

# 9. Kvælstof i fremtidens bæredygtige jordbrug

*Erik Steen Jensen*

## Indledning

Kvælstof (N) er en afgørende produktionsfaktor og samtidig et af de mest debatterede og udforskede miljøproblemer i de senere år. Landbrugets stigende anvendelse af kvælstof kombineret med plante- og husdyrforædling, kulturtekniske forbedringer og intensivning af produktionen i de seneste 50 år har ført til en markant forøgelse af fødevarerproduktion og eksport fra landbrugssektoren. Den økonomiske vækst og den stigende anvendelse af kvælstof har dog haft en pris: uønskede effekter på vandmiljø, atmosfære og naturlige økosystemer af kvælstof udledt som nitrat, ammoniak og lattergas.

Fødevarernes andel af det samlede private forbrug er faldet fra ca. 35 % til kun 10 % over de sidste 50 år. Det skyldes forbrugerkrav om lave priser samt stigende fokus på andre forbrugsgoder. Forbrugernes krav om billige fødevarer har været medvirkende til at øge intensivning og specialisering i landbruget og dermed miljøproblemerne. Samtidig har prisen på fossil energi længe været forholdsvist lav. Dette har betydet, at indu-

strielt fremstillet kvælstofgødning er en relativt billig indsatsfaktor. Landbruget kunne derfor forøge anvendelse af N i 60'erne og 70'erne uden begrænsning.

I firserne kom kvælstof og miljø på dagsordenen i samfundsdebatten (figur 9-1), og der er sket markante ændringer i landbrugets anvendelse af N siden da. Nu virker det, som om intensiteten i debatten er aftaget. Skyldes det blot medierne behov for nye "katastrofer", eller er det, fordi problemerne med kvælstof er løst?

I dette kapitel beskriver jeg først kvælstoffets kredsløb i landbruget – det er et område, hvor de seneste 15 års forskning har givet megen ny viden. Derefter beskriver jeg udviklingen i landbrugets kvælstofanvendelse og belyser så den nuværende effektivitet i N-udnyttelsen for landbruget som sektor, herunder de vigtigste tab og konsekvenserne heraf. Jeg vil herefter formulere min vision om fremtidens anvendelse af kvælstof. Endelig drøftes på hvilken måde, vi som forbrugere kan bidrage til at reducere de negative effekter af N på miljøet.

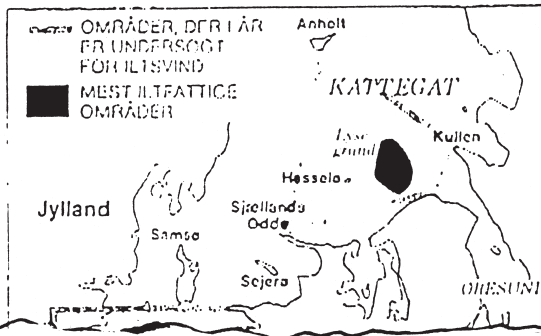
# POLITIKEN

## Danske fisk har åndenød

*Miljøkrav kom for sent og vandene trues af iltsvind*

Af Ellen Ø. Andersen

De ældre danske færvande er vist af kvæltes. Hummerne dør i det sydlige Kattegat, og fiskene flygter nordpå fra Havsvidet, »A fisker, og i disse dage fanger masser af tunger ved Anholt. Havsvidet er ikke noget nyt fænomen i de ældre danske færvande, men de seneste dages meget hurtige udvikling vækker bekymring.



Udendigtet re-  
devedet kom-  
bi. Et alms-  
reanogic-  
en 20 pct. af  
det kan udby-  
en frettelse i  
tyde af ber-  
kun spær kon-  
pæ, men det  
lyde plæm-  
præk fælbom  
kvalitetet og  
fæm, og der  
plæm skæ-  
tæ-1 min kr.

Roskilde  
Itokke E  
fære en 10  
fære, livstid er  
fære, og et  
fære-1 min kr.

Figur 9-1. Aftryk af avisartikel om døde hummere og iltsvind i Kattegat. Ellen Ø. Andersen i Politiken d. 9. oktober 1986.

### Fra N<sub>2</sub> til N<sub>2</sub> – kvælstoffets kredsløb

Kvælstof (nitrogen, N) på gasform (N<sub>2</sub>) udgør 78 % af atmosfæren. Navnet "kvælstof" skyldes, at N<sub>2</sub> ikke understøtter forbrændingsprocessen. Kvælstof i jorden findes hovedsageligt bundet i organisk stof, dvs. som humus, døde planter, dyr og mikroorganismer. Dette organisk bundne N bidrager med ca. 0,1-0,2 % af de øverste jordlag, hvilket kan dreje sig om mere en 5 tons N pr. ha. Kvælstof findes på uorganiske former som ammonium (NH<sub>4</sub>) fasthæftet (adsorberet) til lermineraller og som nitrat (NO<sub>3</sub>) opløst i jordvandet. Kvælstof findes desu-

den på gasform som ammoniak (NH<sub>3</sub>), lattergas (N<sub>2</sub>O) og kvælstofoxider (NO<sub>x</sub>).

Kvælstof indgår i et kompliceret kredsløb, hvor det bevæger sig mellem forskellige puljer via biologiske og kemiske processer (figur 9-2). Ammonium dannes ved mikrobiel nedbrydning af organiske stof. Når der er mere kvælstof til rådighed i det organiske stof, end mikroorganismene kan bruge til deres egen vækst, frigøres ammonium. Denne proces kaldes kvælstofmineralisering. Ammonium omdannes til nitrat af bakterier ved en proces, der kaldes nitrifikation. Når jorden tilføres organisk stof

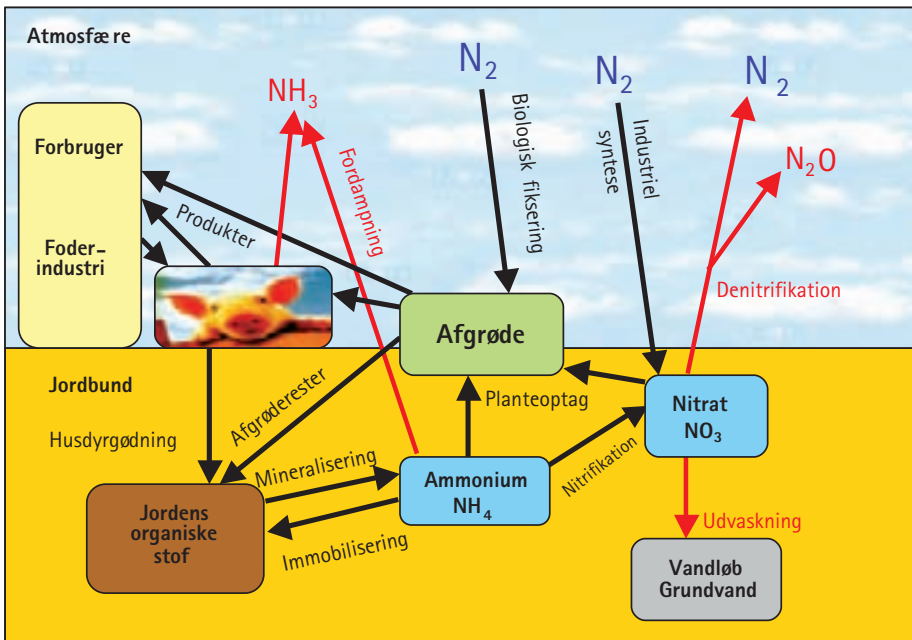
med et lavt indhold af N, kan mikroorganismernes nedbrydning af materialet medføre, at de bruger det nitrat-N og ammonium-N, som findes i jordvæsken, til deres egen vækst. Denne proces kaldes kvælstoffimmobilisering.

