



# *Næringsstoffer, vejr og havstrømme*

# 4

Tilførslen af næringsstoffer har afgørende betydning for omfanget af iltsvind i havet omkring Danmark. Men vind- og vejrforhold samt havstrømme i de danske farvande spiller også en væsentlig rolle. Næringsstofferne kommer fra det omgivende land, fra luften og fra de tilstødende havområder. Langt de fleste af disse næringsstoffer skyldes menneskers aktiviteter, og landbruget i Danmark og vore nabolande er den væsentligste kilde til det kvælstof, der bliver udledt til de indre danske farvande fra land.

Foto: Ole Schou Hansen.

Man kan ikke regulere vejr og havstrømme, der bestemmer tilførslen af ilt til havbunden, men man kan i en vis udstrækning regulere tilførslen af næringsstoffer til havmiljøet. Næringsstoffer, som i høj grad er medvirkende til, at iltsvind opstår.

Havet omkring Danmark modtager næringsstoffer fra land, fra luften og fra tilstødende havområder. Fra land løber næringsstofferne ud i havet via vandløb, regnvandsoverløb, renseanlæg osv. Fra luften kommer kvælstof dels opløst i regnvandet dels som gasser, der opløses i havet. De indre farvande får desuden tilført næringsstoffer med havstrømme fra Skagerrak og Østersøen.

De næringsstoffer, algerne bruger mest af, er kvælstof og fosfor. Algerne optager ca. 16 gange så mange kvælstofatomer som fosforatomer for at vokse og formere sig. Det stof, der først mangler i forhold til algernes behov, er det stof, der begrænser algernes vækst: Det begrænsende næringsstof.

I de åbne danske farvande løber algerne stort set altid først tør for kvælstof. Det er med andre ord kvælstof, der er det begrænsende næringsstof i disse havområder. Kommer der mere kvælstof, vokser algerne mere. Omvendt vil mindre kvælstof i de åbne farvande hæmme væksten af alger.

I fjorde er det typisk fosfor, som begrænser algernes vækst den første del af året. Men om sommeren og om efteråret, hvor iltindholdet i havbunden er lavere, bliver der frigivet en masse fosfor. I de fleste danske fjorde kommer der så meget fosfor fra havbunden, at kvælstof bliver det næringsstof, der begrænser algernes vækst gennem sommeren, og indtil vinteren slukker for lys og varme.

Figur 4-1

Jo mere nedbør der kommer, jo flere næringsstoffer bliver der vasket ud til vores vandmiljø.

Foto: Peter Bondo Christensen.



### Nedbørens betydning

En stor del af de næringsstoffer, der spredes ud på markerne for at gøde landbrugsjorden, bliver ikke optaget af planterne. Der er med andre ord et overskud af næringsstoffer. Når det regner og sner, siver vandet fra nedbøren ned gennem jorden. Vandet fører næringsstofferne videre til vandløb og søer og endelig til havet. Jo mere nedbør, jo mere vand løber der ned gennem jorden, og jo flere næringsstoffer vasker vandet ud.

I våde år kan afstrømningen af næringsstoffer fra land derfor være dobbelt så stor som i tørre år (figur 4-2). År 2002 var eksempelvis et meget vådt år. Her var afstrømningen af kvælstof og fosfor fra det omgivende land til de indre farvande mere end 30% højere end året før. Som bekendt var

det også året med det rekordstore iltsvind. I de tørre år 1996 og 1997 var iltforholdene i de åbne indre farvande omvendt forholdsvis gode. At Mariager Fjord netop i 1997 havde et massivt iltsvind, skyldes bl.a. de særlige vind- og vejrforhold den sommer (se side 23 og 49).

Men det har også betydning, hvornår på året de store nedbørmængder falder. Om vinteren er fordampningen fra jorden lille, og det meste af nedbøren siver ned i jorden. Samtidig holder planterne ikke mange næringsstoffer tilbage, da de ikke gror meget i kulden og vintermørket. Meget nedbør om vinteren giver derfor stor udvaskning af næringsstoffer, som algerne i havet kan bruge om foråret. Det skete f.eks. netop i 2002, hvor algernes forårsopblomstring blev kraftig.

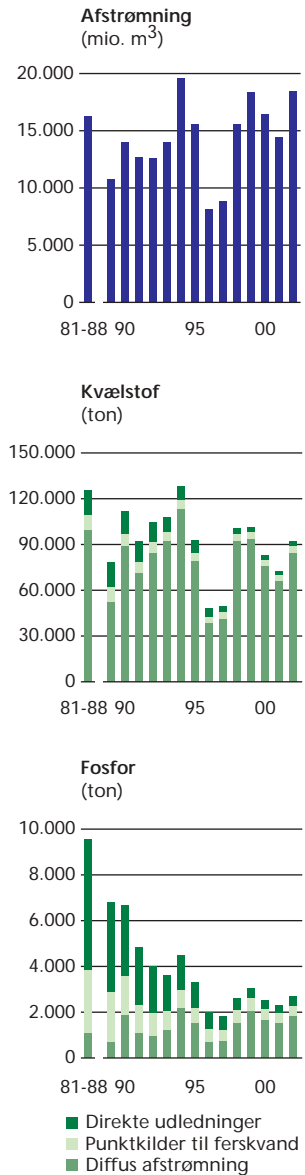
Senere samme år så man atter et eksempel på, at regnen har afgørende betydning for udvaskningen af næringsstoffer. I juni-juli faldt der meget regn, og selv om fordampningen på det tidspunkt er større, og selv om jorden var dækket med planter i fuld vækst, medførte den megen sommerregn også en udvaskning af næringsstoffer til havet i sommerperioden.

Variationer i mængden af nedbør i løbet af året og fra år til år har altså stor betydning for, hvor mange næringsstoffer der tilføres de danske kystvande fra land i det enkelte år. Derfor er et evt. fald eller en evt. stigning i udvaskningen fra et år til det næste ikke nødvendigvis forårsaget af forskellige tiltag – det kan også skyldes variationer i nedbør. Når man vil vurdere vandmiljøplanernes virkninger, må man derfor korrigere for variationerne i nedbør og afstrømning. Man beregner simpelthen, hvad udvaskningen ville være i et "normalår" – dvs. i et år med en gennemsnitlig mængde nedbør og en gennemsnitlig fordeling af nedbøren gennem året, og kalder det for nedbørskorrigerede tal (se kapitel 5).

Men algerne i vores kystvande og i havet reagerer på de mængder næringsstoffer, der reelt bliver ledt til havet de enkelte år. I dette kapitel beskriver vi de reelle tilførsler af næringsstoffer til havet, mens vi i kapitel 5 behandler de nedbørskorrigerede tal.

