

4 Handlingsscenarier – Århus Bugt 2000-2029

I det foregående kapitel beskrev vi forholdene i bunden af Århus Bugt, Station 6, i perioden 1990-99 med afsæt i de outputdata, modellen beregnede. Input til modellen var bl.a. de observationer, som Århus Amt gjorde i bugten i perioden 1990-99 i forbindelse med miljøovervågningen. Det samlede indtryk eller billede, om man vil, som input og output giver, valgte vi at kalde for et *referencescenarium*. Denne betegnelse er valgt, fordi perioden fra 1990-99 repræsenterer det, vi kalder Århus Bugts referencetilstand eller "normaltilstand". Med andre ord vi betegner de variationer, der angår sedimentprocesserne, iltsvind i vandsøjlen, svovlbrintebufferkapacitet osv. som værende "normale" i perioden 1990-99, og det er den tilstand vi sammenligner med, når vi i de nedenstående *handlingsscenarier* ændrer på f.eks. stoftilførslen til bunden, næringsstofbelastningen af vandsøjlen og lignende.

I det følgende beskriver vi 3 handlingsscenarier (kort: scenarium) med hver sit tema:

- Scenarium 1 - den organiske belastning af havbunden
- Scenarium 2 - næringsstofbelastningen af vandsøjle og havbund
- Scenarium 3 - iltforholdene i bundvandet

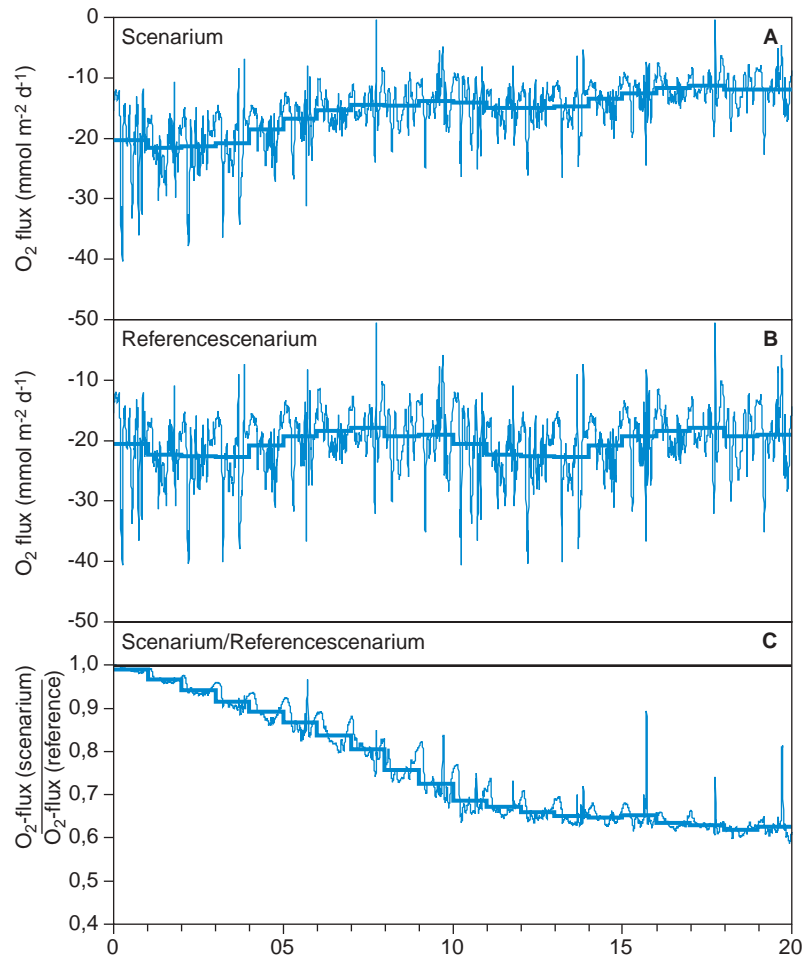
Det viser sig tit vanskeligt af sammenligne referencescenariet og handlingsscenariet alene ud fra de direkte output. Dels er der en betydelig sæsonvariation, dels en variation fra år til år, som ofte bevirker, at graferne præsenterer sig med temmelig meget "støj" og derfor kan efterlade et forvirrende indtryk (Figur 4.1). Eksemplet i Figur 4.1 er hentet fra Scenarium 1.1, som vi præsenterer nedenfor. Sammenlignes fx. iltfluxen i referencescenariet (Figur 4.1B) med Scenarium 1.1 (Figur 4.1A), ses et faldende O_2 -optag, dvs. O_2 -fluxen bliver mindre negativ. På grund af sæsonudsvingene på de to grafer er det dog vanskeligt helt præcist at kvantificere, hvor meget iltfluxen falder, men det kan lade sig gøre, hvis vi så at sige dividerer de to grafer med hinanden. Med andre ord, for hver eneste dato j beregner vi forholdet

$$F_j = \frac{S_j}{R_j},$$

hvor S_j og R_j i dette eksempel er værdien af iltfluxen til datoen j for hhv. handlingsscenariet og referencescenariet. Når dette forhold afbilledes, forsvinder det meste af "støjen", og det bliver lettere at kvantificere ændringen (Figur 4.1C).

Det er værd at bemærke, at en direkte sammenligning mellem handlingsscenarier og referencescenariet ikke kun er vanskelig, når det drejer sig om iltfluxen. Det gælder stort set alle grafer, der er præget af store sæsonudsving og år til år variationer. En sammenligning som den netop beskrevne er derfor gennemført for de fleste output i alle tre scenarier.

Figur 4.1. Sammenligning af handlingsscenario og referencescenario, her eksemplificeret ved O_2 -fluxen i Århus Bugt. A: Handlingsscenario, hvor den organiske stofbelastning af havbunden er nedsat med 50% i tidsrummet 1.1.2000 til 31.12.2009 for derefter at fortsætte med reduceret tilførsel frem til 2020 (se afsnit 4.1.1). B: Referencescenario, hvor den organiske stofbelastning ikke nedsættes, dvs. fortsætter uændret efter samme mønster som i perioden 1990-99 (se Figur 3.8). C: Normalisering af handlingsscenarioet ift. til referencescenarioet viser den effekt (her et faldende iltforbrug), som følger af de handlinger, der forudsætter modelleringen af handlingsscenarioet (her reduceret organisk stoftilførsel). Se også tekst.



4.1 Scenarium 1 - den organiske stofbelastning af havbunden

Den mest markante sedimentation af organisk stof ses ofte i forårsperioden (midt februar-april) i forbindelse med, at primærproduktionen stiger voldsomt ved det, vi kalder forårsopblomstringen (se Figur 3.2). I sommerhalvåret er primærproduktionen som regel mindre intens, men der optræder trods alt af og til perioder med forøget primærproduktion og dermed øget tilførsel af organisk stof til bunden. Sedimentationen er lavest i vintermånederne november-januar.

I scenariet undersøger vi, hvad der sker, når den organiske stoftilførsel hhv. reduceres (Scenarium 1.1) eller forøges (Scenarium 1.2). Vi lader stoftilførslen til havbunden ændre sig over en periode på 10 år fra 2000 til 2009. Derefter fortsætter modellen med den påtrykte ændring i de følgende år. Ved at sammenligne de to scenarier med referencescenariet vurderer vi, hvordan ændringen af den organiske stofbelastning påvirker processerne i havbunden.

4.1.1 Scenarium 1.1 - reduceret organisk stoftilførsel

Resume: I dette scenarium halveres den organiske belastning af havbunden, og der sker der et skifte i nedbrydningsprocesserne på en sådan måde, at en relativt større del af det organiske stof omsættes aerobt og kun langsomt kommer CO_2 -fluxen i ligevægt med O_2 -forbruget. Den lavere organiske be-

lastning af havbunden betyder, at NH_4^+ - og PO_4^{3-} -produktionen falder tilsvarende samtidig med, at iltindholdet i havbunden bliver bedre, dvs. ilt trænger længere ned i bunden. På samme tid presses H_2S fronten så langt ned i bunden, at der ikke længere er sandsynlighed for, at der opstår H_2S -udslip til bundvandet eller truende iltsvind. Nitratproduktionen stiger, hvilket resulterer i en NO_3^- -frigivelse fra bunden, men pga. den mindre NH_4^+ -produktion bliver havbundens totale kvælstoffrigivelse alt i alt mindre. De forbedrede iltforhold i sedimentet fører til, at der dannes mere oxideret jern, som binder mere og mere PO_4^{3-} i havbunden, og derfor falder frigivelsen af fosfor, indtil en ny ligevægt indstiller sig, og fosforfluxen afspejler det samlede fald i den organiske belastning.

4.1.1.0 Input til Scenarium 1.1

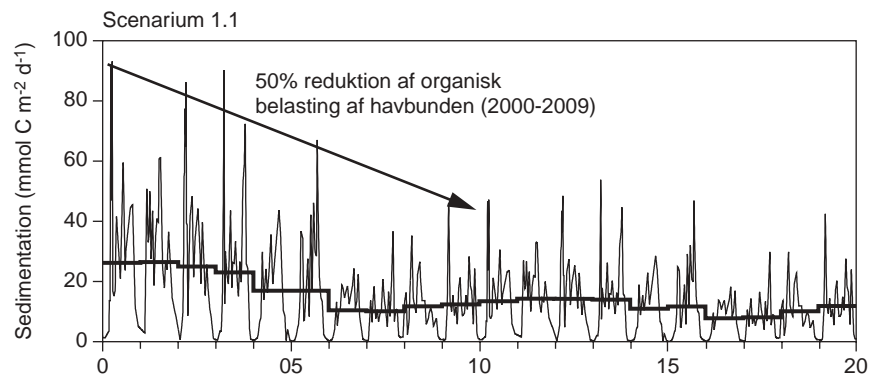
I dette scenarium halveres den organiske stoftilførsel over en periode på 10 år, og den reducerede stoftilførsel fortsætter derefter de følgende år. Alle andre input til modellen ændres ikke, med andre ord svarer alle input til modellen på nær den organiske stoftilførsel til referencescenariet (se Kapitel 3).

I dette scenarium ønsker vi den samme variation i den organiske stoftilførsel til havbunden, som blev observeret i referencescenariet, blot med en gradvis reduktion. Vi bruger derfor den organiske stoftilførsel fra referencescenariet ganget med en belastningsfunktion (B_t), som over 10 år falder lineært fra 1 til 0,5, dvs.

$$B_t = 1 - \frac{0,5}{3650} t$$

hvor t er antallet af dage fra den gradvise ændring af stofbelastningen begynder (1.1.2000), til ændringen er slået helt igennem efter 10 år eller 3650 dage, dvs. 31.12.2009, idet vi ikke tager hensyn til mellemtiliggende skudår.

Figur 4.2. Scenarium 1.1. Sedimentationen af organisk stof i Århus Bugt (2000-19). Den organiske stofbelastning af havbunden halveres lineært over en tiårig periode (2000-09) og fortsætter derefter med en belastning, der svarer til 50% af referencescenariet (se Fig. 3.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



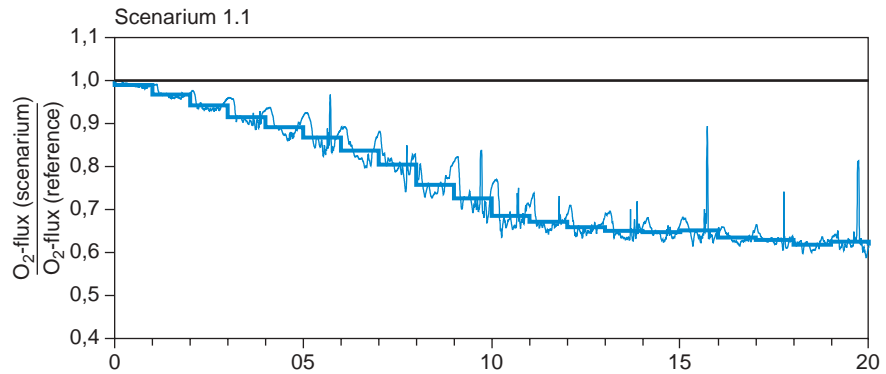
Figur 4.2 viser ændringen af stofbelastningen i ændringsperioden (2000-09) og den efterfølgende 10-års periode (2010-19), hvor den gennemsnitlige årlige belastning er faldet fra 8,50 mmol C m^{-2} til 4,25 mmol C m^{-2} , naturligvis med store udsving i de tiårige perioder.

4.1.1.1 Fluxen af ilt- og kuldioxid

Ved reduktion af den organiske belastning falder iltoptagelsen i takt med, at den organiske belastning aftager (Figur 4.3). Selvom den organiske belastning i perioden 2010-19 er aftaget med 50% i forhold til referencescenariet, falder iltoptagelsen i den samme periode i gennemsnit kun med 40%. Det skyldes både, at en relativt større del af

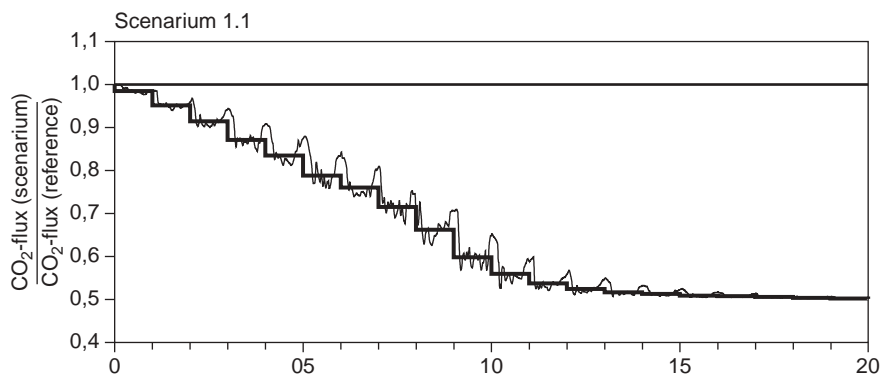
det organiske stof i Scenarium 1.1 omsættes aerobt (42%), end det er tilfældet i referencescenariet (28%), og at en del af de reducerede forbindelser, der blev dannet i perioden før 2000, blev begravet og på den måde forsvandt ud af modellen, uden at blive oxideret. Ser man nøjere efter på Figur 4.3, viser det sig, at iltoptagelsen er stadigt faldende også efter 2019 og først forventes at balancere den organiske stoftilførsel omkring 2050.

Figur 4.3. Scenarium 1.1. O₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.8) i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning af bunden. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Fluxen af CO₂ aftager naturligvis også i takt med den faldende belastning, da CO₂ er det direkte produkt af den organiske stofomsætning (Figur 4.4). Det er derfor umiddelbart indlysende, at CO₂-fluxen er reduceret med 50% i forhold til referencescenariet, efter at havbunden er indtrådt i en ny kvasistationær tilstand mod slutningen af den tiårige periode 2010-19. De små "toppe" på kurven, der viser forholdet mellem CO₂-fluxen af handlings- og referencescenariet, optræder, fordi det tager lang tid, før den reducerede stoftilførsel til havbunden får effekt dybere nede i sedimentet, hvor CO₂ produceres særligt intenst i sommerhalvåret via sulfatreduktionen.

Figur 4.4. Scenarium 1.1. CO₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.10) i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning af bunden. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

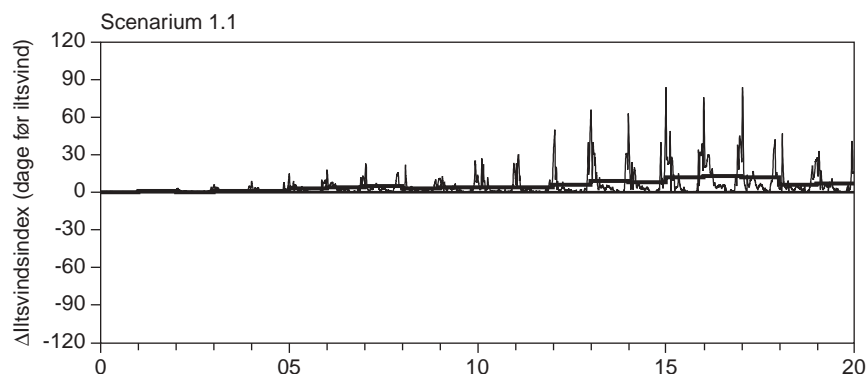


4.1.1.2 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

I lighed med beregningen for referencescenariet beregner vi et iltsvindsindex (I_{O_2} , se definition: afsnit 3.2.2) for Scenarium 1.1 under forudsætning af, at det kun er havbundens iltoptag, der ændrer sig som følge af den reducerede organiske belastning.

Figur 4.5 viser, hvor meget iltsvindsindexet ændrer sig som følge af den reducerede stoftilførsel til havbunden. I tiårsperioden efter at stofbelastningen er reduceret til det halve, er iltsvindsindexet forøget med 11 dage i gennemsnit i forhold til perioden 1990-99. Med andre ord kan vandsøjlen efter belastningsreduktionen i gennemsnit mod-

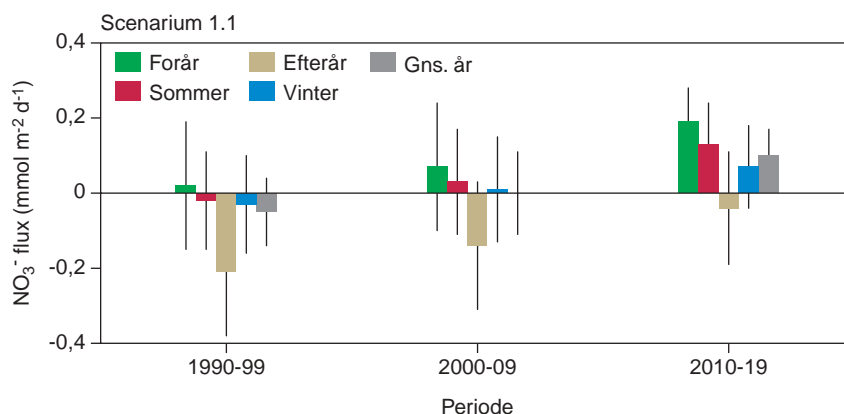
stå iltsvind i 35 dage. I sommer- og efterårsperioden forbedrer iltsvindsindexet sig kun med 3 dage, så den mest markante forbedring af I_{O_2} bliver altså opnået i vinterperioden (1.11-14.2), hvor indexet stiger fra 48 dage til 74 dage.



Figur 4.5. Scenarium 1.1. Den absolutte ændring af iltsvindsindexet (ΔI_{O_2}) i Århus Bugt (2000-19) i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning af bunden, hvor $\Delta I_{O_2} = I_{O_2(\text{scenarium})} - I_{O_2(\text{reference})}$ (se definition af I_{O_2} i afsnit 3.2.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Referencescenariet ses på Figur 3.12.

4.1.1.3 Kvælstofflux og denitrifikation

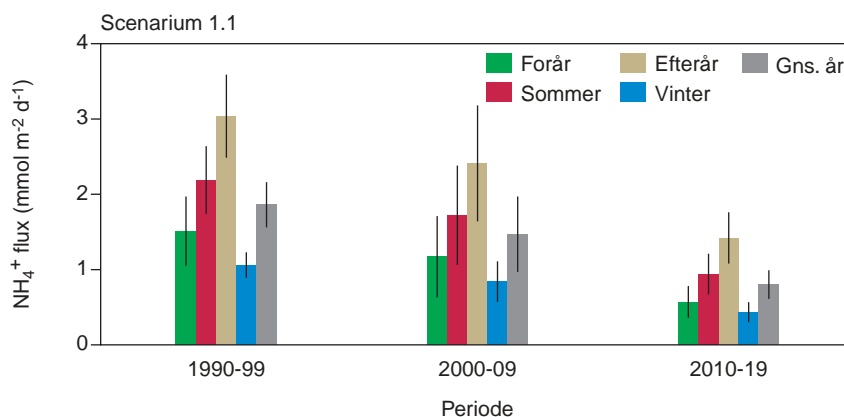
Efterhånden som den organiske stofbelastning falder, ændrer NO_3^- -fluxen sig fra en netto nitratoptagelse på $0,05 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i perioden 1990-99 til en nettoafgivelse på $0,12 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i perioden 2010-19 (Figur 4.6 og Figur 3.13). På samme måde som i referencescenariet er der også i Scenarium 1.1 stor variation i NO_3^- -fluxen i løbet af året, hvilket ses på den forholdsvis store standardafvigelse, når gennemsnitsfluxen betragtes.



