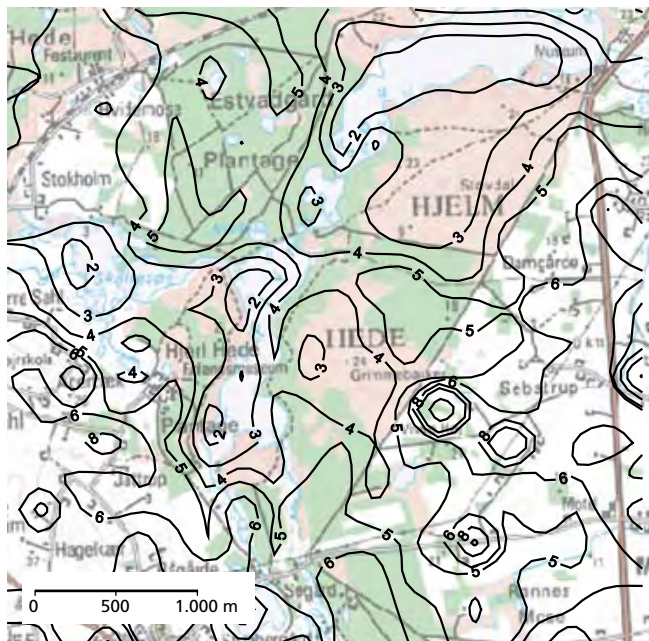
Omgivelserne omkring en kilde spiller en stor rolle for afsætning af ammoniak på lokal-skala.

Foto: Ole Malling.

Figur 3-13

Afsætning af ammoniak på og omkring Hjem Hede beregnet med lokal-skalamodellen vist ved hjælp af kurver, der forbinder punkter med samme afsætning. Afsætningen af ammoniak er stor omkring de enkelte stalde, hvor den kan komme op på over 20 kg kvælstof pr. ha. På selve hedeområderne er afsætningen på 2-5 kg kvælstof pr. ha. Grøn og rød farve viser henholdsvis skov og hede, blå farve angiver vandområder.

Baggrundskortet: © Kort- og Matrikelstyrelsen.



udslip fordelt på gitterfelter på 100×100 m med information om sæsonfordeling, kildehøjde, bygningsstørrelse m.m.

Modellen kan også tage højde for, hvorledes forskellige typer af overflade skaber turbulens i luften og dermed påvirker kvælstofafsætningen. Dette gøres på basis af information fra en detaljeret database over landskabets udnyttelse, hvor hele Danmark er inddelt efter anvendelsen (skov, by, spredt bebyggelse, landbrugsjord m.m.).

Figur 3-13 viser et eksempel på en beregning af ammoniakafsætningen på og omkring et hedeområde i Jylland.

Hvor meget kvælstof kommer der, og hvor kommer det fra?

Resultaterne fra overvågningsprogrammerne viser, at det er betragtelige mængder kvælstof, som fra atmosfæren tilføres de danske land- og vandområder. I 2005 var afsætningen på ca. 7,4 kg kvælstof pr. ha årligt på havområder og ca. 15 kg pr. ha på landområder.

Dette bliver til en samlet afsætning på 70-80.000 og 65-75.000 tons kvælstof på henholdsvis de samlede hav- og landområder. Til sammenligning havde Danmark et udslip

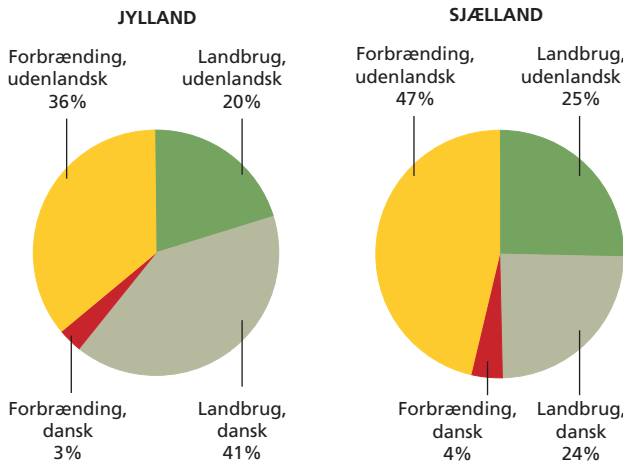
beregnet til 136.000 tons kvælstof i 2004. Det danske udslip er altså på størrelse med afsætningen, når kvælstofafsætning til såvel de danske farvande (samlet areal 103.000 km²) som de danske landområder (areal 43.000 km²) tages med i betragtning.

For at sætte kvælstofafsætningen i Danmark lidt i relief kan vi zoome ud og sammenligne med tilsvarende resultater fra andre dele af Europa. Tabel 3-1 viser kvælstofafsætningen på land i de 20 europæiske lande, hvor der afsættes mest kvælstof pr. ha. Med en tiendeplads ligger Danmark blandt de europæiske lande, hvor der afsættes mest kvælstof. Benelux-landene og Tyskland har en særlig stor afsætning af kvælstof. Det skyldes først og fremmest, at der er et stort udslip af kvælstof i denne del af Europa, og at en stor del af dette er ammoniak, som netop afsættes i kildelandet eller tæt på dette.

Ved at kombinere resultater fra målingerne og modelberegningerne kan man få et rimelig godt billede af, hvor det afsatte kvælstof stammer fra. Ved at slukke for de danske kilder i modellen kan man beregne, hvor stor en del af luftforureningen, der kommer fra vores egne kilder. Samtidig stammer stort set alle ammoniakforbindelser fra landbruget, mens stort set alle kvælstofoxider stammer fra forbrændingsprocesser (biler, el- og varmeproduktion, industri m. m.). Derfor kan man lave en rimelig detaljeret opsplitning af kilderne til kvælstofafsætning i Danmark.

Land	Afsætning (kg pr. ha)
Holland	26
Belgien	25
Tyskland	21
Luxemborg	18
Schweiz	17
Tjekkiet	16
Østrig	15
Danmark	15
Slovenien	14
Frankrig	14
Italien	13
Polen	13
Kroatien	13
Slovakiet	11
Bosnien og Hercegovina	11
Storbritanien	11
Ungarn	11
Serbien og Montenegro	10
Bulgarien	10
Rumænien	10

Tabel 3-1
De 20 europæiske lande, hvor der afsættes mest kvælstof fra atmosfæren pr. arealenhed.



Figur 3-14
Den beregnede gennemsnitlige kvælstofafsætning i Jylland og på Sjælland fordelt på hhv. danske/udenlandske landbrug og forbrændingsprocesser. De viste tal gælder for år 2005.

Ud fra lagkagediagrammet for Jylland (figur 3-14) kan man se, at ca. 41 % af kvælstofafsætningen stammer fra dansk landbrug, ca. 20 % fra udenlandsk landbrug og resten fra forbrændingsprocesser. Ud af den samlede afsætning i Jylland er danske kilder årsag til ca. 44 %. På Sjælland, hvor der er en mindre husdyrproduktion og mere trafik end i Jylland, stammer ca. 49 % af kvælstofafsætningen fra landbrug. Samtidig hermed er den danske andel af den samlede afsætning kun på ca. 28 %.

Ovenstående tal angiver den gennemsnitlige kildefordeling for henholdsvis Jylland og Sjælland. På lokalt plan kan udslip fra fx husdyrproduktion forøge bidrag fra dansk landbrug således, at det vil kunne udgøre mere end halvdelen af den samlede afsætning af kvælstof.

Det udenlandske bidrag udgør altså over halvdelen af kvælstofafsætningen. EMEP har beregnet de enkelte landes bidrag til kvælstofafsætning i Danmark. Ud over vort eget store bidrag er det især de store lande mod syd og vest, nemlig Tyskland, Storbritannien og Frankrig, som bidrager. Holland og Belgien, der er små lande med store udslip, bidrager også væsentligt.

Kvælstofafsætningen på danske natur- og vandområder er altså målt i absolutte tal stor, men hvor stor er afsætningen sammenlignet med bidraget fra andre kvælstofkilder?

For mange af de terrestriske naturområder, dvs. dem der er knyttet til landområderne, er bidraget fra atmosfæren størst, og for højmosernes vedkommende er atmosfæren den eneste kilde til kvælstof. For en række naturområder spiller kvælstof fra tilstrømmende overfladevand og grundvand dog også en rolle. Dette gælder typisk for de naturområder, som ligger lavt i forhold til det omkringliggende landskab.

For de danske vandområder og de naturområder, som er knyttet hertil, er vurderingen mere kompliceret. For søer og vandløb spiller afsætning fra luften en ringe rolle; primært fordi søer og vandløb ofte har en relativt lille overflade, sammenlignet med overfladen af det omkringliggende landskab. Dette giver en lille atmosfærisk afsætning sammenlignet med de betydelige mængder kvælstof, som søer og vandløb oftest modtager fra overfladeafstrømning, dræn og direkte udløb.

De danske farvande modtager kvælstof på tre forskellige måder: fra *landområder* via vandløb og spildevand, fra *luften* og endelig fra *havstrømme*, der fører kvælstoffet frem fra tilgrænsende farvande. Resultater fra danske overvågningsprogrammer og en række forskningsprojekter har vist, at selv om der transporteres store mængder kvælstof frem og tilbage mellem de enkelte farvandsområder, så udgør afsætning fra luften en væsentlig del af tilførslen af kvælstof til de danske farvande. Disse forhold uddybes nærmere i det kommende kapitel.