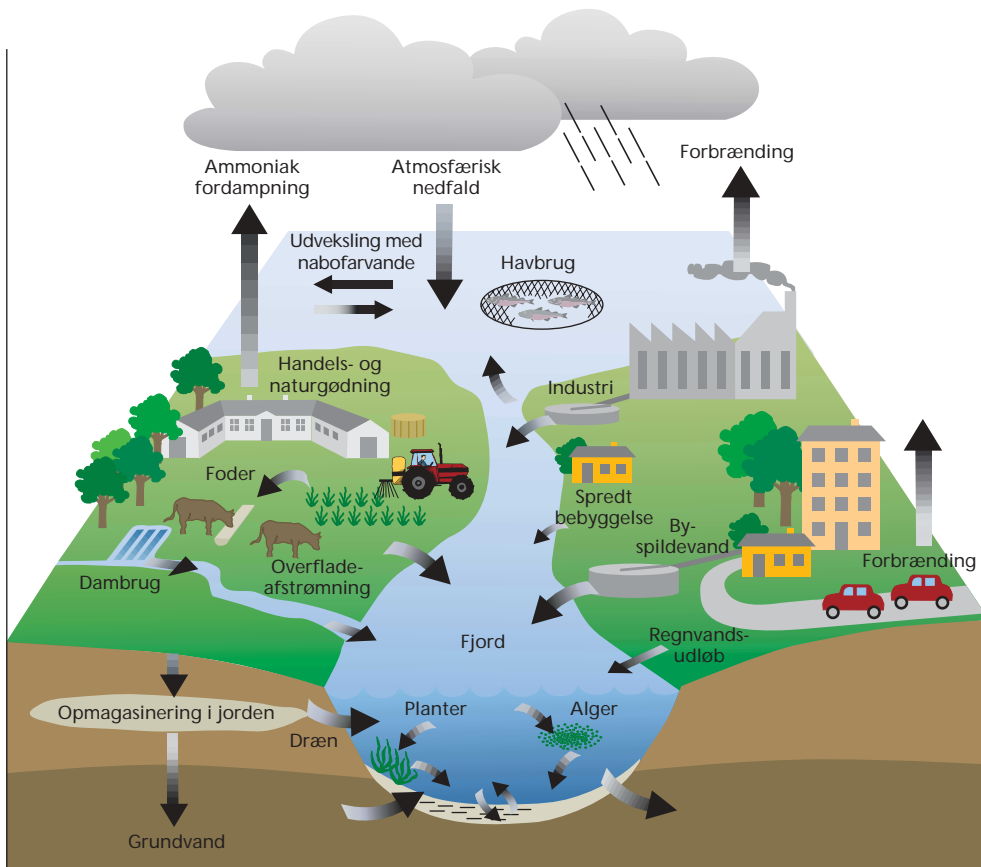
### Tilførsel fra land

Ud over udvaskningen fra landbrugsjord er der også udvaskning fra naturarealer, og til sammen kaldes disse to kilder til næringsstoffer for diffuse kilder. Nogle af næringsstofferne herfra bliver holdt tilbage i søer og vandløb, men størstedelen af dem løber videre og ender i havet.



Figur 4-2

Ferskvandsafstrømning og udledning af kvælstof og fosfor fra Danmark til havet i årene 1989 til 2002, samt gennemsnittet for perioden 1981-1988.



**Figur 4-3**  
Kvælstof og fosfor tilføres vore farvande fra mange forskellige kilder. Her er vist de vigtigste kilder til kvælstoftilførslerne. Kilderne til fosfor er de samme bortset fra, at fosfor stort set ikke afgives til atmosfæren, og at der derfor heller ikke er noget nedfald af fosfor af betydning fra atmosfæren.

Der ledes også næringsstoffer ud fra mere afgrænsede kilder, såkaldte punktkilder, f.eks. fra renseanlæg, regnvands-overløb, fabrikker, ferskvandsdambrug, havbrug o.l. (figur 4-3). Spredt bebyggelse uden kloakering og forbindelse til renseanlæg regnes også for punktkilder. Næringsstofferne fra punktkilderne løber enten direkte ud i havet eller til vandløb, som siden løber ud i havet. De diffuse kilder er de største leverandører af næringsstoffer til danske kystområder, og blandt dem er landbrugsjord den absolut største (tabel 4-1).

#### Kvælstof

I 2002 fik danske marker på landsplan tilført i alt ca. 530.000 tons kvælstof. Det var ca. 235.000 tons mere, end der blev fjernet med høsten. Næsten halvdelen af den samlede mængde kvælstof, der tilføres i landbruget, tabes altså igen. En del af tabet (ca. 40.000 tons) skyldes, at ammoniak fordampes til atmosfæren – især når der spredes gylle på markerne. En anden del af tabet skyldes,

Tilførsel via vandløb	Kvælstof (tons pr. år)			Fosfor (tons pr. år)		
	Danmark	Sverige	Tyskland	Danmark	Sverige	Tyskland
<b>A Diffuse kilder</b>						
• Baggrund	5.800	7.550	3.500	210	130	135
• Landbrug	50.625	19.100	8.500	825	390	350
<b>B Punktkilder til ferskvand</b>						
• Spredt bebyggelse	700	600		155	76	
• Renseanlæg	1.700	770	2.300	180	17	125
• Industri	15	60	15	4	4	2
• Regnvandsoverløb	400	150	400	110	25	85
• Dambrug	1.650			65		
<b>C Tilbageholdelse i ferskvand</b>	-6.075	-5.300	-4.200	-25	-167	-410
<b>Total udledning via vandløb</b>	<b>54.815</b>	<b>22.930</b>	<b>10.515</b>	<b>1.524</b>	<b>475</b>	<b>287</b>
<b>Direkte punktkilder til saltvand</b>						
• Renseanlæg	1.520	1.040		210	33	
• Industri	570	300		40	25	
• Regnvandsoverløb	125	60		30	9	
• Havbrug	325			35		
<b>Total direkte udledning</b>	<b>2.540</b>	<b>1.400</b>		<b>315</b>	<b>67</b>	
<b>Total udledning til kystvandene</b>	<b>57.355</b>	<b>24.330</b>	<b>10.515</b>	<b>1.839</b>	<b>542</b>	<b>287</b>
<b>Udledning til kystvandene i procent fordelt på de tre lande</b>	<b>62</b>	<b>26</b>	<b>12</b>	<b>69</b>	<b>20</b>	<b>11</b>

at bakterier ved denitrifikation omdanner nitrat til luftformigt kvælstof, der forsvinder op i luften. Det største tab skyldes udvaskning af kvælstof. I et år med normale nedbørsmængder drejer det sig om ca. 168.000 tons. Men kun en del af det udvaskede kvælstof løber til vandløbene. I 2002 ledte vandløbene godt 70.000 tons af det udvaskede kvælstof videre til havet.

Foruden tabet fra markerne taber landbruget også omkring 40.000 tons kvælstof fra stalde, møddinger og gyllebeholdere som ammoniak til atmosfæren.

Af alt det kvælstof, som danske landområder eksporterede til de indre danske farvande i 2000, bidrog landbruget med ca. 80%. Bidraget af kvælstof fra punktkilder og spredt bebyggelse var på ca. 10%. De sidste 10% var den udvaskning, som også ville finde sted, hvis hele Danmark lå hen som vild natur – bidraget kaldes også baggrundsbidraget (tabel 4-2). Landbruget er dermed den væsentligste kilde til det kvælstof, der bliver udledt fra danske landområder til de indre farvande.