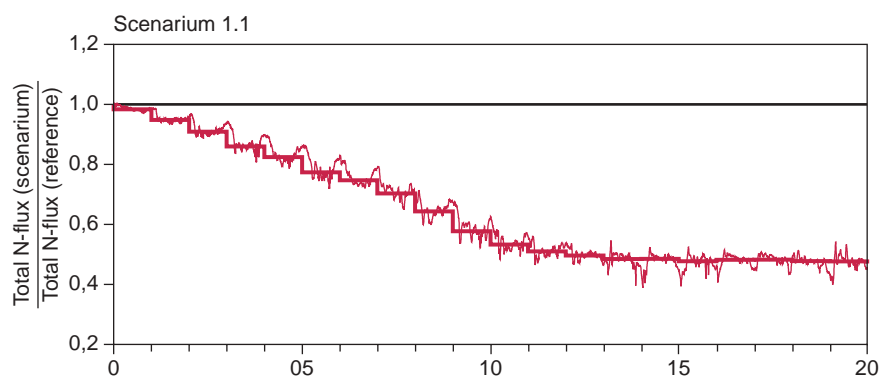
Figur 4.6. Scenarium 1.1. NO_3^- -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.13), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning halveres, og perioden 2010-19 er tiden efter, at næringsstoffereduktionen er gennemført. NO_3^- -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2-30.4), sommer (1.5-31.8), efterår (1.9-31.10), vinter (1.11-14.2; det flg. år) og hele året.

I Scenarium 1.1 er NO_3^- -koncentrationen i bundvandet uændret i forhold til referencescenariet. Når vi derfor i Scenarium 1.1 observerer

en forøget NO_3^- -flux ud af sedimentet, må det betyde, at der bliver produceret NO_3^- i havbunden ved nitrifikationsprocessen (se R6, Af-snit 1.3.1). Det er de forbedrede iltforhold i havbunden, der stimulerer nitrifikationsprocessen, og derigennem fjerner NH_4^+ i havbunden. Samtidig med at denitrifikationen bliver stimuleret, og den organiske stofbelastning falder, aftager også NH_4^+ -produktionen i havbunden. Alt i alt bliver NH_4^+ -koncentrationen i overfladesedimentet derfor mindre, og vi forventer af den grund også den nedgang i nettoammoniumfluxen ud af sedimentet, hvilket også fremgår af Figur 4.7. Samlet set falder den totale N-flux i perioden 2010-19 gennemsnitligt med 53% relativt til referencescenariets tiårige periode på $1,83 \text{ mol m}^{-2}$ (Figur 4.8).



Figur 4.7. Scenarium 1.1. NH_4^+ -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.14), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning halveres, og perioden 2010-19 er tiden efter, at næringsstofreduktionen er gennemført. NH_4^+ -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

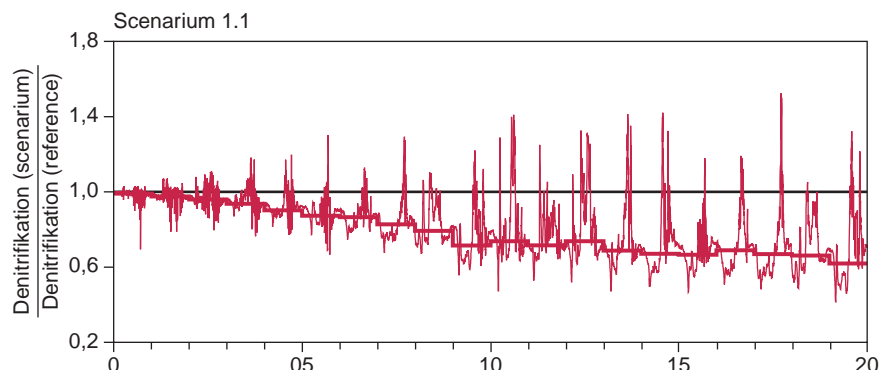


Figur 4.8. Scenarium 1.1. Den totale kvælstoffluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning af bunden. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Denitrifikationsraten er bl.a. afhængig af den organiske stofkoncentration og NO_3^- -koncentrationen i havbunden. En reduktion i den organiske stofbelastning vil derfor afspejle sig i en mere eller mindre reduceret denitrifikationsrate. Omvendt kan denitrifikationen alligevel godt blive stimuleret i perioder med lavt NO_3^- -indhold i porevandet, hvis nitrifikationen øges som følge af, at der er mere ilt i sedimentet. I Scenarium 1.1 ser vi effekten af en reduceret organisk be-

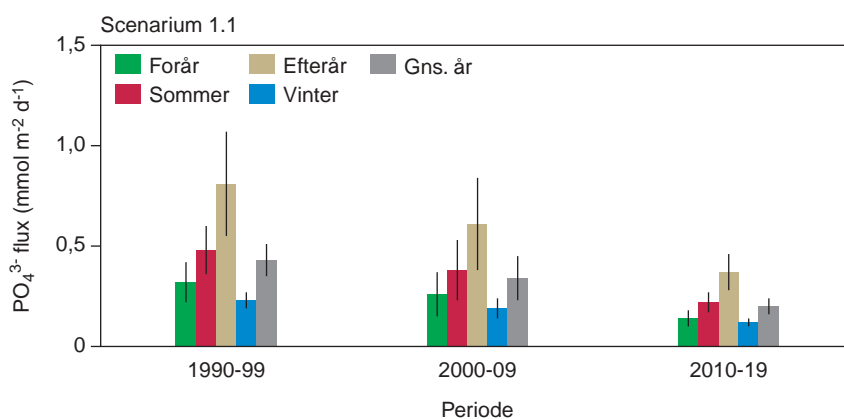
lastning kombineret med forbedrede iltforhold i havbunden og dermed en øget nitrifikation, hvilket resulterer i et meget "forvirret" billede af den relative ændring i denitrifikationsraten (Figur 4.9) På grund af koblingen mellem nitrifikationen og denitrifikationen medfører det, at denitrifikationen ikke falder med 50%, som den reducerede stofbelastning forudsiger, men i gennemsnit blot med 34%.

Figur 4.9. Scenarium 1.1. Ændring i denitrifikationsraten i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.16) i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning af bunden. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

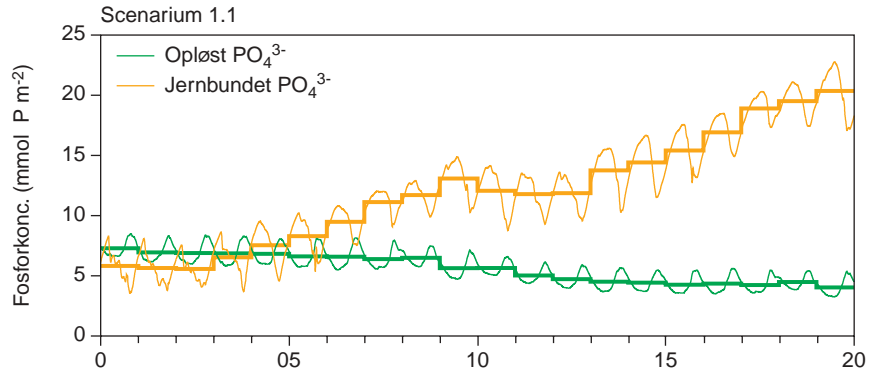


4.1.1.4 Fosfatflux og fosfatpuljer

Selv med reduceret organisk belastning fortsætter PO_4^{3-} med at slippe ud af havbunden, men med en rate, der er reduceret med omkring 54% efter 2010, dvs. efter at den organiske stofbelastning er nede på 50% af referenceværdien (Figur 4.10). Mængden af PO_4^{3-} i porevandet falder i samme periode fra 7,23 mmol m^{-2} til 4,07 mmol m^{-2} , hvorimod indholdet af jernbundet reaktivt fosfat stiger med mere end 11 mmol m^{-2} (Figur 4.11). Med andre ord vokser fosfatmængden i havbunden samtidig med, at den organiske stofbelastning falder. Som Figur 4.11 antyder, fortsætter puljen af jernbundet PO_4^{3-} med at vokse efter 2020, fordi puljen endnu ikke har indstillet sig på en ny ligevægt. Der er en øget iltmedtrængning i havbunden pga. den reducerede stofbelastning, der fører til en stigning af den reaktive oxiderede jernpulje, som derfor binder en større del af det PO_4^{3-} , der bliver frigjort i forbindelse med den organiske stofnedbrydning.



Figur 4.10. Scenarium 1.1. PO_4^{3-} -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.17), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning halveres, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofreduktionen er gennemført. PO_4^{3-} -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

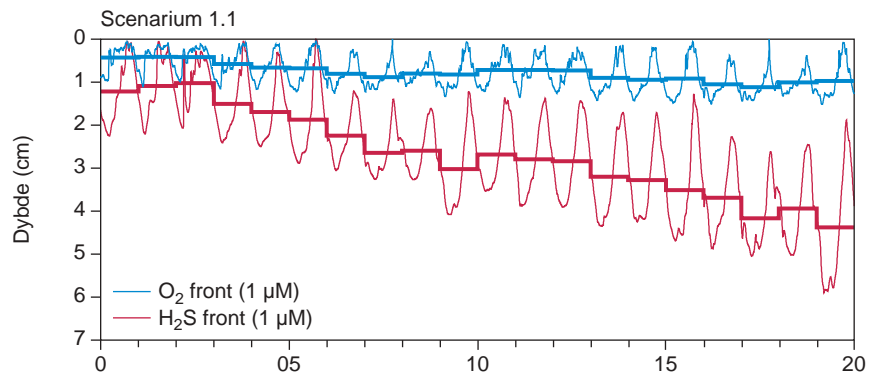


Figur 4.11. Scenarium 1.1. Udviklingen af hhv. opløst PO_4^{3-} i porevandet og letopløseligt jernbundet PO_4^{3-} i de øverste 20 cm af havbunden i Århus Bugt (2000-19) i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning af bunden. Variationen i puljerne før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.18. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

4.1.1.5 Ilt- og svovlbrintefronten

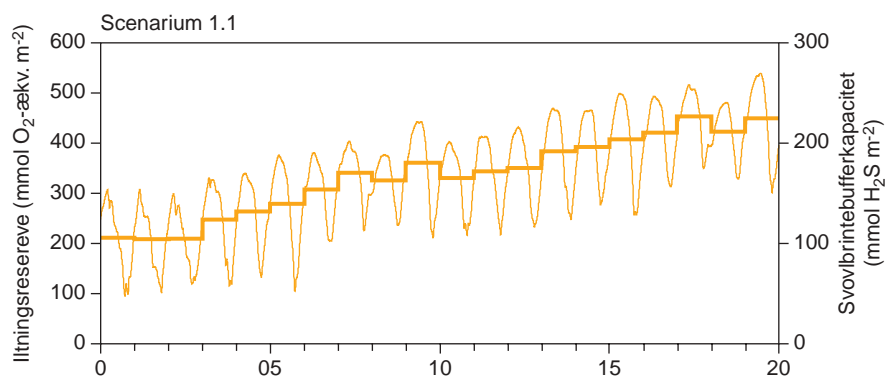
Når der tilføres mindre organisk stof til havbunden, falder den organiske stofomsætning, og derfor trænger ilten dybere ned i havbunden fra gennemsnitlig 0,5 cm i referencescenariet til omkring 1 cm i perioden 2010-19 (Figur 4.12). Samtidig med de forbedrede iltforhold i havbunden bliver også H_2S -fronten skubbet gennemsnitligt 2,5 cm dybere ned i sedimentet. Der er derfor ikke længere sandsynlighed for, at der sker svovlbrinteudslip til havbunden, da svovlbrintefronten efter, at den organiske stofreduktion er slået igennem, ikke når i nærheden af sedimentoverfladen.

Figur 4.12. Scenarium 1.1. O_2 - og H_2S frontens placering ($1 \mu\text{M}$ isopleten) i bunden af Århus Bugt i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning (2000-19). Fronternes placering før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.19. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

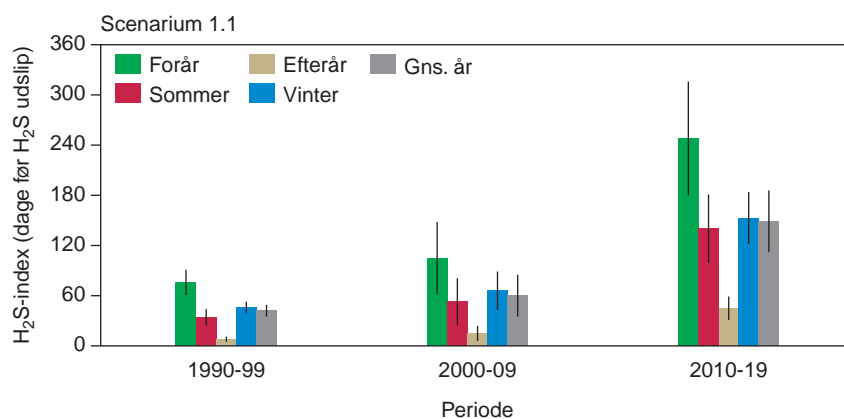


4.1.1.6 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

Effekten af den reducerede organiske belastning af havbunden betyder, som allerede beskrevet, at iltforholdene i havbunden forbedres. Derfor stiger havbundens indhold af oxideret reaktivt jern og dermed iltningsreserven og svovlbrintebufferkapaciteten (Figur 4.13). Den forøgede svovlbrintebufferkapacitet kombineret med en lavere svovlbrinteproduktion betyder også, at det gennemsnitlige H_2S -index (se definition: afsnit 3.2.6) vil stige fra 42 dage i reference perioden til gennemsnitlig 174 dage i perioden 2010-19, altså en forbedring i modstanden mod svovlbrinteudslip på mere end 4 måneder (Figur 4.14). Alene i efterårsperioden stiger H_2S -index med mindst en måned.



Figur 4.13. Scenarium 1.1. Iltningsreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Århus Bugt (2000-19) i forbindelse med en halvering af den organiske stofbelastning. Iltningsreservens størrelse før 2000, dvs. reference-scenariet, ses på Figur 3.21. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Figur 4.14. Scenarium 1.1. H_2S -indexet, dvs. antallet af dage, havbunden er i stand til at tilbageholde produktionen af H_2S og dermed hindrer H_2S udslip (se også definitionen af indexet i afsnit 3.2.6). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.22), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning halveres, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstoffreduktionen er gennemført. H_2S -indexet er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

4.1.2 Scenarium 1.2 - øget organisk stoftilførsel

Resume: I dette scenarium tilføres havbunden en stigende mængde organisk stof, og derved ændrer betydningen af de primære nedbrydningsprocesser sig, så en større del af det organiske stof nedbrydes anaerobt. Iltten trænger heller ikke så langt ned i havbunden. Fluxen af CO_2 overstiger iltforbruget, da en del af de reducerede forbindelser, der dannes i forbindelse med den anaerobe nedbrydning begravnes permanent eller slipper ud fra bunden og op i bundvandet. Produktionen af NH_4^+ og PO_4^{3-} er stigende, men der er ikke så meget ilt i havbunden, at nitrifikationsprocessen effektivt kan fjerne overproduktionen af NH_4^+ , der derfor frigives i stigende omfang fra havbunden. De forringede iltforhold ved bunden medfører også, at denitrifikationen øges på de tidspunkter af året, hvor der kan optages NO_3^- fra vandsøjlen. Den ringe iltnedtrængning i havbunden betyder, at H_2S når meget tæt op til overfladen, så tæt at der stort set er permanent fare for svovlbrinteudslip og iltsvind i bundvandet, specielt i sommerhalvåret. Faren for svovlbrinteudslip

skyldes, at puljen af oxideret jern svinder ind, og det i sig selv medfører en betydelig frigørelse af PO_4^{3-} til både porevandet og bundvandet.

4.1.2.0 Input til Scenarium 1.2

I dette scenarium stiger den organiske stoftilførsel gradvist til 150% af referencetilstanden over en 10-årig periode, og fortsætter derefter med den forøgede stofbelastning. Alle andre input til modellen ændres ikke, med andre ord svarer alle input til modellen på nær den organiske stoftilførsel til referencescenariet (se Kapitel 3).

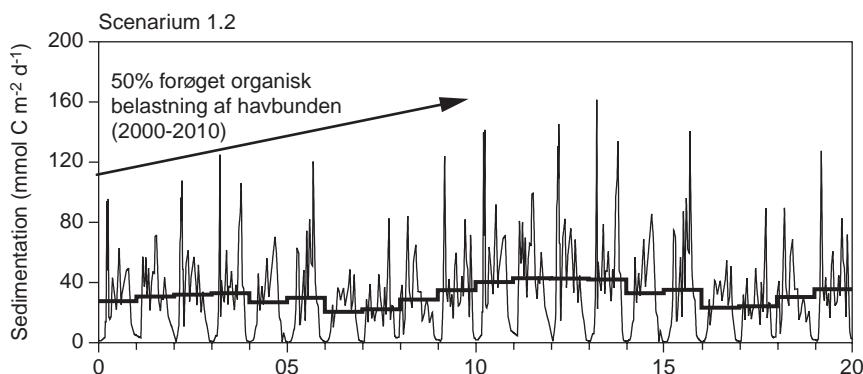
I dette scenarium ønsker vi den samme variation i den organiske stoftilførsel som i Scenarium 1.1 blot med en gradvis stigning i belastningen i stedet for et fald. Den organiske stoftilførsel fra referencescenariet ganger vi derfor med en belastningsfunktion (B_t), som over 10 år stiger lineært fra 1 til 1,5, dvs.

$$B_t = 1 + \frac{0,5}{3650}t$$

hvor t er antallet af dage, fra den gradvise ændring af stofbelastningen begynder (1.1.2000), til ændringen er slået helt igennem efter 10 år.

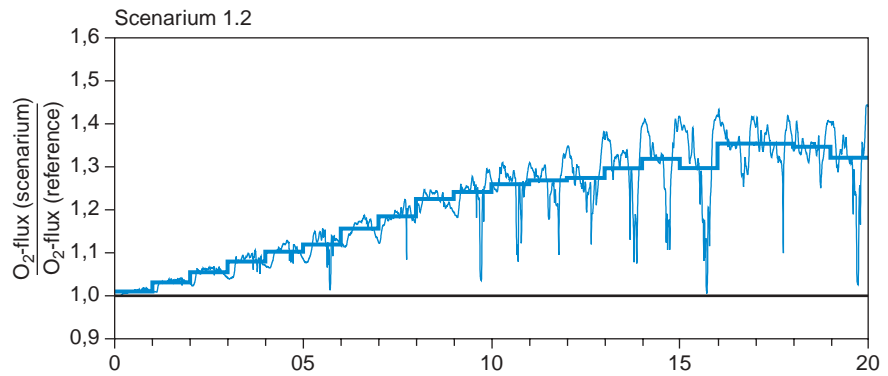
Stofbelastningen i Scenarium 1.2 er vist på Figur 4.15 for perioden 2000-2019. Selv med en stor variation i den årlige stofbelastning ses en gennemsnitlig stigning over en tiårig periode på $4,25 \text{ mmol C m}^{-2}$. Effekten af den forøgede stofbelastning er beskrevet nedenfor, idet vi fokuserer på de samme nøgleparametre som i Scenarium 1.1.

Figur 4.15. Scenarium 1.2. Sedimentationen af organisk stof i Århus Bugt (2000-19). Den organiske stofbelastning af havbunden øges lineært med 50% over en tiårig periode (2000-09) og fortsætter derefter med en belastning, der svarer til 150% af referencescenariet (se Figur 3.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



4.1.2.1 Fluxen af ilt- og kuldioxid

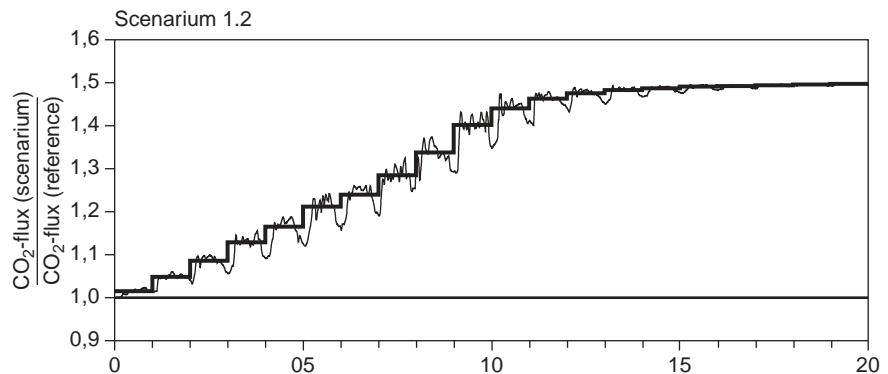
Når den organiske belastning af havbunden stiger, ændrer nedbrydningsprocesserne også karakter sådan, at andelen i den anaerobe omsætning stiger fra 72% til 79%. Samtidig stiger også iltoptagelsen i bunden (Figur 4.16), men interessant nok kun med 32% i gennemsnit for perioden 2010-19, selvom stigningen i den organiske belastning i samme periode er på 50%. Det betyder med andre ord, at havbunden optager mindre ilt, end vi forventer, når vi tager den organiske belastning i betragtning. Den relativt beskedne stigning i iltoptagelsen skyldes, at en væsentlig del af de reducerede forbindelser, der dannes i forbindelse med den anaerobe omsætning, begravnes i havbunden eller slipper op i bundvandet og derfor ikke giver anledning til et iltforbrug, der balancerer med CO_2 -fluxen.