Kvælstofkredsløbene i dyrkede og naturlige økosystemer indeholder i princippet de samme puljer (industrielt syntetiseret kvælstofgødning og foderstoffer undtaget) og processer, men der er stor forskel på puljernes størrelse og processernes hastighed i systemerne.

Kvælstof er det grundstof, som planter, efter kulstof, ilt og brint, har behov for i størst mængde. Planter behøver kvælstof for opbygning af aminosyrer og proteiner, der er nødvendige komponenter i alle celler – også dyrs. Hverken  $N_2$  eller hovedparten af det organisk bund-

ne N kan udnyttes direkte af planter eller dyr. Planter optager hovedsageligt N fra ammonium og nitrat.

En særlig gruppe planter, bælplanterne, fx kløver, ært og bønne, kan i samarbejde med bestemte jordbakterier (*Rhizobium*) omdanne luftens  $N_2$  til ammonium, som så kan udnyttes af planten (figur 9-3). Denne proces kaldes biologisk  $N_2$ -fiksering. Bakterierne, der etablerer sig i rodknolde på planterødderne, kan ved hjælp af enzymet nitrogenase reducere  $N_2$  til  $NH_3$ . Energien til denne proces kommer fra plantens fotosynteseprodukter. Nogle jordbakterier kan fikserer luftens  $N_2$  uden at være i samspil med en plante. Derimod kan mennesker og dyr ikke syntetisere proteiner ud fra luftens kvælstof, og derfor vi må optage det nødvendige kvælstof via proteiner i fødevarer.



Figur 9-2. Schematisk fremstilling af kvælstoffets kredsløb i landbrugs(agro)økosystemet. Kun de vigtigste processer og puljer er medtaget.



Figur 9-3. Hvidkløver og rodknolde med *Rhizobium* på kløverrod samt *Rhizobium*-bakterier i stor forstørrelse. Foto E.S. Jensen.

I takt med den øgede anvendelse af handels(“kunst”)gødning-N er de kvælstoffikserende planter forsvundet fra danske dyrkningssystemer, men de er nu gradvist ved at vende tilbage i planteproduktionen, bl.a. på grund af et voksende areal med økologisk jordbrug. Det er især hvidkløver, der indgår i stigende omfang i græsmarker (figur 9-3).

I naturlige økosystemer tilføres N alene ved biologisk fiksering hos kvælstoffikserende organismer og ved lynnedslag, hvor  $N_2$  omdannes til nitrat, som derefter deponeres med regnvand. Den globale naturlige  $N_2$ -fiksering udgør skønsmæssigt ca. 140 millioner tons pr. år, hvoraf lynnedslag bidrager med 5-10 millioner tons.

Mennesket har i forrige århundrede mere end fordoblet den mængde N, som cirkulerer i det globale N kredsløb, og de store mængder biologisk tilgængeligt N påvirker økosystemerne på alle niveauer. Forøgelsen er sket via fremstilling af syntetiske gødningsstoffer, kvælstoffikserende afgrøder, afbrænding af fossile brændstoffer og nettomobilisering af N

fra jord og biomasse (via dræning, fældning af skov m.m.). Det anslås, at de nævnte aktiviteter bidrager med hhv. 80, 40, 20, og 70 millioner tons N pr. år globalt, men estimerne er forbundet med stor usikkerhed.

I agroøkosystemer fjernes betydelige mængder kvælstof med de høstede produkter via udvaskning til dræn eller grundvand og via gasformige tab til fx  $N_2$  (figur 9-2). For at opretholde jordens frugtbarhed og sikre planternes N-forsyning må der kompenseres for det N, som fjernes. I modsat fald vil jorden udpines for N, og udbyttet af afgrøderne forringes. I agroøkosystemer uden husdyr og kvælstoffikserende bælglplanter tilføres N i form af industrielt syntetiserede gødningsstoffer (handelsgødning, “kunstgødning”). På grund af de relativt store mængder fossil energi (ca.  $0,7 \text{ m}^3$  naturgas eller ca. 1 liter dieselolie pr. kg N), der behøves til syntese af gødningskvælstof, udgør handelsgødnings-N en af de største enkeltposter i landbrugets energiregnskab. I dag er prisen på et kg kvælstof i handelsgødning ca. 5 kr.

## Kvælstof i et historisk lys

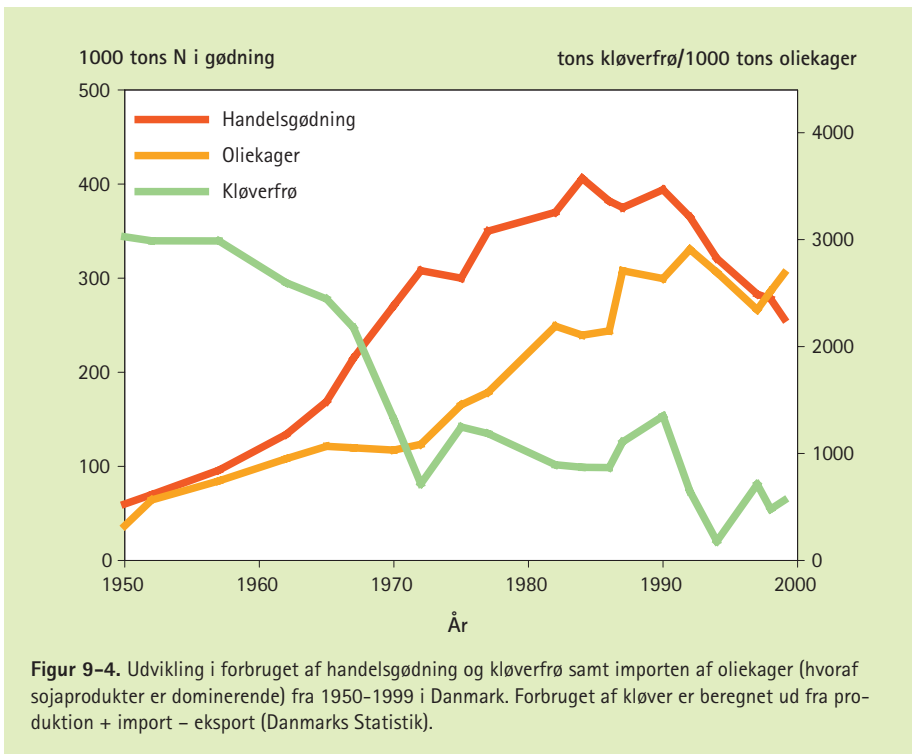
De første agerbrugere i Danmark (4000-3600 f.Kr.) har sikkert været opmærksomme på, at ekskrementer og urin fra dyr og mennesker stimulerede plantevæksten. Men det var formentlig først i jernalderen ca. 500 f.Kr. at bønderne erkendte, at de for at vedligeholde jordens frugtbarhed og øge kornproduktionen på udpinte jorder, måtte tilføre husdyrgødning til marken.