Fig 3-15

Vandløb er en af de tre hovedveje, kvælstof transporteres ad til de danske farvande. Her vises Varde Å's udløb til Ho Bugt.

Foto: Ole Malling.





Virkninger på vandmiljøet og danske naturområder

I nogle, men ikke alle naturtyper griber den luftbårne kvælstof-forurening afgørende ind i de økologiske balancer. Det er især konkurrenceforholdet mellem forskellige plantearter, der påvirkes. Denne påvirkning belyses nærmere i dette kapitel, hvor bl.a. de åbne farvande og hederne er i fokus.

Foto: Ole Malling.

Farvand	Oplands- areal (km ²)	Overfladeareal af farvand (km ²)	Samlet tilførsel af kvælstof (tons pr. år)	Kvælstof fra atmosfærisk afsætning (%)
Skive Fjord	913	38	1.300	4
Limfjorden	7.553	1.526	19.800	10
Kattegat	73.271	22.710	97.700	34

transportmåder er som nævnt side 51, 1) afstrømningen af ferskvand fra land, 2) afsætningen af kvælstofforbindelser fra luften samt 3) tilførsler med havstrømme fra tilgrænsende farvandsområder. Forholdet mellem de to første bidrag bestemmes især af arealet af det opland, hvorfra der tilføres ferskvand, men også af farvandets overfladeareal. En række andre forhold spiller naturligvis også ind, fx oplandets jordbundstype, jordens næringsindhold, tilstedeværelsen af intensivt landbrug, afstanden til områder med store udslip af kvælstof, fx Tyskland og Holland, m.m. Imidlertid ses betydningen af forholdet mellem farvands- og oplandsarealerne klart, når man sammenligner belastningen af de helt kystnære farvande med de mere åbne (tabel 4-1).

Skive Fjord er et typisk eksempel på en dansk fjord, hvor kvælstof tilført med afstrømningen af ferskvand er helt dominerende (96 %). Fjordens oplandsareal er meget stort sammenholdt med farvandets eget overfladeareal. I modsætning hertil bidrager afsætning fra atmosfæren med omkring 34 % af den samlede tilførsel af kvælstof til Kattegat, som har et relativt stort areal sammenholdt med oplandets areal.

Tallene i tabel 4-1 angiver de totale kvælstoftilførslers størrelse over et helt år. Den relative betydning af den atmosfæriske afsætning er størst i sommerhalvåret. Det skyldes primært et lille bidrag fra afstrømningen på denne årstid, hvor nedbørsmængderne er små og fordampningen er stor. For Kattegats vedkommende kan den atmosfæriske tilførsel i juli måned komme op på 60 % af den samlede tilførsel.

I tillæg til bidragene med afstrømning fra vandløb, afsætning fra atmosfæren og transporten med havstrømmene, er der yderligere en kilde til kvælstof i havet nemlig cyanobakterier. Disse er i stand til at binde luftens frie

Tabel 4-1

**Den atmosfæriske kvælstof-
afsætnings andel af den samlede tilførsel ved afstrømning og atmosfærisk afsætning af kvælstof til Skive Fjord, hele Limfjorden og Kattegat. Tallene angiver totaler for et helt år, bestemt som et gennemsnit for en ca. 15-årig periode. I disse tal er der ikke medregnet transport med havstrømme.**

Kilde: DMU.

kvælstof (N_2) og omdanne det til ammoniak, som de derefter kan anvende i deres vækst. Dette bidrag til kvælstof i havet er endnu ikke velbeskrevet, men det menes at være vigtigt, specielt i sommerperioden hvor tilførslen med afstrømning fra vandløbene er lille. Cyanobakteriernes bidrag til kvælstoftilførslerne i havet varierer geografisk, idet de foretrækker brakt vand og dermed hovedsagligt findes i den vestlige del af Østersøen og Bælthavet. Desuden er der store år-til-år-variationer i forekomsterne af cyanobakterier, der kan knyttes til variationer i vejrforholdene.

Hovedparten af atmosfærens bidrag med kvælstof afsættes i form af ammonium og nitrat. En lille del afsættes dog bundet til organiske forbindelser. Alger foretrækker generelt at optage kvælstof i form af ammonium, men de skifter hurtigt til at optage nitrat, hvis ammonium ikke er til stede. Sker optagelsen i form af nitrat, skal algerne bruge energi på en omdannelse, før kvælstoffet kan anvendes i



Boks 1

Biotilgængelighed af kvælstof i havet

I havet optræder kvælstof dels i form af uorganiske forbindelser, især ammonium og nitrat, og dels i form af kvælstof bundet til organiske stoffer. Kvælstof på gasform, N_2 , holdes helt udenfor, da det ikke spiller nogen rolle i denne sammenhæng.

De organiske forbindelser spænder fra meget simple stoffer med ganske få kulstofatomer, fx aminosyrer og urinstof (urea), til store og meget komplekse molekyler af humusstoffer med tusindvis af kulstofatomer. Alger, som dem på de to fotos, kan umiddelbart optage uorganiske og simple organiske forbindelser, mens de ikke kan optage komplekse organiske forbindelser og dermed heller ikke kvælstof bundet til disse.

Over lang tid nedbrydes de store molekyler af lys og bakterier, og dermed frigives bl.a. det bundne kvælstof, som derefter kan optages af algerne. Denne proces er imidlertid så langsom, at kun en lille del af det kvælstof, som findes i havet, indgår i den biologiske omsætning.

væksten. Dette energiforbrug er imidlertid lille set i forhold til, hvad der ellers bruges på vækst. Den helt overvejende del af atmosfærens bidrag med kvælstof er således direkte anvendelig for planterne, og man siger, at biotilgængeligheden er 100 % (se boks 1).

Havområderne er forbundne, og derfor sker der en stor udveksling af vand, salte og andre stoffer mellem dem. De indre danske farvande modtager fx årligt i snit omkring 1.000 km³ vand fra Østersøen og 4.000 km³ vand fra Skagerrak. Hovedparten – 4.500 km³ vand – strømmer tilbage til Skagerrak, mens 500 km³ vand strømmer ind i Østersøen. Med de store vandmængder følger også store mængder kvælstof, og i et totalt budget for kvælstof må man derfor medregne disse tilførsler.

For de indre danske farvande udgør den atmosfæriske afsætning kun ca. 7 % af den samlede tilførsel af kvælstof. Den beskedne andel skyldes netop de store tilførsler af kvælstof med vandmasserne fra Østersøen og Skagerrak.

Figur 4-2

Høje koncentrationer af humusforbindelser farver vandet brunt. Billedet er fra Østersøen ud for Finland.

Foto: Stiig Markager.

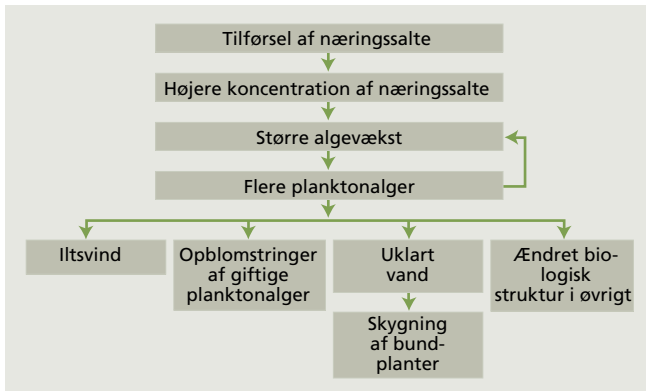


En stor del af dette kvælstof indgår imidlertid ikke i den biologiske omsætning og er derfor uden betydning for miljøtilstanden. Således er 87 % af kvælstoffet i vandmasserne fra Østersøen bundet i humusforbindelser. En del af tilførslen fra Skagerrak er endvidere kvælstof, som kommer fra Kattegat og nu transporteres tilbage igen. Hvis man korregerer for denne transport og tager hensyn til de forskellige bidrags biotilgængelighed, får man et ganske anderledes budget for kvælstoffet i de indre danske farvande. I dette budget udgør de atmosfæriske bidrag således 18 % af den samlede tilførsel med kvælstof.

Kvælstof fra luften spiller kun en lille rolle for de fleste ferske områder (undtagelsen er de kvælstoffattige lobeliesøer). De danske vandløb og søer tilføres almindeligvis så store mængder kvælstof gennem overfladeafstrømningen fra bl.a. markerne, at den atmosfæriske afsætning normalt er uden eller i det mindste af meget begrænset betydning for miljøtilstanden. Endvidere er tilførslen af fosfor almindeligvis den begrænsende faktor for plantevæksten i de danske ferskvandsområder, så i ferskvand er kvælstoftilførslen derfor generelt af mindre betydning for økosystemerne, uanset hvor den kommer fra. I nogle søer, hvor vandets opholdstid er lang og tilførslen af kvælstof begrænset, kan plantevæksten dog være kvælstofbegrænset i kortere eller længere dele af vækstsæsonen. Desuden kan høje kvælstofkoncentrationer påvirke udbredelsen af undervandsplanter i søer i negativ retning.