Figur 4.16. Scenarium 1.2. O_2 -fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.8) i forbindelse med en 50% forøgelse af den organiske stofbelastning af bunden. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Kuldioxid stammer fra omsætningen af det organiske stof, og derfor kan det heller ikke undre, at den forøgede stofbelastningen af havbunden resulterer i en tilsvarende stigning af CO_2 -fluxen (Figur 4.17). De små nedadrettede "peaks" på Figur 4.17 forklarer vi ved, at det tager tid, før den øgede organiske stofmængde når ned til sulfatreduktionszonen, og derfor er de sulfatreducerende bakterier henvist til endnu et stykke tid at omsætte "det gamle organiske stof" efter, at belastningsændringen er indtrådt i år 2000.

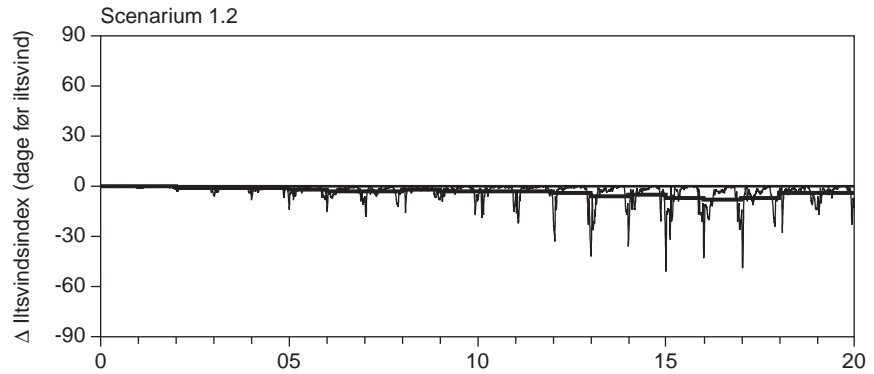
Figur 4.17. Scenarium 1.2. CO_2 -fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.10) i forbindelse med en 50% forøgelse af den organiske stofbelastning af bunden. Den kraftigt optrukne linie viser årets gennemsnit.



4.1.2.2 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

I dette scenarium er iltsvindsindexet (I_{O_2}) beregnet under forudsætning af, at det kun er havbundens iltoptag, der ændrer sig som følge af den ændrede organiske belastning.

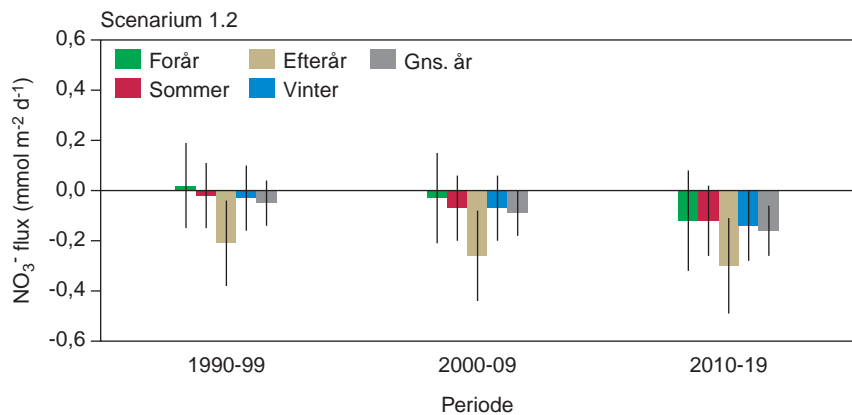
På trods af at stofbelastningen stiger, ændrer iltsvindsindexet sig ikke væsentligt (Figur 4.18). Faktisk nedsættes vandsøjleens potentiale til at modvirke iltsvind i bundvandet kun med 5 dage, dvs. fra 18 dage til 13 dage. Dette lille fald i det årlige iltsvindsindex dækker over mere eller mindre markante ændringer i løbet af året - fra nærmest ingen ændring i sommerhalvåret (midt februar-oktober), hvor I_{O_2} faldt fra 7 til 6 dage og vinterhalvåret, hvor iltsvindsindexet faldt med 12 dage fra 47 til 35 dage. Både Scenarium 1.1 og 1.2 bekræfter observationerne i Århus Bugt, at det i sommerhalvåret er bundvandets egenrespiration, der styrer iltforbruget og dermed iltsvindsindexet, mens havbundens iltforbrug dominerer indexet i vinterhalvåret.



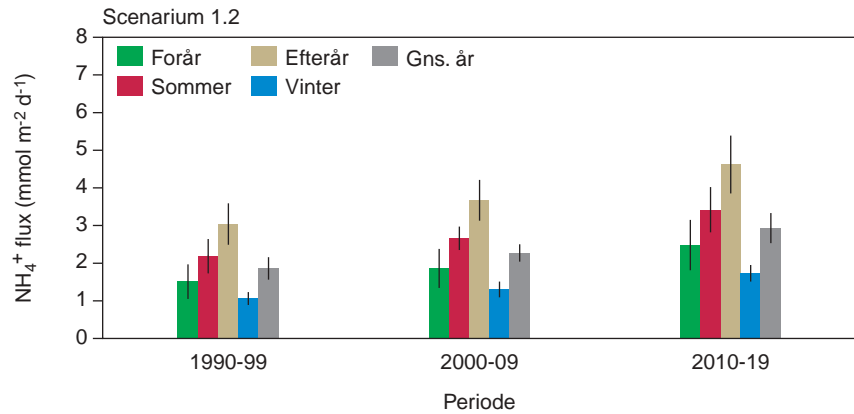
Figur 4.18. Scenarium 1.2. Den absolutte ændring af iltsvindsindexet (ΔI_{O_2}) i Århus Bugt (2000-19) i forbindelse med en 50% forøgelse af den organiske stofbelastning af bunden, hvor $\Delta I_{O_2} = I_{O_2(\text{scenarium})} - I_{O_2(\text{reference})}$, (se definition af I_{O_2} i afsnit 3.2.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Referencescenariet ses på Figur 3.12.

4.1.2.3 Kvælstofflux og denitrifikation

Havbundens optag af NO_3^- bliver mere end tredoblet, når den organiske stoftilførsel til bunden stiger med 50% (Figur 4.19). Samtidig bliver der afgivet forholdsvis mere NH_4^+ fra havbunden, end der bliver optaget NO_3^- (Figur 4.20). Summa summarum vil den årlige kvælstofafgivelse fra havbunden stige med 54% efter 2010 (beregnet ud fra de årlige middelværdier), dvs. efter at den organiske stoftilførsel er steget med 50%.

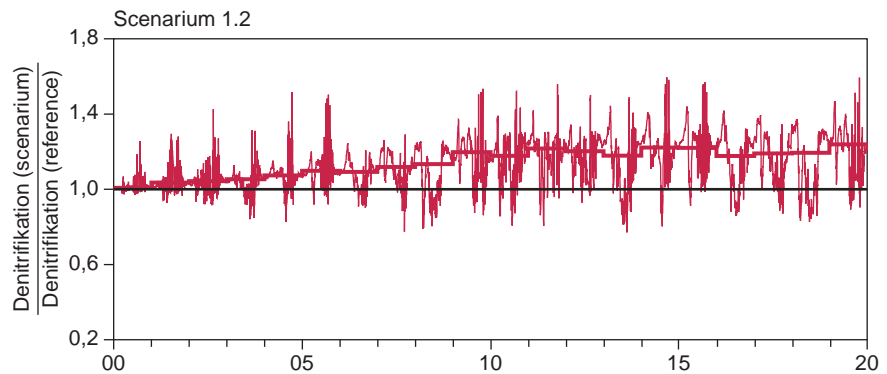


Figur 4.19. Scenarium 1.2. NO_3^- -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.13), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning forøges med 50%, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofstigningen er gennemført. NO_3^- -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2-30.4), sommer (1.5-31.8), efterår (1.9-31.10), vinter (1.11-14.2; det flg. år) og hele året.



Figur 4.20. Scenarium 1.2. NH_4^+ -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.14), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning forøges med 50%, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofstigningen er gennemført. NH_4^+ -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

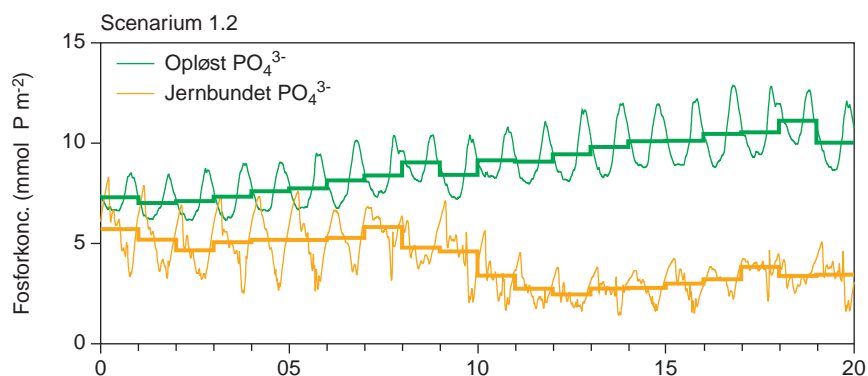
Denitrifikationsprocessen stiger pga. den forøgede stoftilførsel til havbunden (Figur 4.21), men i gennemsnit kun med 21%. At denitrifikationen ikke stiger proportionalt med den organiske stoftilførsel skyldes, at nitrat i vandsøjlen er den væsentligste kvælstofkilde til denitrifikationen, da nitrifikationsprocessen i sedimentet er hæmmet pga. nedsat iltindhold i sedimentet (se nedenfor). Det er derfor variationen i vandsøjleens O_2 - og NO_3^- -indhold, der især er skyld i den store variation, der ses på Figur 4.21.



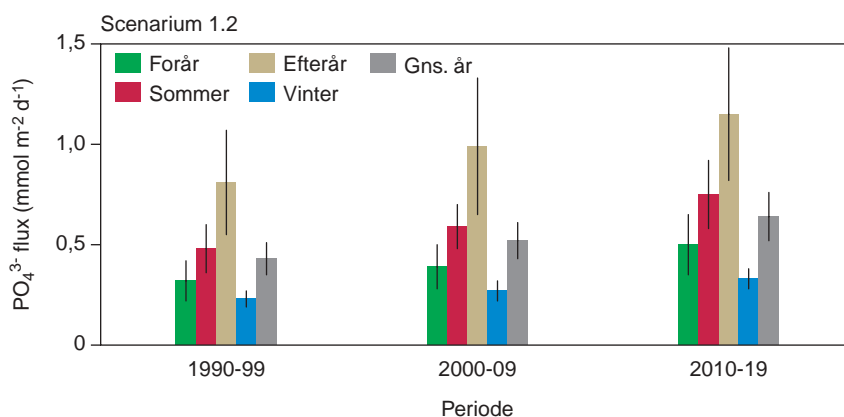
Figur 4.21. Scenarium 1.2. Ændring i denitrifikationsraten i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.16) i forbindelse med en 50% forøgelse af den organiske stofbelastning af bunden. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

4.1.2.4 Fosfatflux og fosfatpuljer

Den øgede organiske stoftransport til havbunden vil også øge PO_4^{3-} -produktionen i forbindelse med nedbrydningen af det organiske stof. Samtidigt betyder de forringede iltforhold i havbunden, at den reaktive jernpulje bliver mindre, og derfor ikke kan binde så meget fosfat i havbunden som i referencescenariet. Resultatet bliver derfor, at mængden af opløst PO_4^{3-} i porevandet stiger og mængden af jernbundet fosfat falder (Figur 4.22) samtidig med, at PO_4^{3-} -fluxen ud af havbunden forøges (Figur 4.23).



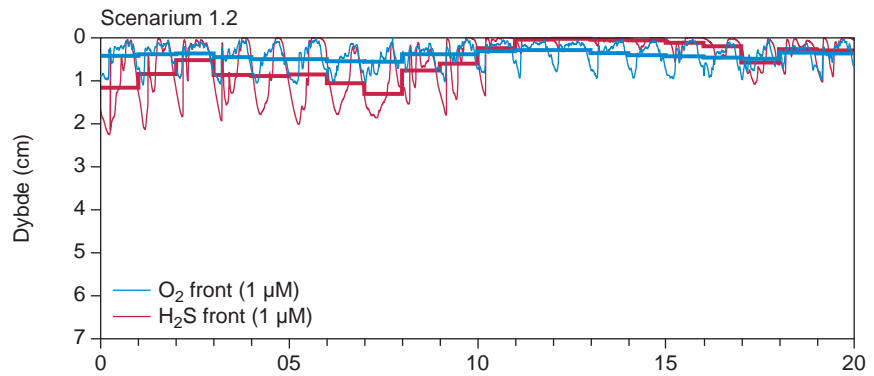
Figur 4.22. Scenarium 1.2. Udviklingen af hhv. opløst PO_4^{3-} i porevandet og letopløseligt jernbundet PO_4^{3-} i de øverste 20 cm af havbunden i Århus Bugt (2000-19) i forbindelse med en 50% forøgelse af den organiske stofbelastning af bunden. Variationen i puljerne før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.18. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



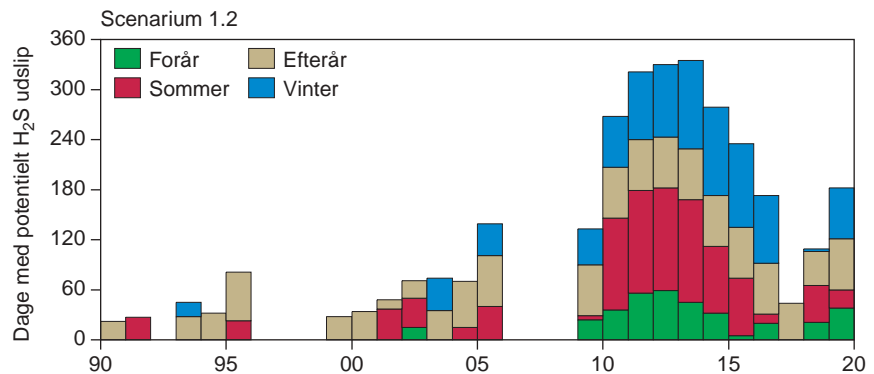
Figur 4.23. Scenarium 1.2. PO_4^{3-} -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.17), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning forøges med 50%, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofstigningen er gennemført. PO_4^{3-} -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

4.1.2.5 Ilt- og svovlbrintefronten

Med den øgede organiske stoftilførsel til havbunden stiger stofomsætningen og dermed både iltforbruget og H_2S -produktionen. Efter at den organiske stofbelastning er øget til 150% af referencescenariet, trænger ilt kun 0,4 cm ned i havbunden, og H_2S når af og til helt op til sedimentoverfladen. I perioden 2010-2019 befinder H_2S -fronten sig i gennemsnit kun 0,1 cm fra sedimentoverfladen (Figur 4.24), og i årene 2021-23 forudsiger modellen endda en potentiel mulighed for svovlbrinteudslip i alle årets 365 dage, dvs. H_2S -fronten < 1 mm fra sedimentoverfladen (data ikke vist). Ti år efter, at den organiske stoftilførsel er steget til 150% af referencescenariet, er det gennemsnitlige antal dage for potentielt H_2S -udslip steget fra 24 dage i perioden 1990-99 til 258 dage i tidsrummet 2010-19 (Figur 4.25).



Figur 4.24. Scenarium 1.2. O_2 - og H_2S frontens placering ($1 \mu M$ isopleten) i bunden af Århus Bugt i forbindelse med en 50% forøgelse af den organiske stofbelastning (2000-19). Fronternes placering før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.19. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Se også tekst for en diskussion af fronternes indbyrdes placering.



Figur 4.25. Scenarium 1.2. Det potentielle H_2S -udslip, dvs. antallet af dage, hvor H_2S -fronten ligger < 1 mm fra sedimentoverfladen fordelt på årstiderne, hhv. forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10) og vinter (1.11–14.2; det flg. år). Århus Bugt 1990-2019. Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.20), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning forøges med 50%, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofstigningen er gennemført.

Det er vigtigt at bemærke sig, at det kan virke modstridende, at modellen forudsiger, at ilt når ned under H_2S -fronten. Det er der flere gode forklaringer på. For det første er modellen "skruet sammen", så processer og koncentrationer i havbunden ikke ændrer på koncentrationerne i bundvandet. Sidstnævnte er alle veldefinerede inputparametre, så sedimentmodellen er med andre ord ikke dynamisk koblet med vandsøjlen. I et naturligt miljø forventer vi, at O_2 -indholdet i bundvandet bliver markant reduceret, når H_2S diffunderer ud af bunden - det sker ikke i modellen. Her er O_2 -koncentrationen bestemt alene ud fra input. I Scenarium 1.2 svarer iltkoncentrationen i bundvandet til referencescenariet og er derfor efter al sandsynlighed for høj. I modellen er det kun iltkoncentrationen i bundvandet, der bestemmer intensiteten af bioturbationen og bioirrigationen, og derfor vil bioaktiviteten i Scenarium 1.2 være den samme som i reference-scenariet. Ilt vil derfor blive pumpet og bioturberet ned i H_2S -zonen og først her blive fjernet ved reaktion med H_2S . For det andet beregner modellen O_2 - og H_2S -frontens placering som en slags middelværdi over et større areal, og da bioirrigationen er meget høj i de øverste

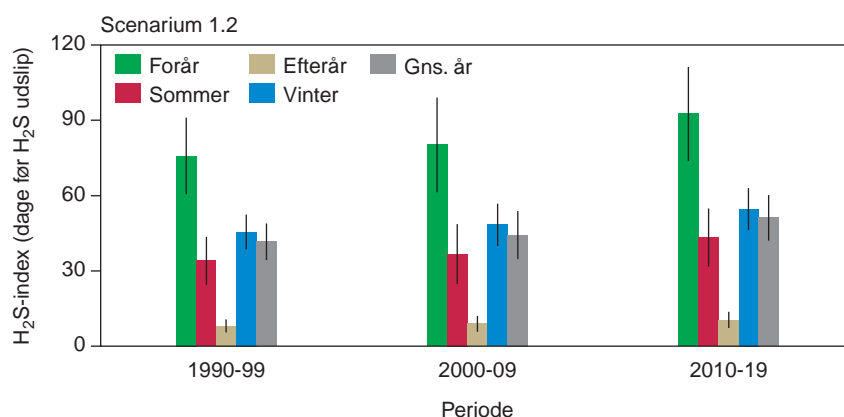
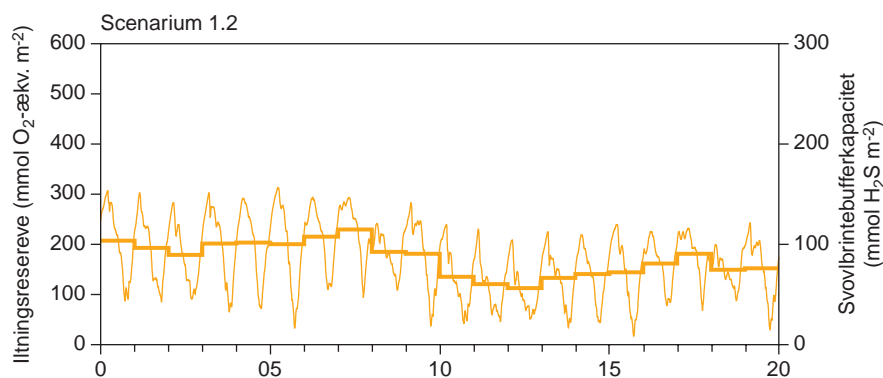
cm ($\alpha > 100$, se Figur 2.7C), pumpes O_2 ned under H_2S -zonen. Sedimentet i nærheden af ormerørene vil derfor blive tilført O_2 , mens sedimentet længere væk fra rørene ikke vil være iltede. Populært sagt midler sedimentmodellen over disse to situationer, og derfor vil det i det "endimensionale billede", som figuren jo viser, se ud som om, O_2 når ned under H_2S -fronten.

Vi har i modellen bevidst valgt ikke at lade H_2S påvirke bioturbationen og bioirrigationen, da der efter vor viden ikke findes tilstrækkelige oplysninger til at modellere bioaktiviteten ud fra en kombineret effekt af H_2S og O_2 .

4.1.2.6 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

I takt med at H_2S -produktionen stiger, rykker H_2S -fronten nærmere mod sedimentoverfladen, og sedimentets svovlbrintebufferkapacitet aftager (Figur 4.26). Svovlbrinteindexet falder derfor også fra i gennemsnit 42 dage i perioden 1990-99 til 14 dage efter, at effekten af den organiske stofbelastning er slået helt igennem, dvs. efter 2010. Mest markant er tilbagegangen i sommer og efterårsperioden, hvor indexet i sidstnævnte periode når helt ned mellem 1 og 3 dage (Figur 4.27).