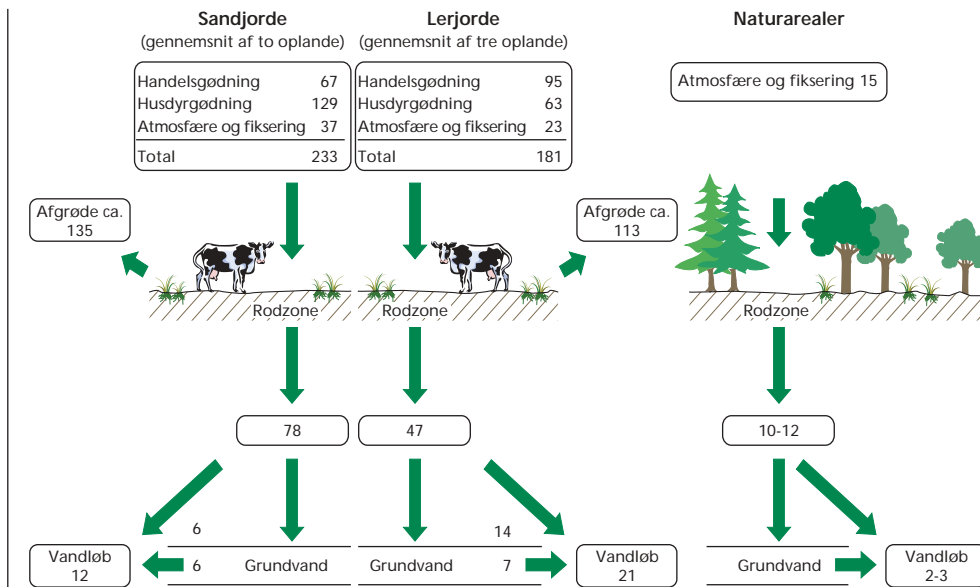
Tabel 4-1

Udledningen af kvælstof og fosfor (i runde tal) fra hhv. Danmark, Sverige og Tyskland til vandløb og søer og samlet til Kattegat, Øresund og Bælt-havet (inklusiv de tilstødende fjorde). Tallene er fra 2000. Opgørelserne foretages lidt forskelligt i de tre lande. I Tyskland er de direkte udledninger fra punktkilder til kystvande indregnet i udledningerne via vandløb.

Tabel 4-2

Hovedkilder af kvælstof og fosfor i hhv. Danmark, Sverige og Tyskland i 2000 (i %). Tabellen angiver også, hvor stor en procentdel af de samlede udledninger til vandmiljøet, der når frem til kystvandet i de respektive lande.

Kilder	Kvælstof (%)			Fosfor (%)		
	Danmark	Sverige	Tyskland	Danmark	Sverige	Tyskland
Baggrund	9	25	24	11	18	20
Landbrug	80	65	58	45	55	50
Punktkilder og spredt bebyggelse	11	10	18	44	27	30
<b>Når frem til kystvandet</b>	<b>90</b>	<b>82</b>	<b>71</b>	<b>99</b>	<b>76</b>	<b>41</b>



Figur 4-4

Det gennemsnitlige årlige kvælstofkredsløb for perioden 1997/98-2001/02 for henholdsvis dyrkede sandjorde, dyrkede lerjorde og naturarealer. Selv om udvaskningen fra sandjorde er større end fra lerjorde, havner en mindre del umiddelbart i vandløbene. Årsagen er, at en større del siver ned til det dybereliggende grundvand, hvorfra noget af det kan strømme ud i vandløbet længere nede eller direkte i havet. På lerjorde sker afstrømningen til vandløbene nærmere jordoverfladen. Bemærk forskellen i udvaskning mellem dyrkede arealer og naturarealer. Alle enheder er i kg kvælstof pr. ha.

### Fosfor

Landbruget tilførte endvidere ca. 76.000 tons fosfor til markerne i 2002. I forhold til den mængde fosfor, der fjernes med afgrøderne, giver det et overskud på 28-33.000 tons. En del af det overskydende fosfor bliver bundet til jordpartikler og til bunden i vandløb og søer, men i 2002 ledte vandløbene ca. 1.150 tons fosfor fra markerne videre til havet.

Ca. 45 % af det fosfor, der kom fra Danmark til kystområderne i de indre farvande i 2000, stammede fra landbruget. Baggrundsbidraget var på ca. 10 %, mens ca. 45 % kom fra punktkilder og spredt bebyggelse uden kloakering. Husholdninger og renseanlæg er derfor også væsentlige fosforkilder til de danske havområder (tabel 4-2).

### Landenes bidrag

Langs vore kyster og i vore fjorde er bidraget af næringsstoffer fra danske kilder de vigtigste. Jo længere man bevæger sig ud mod de åbne indre farvande, jo mere betyder bidragene fra Sverige og Tyskland, som grænser op til de danske havområder.

Betrager man de landbaserede kilder fra de tre lande isoleret – dvs. ser man på den mængde kvælstof og fosfor, der kommer direkte til Kattegat, Øresund og Bælthavet fra de tre lande – vil man se, at Danmark bidrager med langt størsteparten (tabel 4-1).

I 2000 bidrog Danmark med omkring 62 % af den samlede direkte tilførsel af kvælstof fra land til Kattegat, Øresund og Bælthavet. Sverige bidrog med ca. 26 %, mens Tysklands andel af kvælstofudledningen fra det omgivende land var 12 %. De samme tal for fosfor var i 2000: Danmark 69 %, Sverige 20 % og Tyskland 11 % (tabel 4-1).

Ligesom det er tilfældet i Danmark, er bidraget fra landbruget også væsentligt i de to andre lande. Fra Sverige kommer 65 % af kvælstoffet og 55 % af fosforen fra deres land- og skovbrug. I Tyskland bidrager landbruget med henholdsvis 58 % af kvælstoffet og 50 % af fosforen (tabel 4-2).

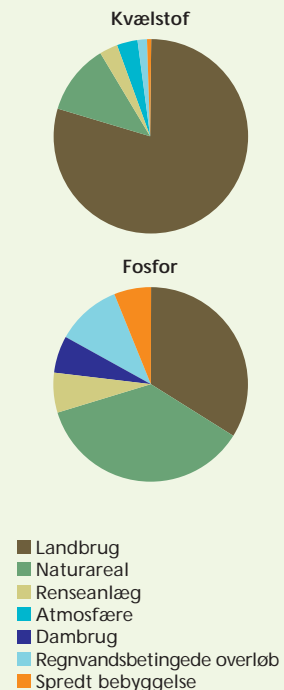
### Næringsstoffer fra havbunden

Havbunden kan under dårlige iltforhold i sensommeren frigive betydelige mængder næringsstoffer. På det tidspunkt af året kommer der ikke mange næringsstoffer fra land, og havbunden kan derfor være den vigtigste næringskilde for planktonalgerne gennem sommeren.

#### Boks 4-1

### Næringsstoffer fra land og atmosfæren

Næringsstofferne kommer fra flere forskellige kilder. Her er der vist bidraget fra de enkelte kilder til Mariager Fjord i 2002. Man kan se, at landbruget er langt den vigtigste kilde for tilførsel af kvælstof. I Mariager Fjord er landbruget ansvarlig for ca. 80 % af den samlede kvælstoftilførsel. Derimod er der flere betydningsfulde kilder, der belaster fjorden med fosfor.





