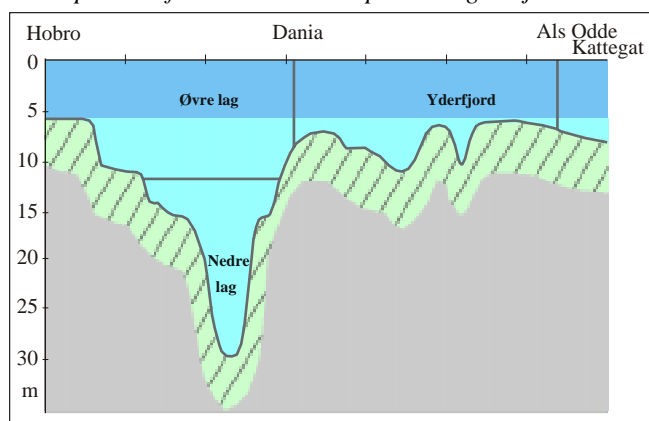


# 14. VAND- OG STOFTRANSPORT

I Mariager Fjord er der siden 1985 hvert år udført beregning af vand- og stoftransport på de indsamlede data. Beregningerne giver et groft skøn over transporter og opholdstider for vand kvælstof og fosfor i fjorden. Beregningerne medtager ikke de biologiske forhold. I det følgende beskrives kun resultaterne fra 1990-1997, da de tidligere år er afrapporteret i Statusrapport for Mariager Fjord fra 1990 (Nordjyllands Amt og Århus Amtskommune, 1990b).

Figur 14.1  
Principskitse af 3-boks-modellen på Mariager Fjord.



## 14.1 Modelopsætning

Beregningerne for 1990-97 er foretaget med en 3-boks-model. I denne modelopsætning er fjorden opdelt i tre bokse, der er indbyrdes afhængige og hvor den yderste står i forbindelse med Kattegat, se figur 14.1. Desuden er der i modellen indbygget en mulighed for indbrud af vand med en højere saltholdighed fra Kattegat direkte til det nedre lag. På langs er fjorden opdelt i to bokse, Inder- og Yderfjorden. Inderfjorden er derefter inddelt i to lag, idet der i Dybet, som ligger ud for Mariager, er indsat en boks i det nederste lag.

Skillefladen mellem den øvre og nedre boks er lagt fast i 12,5 meters dybde ud fra en vurdering af en gennemsnitlig placering af lagdelingen over årene. De forskellige bokses volumener regnes konstante, hvilket er vurderet til at være en acceptabel antagelse, se senere under afsnittet om usikkerheder.

I det følgende gennemgås modellens resultater. Resultaterne af beregningerne beskrives og vurderes for fjorden under ét, både på måneds- og årsbasis. Endelig gives en vurdering af usikkerheden på resultaterne.

## 14.2 Vandskifte

Fjordens vandskifte opfattes som den vandmængde, der totalt tilføres fjorden over en periode, dvs. både ferskvand fra vandløb og saltvand fra Kattegat. Vandskiftet er afhængig af flere forhold, bl.a. ferskvandstilførsel, densitetsdrevne strømninger, tidevand og vindstuvning. I modellen beregnes vandskiftet ud fra massebalance for salt. De vandtransporter, som beregnes, er de nettotransporter, som beregningsmæssigt må medtages for at saltbalancen kan opretholdes. Da modellen forudsætter konstante volumener (ingen vandstandsændringer), beregnes vandskiftet derfor ud fra ferskvandstilførslen og de målte saltholdigheder i fjorden og Kattegat.

Tilledning af saltvand fra Kattegat udgør den største del af vandtilførslen, mens ferskvandstilledningen svarer til omkring en trediedel, se figur 14.2. De totale vandtransporter (sum af saltvand og ferskvand) pr. år dækker over årsvariationer, som er forskellige fra år til år. Med hensyn til ferskvand ses en variation over året, som fra år til år har nogenlunde samme forløb. Tilledningen af ferskvand er mindst i sommerhalvåret og størst i vinterhalvåret. Vinteren 1993-1994 og 1994-1995 viser de største værdier, jf. figur 14.2.

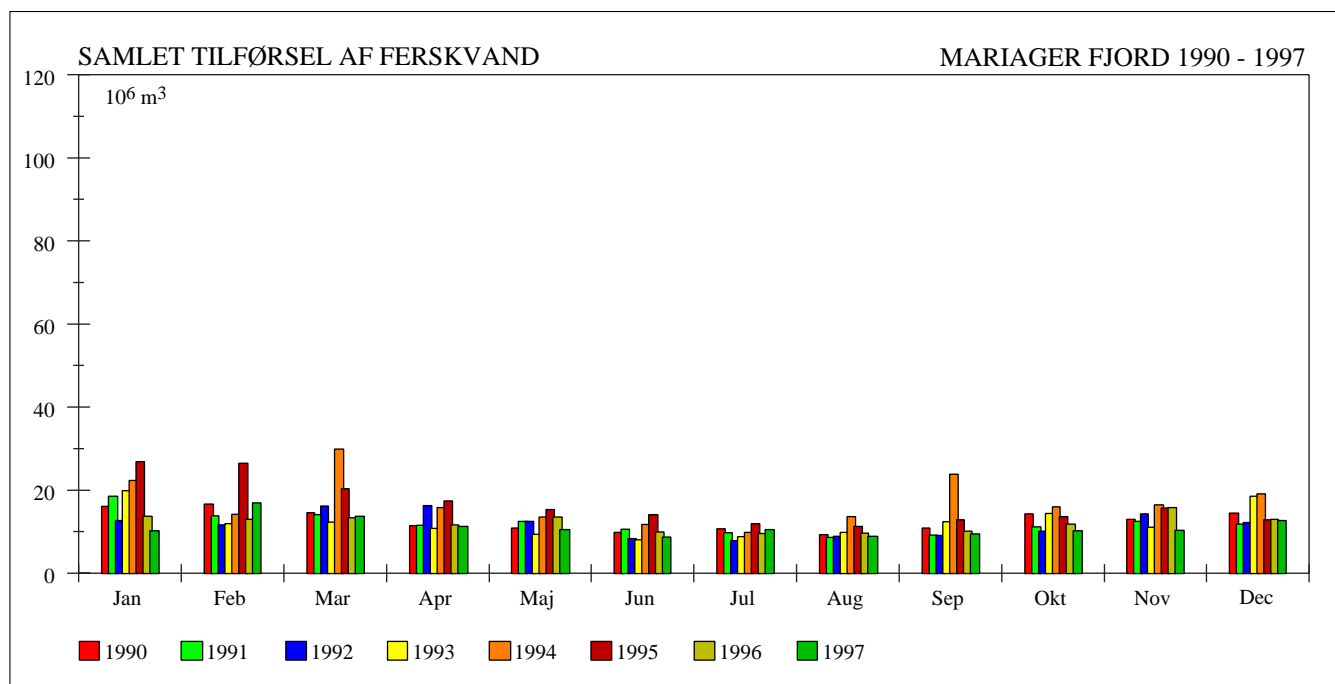
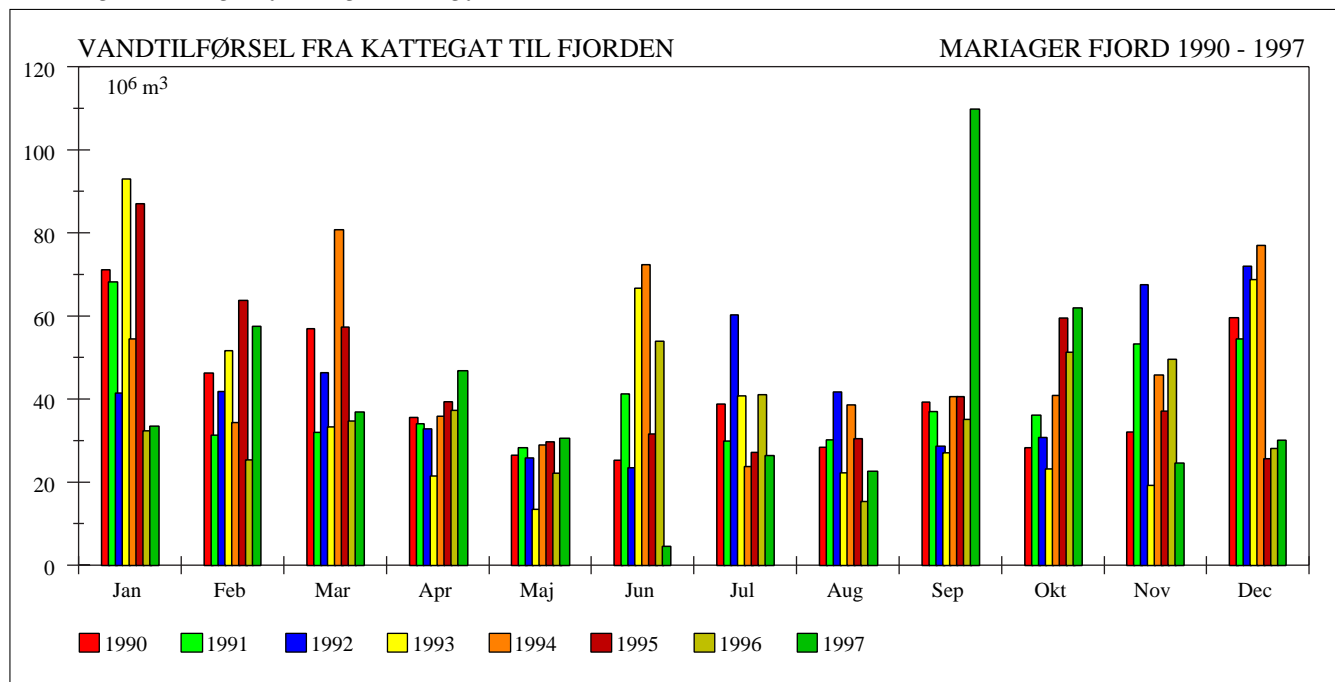
Fjorden tilføres årligt i gennemsnit  $160 \times 10^6 \text{ m}^3$  ferskvand fra land, samt  $500 \times 10^6 \text{ m}^3$  saltvand fra Kattegat, svarende til knap 3 gange fjordens samlede volumen på ca.  $235 \times 10^6 \text{ m}^3$ .

