

Kvælstofbelastning af havmiljøet

Henrik Paaby
Flemming Møhlenberg

Danmarks Miljøundersøgelser, 1996

TEMA-rapport fra DMU, 1996/9
Kvælstofbelastning af havmiljøet

Forfattere: Henrik Paaby¹, Flemming Møhlenberg²

¹Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Systemanalyse

²Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Havmiljø og Mikrobiologi

Udgiver: Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser©
Udgivelseår: December 1996

Layout: ArtGrafik

Forsidefoto: IFOT

Fotos: Peter Bondo Christensen: side 6-7, 31

Biofoto: side 9, 19, 20

Landbrugets Rådgivningscenter: side 22 og 23

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Tryk: Scanprint AS

Papir: Cyklus offset

Sideantal: 40

Oplag: 1500

ISSN: 0909-8704

ISBN: 87-7772-284-1

Pris kr. 60,00

Klassesæt à 30 stk: 900 kr.

Abonnement (5 numre): 225 kr.

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

Købes hos:

Danmarks Miljøundersøgelser

Frederiksborgvej 399

Postboks 358

DK-4000 Roskilde

Tlf. 46 30 12 00

Fax 46 30 11 14

Miljøbutikken

Information og bøger

Læderstræde 1

DK-1201 København K

Tlf. 33 92 76 92 (Information)

Fax 33 37 92 92 (Bøger)

Forord	5
Eutrofiering af havmiljøet	6
Kilder til kvælstoftilførsler	10
Landbrugets udledninger af kvælstof	15
Hvordan kan landbrugets kvælstofbelastning reduceres - og hvad koster det?	21
Effekter af en ændret kvælstofbelastning i fjorde	28
Sammenfatning	34
Litteratur	38

Danmarks Miljøundersøgelser

Tidligere udgivelser i serien TEMA-rapporter fra DMU



Forord

Forureningen af vandmiljøet med næringsstoffer er genstand for stor opmærksomhed fra såvel offentlighedens side som forskernes side. I det seneste ti-år har det specielt været landbrugets udledninger af kvælstof, der har været i fokus. Øgede tilførsler af kvælstof til landbruget (foder og gødning) betyder på den ene side, at der kan tjenes penge på en højere landbrugsproduktion, men betyder på den anden side, at spildet af kvælstof til vandmiljøet øges - og det går ud over såvel grundvandskvaliteten som kvaliteten af havmiljøet.

I denne TEMA-rapport fokuseres på kvælstof-forureningen af havmiljøet. Der redegøres i overskuelig form for omfang

og kilder til kvælstofbelastningen, og der præsenteres model-beregninger af økonomiske og økologiske konsekvenser af at begrænse kvælstofbelastningen.

Temarapporten er baseret på en række faglige rapporter som er angivet i rapportens litteraturliste. Den interesserede læser kan hente grundigere og mere detaljerede oplysninger i disse rapporter. Specifikke referencer til litteraturlisten findes kun i rapportens figurer og tabeller.

Temarapporten har i udkast været gennemlæst og kommenteret af medarbejdere i Danmarks Miljøundersøgelser og Miljøstyrelsen.

Eutrofiering af havmiljøet

Hvad er eutrofiering?

I det seneste årti har det danske marine miljø været genstand for særlig bevågenhed. Det skyldes konstateringen af, at miljøtilstanden er forringet, især i fjordene og de kystnære marine områder. Denne konstatering førte til iværksættelsen af den såkaldte NPo-plan i 1985 og Vandmiljøplanen i 1987.

Forringelsen af miljøtilstanden består i en ændret biologisk balance, hvor masseopblomstring af alger i forårs- og sommerperioden forringer livsvilkårene for naturligt forekommende plante- og dyrearter i de pågældende områder. Fænomenet kaldes *eutrofiering*, og skyldes en øget tilførsel af næringsalte til de marine områder. Væksten af planktonalger og andre planter i vandmiljøet er hovedsagelig

styret af næringsstofferne kvælstof (N) og fosfor (P). Under naturlige forhold er både næringsstofftilførslen og væksten af vandplanter forholdsvis ringe, og der er et alsidigt og stabilt plante- og dyresamfund. Ved øget næringsstofftilførsel kan dette stabile samfund bringes ud af balance. Mange steder i

de kystnære områder fører en øget næringsstofftilførsel til en øget forekomst af etårige bundplanter, nogle gange med masseforekomst af trådalger. Masseforekomster af trådalger forringer livsvil-

kårene for bundens dyreliv og for fiskenes gyde- og opvækstmuligheder. Ved endnu højere næringsstofftilførsel øges mængden af planktonalger kraftigt, og vandet bliver uklart, således at levebetingelserne for planter og dyr forringes yderligere. Det uklare vand bevirker, at sollyset ikke kan trænge ned til bundplanterne og disse forsvinder. I de åbne havområder vil en større mængde af planktonalgerne bundfældes, og der vil være et forøget iltforbrug, som igen kan resultere i iltsvind og fiskedød.

Er det kvælstof eller fosfor, der er skurken?

Mens det overvejende er den tilstedeværende mængde af fosfor, der begrænser væksten af alger og planter i søer, er det

Eutrofiering:

En berigelse af vandmiljøet med næringsstof, der fører til en øget produktion af planktonalger og højere vandplanter.

Den forøgede algeproduktion forringer vandkvaliteten og værdien af den udnyttelse, som foregår af vandområdet



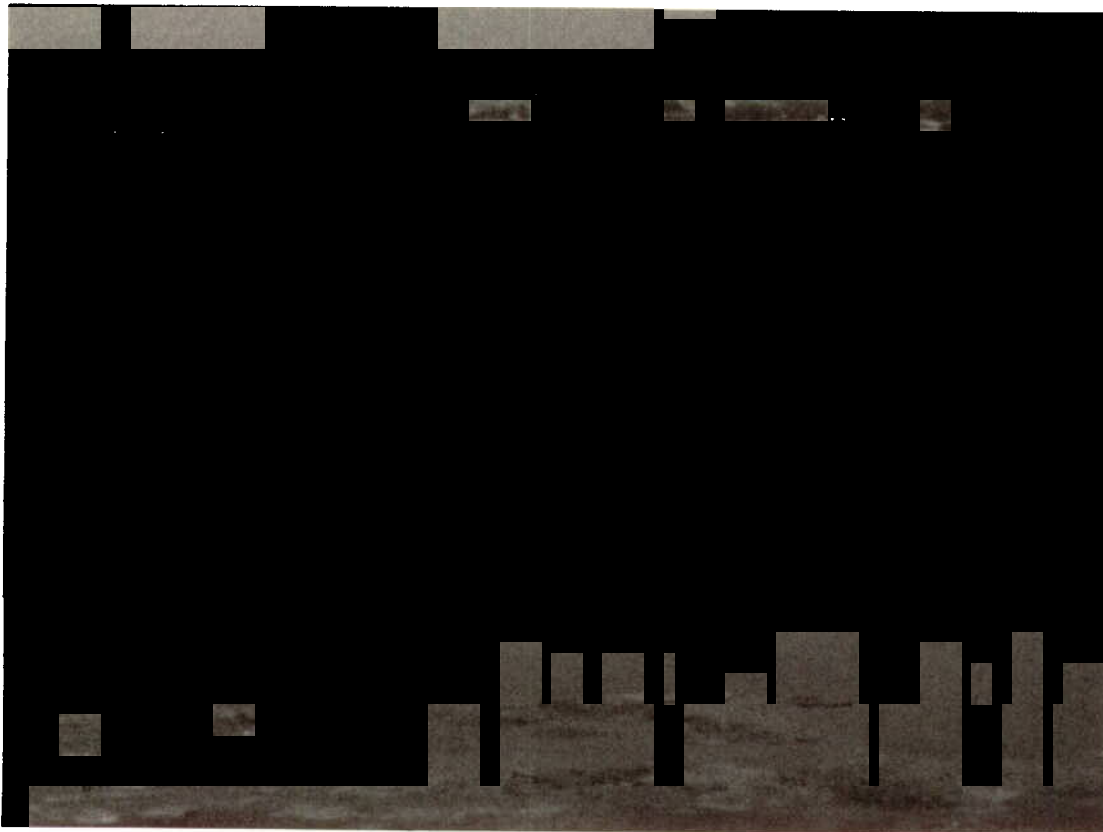
altovervejende kvælstof, der virker begrænsende for algevæksten i det marine miljø. Det betyder, at man for at forbedre kvaliteten af det marine miljø først og fremmest må rette opmærksomheden mod kvælstoftilførslerne til havet. Der kan dog forekomme tilfælde, hvor visse fjorde i perioder af året kommer i et "fosforunderskud" og hvor algevæksten da er styret af fosfortilførslerne.

Hvilken vej går udviklingen?

I Vandmiljøplanens Overvågningsprogram følges udviklingen i miljøtilstanden i de marine områder. Variationerne er store fra år til år fordi vandkvaliteten i de kystnære områder er meget afhængig af vejr og vind. Mens der i 1993 kunne konstateres en forbedring af forholdene i en række fjorde og kystnære områder - begrundet i gunstige klimatiske forhold - blev der i 1994 konstateret de mest omfattende iltsvindsproblemer og masseforekomster af

plankton siden 1988 (figur 2). Kombinationen af en rekordstor kvælstofafstrømning fra land og en lang, meget varm og vindstille periode i juli og august var årsagen til disse tilstande.

Set fra en miljøpolitisk synsvinkel er det vigtigt at kunne sondre mellem kortsigtede, klimabetingede variationer i miljøtilstandens udvikling og den udvikling, der må tilskrives menneskets påvirkninger. Ser man på data over en længere periode for en række miljøkvalitets-indikatorer så som udbredelsen af ålegræs i fjorde og kystnære områder, primær produktionen af planktonalger i åbne havområder eller udviklingen i iltkoncentrationen i bundvandet er billedet det samme: I perioden 1950-1990 kan der konstateres en langsigtet tendens imod en forværring af tilstandene i de danske farvande, som vist i figur 3.



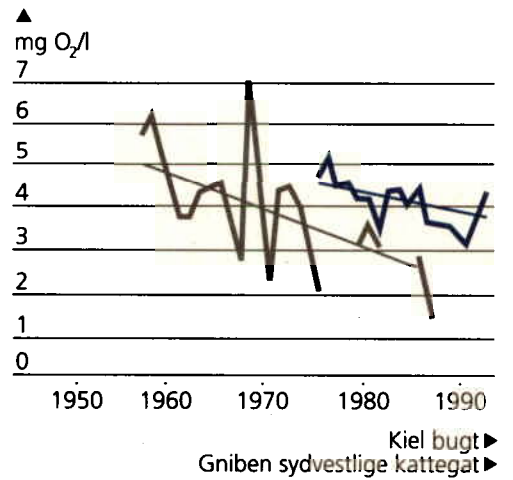
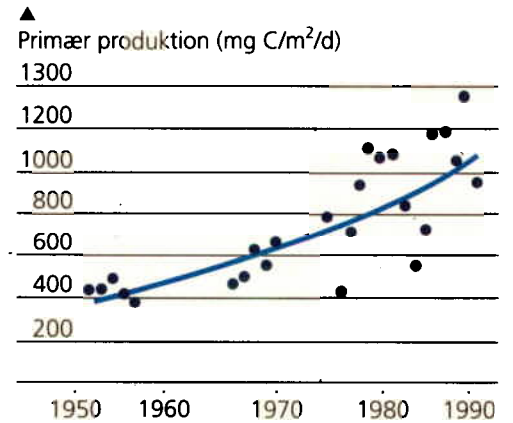
Figur 1. Tilførslen af kvælstof medfører en øget algevækst, der gør vandet uklart og hindrer lyset i at nå de bundlevende dyr og planter

Denne udvikling hænger sammen med en forøget tilførsel af kvælstof til det marine miljø i samme periode. De ældste målinger af kvælstofkoncentrationen i de indre farvande er fra slutningen af 60'erne. En 20-årig tidsserie (1969-89) for udviklingen i middelværdien af vinterkoncentrationen (jan.-feb.) af nitrat i overfladelaget (0-10 meter) er vist i figur 4.

Figur 2. Omtrentlig udbredelse af iltvind i 1994. Grå farve markerer, at der blev observeret en iltkoncentration under 4 mg ilt pr. liter, mens den sorte farve markerer, at der blev observeret en iltkoncentration under 2 mg ilt pr. liter. (Efter Dahl et al., 1995)

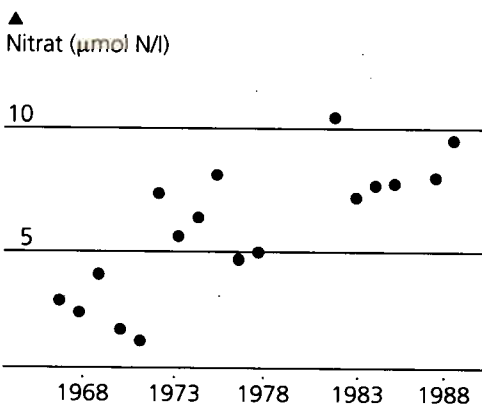


Figur 3. Udviklingen i planktonalgernes produktion i perioden 1950-90 samt udviklingen i iltindholdet i bundvandet i september i hhv. Kiel Bugt (1957-86) og i det sydvestlige Kattegat (1974-92). (Kilder: Richardson et al., 1991 samt Hansen, 1991)



Har eutrofieringen betydning for vores velfærd?

Forværringen af miljøtilstanden i de danske farvande er uheldig. For det første betyder **den**, at den variation og artsrigdom, som vi ønsker at finde i naturen bliver indskrænket. Konsekvensen er en fattiggørelse af oplevelsesmulighederne, ligesom vilkår for friluftaktiviteter og turisme i tilknytning til de marine områder bliver forringet: Rådende trådalger langs kyster og fjorde skaber lugtgener og giver et uæstetisk indtryk. Det er vanskeligt at sætte værdi på disse effekter, men eftersom selve tilstedeværelsen af vore strande er en attraktion for friluft-aktive turister i sommerhalvåret, kan det udmærket tænkes, at en permanent forringet miljøkvalitet kan manifestere sig i et tab af danske valutaindtægter fra turisme. Desuden kan de forringede vilkår for dyr gå ud over fiskeriet af konsumfisk (f.eks. rødspætte og torsk).