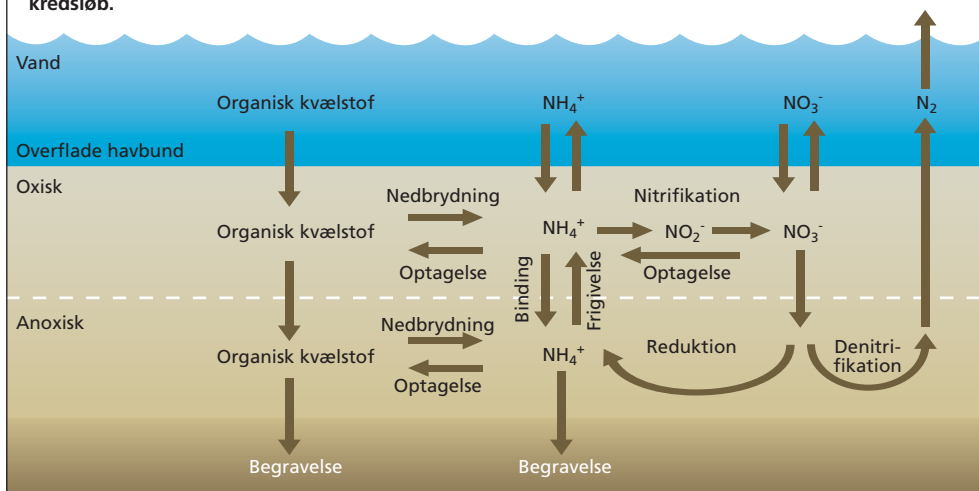
Hovedparten af de næringsstoffer, der frigives fra havbunden, stammer imidlertid i sidste ende fra land. De har blot været en tur gennem algerne, der på et tidspunkt i en eller anden form er sunket ned på havbunden. Når algerester og andet organisk materiale ender på havbunden, nedbryder bakterierne det. På den måde frigives de næringsstoffer, som planterne i sin tid optog, da de producerede organisk stof ved fotosyntese. Når det organiske stof nedbrydes, frigives kvælstof primært som ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ), mens fosfor frigives som fosfat ( $\text{PO}_4^{3-}$ ).

Nedbrydningen af organisk stof og frigivelsen af kvælstof og fosforforbindelser sker hovedsageligt nede i havbunden. Herfra bevæger næringsstofferne sig op mod overfladen af havbunden. Planter og bakterier på havbunden kan optage og bruge næringsstofferne. På en sund havbund fungerer de forskellige organismer derfor som et filter, der optager kvælstof og fosfor og begrænser mængden af næringsstoffer, der trænger op i vandet. Men under dårlige iltforhold forsvinder filteret, og havbunden frigiver næringsstofferne til vandet.

### Kvælstof

Udvekslingen af kvælstof mellem havbund og vand reguleres af et kompliceret kredsløb (figur 4-5). Kredsløbet påvirkes i stor udstrækning af de planter og dyr, der lever på og i havbunden, samt af iltforholdene, temperaturen og lysforholdene ved bunden.

**Figur 4-5**  
Havbundens kvælstof-  
kredsløb.



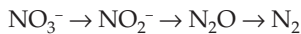
Ammonium, der frigives ved nedbrydning af det organiske stof i havbunden, kan optages af planter på havbunden. Planterne indbygger kvælstoffet i organisk stof, når de danner nyt plantemateriale.

Ammonium kan også blive iltet til nitrat, når der er ilt til stede. Det sørger nitrificerende bakterier for. Processen hedder nitrifikation og kan skematisk skrives som:



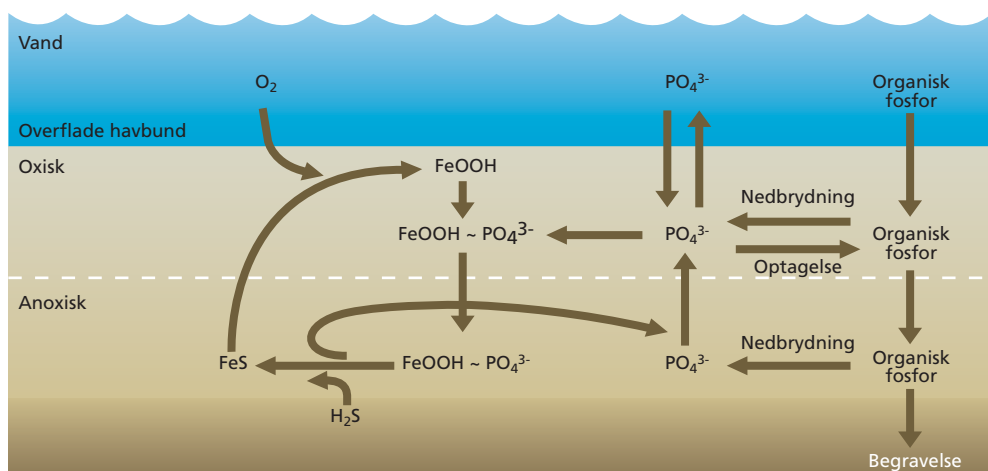
Ammonium iltes først til nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ), der igen iltes til nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ). Gode iltforhold i bundvandet, bølger, kraftig strøm og dyr, der graver og roder i havbunden, bringer alt sammen mere ilt ned i havbunden, og det øger nitrifikationen.

Nitrat er ligesom ammonium en kvælstofkilde for planter. Endvidere kan en speciel bakteriegruppe – de denitrificerende bakterier – bruge nitrat i deres respiration. De nedbryder organisk stof ved at respirere med nitrat. Processen kaldes for denitrifikation og kan skrives som:



Nitrat reduceres via nitrit og lattergas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) til frit kvælstofgas ( $\text{N}_2$ ). Kvælstofgas forsvinder op i atmosfæren, der i forvejen indeholder 80%  $\text{N}_2$ . Planterne kan ikke udnytte kvælstof, når det er på gasform. Denitrifikationsprocessen kan derfor fjerne det plantetilgængelige kvælstof.

Figur 4-6  
Havbundens fosforkredsløb.



Mange af de planter og dyr, der optager og binder kvælstof fra havbunden, forsvinder, hvis der kommer mange planktonalger i vandet, eller hvis iltforholdene i bundvandet forringes. Uden ilt i bundvandet stopper nitrifikationen og dermed denitrifikationen. Derfor kommer der masser af kvælstof i form af ammonium op i vandet under dårlige iltforhold. Kvælstof, der kan give anledning til en højere algeproduktion, som igen øger forbruget af ilt i bundvandet ... en ond cirkel starter.

#### Fosfor

Havbunden holder normalt effektivt på fosfor. Når fosfat frigives ved nedbrydningen af organisk stof, binder det sig hurtigt til lermineraller eller til forskellige metalforbindelser – især jern (figur 4-6).

Jern findes som iltet (oxideret) jern. Det kaldes for ferri-jern ( $\text{Fe}^{3+}$  eller  $\text{Fe(III)}$ ). Når iltet jern reduceres, bliver det til ferro-

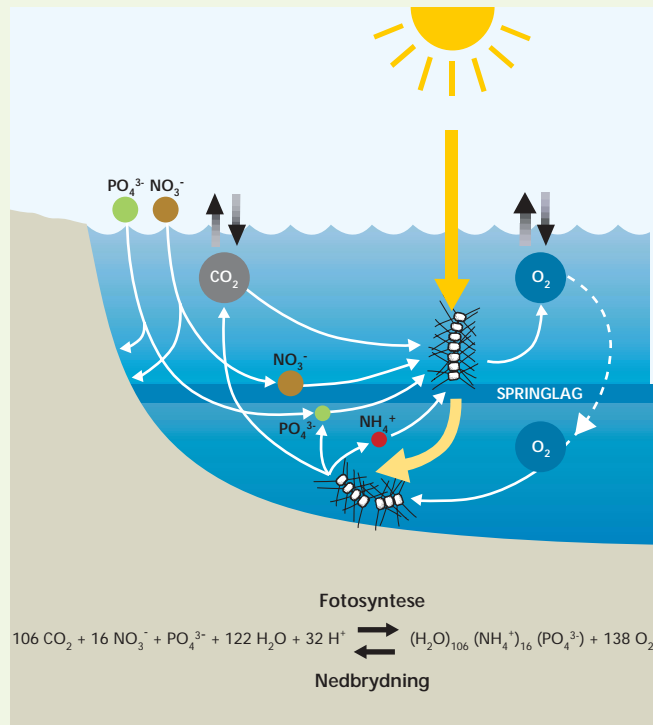
#### Boks 4-2

#### Stofomsætning i havet

Næringsstoffer fra land gøder havets planter. Når planterne får lys nok, laver de fotosyntese og producerer derved organisk stof og ilt. Til fotosyntesen bruger planterne det kuldioxid, der er opløst i havet. Kuldioxid og ilt i de øverste vandmasser udveksles med kuldioxid og ilt i atmosfæren.