Data fra 1997 er udeladt af ovenstående gennemsnitsbetragtninger, da året var specielt rent vejrsmæssigt. I juni, juli og august var vandtilførslen fra Kattegat usædvanlig lille, mens den i september var meget større end normalt. Forskellene passer sammen med vindforholdene, se figur 5.3, da juni, juli og august var usædvanlig vindstille for perioden, hvorefter der i september kom en del blæst.

### 14.2.1 Vandtransporter

I det følgende er resultaterne præsenteret som de gennemsnitlige transporter for perioden 1990-1996. Data fra 1997 er ikke medtaget i gennemsnittene, da det er vurderet, at året var atypisk pga. iltsvindet i august. Gennemsnittet giver et generelt udtryk for de år, der er beregnet transporter for, idet spredningen er forholdsvis lille (10 %) i den øvre del af fjorden, mens der er

Figur 14.2  
Månedlige tilledninger af Kattegatvand og ferskvand i årene 1990-1997.



en noget større spredning (60 %) på udvekslingen mellem den dybe del af fjorden og det øvre lag. Det skyldes, at udskiftningen af vandet i det nedre lag er mere afhængig af forholdene i det enkelte år end de øvre lag er.

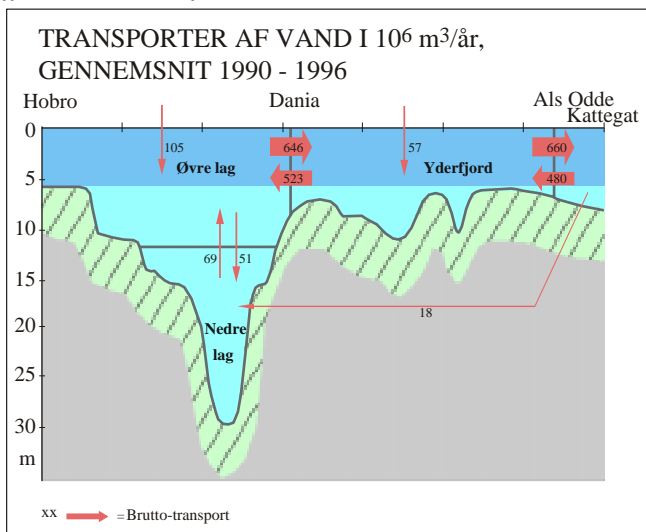
Transporten af vand mellem Kattegat og fjordens enkelte afsnit er angivet med pile på figur 14.3. Bredden er udtryk for størrelsen af transporten. De sjældent

forekommende kraftige indstrømninger fra Kattegat er angivet med en pil direkte til det nedre lag af Inderfjorden.

Det bemærkes, at der transporteres store mængder af vand mellem Inderfjorden og Yderfjorden, samt mellem Yderfjorden og Kattegat. Disse transporter er ikke udtryk for en total udskiftning af vandet, da en stor del af vandet kører frem og tilbage, f. eks. fra Inderfjorden

Figur 14.3

Vandtransport (gennemsnit 1990-1996) mellem Kattegat og fjordens enkelte afsnit.



til Yderfjorden og tilbage igen. Transporterne er mere et udtryk for store vandbevægelser i fjorden. Den afstand, som en partikel vil tilbagelægge i løbet af en tidevandsperiode er ca. 7 km ved munden af fjorden og ca. 3 km ved Dania (Nordjyllands Amt og Århus Amtskommune, 1990b). Langt den største transport sker på langs af fjorden. Transporten mellem Inderfjordens øvre og nedre lag er ca. en faktor 10 mindre.

Tilsyneladende tilføres det nedre lag væsentligt større mængder vand fra det øvre lag end fra Kattegat. Det skyldes sandsynligvis, at modellen er en forsimpning af virkeligheden, hvori det antages, at skillefladen mellem den øvre og nedre vandmasse konstant er i 12,5 meters dybde. Herved giver periodevise opblandinger til dybder større end 12,5 meter anledning til betydelige transporter. Imidlertid er vandmasserne på større dybder reelt næsten upåvirkede heraf, og de nederste vandmasser flyttes kun ved de sjældent forekommende indstrømninger af saltvand fra Kattegat.

I bilag 14.1 er der en opgørelse af transporterne mellem de forskellige dele af fjorden for hvert af årene 1990-97, og i bilag 14.2 er der figurer af transporter i fjorden for hvert af årene 1990 - 1997, svarende til figur 14.3.

### 14.2.2 Opholdstid for vand

Ud fra transporterne er det muligt ved hjælp af modellen at beregne, hvor lang tid vandet opholder sig i de enkelte afsnit af fjorden. Figur 14.4 viser grafisk en fordeling af vandets opholdstid som gennemsnit i de enkelte bokse.

Vandet opholder sig i meget lang tid i den dybe del af Inderfjorden. Ved hjælp af modellen kan det beregnes, at der fra et givet tidspunkt i gennemsnit vil være 75 % af det oprindelige vand tilbage efter 6 måneder og halvdelen tilbage efter 17 måneder. Først efter mere end 7 år vil der være mindre end 1 % tilbage. Gennemsnittene dækker imidlertid over betydelige forskelle fra år til år, afhængigt af, hvornår der har været indstrømning fra Kattegat.

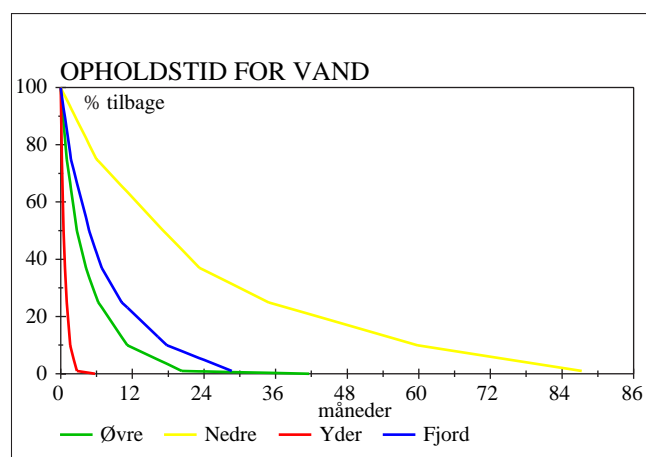
Vandet opholder sig også i forholdsvis lang tid i Inderfjordens øvre lag. Resultater fra modellen viser, at 75 % er tilbage efter 1 måned, halvdelen efter 3 måneder, og 25 % stadig efter 6 måneder. Først efter ca. 2 år er der mindre end 1 % tilbage.