I gennemsnit regner man med, at mindre end 20 % af den samlede tilførsel af kvælstof til søerne kommer fra atmosfæren, og at bidraget er betydeligt mindre for vandløbenes vedkommende. For enkelte danske søer kan afsætning af kvælstof dog potentielt udgøre et problem. Det gælder fx søer, som ligger omgivet af skov og næringsfattige jorde. Eksempler er søer i området syd for Silkeborg og bl.a. Esrum Sø i Nordsjælland. Vandet i Esrum sø har en lang opholdstid, og søen har samtidig et stort overfladeareal set i forhold til oplandet.

Uden for Danmark kan man finde helt anderledes forhold, hvor den atmosfæriske afsætning af kvælstof kan være meget væsentlig for de ferske vande. Et eksempel er de arktiske områder i det nordlige Canada, hvor afsætningen af kvælstof fra atmosfæren udgør et stort miljøproblem.



Figur 4-3
Virkningerne af kvælstof- og fosfortilførsel til havet.

Søerne i disse områder er stærkt følsomme over for tilførsler af kvælstof. Samtidig er de fra naturens side ekstremt næringsfattige på grund af jordbunden i området.

Virkningerne

Kvælstofforbindelserne er naturligt forekommende i havet, hvor det er næringsstof for havets planter. Tilføres det i for store mængder, kan det imidlertid have en række negative virkninger, som under ét betegnes eutrofiering.

I havet er de dominerende planter fritsvævende mikroskopiske alger, som også kaldes planktonalger. Planktonalger kan vokse meget hurtigt – nogen af arterne kan fordoble deres antal i løbet af en enkelt dag, hvis der ellers er nok lys og kvælstof og fosfor til rådighed. I den øverste del af havet er der rigeligt med lys, og her vokser planktonalgerne derfor, indtil der ikke er mere næring i vandet. En øget tilførsel af næring betyder derfor en øget produktion af planktonalger.

Eutrofiering har en række negative virkninger. For havområderne er disse skitseret i figur 4-3 og omfatter:

- Uklart vand
- Iltsvind
- Masseforekomst af giftige eller på anden måde generende alger
- Ændringer i havets biologiske struktur

Er der mange alger i vandet, bliver det uklart og ændrer farve til grønlig, grålig eller brune nuancer. Det er ikke alene algerne, men også diverse opløste stoffer – bl.a. fra



Figur 4-4

Fra iltsvindet i Kattegat 2002. Fladfisk, sandkutlinger m.m. er bukket under og skyllet op på stranden.

Foto: Bent Lauge Madsen.

nedbrydning af døde alger – som gør vandet uklart og farvet. Uklart vand, hvor lyset ikke kan trænge ret langt ned, kan have alvorlige konsekvenser for de store bundplanter, som er afhængige af lys til fotosyntesen.

Iltsvind, som velnok er den mest kendte virkning af eutrofiering, er behandlet indgående i MiljøBiblioteket bind 4, Iltsvind (se litteraturlisten), og vi skal her blot berøre emnet ganske kort. Fænomenet forekommer både på lavt vand i fx fjorde og på dybere vand som fx i Kattegat og Bælthavet. Det opstår almindeligvis i sensommeren og om efteråret. Når algerne dør, synker de ned til bunden og nedbrydes under forbrug af ilt. Specielt i stille vejr vil forbruget af ilt ved bunden kunne overstige tilførslen af ilt, og det deraf følgende iltsvind kan føre til død af fisk og bunddyr.

Nogle arter af planktonalger er til gene, når de optræder i store mængder. Nogle af dem kan ligefrem være giftige, og hvis de ædes af muslinger, som derefter spises af mennesker, kan problemet pludselig blive meget nærværende for os. Dødsfald er ikke observeret i Danmark, men kendes fra andre dele af verden. Fiskerne er derfor pålagt at tage vandprøver, når de fisker muslinger. Forekomst af giftige alger fører hvert år til flere ugers pause i fiskeriet. Andre alger giver misfarvning af vandet, skumdannelse eller slime- de belægninger. De er ikke ligefrem livsfarlige, men de kan give store gener for friluftslivet langs vore kyster.

Naturlige økosystemer er beboet af dyre- og plantearter, som til en vis grad er tilpasset hinanden og som derfor op- træder i temmelig stabile indbyrdes mængder. Ved eutro- fering bliver balancen mellem de forskellige arters antal imidlertid forstyrret. Det kan fx begynde med, at mængden af store bundplanter går tilbage på grund af, at vandet bliver uklart. Dermed forsvinder smådyr, som lever på og omkring de store planter. Deres forsvinden følges af be- stemte fiskearter, som dels lever af disse smådyr, dels kræver rigeligt med ilt. Tilbage bliver fiskearter, som bedre tåler iltsvind. Tilsvarende vil man se, at blåmuslinger går frem på bekostning af orme og andre bunddyr. Ikke alle disse ændringer kan med sikkerhed henføres til eutrofie- ring, og ikke alle ændringer er udelukkende negative.

Figur 4-5

Ved Vesterhavet ses regel- mæssigt misfarvning af vandet og enorme mæng- der skum på stranden. Det- te fænomen skyldes masse- forekomst af en bestemt planktonalge kaldet *Phaeocystis*. Der bliver flere og flere af disse massefore- komster i takt med, at kon- centrationen af næring i vandet stiger.

Foto: Helene Munk Sørensen.



Virkninger på danske naturområder på land

Ændrede konkurrenceforhold

Luften er som tidligere nævnt den væsentligste kilde til kvælstof i mange danske naturområder og for visse typer, fx højmoser, er det den eneste kilde. Fra luften tilføres i dag i gennemsnit ca. 15 kg kvælstof pr. ha og tæt på store udslipskilder kan afsætningen være over 50 kg kvælstof pr. ha. Dette er op til 10-20 gange mere end den naturlige afsætning (se side 13).

Dette har store konsekvenser for mange naturtyper på land, fordi de som udgangspunkt er fattige på kvælstof. De plantearter, der oprindeligt er hjemmehørende i sådanne naturtyper, er netop tilpasset lave kvælstofkoncentrationer. De vil derfor kunne klare sig i konkurrencen med mere kvælstofkrævende planter, som til stadighed tilføres med vind og dyr fra omkringliggende områder. Tilføres der imidlertid mere kvælstof, bliver de førhen veltilpassede plantearter pludselig utilpassede og vil bukke under i konkurrencen med de kvælstofkrævende arter. De kvælstofkrævende arter vokser sig store og skygger for de nøjsomme planter. Mosser, laver, lyng, orkideer og andre blomster udkonkurreres og forsvinder, mens især en række græsser går frem og bliver vidt udbredte. Resultatet er, at naturtyperne kommer til at ligne hinanden stadig mere, og at der bliver færre arter.

Det er ikke alene mere kvælstof som sådan, der afgør konkurrenceforholdet mellem forskellige plantearter. Forøgede tilførsler af kvælstof vil nemlig i naturligt kvælstofbegrænsede områder forøge mængden af levende plantemateriale såvel som dette materiales indhold af kvælstof. Som konsekvens heraf øges mængden af kvælstof i førnen, og der sker en opbygning af organisk bundet kvælstof og kulstof i jorden. Den forøgede kvælstofmængde i jorden kan føre til en øget mineralisering, hvor organisk kvælstof omdannes til ammonium og nitrat, og herved øges risikoen for udvaskning. Udvasning af nitrat forsure jorden, hvilket igen kan påvirke plantekonkurrencen, så følsomme arter tabes eller går tilbage.

En forøget mængde kvælstof i planternes væv vil endvidere påvirke de enkelte planters følsomhed over for in-



Figur 4-6

Virkningen af længerevarende, forøget kvælstoftilførsel til en skov forventes at gennemløbe flere faser. Til at begynde med er skoven i stand til at optage kvælstoffet. Herefter sker der en mætning, og overskuddet udvaskes. I den første fase forøges træernes tilvækst, men snart påvirkes skovbundens vegetation, og efterhånden falder produktionen som følge af stress og sygdomme.

Foto: Ole Malling.

Boks 2

Hedens lukkede kvælstofkredsløb

Planter af lyngfamilien (hedelyng, revling og blåbær) er tilpasset til at leve på steder, hvor der kun er beskedne mængder kvælstof i jorden. De har udviklet et kompliceret samspil med specielle svampe (såkaldt mykorrhiza-symbiose), som styrker deres evne til at optage kvælstoffet.

Lyngplanterne opbygger et lag (morlag) bestående af langsomt nedbrydeligt løv. Morlaget består således af organisk materiale og kan meget hurtigt binde uorganisk ammonium og nitrat, som derved gøres utilgængeligt for de fleste konkurrerende planter. I tæt samarbejde med mykorrhiza-svampene kan lyngplanterne udnytte denne pulje af organisk bundet kvælstof. Kvælstoffet cirkulerer derfor mellem mor, svamp og lyngplante og kommer ikke uden for dette lukkede kredsløb, så andre planter kan få fat i det.

Ved en for stor kvælstoftilførsel får lyngplanterne pludselig konkurrence fra andre planter, fx en del græsser og gederams. Herved kan naturområdet overgå til græshede eller gederamshede.

Andre nøjsomme planter, fx på overdrev, har ikke samme symbiose-forhold som lyngen, men klarer sig alligevel godt ved lav tilførsel af kvælstof. Der er typisk tale om planter med langsom vækst, der er gode til at klare næringsmangel, tørke m.m. Guldblomme er et eksempel på en sådan nøjsomhedsplante, som er gået drastisk tilbage på danske heder og overdrev.