Når algerne dør, synker de til havbunden, hvor de bliver nedbrudt. Herved frigøres de fleste næringsstoffer igen og bliver atter tilgængelige for algerne oppe i vandet.

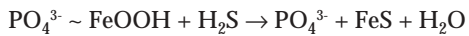
Ud fra ligningen nederst i figuren kan man se, at der skal bruges lige så meget ilt til at nedbryde algerne,



jern ( $\text{Fe}^{2+}$  eller  $\text{Fe(II)}$ ). Fosfat binder sig nemt til iltet jern, mens ikke-iltet jern ikke binder fosfat. Når iltet jern forsvinder, frigives fosfat derfor hurtigt fra havbunden.

Det sker bl.a. om sommeren og i perioder med dårlige iltforhold. Her svinder havbundens pulje af iltet jern langsomt ind. Man kan se det ved, at havbunden skifter farve fra lys brun til sort.

De iltede jernforbindelser binder også den giftige svovlbrinte effektivt, og havbundens indhold af iltet jern har derfor en vigtig rolle ved både at tilbageholde svovlbrinte og fosfat. Men, det er enten eller! Svovlbrinte reducerer iltet jern og "skubber" derved det bundne fosfat væk. Samtidig dannes der jernsulfid ( $\text{FeS}$ ), der farver havbunden sort:



som de i sin tid producerede ved fotosyntese. Den ilt, der er nødvendig til at nedbryde algerne, kommer primært fra bundvandet. Men da bundvandet ofte er adskilt fra overfladevandet af et springlag, trænger ilt fra overfladevandet kun meget dårligt ned i bundvandet. Der bliver derfor hurtigt underskud af ilt i bundvandet.

Jo mere kvælstof og fosfor, der er i havet, jo mere organisk stof producerer algerne, for der er altid kuldioxid nok i havet.

### Specielt om nitrat

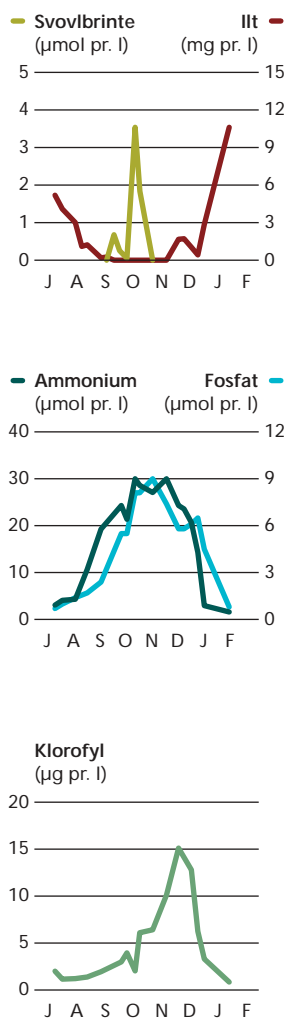
I dagspressen har man flere gange kunnet læse, at nitrat er et iltningmiddel, og

at nitrat derfor forbedrer forholdene i havet. Ved at se på ligningerne i figuren kan man imidlertid let se, at det er noget sludder. Nitrat bliver først og fremmest omdannet til ammonium, når det bliver indbygget i algerne ved deres fotosyntese i overfladevandet. Og når kvælstoffet er bundet i algerne, bidrager det senere til iltsvindet – nemlig når algerne bliver nedbrudt under forbrug af ilt i bundvandet.

Nitrat virker kun som et betydende iltningmiddel for en enkelt bakteriegruppe, nemlig de denitrificerende bakterier. De nedbryder organisk materiale og bruger nitrat til processen i stedet for ilt. Processen sker imidlertid kun,

når der ikke er ilt til stede, og den har kun meget ringe betydning for den samlede omsætning af kulstof. Man har beregnet, at mindre end 3% af det organiske stof i bunden af Århus Bugt bliver nedbrudt ved denitrifikation.

Desværre er der ingen fisk eller andre dyr og planter, der kan ånde med nitrat. Så selv om nitrat kemisk set er et iltningmiddel, bidrager store mængder nitrat i havet kun til at forværre iltforholdene i bundvandet, når det efter at være indbygget i plante-materiale igen frigøres ved nedbrydningsprocessen.



Figur 4-7

Mængden af ilt, svovlbrinte, ammonium og fosfat i bundvandet samt mængden af klorofyl i overfladevandet af Lillebælt fra juli 2002 til februar 2003. Klorofyl anvendes som mål for, hvor mange planktonalger der er.

Data fra Fyns Amt.

I de danske fjorde og i de kystnære områder ser man virkningen af dette samspil om sommeren. Her giver en stor omsætning af organisk materiale i havbunden en høj produktion af svovlbrinte, der konkurrerer med fosfat om iltet jern. På et tidspunkt har havbunden ikke længere iltet jern nok til at holde på fosfaten. Svovlbrinten fortrænger ganske enkelt det fosfat, der er bundet til jern, og fosfat bliver frigivet fra havbunden til vandet.

#### Iltsvind frigiver mange næringsstoffer

Under et iltsvind frigiver havbunden altså både kvælstof og fosfor, og der kan være tale om ganske betydelige mængder.

Fra Fyns Amt har man et konkret eksempel fra det omfattende iltsvind i efteråret 2002. Amtet målte løbende gennem året indholdet af ilt, svovlbrinte, ammonium og fosfat samt mængden af alger (klorofyl) i det sydlige Lillebælt. I slutningen af august forsvandt ilten helt fra bundvandet, og allerede få uger senere var der svovlbrinte i bundvandet (figur 4-7).

Der blev også frigivet meget ammonium og fosfat fra havbunden til bundvandet under iltsvindet, og det førte til flere alger i overfladevandet. Faktisk førte de mange nye næringsstoffer til en opblomstring af planktonalger så sent som i begyndelsen af december måned (figur 4-7).

For Århus Bugt har man lavet en matematisk model, der beskriver, hvor meget kvælstof og fosfor der frigives fra havbunden under dårlige iltforhold. Modellen viser tydeligt, at frigivelsen af både fosfor og kvælstof fra bunden er størst sidst på sommeren i perioder med dårlige iltforhold. Beregningerne viser også, at der gennem sommeren kommer mere kvælstof og fosfor fra havbunden, end der gør fra land, mens tilførslen fra land er vigtigst om vinteren. Det er faktisk det generelle billede, man nu ser i de fleste fjorde.

#### Tilførsel fra luften

Også luften – eller atmosfæren – indeholder næringsstoffer, og den er en vigtig næringsstofkilde for havet. Det er især kvælstof-næringsstoffer i luften, der har betydning for algernes vækst. Indholdet af fosfor er derimod lavt.

Kvælstof tilføres havet fra atmosfæren på to måder. Enten tilføres det som gas (tørdeposition) eller også tilføres det opløst i regndråber (våddeposition). Nedbøren tilfører hovedparten af kvælstoffet fra atmosfæren, og ligesom regnen vasker næringsstoffer ud af jorden, vasker den også kvælstof ud af luften og ned på jorden eller i havet. Variationer i nedbør fra

år til år har altså også indflydelse på, hvor meget kvælstof der leveres fra atmosfæren (figur 4-8).