Vandet i Yderfjorden udskiftes som ventet ret hurtigt. Modellen viser, at der transporteres to trediedele væk inden for en måned, og der er mindre end 1 % tilbage efter ca. 3 måneder. I bilag 14.3 er en tabel over de beregnede opholdstider for vand.

Ovenstående beregninger giver en middellopholdstid for hele fjorden, defineret som udskiftning af 37 % af fjordens vandvolumen, på ca. 7 måneder eller omkring 200 dage. I en anden undersøgelse er der angivet en opholdstid for hele fjorden på ca. 6 måneder (Torben Larsen, 1990). Ud fra en tredje undersøgelse kan der beregnes en tilsvarende middellopholdstid på mellem 125 og 167 døgn (F.L.Smidth & Co. A/S, 1972). Det ses, at estimaterne er i samme størrelsesorden.

Figur 14.4

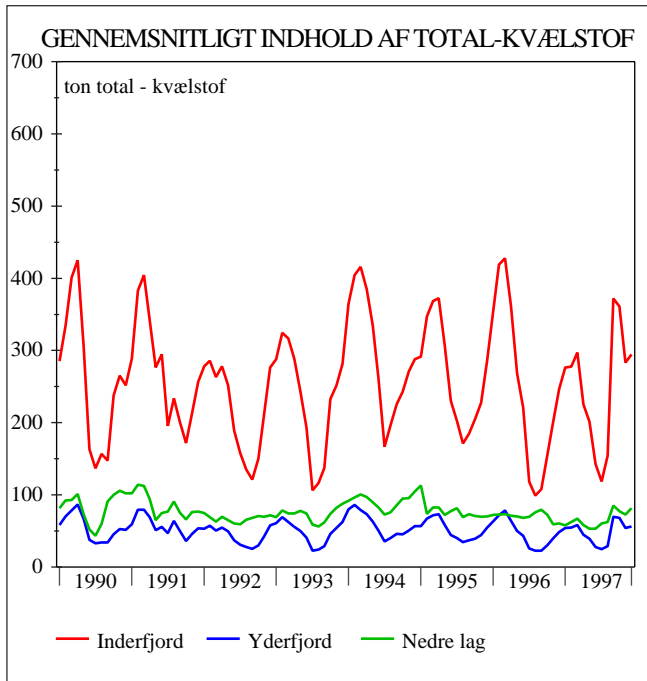
Vandets gennemsnitlige opholdstid i de enkelte bokse, beregnet med 3-boksmodellen.



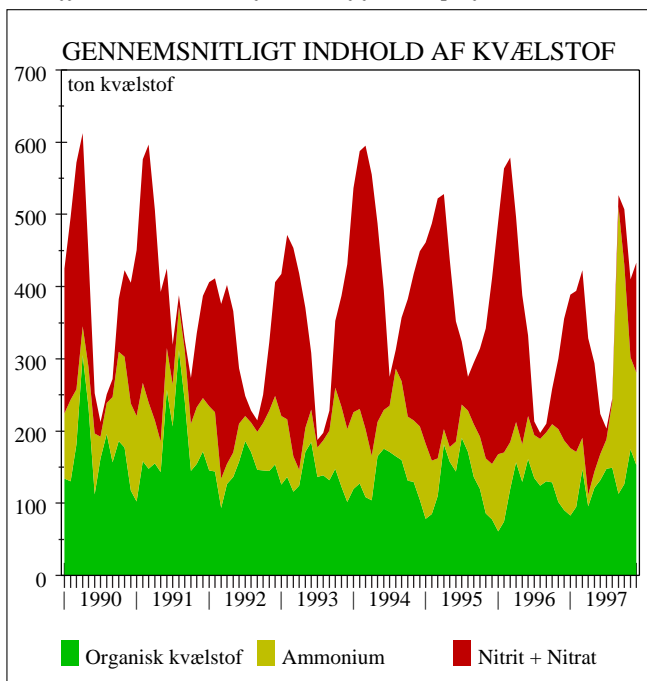
### 14.3 Kvælstof

I sammenligning med andre danske farvande er kvælstof-koncentrationerne i Mariager Fjord høje, se figur 9.11. De største koncentrationer findes i Inderfjordens øvre og nedre lag. I modellen varierer de højeste, volumenvægtede værdier (vinter-koncentrationer) mellem

Figur 14.5  
Mængden af kvælstof i de forskellige afsnit af fjorden.



Figur 14.6  
Hele fjordens indhold af kvælstof fordelt på fraktioner.



1900 og 2700 µg N/l, mens de laveste, volumenvægtede koncentrationer ligger mellem 700 og 1200 µg N/l. Variationerne er størst i Inderfjordens øvre lag. Der er en tydelig, biologisk bestemt variation over året, der gentages fra år til år, se bilag 14.4. På grund af volumenernes størrelse findes de største kvælstofmængder i Inderfjordens øvre lag, mens mængderne er en del mindre i det nedre lag og Yderfjorden, se figur 14.5.

I gennemsnit udgør kvælstofmængderne i Inderfjordens øvre og nedre lag samt Yderfjorden hhv. 67 %, 20 % og 13 % af de totale kvælstofmængder. Middelmængden af kvælstof i fjorden er i følge modellen stort set konstant fra år til år, dvs. der er ikke tendens til hverken et fald eller en stigning. Figur 14.6 viser en opgørelse af hele fjordens indhold af kvælstof fordelt på fraktioner.

Det ses, at den største variation forekommer i nitrit + nitrat. Den variation stammer overvejende fra det øvre lag i Inderfjorden, se bilag 14.5, hvor der er en tilsvarende opgørelse for hvert af fjordafsnittene. I det nedre lag af Inderfjorden er kvælstofmængden mindre varierende og den største del af kvælstoffet forekommer på ammonium-form. Under iltsvindet i august 1997 ses der en markant stigning i fjordens indhold af ammonium i alle dele af fjorden.

I det følgende er total-kvælstof omtalt som kvælstof, idet fraktionerne ikke er vurderet for sig.

#### 14.3.1 Transport af kvælstof

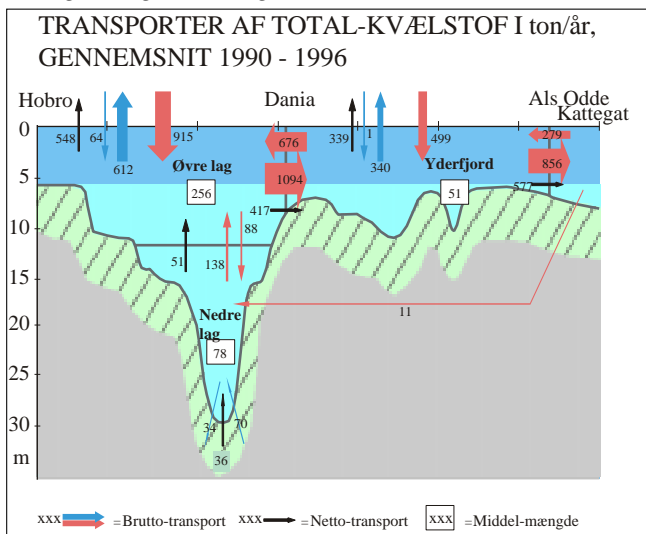
Figur 14.7 viser transporterne af kvælstof, beregnet med 3-boksmodellen, som et gennemsnit over 1990 - 1996. Data fra 1997 er ikke medtaget i gennemsnitene, da det er vurderet, at året var atypisk pga. iltsvindet i august.

Gennemsnittet dækker over spredninger fra år til år, der er forholdsvis små for Inderfjordens øvre lag og Yderfjorden. Transporterne i det nedre lag har derimod en større spredning, der sandsynligvis skyldes en afhængighed af forskelle i indbrud af Kattegatvand.