I middelalderens Europa formuleredes de første teorier om planternes ernæring og vækst. I 1840 fremkom Justus von Liebig (1803-1873) med sine teorier. Han er formentlig den videnskabsmand, som har haft størst betydning for

vor viden om planternes ernæring. Liebig indså problemet i, at næringsstoffer blev bragt med fødevarer til byerne, men ikke recirkuleret til markerne (se side 183).

Erkendelsen af kvælstoffets vigtighed for plantevækst gav naturligt anledning til ønsket om at kunne anvende opløseligt kvælstof i koncentreret form – handelsgødningen var opfundet. I Danmark satte Liebigs arbejde også gang i undersøgelser af planternes ernæring, og gødsning med N. Kvælstof har siden da været genstand for et omfattende forsknings- og forsøgsarbejde.

Chilesalpeter var en af de første former for mineralsk handelsgødnings-



kvælstof. I starten af 1900-tallet begyndte udvindingen af dette gødningsmiddel fra naturlige mineralaflejringer i Chile. Samtidig blev der udvundet organisk gødning i form af guano (fuglegødning) fra peruvianske øer.

Det blev tyskerne Haber og Bosch, der stod for det store gennembrud i fremstillingen af mineralsk kvælstofgødning, da de opfandt den industrielle syntese af ammoniak i 1913. Metodens udbredelse blev dog forsinket af de økonomiske vanskeligheder i efterkrigstiden. I 1960'erne, hvor mængden af billig energi forøgedes markant, skete der en eksponentiel stigning i produktion og anvendelse af handelsgødnings-N i Danmark, og denne stigning kulminerede sidst i 80'erne (figur 9-4). I 1989/90 blev der i Danmark anvendt ca. 0,40 millioner tons N pr. år i handelsgødning, men i 1999 var forbruget faldet til ca. 0,26 millioner tons N pr. år. Globalt anvendtes ca. 80 millioner tons N i 1999.

## Kvælstof og miljøpolitik

Den store og intensive animalske produktion (svinekød og mælkeprodukter) har stor indflydelse på kvælstofs anvendelse og udnyttelse i dansk landbrug. Husdyrproduktion medfører en stor import af næringsstoffer i fodermidler, hvoraf hovedparten efterfølgende tilføres dyrkningsjorden som husdyrgødning på organisk og uorganisk form.

I midten af firserne var en kurv med døde hummere, som tilsyneladende var fanget i et område af Kattegat med iltsvind, som tidligere nævnt med til at skærpe fokus på landbrugets kvælstofanvendelse og effekterne på det omgivende miljø (se figur 9-1). Det førte til NPO-planen<sup>9</sup> i 1985 og Vandmiljøplan I i 1987. Efterfølgende er der udarbejdet adskillige nationale handlingsplaner, senest Vandmiljøplan II, som forventes iværksat i slutningen af 2003. Der er også indført en række reguleringer af landbrugets anvendelse af N.

## Til- og fraførsel af kvælstof i dansk landbrug

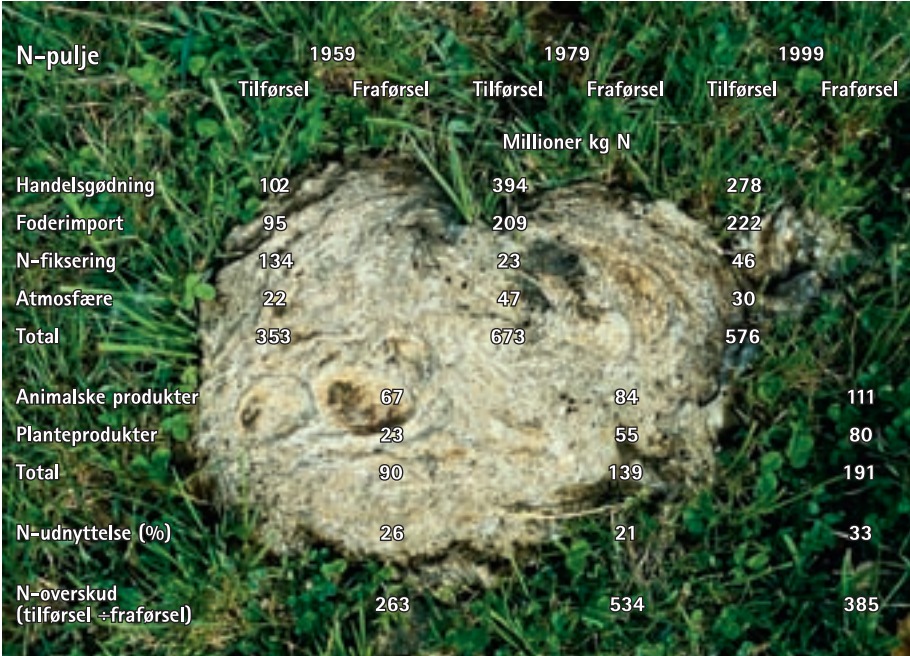
Udviklingen i forbruget af N og dets udnyttelse kan overordnet vurderes ud fra en national oversigt over *tilførsel* af N i handelsgødning, fodermidler, biologisk N<sub>2</sub>-fiksering og afsætning fra atmosfæren og *fraførsel* i produkter fra landbrugssektoren.

I 1999 blev der tilført 576 millioner kg N til landbruget i Danmark, men kun ca. 191 millioner kg genfandt i de produkter, som eksporteres fra sektoren. Det N, som optages i afgrøder, der efterfølgende benyttes som foder i husdyrproduktionen, indgår ikke, da det er processer i

landbrugets interne N-kredsløb. Husdyrgødning optræder heller ikke som en post, da den produceres og "forbruges" intern i sektoren. Til sammenligning tilførtes der 353 millioner kg N i 1959, hvoraf 90 mill. kg eksporteredes i produkter.

I 1959 udnyttedes kvælstoffet således med 26 %'s effektivitet. I 1999 var effektiviteten forøget til 33 %. Det betyder, at der i 1999 "forsvandt" eller "ophobedes" 385 millioner kg N i landbruget i Danmark, hvilket svarer til ca. 145 kg N pr. ha; denne post betegnes N-overskuddet.

9. N for kvælstof, P for fosfor og O for ilt.



N-pulje	1959		1979		1999	
	Tilførsel	Fraførsel	Tilførsel	Fraførsel	Tilførsel	Fraførsel
	Millioner kg N					
Handelsgødning	102		394		278	
Foderimport	95		209		222	
N-fiksering	134		23		46	
Atmosfære	22		47		30	
Total	353		673		576	
Animalske produkter		67		84		111
Planteprodukter		23		55		80
Total		90		139		191
N-udnyttelse (%)		26		21		33
N-overskud (tilførsel - fraførsel)		263		534		385

Tabel 9-1. Tilførsel og fraførsel samt udnyttelse og overskud af N i landbrugssektoren i 1959, 1979 og 1999. (Efter Kyllingsbæk, 1995, 2000).

Et så stort N-overskud (mere end 100 kg N pr. ha) forekommer kun i relativt få områder i Europa: Holland, Belgien, NV-Tyskland. I de seneste år er overskuddet i Danmark formindsket pga. af en reduceret anvendelse af handelsgødning.