Omkring halvdelen af det kvælstof, der falder ned på havoverfladen i de indre farvande, er indbygget i ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) og ammonium ( $\text{NH}_4$ ). Det stammer hovedsageligt fra fordampning fra stalde, gyllebeholdere, møddinger og udbragt gylle. Den anden halvdel af kvælstoffet er indbygget i kvælstofilter ( $\text{NO}_x$ ), der opstår, når man afbrænder kul, olie, benzin o.l. i motorer, oliefyr, industri og kraftværker.

Mere end halvdelen af det kvælstof, der tilføres Kattegat og Bælthavet fra atmosfæren, stammer fra andre lande end Danmark, Tyskland og Sverige, der grænser op til de indre farvande. I 2001 udgjorde bidraget fra danske kilder fra 15 til 30% af det samlede nedfald fra atmosfæren til de indre farvande. Det danske bidrag var mindst i det sydlige Bælthav og størst i Kattegat.

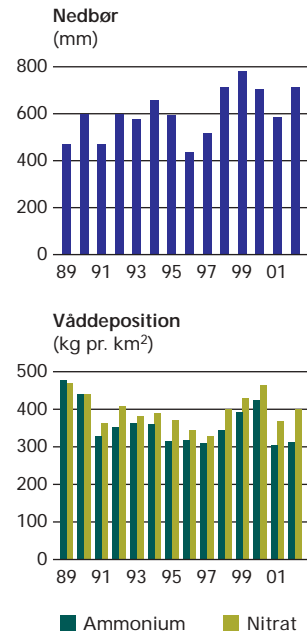
Ser man alene på Danmarks andel, bidrager fordampningen af ammoniak fra dansk landbrug med tre gange så meget kvælstof til Kattegat som afbrænding af fossilt brændstof.

Let forenklet kan man sige, at kvælstofilter kan transporteres langt i atmosfæren, mens ammoniak ikke kommer langt væk fra kilden, før det falder ned igen. Vi får med andre ord selv meget af vores egen ammoniak i hovedet igen, mens vi i højere grad eksporterer kvælstof fra forbrænding til andre lande.

Det kvælstof, der binder sig til partikler i atmosfæren, kan opholde sig her i mere end en uge. Vinden kan transportere partiklerne mere end 1.000 km, inden de atter ender på jorden eller i havet. Kvælstof fra atmosfæren bliver derfor transporteret til danske havområder fra en stor del af Europa. De fremherskende vindretninger betyder, at Danmark modtager en del kvælstof fra det europæiske kontinent, bl.a. fra Tyskland, Polen og Holland. Selv om Sverige ligger lige så tæt på Danmark, bidrager svenske kilder mindre, fordi vinden ofte blæser fra sydvest mod nordøst.

Af det samlede kvælstofbidrag fra atmosfære og land kommer omkring en tredjedel af det kvælstof, der ender i Kattegat og Bælthavet, fra atmosfæren (0,9 og 1,1 tons kvælstof pr.  $\text{km}^2$  i henholdsvis Kattegat og Storebælt i 2002).

Det er i de åbne farvande, at atmosfærens bidrag af kvælstof har størst betydning for algernes vækst. Dels har de åbne farvande et stort overfladeareal, og de modtager derfor en stor andel fra atmosfæren i forhold til det, der kommer fra land. Dels er bidraget fra atmosfæren forholdsvis større end



Figur 4-8

Den årlige nedbør og våddeposition af kvælstof på Anholt i perioden 1989-2002. På trods af den generelt stigende nedbørsmængde er der et generelt fald i depositionen af kvælstof fra atmosfæren gennem perioden.

Figur 4-9

De samlede tilførsler af kvælstof til de indre farvande fra de omgivende lande, atmosfæren og de tilstødende farvande angivet som gennemsnit over en længere årrække. Tallene er i 1.000 tons pr. år. Kvælstof fra Skagerrak tilføres med det indstrømmende bundvand, mens de andre tilførsler sker til overfladevandet.



bidraget fra land om sommeren, hvor kvælstof netop begrænser algernes produktion i de åbne farvande.

Fjordene er godt nok tættere på landbrugets kilder, hvor ammoniak fordampes, og bidraget fra atmosfæren er derfor større pr. km<sup>2</sup> vandoverflade her (i 2002 oftest 1,1-1,6 tons kvælstof pr. km<sup>2</sup>, højest i jyske fjorde og lavest på Sjælland). Til gengæld er overfladearealet lille, og dermed er atmosfærebidraget ikke så stort som det, der kommer direkte fra land via vandløb.

Siden 1989 er der kommet mindre kvælstof fra atmosfæren til de indre farvande. I 2001 kom der ca. 15% mindre end i 1989 (figur 4-8). Selv om variationer i vind og vejr giver store variationer fra år til år, er reduktionen et bevis på, at nationale og internationale forsøg på at nedsætte udslippet af kvælstof til atmosfæren virker.

### Tilførsel fra Østersøen og Skagerrak til de indre farvande

Den sidste store kilde af næringsstoffer til de indre farvande er de tilstødende havområder.

Fra Skagerrak strømmer der salt vand ind langs bunden af Kattegat. Vandet indeholder næringsstoffer, som kan være vigtige for produktionen af alger i de åbne indre farvande.

Fra den modsatte ende løber der i gennemsnit årligt omkring 950 km<sup>3</sup> vand fra Østersøen op gennem de danske bæltter og Kattegat til Skagerrak og Nordsøen. Disse enorme mængder vand fører også en betragtelig mængde næringsstoffer til de indre farvande (figur 4-9).

#### Næringsstoffer fra Skagerrak og Jyllandsstrømmen

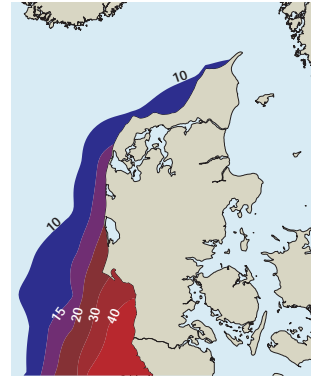
Det vand, der strømmer fra Skagerrak til Kattegats bundvand, er blandet af forskellige vandmasser. De forskellige vandmassers andele varierer, men består hovedsageligt af vand fra den centrale Nordsø blandet med oceanisk vand fra Nordøstatlanten og vand fra Den jyske Kyststrøm, også kaldet Jyllandsstrømmen.

Jyllandsstrømmen fører vand fra Tyske Bugt op langs den jyske vestkyst og ind i Skagerrak (figur 4-10). Hovedparten af vandet tager en tur rundt langs kysterne i Skagerrak, inden det forsvinder op langs Norges vestkyst og ud i Norskehavet. En mindre del af vandet fra Jyllandsstrømmen føres imidlertid ind i bundvandet i Kattegat og Bælthavet. I gennemsnit stammer ca. 10% af det vand, der strømmer fra Skagerrak til Kattegat, fra Tyske Bugt.

Den andel, de forskellige vandmasser udgør af den samlede vandmasse, er interessant, fordi der er forskel på, hvor mange næringsstoffer de indeholder. Koncentrationen af næringsstoffer i vandet fra den centrale Nordsø og i det Nordatlantiske vand er generelt ikke påvirket af menneskelige aktiviteter og er derfor forholdsvis lav. Tyske Bugt og dermed Jyllandsstrømmen modtager derimod næringsstoffer fra de europæiske floder, især fra Elben og Rhinen, der udmunder i den sydlige Nordsø.