Figur 4. Udviklingen i vinterkoncentrationen af nitrat i overfladelaget (0-10 m) i perioden 1969-89 i det østlige Kattegat ved Fladen. (Kilde: Kronvang et al., 1993)

Figur 5. Danmarks kyster er et værdifuldt naturgode, som udnyttes både af den danske befolkning og turisterne

Kilder til kvælstoftilførsler

Danske og udenlandske bidrag

Kilderne til kvælstofbelastningen af de marine områder er både af dansk og udenlandsk oprindelse. En betydelig del af den årlige kvælstofbelastning af de danske farvande sker i form af tilførsler med havstrømme, hvor kilderne er andre landes udledninger (f.eks. kvælstoftilførsler til Nordsøen fra Rhinen). Den samlede kvælstoftilførsel til hele Nordsøen er opgjort til i størrelsesordenen 9 mio. tons pr. år. De indre danske farvande tilføres i 1980'erne netto omkring 70.000 tons omsætteligt kvælstof årligt fra hhv. Østersøen, Sverige og Tyskland, mens det danske, landbaserede bidrag udgjorde omkring 75.000 tons. Hertil kommer depositioner af kvælstof fra atmosfæren, som stammer fra danske og langtransporterede europæiske luftemissioner af kvælstof-forbindelser. Den samlede atmosfæriske kvælstof-deposition på de indre danske farvande er beregnet til omkring

40.000 tons, hvoraf de ca. 11.000 tons vurderes at stamme fra danske kilder. Største-parten af de danske emissioner af kvælstofforbindelser til atmosfæren langtransporteres og afsættes udenfor det danske område.

For de indre danske farvande - og specielt for fjorde og kystnære områder - spiller de danske tilførsler en stor rolle. Dette skyldes dels, at de danske kilder tegner sig for omkring halvdelen af de samlede kvælstoftilførsler til de indre farvande, men også at en stor del af de danske kvælstoftilførsler sker koncentreret i forårsperioden, hvor kvælstoffet kan udnyttes af alger og forårsage masseopblomstring.

Tabel 1 viser bidragene fra danske kilder til de indre, danske farvande i året 1994 sammenholdt med det seneste, samlede skøn for tilførslerne fra udenlandske kilder.

Indenlandske kilder	Tons N	Udenlandske kilder	Tons N
Landbrug	87.000	Transporteret med luften	29.000
Renseanlæg	9.100	Nettotilførsel fra Skagerrak	-28.000
Regnvandsbetingede udløb	1.000	Nettotilførsel fra Østersøen	31.000
Spredt bebyggelse	1.000	Tilførsel fra Tyskland	20.000
Dambrug	550	Tilførsel fra Sverige	45.000
Havbrug	275		
Industri	1.850		
Kraftværker	1.000		
Trafik	1.500		
Naturarealer	3.000		
Ialt, indenlandske kilder	106.275	Ialt, udenlandske kilder	97.000

Tabel 1. De indenlandske kilders bidrag til kvælstofbelastningen af de indre danske farvande i 1994, sammenlignet med et skøn over bidragene fra udlandet.

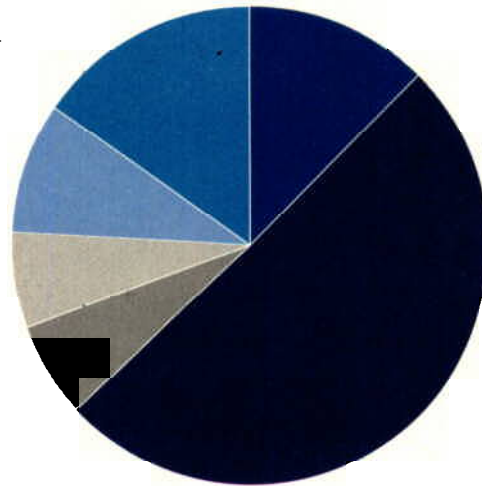
De danske punktkilder

De såkaldte punktkilder omfatter udledningerne fra renselanlæg, særskilte spildevandsudledninger fra især fødevarerindustrien, udledninger fra dambrug og havbrug, udledninger fra spredt bebyggelse og de såkaldte regnvandsbetingede udløb (overløbs-bygværker og separate udløb for overfladevand). Hertil kommer emissioner til luft af NO_x-forbindelser fra især kraftværker og trafik, der i et mindre omfang bidrager til kvælstofdepositionen på havoverfladen. Punktkildernes indbyrdes relative betydning er vist i figur 6. Det ses, at renselanlæggene tegner sig for godt halvdelen af de samlede punktkildeudledninger til vandmiljøet.

Gennemførelsen af hhv. NPo-planen og Vandmiljøplanen har betydet, at kvælstofudledningerne fra renselanlæggene, de industrielle udledninger og dambrugene er reduceret betragteligt i de senere år. Det betyder, at de øvrige punktkilder, d.v.s. udledningerne fra spredt bebyggelse og regnvandsbetingede udløb, idag har en relativ større vægt i det samlede regnestykke.

Fladekilder

Fladekilder (eller diffuse kilder) omfatter kvælstofafstrømningen fra arealer - dyrkede og udyrkede - i det åbne land. Kvælstofafstrømningen afhænger dels af arealanvendelse og dyrkningspraksis, dels af klimatiske forhold (nedbør og temperatur). Kvælstoftabet til overfladevand pr. ha. landbrugsareal er typisk 10-15 gange større end tabet fra et naturareal eller en skov. Det er derfor landbrugsdriften, der er langt den største kilde til kvælstoftilførsler til havet fra landarealer. De klimatiske



Figur 6. Punktkildernes bidrag til kvælstofudledninger i 1994

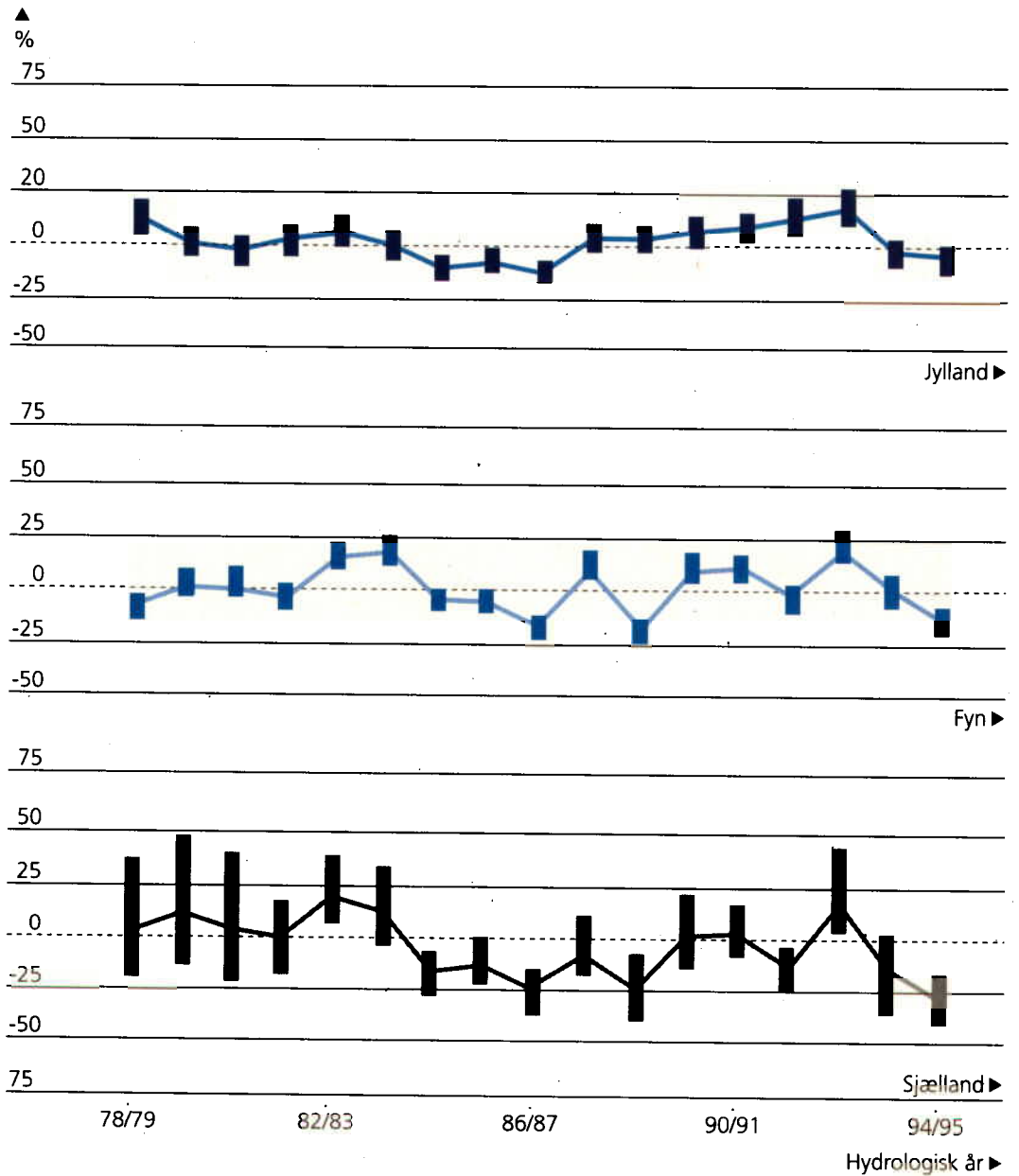
- Renselanlæg
- Industri
- Regnvandsudløb
- Spredt bebyggelse
- Dambrug og havbrug
- Kraftværker og trafik

forhold har meget stor betydning for den årlige kvælstoftilførsel, hvilket kan ses af, at den diffuse kvælstoftilførsel steg fra f.eks. 90.000 tons i 1993 til omkring 112.000 tons i 1994. Ved en vurdering af, om de udledninger, der er betinget af landbrugets dyrkning og gødskning, udvikler sig i opad- eller nedadgående retning er det derfor nødvendigt at korrigere tallene for den del, der skyldes klimatiske år-til-år variationer.

I Vandmiljøplanens Overvågningsprogram følges det diffuse tab af bl.a. kvælstof igennem et måleprogram for vandløb og kilder. Der foretages således amtskommunale målinger i 260 vandløb og 58 kilder, og disse målinger indsamles, analyseres og rapporteres i en årlig samlet rapport over udviklingen i vandløbenes og kildernes tilstand, herunder transporten af kvælstof. I denne forbindelse foretages beregninger af transporten af kvælstof korrigeret for variationen i vandafstrømningen. Figur 7 viser den vandafstrømningskorrigerede transport af kvælstof i hhv. Jylland, Fyn og Sjælland beregnet ud fra data fra 52 vandløb, for perioden

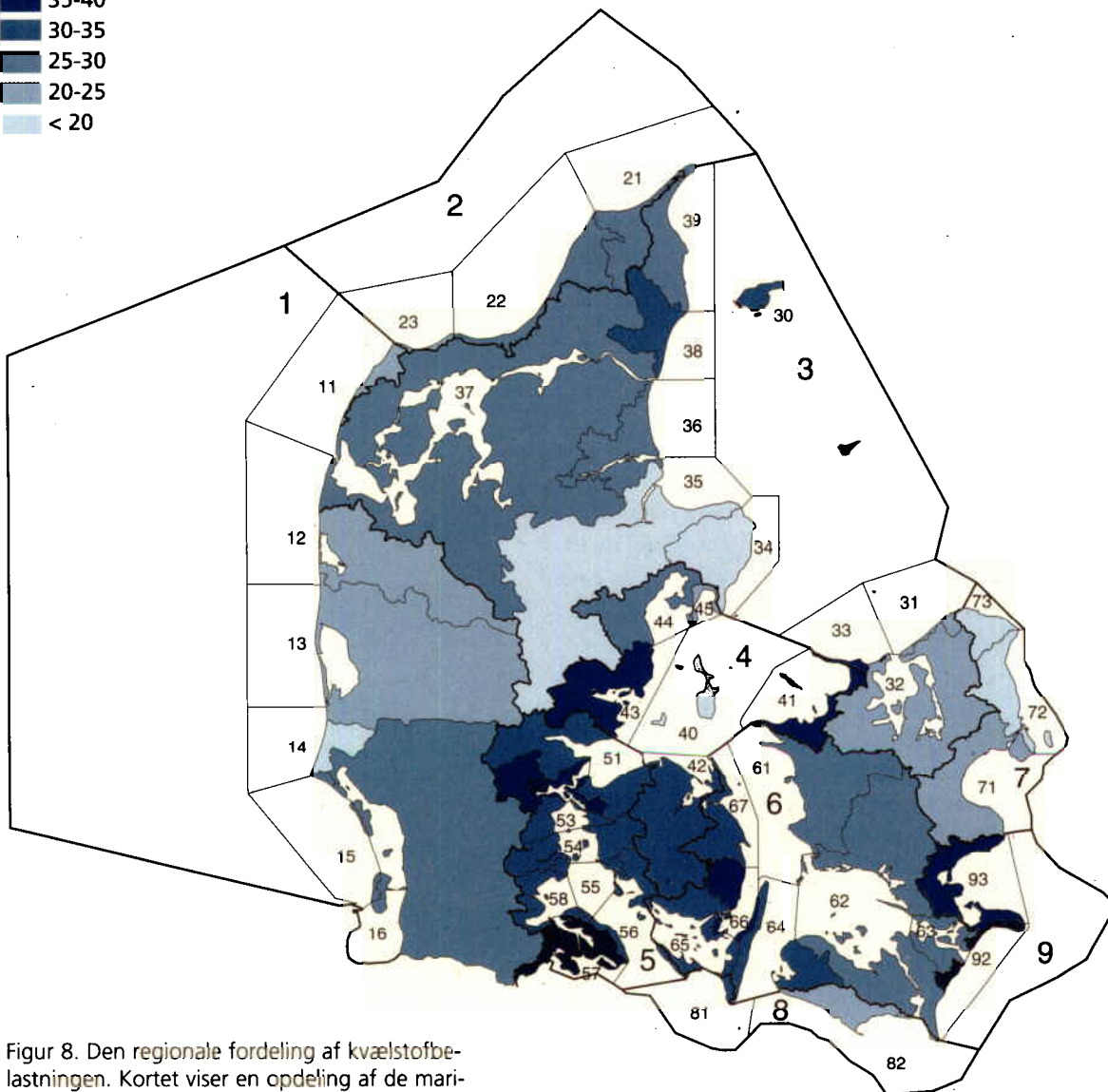
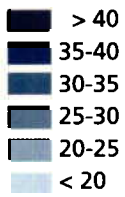
1978/79-1994/95. Afstrømningen er sat i forhold til den gennemsnitlige kvælstofafstrømning for 9-års-perioden før Vandmiljøplanen (1978/79-1986/87). Det frem-

går af figuren, at der ikke kan spores nogen tendens indenfor de 15 år for nogle af landsdelene. For de seneste to år synes kurverne dog at bevæge sig nedad, men



Figur 7. Transporten af kvælstof (nitrat-N) i perioden 1978/79 - 1994/95, korrigeret for variationen i den klimabetingede vandafstrømning. Transportmængden er sat i forhold til gennemsnittet i 9-årsperioden før Vandmiljøplanen (1978/79-1986/87). (Efter: Larsen et al., 1995).