Figur 4.26. Scenarium 1.2. Iltningsreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Århus Bugt i forbindelse med en 50% forøgelse af den organiske stofbelastning (2000-19). Iltningsreservens størrelse før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.21. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Figur 4.27. Scenarium 1.2. H_2S -indexet, dvs. antallet af dage, havbunden er i stand til at tilbageholde produktionen af H_2S og dermed hindrer H_2S udslip (se også definitionen af indexet i afsnit 3.2.6). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.22), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor den organiske stofbelastning forøges med 50%, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofforøgelsen er gennemført. H_2S -indexet er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

4.2 Scenarium 2 – næringsstofbelastningen af vandsøjle og havbund

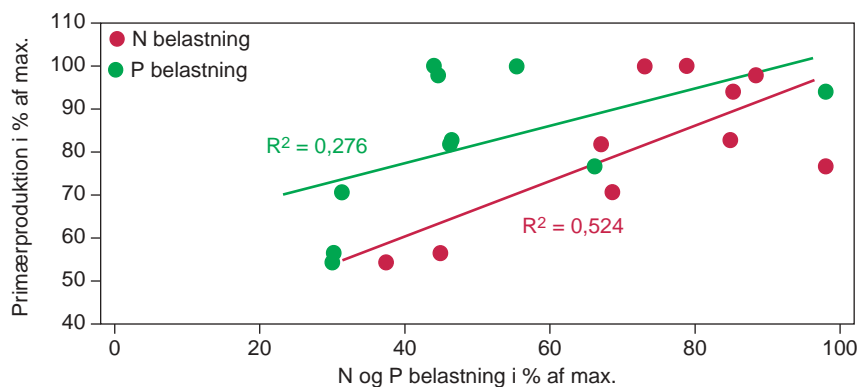
I dette scenarium undersøger vi effekten af at nedsætte belastningen med N- og P-næringsalte til Station 6 i Århus Bugt, idet vi antager, at en sådan reduktion i næringsstofbelastningen også fører til en reduktion af den organiske stoftilførsel til havbunden.

Primærproduktionens relation til den landbaserede N- og P-belastning af Århus Bugt er vist på Figur 4.28 for perioden 1990-99. Vi opstiller flg. empiriske sammenhæng mellem primærproduktionen og en reduceret belastning med N og P

$$R_{pp}(N) = 0.64R_N + 33,37 \quad (4.1)$$

$$R_{pp}(P) = 0.43R_p + 59,17 \quad (4.2)$$

hvor $R_{pp}(N)$ og $R_{pp}(P)$ er primærproduktionen i % relativt til maksimumværdien, når belastning med N og P nedsættes fra 100% til hhv. R_N og R_p .



Figur 4.28. Primærproduktionen som funktion af den landbaserede N- og P-belastning af Århus Bugt. Bemærk at begge variable er normaliseret til hhv. den maksimale primærproduktion og den maksimale N- og P-belastning.

Det er vigtigt at bemærke, at der også tilføres N og P til Århus Bugt fra det tilgrænsende vandområde (Kattegat) og fra atmosfæren. Vi kender ikke næringsstofftilførslen fra Kattegat til Århus Bugt, men antager, at næringsstofftilførslen fra Kattegat reduceres på samme relative vis som næringsstoffernes tilførsel fra oplandet til Århus Bugt. Med andre ord behøver vi ikke kende den absolutte næringsstoffreduktion fra Kattegat til Århus Bugt for at kunne opstille betingelserne for scenariet. I scenariet ser vi bort fra den atmosfæriske belastning eller antager den samme relative reduktion i denne belastning som for land og det tilgrænsende Kattegat.

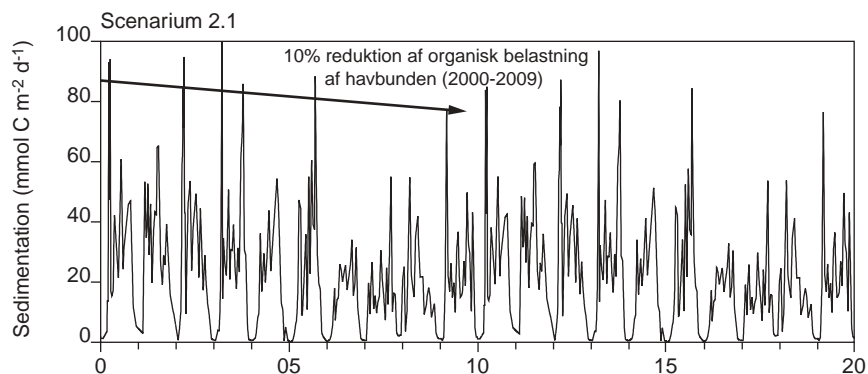
4.2.1 Scenarium 2.1 - nedsat belastning med organisk stof, kvælstof og fosfor af vandsøjle og havbund

Resume: I dette scenarium nedsættes kvælstof- og fosforbelastning af Århus Bugt, hvilket medfører, at den organiske stofbelastning af havbunden falder med 10%. Derfor falder også iltoptagelsen, og O_2 trænger længere ned i havbunden og skubber på den måde også H_2S dybere ned. Det hænger bl.a. sammen med, at der produceres mindre H_2S , fordi sulfatreduktionen falder

som følge af den reducerede belastning. Den iltede og oxiderede zone i havbunden udvides, hvilket påvirker både kvælstof- og fosforomsætningen. I takt med at der kommer mindre organisk stof ned på bunden, falder produktionen af NH_4^+ i havbunden, og samtidig bliver mere NH_4^+ omsat til NO_3^- ved nitrifikationsprocessen. Ammoniumindholdet i havbunden falder derfor, og der bliver afgivet mindre NH_4^+ fra bunden til vandsøjlen. Den forøgede produktion af NO_3^- gennem nitrifikationsprocessen modsvares ikke af et tilsvarende forbrug, fordi der kommer mindre organisk stof ned på bunden. Derfor stiger NO_3^- -koncentrationen i havbunden så meget, at NO_3^- -fluxen forår, sommer og vinter ændrer sig fra et NO_3^- optag til en afgivelse, og i efteråret falder havbundens NO_3^- -optagelse. Samlet set betyder ændringerne i NH_4^+ - og NO_3^- -fluxene, at N-fluxen fra havbunden årligt falder med 66 mg N m^{-2} . På grund af at havbunden bliver mere iltet, efterhånden som næringsstofbelastningen sættes ned, stiger indholdet af oxideret jern, og der bliver bundet mere PO_4^{3-} i havbunden. Stigningen i havbundens indhold af jernbundet fosfat modsvares af et tilsvarende fald i den opløste PO_4^{3-} pulje, så alt i alt ændrer havbundens indhold af reaktivt PO_4^{3-} sig ikke. Det betyder med andre ord, at den reducerede tilførsel af organisk stof viser sig ved et tilsvarende fald i PO_4^{3-} -afgivelsen fra havbunden.

4.2.1.0 Input til Scenarium 2.1

I scenariet reduceres kvælstof- og fosforbelastningen af Århus Bugt over en periode på 10 år til hhv. 89% og 72% af belastningen i referencescenariet. Nedgangen i N- og P-koncentrationen medfører derfor en nedgang i primærproduktionen og stoftilførslen til bunden på 10% (Figur 4.29). De øvrige inputparametre ændres ikke.

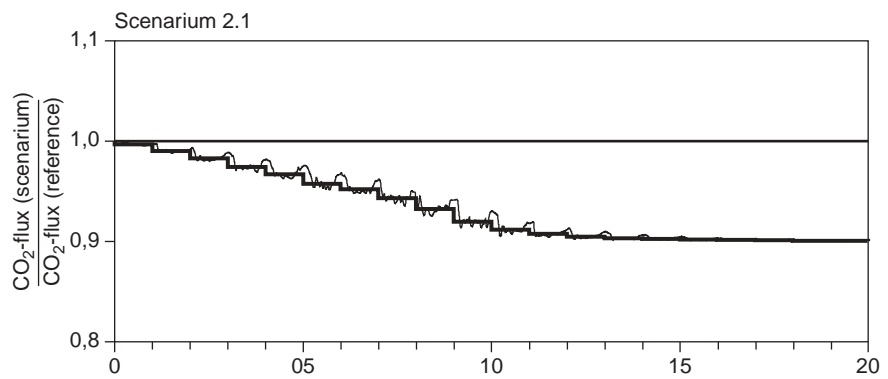


Figur 4.29. Scenarium 2.1. Sedimentationen af organisk stof i Århus Bugt (2000-19). Den nedsatte næringsstofbelastning af vandsøjlen medfører en lineær 10% reduktion af den organiske stofbelastning af havbunden over en tiårig periode (2000-09) og fortsætter derefter med en belastning, der svarer til 90% af referencescenariet (se Figur 3.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

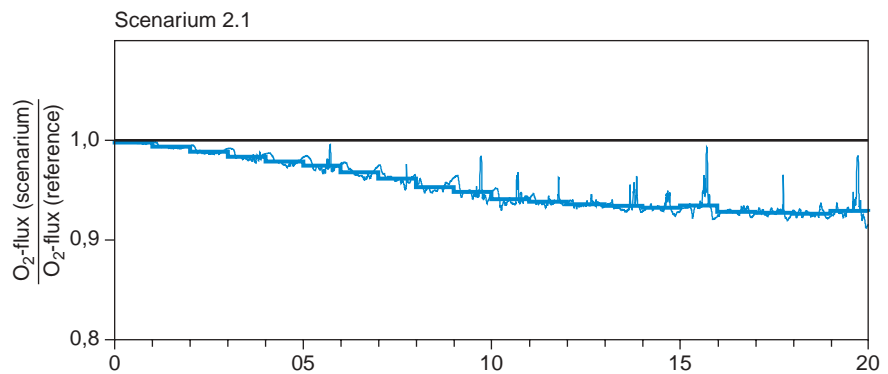
4.2.1.1 Fluxen af ilt- og kuldioxid

Samtidig med at den organiske stofbelastning falder med 10% fra 2000-09, falder også CO_2 -fluxen til et niveau, der præcist modsvares reduktionen i den organiske belastning (Figur 4.30). Ligesom det var tilfældet i Scenarium 1.1, falder havbundens iltforbrug knap så meget som CO_2 -fluxen (Figur 4.31), og er i perioden 2010-2019 i gennemsnit kun aftaget med 7,6%.

Figur 4.30. Scenarium 2.1. CO₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.10) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

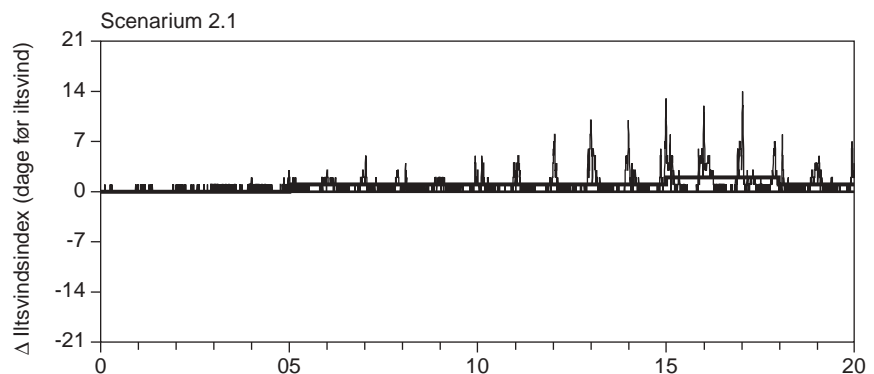


Figur 4.31. Scenarium 2.1. O₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.8) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



4.2.1.2 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

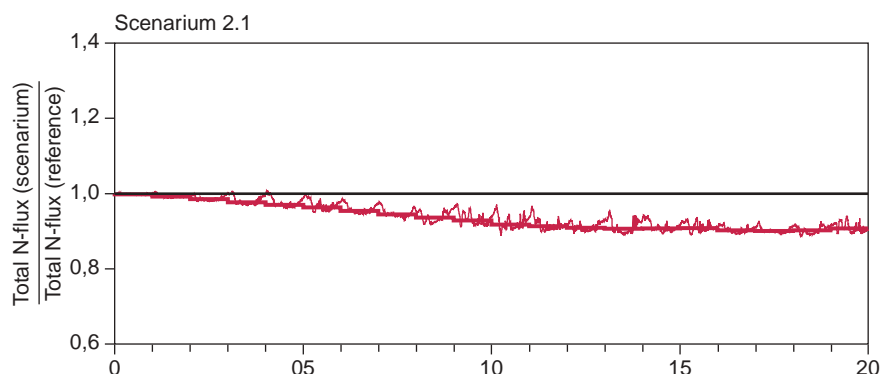
Den lavere organiske stofbelastning påvirker stort set ikke iltsvindsindexet, som i tiårsperioden efter belastningsændringen er gennemført, dvs. 2010-19, i gennemsnit kun er forbedret med 4 dage (Figur 4.32). Det er havbundens reducerede iltforbrug i vinterhalvåret, der er skyld i, at iltsvindsindexet overhovedet bliver forbedret, da der ikke er nogen effekt af den reducerede organiske stoftilførsel i sommer- og efterårsperioden. Det skal dog bemærkes, at ligesom i de tidligere scenarier, er iltsvindsindexet (I_{O_2}) beregnet under forudsætning af, at det kun er havbundens iltoptagelse og altså ikke vandsøjlets egenrespiration, der ændrer sig som følge af den ændrede organiske belastning.



Figur 4.32. Scenarium 2.1. Den absolute ændring af iltsvindsindexet (ΔI_{O_2}) i Århus Bugt (2000-19) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen, hvor $\Delta I_{O_2} = I_{O_2(\text{scenarium})} - I_{O_2(\text{reference})}$, (se definition af I_{O_2} i afsnit 3.2.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Referencescenariet ses på Figur 3.12.

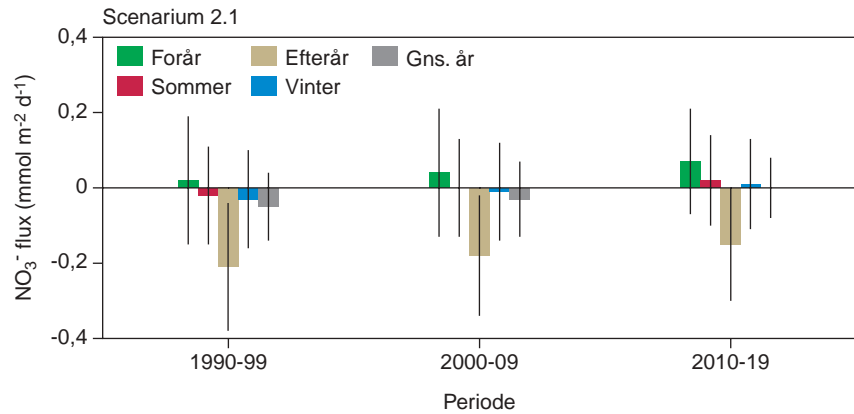
4.2.1.3 Kvælstofflux og denitrifikation

I samme periode som næringsstofbelastningen bliver mindre, ændrer kvælstoffluxen mellem bunden og vandsøjlen sig også. Frigivelsen af kvælstof fra havbunden falder fra $1,82 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ før belastningsreduktionen til $1,64 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i ti-års perioden efter, at ændringen er indtrådt. Dette svarer til en nedgang i kvælstoffluxen på 9,9% (Figur 4.33). Bag den reducerede N-flux gemmer sig ændringer af både NO_3^- og NH_4^+ -fluxene samt denitrifikationsraten.



Figur 4.33. Scenarium 2.1. Den totale kvælstoffluxændring i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Den organiske stofbelastning af havbunden aftager i dette scenarium med ca. 10% og N-belastningen med 11%. Den nedsatte stofbelastning betyder, at iltforholdene i bunden bliver langt bedre, og dermed øges også nitrifikation. Da denitrifikationen i perioder er reduceret pga. den mindre stoftilførsel til bunden, og NO_3^- -koncentrationen i bundvandet samtidig er nedsat set i forhold til referencescenariet, betyder det alt andet lige, at tendensen til NO_3^- -afgivelse forstærkes. Scenarium 2.1 viser da også en øget nitratfrigivelse fra havbunden i foråret og et reduceret optag i efterårsperioden samtidig med, at NO_3^- fluxen ændrer sig fra et nettooptag til en nettoafgivelse i sommer- og vinterperioden (Figur 4.34). Samlet set resulterer det i en reduktion af NO_3^- -optaget fra gennemsnitlig $0,05 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ til $0,00 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ efter, at belastningsreduktionen er gennemført (2010-19). Betydningen af den nedsatte NO_3^- koncentration i bundvandet kan vises ved at genberegne Scenarium 2.1 uden at ændre på N-koncentrationen i vandet. En sådan beregning viser, at i perioden 2010-19 stiger NO_3^- -fluxen med $0,03 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, når alene stoftransporten til bunden reduceres med 10%. Nedsættes også NO_3^- koncentrationen i bundvandet med de anførte 11%, stiger NO_3^- -fluxen yderligere $0,02 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, med andre ord ændres NO_3^- -fluxen med ca. 40% pga. den nedsatte næringsstoffsaltkoncentration i bundvandet (Tabel 4.1).



Figur 4.34. Scenarium 2.1. NO_3^- -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.13), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning af vandsøjlen i Århus Bugt nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofbegrænsningen er gennemført. NO_3^- -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

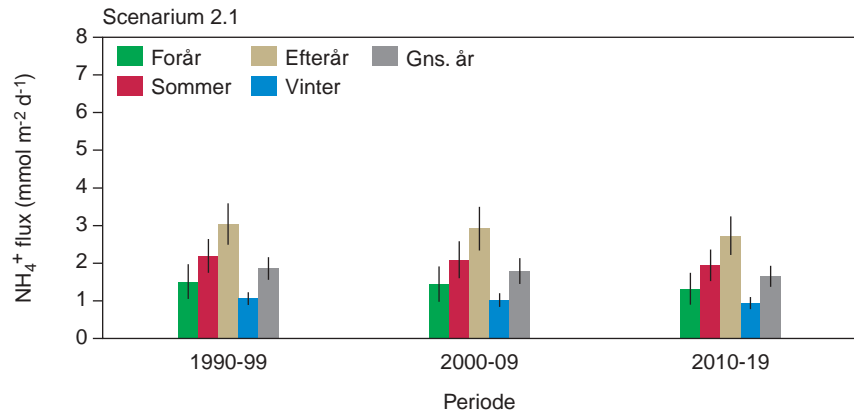
Tabel 4.1. Betydningen af at nedsætte belastningen med organisk stof kombineret med en samtidig reduktion af næringsstofbelastningen med N og P. Reduktionerne er gennemført fra 2000-2009 og fluxændingen opgjort for perioden 2010-2019.

	mmol m ⁻² d ⁻¹			kombineret effekt
	Reference ²⁾	Fluxændring ¹⁾		
		begrænset organisk stoftilførsel	begrænset N og P tilførsel	
NO_3^-	-0,045	0,029	0,016	0,045
NH_4^+	1,864	-0,227	0,005	-0,221
Total N	1,819	-0,197	0,021	-0,176
PO_4^{3-}	0,429	-0,048	0,000	-0,047
denitrifikation	0,401	-0,020	-0,027	-0,047

¹⁾ fluxænding = reference scenarium – handlingsscenario

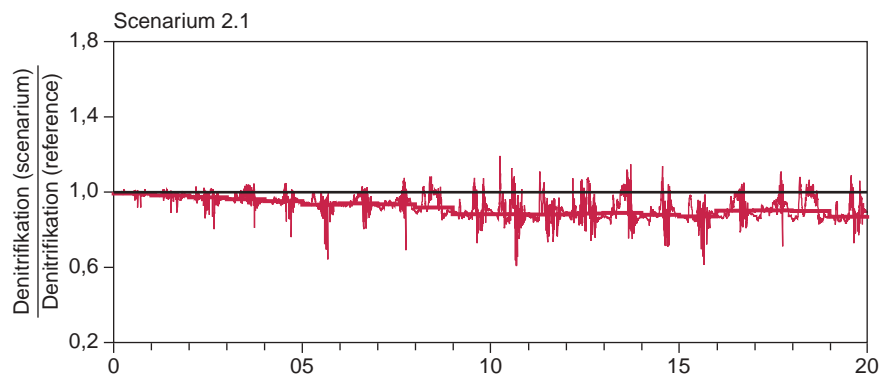
²⁾ for fluxen < 0 er der tale om et optag i havbunden. Omvendt frigives der N eller P, når fluxen > 0.

Den reducerede stofnedbrydning i havbunden medfører en mindre NH_4^+ -produktion. Samtidig bliver nitrifikationen stimuleret af de forbedrede O_2 -forhold i havbunden, hvilket i sidste ende betyder, at nettoproduktionen af NH_4^+ bliver mindre, og NH_4^+ -fluxen ud af havbunden falder fra et tiårigt gennemsnit på 1,86 mmol N m⁻² d⁻¹ til 1,64 mmol N m⁻² d⁻¹ (Figur 4.35). Da NH_4^+ -fluxen bestemmes af processerne i havbunden, og NH_4^+ -koncentrationen i vandsøjlen i forvejen er lav (<2 μM), påvirker det kun i begrænset omfang NH_4^+ -fluxen at nedsætte NH_4^+ -koncentrationen i scenarium 2.1 (Tabel 4.1).