Koncentrationen af kvælstof i vand fra Tyske Bugt er derfor i gennemsnit ca. 2½ gange højere end i det øvrige vand, der strømmer ind fra Skagerrak. Og i gennemsnit stammer op til 22% af den totale mængde kvælstof, der strømmer fra Skagerrak til Kattegat, fra Tyske Bugt. Men kun en del af dette kvælstof er biologisk aktivt og kan derfor bruges af algerne.

Specielle vejrforhold betyder, at Jyllandsstrømmen i enkelte år transporterer ekstra mængder kvælstof fra Tyske Bugt til Kattegat. Den største kendte indstrømning fandt sted i februar-marts 1989, hvor mindst 13.000-17.000 tons ekstra nitrat strømmede ind med vand fra Jyllandsstrømmen. I de følgende måneder kunne man følge det nitratholdige vand mod syd i de indre farvande, indtil det i maj nåede det sydlige Bælthav.



Figur 4-10

Jyllandsstrømmen, der bevæger sig fra Tyske Bugt og videre op langs den jyske vestkyst og ind i Skagerrak, indeholder højere koncentrationer af næringsstoffer end resten af Nordsøvandet. På kortet er vist det gennemsnitlige indhold af nitrat ( $\mu\text{mol pr. liter}$ ) i de øverste 10 m af vandsøjlen i februar måned for perioden 1986-1993.



Også i marts 2002 var der en mindre ekstra indstrømning af kvælstof fra Tyske Bugt til Kattegat. Det ekstra tilskud af nitrat kan dog kun have haft en begrænset virkning på efterårets iltsvind, da det kun udgjorde en lille del af de samlede tilførsler af kvælstof.

#### Næringsstoffer fra Østersøen

Overfladevandet, der strømmer ind i Øresund og Bælthavet fra Østersøen, er meget mere ensartet end det vand, der strømmer fra Skagerrak til Kattegats bundvand. Det har samtidig et meget lavt indhold af biologisk aktivt kvælstof – faktisk er der kun halvt så meget af det som i vandet fra Skagerrak.

Det lavere indhold af biologisk aktivt kvælstof skyldes især vandets lange opholdstid i Østersøen. Hele Østersøen øst for Gedser Rev modtager store mængder næringsstoffer (i 2000 ca. 900.000 tons kvælstof fra land og atmosfæren og 31.400 tons fosfor), men da vandet opholder sig 25-30 år i Østersøen, bliver en stor del af næringsstofferne fjernet ved denitrifikation og permanent deponering i havbunden, inden vandet strømmer ud gennem de indre farvande til Skagerrak og Nordsøen.

#### Hvor mange af næringsstofferne kan algerne bruge?

Det er først og fremmest mængden af kvælstof i det gennemstrømmende vand, der er interessant, da det som nævnt er kvælstof, der begrænser algernes vækst i de åbne farvande.

Men det er et kompliceret regnestykke at gøre op, hvor meget kvælstof der kommer fra de tilstødende farvande, og hvilken rolle det spiller. Der er mange ting, man skal være opmærksom på.

Figur 4-11

Algerne i havet kan kun bruge det kvælstof, der er biologisk aktivt.

Foto: Helene Munk Sørensen,  
Århus Amt.



En del af det kvælstof, der kommer ind med vandet fra Skagerrak, forsvinder ved, at bakterier i havbunden omdanner det til frit kvælstof ved denitrifikation (se side 69); så kan det ikke bruges af algerne. En anden del løber direkte videre med bundvandet til Østersøen og når derfor ikke op i de vandlag, hvor der er tilstrækkeligt lys til, at algerne kan vokse og bruge det. Endelig stammer en del af det kvælstof, der løber ind i Kattegat fra Skagerrak, i virkeligheden fra Kattegats eget overfladevand. Alger, der er vokset frem i Kattegats overfladevand, transporteres nemlig nordpå til Skagerrak, hvor de daler ned og afgiver deres kvælstof til det bundvand, der igen strømmer ind i Kattegat.

Man bliver også nødt til at indregne, at algerne ikke kan bruge alle former for kvælstof. Kun det biologisk aktive kvælstof har betydning for algernes vækst. Det er uorganisk kvælstof som f.eks. nitrat og ammonium plus kvælstof, der er bundet i organiske forbindelser i alger og bakterier.

Kvælstof, der er bundet i rester af gamle planter (humusstoffer), er ikke aktivt, før lys og bakterier har nedbrudt humusstofferne og derved har gjort kvæstoffet tilgængeligt for algerne. Nedbrydningen er imidlertid en langsom proces i forhold til den tid, vandet opholder sig i Kattegat og Bælthavet. Kvælstof, der frigives fra humus, har derfor næppe nogen større betydning. Da 70-90% af alt kvælstof i vand fra henholdsvis Skagerrak og Østersøen er bundet i humus, er det kun en mindre del af det kvælstof, der føres til de indre farvande med havstrømme, der reelt er interessant for algerne. Men præcist hvor meget ved man endnu ikke nok om.

Samlet set bidrager havstrømmene altså med ca. 75% af alt det kvælstof, der tilføres de indre farvande fra land, vand og luft. Men alle de nævnte forhold betyder, at det kvælstof, der kommer med havstrømmene, og som kan bruges direkte til algevækst, formodentlig kun udgør omkring 30% af den totale tilførsel af kvælstof.

### **Kvælstofbudget for de indre farvande**

Zoomer man ud, er det muligt at få et billede af alle kvælstofbidragene og give et bud på det samlede kvælstofbudget for de indre farvande. Det giver mulighed for at vurdere, hvilke knapper man kan skrue på for mest effektivt at reducere tilførslen af kvælstof og dermed mindske risikoen for iltsvind.

De enkelte kilder i kvælstofbudgettet varierer meget fra år til år afhængigt af vejrforholdene. Tabel 4-3 præsenterer derfor bidraget fra de forskellige kilder som et gennemsnit over en



Figur 4-12  
Kiselalger er de mængdemæssigt vigtigste planktonalger i de indre farvande.

Foto: Nina Lundholm og Jette Skov.

	Samlet kvælstof- mængde (1.000 tons)	Biologisk aktivt kvælstof (1.000 tons)	Korrigeret for recirkulation mellem Kattegat og Skagerrak (1.000 tons)	Procentvis andel af biologisk aktivt kvælstof efter korrektion for recirkulering
Danmark	70	64	64	32%
Sverige	28	23	23	11%
Tyskland	24	23	23	11%
Andre lande via atmosfæren	26	26	26	13%
Skagerrak	223	89	39	19%
Østersøen	217	28	28	14%
<b>Total</b>	<b>588</b>	<b>253</b>	<b>203</b>	<b>100%</b>
Dansk andel (%)	12%	25%	32%	

Tabel 4-3

Samlede kvælstoftilførsler fra de omgivende lande, atmosfæren og de tilstødende farvande til Kattegat, Øresund og Bælt-havet. Den del der kommer fra atmosfæren fra hhv. Danmark, Sverige og Tyskland er indregnet i disse landes bidrag. Se tekst for forklaring på biologisk aktivt kvælstof og recirkulation mellem Kattegat og Skagerrak.

længere årrække. I denne opstilling bidrager Danmark kun med lige godt en tiendedel af den samlede kvælstoftilførsel. Men som netop beskrevet må man vurdere flere ting, før det er klart, hvor meget brugbart kvælstof algerne i overfladevandet får fra de forskellige kilder. Første skridt er at beregne det kvælstof, som algerne ikke kan bruge, og fjerne det fra regnskabet. Det kan man gøre ud fra en viden om, hvilken kemisk form kvælstoffet har, samt en viden om, hvilken værdi de forskellige kvælstofformer har som gødning for algerne. Det kvælstof, algerne kan bruge, kaldes som nævnt biologisk aktivt.