Kvælstof-tab til de marine områder
Kg N pr. ha



Figur 8. Den regionale fordeling af kvælstofbelastningen. Kortet viser en opdeling af de marine kystafsnit (ialt 48) samt de tilhørende oplände. Farvelægningen markerer det relative kvælstof-tab, d.v.s. N-tabet pr. hektar, fra åbne landområder (landbrugs- og naturarealer) i de enkelte oplände til de marine kystafsnit i 1994. (Kilde: Larsen et al., 1995)

det er endnu for tidligt at konkludere, om udviklingen går imod en generel reduktion i det diffuse kvælstoftab, der er betinget af menneskelige aktiviteter.

I modsætning til punktkilderne kan det derfor konstateres, at landbrugets bidrag til kvælstofbelastningen af de marine vande stort set er uændret frem til 1992/93 i forhold til situationen før vandmiljøplanens gennemførelse. For de seneste år synes der at være en tendens til et fald i bidraget, men det er endnu for tidligt at konkludere, om dette fald varer ved.

Den regionale fordeling af belastningen fra land

Kvælstoftabet varierer fra egn til egn. De regionale forskelle i kvælstoftilførsler fra land afspejler både forskelle i udnyttelsen af arealerne til landbrugsproduktion, herunder fordelingen af husdyr, og de naturbetingede forhold, så som geologi og hydrologiske karakteristika. De sidstnævnte forhold har stor betydning for kvælstoffets skæbne under transporten til de marine områder. En del af kvælstoffet omsættes undervejs - biologisk ved optag i planter eller kemisk ved f.eks. *denitrifikation*, hvor nitrat (NO_3^-) omdannes til frit (luftformig) kvælstof (N_2) og lattergas (N_2O). Kortet på figur 8 viser hvorledes kvælstoftabet fra landbrugsområder og naturarealer pr. ha. i 1994 varierede for *afstrømnings-oplande* til forskellige kystafsnit.

Landbrugets udledninger af kvælstof

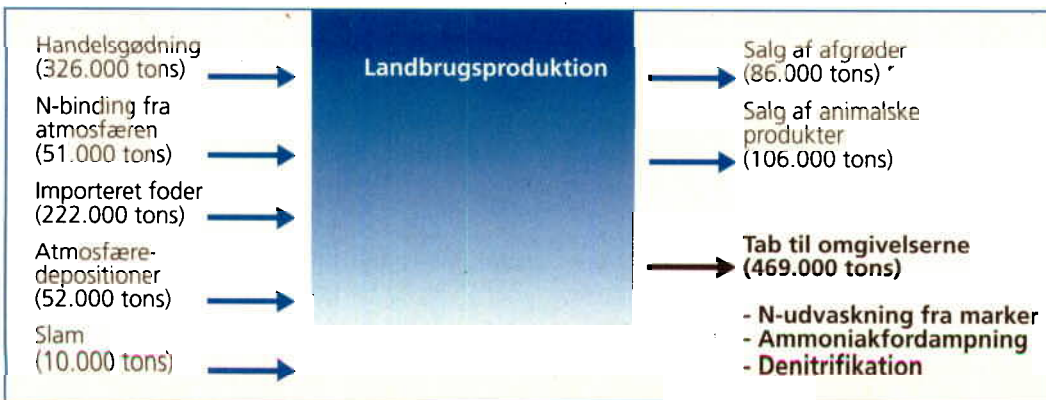
Kvælstofbalancen i produktionssystemet

Landbrugets udledninger af kvælstof til det omgivende miljø hænger både sammen med, hvor store mængder kvælstof, der tilføres produktionssystemet, og hvor godt de tilførte mængder udnyttes til produktion af afgrøder og animalske produkter. De tilførte mængder kvælstof vil aldrig kunne udnyttes 100%. Dette gælder i særlig grad for animalsk produktion, hvor tabet er betydeligt højere end ved produktion af vegetabiliske produkter, eftersom den tilførte kvælstofmængde skal omsættes igennem flere tabsgivende produktions-led (produktion af foder, opfodring af husdyr).

Det totale tab af kvælstof fra landbrugsproduktionen kan opgøres i en såkaldt *kvælstofbalance*, jvf. figur 9. De enkelte balance-poster er her opgjort for dyrkningsåret 1993/94.

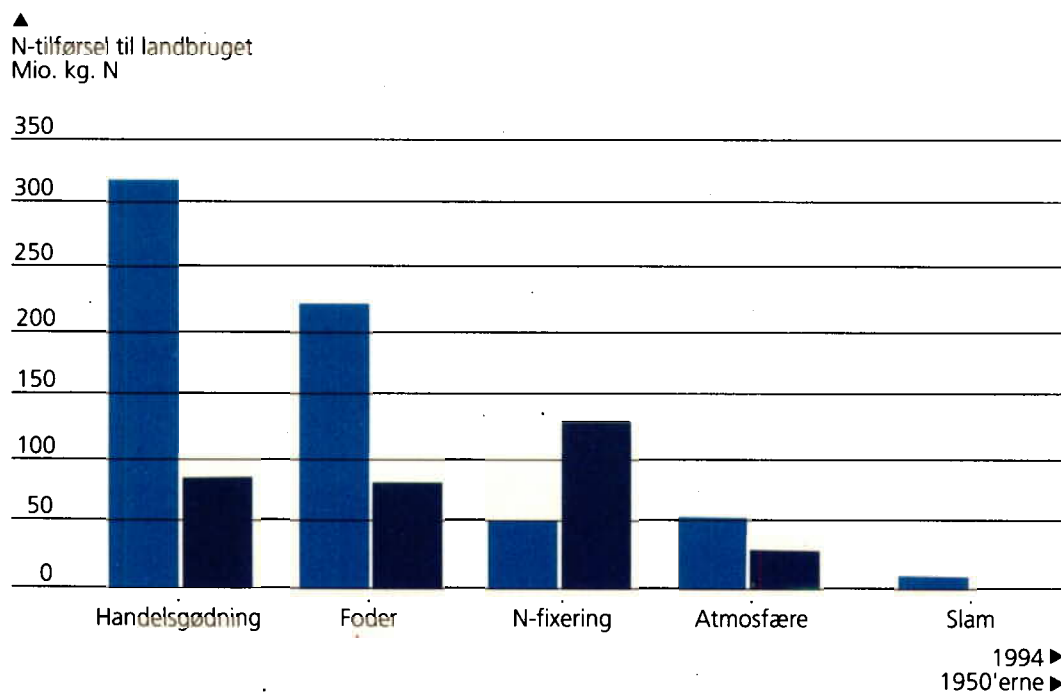
Kvælstoftilførslerne til det samlede produktionssystem består af kvælstof i handelsgødning, fixering af kvælstof fra luften (via bælgplanter), kvælstof i importeret foder til husdyr, afsæt af kvælstof fra atmosfæren på jordoverfladen (hidrørende fra luftemissioner med kvælstofforbindelser) og tilførsel af kvælstof med affaldsprodukter fra industri og renseanlæg (slam), som anvendes som gødning.

De samlede kvælstoftilførsler til landbruget er fordoblet siden 1950'erne. Tilførslen af kvælstof med handelsgødning er næsten 4-doblet, mens tilførslerne med importeret foder er næsten 3-doblet. Tilførslerne fra atmosfærisk nedfald er også vokset betydeligt, hvorimod den årlige tilførsel af kvælstof via dyrkning af kvælstof-fixerende afgrøder (kløvergræs og andre bælgplanter) er aftaget betydeligt, jvf. figur 10.



Figur 9. Kvælstofbalancen i landbrugsproduktionen: Tilførsler, høst og tab. (Kilde: Kyllingsbæk, 1995).

Figur 10. Tilførslen af kvælstof til landbruget i 1950'erne og i 1994 (Kilde: Kyllingsbæk, 1995)



Samtidig med, at kvælstoftilførslerne er steget, er det samlede landbrugsareal *faldet* fra omkring 3,2 mio. ha. til omkring 2,6 mio. ha. Dette betyder, at for den enkelte mark er *dyrkningsintensiteten* steget endnu mere, end total-tallene antyder. Kvælstoftilførslen pr. hektar landbrugsjord er således steget 2,5 gange.

Kvælstofoverskuddet - tab til omgivelserne

Den andel af den samlede kvælstoftilførsel, der ikke fjernes med de høstede afgrøder eller i solgte animalske produkter - det samlede overskud - kan for dyrkningsåret 1993/94 beregnes til 469.000 tons. Kvælstof-overskuddet fra landbruget er vokset betydeligt i de senere årtier. En sammenligning med det beregnede kvælstof-overskud i dansk landbrug i 50'erne viser, at overskuddet er fordoblet.

I en europæisk sammenligning ligger Danmark på en 5'te plads m.h.t. kvælstofoverskud pr. hektar landbrugsjord (figur 11). Tallene i figuren er ikke helt sammenlignelige med totalbalancen for dansk landbrug i figur 9, eftersom enkelte poster for kvælstoftilførsel ikke er medtaget, f.eks. kvæstoffixering fra luften og tilførsel med slam.

Det absolutte tab af kvælstof til omgivelserne afhænger dels af *produktionsniveauet*, d.v.s. størrelsen af den samlede landbrugsproduktion og den hermed forbundne totale omsætning af kvælstof, dels af hvor *effektivt* den tilførte mængde kvælstof til produktionssystemet udnyttes. Kvælstofudnyttelsen - målt som den fraførte kvælstofmængde i afgrøder og animalske produkter i procent af de tilførte kvælstofmængder - ligger i dag på niveau

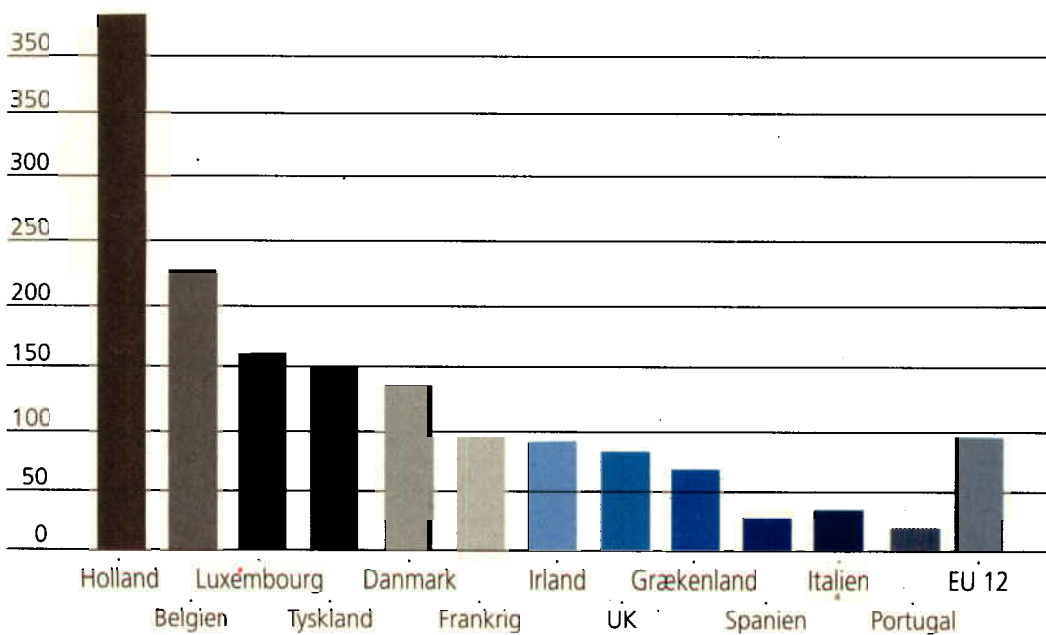
med eller en smule over niveauet i 50'erne (omkring 27%). I begyndelsen af 80'erne var udnyttelsen nede på 20%, så der er sket en vis forbedring af udnyttelsen i det seneste ti-år.

Hvor forsvinder kvælstoffet hen?