Figur 4.35. Scenarium 2.1. NH_4^+ -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.14), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning af vandsøjlen i Århus Bugt nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofbegrænsningen er gennemført. NH_4^+ -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

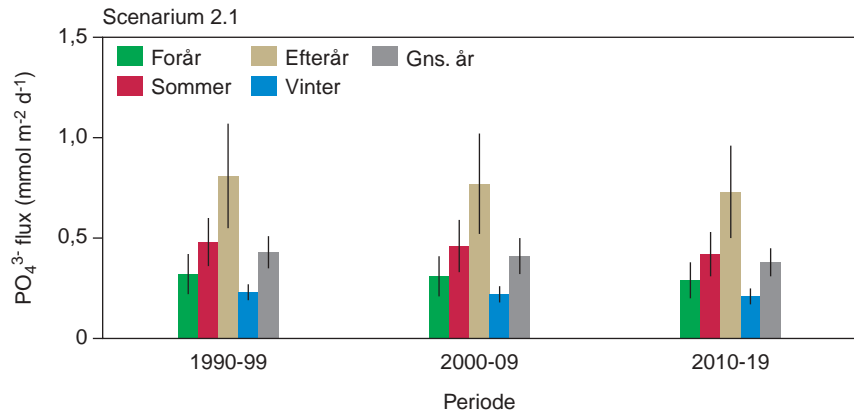
I gennemsnit er denitrifikationsraten reduceret med 12% fra $0,40 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ til $0,35 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i den tiårige periode efter, at næringsstofbegrænsningen er gennemført. Den reducerede denitrifikation dækker som antydnet ovenfor over store variationer i løbet af perioden, hvor denitrifikationsraten af og til ligger over referencescenariet, men oftest under (Figur 4.36).



Figur 4.36. Scenarium 2.1. Ændring i denitrifikationsraten i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.16) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

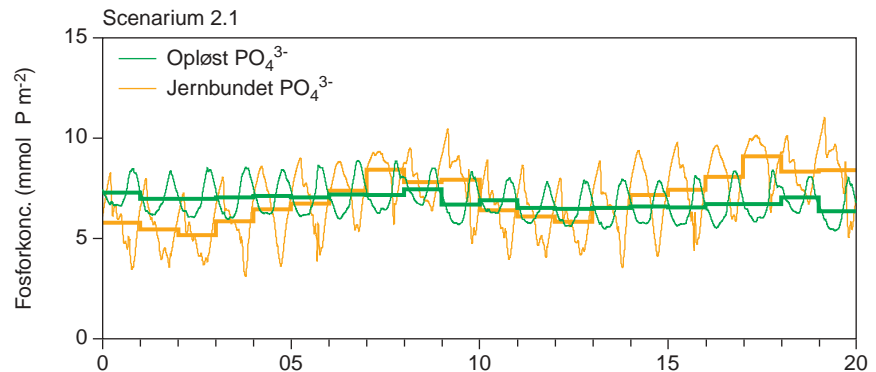
4.2.1.4 Fosfatflux og fosfatpuljer

Efter at den organiske stofbelastning er nedbragt med 10%, og bundvandets PO_4^{3-} -koncentration er reduceret til 72% af referenceværdien, fortsætter PO_4^{3-} med at strømme ud af havbunden omend med en 11% lavere rate end tidligere (Figur 4.37). Den lavere PO_4^{3-} -flux modsvarer den reducerede stofomsætning i sedimentet og er i dette scenarium ikke påvirket af, at PO_4^{3-} -koncentrationen i bundvandet er reduceret med 30% (Tabel 4.1).



Figur 4.37. Scenarium 2.1. PO₄³⁻-fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.17), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning af vandsøjlen i Århus Bugt nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofbegrænsningen er gennemført. PO₄³⁻-fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler ± σ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

I havbunden forskydes balancen mellem PO₄³⁻ i porevandet og jernbundet fosfat pga. de ændrede iltforhold i havbunden. En større del af det opløste fosfat i porevandet binder sig til den voksende pulje af oxideret jern på bekostning af et tilsvarende fald i den opløste fosfatpulje, men overordnet set ændrer sedimentets totale P-indhold sig ikke (Figur 4.38). Alt det PO₄³⁻, der produceres i sedimentet, forsvinder altså ud i bundvandet, i hvert tilfælde når PO₄³⁻-balancen betragtes over en tiårig periode. Det er dog vigtigt at holde sig for øje, at fosfatfluxen i Scenarium 2.1 varierer ligeså betragteligt over året som i referencescenariet.

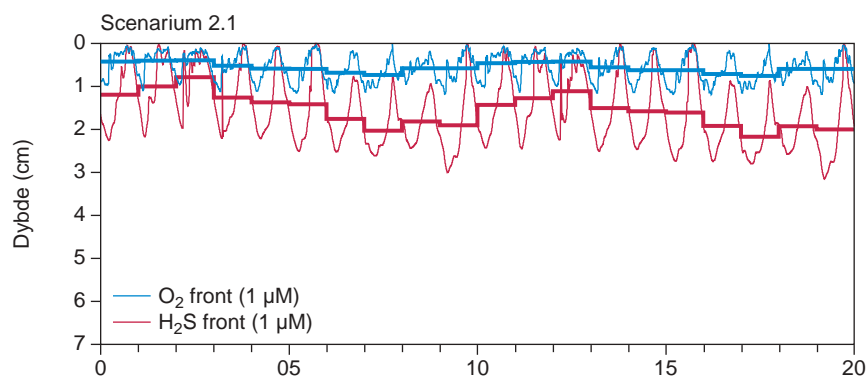


Figur 4.38. Scenarium 2.1. Udviklingen af hhv. opløst PO₄³⁻ i porevandet og letopløseligt jernbundet PO₄³⁻ i de øverste 20 cm af havbunden i Århus Bugt (2000-19) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen. Variationen i puljerne før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.18. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

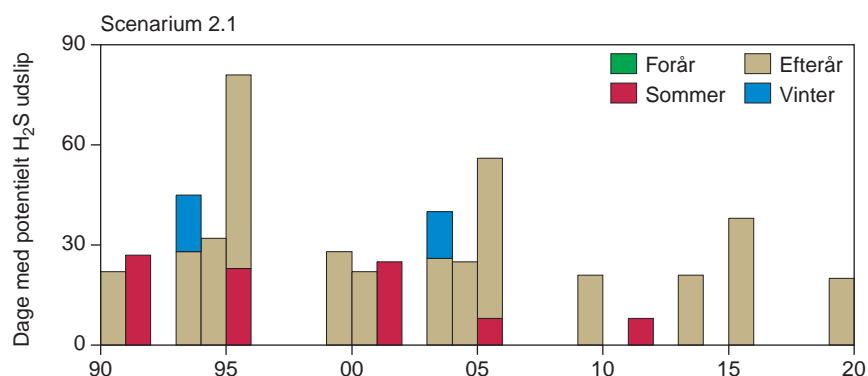
4.2.1.5 Ilt- og svovlbrintefronten

I takt med at den organiske stoftilførsel til havbunden aftager, trænger O₂ lidt længere ned i bunden, men ikke meget - i størrelsesordenen 0,5 mm (Figur 4.39). På samme tid bliver H₂S-fronten tvunget dybere ned i havbunden fra 1,4 cm (gennemsnit af års middelværdierne fra 1990-99) til 1,7 cm i tidsrummet 2010-2019. Det betyder også, at antallet af dage med potentiel mulighed for svovlbrinteudslip fal-

der, dvs. antallet af dage, hvor svovlbrintefronten befinder sig mindre en 1 mm fra sedimentoverfladen (Figur 4.40). I tiårsperioden 2010-19 er antallet af dage med potentiel fare for H₂S-udslip i gennemsnit faldet til 8,5 dage, men som Figur 4.40 viser, dækker dette fald over en stor spredning. Det betyder med andre ord, at det trods alt stadig forventes, at der vil optræde længerevarende perioder specielt i efteråret (op til 38 dage i 2015), hvor der er potentiel fare for H₂S-udslip.



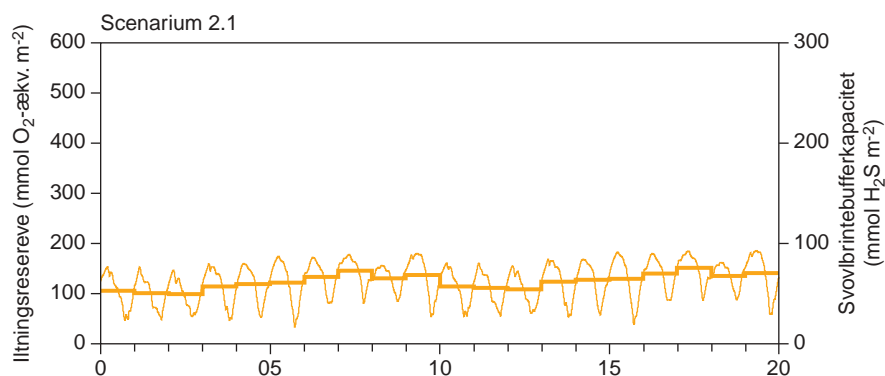
Figur 4.39. Scenarium 2.1. O₂- og H₂S frontens placering (1 µM isopleten) i bunden af Århus Bugt i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen (2000-19). Fronternes placering før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.19. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



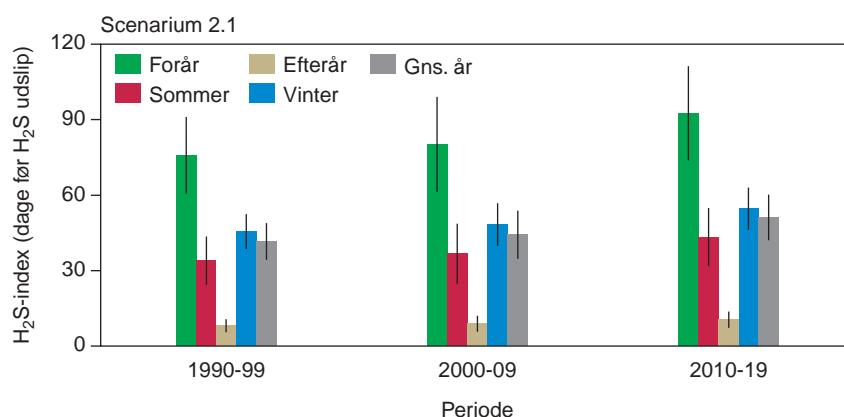
Figur 4.40. Scenarium 2.1. Det potentielle H₂S-udslip, dvs. antallet af dage, hvor H₂S-fronten ligger < 1 mm fra sedimentoverfladen fordelt på årstiderne, hhv. forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10) og vinter (1.11–14.2; det flg. år). Århus Bugt 1990-2019. Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.20), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning af vandsøjlen i Århus Bugt nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofbegrænsningen er gennemført.

4.2.1.6 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

Havbundens iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet stiger ca. 10% i forbindelse med faldet i den organiske stofbelastning (Figur 4.41). Samtidig falder svovlbrinteproduktionen, og dermed stiger det gennemsnitlige H₂S-index fra 42 til 52 dage for hhv. perioderne 1990-99 og 2010-19 (Figur 4.42). Den relativt største fremgang sker i efterårsperioden, hvor forbedringen er på >30% svarende til 3 dage, mens den absolutte fremgang er størst i forårsperioden, hvor indexet stiger fra 76 til 94 dage.



Figur 4.41. Scenarium 2.1. Iltningsreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Århus Bugt i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af vandsøjlen (2000-19). Iltningsreservens størrelse før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.21. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Figur 4.42. Scenarium 2.1. H_2S -indexet, dvs. antallet af dage, havbunden er i stand til at tilbageholde produktionen af H_2S og dermed hindrer H_2S udslip (se også definitionen af indexet i afsnit 3.2.6). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.22), perioden 2000-09 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning af vandsøjlen i Århus Bugt nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstofbegrænsningen er gennemført. H_2S -indexet er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2-30.4), sommer (1.5-31.8), efterår (1.9-31.10), vinter (1.11-14.2; det flg. år) og hele året.

4.3 Scenarium 3 - iltforholdene i bundvandet

I det tredje scenarium undersøger vi, hvordan iltindholdet i bundvandet påvirker nedbrydningsprocesserne i havbunden. I Scenarium 1 og 2 ændrede vi den organiske stoftilførsel til havbunden uden, at det i øvrigt fik nogen konsekvens på iltkoncentrationen i bundvandet. I de to forrige scenarier brugte vi nemlig som input til modellens to tiårige perioder (2000-2019) den iltkoncentration, som var blevet bestemt af Århus Amt i forbindelse med miljøovervågningen af bugten i perioden 1990-99.

Som omtalt i afsnit 1.5 styrer iltkoncentrationen i bundvandet bioaktiviteten i havbunden, dvs. bioturbation og bioirrigation. I Scenarium 3 modellerer vi derfor også effekten af, at dyrene i havbunden ændrer aktivitet som følge af ændrede iltforhold i bundvandet.

Vi diskuterer i det følgende tre scenarier:

- Scenarium 3.1 Iltindholdet ved bunden svarer til 100% luftmætning efter 1999.
- Scenarium 3.2 Iltindholdet ved bunden er reduceret til 50% af referencescenariet i perioden 15.7-15.9 hvert år efter 1999.
- Scenarium 3.3 Totalt iltsvind ved bunden i perioden 15.7-15.9 hvert år efter 1999.

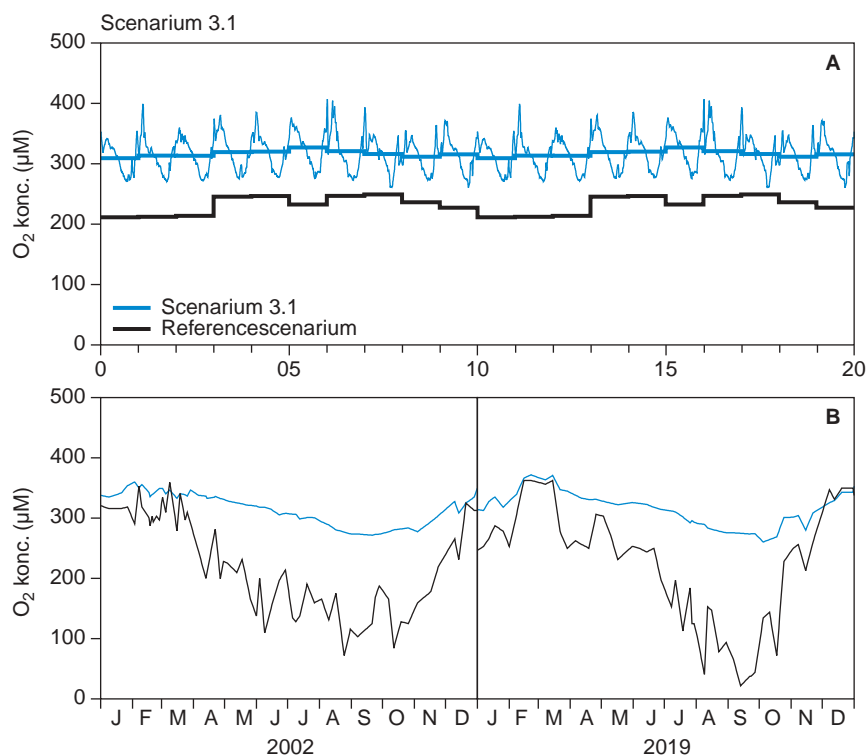
4.3.1 Scenarium 3.1 - iltindholdet ved bunden svarer til 100% luftmætning efter 1999

Resume: I dette scenarium er hele vandsøjlen fuldt opblandet, dvs. at der på intet tidspunkt af året dannes et springlag, som kan hindre O_2 i at nå ned til bunden. Med andre ord er bundvandet året rundt luftmættet. Med et højere iltindhold i vandet trænger ilten dybere ned i havbunden og skubber på den måde H_2S fronten endnu længere ned i bunden. Det høje iltindhold fører også til, at O_2 -optagelsen stiger betydeligt, fordi en større del af den organiske stofnedbrydning foregår aerobt. Derfor falder H_2S -produktionen, og der bliver omsat mindre af den oxiderede jernpulje. Skiftet i den organiske stofomsætning betyder dels, at der oparbejdes en mindre iltgæld i havbunden i løbet af sommerhalvåret, dels at iltsvindsindexets årlige gennemsnit stiger med omkring 2 uger, dvs. den tid det tager havbunden af optage så meget ilt fra vandet, at der opstår iltsvind. Mere ilt ved bunden øger også nitrifikationen, som mere end fordobles. Det betyder, at mere NH_4^+ bliver omsat til NO_3^- . Da denitrifikationen ikke ændrer sig væsentligt, men blot flytter lidt dybere ned i havbunden (under den iltede zone), stiger NO_3^- koncentrationen i havbunden, og NO_3^- begynder at strømme fra bunden og ud i bundvandet. Ammoniumkoncentrationen falder, og mindre NH_4^+ slipper ud af bunden, men faldet i NH_4^+ -fluxen balanceres af den stigende NO_3^- -flux, så alt i alt ændrer den totale N-flux sig ikke på trods af de forbedrede iltforhold i bundvandet. Fosfatfluxen falder også markant om sommeren og i efteråret. Det er puljen af oxideret jern, der stiger, når der kommer mere ilt til bunden, og derfor binder mere og mere af det PO_4^{3-} , der bliver frigjort ved den organiske stofomsætning. Derimod ændrer puljen af opløst PO_4^{3-} sig kun marginalt over de 20 år, scenariet afvikles.

4.3.1.0 Input til Scenarium 3.1

I dette scenarium forestiller vi os, at vandsøjlen er fuldt opblandet, dvs., vi antager, at bundvandet året rundt er mættet fuldstændig med luft (Figur 4.43). Med andre ord, i Scenarium 3.1 afhænger O_2 -koncentrationen i bundvandet kun af temperaturen og saliniteten. Alle andre inputparametre er uændrede ift. referencescenariet.

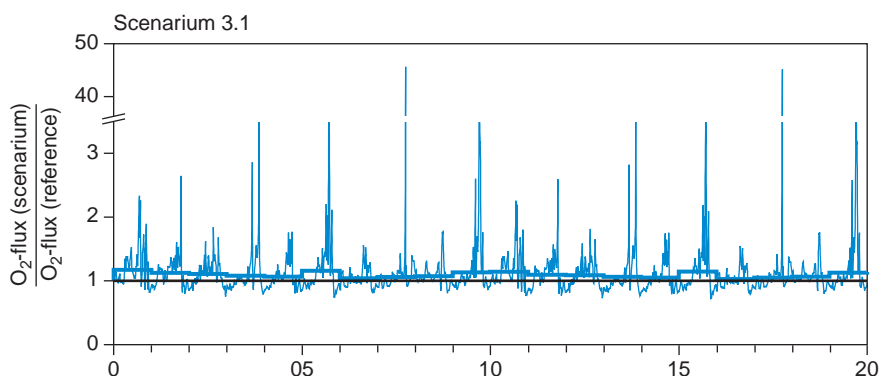
Figur 4.43. Scenarium 3.1. A: Iltkoncentrationen i bundvandet, Århus Bugt (1.1.2000–31.12.19) for hhv. referencescenariet og Scenarium 3.1, hvor bundvandet er fuldstændigt mættet med luft året rundt. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019), der viser dag til dag variationen for hhv. Scenarium 3.1 og referencescenariet. Bemærk at iltindholdet i Scenarium 3.1 kun varierer pga. ændret temperatur og salinitet i bundvandet.

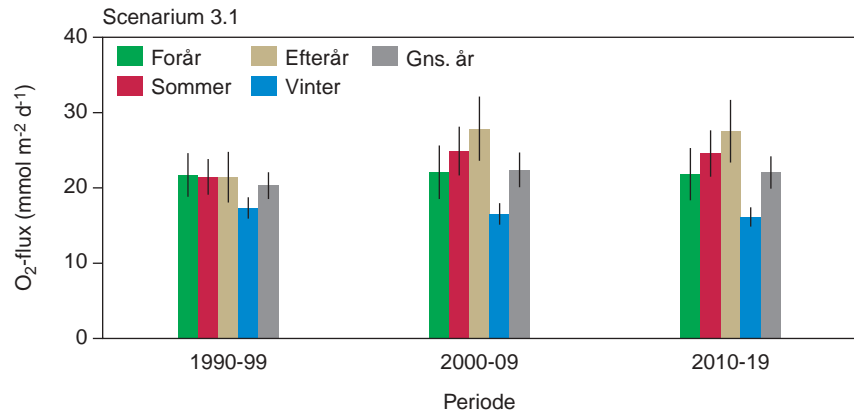


4.3.1.1 Fluxen af ilt- og kuldioxid

Den væsentligt højere iltkoncentration i bundvandet, som introduceres i Scenarium 3.1, medfører en betydelig stigning i havbundens iltoptagelse (Figur 4.44). Særlig markant stiger iltoptaget i efteråret (1.9-31.10), hvor fluxen øges med 47% (Figur 4.45). Denne markante stigning skyldes naturligvis, at det netop er i efteråret, at iltkoncentrationen ændrer sig mest, da iltkoncentrationen og dermed iltfluxen i referencescenariet er lavest på denne årstid. Især bliver O_2 -flux den 1.10 i hhv. 2007 og 2017 særligt iøjnefaldende, fordi iltkoncentrationen på dette tidspunkt i referencescenariet er $0 \mu\text{M}$, og O_2 -fluxen derfor er minimal (se 1.10 1997 på Figur 4.44 og Figur 3.8). Iltoptaget er derimod reduceret en smule i vinterperioden i forhold til referencescenariet. Det skyldes, at der i løbet af sommerhalvåret ikke er oparbejdet en så stor iltgæld i havbunden som i referencescenariet, og derfor kræves der mindre O_2 i vinterperioden til oxidation af havbundens reducerede stofpuljer. Alt i alt betyder de forbedrede iltforhold ved bunden, at iltoptaget er 12% højere på årsbasis i perioden 2000-19 relativt til referencescenariets gennemsnit.