Gederams er en indikator for, at store mængder kvælstof er tilgængelige – og denne plante er ved at indvandre på en række danske heder.

Foto: Ole Malling.



Guldblomme er en nøjsomhedsplante, som tidligere var meget almindelig på heder og overdrev, men som nu er i kraftig tilbagegang.

Foto: NatureEyes.

sektangreb og sygdomme. Virkningen af insektangreb kan fx forøges, fordi insekterne foretrækker planter med højt kvælstofindhold. Følsomheden over for klimastress – fx tørke – påvirkes ligeledes. Det skyldes bl.a., at en øget mængde kvælstof i jorden kan medføre, at planternes overjordiske del vokser mere end rodnettet. Følsomheden over for frost kan også blive større, når planternes kemiske sammensætning ændres.

Virkningerne vil være forskellige for forskellige plantearter og kan dermed påvirke artssammensætningen, specielt hvis der sker en påvirkning af en eller flere dominerende arter.

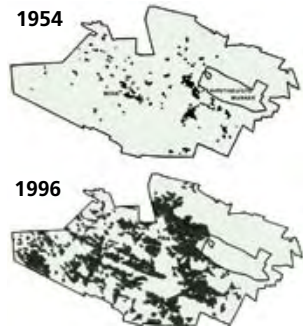
Ændringerne kan ske gradvist over lang tid, eller de kan udløses hurtigt af andre påvirkninger af økosystemet. Langsomme ændringer i jordens puljer og produktiviteten i et område vil ofte være vanskelige at observere.

På en hede vil dværgbuske fx kunne dominere gennem en lang årrække, selv ved store tilførsler af kvælstof, idet andre plantearter har vanskeligt ved at etablere sig. Først hvis vegetationen åbnes som følge af, at dværgbuskene bliver gamle, via pleje eller ved større angreb af fx lyngens bladbille, vil konsekvensen af ændrede konkurrencefor-

Figur 4-7

Græsset blåtop dominerer i dag store dele af Randbøl Hede. De to kort viser udbredelsen af blåtop på Randbøl Hede i 1954 og 1996.

Foto: Ringkøbing Amt.



hold vise sig. Så kan græsset nemlig få overtaget og udkonkurrere dværgbuskene.

Et eksempel er Randbøl Hede (figur 4-7). I 1954 dækkede lyng og andre dværgbuske 87 % af hedens areal, mens den i dag for 75 % procent vedkommende er domineret af græsser. Lyn-gen og andre karakteristiske hedeplanter er stærkt trængt – og den bedste forklaring på disse ændringer er den forøgede tilførsel af kvælstof.

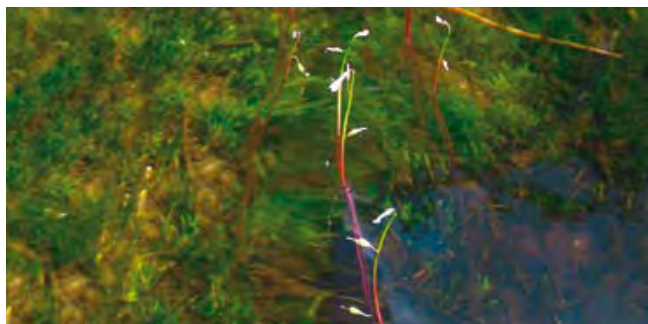
Et andet eksempel stammer fra en skotsk undersøgelse, hvor man studerede ændringer i skovbundens vegetation i nåle- og løvskove som følge af ammoniakudslip fra kyllinge-, svine- og kvægfarme. Man beregnede, at der i skovbryn blev afsat 40-80 kg kvælstof pr. ha om året og fandt visse steder direkte svidningsskader på skovfyr og sitkagran. Bladenes indhold af kvælstof faldt med stigende afstand til kilderne. Endvidere forandrede vegetationen sig meget klart i de nærmeste 300 m fra staldene. Bølget bunke, krybende hestegræs, gederams, hindbær og stor nælde dominerede tæt på udslippene, mens mosser, bregner, skovmærke og skovsyre trivedes bedst længere inde i skovene. Antallet af arter var alle steder lavest tæt på staldene.

Tålegrænser og habitatdirektiv

Tålegrænsen er defineret som den belastning med kvælstof, et område kan udsættes for over en længere periode, uden at det fører til væsentlige ændringer. De enkelte naturområder har forskellige tålegrænser, som bl.a. afhænger af jordbundsforholdene. For heder, enge og overdrev afhænger tålegrænsen desuden af det pågældende områdes pleje.

Figur 4-8
Lobeliesøer hører til en af de naturtyper, der kun tåler en lav belastning med kvælstof.

Foto: Jens Møller Andersen.



Højmoser og lobeliesøer har en tålegrænse på 5-10 kg kvælstof pr. ha om året, mens den for heder, overdrev og lavmoser ligger på 10-25 kg og for nåle- og løvskov på henholdsvis 7-15 og 15-30 kg (se tabel 4-2). Til sammenligning gødes en almindelig kornmark med 150 kg kvælstof pr. ha om året.

Inden for EU's habitatdirektiv har man foretaget en opdeling af den europæiske natur i forskellige typer, som skal sikres gennem tiltag med henblik på opfyldelse af en række kriterier for gunstig bevaringsstatus. Omkring 60 af disse naturtyper optræder i Danmark, og en række områder, hvor disse naturtyper forekommer, er udpeget som såkaldte Natura 2000-områder. Områderne indgår derved i et net af lignende områder på europæisk plan, og disse områders bevarelse vil samlet medvirke til at fastholde den biologiske mangfoldighed. Et af kriterierne for gunstig bevaringsstatus er, at disse naturområder ikke tilføres kvælstof over tålegrænserne.

Naturtype	Tålegrænse (kg kvælstof pr. ha pr. år)	Evt. plejeindsats
Aktive højmoser	5-10	Rydning af opvækst
Lobeliesøer	5-10	–
Basiske lavmoser	15-25	Græsning, høslet
Tørre heder	10-20	Græsning, slåning, afbrænding, evt. tørvskrælning
Kystklitter med dværgbuske (klithede)	10-20	Græsning
Overdrev og krat på kalkholdig jord	15-25	Græsning, rydning af opvækst, evt. høslet
Artsrige overdrev	10-20	Græsning, rydning af opvækst, evt. høslet
Løvskov	10-20 (30)*	Tilførsel af kalium, calcium og magnesium mod forsuring
Nåleskov	7-20 (30)*	Tilførsel af kalium, calcium og magnesium mod forsuring

* beregnet og baseret på Bak (2003).

Tabel 4-2

Tålegrænser for danske naturtyper. Grænserne kan variere med jordbundstype, og derfor angives de som intervaller. Til højre angives de plejeindsatser, som til dels kan modvirke tilførsel af kvælstof over grænsen. Til sammenligning er den gennemsnitlige årlige afsætning af kvælstof fra atmosfæren i størrelsesordenen 15 kg pr. ha, hvoraf 8-11 kg kommer fra udlandet.

Kilde: Søgaard m.fl. 2003 og DMU.



Før, nu – og i fremtiden

A large, stylized orange number '5' is positioned on the right side of the page, partially overlapping the title text.

Dette kapitel sætter fokus på de nationale og internationale initiativer, som er taget for at begrænse udslip af kvælstof til luften. Samtidig vises de hidtidige resultater af denne indsats og til sidst diskuteres forskellige scenarier for den fremtidige udvikling.

Foto: High-lights.



Figur 5-1

Lille blåpil er en yderst sjælden guldsmed i Danmark. Dens levested er sure, næringsfattige vandløb og den er bl.a. fundet ved en mose i Sepstrup Sande, Midtjylland. Dens udbredelse trues af eutrofiering af disse naturtyper.

Foto: Thomas Larsen.

I de tidligere kapitler har vi vist, at afsætning af kvælstof fra luften har stor virkning på vores natur og miljø. Det er nødvendigt at gøre noget ved afsætningen, hvis vi skal bevare mange af de følsomme naturtyper og det mangfoldige dyre- og planteliv, som i dag findes i Danmark. Siden slutningen af 1980'erne er der da også blevet sat ind med lovgivning til regulering af udslippene, og afsætningen af kvælstof fra luften er begyndt at aftage.

Begrænsning af udslip

I praksis er det kun to typer af kvælstofforbindelser, som er relevante i forbindelse med luftbåren kvælstofforurening, nemlig kvælstofoxiderne (NO og NO₂) og ammoniak (NH₃). Umiddelbart kunne det derfor lyde som et overskueligt problem at regulere udslippene, men der er desværre som tidligere nævnt tale om udslip fra et utal af kilder fra samfundets basale aktiviteter: Både fra forbrændingsprocesser, hvoraf energiproduktion og trafik er nogle af de væsentligste, og fra landbrugsproduktion.

Samtidig er forureningen med kvælstofoxider og ammoniak grænseoverskridende. Indsatsen for at begrænse udslippene kræver derfor internationalt samarbejde og udvikling af ny teknologi og nye produktionsmetoder med mindre udslip af kvælstof.