En del af kvælstofoverskuddet kan på kort sigt bindes i organisk materiale i jorden (opbygning af humus), men i en langsigtet ligevægtsbetragtning vil skæbnen for overskuddet være udvaskning fra markerne, fordampning til atmosfæren i form af ammoniak fra stald, lager og mark eller en bio-kemisk omsætning i jorden til lattergas og frit luftformig kvælstof (denitrifikation). Det er ikke muligt for det enkelte år at angive en nøjagtig fordeling på disse tabsposter - fordelingen

afhænger af en lang række forhold, ikke mindst de klimatiske forhold. Man kan ved hjælp af forskellige tekniske metoder måle sig frem til udvaskningen af kvælstof fra punkter på den enkelte mark, og sådanne målinger foretages da også i forbindelse med mark-forsøg rundt omkring i landet. De foreliggende vurderinger af den samlede kvælstofudvaskning fra landbrugsjordene stammer imidlertid fra modelberegninger. Kvæstofudvaskningen er i slutningen af 80'erne, d.v.s. omkring vedtagelsen af vandmiljøplanen, vurderet til at udgøre 230.000 tons N pr. år - opgjort under forudsætning af gennemsnitlige klimaforhold. For 1994 viser forskellige modelberegninger, at udvaskningsniveauet er faldet til omkring eller lidt under 200.000 tons N. Ammoniakfor-

▲
Kvælstofoverskud pr. ha. landbrugsjord i Europa
kg. N



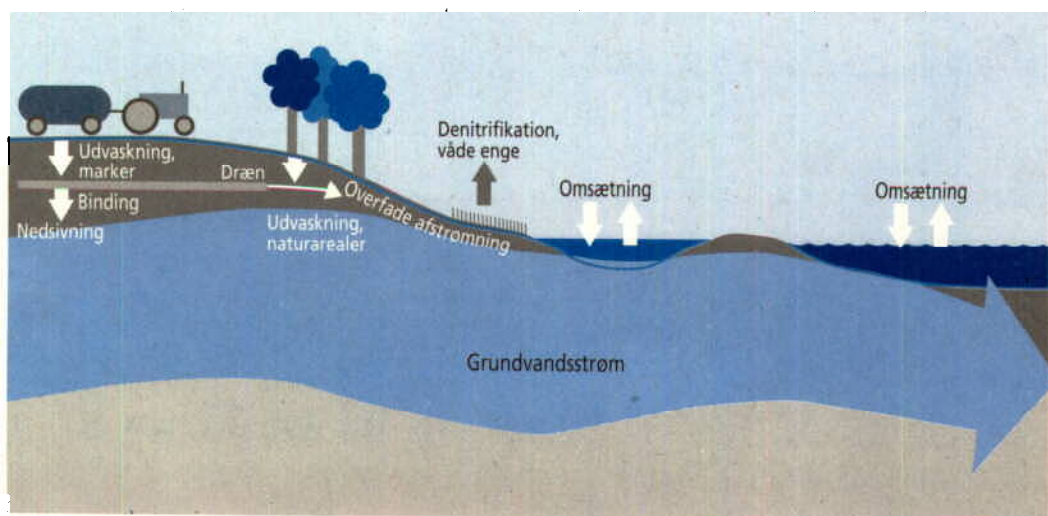
Figur 11. Kvælstofoverskuddet pr. ha. landbrugsjord i EU. (Kilde: Brouwer et al., 1995).

dampningen fra landbruget er vurderet til 115.000 tons N pr. år. Den kvælstofmængde, der udvaskes fra markens rodzone kan gennemløbe en række tabs- og omsætningsprocesser under den videre transport. En del af den udvaskede nitrat vil således blive omsat ved *denitrifikation*, hvor nitrat omdannes til luftformig kvælstof (N_2) og lattergas (N_2O) i de øvre grundvandsmagasiner, mens en anden del vil blive transporteret videre til vandløb og søer. En del af kvælstoffet vil her blive omsat ved optag i planter og alger eller ved denitrifikation. Den kvælstofmængde, der ikke optages eller fjernes i de ferske økosystemer transporteres videre til det marine miljø. I forbindelse med Vandmiljøplanens Overvågningsprogram foretages konkrete målinger og beregninger af, hvad der år for år tilføres de marine områder af næringssalte. Sammenholdes disse målinger med udvaskningsberegningerne, kan man give et bud på, hvor stor en andel af de udvaskede kvælstofmængder fra markerne, der når de marine vande. For landet som helhed er tallet

omkring 38%, men variationerne er store og afhænger af de naturgivne betingelser. F.eks. er kvælstoftilbageholdelsen større i sandjordsområder end på lerjorde, idet en forholdsvis større del af det udvaskede kvælstof vil nå grundvandsmagasiner, hvor betingelserne for denitrifikation - et iltfrit miljø - er tilstede. Ligesådan vil passage igennem mange søer reducere kvælstofmængden, der når de marine vande.

De våde, vandløbsnære arealer - de såkaldte lavbundsarealer - har endvidere et stort potentiale for kvælstoffjernelse. Pilotundersøgelser har således vist, at sådanne arealer under gunstige forhold kan fjerne en nitratmængde via denitrifikation på 300-600 kg kvælstof pr. ha. Disse engområder udgør således et naturligt filter for kvælstof-transporten til de marine områder. Imidlertid er engområdernes filtereffekt ofte kraftigt reduceret p.g.a. dræning, hvorved grund- og drænvand ledes direkte ud i vandløbene. En genopretning af lavbundsjordenes filtereffekt gennem f.eks. sløjfning af drænen i vand-

Figur 12. Kvælstoftransporten fra udvaskning til overfladevand



løbsnære områder kan derfor bidrage til at øge engenes fjernelse af kvælstof. Hvor store potentialer, der ligger heri er genstand for en række undersøgelser og forskning i disse år, men et foreløbigt bud lyder på, at en omfattende genopretning af lavbundsjordenes filtereffekt vil kunne fjerne op til 20.000 tons kvælstof årligt.

Perspektiverne for de nærmeste år

EU's seneste landbrugsreform fra 1992 betød, at landbrugsstøtten blev omlagt fra prisstøtte til hektarstøtte. Dette betyder, at landbrugets afsætningspriser på en række afgrøder gradvist reduceres fra et

kunstigt højt niveau til noget der nærmer sig verdensmarkedspriser. Denne pris-sænkning kan på længere sigt bevirke en lavere produktion og et lavere input af handelsgødning. Braklægningsforpligtelserne trækker også i retning af et lavere forbrug af gødning. I modsat retning trækker det, at svineproduktionen er i vækst, bl.a. begunstiget af det skift i konkurrence-vilkårene mellem de forskellige driftsgrene i landbruget, som EU-reformen har medført. En generel vækst i produktionen af svin på bekostning af en ren planteavl vil betyde en forringelse af kvælstofbalancen, idet tabet af kvælstof ved svineproduktion er større end tabet

Figur 13. Våde lavbunds-jorder udgør et naturligt filter for kvælstof.

ved planteavl. Det er ligeledes vigtigt at være opmærksom på, at de indførte braklægningsforpligtelser antagelig er et overgangsfænomen på vejen til et europæisk landbrug, der fungerer på verdensmarkedsvilkår. Det kan med andre ord forventes, at en del af de arealer, der idag ligger brak, vil blive taget ind i omdriften igen om nogle år.

Figur 14. EU's landbrugsreform fra 1992 betyder at 10% af landbrugsarealet i dag ligger brak. Men braklægningen er formentlig et overgangsfænomen på vej imod en tilpasning af landbruget til verdensmarkedsvilkår

Hvordan kan landbrugets kvælstofudledninger reduceres

- og hvad koster det?

Foranstaltninger - muligheder

Landbrugets udledninger af kvælstof kan naturligvis begrænses ved at reducere den samlede kvælstofomsætning - d.v.s. sænke produktionen. Dette kan da også blive nødvendigt i visse områder, såfremt hensynet til ikke blot havmiljøet, men også sikringen af grundvandet mod nitratforurening skal tilgodeses. Kvælstofomsætningen kan sænkes ved en reduceret gødskning af arealerne - d.v.s. en reduktion i tilførslen af kvælstof i handelsgødning. Eller landbrugsproduktionen kan sænkes gennem en ekstensivering (reduktion) af husdyrholdet eller ved udtagning af dyrkede arealer. Disse foranstaltningmuligheder har især været diskuteret i forbindelse med udpegning af lokale områder, som er særlig følsomme overfor forurening med nitrat, f.eks. områder, hvor der indvindes grundvand til drikkevand.

En anden mulighed er at effektivisere udnyttelsen af kvælstof i produktionsprocessen. Det er specielt denne mulighed, der er fokuseret på i de politiske handlingsplaner - NPo-planen, Vandmiljøplanen og Handlingsplanen for et Bæredygtigt Landbrug - hvor foranstaltninger som lovbeholdningen af gylletanke m.v. til opbevaring af husdyrgødning, udarbejdelse af gødningsplaner, etablering af vin

tergrønne marker samt bestemmelser om udbringningstidspunkter for husdyrgødning har til hensigt at øge udnyttelsen af husdyrgødningens kvælstof-indhold på bekostning af handelsgødnings-tilførslen. Det er da også i forhold til husdyrproduktionen, at de største muligheder for en mere effektiv kvælstofudnyttelse ligger, ligesom det er husdyrproduktion, der lokalt skaber de største problemer med kvælstoftab til vandmiljøet.

En bedre udnyttelse af husdyrgødningen kan ske ved at fordele husdyrgødningen bedre på markerne - og ved at udbringe den på de tidspunkter af året, hvor planterne har den bedste mulighed for at optage kvælstoffet i gødningen. Den såkaldte *nyttevirkning* eller *virkningsgrad* af husdyrgødning er defineret som den mængde handelsgødnings-kvælstof, som 100 kg husdyrgødnings-kvælstof kan erstatte uden at det går ud over kvælstof-tilgængeligheden for afgrøden og dermed høsten. Nyttevirkningen er således et teknisk mål for, hvor tilgængelig husdyrgødningens næringsstoffer er for planterne under de givne vilkår. Nyttevirkningen afhænger foruden af udbringningstidspunktet og afgrøden af udbringningsmåden, d.v.s. hvilken teknik, der anvendes

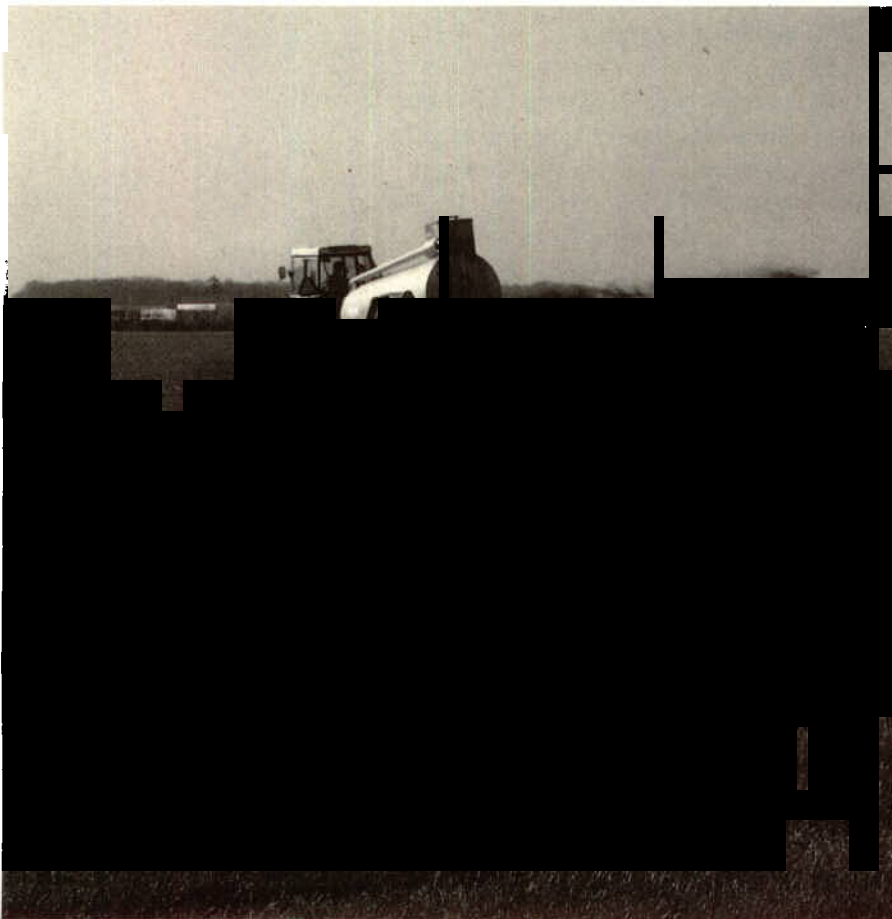
ved udbringningen. Den maksimale nyttevirkning opnås normalt ved udbringning på en voksende afgrøde i forårs månederne ved en såkaldt *nedfældning* af gylle, hvor gyllen injiceres i jorden; men denne metode er også den *dyreste*. En *noget billigere*, men *næsten lige så effektiv* metode er udbringning med *slæbeslanger*, mens den billigste, traditionelle metode er *bredspredning* med en roterende spreder, som dog også giver de største kvælstoftab.

Den aktuelle udnyttelse af husdyrgødningens kvælstofindhold er naturligvis et økonomisk spørgsmål for den enkelte landmand. Det koster at øge nyttevirkningen, og hvis omkostningerne overstiger prisen på handelsgødning, er der ikke noget *økonomisk incitament* for landmænd-

ene til at udnytte husdyrgødningen bedre. Hertil kommer det forhold, at der hersker større usikkerhed og skepsis overfor husdyrgødningens værdi i forhold til handelsgødning. Handelsgødning kan doseres mere præcist og til lavere omkostninger.

I Vandmiljøplanens Overvågningsprogram undersøges landbrugspraksis i seks landbrugsdominerede oplande. Via de oplysninger, der indhentes, er det muligt at følge gødskningspraksis på forskellige typer af landbrugsbedrifter. Resultaterne viser, at der på trods af lovkravene vedrørende opbevaring og udbringning af husdyrgødning fortsat gødskes i et omfang, der overstiger de anbefalede og

Figur 15. Bestræbelserne på at øge udnyttelsen af husdyrgødning omfatter bl.a. udvikling af spredeudstyr til gylle. På billederne ses hhv. den traditionelle bredspreder og den mere miljøvenlige spredningsteknik med slæbeslanger



økonomisk optimale kvælstofnormer på 30 % af landbrugsarealet.