Resultatet af vurderingen er, at algerne kan udnytte alt det kvælstof, der kommer fra atmosfæren, ca. 90% af det der kommer fra land, mens det kun er ca. 10 og 30% af det kvælstof, der kommer fra hhv. Østersøen og Skagerrak, der er noget værd for algerne.

Inddrager man disse forhold i regnskabet, ser man, at Danmarks bidrag til den kvælstofmængde, der er tilgængelig for algerne, udgør ca. 25%. Indregner man desuden recirkulationen mellem Kattegat og Skagerrak, stiger Danmarks bidrag til ca. 32% (tabel 4-3).

Havstrømmenes bidrag og værdien af dette kvælstof for algerne er som nævnt vanskeligt at bestemme, og andre beregninger viser, at Danmarks bidrag er ca. 28%. Der er derfor enighed om størrelsesordenen af Danmarks andel: Vi bidrager med omkring 30% af det aktive kvælstof, der tilføres de åbne indre farvande.

## Næringsstofferne står ikke alene

Som tidligere omtalt er det ikke alene mængden af næringsstoffer, der bestemmer, om der opstår iltsvind eller ej. Det omfattende iltsvind i 2002 er et godt eksempel på, hvordan mange enkelte forhold spiller sammen.

### Iltsvindet i 2002

Tilledningerne af næringsstoffer til havet var store i 2002 – både i vinter- og sommermånederne. Men ikke større end man har set tidligere, hvor iltsvindet var betydeligt mindre (figur 4-2). Udviklingen i 2002 viser derfor, hvordan de meteorologiske forhold har afgørende betydning for, om en stor tilførsel af næringsstoffer også fører til omfattende iltsvind.

Vindens styrke og retning er afgørende for forsyningen af ilt til bundvandet. Vinden kan blande det iltrige overfladevand og det iltfattige bundvand og kan også sikre tilførsel af nyt iltrigt bundvand med havstrømme.

I sensommeren og efteråret 2002 var vinden svagere end normalt i perioden fra august til december. Især i august-september var vindens blanding af overflade- og bundvand meget ringe. Samtidig blæste det mest fra østlige retninger. Det blokerede for den indstrømning af iltrigt vand fra Skagerrak til bundvandet i Kattegat og Bælthavet, som fortrinsvis finder sted ved vestlig vind. Den specielle vejr-situation hæmmede altså begge forsyningsveje for ilt til bunden.

I løbet af sommeren og efteråret 2002 var temperaturen i overfladevandet også højere end normalt. Det betød, at forskellen i vægtfylde mellem bundvand og overfladevand var større end normalt. Det gav en stabil lagdeling i vandsøjlen – et meget stærkt springlag – som det kræver meget vindenergi at bryde. En stor udstømning af ret fersk vand fra Østersøen i anden halvdel af 2002 gjorde overfladevandet endnu lettere og forstærkede lagdelingen yderligere.

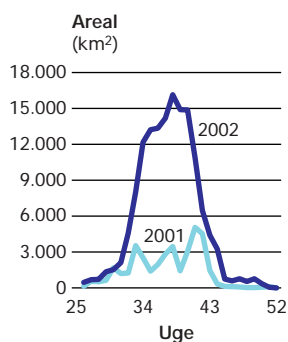
Den meget lange og ret vindstille periode, de høje temperaturer i overfladevandet og den store udstømning af lettere vand fra Østersøen gav altså en ualmindelig kraftig lagdeling, der afskar havbunden fra forsyning af ilt fra overfladelaget. Specielt de lavvandede områder som det vestlige Kattegat og Smålandsfarvandet blev ramt af disse vejrforhold. Her ville vinden ellers normalt have blandet vandsøjlen med jævne mellemrum. Da den fremherskende østlige vindretning samtidig gjorde, at der kun kom lidt iltrigt bundvand fra Skagerrak, fik Kattegat, Øresund og Bælthavets bundvand kun tilført ubetydelige mængder ilt fra juli til slutningen af okto-

Figur 4-13

Efter det omfangsrige iltsvind i 2002, blev der gennemført en række undersøgelser for at beskrive omfanget af skader på bunddyrene. Her bliver der taget en prøve af havbunden i november 2002 (se også figur 3-14).

Foto: Anders Engell-Kofoed.





Figur 4-14

Det samlede areal ramt af iltsvind i rekordåret 2002 sammenlignet med 2001, som var et gennemsnitsår med hensyn til styrke og udbredelse af iltsvind. Til sammenligning udgør arealet af Sjælland ca 7.500 km<sup>2</sup> (se også figur 7-2).

ber. Den store tilledning af næringsstoffer fra land kombineret med disse forhold var den direkte årsag til det rekordstore og langvarige iltsvind i 2002 (figur 4-14).

#### Variationer i klimaet

Vind- og vejrforhold har altså stor betydning for forholdene i de danske havområder. Set i et længere perspektiv er der måske endnu større meteorologiske kræfter, der spiller ind. Næmlig den såkaldte Nordatlantiske Oscillation, NAO, der præger vejret i det nordatlantiske område. NAO er simpelthen forskellen mellem det atmosfæriske tryk over Portugal (Lissabon eller Azorerne) og Island. NAO veksler fra år til år mellem lav og høj, men der er tilsyneladende perioder på 10-20 år, hvor NAO om vinteren er enten generelt lav eller generelt høj.

Ved en høj NAO er der højere tryk over Portugal og lavere tryk over Island. Det giver kraftige vestenvinde og flere storme over Nordvesteuropa, og våde og milde vintre i det nordlige Europa. En periode med overvejende høj NAO om

Figur 4-15

Variationer i klimaet påvirker også havmiljøet i Danmark.

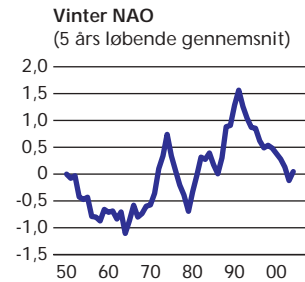
Foto: Peter Bondo Christensen.



vinteren udelukker dog ikke, at der om sommeren kan forekomme lange perioder med stille vejr og østlige vinde som i 2002. Når NAO er lav, blokeres der for vestenvindene, og der kommer tør og kold luft ind fra Asien over det nordlige Europa.

En længere periode med høj NAO har sikkert medvirket til de forholdsvis milde vintre i de sidste 15-20 år. Det har også betydet højere havtemperaturer og har påvirket havstrømme i det nordatlantiske område. Den høje NAO har formodentlig også givet mere nedbør og dermed mere ferskvand til Østersøen. Det betyder, at der er strømmet flere km<sup>3</sup> vand fra Østersøen til Kattegat.

Det ser imidlertid ud til, at NAO generelt er aftagende. I 2003 og 2004 lå NAO på omkring middel for perioden 1950-2000 (figur 4-16). Det kan betyde, at en periode med koldere og mere tørre vintre måske er på vej. Hvis det er tilfældet, vil det give mindre udvaskning af næringsstoffer og mindre udstrømning fra Østersøen, og det vil alt andet lige være til gavn for de indre danske farvande.



Figur 4-16  
Variationer i NAO-indeks som et gennemsnit af indeks i januar, februar og marts måned fra 1950-2004.