Boks 2

Regulering af luftkvalitet

Regulering af luftkvaliteten i Danmark foretages i princippet i tre forskellige regi: UNECE, EU og nationalt.

UNECE

Arbejdet med den internationale regulering af luftkvalitet i Europa blev påbegyndt i UNECE med vedtagelsen af Genevekonventionen i 1979. Konventionen er ratificeret af 47 lande på det europæiske kontinent samt USA og Canada. Den første protokol vedrørte finansieringen af det tekniske-videnskabelige grundlag, og på basis af den er luftovervågningen i EMEP sat i værk. Herefter er der vedtaget en række protokoller, hvoraf NO_x-protokollen kom i 1988. Endelig er der Göteborgprotokollen, som blev underskrevet i 1999. Her forsøger man for første gang at regulere flere forureninger (SO₂, NO₂ og NH₃) samtidig, og lade det ske på en måde, som så vidt muligt er økonomisk optimal.

EU

Regulering af luftkvalitet er fastlagt i det overordnede luftframedirektiv (1996) med tilhørende mere detaljerede såkaldte datterdirektiver. Regulering af kvælstofoxider (NO_x) indgår i datterdirektivet fra 1999. Ud over dette er der i 2001 vedtaget det såkaldte NEC-direktiv (National Emission Ceilings) om nationale udslipslofter, som EU-landene skal overholde i 2010. En forlængelse af dette direktiv med nye og skrapere krav for 2020 forventes vedtaget af EU i løbet af 2007-2008. EU-direktiverne adskiller sig fra konventionerne og protokollerne under UNECE ved, at de er bindende for EU-landene, som har pligt til at gennemføre dem via national lovgivning. Kravene i Göteborgprotokollen og NEC-direktiverne er ens for Danmark.

Ud over denne direkte regulering af luftkvaliteten, så er der i EU-regi vedtaget en to andre direktiver med relevans for kvælstofproblematikken. Dette drejer sig om Habitat-direktivet og Vandrammedirektivet, som begge stiller krav om, at naturområder og vandmiljø skal beskyttes. Dette indebærer ofte en reduktion i afsætning af luftens kvælstof.

Nationalt

Danmark har indarbejdet EU-direktiverne i den nationale lovgivning. Ud over dette har Danmark vedtaget Luftvejledningen og en regulering af udslip fra kraftværker m.m. Og endelig er der via vandmiljøplanerne (I, II og III) og Ammoniakhandlingsplanen vedtaget regler til begrænsning af udslip af ammoniak fra landbruget.



Figur 5-2

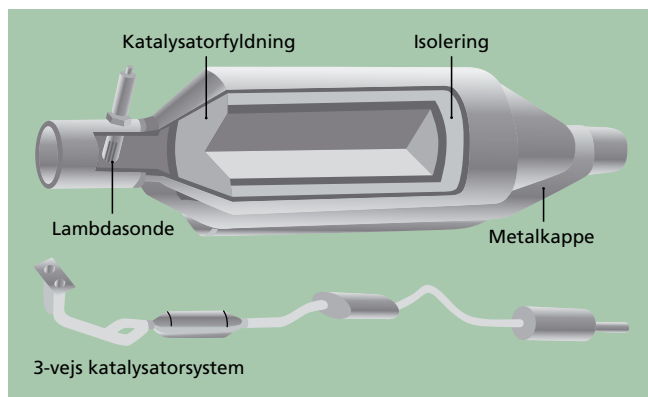
Principskitse af katalysator og det samlede udstødningssystem. Den viste katalysator er en 3-vejs katalysator, hvilket henviser til, at den kan nedsætte udslippet af kulstofmonooxid (CO), kulbrinter (HC) og kvælstofilter (hovedsageligt kvælstofmonooxid, NO) på én gang. Dette gøres ved at katalytiske overflader forøger hastigheden af de kemiske processer, som foregår i katalysatoren. Samtidig hermed måles iltindholdet i udstødningsgassen med Lambdasonden, hvilket benyttes til at styre blandingen af luft og brændstof i motoren. Ved det rigtige forhold mellem ilt og brændstof reduceres kvælstofmonooxid til frit kvælstof (N_2) og kulstofmonooxid og kulbrinter oxideres til kuldioxid (CO_2).

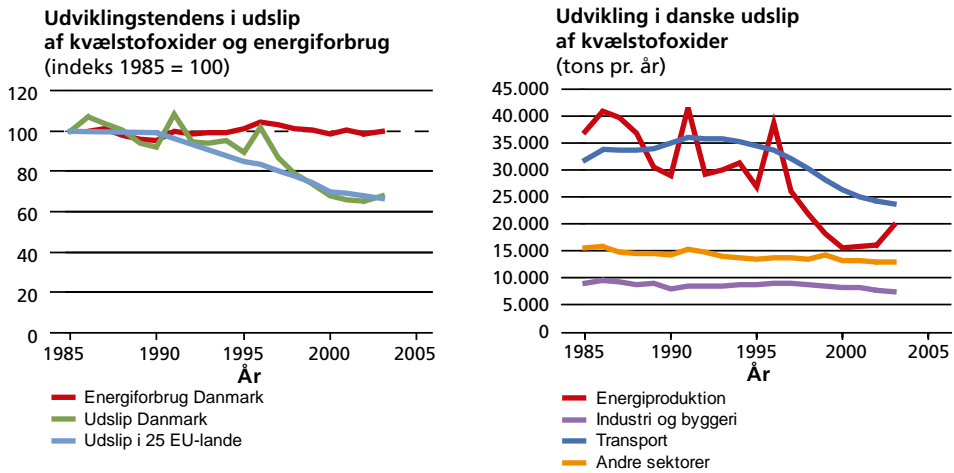
Kvælstofoxider

Den første internationale aftale, NO_x -protokollen, om begrænsning af udslip af kvælstofoxider blev vedtaget i 1988 (se boks 2). Den indeholder bl.a. en række bestemmelser om anvendelse af den bedst tilgængelige teknik til begrænsning af udslip af kvælstofoxider.

Göteborgprotokollen og NEC-direktivet (se boks 2) angiver, at Danmark skal reducere udledningen af kvælstofoxider med 60 % fra år 1990 frem til år 2010. For de 47 lande, som er omfattet af Göteborgprotokollen, vil der ske en samlet reduktion af udslippene med 41 % for den samme periode.

Samtidig er der blevet forsket og udviklet intenst for at forbedre forbrændingsprocesserne. Derved kan man minimere mængden af kvælstofudslip set i forhold til mængden af produceret energi eller antallet af kørte kilometer. De store kraftværker har fået effektive filtre, som fjerner kvælstofoxiderne, inden røgen slippes ud i luften. Energiudnyttelsen er blevet optimeret i huse og i industrien, og der er blevet bygget effektive kraftvarmeværker. Dette nedsætter forbruget af fossile brændstoffer og dermed udslippet af kvælstofoxider. Der er ganske vist kommet flere biler, men de har nu katalysatorer, således at benzinbiler i dag forurener 80-90 % mindre med kvælstofoxider end de gjorde omkring 1990 (figur 5-2). Netto har alle disse tiltag for Danmark ført til en samlet reduktion i udslippet af kvælstofoxider på 34 % i forhold til niveauet i 1990 og det på trods af et stort set uændret energiforbrug siden midten af 1980'erne (figur 5-3).





Figur 5-3 (venstre)

Udviklingstendens i udslip af kvælstofoxider og energiforbrug i Danmark. Til sammenligning vises ændringerne i udslippene i de 25 EU-lande. Udslippene i 1985 er sat til 100 og alle andre udslip er omregnet i overensstemmelse hermed. For det danske energiforbrugs vedkommende er værdien for 1986 sat til 100 og de andre års forbrug omregnet i overensstemmelse hermed.

Kilder: EMEP, DMU og Danmarks Statistik.

Figur 5-4 (højre)

Udvikling i det danske udslip af kvælstofoxider fordelt på energiproduktion, transport, industri og byggeri samt andre sektorer. Variationerne fra år til år i udslip fra energiproduktion skyldes forskelle i import/eksport af energi fra andre lande.

Kilde: DMU.

Ammoniak

En række internationale aftaler har direkte eller indirekte konsekvenser for, hvor meget ammoniak der må slippes ud til atmosfæren. Dette drejer sig først og fremmest om Göteborgprotokollen og NEC-direktivet, som opstiller loft for, hvor meget ammoniak der må slippes ud i 2010. For Danmark gælder, at der skal ske en reduktion i udslippet med 43 % set i forhold til 1990. For de øvrige lande, som er omfattet af Göteborgprotokollen, vil der ske en samlet reduktion af udslippene af ammoniak med 17 % for den samme periode.

Endvidere er der Habitatdirektivet fra 1992, hvor Danmark har forpligtet sig til at bevare og beskytte en række udvalgte naturområder. Det kan medføre behov for reduktioner i ammoniakudslip nær Natura 2000-områder.



Figur 5-5

Ved hjælp af tekniske forbedringer ved husdyrproduktionen er det lykkedes at begrænse udslippet af ammoniak. Her er vist et eksempel med en overdækket gylletank, hvilket fører til kraftig begrænsning af ammoniakudslippet.

Foto: Thomas Ellermann.