Effekter af foranstaltninger

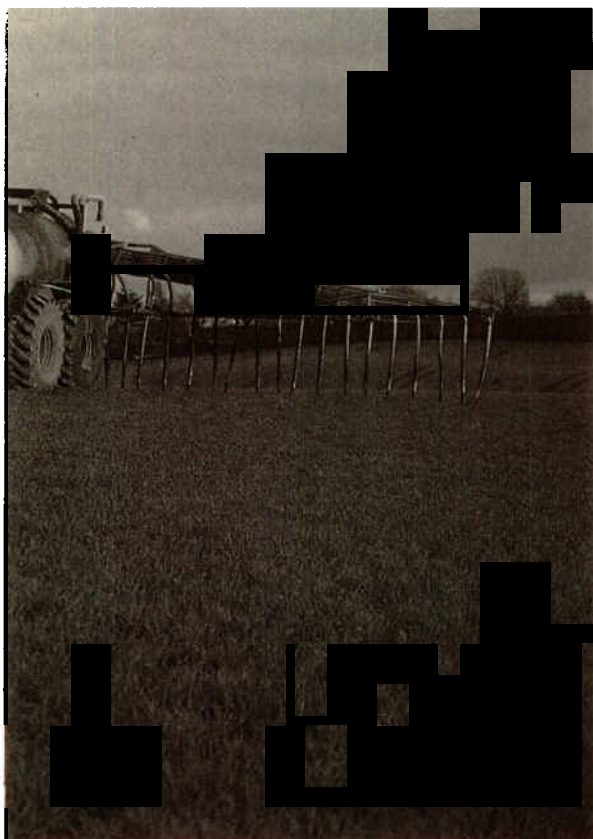
Men hvor langt kan man nå med forskellige foranstaltninger? Og hvad vil det koste?

Danmarks Miljøundersøgelser har ved hjælp af en *konsekvensberegningsmodel*, der kan simulere omkostninger og belastningsændringer ved forskellige indgreb, beregnet effekterne af forskellige foranstaltninger overfor landbrugets kvælstofbelastning. Det er herved muligt at sammenligne forskellige foranstaltningers *omkostningseffektivitet* - d.v.s. hvad det

koster at reducere kvælstofbelastningen med forskellige foranstaltninger hver for sig og i kombination - og hvor langt man kan nå.

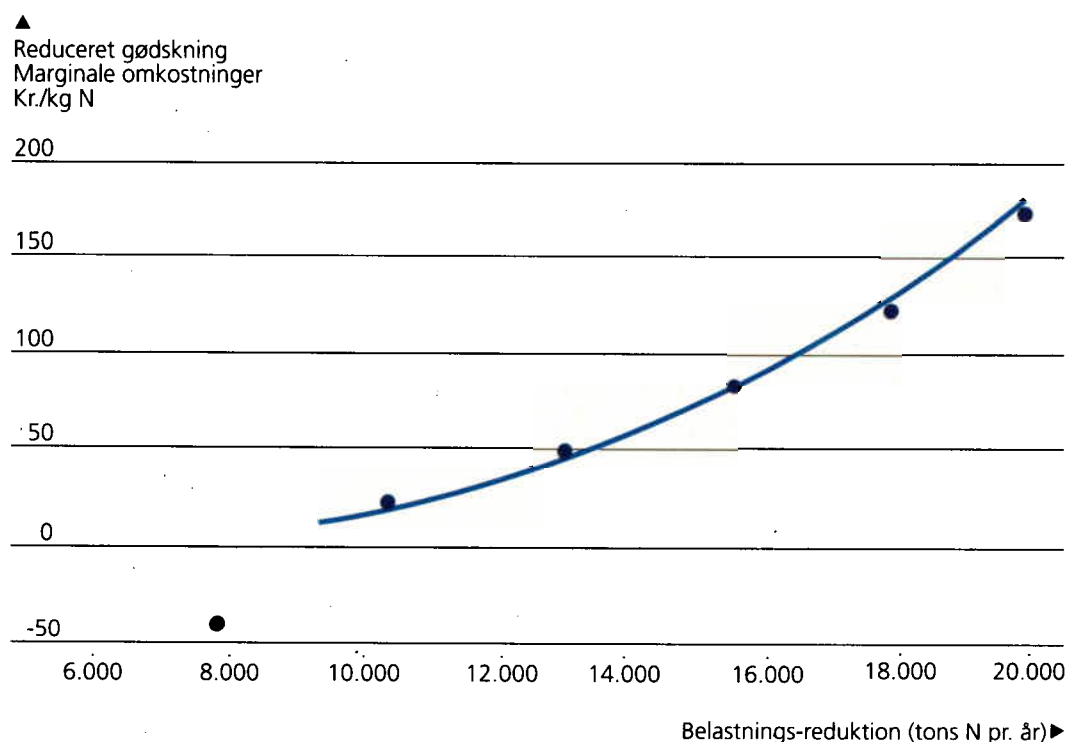
Foranstaltningernes konsekvenser er vurderet i forhold til et såkaldt basis-scenarie, som er den modelberegnet belastning og økonomi knyttet til landbrugets forventede produktion og gødskning medio 90'erne. I basis-scenariet forventes det, at landbrugets samlede bidrag til kvælstofbelastningen af havmiljøet som følge af EU-reformen af landbrugspolitikken og de miljøpolitiske foranstaltninger er nedbragt fra omkring 96.000 tons i 1989 til 80.000 tons kvælstof - svarende til en 16% reduktion. Heraf stammer de 12.000 tons fra ammoniak-fordampning og er altså atmosfæriske afsæt på havoverfladen. De økonomiske konsekvenser er vurderet som ændringerne i landbrugets *jordrente*, der er et mål for det årlige overskud fra salg af landbrugsprodukter, når udgifter til råvarer, arbejde og afskrivning og forrentning af bygninger og maskiner er betalt.

Figur 16 viser konsekvenserne af at reducere gødskning, hhv. øge udnyttelsen af husdyrgødningen. Figurerne viser hvorledes de *marginale omkostninger*, d.v.s. omkostningerne for at reducere den marine kvælstofbelastning med de sidste kg N,



Basis-scenarie (medio 90'erne)	
Forbrug af handelsgødning:	300.000 tons N
Udvaskning fra marker:	180.000 tons N
N-afstrømning til kyst:	68.000 tons N
Ammoniak-deposition:	12.000 tons N
Belastningsbidrag ialt:	80.000 tons N

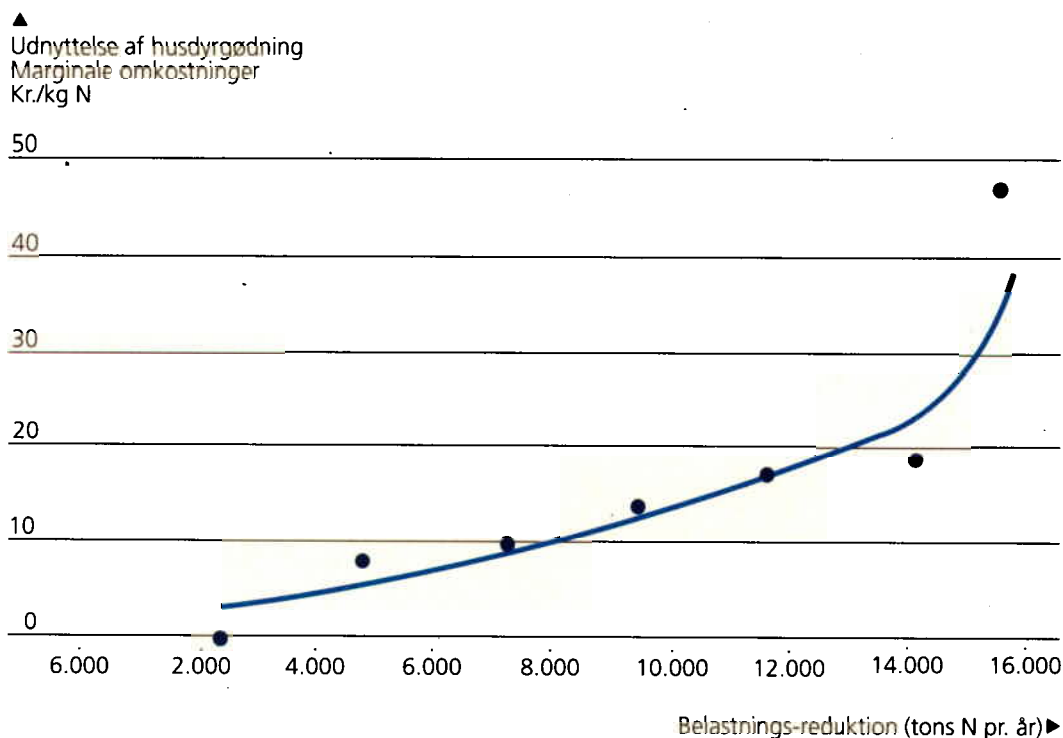
Figur 16. De marginale omkostninger ved at reducere kvælstofbelastningen af de marine vande v. hhv. reduceret gødsning og en øget udnyttelse af husdyrgødning. Kurverne viser, hvorledes prisen pr. ekstra kg kvælstof-reduktion stiger i takt med den samlede reduktion af belastningen



øges i takt med en stramning af foranstaltningen. Eksempelvis er det tilnærmelsesvist omkostningsfrit at reducere belastningen med de første 2.500 tons N ved at øge udnyttelsen af kvælstof i husdyrgødning, mens det koster 7,50 kr. pr. kg N pr. år (eller ialt 18 mio. kr. pr. år) at reducere belastningen med de næste 2.500 tons ved en yderligere øget udnyttelse af husdyrgødning. Det fremgår af figur 16, at der synes at være en økonomisk gevinst for landmændene forbundet med at reducere belastningen af havet med op til 8.000 tons kvælstof pr. år - ved at sænke det samlede handelsgødningsforbrug med 60.000 tons. At det ligefrem er økonomisk fordelagtigt kan umiddelbart forekomme overraskende; det hænger imidlertid sammen med, at landbruget gødsker over de anbefalede normer på en stor del af area-

let, jvf. ovenfor. De anbefalede gødsningsnormer er fastsat som det økonomisk optimale gødsningsniveau under hensyn til de enkelte afgrøders respons på tilførsel af kvælstof. Gødsning over dette niveau er derfor ud fra en teknisk-økonomisk modelbetragtning ikke en økonomisk fordel for den enkelte landmand.

Overgødsningen kan imidlertid skyldes en række forhold og usikkerhedsmomenter, som ikke er afspejlet i modellen. Det vil derfor nok være forhastet at konkludere, at der er en væsentlig økonomisk gevinst ved denne reduktion. En mere forsigtig konklusion er, at det ved en mere rationel gødsning vil være muligt at reducere kvælstof-belastningen med op til 10% i forhold til basissceneriet til meget små omkostninger. Belastningsbidraget



fra landbruget vil herefter være nedbragt med godt 25% i forhold til niveauet i slutningen af 80'erne. Det vil ifølge modelberegningerne være muligt at reducere kvælstofbelastningen fra landbruget til havområderne med yderligere 20.000 tons ved at kombinere et generelt sænket gødskningsniveau til 20% under det driftsøkonomisk optimale niveau med en maksimal udnyttelse af husdyrgødning (65% af svinegødningens kvælstofind-

hold og 50% af kvæggødningens kvælstof-indhold), samt en omlægning af 200.000 ha korn- og rapsarealer på sandjorde til ekstensiv drift (afgræsningsarealer). Herved vil landbrugets bidrag til kvælstofbelastningen af det marine miljø være halveret i forhold til niveauet i 80'erne, svarende til målsætningen i de internationale havkonventioner. Samtidig vil landbrugets kvælstofudvaskning fra markernes rodzone være bragt ned til 112.000 tons kvæ-

50%-reduktions-scenarie:

*Handelsgødningsforbrug:
140.000 tons N*

*Maksimal udnyttelse af
husdyrgødning-N*

*Overgang til ekstensiv drift af
200.000 ha korn- og rapsarealer
på sandjorde*

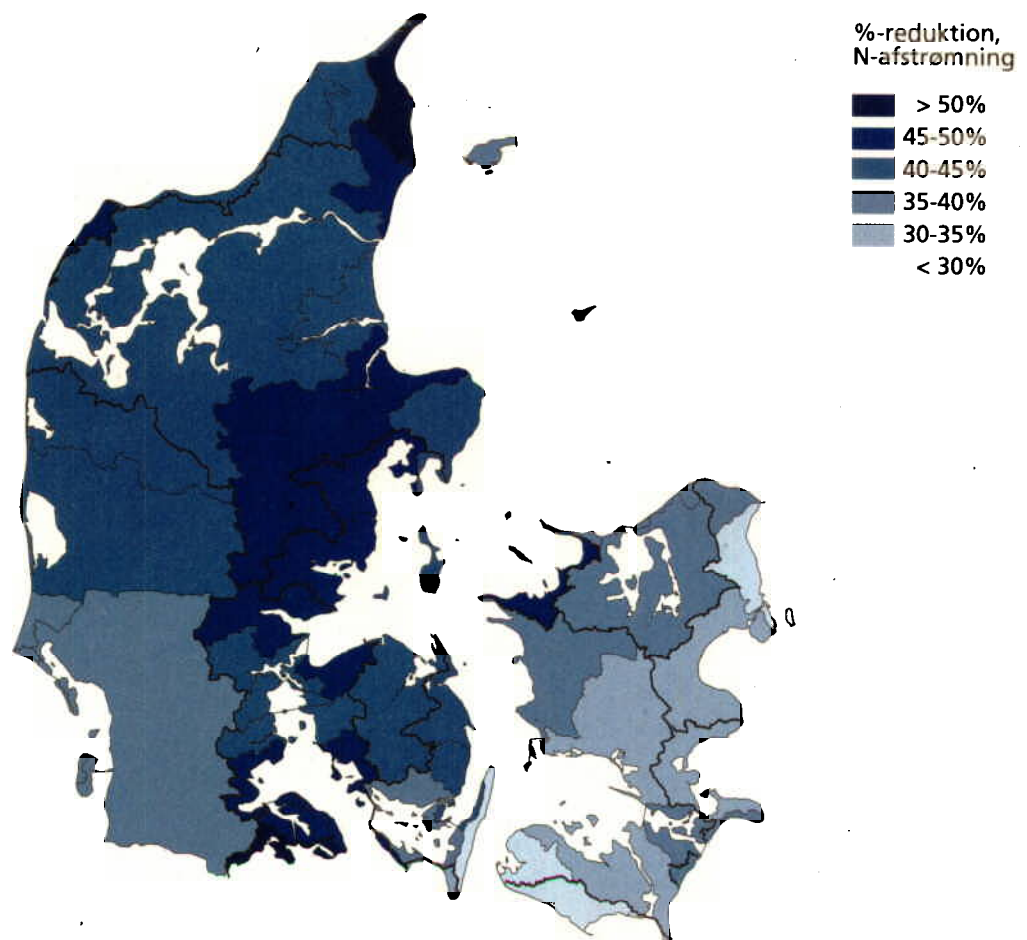
*Omkostninger for landbruget:
0,6 mia. kr. pr. år*

stof - og dermed *under* målet i vandmiljøplanen (130.000 tons). Landbrugets indtjeningstab ved en reduktion af den marine belastning *med* de sidste 20.000 tons er beregnet til ialt 600 mio. kr. pr. år *eller* i gennemsnit 30 kr. pr. kg kvælstofreduktion.