De røde og blå pile symboliserer bruttotransporter, mens de sorte (tynde) er nettotransporter. Bredden af de røde og blå pile er udtryk for størrelsen af transporten. De lodrette pile oppefra er tilledning fra land. De blå pile er den mængde, der enten forsvinder fra eller tilføres vandfasen. I det følgende omtales denne mængde som den interne til- og fraførsel, idet det er den mængde, der kræves for at kvælstofbalancen pas-

Figur 14.7

Transporter af kvælstof mellem de forskellige afsnit af fjorden og Kattegat som et gennemsnit over 1990-1996.



ser i modellen. Den interne fraførsel udgøres af denitrifikation, sedimentation og indbygning i blåmuslinger, ålegræs m.m., når de blå pile peger væk fra boksen. Når de blå pile peger ind i boksen, foregår der en intern tilførsel, som kan bestå af frigivelse fra sedimentet og kvælstoffiksering. Værdierne under boksene angiver den gennemsnitlige kvælstofmængde i vandfasen over året. Pilen fra Kattegat direkte til nedre lag er udtryk for den kvælstoftilledning, der kommer fra Kattegat, når der er indbrud af saltere vand langs bunden i Yderfjorden og ind i Dybet.

Af figur 14.7 ses, at transporterne på langs af fjorden samt tilledningen fra land og den interne til- og fraførsel udgør de største mængder, hvor forholdene i det øvre lag i Inderfjorden er dominerende. Det nedre lag ses at være af langt mindre betydning.

Bruttotransporten mellem Inder- og Yderfjorden udgør hhv. ca. 77 % og 48 % af det, der kommer fra land. Netto transporteres der således en mængde svarende til knap 30 % af det, der kommer fra land fra Inder- til Yderfjorden. Udvekslingen med det nedre lag i Inderfjorden svarer til en bruttotransport fra og til øvre lag på hhv. 6 % og 10 % af tilledningen fra land. Netto-transporten fra nedre til øvre lag svarer således til ca. 4 % af den mængde, der kommer fra land.

Totalopgørelserne for hele fjorden er præget af forholdene i Inderfjordens øvre lag. Det ses, at de største værdier er de årlige tilledninger fra land, og derefter tilledningen til Kattegat og den interne til- og fraførsel. I gennemsnit er der en nettoeksport (transport til Kattegat fratrukket transport fra Kattegat) på ca. 40 % af

den totale tilledning fra land. Den interne fraførsel udgør 60 % af tilledningen fra land. Fra fjordens vandmasse forsvinder således i gennemsnit ca. 100 % af tilledningen fra land.

Set over årene kan det således ud fra modellens resultater konkluderes, at den mængde kvælstof, der tilføres fjordens vandmasser pr. år, også forsvinder igen, og kvælstofmængden i fjorden derfor er konstant. Dette ses også ved at sammenligne indholdet af kvælstof i fjorden over årene, hvor det selvfølgelig varierer fra år til år, men er i samme størrelsesorden, jf. bilag 14.1. Dvs. der sker hverken et fald eller en tilvækst i kvælstofindholdet.

I bilag 14.1 er angivet værdier for de årlige transporter af kvælstof i fjorden. I bilag 14.2 er der en grafisk fremstilling af alle kvælstoftransporterne for hvert år, svarende til figur 14.7.

### 14.3.2 Intern til- og fraførsel af kvælstof

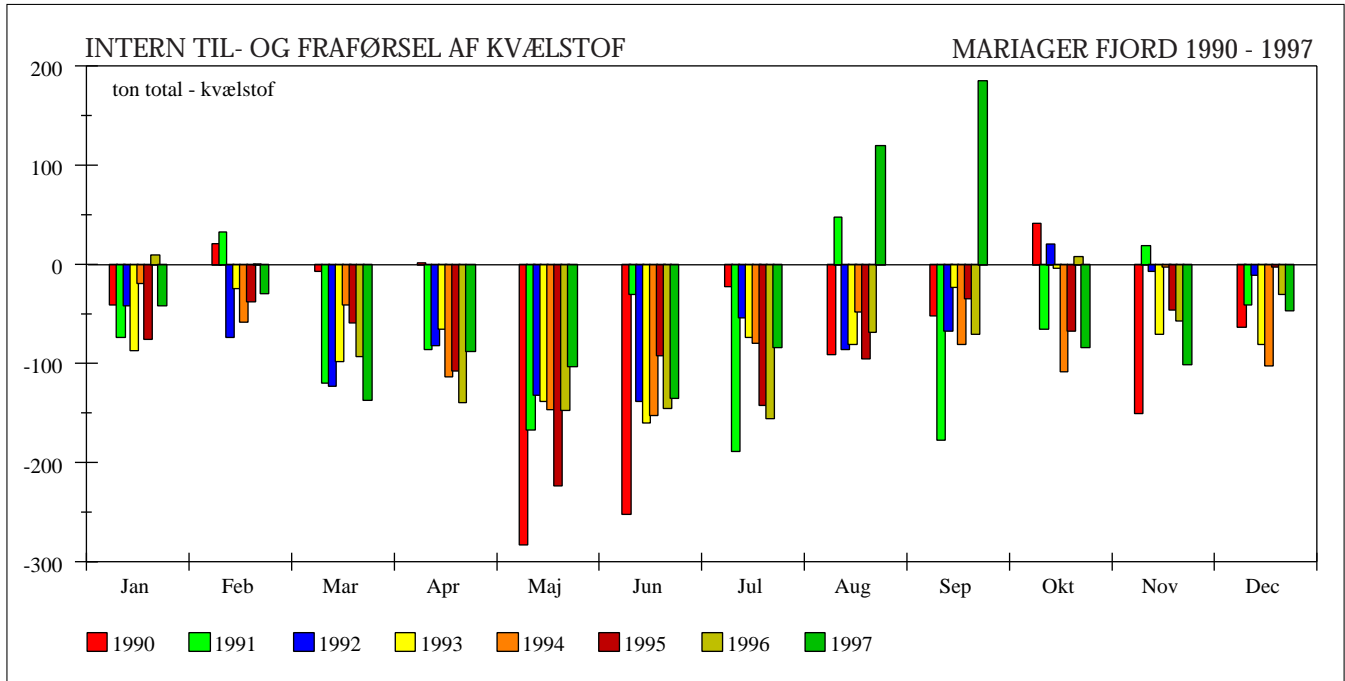
Den interne til- og fraførsel udgør en stor del af de beregnede mængder i modellen. I figur 14.8 ses den beregnede variation over året som total for hele fjorden.

Det ses, at der foregår en intern fraførsel (negative værdier), svarende til sedimentation og denitrifikation næsten hele året hvert år med få undtagelser. Fraførslen er størst i sommerhalvåret og mindst i vinterhalvåret. Tendensen er ens fra år til år, mens størrelserne kan variere. I august og september 1997 ændrer situationen sig dog, da der sker en intern tilførsel af kvælstof til vandfasen (positive værdier). I de to måneder tilføres der en kvælstofmængde på næsten 400 ton, svarende til ca. en trediedel af tilførslen fra land i 1997.

For den interne til- og fraførsel er det forholdene i Inderfjordens øvre lag, der er afgørende. Den interne til- og fraførsel i Yderfjorden er meget mindre og langt mere konstant over året. I forhold til det øvre lag er den interne til- og fraførsel i det nedre lag lille og variationen over året er ikke entydig. Tendensen er dog, at der sker en tilførsel (positive værdier), svarende til en frigivelse fra sedimentet, fra august måned til og med januar/februar. Der foregår overvejende en fraførsel (negative værdier), som sandsynligvis er sedimentation af forårsmaksimum i april og maj, men fraførslen foregår også spredt over året. I bilag 14.6 ses variationen i den interne til- og fraførsel, svarende til figur 14.8, for alle afsnit af fjorden.

Figur 14.8

Variationerne i kvælstofs interne til- og fraførsler for hele fjorden pr. måned for hvert af årene 1990-1997.