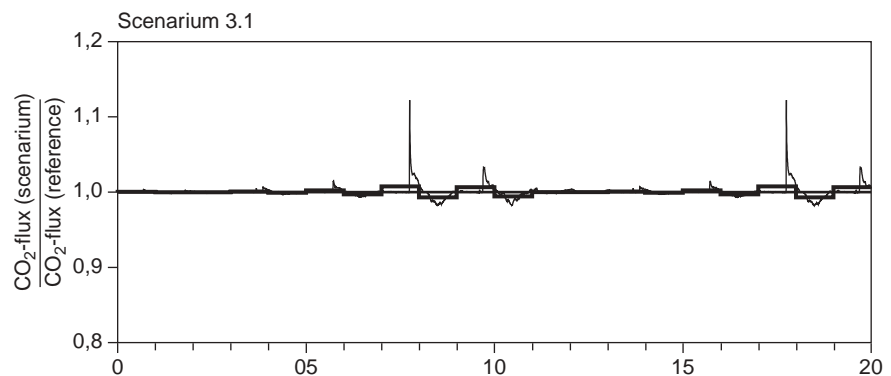
Figur 4.44. Scenarium 3.1. O_2 -fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.8) når O_2 -indholdet i bundvandet svarer til fuldstændig luftmætning. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



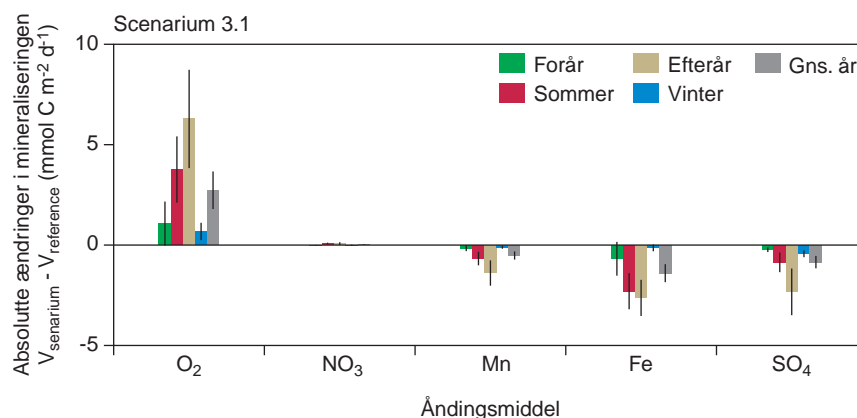


Figur 4.45. Scenarium 3.1. O₂-fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.8) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 svarer O₂-indholdet i bundvandet til fuldstændig luftmætning. O₂-fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

Den organiske stoftilførsel til havbunden er uforandret i forhold til referencescenariet, og bedømt på årsbasis ændrer CO₂-fluxen sig ikke, selv om iltforholdene ved havbunden forbedres (Figur 4.46). De små dag til dag udsving, der ses på figuren fx. den 1.10 2007 og 17. skyldes, at bioturbationen og irrigation i referencescenariet er kraftigt reduceret i perioder pga. meget lave O₂-koncentrationer i bundvandet. Det er denne effekt, der i Scenarium 3.1 så at sige neutraliseres, når bundvandet luftmættes. Alt i alt forbliver CO₂-produktionen i havbunden uændret på trods af, at iltoptaget forøges kraftigt. Forklaringen herpå er, at CO₂-produktionen alene bestemmes af koncentrationen af det organiske materiale, mens iltoptagelsen øges som følge af et skift fra anaerob til aerob mineralisering. Den aerobe mineralisering (dvs. den bakterielle O₂-respiration) bliver mere dominerende særligt på bekostning af jern- og sulfatreduktionen (Figur 4.47). Produktionen af H₂S bliver derfor tilsvarende reduceret, og der dannes mindre FeS i havbunden. Iltgælden, der opbygges i havbunden i løbet af sommeren, bliver derfor knap så stor som i referencescenariet, og iltforbruget i vinterperioden dermed mindre, som det netop er diskuteret.



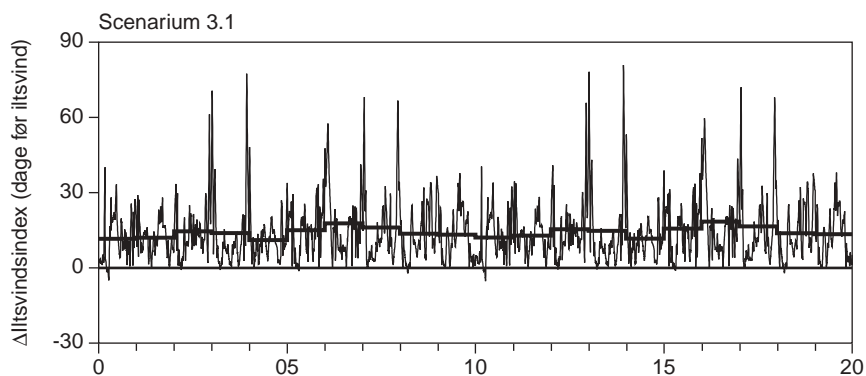
Figur 4.46. Scenarium 3.1. CO₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.10) når O₂-indholdet i bundvandet svarer til fuldstændig luftmætning. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Figur 4.47. Scenarium 3.1. Den absolutte ændring af mineraliseringsraten for hhv. iltrespirationen (O_2), denitrifikationen (NO_3), manganreduktionen (Mn), jernreduktionen (Fe) og sulfatreduktionen (SO_4), når bundvandet i Århus Bugt bliver fuldstændig luftmættet. En positiv forskel mellem raterne i Scenarium 3.1 og referencescenariet, dvs. $V_{scenarium} - V_{reference}$, viser, at den pågældende mineralisering bliver styrket, mens en negativ forskel viser en svækket mineralisering. Ændringen i mineraliseringsraten er beregnet for perioden 2009-19 og vist som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

4.3.1.2 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

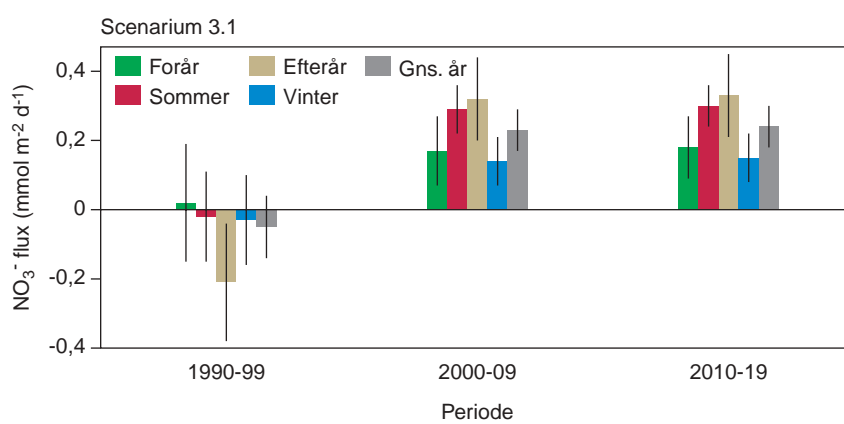
Selvom iltforbruget i havbunden stiger, stiger iltsvindsindexet markant, og det vil derfor vare længere, før der opstår iltsvind (i.e. $<4 \text{ mg } O_2 \text{ liter}^{-1}$) i bundvandet, end det er tilfældet i referencescenariet (Figur 4.48). Det er den permanent høje iltkoncentration i vandet (Figur 4.43), der fører til forbedringen af iltsvindsindexet. I gennemsnit forbedres indexet med 14 dage i perioden 2000-2019. Den største forbedring sker i vinterperioden (21 dage), hvor havbundens iltforbrug er reduceret, fordi puljen af stoffer, der skal oxideres, ikke længere er så stor.



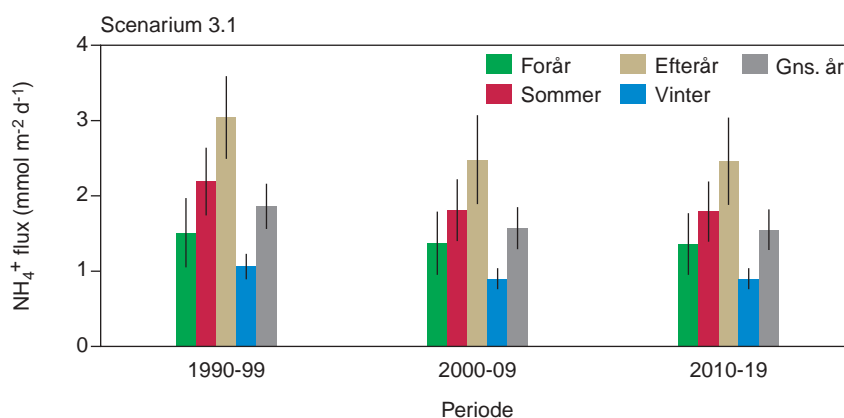
Figur 4.48. Scenarium 3.1. Den absolutte ændring af iltsvindsindexet (ΔI_{O_2}) i Århus Bugt (2000-19) når O_2 -indholdet i bundvandet svarer til fuldstændig luftmætning, hvor $\Delta I_{O_2} = I_{O_2(scenarium)} - I_{O_2(reference)}$, (se definition af I_{O_2} i afsnit 3.2.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Referencescenariet ses på Figur 3.12.

4.3.1.3 Kvælstofflux, denitrifikation og nitrifikation

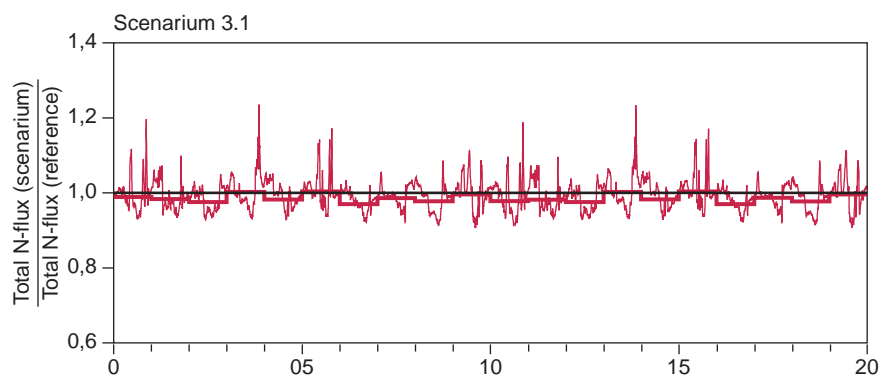
Med introduktionen af mere O_2 til bundvandet ændrer NO_3^- -fluxen retning fra et optag til en afgivelse af NO_3^- fra havbunden (Figur 4.49). Det mest markante skifte sker i efteråret, hvor NO_3^- -fluxen ændrer sig fra en optagelse på i gennemsnit $0,21 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (1990-99) til en afgivelse på $0,33 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (gennemsnit for perioden 2000-19). Også NH_4^+ -fluxen ændrer sig, idet der slipper mindre NH_4^+ ud af havbunden, når O_2 -indholdet i bundvandet stiger (Figur 4.50). Selvom reduktionen i NH_4^+ -fluxen ikke synes af meget på Figur 4.50, svarer reduktionen i NH_4^+ -fluxen til forøgelsen af NO_3^- -fluxen – et godt eksempel er efterårsperioden, hvor NO_3^- -fluxen er øget med $0,53 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, og NH_4^+ -fluxen tilsvarende reduceret med $0,58 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Det betyder med andre ord, at den totale N-flux ikke ændrer sig på årsbasis, selvom der er nogle dage, hvor N-fluxen afviger markant fra referencescenariet (Figur 4.51).



Figur 4.49. Scenarium 3.1. NO_3^- -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Fig. 3.13) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 svarer O_2 -indholdet i bundvandet til fuldstændig luftmætning. NO_3^- -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

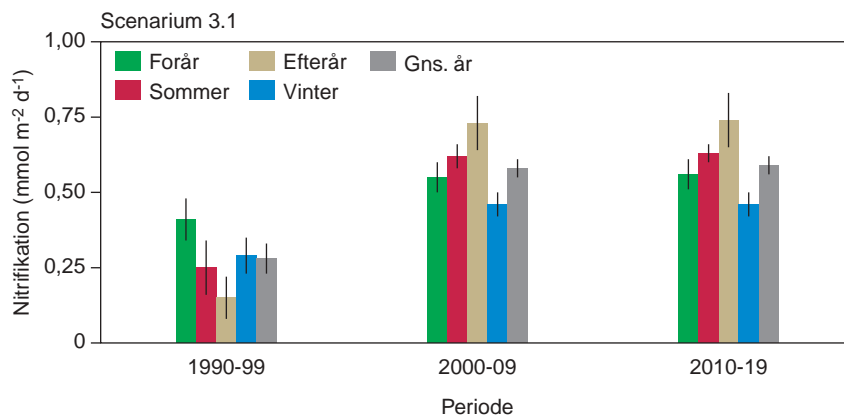


Figur 4.50. Scenarium 3.1. NH_4^+ -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.14) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 svarer O_2 -indholdet i bundvandet til fuldstændig luftmætning. NO_3^- -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.



Figur 4.51. Scenarium 3.1. Den totale kvælstoffluxændring i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet når O_2 -indholdet i bundvandet svarer til fuldstændig luftmætning. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

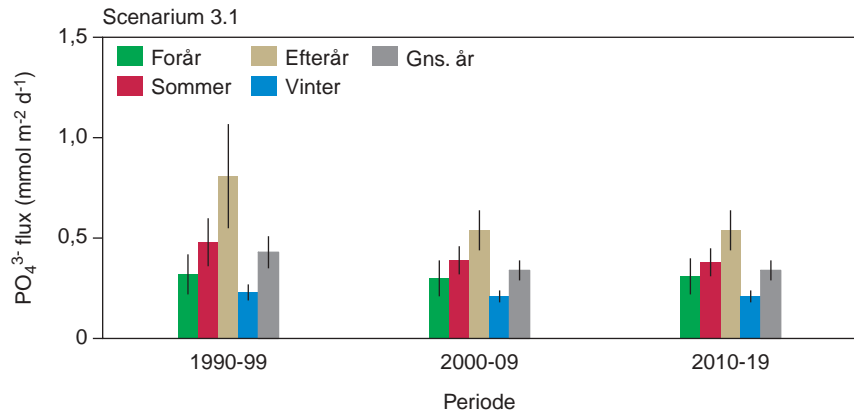
Denitrifikationen ændrer sig heller ikke nævneværdigt i Scenarium 3.1 (se Figur 4.47), så heraf slutter vi, at det alene er nitrifikationen – altså NH_4^+ oxidation til NO_3^- (se afsnit 1.3.1) – der stimuleres af det forøgede iltindhold ved bunden (Figur 4.52). På årsbasis øges nitrifikationen til mere end det dobbelte, og i efterårsperioden, hvor de stærkt forbedrede iltforhold ved bunden får størst betydning, kvitterer nitrifikationen med en 400% forøgelse. Med andre ord fører de forbedrede iltforhold i havbunden til en øget nettoproduktion af NO_3^- samtidig med, at denitrifikationen fortsætter upåvirket, fordi denne proces blot flytter dybere ned i havbunden lige under den iltholdige zone.



Figur 4.52. Scenarium 3.1. Nitrifikationen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet og i perioderne 2000-09 og 2010-19 svarer O_2 -indholdet i bundvandet til fuldstændig luftmætning. Nitrifikationen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

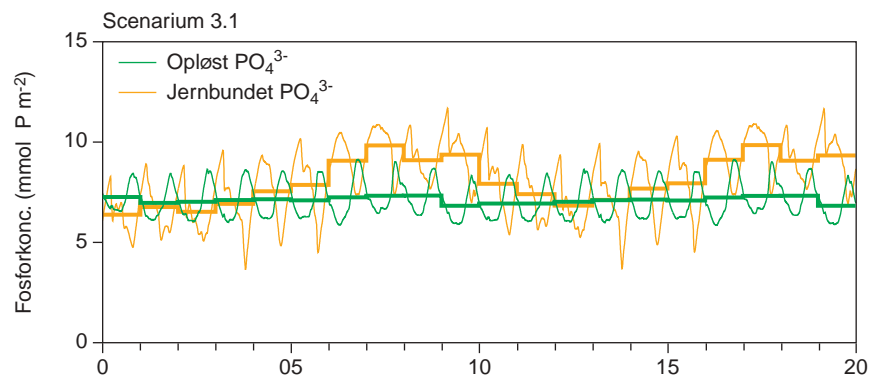
4.3.1.4 Fosfatflux og fosfatpuljer

Det øgede iltindhold i havbunden fører i perioden 2000-19 til en ca. 20% reduktion af PO_4^{3-} -fluxen fra bunden til vandet med den mest iøjnefaldende reduktion i sommer- og efterårsperioden, hvor PO_4^{3-} -fluxen normalt er størst pga. de sædvanligvis forringede iltforhold i havbunden (Figur 4.53).



Figur 4.53. Scenarium 3.1. PO₄³⁻-fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.17) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 svarer O₂-indholdet i bundvandet til fuldstændig luftmætning. PO₄³⁻-fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler ± σ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

I havbunden vokser puljen af oxideret jern i samme periode (Figur 4.54) og binder over en ti-årig periode i gennemsnit 27% mere PO₄³⁻ end før år 2000, hvor O₂-indholdet i bundvandet var lavere. Puljen af PO₄³⁻ i porevandet ændrer sig derimod kun marginalt. Da også omsætnings-hastigheden af organisk stof og dermed produktionen af PO₄³⁻ forbliver uændret (se Figur 4.46), bindes en stor del af det PO₄³⁻, der produceres ved den organiske stofomsætning, til puljen af oxideret jern. Denne jernbundne fosfatpulje vokser derfor 2,2 mmol P år⁻¹ svarende til en stigning på 0,2% af den oprindelige jernbundne fosfatpulje fra før år 2000.

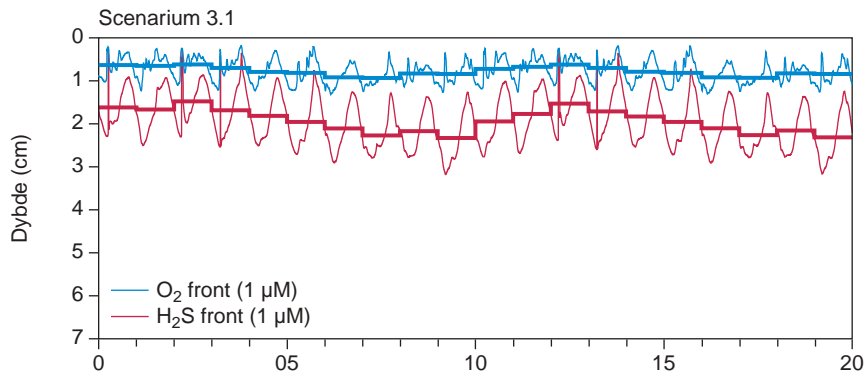


Figur 4.54. Scenarium 3.1. Udviklingen af hhv. opløst PO₄³⁻ i porevandet og letopløseligt jernbundet PO₄³⁻ i de øverste 20 cm af havbunden i Århus Bugt (2000-19) når O₂-indholdet i bundvandet svarer til fuldstændig luftmætning. Variationen i puljerne før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.18. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

4.3.1.5 Ilt- og svovlbrintefronten

Den forøgede iltkoncentration ved bunden betyder selvfølgelig, at O₂ trænger længere ned i havbunden, nemlig fra 0,53 cm til i gennemsnit 0,78 cm for perioden 2000-2019 (Figur 4.55). Samtidig skubber iltens H₂S-fronten mere end 5 mm dybere ned i havbunden til et gennemsnit på 1,94 cm. Det betyder også, at der ikke længere optræder perioder, hvor der er potentiel mulighed for udslip af H₂S fra havbunden (data ikke vist).