Handelsgødning udgør næsten halvdelen af den tilførte mængde N efterfulgt af proteinrige fodermidler (oliekaer i figur 9-4). Biologisk N-fiksering hos bælplanter udgør i alt 8 % af den samlede tilførsel, og den resterende mængde N (8 %) hidrører fra det kvælstof, som afsættes fra atmosfæren i nedbør samt tilføres med slam og andre affaldsprodukter. Fra 1959 til 1979 skete der et markant fald i bidraget fra biologisk fikseret N, men 1999 var fikseringen fordoblet i forhold til 1979, da der nu

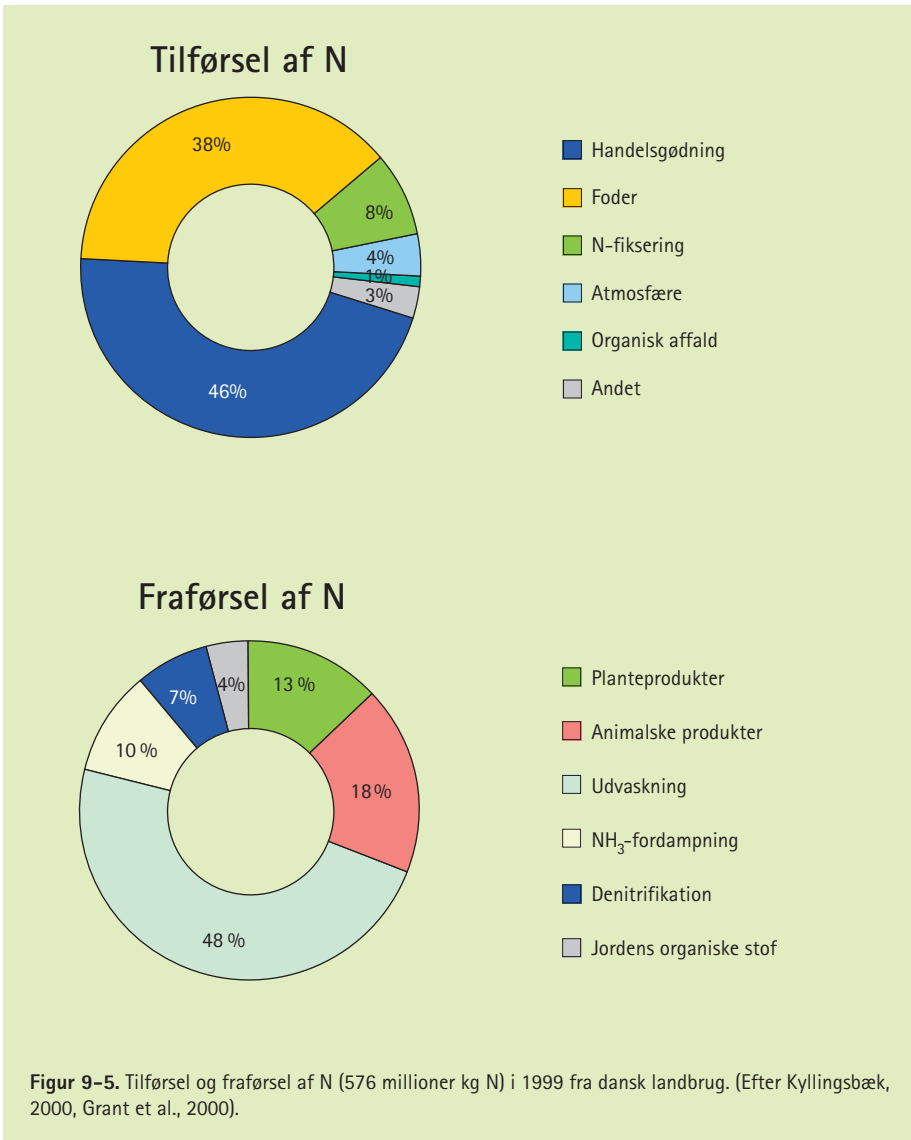
anvendtes flere kvælstoffikserende bælplanter i landbruget.

Ca. 13 % af det tilførte N vil være at finde i planteprodukter, som sælges fra landbruget, og ca. 18 % vil være at finde i animalske produkter som mælk, kød, æg osv. (figur 9-5). De resterende 67 %, som der ikke kan redegøres for, tabes fra systemet og bidrager herved til forurening af vandmiljøet, atmosfæren og de naturlige økosystemer samt i et mindre omfang til nettoopbygning af jordens organisk bundne kvælstof.

Det er bemærkelsesværdigt, at der er sket en forbedring af den effektivitet, hvormed N udnyttes fra 1959 til i dag, trods de meget større mængder, der tilføres til jordbruget. Omkring 1980 var udnyttelsen kun 21 %. Forbedringen til

33 % kan formentligt tillægges forskning, udvikling og de miljøhandlingsplaner, som er gennemført i de senere år. I disse er der især lagt vægt på at husdyrgødningen tillægges større værdi. Husdyrgødningen består både af organisk og uorganisk N, og værdien af husdyrgød-

ningen skønnes ud fra indholdet af uorganisk N og tilgængeligheden af det organisk N, som afhænger af fodring og typen af husdyr. Når værdien af husdyrgødningen sættes højere, dvs. en større andel af det organiske N forventes at være tilgængeligt for afgrøden efter minera-



lisering, vil mængden af handelsgødnings-N, som tilføres marker på husdyrbrugsbedrifter, blive reduceret, da der er en øvre grænse for den samlede mængde N, som må tilføres pr. ha.

På trods af den større viden om kvælstoffets kredsløb og den teknologiske udvikling udnyttes imidlertid kun ca. en tredjedel af det N, som tilføres agroøkosystemet. Der er derfor fortsat et stort behov for at forbedre N-udnyttelsen i dansk landbrug.

### Tabene og deres effekt på miljøet

I de senere år er landbrugets N-over-skud formindsket, hvilket er et fingerpeg om, at tabene har været mindre; fx er det beregnet, at udvaskningen af nitrat er reduceret med ca. 15-20%. Der er endnu et stykke vej, før vi når ned på niveauer, som er acceptable for det omgivne miljø. Vurdering af N-tabene fra

landbruget viser, at N-udvaskningen trods en stor national planlægnings- og lovgivningsindsats er større end den N-mængde, der findes i vegetabiliske og animalske produkter (figur 9-5). De resterende N-poster i fraførselsregnskabet udgøres af gasformige tab af ammoniak fra mark og stald og biologisk denitrifikation af nitrat til  $N_2O$  (lattergas) og  $N_2$ .

De seneste 15 års markante forskningsindsats i Danmark og internationalt har som nævnt givet en betydelig viden om processer i kvælstoffets kredsløb og koblingen til kulstofkredsløbet, herunder om mulighederne for at effektivisere afgrødernes udnyttelse af kvælstof og for at "tætne" N-kredsløbet, således at tabene reduceres. I det følgende omtales de tre mest betydningsfulde tabsposter: nitratudvaskning, ammoniakfordampning og denitrifikation.

## Nitratudvaskning

Udvaskning af nitrat skyldes, at nitrat er opløseligt i vand, og at det findes i jorden på tidspunkter uden plantedække, eller når planter på grund af ringe vækst ikke optager nitrat fra jorden. Når nedbøren så om efteråret og vinteren er større end fordampningen, vil det resultere i en nedadgående vandbevægelse, som vil føre nitrat ned til drænen eller længere ned til grundvandet.