Et regionalt perspektiv -differentierede reduktionsmål?

Effekten af en gennemførelse af 50% reduktions-scenariet vil ikke være den samme i alle kystområder, men vil variere som følge af den regionale variation i

landbrugsproduktionen og de naturgivne forhold i de respektive afstrømningsoplande. Figur 17 viser, at *reduktionen* i landbrugets *belastningsbidrag* varierer fra omkring 30% til op mod 60%. Et andet forhold, som varierer regionalt, er *omkostningseffektiviteten* - d.v.s. hvor meget det koster at reducere de sidste kg tilførte kvælstofmængder i de enkelte marine områder. Denne variation er vist i figur 18, som viser, at prisen for de sidste kg kvælstof varierer fra under 30 kr. pr. kg. til over 80 kr. pr. kg.

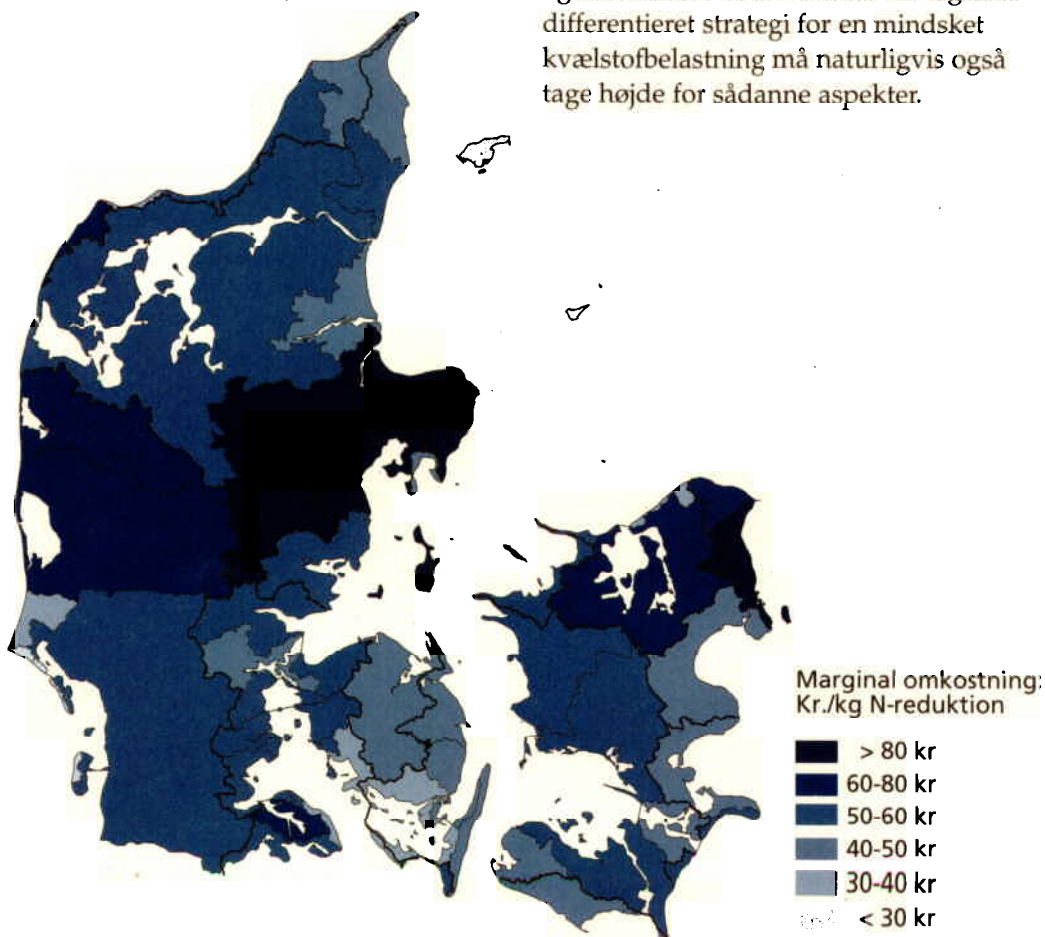


Figur 17. Den regionale variation i i belastningsreduktionerne fra de enkelte afstrømningsoplande ved gennemførelse af 50%-reduktions-scenariet

De marine områders følsomhed overfor en ændret kvælstofbelastning er endvidere meget forskellig. På figur 2 blev det vist hvilke områder, der i 1994 var særlig udsat for iltsvind på grund af eutrofiering. I lyset af denne regionale variation - på såvel omkostningssiden som effektsiden - kunne man spørge sig selv, om man ikke kunne få mere miljø for pengene ved at opstille forskellige målsætninger for en reduceret kvælstofbelastning for de forskellige landsdele - så reduktioner gennemføres, hvor effekt for miljøtilstanden er størst i forhold til omkostningerne.

En regionalt differentieret reduktions-strategi må tage udgangspunkt i en vurdering af de enkelte kyst-områders og fjordes følsomhed overfor en ændret kvælstofbelastning. Danmarks Miljøundersøgelser arbejder med at udvikle modeller, der kan belyse udviklingen i fjordenes vandkvalitet som følge af en ændret kvælstofbelastning. Foreløbige resultater af dette arbejde er vist i det følgende.

Der er også andre hensyn at tage ved fastlæggelse af reduktionsmålsætninger - f.eks. hensyn til grundvandsbeskyttelse og terrestriske naturværdier. En regional differentieret strategi for en mindsket kvælstofbelastning må naturligvis også tage højde for sådanne aspekter.



Figur 18. Den regionale variation i de marginale omkostninger ved gennemførelsen af 50%-reduktions-scenariet.

Effekter af en ændret kvælstofbelastning i fjorde

Kvaliteten af marine vande - miljøindikatorer

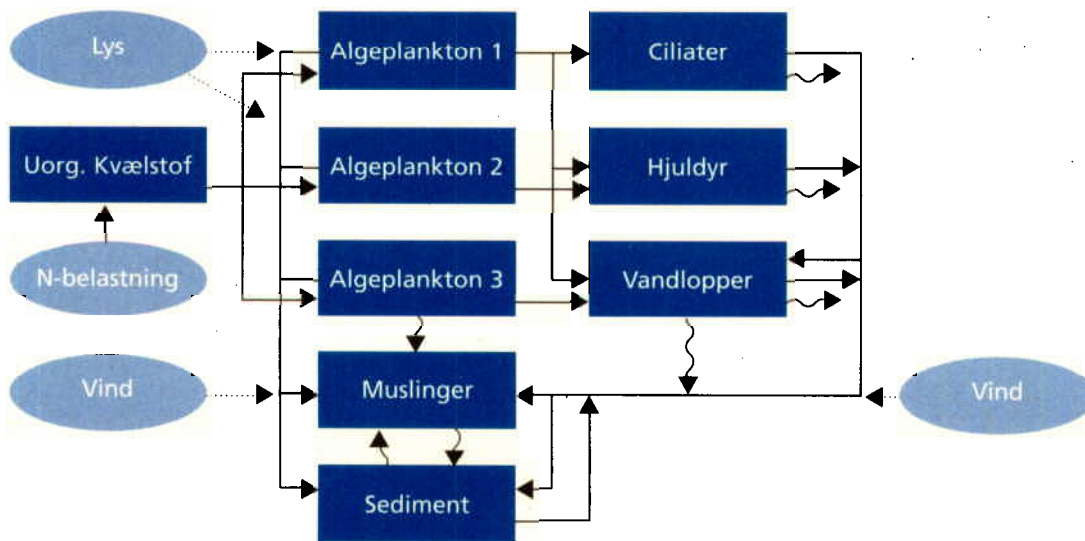
Ved "kvaliteten" af marine vande menes her summen af de biologiske, kemiske og fysiske forhold, der karakteriserer de marine områder. En beskrivelse af disse forhold indebærer i sig selv ikke nogen stillingtagen til hvad der er "godt" og "skidt". Når vi vælger at beskrive udviklingen i miljøkvaliteten ved hjælp af bestemte *tilstands-variable* (f.eks. tilstedeværelse og koncentration af planter og dyr) er det underforstået, at disse tilstandsvariable direkte eller indirekte har en ressource- eller velfærdsmæssig betydning for samfundet. Det er også ofte underforstået, at den *skala*, hvorpå ændringer i en tilstandsvariabel måles, tager sit udgangspunkt i en situation, hvor økosystemet er upåvirket af menneskelig aktivitet. På samme måde indebærer dette imidlertid ikke nødvendigvis, at det bør være målsætningen for samfundet at nå dette nulpunkt. *Målsætningerne for miljøkvaliteten er et politisk valg.*

For at kunne træffe beslutninger om dette valg på et korrekt fagligt grundlag er det imidlertid vigtigt, at man er i stand til at beskrive *vekselvirkningerne mellem de kvalitets-aspekter, der er vigtige for samfundet og de menneskelige påvirknings-faktorer* på en så éntydig og overskuelig måde, som muligt. Det indebærer for det første, at man må udvælge nogle miljøkvalitetsvariable - *miljøindikatorer* - der kan fortæl-

le os noget om, hvor påvirket økosystemet er af menneskelig aktivitet. Disse indikatorer må samtidig være dækkende for det sæt af problemer (fiskeri-ressourcer, badevandskvalitet etc.), som den menneskelige aktivitet afstedkommer. For det andet må man kunne identificere *årsagerne* til observerede ændringer i miljøindikatorerne éntydigt: I hvor høj grad skyldes ændringerne i miljø-indikatorerne klimapåvirkninger eller menneskelig aktivitet? Det sidste spørgsmål kan man forsøge at belyse ved hjælp af modeller.

En model for miljøkvaliteten i fjorde

Danmarks Miljøundersøgelser har igangsat et arbejde med at opstille modeller, der kan belyse ændringerne i fjordenes miljøkvalitet. Fjordmodellerne beskriver den tidslige variation i en række kemiske og biologiske komponenter, der er vigtige for den biologiske omsætning i fjorde, samt karakteriserer fjordenes "helbredstilstand". Komponenterne omfatter *algeplankton* (3 størrelsesgrupper), *zooplankton: ciliater, hjuldyr, vandlopper* (12 stadier), *uorganisk kvælstof, filtrerende muslinger*, samt *sedimentindhold af kvælstof/kulstof*. Samspillet mellem komponenterne indbyrdes og koblingen til omverdenen beskrives matematisk på baggrund af resultater fra forsøg, forskning og miljøovervågning. Væksten hos de tre typer algeplankton



Figur 19. Schematisk oversigt over stofkredsløbet i Fjordmodellen. Optrukne pile angiver transport af kvælstof mellem tilstandsvariable (kasser), tvangsfunktioners (cirkler) påvirkning af processer er angivet med stiplede pile, respirationstab og mineralisering af kvælstof er angivet ved bugtede pile.

afhænger af temperatur, lysforhold samt koncentration af uorganisk kvælstof. Tab af algeplankton finder sted ved græsning fra zooplankton og bundlevende muslinger samt sedimentation til bunden (figur 19). Omfang og effektivitet af disse tabsprocesser påvirkes af temperatur og vandets bevægelse (omrøring).