For at kunne leve op til alle disse krav sker der fortsat forskning og udvikling i nye landbrugsteknikker og etablering af bedre viden om spredning af kvælstof i natur og vandmiljø og om virkning af kvælstoftilførslen. Blandt andet derfor har landbruget i dag en langt bedre husholdning med kvælstof i husdyrproduktionen, så der ikke tabes nær så meget kvælstof til omgivelserne. Man har også udviklet langt bedre staldsystemer, hvor tab af kvælstof til luften er mindsket betydeligt (figur 5-5).

Resultatet af den danske lovgivning og udvikling af bedre teknikker i dansk landbrug er en reduktion af udslippet med næsten 30 % set i forhold til 1990. Og det på trods af, at der aldrig har været produceret så mange husdyr, som i dag (figur 5-7). Ammoniakudslippet fra de 25 EU-lande er faldet lidt mindre end det danske.

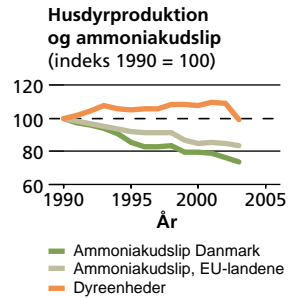
Faldet i det danske udslip er opnået ved, at den danske lovgivning har stillet krav om en mere miljøvenlig landbrugsproduktion. Et af de steder, hvor man har lavet forbedringer, er ved opbevaring og udbringning af husdyrgødning, som er ansvarlig for mere end 30 % af det samlede ammoniakudslip. Produktionen er blevet ændret således, at gyllebeholdere skal overdækkes, og der skal være tilstrækkelig lagerkapacitet til, at gødningen kun bringes ud på markerne, når afgrøderne har brug for den. En stor del af husdyrgødningen nedfældes direkte i jorden eller lægges med slæbeslanger ned mellem planterne (figur 5-6).



Figur 5-6

Ved hjælp af såkaldte slæbeslanger lægges husdyrgødningen ned mellem planterne. Dette giver en langt mindre fordampning af ammoniak end de gammeldags bredspredere.

Foto: Bent Lauge Madsen.



Figur 5-7

Udviklingen i husdyrproduktion (dyreenheder) og udslip af ammoniak i Danmark. Til sammenligning vises også udviklingstendenser for ammoniakudslip i de 25 EU-lande.

Kilder: EMEP, Danmarks Statistik og DMU.

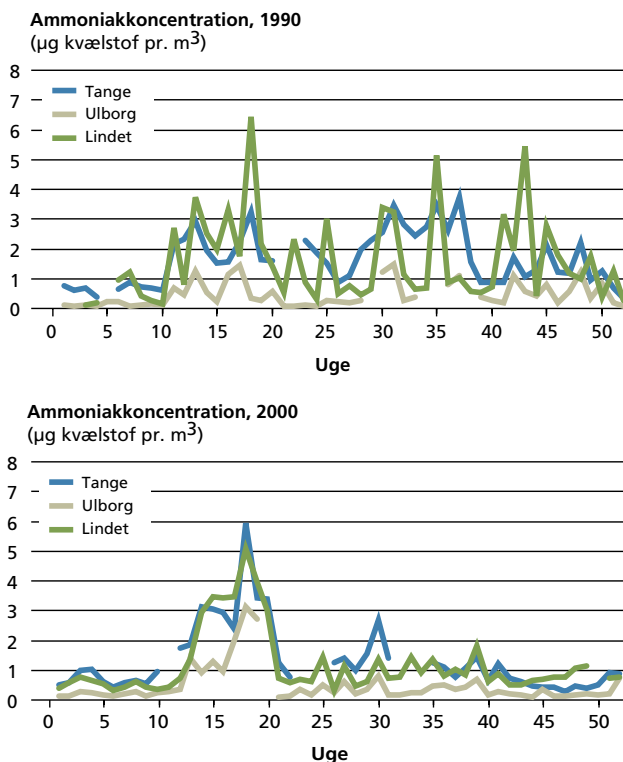
Udviklingstendenser

Kravene til landbruget har ført til, at en langt større del af husdyrgødningen i dag bringes ud om foråret i stedet for som tidligere, hvor gyllebeholderne var mindre og blev tømt mere jævnt over året. At ændringerne i landbrugspraksis har betydning for luftens indhold af ammoniak kan ses i resultaterne fra DMU's overvågning af luftforureningen. Figur 5-8 viser målinger af ammoniak i Jylland fra 1990 og 2000. I 2000 var høje ammoniakkoncentrationer begrænset til en kort periode fra marts til maj, mens der i 1990 var perioder med høje ammoniakkoncentrationer i en større del af året.

Der er sket en nedgang i udslippet af kvælstof til luften, men har anstrengelserne været umagen værd? Har det ført til et lavere indhold af kvælstofoxider og ammoniakforbindelser i luften og dermed til en mindre tilførsel af luftbåren kvælstof til natur og vandmiljø?

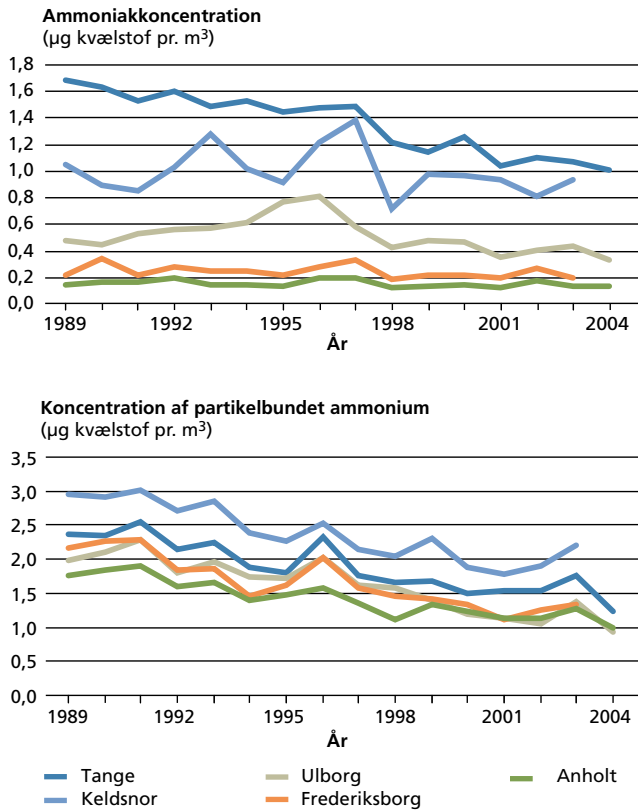
Ud fra resultaterne fra de mange års målinger kan vi vurdere udviklingstendenserne. Og heldigvis kan vi overordnet set svare "ja". Men det er ikke alle kvælstofforbindelser, hvor faldet er lige stort, og der er geografiske forskelle på,

Figur 5-8
Målinger af ammoniakkoncentrationen ved målestationerne i Jylland i 1990 (øverst) og 2000 (nederst) viser tydeligt, at husdyrgødningen i dag fortrinsvis bringes ud om foråret, hvor den tidligere blev bragt ud over en større del af året.



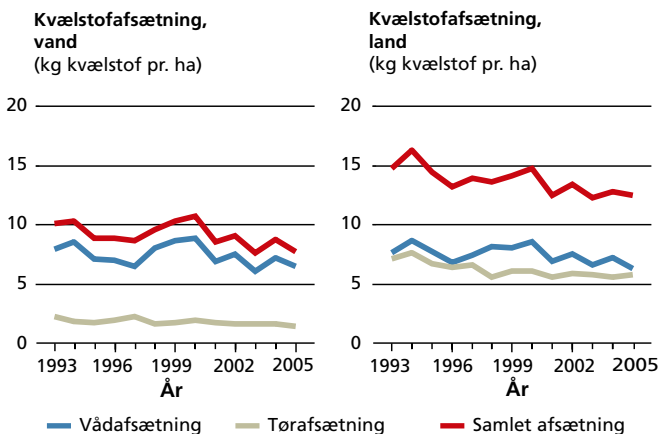
hvor stort faldet har været i luftens kvælstofindhold og i afsætningen på natur og vandmiljø (figur 5-9 og 5-10). Årsagen til dette er navnlig, at ammoniak omdannes og afsættes hurtigt, samt at udviklingen i landbrugsproduktionen er forskellig fra egn til egn, og dermed vil udslip af ammoniak til luften variere fra sted til sted. For kvælstofoxiderne er forholdene anderledes, da de omdannes og afsættes langsommere. De transporteres derfor over lange afstande og de lokale forskelle bliver små.

Nedgangen i luftens indhold af kvælstof følger som tidligere nævnt udviklingen i udslip af kvælstof fra Danmark og de øvrige europæiske lande, og det er derfor givet, at de målte ændringer skyldes ændringerne i udslippet (figur 5-11). For en række af kvælstofforbindelserne skyldes hovedparten af de målte ændringer faldet i udslip i de andre europæiske lande. Dette gælder navnlig for kvælstofoxiderne og for den nitrat og ammonium, som man finder i nedbøren. For den ammonium, som findes bundet til luf-



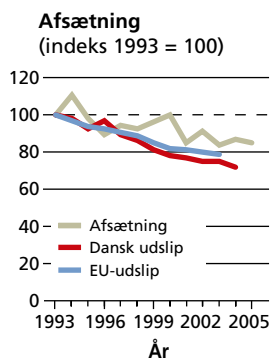
Figur 5-9

De nationale og internationale begrænsninger i ammoniakudslippene har ført til et fald i koncentrationerne af partikelbundet ammonium ved målestationerne. Da de ammoniumholdige partikler ofte transporteres 500-1000 km i atmosfæren, er de lokale forskelle udvisket, og man ser samme udviklingstendens for alle målestationerne. Ammoniak transporteres til gengæld kun over korte afstande (5-100 km) i atmosfæren. Derfor påvirkes ammoniakkoncentrationen af ændringerne i landbrugsproduktionen i området omkring målestationerne, og derfor ses vidt forskellige koncentrationer og udviklingstendenser.