Hovedparten (mere end  $\frac{3}{4}$ ) af det N, som om foråret tilføres med syntetisk gødning til en efterårssået afgrøde, fx vinterhvede, vil blive optaget i afgrøden, hvis det tilføres i en afpasset mængde. Derimod optager forårsetablerede afgrøder kun ca. halvdelen af den tilførte syntetiske gødning, og en væsentlig del ind-

bygges i jordbundens mikroorganismer som organisk stof. Det gødnings-N, som er indbygget i jordens organisk stof, dvs. døde mikroorganismer, kan delvist frigives som ammonium og omdannes til nitrat om efteråret, når jordens mikroorganismer omsætter kvælstof i planterester, husdyrgødning og humus (se s. 163).

Problemerne med udvaskning er størst i områder med intensivt husdyrhold, lette jorder og megen nedbør. Når husdyrgødningen tilføres til en voksende afgrøde, kan ammonium og noget af det letnedbrydelige organisk bundne N udnyttes af afgrøden i vækstsæsonen, men hovedparten bidrager til jordens organisk stof, og en del frigøres om efteråret og i de kommende år.



**Figur 9-6.** Kødkvæg på vedvarende græsningsarealer ved Risø i Roskilde Fjord. Ved denne ekstensive driftsform er der både mulighed for produktion af kød af høj kvalitet og for at benytte kvæget i naturpleje. Hvis ikke strandengsarealer som dette afgræsses, vil de hurtig ændre karakter på grund af tilgroning. Foto: E.S Jensen.

Fordelingen af husdyrproduktion i Danmark er skæv, hvilket vil sige, at der på sandede jorder i Jylland findes langt flere husdyr end på de bedre lerjorder på Sjælland (se også figur 4-1). Der er således flere faktorer, som forstærker miljøproblemerne med kvælstof, dels den store koncentration af husdyr og dels de sandede jorder, hvor igennem de store mængder nitrat, som frigøres under omsætningen af gødningen, lettere siver ned til grundvandet. Det såkaldte "nitratbælte", som er det landområde, der strækker sig fra Djursland op over Himmerland, er det fysiske udtryk for denne problemstilling.

### Hvad er problemet med nitrat?

Det nitrat, som via vandløb bringes til søer samt indre og kystnære farvande

kan forrykke den økologiske balance i disse økosystemer (eutrofiering). En forøget vækst af alger i vandmiljøet, som, når de dør og omsættes, giver anledning til iltsvind, kan betyde, at bundvegetation, bundfauna og fisk dør. Genetablering af et normalt liv i sø- eller havbunden kan tage mange år.

Nitrat kan også transporteres til dybere liggende jordlag og til grundvandet. Overvågning af grundvandets kvalitet i 2000 viste, at ca. 24 % af de såkaldte overvågningsboringer indeholdt mere end den vejledende grænseværdi for drikkevand på 25 mg/l, og 18 % indeholdt mere end de tilladelige 50 mg  $\text{NO}_3$ /l vand. I de seneste 10 år er 500 mindre vandværker lukket pga. nitrat i grundvandet. Det har ikke været muligt at konstatere væsentlige ændringer i

grundvandets indhold af nitrat siden vedtagelsen af Vandmiljøplanen i 1987. Det skyldes, at hovedparten af det grundvand, der er analyseret, er dannet før vedtagelsen af Vandmiljøplan I; man kan først forvente at se effekter i den kommende 10-års periode.

### Har nitrat betydning for vor sundhed?

Store mængder nitrat i drikkevandet kan være farligt for spædbørn, idet nitrat efter indtagelse omdannes til nitrit, som er giftigt for spædbørn. Det er imidlertid meget sjældent, at drikkevand i Danmark indeholder nitrat i mængder, der kan foranledige forgiftninger på spædbørn. Engelske undersøgelser har vist, at det nitrat, vi indtager med drikkevand (de nuværende gennemsnitlige koncentrationer i UK), udgør ca.  $\frac{1}{5}$  af vores to-

tale nitratindtag. Resten kommer fra fødevarer, især grøntsager.

Vi producerer desuden selv nitrat i kroppen, som omdannes til nitrit – og der er fremsat teorier om, at nitrat via nitrit kan have en vigtig funktion ved at beskytte mod infektioner i mund og tarmssystem.

Selvom der ikke er vist klare sammenhænge mellem nitrat i drikkevand og vor sundhed, bør vi forsøge at undgå alle former for forurening af vores drikkevand.

### Kan vi reducere udvaskningen af nitrat til vandmiljøet yderligere?

Svaret er ja. Desto større mængder N, som cirkulerer i agroøkosystemet, desto større er sandsynligheden for tab og dermed en dårlig N-udnyttelse. En reduktion af de mængder N, som tilføres med



**Figur 9-7.** Produktion af frilandsgrise kan også give anledning til tab af N, især når vegetationen forsvinder som følge af grisenes roderi. Hvis græsset får lov at vokse til igen, kan det optage en stor del af det N, som afsættes med gødningen (se også side 22).



**Figur 9-8.** Efterafgrøder dyrkes for at optage nitrat fra jorden om efteråret og forebygge nitratudvaskning. Undersøgelser viser, at rajgræs sået sammen med hovedafgrøden om foråret og korsblomstrede afgrøder sået efter hovedafgrøden er de mest effektive afgrøder til at "opfange"  $\text{NO}_3$ . Når efterafgrøden pløjes ned om foråret, frigøres noget N fra plantematerialet, og dette kommer den følgende afgrøde til gavn. Foto: E.S. Jensen.

husdyrgødning og handelsgødning, og en bedre synkronisering af tilførslen af plantetilgængeligt N med de tidspunkter, hvor planterne optager N, er to væsentlige indsatser, som kan føre til en bedre udnyttelse af N.

Reduceret tilførsel af husdyrgødning på intensive husdyrbrug er her et vigtigt tiltag. Store mængder husdyrgødning pr. arealenhed er et af de væsentligste problemer, og her kan en strukturændring med en kraftig reduktion i tætheden af husdyr i nogle områder være påkrævet. En bedre fordeling af husdyrproduktionen i Danmark vil også være et redskab, da der herved sker en reduktion i antallet af dyreenheder i nogle områder. Eksensivering af husdyrproduktionen er også en mulighed, fx mere kødkvæg på

græs og færre intensive svinebrug (figur 9-6 og 9-7).

En bedre lokal fordeling af husdyrgødning i områder med både husdyrbrug og plantebrug bør stimuleres via et tættere samspil mellem de forskellige brugstyper. Bedre metoder til at vurdere værdien af husdyrgødning som kilde til plantenæringsstof for de følgende afgrøder skal udvikles, og en ændring i den kvalitative sammensætning af husdyrgødningen mod et mindre N-indhold via en bedre foderudnyttelse vil ligeledes bidrage til en mindre N-frigørelse om efteråret.

Nitratudvaskningen kan yderligere reduceres ved dyrkningsmæssige tiltag, fx ved at nedsætte mængden af syntetisk N-gødning yderligere, tilføre den på de

mest optimale tidspunkter og former afhængigt af afgrøde og variationen i marken (se side 130). Desuden er plantedække en vigtig faktor i reduktionsbestræbelserne. Fx vil tidligere såning af afgrøder om efteråret, end det er tilfældet i dag, reducere udvaskningen, fordi en kraftigere vækst vil betinge et større optag af N. Endelig vil dyrkning af efterafgrøder optage N om efteråret og i det tidlige forår (figur 9-8).

En bedre sammensætning af afgrøder-

ne i sædskiftet ud fra de givne klimatiske og jordbundsmæssige forhold er også en vigtig faktor. Der er fx forskel på hvor meget N, der frigøres på toppen af og neden for en bakke, og det bør der tages hensyn til ved udbringning af gødning.