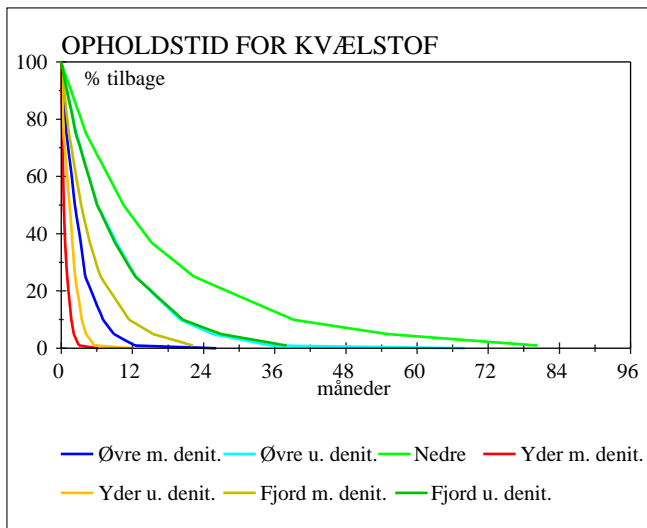
### 14.3.3 Opholdstid for kvælstof

Ved hjælp af modellen er der beregnet en opholdstid for kvælstof i fjorden. I beregningen antages det, at kvælstoffet skal være helt ude af fjorden. Dvs. kvælstoffet skal være eksporteret til Kattegat eller denitrificeret. Kvælstof, der midlertidigt er ude af systemet ved f.eks. sedimentation og indbygning i blåmuslinger, ålegræs m.m., opfattes fortsat som værende i fjorden. Beregningen er foretaget for to yderpunkter. Dvs. én beregning, hvor det antages, at der ikke sker en denitrifikation. Og en anden beregning, hvor det antages, at

hele den interne fraførsel i Inderfjordens øvre lag og Yderfjorden udgøres af denitrifikation. I Inderfjordens nedre lag sker der netto en intern tilførsel til vandfasen, og der er derfor kun én beregning for det nedre lag. Figur 14.9 viser opholdstiden for kvælstof i fjorden, beregnet ud fra boksmodellen.

Figur 14.9

Opholdstid for kvælstof i fjorden med og uden denitrifikation.



I Inderfjordens øvre lag kan opholdstiden for kvælstof således forventes at ligge inden for de to yderpunkter. 50 % af kvælstoffet vil derfor fra et givet tidspunkt i gennemsnit være tilbage efter 2,5 måned med denitrifikation og 6 måneder uden denitrifikation. 25 % vil være tilbage efter hhv. 4 og 13 måneder. I det øvre lag er der således en markant forskel mellem de to antagelser.

I Yderfjorden er forskellen mindre. 50 % er tilbage efter 0,5 måned med denitrifikation og 2,5 måneder uden denitrifikation, og 25 % er tilbage efter hhv. 1 og 2,5 måned.

Opholdstiden i Inderfjordens nedre lag er noget større. 50% er tilbage efter 10,5 måned og 25 % er tilbage efter 22 måneder.

For hele fjorden under ét er opholdstiden for 50 % udskiftning af kvælstoffet mellem 3,5 og 6 måneder. 37 % af den oprindelige kvælstofmængde er fortsat tilbage efter 5-9 måneder. Først efter 22-38 måneder er 99 % af det oprindelige kvælstof væk fra fjorden. I

bilag 14.3 er angivet en tabel over de beregnede opholdstider for kvælstof i fjorden.

På baggrund af de lange opholdstider vurderes det, at Inderfjorden er følsom for tilførsler af kvælstof fra land, også i vinterhalvåret forud for planktonets vækstsæson. En del af den kvælstof, der tilføres fra land i løbet af vinteren, vil efter en remineralisering kunne give anledning til algevækst. Koncentrationen af næringsalte i Yderfjorden er ikke direkte afhængig af koncentrationen flere måneder forinden, men afhænger primært af koncentrationen i det vand, der kommer fra de tilstødende områder: Fra land, Inderfjorden og Kattegat.

Ud fra undersøgelser af sedimentationen i fjorden er det konstateret, at mængden af kvælstof, der sedimenteres er forholdsvis lille, se kapitel 13. Den interne fraførsel af kvælstof for Inderfjordens øvre lag omregnes derfor til denitrifikationsrater, hvorved der fås en mulighed for at sammenligne med denitrifikationsrater fra andre områder. I det øvre lag er der en gennemsnitlig kvælstoffraførsel på 550 ton N/år. Når der tages hensyn til en sedimentation på omkring 40-70 ton N/år, vil der være ca. 500 ton N/år, der i følge modellen denitrificeres.

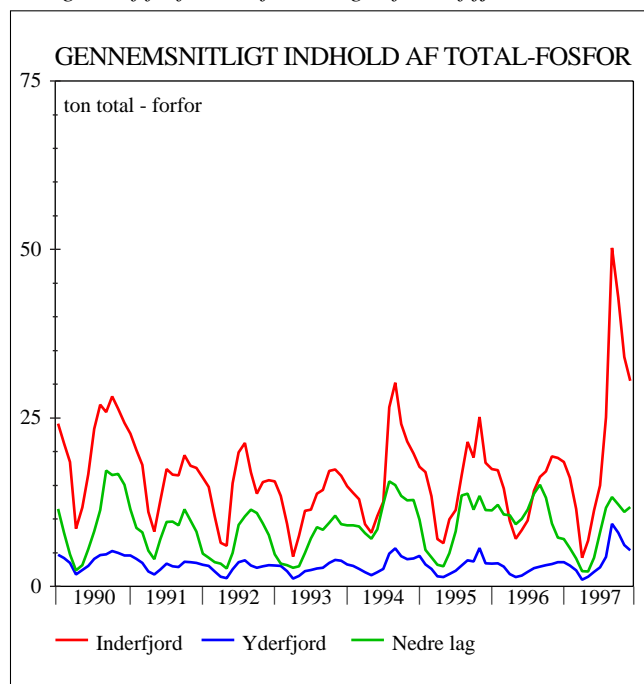
Denitrifikationen foregår især i overfladesedimentet i kontakt med iltet vand. Overfladearealet i det øvre lag er på minimum 12,5 km<sup>2</sup> (12,5 meters dybde) - heraf fås en årlig denitrifikationsrate på ca. 40 g N/m<sup>2</sup>. Sammenlignes denne værdi med en årlig denitrifikationsrate på omkring 2 g N/m<sup>2</sup> for kystnære sedimenter (DMU, 1996) ses den at ligge noget højere. En del af forskellen kan delvis tilskrives usikkerheder på beregningerne og delvis en forskel i opholdstiden. En længere opholdstid vil sandsynligvis medføre en større kvælstoftilbageholdelse (DMU, 1996). I den beregnede kvælstoftilbageholdelse er inkluderet både sedimentation, denitrifikation og indbygning i blåmuslinger, ålegræs, m.m. I Mariager Fjord er opholdstiden forholdsvis stor, og man kan derfor forvente en noget større kvælstoftilbageholdelse. De opholdstider, der er beregnet med antagelse om denitrifikation, må derfor anses for at være tættest på en opholdstid for kvælstof.

## 14.4 Fosfor

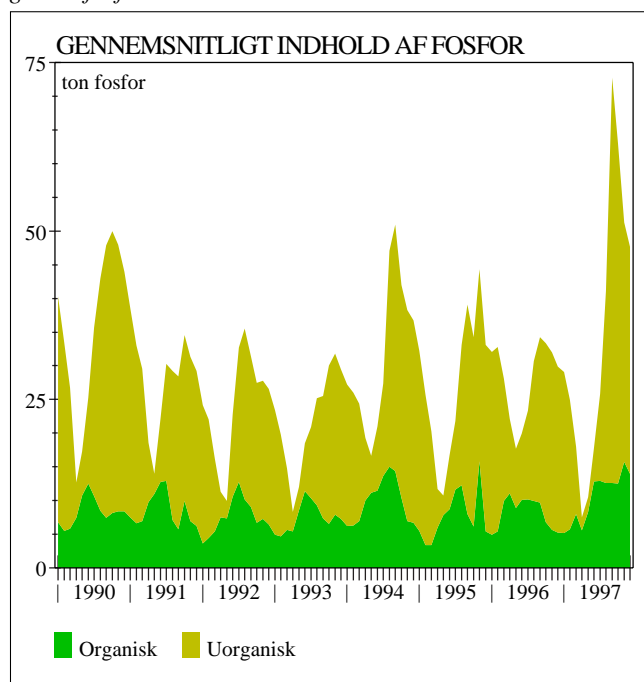
I forhold til andre danske fjordsystemer ligger koncentrationen af fosfor, opgjort som total-fosfor, i Mariager Fjord relativt højt, jf. figur 9.21. Koncentrationen er højest i den dybe del af fjorden, mindre i det øvre lag

og mindst i Yderfjorden, der også er meget påvirket af de lavere koncentrationer i Kattegat, se bilag 14.7. Til trods for, at de største fosforkoncentrationer i Mariager Fjord findes i det nedre lag i Inderfjorden, er de største fosfor-mængder i det øvre lag i Inderfjorden, pga. et større volumen, se figur 14.10.