Figur 5-10

Siden 1993 er den samlede afsætning af kvælstof til såvel land- som vandområder faldet med lidt over 20 %. Kurverne viser gennemsnit for danske baggrundsmålestationer. Årtil-år-variationerne skyldes hovedsageligt de naturlige variationer i de meteorologiske forhold.



Figur 5-11
Udviklingstendenserne i afsætning af kvælstof følger ændringerne i udslippene i Danmark og det samlede EU.

Kilder: DMU, EMEP.

tens partikler, spiller de danske kilder en langt større rolle. Modelberegninger har vist, at i Danmark kommer omkring halvdelen af luftens indhold af partikelbundet ammonium fra danske kilder. Her har faldet i danske udslip altså lige så stor vægt, som faldet i de udenlandske udslip.

Fremtiden?

Der er som nævnt opnået et fald i afsætningen af luftbåren kvælstof på lidt over 20 % siden 1993, men hvordan vil det komme til at se ud om 10-20 år? Det kan man få en idé om ved at anvende modeller og lave beregninger for mulige fremtidige situationer – såkaldte scenarieberegninger (se også MiljøBiblioteket bind 6, Miljøscenarier).

Tabel 5-1 viser resultaterne fra to forskellige scenarieberegninger udført med DMU's luftforureningsmodel DEHM (se side 41). Scenario 1 svarer til forholdene i år 2010, når det antages, at de vedtagne nationale udslippslofter for år 2010 i NEC-direktivet overholdes i alle EU's medlemsstater. Scenario 2 svarer til forholdene i år 2020, når det antages, at de forventede nationale udslippslofter for år 2020 overholdes i alle EU's medlemsstater. Scenario 1 bygger på det gældende EU-direktiv, mens scenario 2 bygger på afløseren af dette direktiv. Dette direktiv er ved at blive forhandlet i EU. De forventede ændringer i udslip af kvælstofoxider og ammoniak samt det samlede udslip af kvælstof i EU ses i figur 5-12.

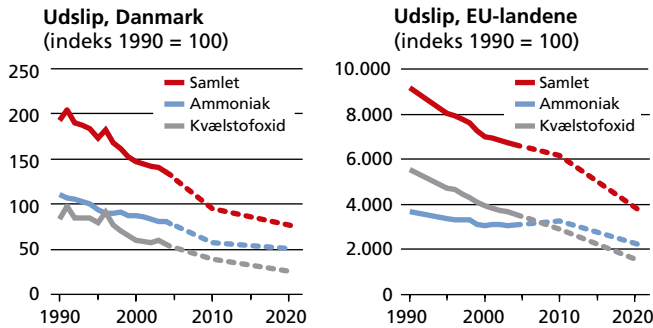
	Dansk kvælstofudslip	EU's kvælstofudslip	Kvælstofafsætning
Scenario 1	35 %	19 %	18 %
Scenario 2	48 %	41 %	32 %

Tabel 5-1

Fald i udslip og afsætning af kvælstof beregnet i forskellige scenarier for det fremtidige udslip af kvælstofoxider og ammoniak:

- 1) Reduktion af kvælstofudslip svarende til, at de vedtagne udslippslofter for år 2010 i NEC-direktivet overholdes.
- 2) Reduktion af kvælstofudslip svarende til, at de forventede udslippslofter for år 2020 i det kommende NEC-direktiv overholdes.

Kolonne 2 og 3 angiver den procentvise reduktion i udslip fra Danmark og EU ved de to forskellige scenarier beregnet i forhold til udslip i år 2000. Den sidste kolonne angiver et estimat af den procentvise reduktion af kvælstofafsætningen på danske landområder ligeledes i forhold til år 2000.



Figur 5-12
Udslippene af kvælstof ventes fortsat at falde frem til 2020. Størst fald ventes for kvælstofoxid. De viste fremskrivninger svarer til scenario 1 og 2 i tabel 5-1.

Kilder: EMEP, DMU.

Resultaterne viser tydeligt, at når udslippet nedsættes, opnås der reduktioner i kvælstofafsætningen i samme størrelse som ændringen i udslippene. Afsætningen af kvælstof til de danske landområder stammer dels fra kilder i Danmark (ca. 40 %) og dels fra udenlandske kilder (ca. 60 %) (se side 49). Ændringen i kvælstofafsætningen i Danmark ved de to scenarier skyldes derfor såvel ændringerne i de danske kilder som ændringerne i kilderne i det øvrige EU.

Figur 5-13
Markperlemorsommerfuglen lever fortinsvis på næringsfattige overdrev som er en truet naturtype pga. eutrofieringen. Arten er derfor i tilbagegang.

Foto: Thomas Larsen.



Umiddelbart kan en reduktion af de danske udslip på næsten 50 % virke som en drastisk reduktion. Igennem de seneste årtier er der imidlertid blevet forsket og arbejdet med tekniske forbedringer for herved at reducere udslippene. En af de mulige tekniske løsninger bygger på tilsætning af svovlsyre til gyllen, hvilket vil forhindre ammoniak i at dampe af til luften. De foreløbige testresultater angiver en mulig reduktion på udslip fra stalde på op mod 80 %. Dette er blot én af de løsninger, som vil gøre det teknisk muligt at opnå en halvering af de danske udslip.

Målingerne har vist, at afsætningen af kvælstof gennem de sidste 13 år er faldet med lidt over 20 % og scenarieberegningerne viser, at der kan forventes et yderligere fald med 10-30 % alt efter, hvor skrappe udslipsofter, der bliver vedtaget for år 2020, og i hvilket omfang det lykkes landene at leve op til målsætningerne.

Informationer om afsætning af kvælstof i tidligere tid er sparsomme, men ud fra gamle målinger af vådafsætningen (figur 1-3 og side 13) og ved hjælp af modelberegninger er det dog muligt at danne sig et skøn. Udslippene af kvælstof er baseret på viden om levevis og landbrugsproduktion omkring begyndelsen af 1800-tallet, og ved at anvende disse udslip i de moderne spredningsmodeller har man skønnet, at kvælstofafsætningen omkring år 1800 har været på ca. 1-2 kg pr. ha., altså omkring 5-10 % af den nuværende afsætning.

Der er ingen tvivl om, at det moderne samfund giver anledning til en langt større tilførsel af kvælstof til natur og vandmiljø end det ovennævnte "naturlige" niveau. Det ligger også fast, at afsætningen af kvælstof – på trods af de sidste 10-15 års indsats – stadigvæk ligger over det niveau, som de mest føl-somme naturtyper kan tåle.

Reduktionen af den luftbårne kvælstofforurening kan overordnet set betragtes som en politisk succes, hvor internationale og nationale tiltag har knækket kurverne på trods af en fortsat økonomisk udvikling. Samtidig må man dog konstatere, at der fortsat er et godt stykke vej, før naturen på land og i vand opnår gunstig bevaringsstatus som krævet af Habitatdirektivet. Bevarelse af en mangfoldig dansk natur fordrer nye tiltag for at begrænse udslippene.



Figur 5-14

Lyng i Råbjerg Mose. Nordjyllands Amt.

Foto: Ole Malling.

Litteratur

Referencer

Andersen, J.M., Bruun, H.G., Jensen, J.D., Wier, M., Sørensen, P.B., Rolev, A.-M., Conley, D.J., Hertel, O., Frohn, L.M. & Asman, W.A.H. (2000).

Økonomiske og miljømæssige konsekvenser af markedsordningerne i EU's landbrugsreform. Agenda 2000. Danmarks Miljøundersøgelser. - Faglig rapport fra DMU 308: 63 s.

Bach, H., Christensen, N. & Kristensen, P. (red.) (2001). Natur og Miljø 2001. Påvirkninger og tilstand. Danmarks Miljøundersøgelser. – Faglig rapport fra DMU 385: 368 s. Internet udgave.

Christensen, L. & Gudmundsson, H. (2003). Modelanalyser af mobilitet og miljø. Slutrapport fra ALTRANS og AMOR II. Danmarks Miljøundersøgelser. – Faglig rapport fra DMU 447: 116 s.

Dalgaard, T., Kjeldsen, T., Rasmussen, B.M., Fredshavn, J.R., Münier, B., Schou, J.S., Dahl, M., Wiborg, I.A., Nørmark, P. & Hansen, J.F. (2004).

ARLAS' scenariosystem. Et grundlag for helhedsorienterede konsekvensvurdringer af ændringer i arealanvendelsen. I: Hansen, J.F. (red): Arealanvendelse og landskabsudvikling Fremtidsperspektiver for natur, jordbrug, miljø og arealforvning. Danmarks Jordbrugsforskning. – DJF rapport. Markbrug 110: 97-128.