Nye former for halmnedmuldning og jordbearbejdning, udyrkede randzoner omkring markerne og våde enge er yderligere instrumenter, der kan spilles på for at reducere udvaskningen af nitrat fra dyrkningsjorden.

## Ammoniakfordampning

Tab af ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) ved fordampning forekommer især fra jordbrug med et intensivt husdyrhold. Her fordamper ammoniak både fra stald og mark. Mere end 30 % af den mængde kvælstof, som dyrene afsætter i urin og ekskrementer, tabes i form af ammoniak fra afgræsningsmarken, i stalden, ved opbevaring og spredning. Fra dansk landbrug fordamper i alt ca. 80.000 tons ammoniak til atmosfæren. Hovedparten stammer fra husdyrproduktionen, men ca. 20.000 tons hidrører fra udbringning af handelsgødning og direkte fordampning fra afgrøderne. Det største ammoniaktab sker fra stalde, især fra stalde med dybstrøelse.

Tidligere udbragtes gyllen ved bredspredning over afgrøden eller jorden, men der er nu udviklet udstyr, som kan nedfælde gyllen i render i jorden eller lægge den ud mellem rækkerne i en voksende afgrøde. Ammoniaktabene kan reduceres til mindre end  $\frac{1}{4}$  af tabene ved bredspredning. Når Vandmiljøplan II er implementeret forventes det, at ca. 75 % af husdyrgødningen lægges ud med slanger eller nedfældes, og at kun ca.

25 % tilføres med den gammeldags bredspredning.

I de seneste 15 år er tabene under og efter udbringning ca. halveret, hvilket udgør den væsentligste reduktion i ammoniaktabene. Derfor udgør tabene fra stalde nu den største post på ca. 27.000 t N pr. år.

### Hvad er problemet med ammoniak?

Problemet er, at ammoniak kan transporteres over store afstande og afsættes i følsomme naturlige og seminaturlige økosystemer, fx heder, skove, søer osv. I områder med intensiv husdyrproduktion kan ammoniakafsætningen komme op på over 40 kg N pr. ha. I de naturlige økosystemer fører afsætningen til N-beregelse ud over det niveau, som er optimalt for det pågældende økosystem. Herved forrykkes deres økologiske balance med tab af biodiversitet m.m. som resultat.

Tålegrænser er udtryk for de grænser/niveauer, som må respekteres af hensyn til de langsigtede konsekvenser for det pågældende økosystem. Forskellige økosystem har forskellige tålegrænser

for N. Heders tålegrænser er fx meget lavere end naturlige græsarealer og skovs.

Det ammoniak, som afsættes i Danmark, kommer ikke blot fra danske kilder, men også fra udlandet, men vi forurener med mere ammoniak uden for landets grænser end den mængde ammoniak, der afsættes i Danmark som hidrører fra vore naboer.

### Kan ammoniaktabene reduceres yderligere?

Svaret er ja. Ammoniaktabene kan dels reduceres ved en reduktion i husdyrbrugens intensitet, dels ved hjælp af andre værktøjer. Der er blandt andet muligheder for at forbedre dyrenes udnyttelse af N, således at mindre N afsættes med urinen, der er den dominerende kilde til ammoniakfordampning. Det kan gøre gennem en optimering af foderkvalitet og -sammensætning.

En anden mulighed består i at genvinde en større del af ammoniakken fra staldluften og genanvende kvælstoffet. Overdækning af gødningslagre, fx gylle-



**Figur 9-9.** Bredspredning af gylle. Denne form for spredning, hvor der tabes store mængder N ved ammoniakfordampning forventes kun at blive benyttet for udbringning af 25 % af husdyrgødningen, når Vandmiljøplan II er iværksat i fuldt omfang i 2003. Foto: M. Nørgaard Hansen.

tanke, er også af afgørende betydning. Iltfri opbevaring bør foretrækkes, og kompostering undgås, idet ilttilgang til gødningen forstærker ammoniakfordampningen.

Endelig er videreudvikling af nedfældningsmetoder og den rette timing af nedfældning i forhold til afgrødens N-behov af stor betydning for at reducere tabene i marken. Samlet vil disse foranstaltninger have en stor effekt.

## Denitrifikation

Den sidste tabsproces, som skal omtales her, er tabet af N via denitrifikation. Denitrifikation er overvejende en biologisk proces, hvorved bakterier omdanner nitrat til lattergas ( $N_2O$ ) og  $N_2$ . Hvis denne omdannelse går til  $N_2$ , er nitrat reduceret til en uskadelig form, men der er tale om tab af en ressource fra agroøkosystemet. Lattergas er derimod en meget kraftigt virkende drivhusgas, der bidrager til nedbrydning af ozonlaget, og som har en lang halveringstid i atmosfæren.

Denitrifikation finder sted i jord med

et lavt iltindhold, fx efter nedbør, når der er nitrat og organisk stof til stede. På grund af at jordstrukturen på lerjord oftere giver anledning til iltfri zoner end det er tilfælde på en sandjord, er denitrifikation normalt størst i lerjord, og når der tilføres husdyrgødning. Det er vanskeligt at måle denitrifikation på grund af processens store rumlige og tidlige variation. På sandjord kan denitrifikation udgøre 0-20 kg N pr. ha. pr. år, og på husdyrgødet jord vil den typisk være ca. 30-50 kg N pr. ha. pr. år.

Dræning af en væsentlig del af det danske agerland i starten af 1900-tallet har resulteret i nedsat denitrifikation. I Vandmiljøplan II er der kalkuleret med genetablering af vådområder, hvor der ved denitrifikation skal fjernes nitrat fra

grundvand eller fra drænvand, der overrisles områderne. Landmanden får kompensation for at udlægge våde enge, men endnu synes der langt til målet om 16.000 ha nye våde enge ved udgangen af 2003.

## Kvælstofanvendelse i de nærmeste år

I et landbrug med en meget stor og intensiv produktion af mælkeprodukter og svin til eksport, hvor der som proteinkilde anvendes importeret sojaprotein, er det meget tvivlsomt, om den nuværende viden om processer i kvælstofkredsløbet og kendte metoder til at nedsætte tab vil føre til yderligere markante ændringer i de uønskede miljøeffekter af kvælstof.

I udvikling af et mere bæredygtigt samfund er det nødvendigt at opstille mere konkrete miljømål. Det kan fx være at videreudvikle de nævnte tålegrænser og at omlægge en større del af jordbruget til bæredygtige former, der tager større hensyn til naturen, fx økologisk jordbrug. Et overordnet mål om balance mellem til- og fraførsel af N i landbruget (se også figur 9-5) vil kunne danne baggrund for grønne afgifter på gårdniveau i fremtiden. I balancen skal der tages hensyn til, at nogle N-tab er uundgåelige – størrelsen heraf kan vurderes ud fra tab i naturområder med en sammenlignelig placering (jordtype osv.).

Sådanne mål på gårdniveau ville harmonere med princippet om, at det er nødvendigt at erstatte de næringsstoffer, som fjernes fra marken. Såfremt der ikke er en rimelig balance, vil dette kunne føre til udpining af jorden eller overskud af N, som tabes til miljøet. Et grønt regnskab for kvælstof kan benyttes i relation til grønne afgifter for både over-

og underskud af N på den enkelte bedrift og regionalt.