Figur 14.10  
Mængden af fosfor i de forskellige afsnit af fjorden.



Figur 14.11  
Hele fjordens indhold af fosfor fordelt på organisk og uorganisk fosfor.



I gennemsnit udgør mængden af fosfor i Inderfjordens øvre og nedre lag samt Yderfjorden hhv. 57 %, 32 % og 11 % af de totale fosformængder.

Over 1990-1996 årene er det gennemsnitlige indhold af fosfor i fjorden ikke ændret væsentligt. Figur 14.11 viser fjordens indhold af fosfor, fordelt på organisk og uorganisk fosfor.

Det ses, at indholdet af organisk fosfor er næsten konstant fra år til år. Derimod varierer indholdet af uorganisk fosfor og efter 1990 er det afhængig af, om der har været iltsvind, idet mængden er størst i sommeren 1994 og 1997, hvor der netop blev konstateret mere omfattende områder med lave iltkoncentrationer. I sommeren 1997 ses den største mængde af uorganisk fosfor.

Hele fjordens indhold af organisk fosfor stammer overvejende fra Inderfjordens øvre lag, mens variationerne i indholdet af uorganisk fosfor stammer fra både Inderfjordens øvre og nedre lag. I Yderfjorden er mængderne, og dermed også variationerne, af mindre betydning for opgørelsen for hele fjorden. I bilag 14.8 ses opgørelser af de forskellige fjordafsnits fordeling på organisk og uorganisk fosfor, svarende til figur 14.11.

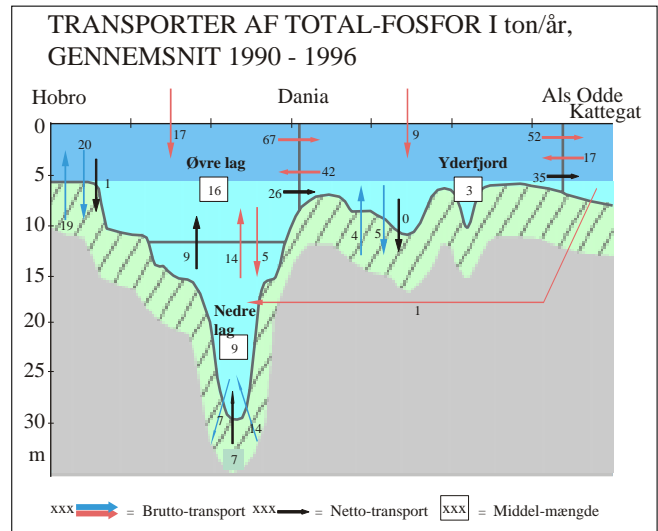
I det følgende omtales totalfosfor som fosfor, idet der ikke er vurderet på fraktioner.

### 14.4.1 Transport af fosfor

Figur 14.12 viser de gennemsnitlige transporter af fosfor i Mariager Fjord, der er beregnet med modellen over perioden 1990-1996. Værdier fra 1997 er udeladt af gennemsnitsbetragtningerne, da året er vurderet som atypisk pga. det massive iltsvind i august.

De røde og blå pile mellem de forskellige afsnit af fjorden angiver transporter af fosfor. Bredden er udtryk for størrelserne. De sorte (tynde) pile er udtryk for netto-transporter. Pilen direkte fra Kattegat til det nedre lag er udtryk for den tilledning, der foregår langs bunden i Yderfjorden, når der er indbrud af saltere vand fra Kattegat til det nedre lag. De lodrette pile oppefra symboliserer tilledningen fra land. De blå pile på tværs af bunden er udtryk for den interne til- og fraførsel. I modellen udgør den interne til- og fraførsel den mængde fosfor, der kræves for at fosforbalancen passer. Den interne til- og fraførsel af fosfor kan sandsynligvis tolkes som en udveksling af fosfor med sedimentet. Dvs. når den blå pil peger væk fra boksen, kan

Figur 14.12  
Transporter af fosfor mellem de forskellige afsnit af fjorden og Kattegat som et gennemsnit over 1990-1996.



det være udtryk for sedimentation samt en indbygning i biomasse. Når den blå pil peger ind i boksen, er det sandsynligvis udtryk for tilførsel af fosfor fra bunden. Værdierne under boksene angiver den gennemsnitlige fosformængde i boksen over året.

Spredningen på transporterne mellem årene er for fosfor – som for kvælstof – mindst på langs af fjorden, mens udvekslingerne med den dybe del har en lidt større spredning. For de interne til- og fraførsler er spredningen fra år til år størst i Inderfjordens øvre lag og Yderfjorden. Gennemsnittene vurderes dog til at være repræsentative for generelle tendenser.

En sammenligning af transporterne af fosfor mellem de forskellige bokse i fjorden, jf. figur 14.12 viser, at disse først og fremmest foregår på langs af fjorden. Hele fjorden taget under ét er derfor domineret af forholdene i det øvre lag og Yderfjorden, da de to bokse udgør størstedelen af fjorden. I gennemsnit foregår der en brutto-transport mellem Inderfjorden og Yderfjorden på hhv. 2,6 og 1,6 gange tilledningen fra land. Netto sker der således en transport fra Inderfjorden til Yderfjorden, svarende til den årlige tilledning fra land til fjorden, der er på 20-30 tons fosfor.

Transporterne af fosfor mellem det nedre og øvre lag er noget mindre end mellem det øvre lag og Yderfjorden. De største transporter i det nedre lag er udvekslingen med det øvre lag og tilførsel af fosfor fra sedimentet, mens tilledningen fra Kattegat er forsvindende.

Fra det nedre til det øvre lag tilføres der i gennemsnit en mængde svarende til 54 % af tilledningen fra land.

Den modsatte vej er transporten ca. 20 %, dvs. der er en netto-transport af fosfor fra det nedre til det øvre lag i størrelsesordenen en trediedel af tilledningen fra land.

Den gennemsnitlige fosfortilledning til Kattegat pr. år er ca. det dobbelte af tilledningen fra land. Fra Kattegat modtager fjorden en mængde, der svarer til ca. to trediedele af tilledningen fra land. Netto-eksporten af fosfor er derfor 30 % større end tilledningen fra land. Tilførslen fra sedimentet svarer netto til 23 % af tilledningen fra land. Merudledningen af fosfor til Kattegat stammer overvejende fra den interne tilførsel af fosfor fra sedimentet, samt fra en lille reduktion af fosformængden i fjorden, som i løbet af årene 1990-1996 svarer til en nedgang i fosformængden i fjordens vandmasse på under 2 % pr. år. Den store fosforreduktion i fjorden har vist sig tidligere, idet fjordens fosformængde i dag kun svarer til 1/3 af den mængde, der var i begyndelsen af 1980'erne pga. den forbedrede spildevandsrensning.

I bilag 14.1 er angivet alle værdier for de årlige transporter af fosfor mellem fjordafsnittene, og i bilag 14.2 er der figurer af disse, svarende til figur 14.12.

#### 14.4.2 Intern til- og fraførsel af fosfor

Den interne til- og fraførsel af fosfor kan betragtes som en udveksling med sedimentet, samt en indbyg-