Groth, N.B., Hedegaard, M.B., Holmberg, T., Höll, A. & Petersen, H.S. (1998).

Arealanvendelsen i Danmark 1995-2025. Den nuværende og fremtidige arealanvendelse belyst som led i en vurdering af de økologiske råderum. By- og Landsplanserien, nr. 2.

http://www2.dmu.dk/1_Viden/2_miljoetilstand/3_luft/4_udsigt/default.asp

Illerup, J.B., Birr-Pedersen, K., Mikkelsen, M.H, Winther, M., Gyldenkærne, S., Bruun, H.G. & Fenhann, J. (2002). Projection Models 2010. Danish Emissions of SO₂, NO_x, NMVOC and NH₃. National Environmental Research Institute. – NERI Technical Report 414 : 192 pp. Internet udgave

Jensen, J.D., 1996.
An Applied Econometric Sector model for Danish Agriculture (ESMERALDA). Statens Jordbrugs- og Fiskeriøkonomiske Institut, rapport nr. 90.

Münier, B. (2004).
Plantesamfundene og landskabstruktur ved ændret arealanvendelse. I: Hansen, J.F. (red): Arealanvendelse og landskabsudvikling Fremtidsperspektiver for natur, jordbrug, miljø og arealforvaltning. Danmarks JordbrugsForskning. – DJF rapport Markbrug 110: 71-80.

Münier, B., Birr-Pedersen, K. & Schou, J.S. (2004).
Combined ecological and economic modelling in agricultural land use scenarios. – Ecological Modelling 174(1-2): 5-18.

Münier, B., Nygaard, B., Ejrnæs, R. & Bruun, H.G. (2001).
A Biotope Landscape Model for Prediction of Semi-Natural Vegetation in Denmark. – Ecological Modelling 139(2-3): 221-233.

Møller Andersen, F. (ed.); Werner, M.; Jensen, J.D.; Jensen, T.S.; Henriksen, G.T.; Olsen, A.; Illerup, J.B.; Nielsen, C.; Winther, M.
Environmental satellite models for ADAM. (Statistics Denmark, Copenhagen, 2001) 110 p.

Møller Andersen, F.; Fenhann, J.; Larsen, H.V.; Schleisner, L.
A scenario model for the generation of waste. (Danish Environmental Protection Agency, Copenhagen, 1999) (Environmental project, no. 434) vp.

Pedersen, O., Møller, F. & Christensen, N., 2002. Informationsgrundlaget for integreret miljøplanlægning. Rapport fra Danmarks Statistik og Danmarks Miljøundersøgelser.

Regeringen, 2002. Danmarks strategi for bæredygtig udvikling. Fælles fremtid – udvikling i balance.

www.vandudsigten.dk

Stikordsregister

A

Afsætning · 29
 bestemmelse · 37
 geografiske fordeling · 44
 komponenter · 40
 måling · 38
 oprindelsessted · 48
 sammensætning · 32, 33
 Afsætningsbegrænsning · 78
 Ammoniak
 afsætning · 22, 30
 andel af afsætningen · 33
 kilder · 13
 reduktion af udslip · 17, 73, 76, 77
 udslip · 20
 Ammoniakhandlingsplanen
 · 17, 71
 Ammonium
 afsætning · 27
 levetid i atmosfæren · 27
 transport · 27
 Ammoniumbisulfat · 26
 Ammoniumforbindelser, parti-
 kelbundet · 26
 Ammoniumnitrat · 26
 Ammoniumsulfat · 26

B

Baggrundovervågningsprogram
 · 37
 Bilmotorer · 13
 Biodiversitetskonventionen · 17
 Biotilgængelighed · 56

Blåtop · 65

C

Cyanobakterier · 55

D

Datterdirektiv · 71
 DEHM · 41

E

EU · 71
 Eutrofiering · 10

F

Farvande, kvælstofkilder · 51
 Filterpack-opsamler · 39
 Fladekilder · 21
 Forbrændingsprocesser · 13
 Frit kvælstof · 11
 Fugleklatte · 39

G

Genevekonventionen · 71
 Grænselag · 28
 Gødningsbeholdere · 21
 Gødningsudbringning · 21
 Göteborgprotokollen · 17, 72

H

Habitatdirektivet · 17
 Havsalt · 26
 Hede
 kvælstofkredsløb · 64
 kvælstoftålegrænse · 67

Husdyrproduktion · 15
 Hydroxylradikal · 25
 Højmoser · 62
 kvælstoftålegrænse · 67

I

Iltsvind · 60

K

Katalysator · 72
 Kattegat · 55
 Konkurrenceforholdsændringer
 · 62
 Kraftværker · 13
 Kvælstof (se også kvælstoffor-
 bindelser)
 afsætning · 13 (se også kvæl-
 stofafsætning)
 biologisk aktivt · 12
 frit · 11
 luftens · 11
 udslip · 12, 13
 Kvælstofafsætning · 13, 15
 komponenter · 40
 geografiske fordeling · 44
 måling · 38
 oprindelsessted · 48
 virkninger i vandmiljøet · 59
 virkninger på landjorden · 62
 Kvælstofforbindelser
 afsætning · 29
 biotilgængelighed · 56
 kilder · 13
 omdannelser · 25

opblanding i atmosfæren · 27
transport · 26

Kvælstofforurening
farvandene · 16
naturen på land · 16

Kvælstofkilder · 50
betydning i vandmiljøet · 54

Kvælstofkredsløb, hedens · 64

Kvælstofmonoxid · 25

Kvælstofoxid · 25 (se også kvælstofoxider)
afsætning · 23, 30
andel af afsætninge · 32
forurening med · 12
kilder · 13
levetid i atmosfæren · 27
reduktion af udslip · 17, 72
udslip · 23 (se også kvælstofudslip)
virkninger · 10

Kvælstoftålegrænse · 16, 66, 67

Kvælstofudslip · 12, 13, 17, 23
(se også ammoniak og kvælstofoxider)
begrænsning · 70, 72, 73
fremtidens · 79
reduktion · 17

L

Landbrug · 13

Landjordens natur
kvælstofkilder · 50
kvælstofafsætningens virkninger · 62

Limfjorden · 55

Lobeliesøer · 54
kvælstoftålegrænse · 67

Lokal-skala-modeller · 45

Luftbåren kvælstofforurening;
def. · 6

Luftforureningsmodeller · 38

Luftforureningsovervågning · 36

Luftrammedirektiv · 71

Luftvejledningen · 71

Lyngens bladbille · 65

M

Modelberegninger · 41

Modeller; se luftforureningsmodeller, stor-skala-modeller og lokal-skala-modeller

Mykorrhiza · 64

Målemetoder · 38

N

Nationale Overvågningsprogram for Vandmiljø og Natur (NOVANA) · 36

Natriumnitrat · 26

NEC-direktivet · 17, 71, 72

Nedbørsopsamler · 39

Nitrat
afsætning · 27
transport · 27

NOVANA · 36

NO_x-protokollen · 72

O

Opblanding · 27

Overgødskning · 10

Overvågning af luftforureningen · 36

Ozon · 25

P

Partikelbundet ammonium · 26
levetid i atmosfæren · 26
transport · 27

Partikelbundet nitrat
levetid i atmosfæren · 26
transport · 27

Phaeocystis · 61

Punktkilder · 21

R

Randbøl Hede · 65

Røgfanemodell · 46

S

Salpetersyre · 25
afsætning · 30

Skive Fjord · 55

Stalde · 21

Stor-skala-modeller · 41

Svovlsyre · 26

T

Trafik · 15

Transport af kvælstofforurening · 26

Turbulenscelle · 28

Tørafafsætning · 29

Tålegrænser; se kvælstoftålegrænser

U

Udslipsbegrænsning · 78

Udslipsopgørelse · 22, 24

Udvaskning · 27

UNEC · 71

V

Vandmiljø
kvælstofkilder · 50
kvælstofkilders betydning · 54
kvælstofafsætningens virkninger · 59

Vandrammedirektivet · 17

Vådafafsætning · 31

Luftbåren kvælstofforurening

Redigeret af Thomas Ellermann

Denne bog handler om en form for kvælstofforurening, som kan ramme langt fra kilden, og som man først for alvor blev opmærksom på midt i 1980'erne: *den luftbårne*. Det særlige ved den er, at forskellige kvælstofforbindelser slipper ud fra kilder på jordoverfladen, bevæger sig op i luften og transporteres omkring med luftmasserne for til sidst at komme ned på jord- eller vandoverflader igen.

Bogen beskriver blandt andet:

- De kilder, kvælstofforbindelserne kommer fra
- Kvælstofforbindelsernes bevægelse op i atmosfæren, spredningen fra sted til sted og afsluttende afsætning på vand, jord eller vegetation
- Hvordan man måler og forudsiger kvælstofafsætningen
- Den virkning, kvælstofafsætningen har på havmiljøet og naturområderne på land

Bogen fortæller endvidere, hvordan vi overvåger kvælstofforureningen i Danmark, og hvordan man gennem internationale forhandlinger og aftaler forsøger at begrænse forureningen og dens virkninger.

Skrevet i en faglig, men let tilgængelig form med mange tegninger og fotografier.



Danmarks Miljøundersøgelser
Aarhus Universitet

ISBN 978-87-7739-793-6