Dette vil indvirke på strukturen i landbruget, da der i nogle dele af landet vil være behov for at ændre dyrkningspraksis, idet bestemte produktioner ikke vil være rentable med de afgifter, som vil forekomme på de givne lokaliteter, fx pga. af stor udvaskning af N på bestemte jordtyper.

Der vil være behov for en videreudvikling af metoder til at opgøre kvælstoftilførslen på den enkelte gård, fx via biologisk kvælstoffiksering og lokal afsætning af N fra atmosfæren. Der vil også være behov for at udvikle nye skånsomme produktionsformer og økonomisk kompensation til landmænd i disse områder, som det er tilfældet i de såkaldte Særlige Følsomme Landområder (SFL).

### Vil korn kunne fikseres sit eget N i fremtiden?

Til trods for store fremskridt inden for molekylærbiologi er det ikke lykkedes at få kornarter til at indgå en symbiose med *Rhizobium*-bakterier om at fikseres luftens N<sub>2</sub>, fx ved at overføre bælgplanternes gener for rodknolddannelse til ris eller hvede, eller at overføre de gener, som gør bakterierne i stand til at fikseres N, til planterne og derefter få dem udtryk i planterne, så planten evt. kan fikseres N uden bakterier. Et gennembrud

synes ikke at være lige om hjørnet – ej heller inden 2025. Årsagen er de mange gener, som er involveret, og som skal kunne fungere i et kompliceret samspil.

Nogle forskere mener, at der er mulighed for at udvikle ikke-symbiotisk  $N_2$ -fiksering, hvorved planterødderne kan tiltrække bestemte bakterier, som så kan få energi til at fikserer N ved rodoverfladen fra planten i form af rodeksudater. Det vil være et mindre kompliceret skridt, men set fra et miljøsynspunkt ikke så optimalt, som den plante, der selv kan fikserer  $N_2$ .

Når planten nemlig fikserer sit eget N, er der en tæt kobling mellem N-behov og syntese af N, idet plantens fotosynteseprodukter regulerer den hastighed, hvormed  $N_2$  fikseres. Da kvælstoffikseringen foregår “inde i planten” vil risiko for tab og konkurrence om kvælstoffet fra ukrudt og mikroorganismer medføre, at tabene minimeres i vækstsæsonen. Når kvælstof derimod fikseres i ude i jorden, vil mikroorganismer og ukrudt kunne udnytte dette kvælstof, og N kan tabes ved denitrifikation, ammoniakfordampning og udvaskning og således resultere i præcis de samme miljøproblemer, som mineralske gødninger, dog formentligt i mindre omfang.

Der er næppe tvivl om, at udvikling af kvælstoffikserende korn vil være et meget betydeligt skridt i retning af at sikre den globale fødevarerforsyningen og samtidig få færre kvælstofbetingede skader på det omgivende miljø. Udviklingen af nye kvælstoffikserende planter bør forgå i tværfaglige forskergrupper med plantefysiologer, jordbundsmikrobiologer, genetikere, plantemolekylærbiologer, agronomer m.fl., således at de nye planter udvikles i et helhedsorienteret perspektiv, herunder at det sikres at teknologien kommer verdens befolkning til

gavn. Hvis ikke der er helhedsorientering i forskning og udvikling af kvælstoffikserende kornplanter, er der en fare for, at vi ender op med planter, der måske kan fikserer N, men som eventuelt miljømæssigt vil skabe større risici og problemer end syntetisk gødnings-N.

### **Plantereguleret N-frigørelse fra jord og gødning?**

Med de senere års større indsigt i den mikrobielle økologi i det rodnære miljø (rhizosfæren) bliver det måske muligt at udvikle plante-mikrobe-systemer, hvor planten via signalmolekyler kan påvirke mikrobiel aktivitet og omsætningen af organisk stof i jorden. Dette vil være en nøgle til at regulere mineraliseringen af N, således at den tilpasses til plantens N-behov og kun finder sted, når der er planter til stede.

De seneste års udvikling inden for forskning i rhizosfæreprocesser med anvendelse af rapportørgener i mikroorganismer har gjort det muligt kvantitativt og kvalitativt at belyse, hvorledes organismene reagerer på forskellige kulstof-forbindelser fra roden, næringsstofbegrænsninger m.m. Man kan også forestille sig, at planten via signalstoffer fra roden kan påvirke frigørelsen af N fra langtidsvirkende N-gødninger i takt med behovet for N. Hvis disse gødninger kan fungere over en længere årrække, kan energi til transport og spredning spares.

Der er sket en betydelig udvikling inden for anvendelse af informationsteknologi i landbruget i de seneste år. Denne teknologi vil i fremtiden føre til udvikling af avancerede metoder til at tilføre kvælstofgødning stedspecifikt afhængigt af plantens behov og jordens evne til at frigøre N (se side 128). Denne teknologi og udvikling af andre metoder vil dog

fortsat afhænge af prisen på handelsgødningens-N og/eller miljøafgifter i forbindelse med uønskede udslip af N fra landbruget.

### Omlægning til økologisk jordbrug

I økologisk jordbrug arbejdes der ud fra formulerede målsætninger om bl.a. at optimere recirkulering af næringsstoffer, bevare jordens frugtbarhed og så vidt mulig undgå at forurene det omgivende miljø ved produktionen. Der er således et klart defineret udgangspunkt i miljø og naturhensyn, som medfører, at der i økologisk jordbrug ofte er lavere udbytte end i konventionelt jordbrug. Omlægning til økologisk jordbrug eliminerer dog ikke tab af N, men adskillige under-

søgelser viser, at tabene generelt er mindre end i konventionelt jordbrug. Dette skyldes især, at potentialet for udvaskning er mindre, fordi mindre mængder N cirkulerer i agroøkosystemet, og fordi N-overskuddet er væsentligt mindre.

I et økologiske jordbrug er kvælstof-forsyningen baseret på  $N_2$ -fiksering hos bælplanter. En stor del af de nuværende danske økologiske brug er baseret på mælkeproduktion. I disse systemer er kløvergræsset en vigtig komponent, som bidrager med grovfoder, fikseret  $N_2$  og organisk stof til systemet. New Zealand-ske undersøgelser har vist, at kvælstoftabet fra mælkeproducerende bedrifter med overvejende biologisk kvælstoffiksering som N-kilde er lang mindre end



**Figur 9-10. a)** "Den kultiverede ørken" – konventionel hvedemark uden en eneste ukrudtplante. **b)** Samdyrket afgrøde af byg og linse. I denne afgrøde komplementerer planterarterne hinanden. Linse kan fikserer luftens kvælstof, hvorved byg får mulighed for at udnytte en relativt større del af jordens nitrat og ammonium. Bygplanterne giver samtidigt støtte til linse, så udbyttetab som følge af lejesæd reduceres. Foto: E.S Jensen.

tab fra bedrifter, hvor handelsgødning var den dominerende N-kilde. Udvaskningen af nitrat var fx hhv. 30 og 130 kg N pr. ha, og når produktionsniveauet blev indregnet, var de samlede tab hhv. 1,4 og 2,6 kg N pr. kg N i produkterne.