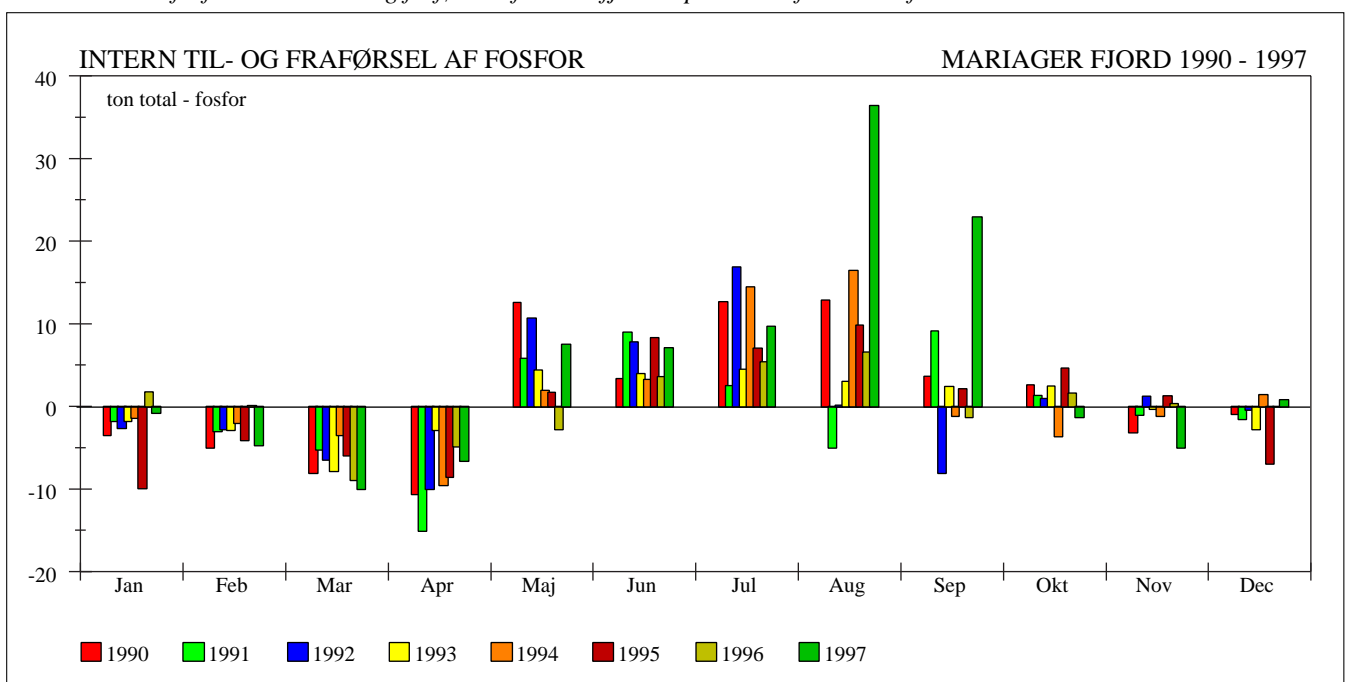
ning i biomasse. Figur 14.13 viser årsvariationen af den interne til- og fraførsel af fosfor for hele fjorden. Variationen over året er stort set den samme år for år. I foråret afgives fosfor til sedimentet (negative værdier), om sommeren frigives fosfor (positive værdier), mens efteråret varierer lidt. I august og september 1997 øgedes tilførslen af fosfor fra sedimentet markant. Den interne tilførsel var i de to måneder ca. 5 gange større end normalt, svarende til ca. 150 % af tilledningen fra land.

De totale, interne til- og fraførsler for årene varierer også, da der i nogle år foregår en nettofrigivelse fra sedimentet (positive værdier), mens der i andre år foregår en ophobning i sedimentet (negative værdier). For fjorden som helhed foregår der i gennemsnit en frigivelse fra sedimentet (positive værdier). Den interne til- og fraførsel for hele fjorden er fundet som summen af de interne til- og fraførsler i de enkelte fjordafsnit.

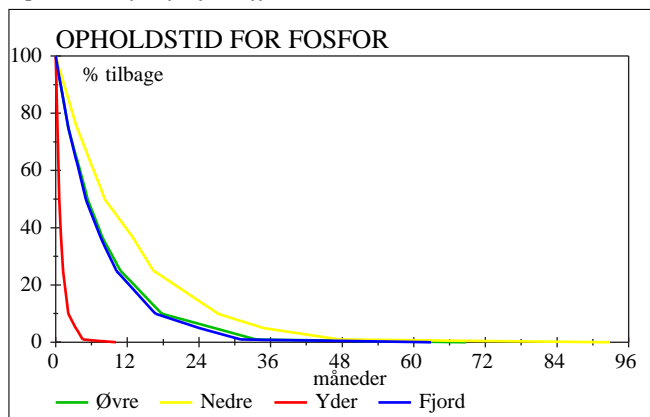
I det øvre lag foregår der i årene 1990-1996 netto en sedimentation (negative værdier) på i gennemsnit ca. 1 ton P/år. I det nedre lag tilføres sedimentet brutto i gennemsnit lidt mere end den årlige tilførsel fra land, mens der i gennemsnit frigives lidt mindre til vandfasen igen. I Yderfjorden er der netto en meget lille tilførsel til sedimentet på i gennemsnit 400 kg P/år. Årene varierer dog også indbyrdes fra hinanden. I bilag 14.9 ses den interne til- og fraførsels variation, svarende til figur 14.13, for alle afsnit af fjorden.

Figur 14.13

Variationerne i fosfors interne til- og fraførsler for hele fjorden pr. måned for hvert af årene 1990-1997.



Figur 14.14  
Opholdstid for fosfor i fjorden.



Mens der i det øvre lag og i Yderfjorden på årsbasis både finder en intern til- og fraførsel sted, er det nedre lag på årsbasis helt domineret af en frigivelse af fosfor til vandfasen (positive værdier). Et gennemsnit over årene 1990-1996 giver en tilførsel fra sedimentet til det nedre lag på ca. 7 ton pr. år.

#### 14.4.3 Opholdstid for fosfor

Ved hjælp af modellen er der beregnet en middellopholdstid for fosfor i fjorden. I beregningen er det antaget, at kun den del af fosformængden, der eksporteres til Kattegat, er endeligt væk fra fjorden. Udvekslingen med sedimentet indgår derfor ikke i beregningen.

Figur 14.14 viser fosfors opholdstid i fjorden.

I Inderfjordens øvre lag betyder opholdstiden for fosfor, at der fra et givet tidspunkt i gennemsnit vil være 50 % af det oprindelige fosfor tilbage efter mere end 5 måneder. 25 % vil fortsat være tilbage efter 11 måneder.

I Inderfjordens nedre lag tager det i gennemsnit ca. 8 måneder for en 50 %'s udskiftning. 25 % er fortsat tilbage efter 16 måneder.

I Yderfjorden er opholdstiden mindst. 50 % er tilbage efter 0,5 måned og 25 % efter lidt mere end en måned.

For hele fjorden ligger opholdstiden tæt på Inderfjordens øvre lag, hvilket kan forklares med, at denne del af fjorden udgør den største del, og derfor også tæller mest. 50 % af fosformængden er udskiftet efter 5 måneder og 25 % efter 10 måneder. Opholdstiden for fosfor i fjorden for 37 %'s udskiftning er på 7,5 måned.

I bilag 14.3 er en tabel med de beregnede opholdstider for fosfor.

På baggrund af de lange opholdstider vurderes det, at Inderfjorden også er følsom over for tilførsler af fosfor fra land i længere tid forud for planktonets vækstsæson.

### 14.5 Usikkerheder

Modelberegninger er forbundet med usikkerheder, hvilket må forventes, når virkeligheden beskrives firkantet. I det følgende beskrives og vurderes nogle mulige fejlkilder.

I modellen er fjorden delt op i tre bokse med 1) konstant volumen og 2) fuld opblanding.

#### Ad 1)

Beregningen med konstant volumen introducerer en usikkerhed i alle tre bokse. I overfladen pga. vandstandsvariationer, som ikke medtages. I skillefladen mellem øvre og nedre lag pga. at lagdelingens placering antages konstant.

Med hensyn til vandstandsændringerne vurderes fejlen til at være minimal, idet den volumentilvækst/reducering, som vandstandene giver anledning til, er små i forhold til totalvolumenet. Amternes egne målinger af vandstanden viser, at tidevandsamplituderne i gennemsnit i Inderfjorden ligger på omkring 30 cm med en spredning på 10 cm. En rimelig ændring i vandstanden vurderes at være +/- 25 cm, dvs. max. en halv meter (Århus Amt og Nordjyllands Amt, 1996). En sådan ændring vil i modellen medføre en fejl på den interne til- og fraførsel af kvælstof og fosfor på omkring +/- 1 % for hele fjorden som et gennemsnit over årene. En nærmere undersøgelse af vandstandene viser, at middelvandstanden varierer meget lidt fra kote 0 m DNN (- 2 cm), hvorfor de ovennævnte fejl må beskrives som de absolutte yderpunkter ved at beregne med konstant volumen.

Med hensyn til antagelsen om at skillefladen mellem øvre og nedre lag i modellen ligger konstant i 12,5 meters dybde, så er skillefladens flytning op og ned indirekte medtaget, idet der foregår nogle interne transporter mellem øvre og nedre lag, som også er udtryk for, at skillefladen flytter sig.