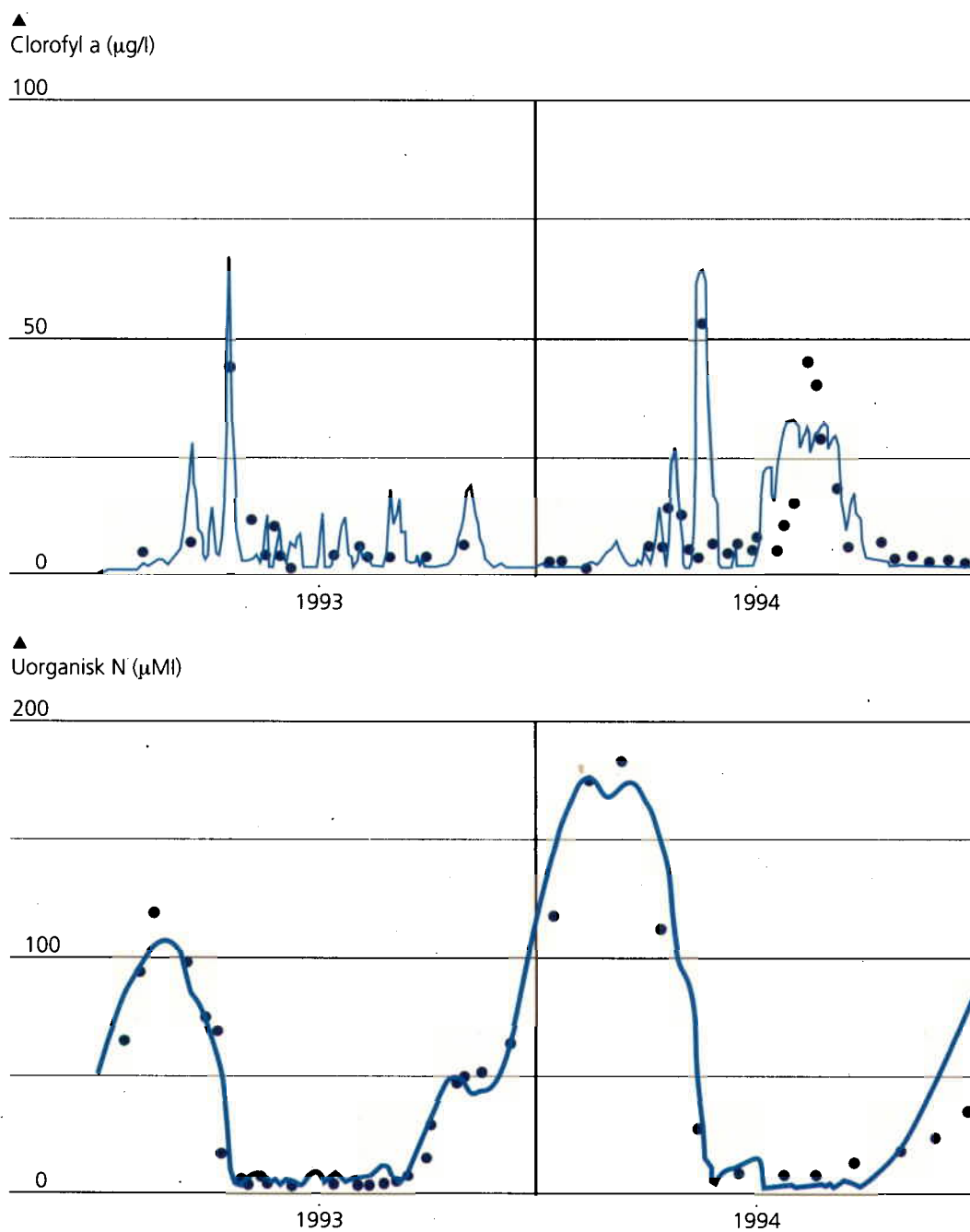
Uorganisk kvælstof fjernes fra vandfasen ved algenes vækst, og tilføres sedimentet bundet i dødt organisk materiale (f.eks. fæces). Ved biologisk recykling i vandet eller sedimentet tilbageføres en del af det biologisk bundne kvælstof som uorganiske forbindelser. Kvælstof tilføres udefra via afstrømning og atmosfærisk deposition, og tabes fra systemet ved denitrifikation. I lavvandede fjorde, d.v.s. fjorde med en dybde på op til 3-4 m, kan bundlevende mikroalger, makroalger (tang) samt ålegræs være vigtige i stofomsætningen. Disse komponenter indgår *ikke* dynamisk i fjordmodellen, men deres *maksimalde dybdeudbredelse* kan beregnes på baggrund af lysudslukningen i vandet.

Processerne i fjordmodellen *styres* af eksterne forhold som luft- og vandtemperatur, solindstråling, vindhastighed samt kvælstofbelastning. De fysiske variable anvendes til at beregne omrøringen (turbulensen) i vandet, der har betydning for planktonalgernes lystilgængelighed og for tilførsel af føde til muslingerne.

Modellen beregner den tidlige variation i klorofyl-koncentrationen (klorofyl *a*), algeplanktonets årsproduktion (primærproduktion), vandets gennemsigtighed, lys-tilgængeligheden for algeplankton samt dybdegrænse for ålegræs. Modellen beregner endvidere det bundnære vands indhold af ilt på baggrund af omrøringsforholdene.

Hvor god er fjordmodellen til at forklare udviklingen?

Ved *kalibrering* (tilpasning) af fjordmodellen justeres på de matematiske udtryk i modellen således, at modellens forudsigelser af flest mulig variable bringes i overensstemmelse med målte værdier.



Figur 20. Modellsimulering af klorofyl og uorganisk kvælstof (optrukne linier) samt målte værdier (punkter) for årene 1993-1994.

Ved *verificering* af modellen undersøges det, om den kalibrerede model er i stand til at beregne udviklingen med tilstrækkelig nøjagtighed i forhold til et år, hvor den faktiske udvikling kendes.

Fjordmodellen blev kalibreret med 1993-data fra Roskilde Bredning og verificeret på 1994-data. Disse år var meteorologisk yderst forskellige, ligesom variation i kvælstofbelastningen gennem året viste store forskelle. Gennem 6 uger i sommeren 1994 lå der et højtryk over Skandinavien, indstrålingen var høj og vindaktiviteten var unormalt lav i denne periode.

I figur 20 er vist eksempler på fjordmodellens simulering af udvalgte komponenter sammen med observerede værdier for Roskilde Bredning gennem 1993-94. Modellens forudsigelser af både niveauer og tidlig variation i de enkelte variable er i god overensstemmelse med de målte værdier. Iltsvindet primo august 1994 forudsiges således af modellen ligesom den efterfølgende opblomstring af algeplankton som følge af muslingedød og næringssaltsfrigivelse fra bunden også simuleres overbevisende.

Effekter af en ændret kvælstofbelastning

Fjordmodellen kan anvendes til at *simulere* effekterne af ændringer i menneskelige påvirkninger som kvælstoftilførsel eller et ændret fiskeritryk på muslinger, ligesom modellen kan simulere effekterne af klimatiske variationer. I det følgende belyses effekter på vandkvaliteten af en ændret kvælstofbelastning i et lukket fjordsystem som Roskilde Bredning. De indre dele af Roskilde Fjord har tidligere været meget

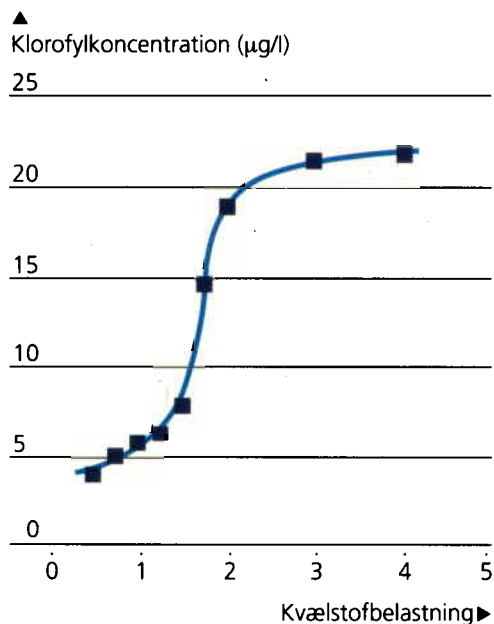
belastet med fosfor, og det forurenede bundlag virker idag som en betydelig fosforkilde. Der er således rigeligt med fosfor tilgængeligt for plantevækst i økosystemet, mens kvælstoftilførslerne hermed er det næringsstof, der begrænser plantevæksten i Roskilde Bredning. Systemet er derfor velegnet til at undersøge effekter af reduktioner i kvælstoftilførsler. Som mål for vandkvaliteten er anvendt den gennemsnitlige koncentration af planteplankton (koncentrationen af klorofyl a) i produktionsperioden, d.v.s. april-oktober, samt udbredelsen (dybdegrænsen) af ålegræs, der afhænger af lysets nedtrængen til bunden (lyset bremses og absorberes i vandet af plankton, dødt organisk materiale samt ophvirvlet bundmateriale).

Når effekterne af variationer i kvælstoftilførsel til fjorden skal beregnes, må alle andre betydende forhold "fastfryses", d.v.s. man må gøre sig bestemte antagel-

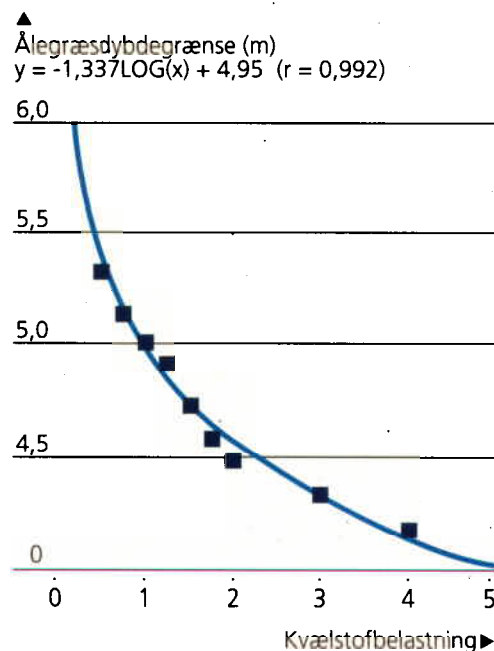
Figur 21. Dybdeudbredelsen af ålegræs styres af gennemtrængeligheden for lys i vandsøjlen.



Figur 22. Gennemsnitlig klorofylkoncentration i algernes vækstperiode som funktion af niveauet for den eksterne kvælstoftilførsel. 1*kvælstofbelastning (udgangsniveauet eller "normalbelastningen") svarer til 12,5 tons N pr. km². Til sammenligning er kvælstoftilførslen til Skive Fjord / Lovns Bredning betydeligt højere, nemlig ca. 35 tons N pr. km².



Figur 23. Ålegræssets dybdeudbredelse som funktion af den eksterne kvælstoftilførsel.



ser om f.eks. de klimatiske forhold over tiden. I disse modelkørsler er anvendt værdier for klimavariationer for de to år 1993 og 1994. Disse repræsenterer extremer m.h.t. vindhastighedens fordeling gennem året, og modelberegningerne er foretaget ved at køre modellen over en 4-årig periode, hvor det antages at klimaforholdene i de to første år svarer til forholdene i 1993, det 3. år til 1994 og det 4. år igen til 1993. I figur 22 er vækstperiodens (april-oktober) gennemsnitlige klorofylkoncentration vist som funktion af den eksterne kvælstoftilførsel. Simuleringerne viser, at vandets klorofylkoncentration øges med stigende kvælstofbelastning, fra 5 µg Chla pr. liter til 21 µg Chla pr. liter når kvælstofbelastningen 4-dobles.

Modellen forudsiger en meget markant stigning i plankton-koncentrationen, når belastningen overstiger "normalbelastningen" for den sydlige del af Roskilde Fjord (d.v.s. belastningen for årene 1993 og 1994) med 50%. Den højere koncentration af plankton og dødt organisk materiale ved stigende kvælstofbelastning reducerer samtidigt ålegræssets dybdeudbredelse fra 5 meter til 4,15 meter (Figur 23) ved en 4-dobling af belastningsniveauet. Sammenhængen kan beskrives matematisk ved udtrykket:

$$\text{Dybdegrænse (m)} = -1,337 \cdot \log(N\text{-belastningsniveau}) + 4,95$$

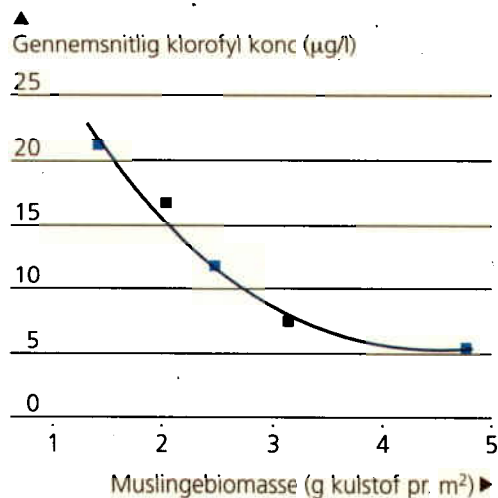
hvor *N*-belastningsniveau angiver kvælstofbelastningen sat i forhold til "normalbelastningen".

Ud fra dette matematiske udtryk kan man beregne, at en reduktion af kvælstofbelastningen på 25% vil øge dybdegrænsen

med 0,17 meter i danske fjorde, mens en mere markant belastnings-reduktion på 50% vil øge dybdegrænsen med 0,4 meter. Det lyder måske umiddelbart ikke af meget, men afhængig af bundens hældning i fjordsystemet kan selv mindre ændringer i ålegræssets dybdegrænse bevirke store ændringer i det areal, som dækkes af ålegræs. Hvis man antager en bundhældning på f.eks. 1 promille i et 8 meter dybt fjordafsnit, vil arealet, hvor lyset er tilstrækkeligt til ålegræsvækst kunne øges med hhv. 7% og 18% ved en 25%, hhv. 50% belastningsreduktion. Der er i modellen ikke taget hensyn til bindingen af kvælstof i den øgede ålegræs-biomasse, ligesom ålegræssets effekt på re-suspensionen ikke er inkluderet. Derfor vil den reelle effekt af belastningsreduktionen sandsynligvis være større.

Effekter af ændringer i den biologiske struktur

Bundlevende dyr som muslinger er dominerende græssere i mange af vore fjorde. Muslingerne kan opfattes som et biologisk filter, der ved at fjerne plankton fra van-



det kan forbedre vandkvaliteten selv under næringsrige forhold. Ud over den tilgængelige fødemængde reguleres muslingernes mængde især af iltvind ved bunden og ved fiskeri. Muslingernes betydning for vandkvaliteten kan belyses i fjordmodellen ved 'kunstigt' at øge muslingernes dødelighed, f.eks. som følge af fiskeri. Som det fremgår af figur 24 øges vandets klorofylkoncentration markant - og vandkvaliteten falder, når den naturlige muslingebestand reduceres med mere end en trediedel. Disse resultater understreger, at også andre menneskelige påvirkninger end kvælstoftilførsel har betydning for vandkvaliteten.