Der er et stort behov for at udvikle økologiske jordbrugssystemer uden mælkeproduktion, især planteproduktionssystemer, evt. med et mindre husdyrhold. I sådanne systemer, hvor kløvergræs kun vil indgå i et mindre omfang i sædskiftet, fx som grøngødning, er det vigtigt at få kendskab til N-balancerne, således at det sikres, at de kvælstof-

mængder, der bortføres fra systemet med afgrøde og evt. tab erstattes af  $N_2$ -fiksering og evt. husdyrgødning via aftaler med økologiske nabohusdyrbrug eller rene bygødnings (se side 192).

Økologisk husdyrproduktion har behov for økologisk produceret proteinføde, især hvis økologisk svine- og fjerkræproduktion skal udvikles i fremtiden. Her er der gode muligheder for at forbedre dyrkningen af frøbælgplanter, fx ærter, bønner og lupiner. Herved tilføres der N til agroøkosystemet via  $N_2$ -fiksering, og importen af sojafodermidler bliver overflødig.

## Vision for anvendelse af kvælstof i dansk landbrug år 2025

Det er min vision, at en stor del af den viden om kvælstofkredsløbet, der er fremkommet via forskning i firserne og halvfemserne, vil være nyttiggjort i landbruget i år 2025. En væsentlig større del af landbruget end i dag vil være omlagt til økologisk drift, men der vil fortsat være en stor eksport af fødevarer fra dansk landbrug. Landbrugssektoren vil have langt mere fokus på miljøeffekter og kvalitet af fødevarereproduktionen end det er tilfældet i dag, og priserne på fødevarer vil være højere.

Målet for faktor-4-princippet vedrørende anvendelse af N i landbruget er forhåbentlig nået i 2025. Dette princip lægger op til, at der ved en given produktion bør stræbes efter at anvende halv så mange ressourcer dobbelt så effektivt. Det vil sige, at hvor vi i dag finder 33 kg N i det færdige produkt ud af 100 kg tilført N, vil det være 66 % ud af 50 kg N ved samme produktionsniveau. Kvælstofoverskuddet vil herved være re-

duceret betydeligt pga., at tilførslerne af N er reduceret betydeligt, og at det tilførte N udnyttes dobbelt så effektivt som i 2000. Det vil være en stor udfordring for forskning og udvikling at nå dette mål. I 2025 vil der være mere fokus på udnyttelse af jordens næringsstofressourcer, især N, via dyrkning af afgrøder med større diversitet i rum og tid med hensyn til udnyttelse af næringsstoffer, fx blandinger af afgrødearter med overfladiske og dybtgående rodsystemer, dyrkning af korn og grøngødning i striber på det samme areal samt dyrkning af enårige blandingsafgrøder af kvælstoffikserende planter og ikke-fikserende planter i et væsentligt større omfang end det er tilfældet i nutidens økologiske jordbrug. Proteinafgrødeproduktionen i Danmark vil ligeledes være væsentligt større i 2025 end i dag. Hermed er behovet for import af sojabønner og anvendelsen af handelsgødning væsentligt reduceret (figur 9-10).

I år 2025 vil nogle former for husdyrproduktion være yderligere intensivret/industrialiseret, dog under hensyntagen til dyrenes velfærd og det omgivende miljø. Svinefabrikker vil være placeret i agroindustrielle områder. I sådanne fabrikker vil det være muligt at have fuld kontrol med alle næringsstofab, inkl. genindvinding af ammoniak fra luften. Husdyrgødningen passerer biogasanlæg og systemer for udvinding/oprensning af næringsstoffer, som så kan genanvendes i planteproduktion. Tætheden af husdyr pr. arealenhed i det åbne land vil være langt mindre end i dag, og marker og stalde har sensorer, som kan registrere udslip af N, hvad enten det er til grundvand, vandløb eller atmosfære. Producenten må derefter betale afgifter for de konkrete udslip. Der vil være udviklet et bedre samspil mellem husdyr- og plantebrug med hensyn til udnyttelsen af husdyrgødningen.

I 2025 er den enkelte forbruger mere bevidst om sin rolle i relation til den måde, hvorpå fødevarerne produceres. Norske undersøgelser viser, at der kræ-

ves ca. 20 kg N til at producere 1 kg animalsk protein-N, hvorimod kun 3 kg N er påkrævet til at producere et kg vegetabilsk protein-N. En ændring af vor livsstil i retning af at skifte en væsentlig del af det animalske protein i kosten ud med vegetabilsk protein og reducere proteinindtaget vil påvirke landbrugets produktion og balancen i N-regnskabet kraftigt. Samtidigt kan vi forbedre vor sundhed.

Vi må vælge fødevarer, som så vidt muligt er produceret lokalt under hensyn til miljøet (fx økologiske fødevarer), dvs. være engageret i hvor og hvordan fødevarerne produceres. Et vigtigt aspekt er at medvirke til, at fødevarerproducenten får en rimelig pris for sine produkter, herunder at vi stiller krav til gennemsigtighed i prisdannelsen og er indstillet på at betale mere for kvalitetsfødevarer produceret under hensyn til dyrevelfærd, miljø og natur. Endelig må vi bidrage til en bedre recirkulering af næringsstoffer fra bord til jord, fx via kildesortering af affald, således at "rene" næringsstoffer kan recirkuleres til agerjorden.

## Afslutning

Firsernes og halvfemsernes miljøpolitik og -lovgivning er nu ved at sætte synlige spor i miljøet. Undersøgelser i 2001 tyder på, at vandkvaliteten i de kystnære og åbne danske farvande er i bedring, men endnu synes der ikke at være markante effekter at se på grundvandets indhold af nitrat. I vandløb er det andre faktorer, som påvirker miljøtilstanden, og i søer har fosfor størst betydning for vandkvaliteten.

Værdien af vore fælles goder, fx et rent grundvand, en ren atmosfære og

naturområder uden forurening må prioriteres højere i fremtiden. Her må den enkelte landmand erkende, at hans eventuelle overgødskning med N kan have alvorlige konsekvenser for grundvandskvaliteten, og forbrugeren må erkende, at han via sit valg af fødevarer har et medansvar for den måde, der produceres på i landbruget.

Hvis vi vil medvirke til at virkeliggøre en vision om et bæredygtigt samfund, som ikke blot handler om at foretage en oprydning i forhold til de problemer, vi

allerede har skabt, må vi udnytte naturressourcerne mere effektivt. Her, hvor det altså drejer sig om at ændre vore væner, har økonomiske redskaber vist sig meget effektive. En løsning kan derfor være at sætte en pris på naturressourcer og økologiske "tjenester", således at prisen på fødevarer afspejler de miljømæssige omkostninger, der har været forbundet med deres produktion – fx omkostningen til at rense grundvand for nitrat. Hvis fødevarer er produceret fra ikke-fornybare ressourcer, transporteret fra den anden side af kloden med fly, indpakket i materiale, som ikke kan recirkuleres osv., så skal dette afspejles i prisen på produktet.

Fremtidens landbrugsstøtten i EU må desuden kobles tæt til miljøhensyn, det såkaldte cross-compliance-princip, hvor de landmænd, som tager mest hensyn til miljøet, honoreres for dette.

Uanset visionens udseende og de politiske beslutninger vil kvælstof fortsat være en afgørende produktionsfaktor i landbrugets planteproduktion og et potentielt miljøproblem. Det må være målet, at det kvælstof, der tilføres agroøkosystemet via biologisk eller industriel fiksering af  $N_2$  – og som ikke fraføres med de producerede fødevarer – hovedsageligt kommer til at forlade systemet som uskadeligt  $N_2$ . Herved vil kredsløbet nemlig være sluttet.