#### Ad 2)

Modellen forudsætter, at den aktuelle koncentration repræsenterer den totale stofmængde i hver boks. Det er en forsimpning af virkeligheden, som det er forsøgt at tage hånd om ved at volumenvægte koncentrationer-

ne, så mængderne i de enkelte bokse er tilstræbt korrekt. De beregnede værdier er derfor mere et udtryk for en generel tilstand i området end for tilstanden et bestemt sted.

Yderligere er opgørelsen af koncentrationerne/stofmængderne baseret på målinger fra 2 - 3 stationer (2 i fjorden og 1 i Kattegat). Spørgsmålet er, hvor repræsentative disse målinger er for fjorden. I efteråret 1997 er der foretaget en undersøgelse mhp. at vurdere dette. Undersøgelsen er udført ved at udtage prøver i forskellige dybder på flere transekter i den dybe del af fjorden. De foreløbige resultater viser, at stationen i denne ene situation er rimelig repræsentativ for forholdene i området (Nordjyllands Amt og Århus Amt, Upubl.).

En anden side af koncentrationsproblemet er, at der fra Yderfjorden ikke foreligger målinger. Koncentrationerne er derfor vurderet til – som volumenvægtede, middelkoncentrationer for hele Yderfjorden – at være afhængig af 2/3 af Inderfjordens koncentration og 1/3 af Kattegats koncentration af de pågældende stoffer. Det medfører derfor en ikke opgjort usikkerhed på stofmængderne i Yderfjorden, og dermed også på beregningerne. Men da Yderfjorden rent volumenmæssigt udgør den mindste del af fjorden, vurderes resultaterne for hele fjorden dog at give et rimeligt billede af situationen. I bilag 14.10 er den procentvise ændring ved at antage en fifty-fifty fordeling angivet for nogle forskellige transportere. De største ændringer i procent fås i udvekslinger med Kattegat.

Af andre muligheder for at introducere fejl eller usikkerheder i modellen er tilledningerne. I modellen er således ikke medtaget nedbør på fjordens overflade samt atmosfærisk deposition. Heller ikke fordampning fra fjorden er medtaget. Generelt vurderes disse fejlkilder at være af mindre betydning. Mht. nedbør og fordampning er det vurderet, at disse for en stor del ophæver hinanden. Desuden vil disse parametre give anledning til meget små volumenændringer, og de er én gang vurderet til at være af mindre betydning, jf. ovenstående. Fra beregninger med en anden udgave af boksmodellen vides det, at udeladelse af nettonedbøren ikke er en væsentlig fejl (Nordjyllands Amt, 1996).

Fra virksamheden Dansk Salt i Dania udledes en saltmængde, som ikke er medtaget i beregningerne. Det er tidligere undersøgt – med en anden udgave af boksmodellen – om denne udledning betyder noget. Konklusionen var, at denne fejl er ubetydelig, hvorfor tilledningen ikke er medtaget (Nordjyllands Amt, 1996).

Fra tilledningerne fra land introduceres sandsynligvis også en fejl i modellens resultater. Fra andre undersøgelser ved man, at fosfor kan være underestimeret i opgørelsen af tilledningen fra land (Århus Amt, 1997c). Det er dog ikke muligt at kvantificere denne fejl, da den er afhængig af det enkelte vandløb og de vejrmæssige forhold. Fejlen på kvælstof er formentlig mindre. Den evt. fejl på tilledningen af kvælstof og fosfor fra land indvirker i modellen direkte på den interne til- og fraførsel. I en undersøgelse vurderes usikkerheden på 1-boksmodellen ved at antage en fejl på tilledningen fra land af fosfor på 50 % (Århus Amt og Nordjyllands Amt, 1996). En beregning, hvor tilledningen fra land tillægges 50 %, resulterer i en ændring på den interne til- og fraførsel på -70 % (WaterConsult, 1996). En lignende beregning med 3-boksmodellen, hvor fosfortilledningen øges med hhv. 30 og 5 %, giver en usikkerhed på gennemsnittet 1990 - 1996 af den interne til- og fraførsel for hele fjorden på hhv. -140 % og -23 %. Det ses heraf, at den interne til- og fraførsel i modellen fortsat afhænger meget af tilledningen fra land.

Den interne til- og fraførsel i modellen er dér, hvor usikkerhederne opsamles. Den interne til- og fraførsel af fosfor er den mængde, der i modellen er behæftet med den største usikkerhed. En yderligere følsomhedsanalyse på modellen har vist, at den interne til- og fraførsel af fosfor også er påvirket af bestemmelsen af saltholdighed i både fjord og Kattegat, samt fosfor-koncentrationen i fjorden. En relativ ændring i saltholdigheden i fjordens øvre lag på +/- 5 %, giver en ændring af den interne til- og fraførsel af fosfor på + 50 % /- 40 %. I forhold til fosfortilledningen fra land udgør den interne til- og fraførsel i modellen som udgangspunkt 22 %. Ændringerne i saltholdigheden betyder, at den interne til- og fraførsel som gennemsnit udgør fra 13 % til 32 % af tilledningen fra land. Derimod er kvælstof-koncentrationen i fjorden og volumen samt fordelingen af saltholdighed, kvælstof- og fosfor-koncentrationerne i Yderfjorden af langt mindre betydning, se bilag 14.10, hvor resultaterne af de forskellige undersøgelser er angivet.

Til sammenligning er der gennemført en vurdering af 1-boksmodellen over 3 uger og 2 uger, hvor resultatet var, at den samme ændring medfører en ændring af den interne til- og fraførsel på hhv. +/- 100 % og +/- 500 % (Århus Amt og Nordjyllands Amt, 1996). Heraf ses, at usikkerheden er mindsket betydeligt, sandsynligvis både som følge af en undersøgelse over en længere periode og som følge af, at der i 3-boksmodellen er taget hensyn til indbrud af saltvand fra Kattegat.

I bilag 14.10 er givet en samlet oversigt over de procentvise forskelle i resultaterne ved forskellige ændringer.

## Sammenfatning

---

Der er gennemført vand- og stoftransportberegninger for Mariager Fjord for årene 1990-1997 med en 3-boksmodel. Beregningerne giver et groft skøn over transporter og opholdstider for vand kvælstof og fosfor i fjorden. Beregningerne medtager ikke de biologiske forhold.

Vandet opholder sig lang tid i Inderfjordens dybe lag. Efter 17 måneder vil der stadigvæk være halvdelen af det oprindelige vand tilbage. I Inderfjordens øvre lag er opholdstiden kortere. Her vil der efter 3 måneder være halvdelen af det oprindelige vand tilbage, hvilket er lang tid sammenlignet med andre fjorde. I Yderfjorden transporteres to trediedele af det oprindelige vand væk inden for en måned.

Kvælstofmængden i Mariager Fjords vandmasser er konstant. Af den mængde, der tilledes fra land eksporteres 40 % til Kattegat, mens 60 % udgøres af den interne fraførsel, som sandsynligvis er udtryk for denitrifikation og sedimentation ud af vandfasen. Tendensen i årsvariation for den interne til- og fraførsel af kvælstof er den samme fra år til år, idet den interne til- og fraførsel er størst i sommerhalvåret og mindst i vinterhalvåret.

Opholdstiden for kvælstof i fjorden afhænger af denitrifikationen, idet opholdstiden er på mellem 2 og 4 år (99 %'s udskiftning), afhængig af denitrifikationens størrelse.

Den mængde fosfor, der eksporteres til Kattegat, svarer til 130 % af tilledningen fra land. Mer-eksporten af fosfor til Kattegat stammer i modellen delvis fra den interne tilførsel (22 %), som sandsynligvis er udtryk for en frigivelse fra bunden, og delvis fra en mindre reduktion af fosformængden i Mariager Fjord. Årsvariationen i den interne til- og fraførsel af fosfor viser i store træk det samme fra år til år, idet der sker en intern fraførsel i foråret og intern tilførsel om sommeren. Den resterende del af året er varierende. Den interne fraførsel kan tolkes som sedimentation og den interne tilførsel som frigivelse af fosfor fra bunden.

Opholdstiden for fosfor i fjorden er på 2,5 år med en 99 %'s udskiftning. Beregninger af den interne til- og fraførsel af fosfor er forbundet med den største usikkerhed, idet denne mængde afhænger meget af tilførslen fra land, af saltholdigheden i fjorden og Kattegat samt af fosforkoncentrationerne i fjorden.