Andre fjordsystemer

Vandskiftet i Roskilde Bredning er lavt sammenlignet med andre fjordsystemer. Dette forhold sammen med kvælstofs nøglerolle i den fosfor-belastede fjord medfører, at selv mindre reduktioner i kvælstof-belastningen vil have relativt store og positive konsekvenser for vandkvaliteten. I andre fjordsystemer med et større vandskifte vil forbedringerne blive "fortyndet", men samtidigt også blive udstrakt til et større område. Den meget markante sammenhæng mellem kvælstofbelastningen og vandkvaliteten, der forudsiges i Fjordmodellen, betyder, at selv mindre reduktioner i kvælstoftilførslen vil have positive virkninger i det marine miljø.

Figur 24. Klorofylkoncentration som funktion af muslingebestanden.

Sammenfatning

Kvaliteten af det danske marine miljø er genstand for stor bevågenhed. Det skyldes at miljøtilstanden er forringet, især i fjordene og de kystnære havområder. Forringelsen af miljøtilstanden skyldes en øget tilførsel af kvælstof i de seneste årtier - som i perioder af året fører til en masseopblomstring af alger i vandet i mange områder. Vandet bliver uklart, så sollyset ikke kan trænge ned til bundplanterne og disse forsvinder. I de åbne havområder forekommer der tilfælde af iltsvind som følge af forrådnelsesprocesser i forbindelse med bundfældelsen af alger.

Den forringede miljøkvalitet indskrænker den variation og artsrigdom, som vi ønsker at finde i vor natur. Konsekvensen er en fattiggørelse af mulighederne for oplevelser i naturen, ligesom vilkår for friluftsliv og turisme forringes. Endelig kan forrykkelsen af den økologiske balance gå ud over fiskeriet af konsumfisk.

Kvælstof tilføres det danske havmiljø fra såvel luften som med vandet (afstrømning fra land og med havstrømme fra udlandet), og den geografiske oprindelse (kilderne) er såvel udlandet som Danmark. Over halvdelen af tilførslerne stammer imidlertid fra danske udledninger, og en væsentlig del af de danske kvælstoftilførsler sker koncentreret i forårsperioden, hvor kvælstof kan udnyttes af alger og forårsage masseopblomstring.

Gennemførelsen af den såkaldte Npo-plan i 1985 og Vandmiljøplanen i 1987 har betydet, at kvælstofudledningerne fra de

såkaldte punktkilder (renseanlæg, industri, dambrug m.fl.) er reduceret betydeligt. Derimod kan der ikke konstateres nogen væsentlig nedgang i kvælstofbidraget fra de dyrkede landområder, og landbruget tegner sig derfor for over 80% af den samlede kvælstoftilførsel til de marine områder.

Landbrugets udledninger af kvælstof hænger både sammen med, hvor store mængder kvælstof, der omsættes i produktionen, men også hvor godt de tilførte mængder udnyttes til produktion af vegetabiliske og animalske produkter. Siden 1950'erne er de samlede kvælstoftilførsler pr. hektar landbrugsjord steget 2,5 gange, mens udnyttelsen af kvælstoffet ligger på niveau med udnyttelsen i 50'erne. Dette betyder, at den overskydende mængde kvælstof er steget tilsvarende.

En del af den overskydende mængde kvælstof omsættes via kemiske processer i jorden (denitrifikation) til frit, luftformigt kvælstof og lattergas, men en stor del udvaskes fra markernes rodzone eller fordamper i form af ammoniak og transporteres videre til det omgivende miljø. Det er ikke hele kvælstofoverskuddet, der når det marine miljø. Der sker således en reduktion undervejs via kemiske processer eller biologisk omsætning. For landet som helhed kan man således beregne, at omkring 38% af det kvælstof, der udvaskes fra markernes rodzone når det marine miljø. Variationerne i kvælstoffjernelsen varierer betydeligt geografisk. De våde vandløbsnære enge har et stort

potentiale for kvælstoffjernelse og udgør derfor et naturligt filter for kvælstoftransporten til de marine områder. Engenes filtereffekt er imidlertid ofte kraftigt reduceret p.g.a. dræning. Der ligger derfor muligvis et stort potentiale for kvælstoffjernelse i at genoprette disse områders filtereffekt. Hvor store mængder kvælstof der vil kunne fjernes ad denne vej er genstand for forskning og undersøgelser i disse år.

Men hvad skal der til for at reducere landbrugets kvælstofudledninger, hvad vil det koste og hvad er effekten i det marine miljø?

Landbrugets udledninger kan naturligvis begrænses ved at reducere landbrugsproduktionen. Dette kan da også blive nødvendigt i visse områder, såfremt hensynet til ikke blot havmiljøet, men også grundvandskvaliteten skal tilgodeses. Kvælstofomsætningen kan f.eks. sænkes ved en reduceret gødsning, en reduktion af husdyrholdet eller ved en udtagning af dyrkede arealer. Disse foranstaltningmuligheder har især været diskuteret i forbindelse med udpegning af miljøfølsomme områder, f.eks. områder, hvor der indvindes drikkevand. Men man kan også forsøge at effektivisere udnyttelsen af kvælstoffet i landbrugsproduktionen, herunder specielt udnyttelsen af husdyrgødningens kvælstofindhold.

Danmarks Miljøundersøgelser har ved hjælp af en konsekvensberegningsmodel beregnet omkostninger og effekter af at gennemføre sådanne foranstaltninger - hver for sig, i kombination og med forskellig styrke. Udgangspunktet for disse

beregninger er et såkaldt basis-scenarie, der reflekterer den forventede (modelberegnet) situation medio 90'erne m.h.t. landbrugets produktion, struktur og gødsning. I basisscenariet forventes de kvælstoftilførsler til det marine miljø, der hidrører fra dansk landbrug, at udgøre 80.000 tons. Dette niveau er ca. 16% under niveauet i 1980'erne, og faldet fra 80'erne til 90'erne skyldes de allerede gennemførte miljøforanstaltninger og ikke mindst omlægningen af EU's landbrugspolitik.

Beregninger med modellen viser, at landbrugets kvælstofbelastning af de marine vande kan nedbringes med yderligere op til 8.000 tons (10%), hvis samtlige landbrug bringes til at gødske i overensstemmelse med de anbefalede gødskningsnormer (det økonomisk optimale niveau). Der er altså tale om at fjerne den overgødsning, der specielt finder sted på mange husdyrbrug.

De marginale omkostninger ved at begrænse belastningsbidraget yderligere er herefter stigende. En kombination af reduceret gødsning (20% under det optimale niveau), maksimal udnyttelse af husdyrgødningens kvælstofindhold samt en ekstensivering af 200.000 ha. sandjorde, der idag dyrkes med korn og raps vil ifølge modellen yderligere begrænse landbrugets kvælstofbidrag til havet med 20.000 tons. Herved vil reduktionsmålet ifølge de internationale havkonventioner være opfyldt, og vandmiljøplanen være mere end opfyldt. Prisen for denne reduktion er et årligt indtjeningsstab for landbruget på 0,6 mia. kr.

Foranstaltningerne i det beskrevne scena-

rie er gennemført i national skala. Det vil ud fra en miljøøkonomisk synsvinkel være en fordel at differentiere indsatsen regionalt, eftersom omkostninger og effekt varierer fra område til område. Ved differentiering af målsætningerne må der imidlertid også inddrages andre hensyn - ikke mindst hensynet til grundvand og til naturværdier.

Den økologiske effekt af at reducere kvælstoftilførslerne til det marine miljø kan kvantificeres ved hjælp af miljøkvalitetsmodeller for fjorde. Danmarks Miljøundersøgelser arbejder med at udvikle modeller, der kan beregne effekterne på udvalgte miljøindikatorer. Foreløbige resultater af dette arbejde viser, at ændringer i kvælstoftilførslerne til fjorde kan få stor betydning for miljøkvaliteten. En indikator for sundhedstilstanden i vore fjorde er den såkaldte dybdegrænse for ålegræs, der bl.a. er styret af lysets mulighed for at nå bunden i vandsøjlen. En konkret beregning viser således, at en halveret kvælstoftilførsel vil øge dybdegrænsen med 0,4 meter, hvilket - afhængig af hældningen - kan øge den arealmæssige udbredelse af ålegræs med op imod 20%.

Litteratur

Brouwer, F.M., Godeschalk, F.E., Hellegers, D.J.G.J. & Kelholt, H.J. (1995): Mineral Balances at Farm level in the European Union. Agricultural Economics Research Institute (LEI-DLO), the Netherlands.

Dahl, K., Ærtebjerg, G., Jensen, J.N., Nielsen, T.G., Lisbjerg, D., Krause-Jensen, D. & Christensen, P.B. (1995): Marine områder - Fjorde, kyster og åbent hav. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1994. Danmarks Miljøundersøgelser. - Faglig rapport fra DMU nr. 142.

Grant, R., Blicher Mathiesen, G., Andersen, H.E., Berg, P., Jensen, P.G. og Laubel, A.R. (1995): Landovervågningsoplände. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1994. Danmarks Miljøundersøgelser. 142 sider. - Faglig rapport fra DMU nr. 141.

Hansen, I.S. (1991): Transport af vand og stof indenfor og til Kattegat og Bælthavet - herunder ændringer siden 1950'erne. I Rapport fra Konsensuskonference 1991 - Kvælstof, fosfor og organisk stof i jord og vandmiljøet. Kapitel 15

Hoffmann, C.C. (1996): Kvælstoffjernelse på vandløbsnære arealer. Artikel i "Vand & Miljø" (i tryk).

Jørgensen, S.E. (1995): State of the art of ecological modelling in limnology. Ecological Modelling 78: 101-115.

Kjørboe, T. (1988): Planktonfødekæden: Bioenergetiske og økologiske studier. Danmarks Fiskeri- & Havundersøgelser.

Kjeldahl, R., Schou, J.S., Vetter, H. & Paaby, H. (1995): Landbrugspolitik og Miljøregulering - 1. delrapport. Miljøprojekt nr. 297. Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen.

Kronvang, B., Ærtebjerg, G., Grant, R., Kristensen, P., Hovmand, M. and Kirkegaard, J. (1993): Nationwide Monitoring of Nutrients and their Ecological Effects: State of the Danish Aquatic Environment. Ambio vol. 22, no. 4, june 1993.

Kyllingsbæk, A. (1995): Kvælstofoverskud i dansk landbrug 1950-1959 og 1979-1994. SP-rapport nr. 23, 1995. Landbrugs- og Fiskeriministeriet, Statens Planteavlssøg.

Larsen, S.E., Erfurt, J., Græsbøll, P., Kronvang, B., Mortensen, E., Nielsen, C.A., Ovesen, N.B., Paludan, C., Rebsdorf, Aa., Svendsen, L.M. & Nyegaard, P. (1995): Ferske vandområder - Vandløb og kilder. Vandmiljøplanens Overvågningsprogram 1994. Danmarks Miljøundersøgelser. 196 sider. - Faglig rapport fra DMU nr. 140.

Miljøstyrelsen (1995): Vandmiljø-95. Redegørelse fra Miljøstyrelsen Nr. 3 1995. Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen.

Miljøstyrelsen (1994): Ånære arealers samspil med vandløb. Miljøprojekt nr. 275. Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen.

Møhlenberg, F. (1995): Regulation mechanisms of phytoplankton growth and biomass in a shallow estuary. *Ophelia* 42: 239-256.

Paaby, H., Møller, F., Skop, E., Jensen, J.J., Hasler, B., Bruun, H. & Asman, W.A.H. (1996): Omkostninger ved reduktion af næringsstofbelastningen af havområderne. - Metode, model, analyse. Danmarks Miljøundersøgelser. 187 sider. - Faglig rapport fra DMU nr. 165.

Richardson, K. & Ærtebjerg, G. (1991): Effekter af kvælstof og fosfor i Kattegat og Bælthavet. I rapport fra konsensuskonference 1991 - Kvælstof, fosfor og organisk stof i jord og vandmiljøet. Kapitel 16.

Roskilde Amt (1996): Miljøtilstanden og dens udvikling i Roskilde Fjord - årsags-sammenhænge og reguleringsmekanismer. 41 sider.

Sand-Jensen, K. (red.), Borum, J., Geertz-Hansen, O., Jensen, J.N., Josefson, A.B., Møhlenberg, F. & Rieman, B., 1994: Resuspension og stofomsætning i Roskilde Fjord. - Miljøstyrelsen. 69 sider. - Havforskning fra Miljøstyrelsen nr. 51.

Schou, J., Paaby, H., Jensen, J.D. & Vetter, H. (1996): Landbrugspolitik og miljøregulering - 2. delrapport. Miljøprojekt nr. 321. Miljø- og Energiministeriet, Miljøstyrelsen

Danmarks Miljøundersøgelser

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

Henvendelser kan rettes til:

Danmarks Miljøundersøgelser
Postboks 358
Frederiksborgvej 399
DK-4000 Roskilde
Tlf. 46 30 12 00
Fax 46 30 11 14

*Direktion og Sekretariat
Forsknings- og Udviklingssektion
Afd. for Atmosfærisk Miljø
Afd. for Havmiljø og Mikrobiologi
Afd. for Miljökemi
Afd. for Systemanalyse
Afd. for Arktisk Miljø**

** Indtil der er etableret faciliteter i Roskilde:*

*Tagensvej 135, 4. sal, DK-2200 København N
Tlf. 35 82 14 15, Fax 35 82 14 20*

Danmarks Miljøundersøgelser
Postboks 314
Vejløvej 25.
DK-8600 Silkeborg
Tlf. 89 20 14 00
Fax 89 20 14 14

*Afd. for Vandløbsøkologi
Afd. for Sø- og Fjordøkologi
Afd. for Terrestrisk Økologi*

Danmarks Miljøundersøgelser
Grenåvej 12
Kalø
DK-8410 Rønne
Tlf. 89 20 17 00
Fax 89 20 15 14

*Afd. for Landskabssøkologi
Afd. for Kystzoneøkologi*

DMU udgiver følgende publikationer:

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

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