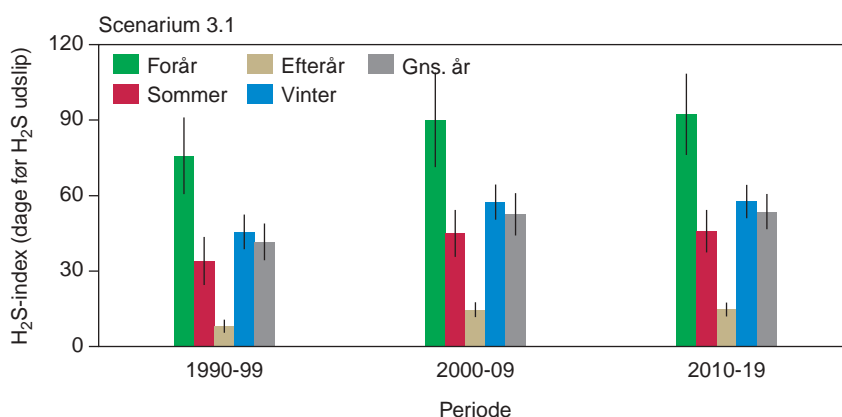
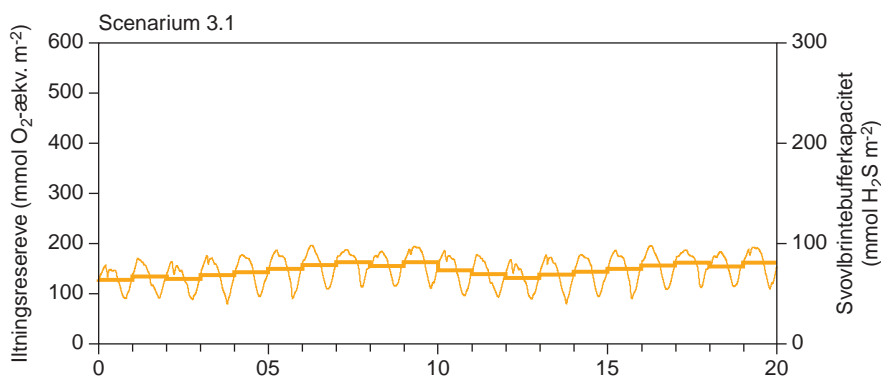
Figur 4.55. Scenarium 3.1. O₂- og H₂S frontens placering (1 μM isopleten) i bunden af Århus Bugt når O₂-indholdet i bundvandet svarer til fuldstændig luftmætning (2000-19). Fronternes placering før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.19. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



4.3.1.6 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

Havbundens iltningsreserve eller svovlbrintebufferkapacitet stiger ca. 25%, når iltindholdet i bundvandet stiger, til det der svarer til luftmætning (Figur 4.56). Samtidig sker der et skifte i den organiske stofomsætning, således at en mindre del af stofomsætningen sker ved reduktion af sulfat, og derfor falder produktionen af svovlbrinte (se Figur 4.47). Det korte af det lange bliver, at det gennemsnitlige H₂S-index øges med 11 dage, hvor den relativ største stigning sker i efteråret, hvor indexet næsten fordobles fra 8 til 15 dage (Figur 4.57).

Figur 4.56. Scenarium 3.1. Iltningsreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Århus Bugt når O₂-indholdet i bundvandet svarer til fuldstændig luftmætning (2000-19). Iltningsreservens størrelse før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.21. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Figur 4.57. Scenarium 3.1. H₂S-indexet, dvs. antallet af dage, havbunden er i stand til at tilbageholde produktionen af H₂S og dermed hindrer H₂S udslip (se også definitionen af indexet i afsnit 3.2.6). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.22) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 svarer O₂-indholdet i bundvandet til fuldstændig luftmætning. H₂S-indexet er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler ± σ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

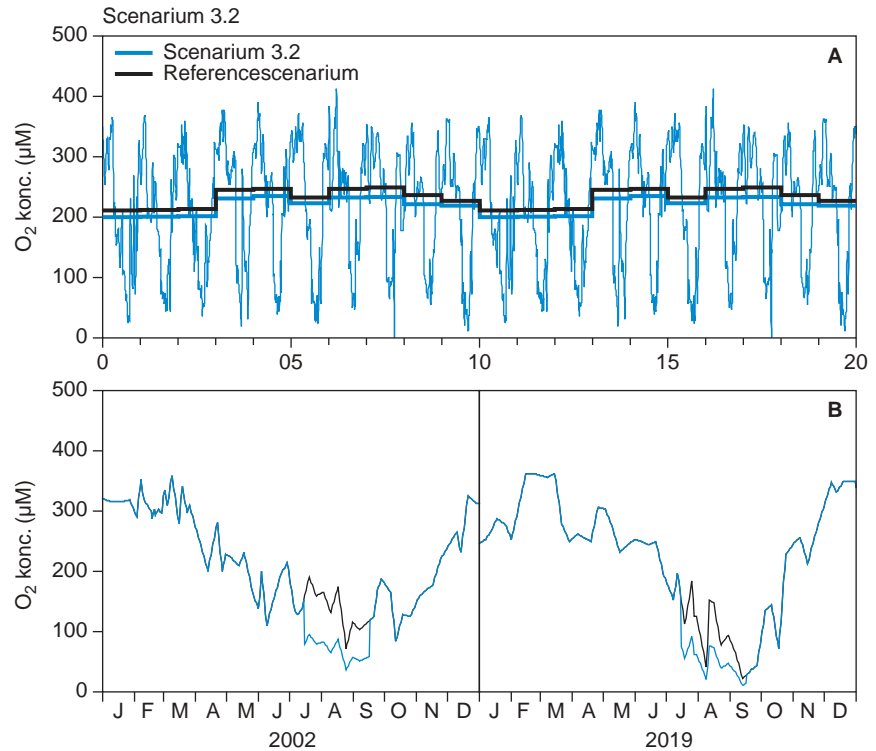
4.3.2 Scenarium 3.2 - Iltindholdet ved bunden reduceret til 50% af referencescenariet i perioden 15.7-15.9 hvert år efter 1999

Resume: I dette scenarium er iltkoncentrationen i bundvandet halveret i sensommeren (15.7-15.9) ift. det normale (referencescenariet). Det lave iltindhold får en negativ påvirkning på bioaktiviteten, og havbunden bliver derfor ikke bioturberet med samme intensitet som tidligere samtidig med, at irrigationen også er nedsat, så der ikke pumpes så meget vand ud og ind af havbunden. Det lave iltindhold ved bunden påvirker naturligvis den organiske stofomsætning i havbunden, som især i sensommeren domineres af de anaerobe nedbrydningsprocesser. Det medfører, at indholdet af reducerede stoffer i havbunden stiger, dvs. koncentrationen af H_2S stiger og det oxiderede jern bliver reduceret. Den stigende H_2S -koncentration fører H_2S -fronten tættere mod sedimentoverfladen, og risikoen for H_2S -udslip øges betydeligt, fordi ilten på samme tid kun når nogle ganske få 1/10-dele mm ned i bunden. Iltgælden i havbunden vokser, og visse år fortsætter virkningen fra sensommerens iltsvind helt ind i den efterfølgende vinter og forår. Nitrifikationen hæmmes af iltmanglen i havbunden, så der dannes ikke tilstrækkeligt med NO_3^- til at opretholde denitrifikationen, som bliver alvorligt svækket især i sensommeren. Det NH_4^+ , der ikke bliver nitrificeret i havbunden, forsvinder i stedet for ud i bundvandet, men det påvirker kun NH_4^+ fluxen ganske lidt, da fluxen i forvejen er høj i sensommeren. De dårlige iltforhold i bundvandet øger PO_4^{3-} -fluxen ud af bunden, men tidsrummet med den forøgede PO_4^{3-} flux begrænser sig til perioden 15.7-15.9. Det er den øgede reduktion af det oxiderede jern, der fører til, at mere PO_4^{3-} bliver opløst i bunden for derefter at strømme ud i bundvandet i takt med, at det jernbundne PO_4^{3-} går i opløsning.

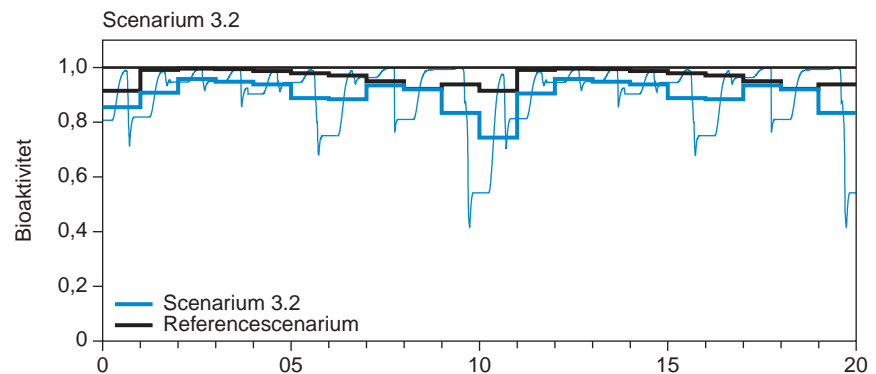
4.3.2.0 Input til Scenarium 3.2

I dette scenarium er iltkoncentrationen i bundvandet hvert år i perioden 15.7-15.9 reduceret med 50% ift. referencescenariet (Figur 5.58). Det mærkbart reducerede iltindhold i bundvandet i sommermånedene påvirker de bioturberende og bioirriterende dyr på en sådan måde, at bioaktiviteten falder med ca. 7% i forhold til referencescenariet målt i perioden 2000-19 (Figur 5.59). I de år, hvor iltforholdene ved bunden er relativt gode, kommer de bioturberende dyr dog så hurtigt til hægterne igen efter et forudgående iltsvind, at bioaktiviteten svarer til aktiviteten i referencetilstanden (se årene 2007, 08, 17 og 18).

Figur 4.58. Scenarium 3.2. A: Iltkoncentrationen i bundvandet, Århus Bugt (1.1. 2000–31.12.19) for hhv. referencescenariet og Scenarium 3.1, hvor iltindholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7.–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019), der viser dag til dag variationen for hhv. Scenarium 3.2 og referencescenariet. Bemærk at iltindholdet i Scenarium 3.2 kun afviger fra referencescenariet i perioden 15.7.–15.9.



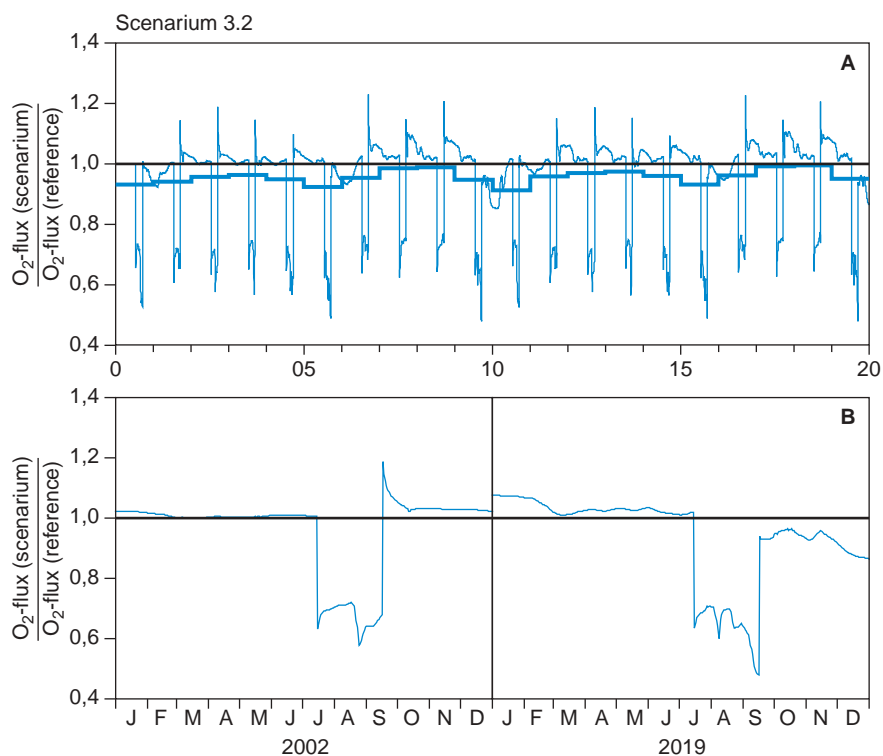
Figur 4.59. Scenarium 3.2. Bioaktiviteten i Århus Bugt (2000-19) når O_2 -indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7.–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 3.2. og referencescenariet.



4.3.2.1 Fluxen af ilt- og kuldioxid

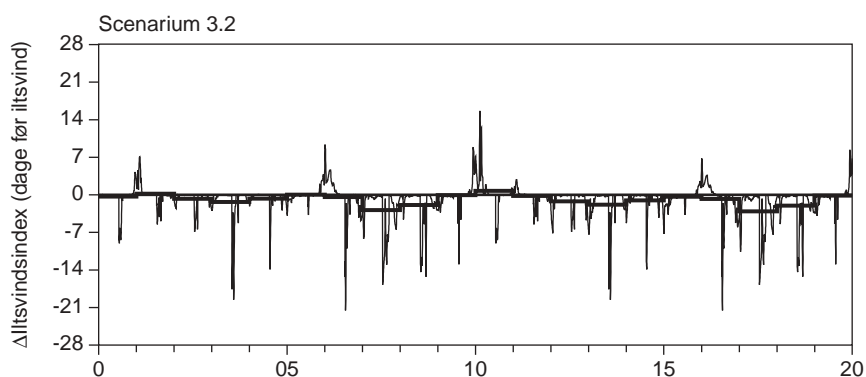
De forværede iltforhold i sommermånederne påvirker havbundens iltoptag. Ikke kun den markante reduktion i iltoptaget i perioden 15.7-15.9 springer i øjnene, også den forøgede O_2 -optagelse lige efter, at iltkoncentrationen i bundvandet er steget til det "normale", er bemærkelsesværdig (Figur 4.60). Nedgangen i iltoptaget i perioden 15.7-15.9 skyldes naturligvis de forringede iltforhold ved bunden, hvilket begrænser den aerobe stofomsætning og stimulerer de anaerobe processer. I denne periode vokser havbundens indhold af reducerede stoffer. Når iltindholdet i bundvandet efter 15.9 bliver bedre, øges også iltoptaget, som bl.a. bruges til at oxidere de reducerede forbindelser, der blev dannet i perioden 15.7-15.9. Samlet set medfører de forværede iltforhold i juli-september en ubetydelig nedgang i det årlige O_2 -optag på 4% (gennemsnit for perioden 2000-2019). Fluxen af CO_2 ud af havbunden ændrer sig ikke set over samme periode, hvilket vi heller ikke forventer, da mængden af organisk stof, der tilføres bunden, er uforandret i scenariet (data ikke vist).

Figur 4.60. Scenarium 3.2. A: O₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.8) når O₂-indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7.–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



4.3.2.2 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

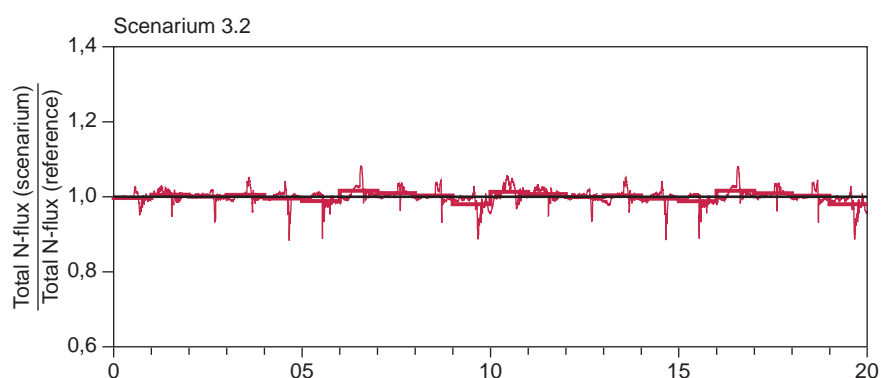
Som det netop er beskrevet, falder havbundens iltoptag, samtidig med at iltindholdet i bundvandet mindskes. Det betyder, at iltsvindsindexet i realiteten enten stiger eller falder afhængig af, om det er havbundens iltoptagelse eller O₂-koncentrationen i bundvandet, der ændrer sig mest markant (Figur 4.61). Der forekommer derfor enkelt-hændelser i sommerperioden, hvor indexet går dramatisk tilbage pga. de forringede iltforhold i vandsøjlen, hvilket dog ikke påvirker indexet på årsbasis set over en længere periode.



Figur 4.61. Scenarium 3.2. Den absolutte ændring af iltsvindsindexet (ΔI_{O_2}) i Århus Bugt (2000-19) når O₂-indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7. - 15.9, hvor $\Delta I_{O_2} = I_{O_2(\text{scenarium})} - I_{O_2(\text{referencen})}$, (se definition af I_{O_2} i afsnit 3.2.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Referencescenariet ses på Figur 3.12.

4.3.2.3 Kvælstofflux, denitrifikation og nitrifikation

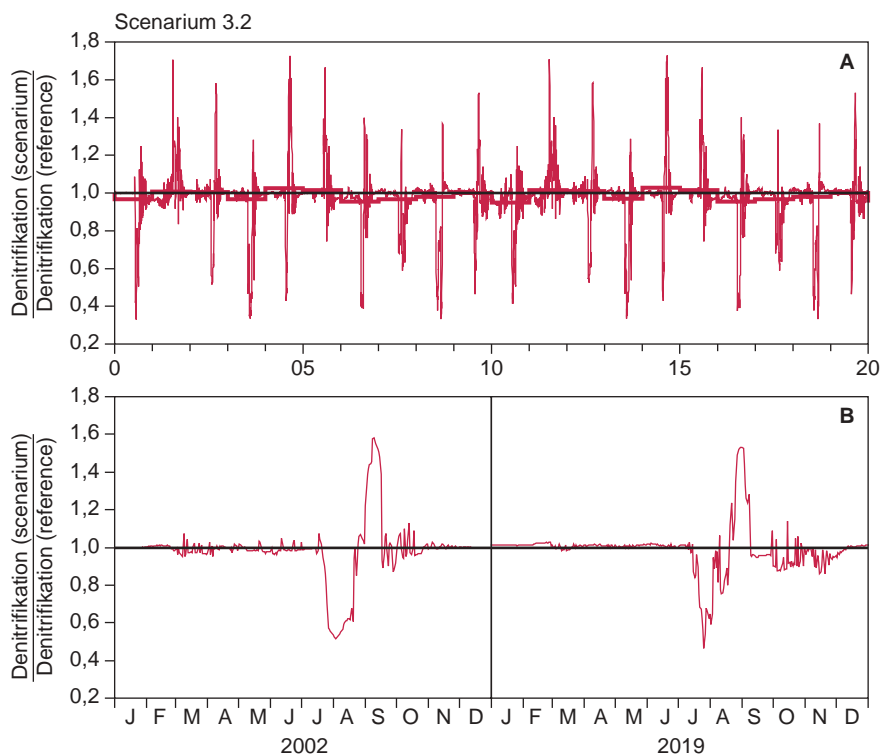
Det forøgede iltvind i sommerperioden påvirker ikke den totale kvælstofflux i nævneværdig grad (Figur 4.62). Det gælder også for denitrifikationen på årsbasis, hvorimod denitrifikationen påvirkes betydeligt under og umiddelbart efter iltsvindsperioderne (Figur 4.63). Samtidig med at iltindholdet i fjordbunden nedsættes med 50%, falder også denitrifikationen. Umiddelbart skulle man forvente, at denitrifikationen stiger, når ilten langsomt forsvinder fra havbunden – denitrifikationsprocessen er jo en anaerob proces, som omsætter NO_3^- til N_2 (se afsnit 1.2.2), men netop NO_3^- er en mangelvare i sommermånederne, og denitrifikationsprocessen er derfor afhængig af, at NO_3^- produceres fra NH_4^+ ved nitrifikationsprocessen, og denne proces kræver ilt. Med andre ord er denitrifikationen tæt koblet til nitrifikationsprocessen, og derfor begrænses begge processer betydeligt, når ilten forsvinder fra fjordbunden (Figur 4.64). Når ilten forsvinder i sommerperioden, bliver der derfor omsat mindre NH_4^+ , som i stedet forsvinder fra havbunden og op i bundvandet. Mængden af NH_4^+ , der på den måde undgår at blive nitrificeret, er dog relativt lille set i forhold til puljen af NH_4^+ i porevandet. Derfor er det også svært at få øje på en forøget NH_4^+ -flux i sommermånederne (Figur 4.62). Så snart O_2 vender tilbage til bunden, bliver nitrifikationen stimuleret (Figur 4.64), hvilket har en øjeblikkelig positiv og kraftig effekt på denitrifikationen (Figur 4.63).



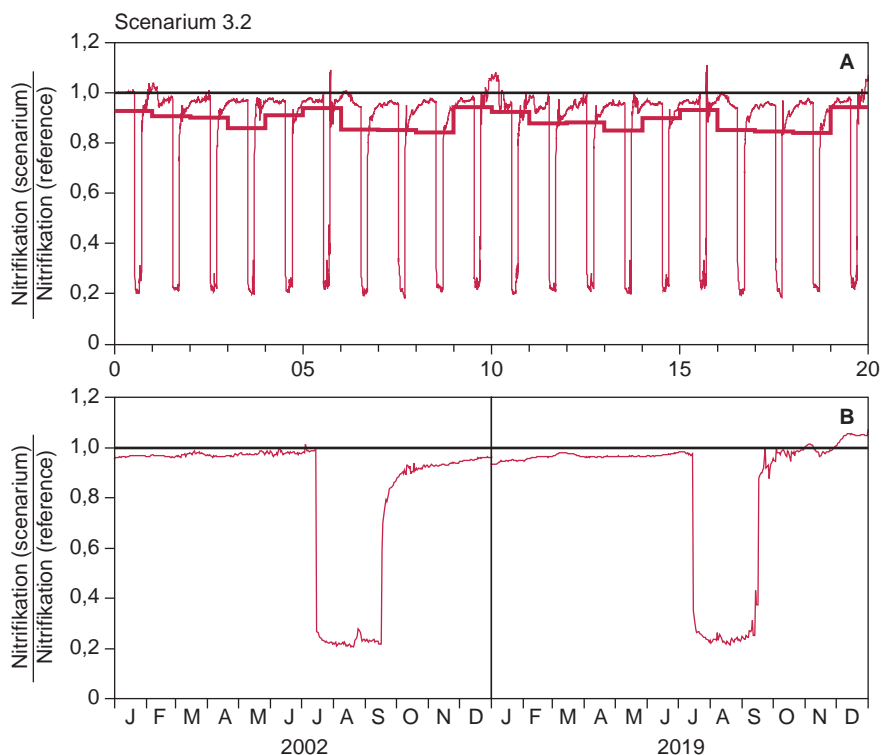
Figur 4.62. Scenarium 3.2. Den totale kvælstoffluxændring i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet når O_2 -indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7.–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Det skal bemærkes, at denitrifikationen trods alt ikke er mere afhængig af nitrifikationsprocessen, end at processen udmærket kan fortsætte, selvom der ikke bliver produceret NO_3^- ved nitrifikation. Så snart der bliver tilført NO_3^- fra bundvandet til den iltfrie del af havbunden, aktiveres denitrifikationen. Det betyder med andre ord, at selv under iltsvindsperioder, hvor nitrifikationen er hæmmet, kan denitrifikationen alligevel stimuleres, når der optræder NO_3^- i bundvandet.

Figur 4.63. Scenarium 3.2. A: Denitrifikationen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.16) når O_2 -indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7.–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.

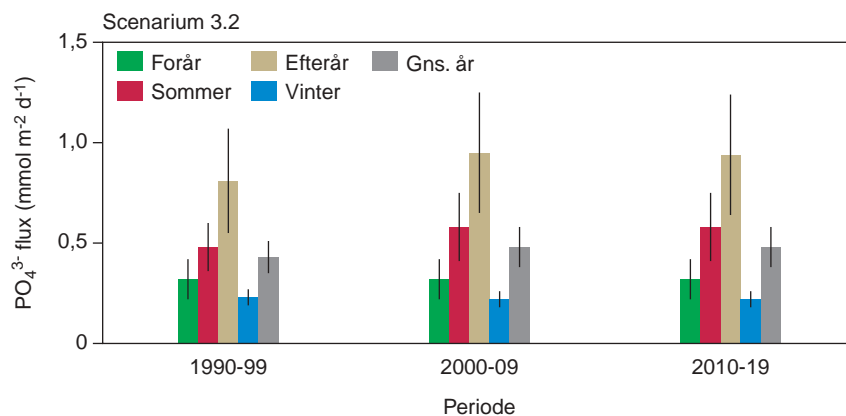


Figur 4.64. Scenarium 3.2. A: Nitrifikationen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet når O_2 -indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7.–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



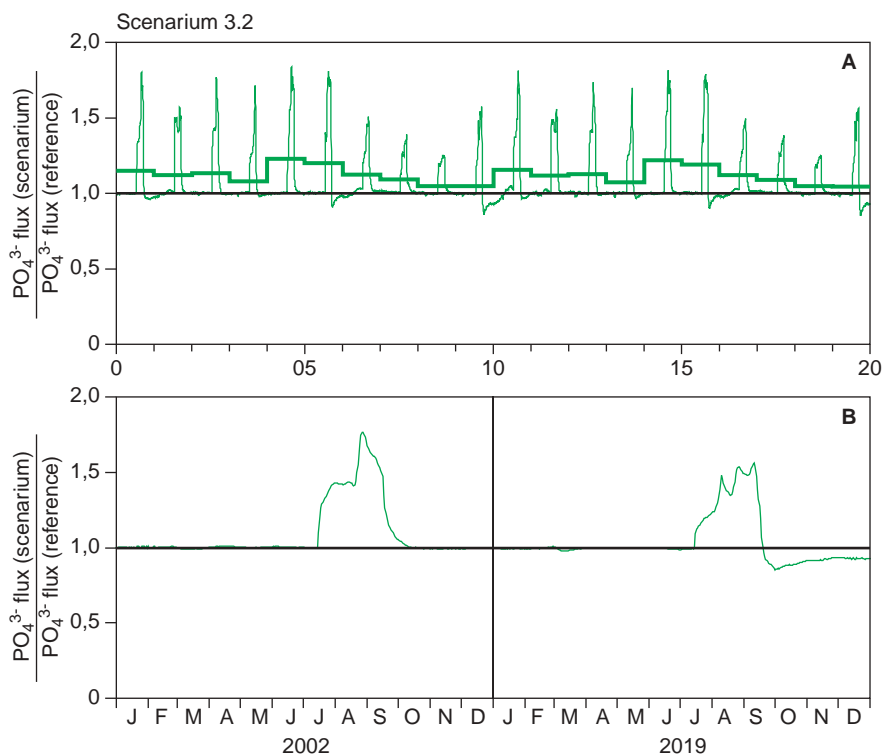
4.3.2.4 Fosfatflux og fosfatpuljer

Det forringede iltindhold i bundvandet medfører på årsbasis, at fosforfrigivelsen over en tyveårig periode i gennemsnit stiger med 7% fra $0,43 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (1990-99) til $0,48 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i perioden 2000-2019 (Figur 4.65). Den forøgede fosforfrigivelse er begrænset til perioden 15.7-15.9, hvor iltkoncentrationen i bundvandet er nedsat med 50% ift. referencetilstanden (se Figur 4.58). I sommerperioden er PO_4^{3-} -fluxen derfor forøget med op til 80%, mens den i vinterhalvåret er praktisk taget uforandret (Figur 4.66).

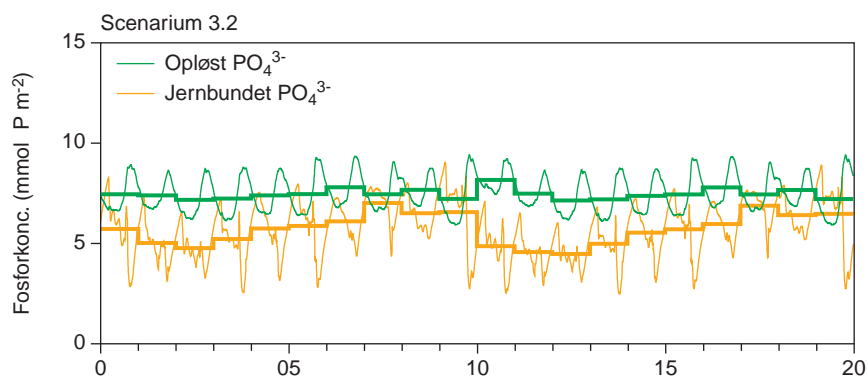


Figur 4.65. Scenarium 3.2. PO_4^{3-} -fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.17) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 er O_2 -indholdet i bundvandet reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7.–15.9. PO_4^{3-} -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

Figur 4.66. Scenarium 3.2. A: Den totale PO_4^{3-} -flux i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.17) når O_2 -indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



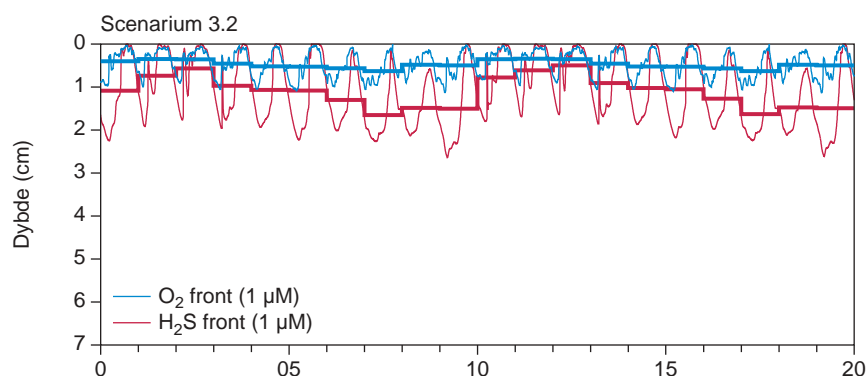
Når mere PO_4^{3-} slipper op i bundvandet, påvirker det selvfølgelig fosforpuljerne i bunden, men faktisk er det kun puljen af jernbundet fosfat, der ændrer sig væsentligt (Figur 4.67). Det kan være svært at se ændringen på figuren, men faktisk falder den jernbundne fosforpulje i gennemsnit med 13% på årsbasis. Når størrelsen den jernbundne fosforpulje bliver mindre, betyder det i første omgang, at der opløses mere PO_4^{3-} i porevandet. Det er jo som bekendt koncentrationsforskellen mellem porevandet og bundvandet, der bestemmer størrelse og retning af PO_4^{3-} -fluxen, og derfor stiger PO_4^{3-} -fluxen ud af bunden, når der opløses mere PO_4^{3-} i porevandet. Fosfatkoncentration i bundvandet er uændret ift. referencescenariet, da denne størrelse, som er en inputparameter til modellen, ikke er ændret i Scenarium 3.2.



Figur 4.67. Scenarium 3.2. Udviklingen af hhv. opløst PO_4^{3-} i porevandet og letopløseligt jernbundet PO_4^{3-} i de øverste 20 cm af havbunden i Århus Bugt (2000-19) når O_2 -indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7-15.9. Variationen i puljerne før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.18. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

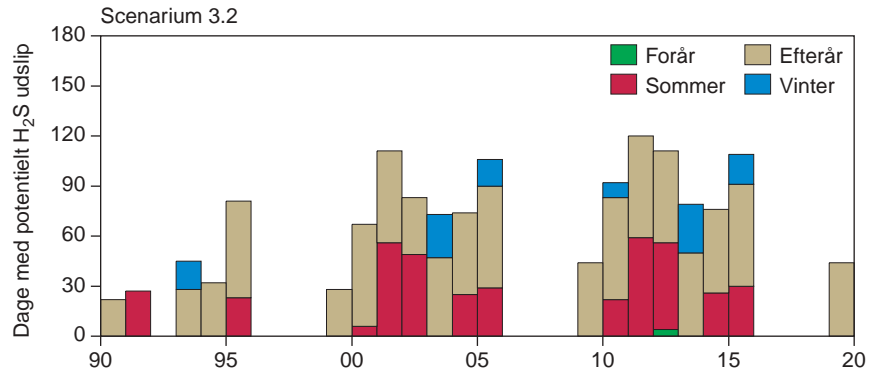
4.3.2.5 Ilt- og svovlbrintefronten

Det er næsten indlysende, at når iltforholdene ved bunden bliver dårligere, trænger O_2 ikke så langt ned i havbunden, og tilsvarende når H_2S længere op mod sedimentoverfladen. Det er da også det billede, der kendetegner Scenarium 3.2 (Figur 4.68). Set over en længere periode kryber svovlbrintefronten ca. 3 mm tættere mod sedimentoverfladen, og samtidig reduceres nedtrængningen af ilt fra 0,53 cm til 0,47 cm.



Figur 4.68. Scenarium 3.2. O_2 - og H_2S frontens placering ($1 \mu\text{M}$ isopleten) i bunden af Århus Bugt når O_2 -indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7-15.9. Fronternes placering før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.19. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

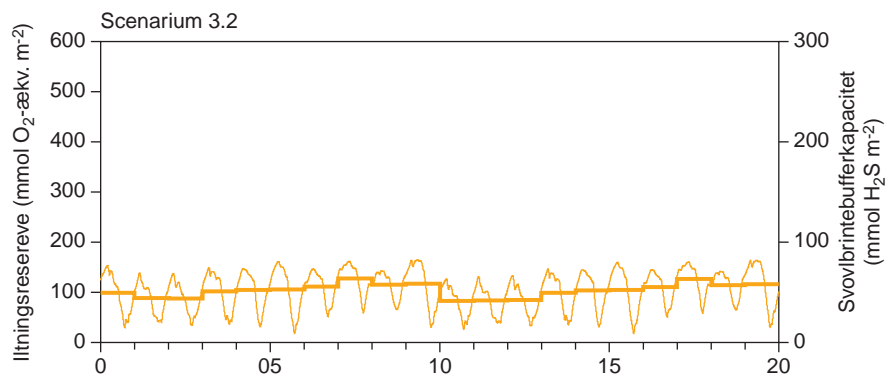
Selvom H_2S kun kommer omkring 3 mm tættere til sedimentoverfladen, er det nok til, at iltsvindet i juli-september øger antallet af dage, hvor der er potentiel mulighed for, at H_2S slipper ud i bundvandet (Figur 4.69). I perioden 1990-99 er der i gennemsnit 24 dage med potentiel mulighed for svovlbrinteudslip, og dette gennemsnit stiger til 64 dage, når iltforholdene i bundvandet forværres i sommerperioden. Det er især i sommer- og efterårsperioden, at der optræder potentielt flere dage med H_2S -udslip, men effekten af de dårlige iltforhold i sensommeren kan visse år strække sig helt ind i vinterperioden og det efterfølgende forår.



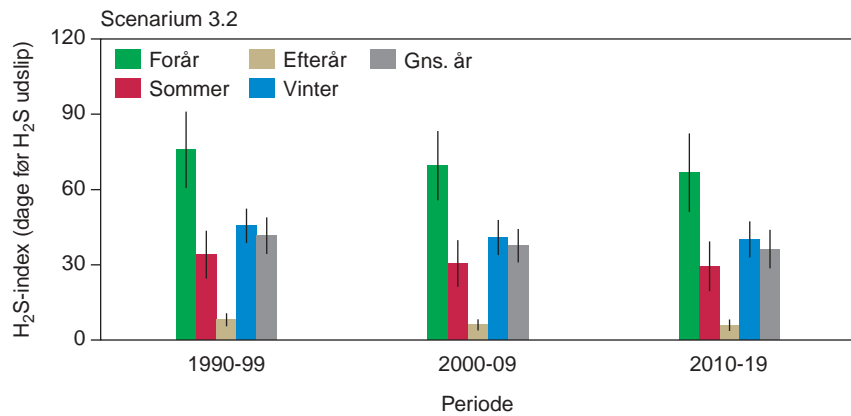
Figur 4.69. Scenarium 3.2. Det potentielle H₂S-udslip, dvs. antallet af dage, hvor H₂S-fronten ligger < 1 mm fra sedimentoverfladen fordelt på årstiderne, hhv. forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10) og vinter (1.11–14.2; det flg. år). Århus Bugt 1990-2019. Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.20) og fra 2000 og fremefter er O₂-indholdet i bundvandet reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7–15.9.

4.3.2.6 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

Havbundens iltningsreserve eller svovlbrintebufferkapacitet falder omkring 12,5%, i forbindelse med, at iltforholdene ved havbunden forværres (Figur 4.70), eller udtrykt i andre tal nedsættes sedimentets evne til at tilbageholde H₂S på årsbasis fra 42 dage i gennemsnit til 36 dage i tidsrummet 2000-2019 (Figur 4.71). Det er nedgangen i havbundens oxiderede jernpulje, der er skyld i, at iltningsreserven falder, ligesom reduktionen af jernpuljen resulterer i en frigivelse af PO₄³⁻ til bundvandet (se ovenfor). I efterårsperioden, hvor H₂S-indexet normalt ligger på ca. 8 dage, reduceres indexet yderligere med 2 dage pga. de forværede iltforhold ved bunden, og derved når sedimentets evne til at modstå et eventuelt svovlbrinteudslip ned under en uge.



Figur 4.70. Scenarium 3.2. Iltningsreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Århus Bugt når O₂-indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7–15.9. Iltningsreservens størrelse før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.21. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Figur 4.71. Scenarium 3.2. H₂S-indexet, dvs. antallet af dage, havbunden er i stand til at tilbageholde produktionen af H₂S og dermed hindrer H₂S udslip (se også definitionen af indexet i afsnit 3.2.6). Perioden 1990-99 svarer til referencescenariet (se Figur 3.22) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 er O₂-indholdet i bundvandet reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7–15.9. H₂S-indexet er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler ± σ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

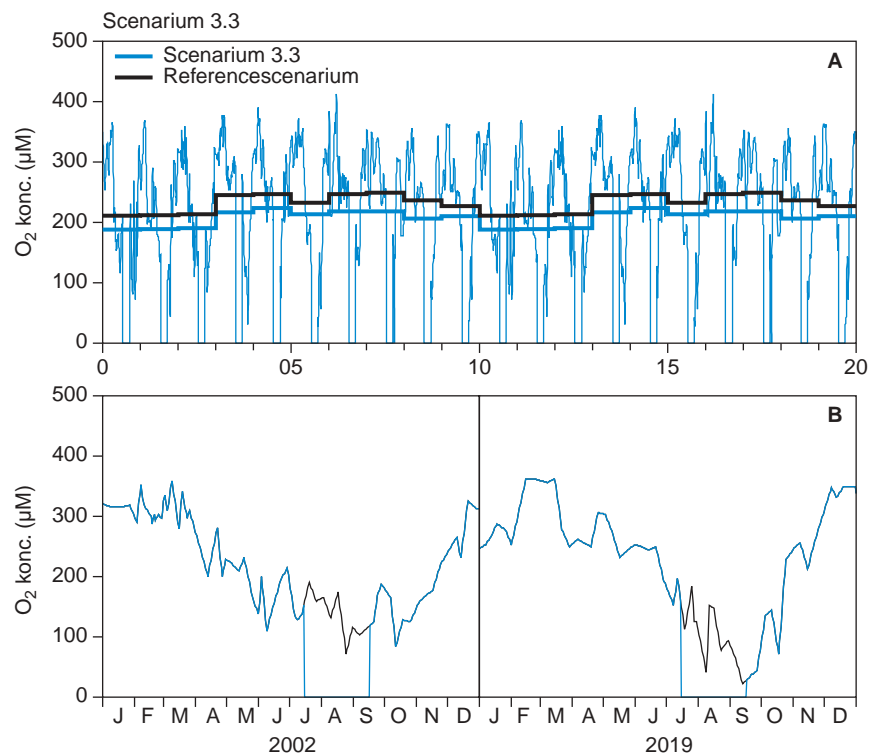
4.3.3 Scenarium 3.3 – Totalt iltsvind ved bunden i perioden 15.7-15.9. hvert år efter 1999

Resume: I dette scenarium optræder der totalt iltsvind ved bunden i sensommeren (15.7–15.9), hvilket påvirker bioaktiviteten, dvs. bioturbationen og bioirrigationen, så voldsomt, at effekten strækker sig langt ind i det efterfølgende år. De årligt tilbagevendende iltsvind betyder også, at bunddyrene aldrig når at rekolonisere og vokse op, før det næste iltsvind igen nedsætter bioaktiviteten. Ilt- og svovlbrintefronten flytter derfor så tæt op mod sedimentoverfladen, at der i en stor del af året er risiko for H₂S-udslip til bundvandet – primært i sensommeren. På denne tid af året når H₂S-indexet ned under 2 dage, dvs. det antal dage der forventes at gå, før H₂S slipper ud af bunden og op i vandet. Produktionen af H₂S er særlig stor i sensommeren, fordi det totale iltsvind medfører, at al den organiske stofomsætning foregår anaerobt – primært ved sulfatreduktion. Derfor stiger havbundens indhold af reducerede forbindelser i sommerperioden, og den nedsatte bioaktivitet medfører, at en stor del af de reducerede forbindelser i havbunden aldrig når op til sedimentoverfladen, men i stedet for bliver begravet permanent i havbunden. Set over en længere periode fører det til et fald i havbundens årlige iltoptagelse. De reducerede forbindelser, der trods den nedsatte bioaktivitet alligevel bliver ført op til sedimentoverfladen, giver anledning til en markant O₂-optagelse i havbunden i samme øjeblik, der optræder O₂ i bundvandet. På grund af koblingen mellem nitrifikation og denitrifikation er begge processer meget påvirkede af iltsvindet i sensommeren, hvor der sædvanligvis ikke er NO₃⁻ i vandet. De hyppige iltsvind påvirker derfor kvælstofkredsløbet på en sådan måde, at nitrifikationen går i stå i samme øjeblik, at ilten forsvinder fra bundvandet. Derfor stiger NH₄⁺-frigivelsen fra havbunden i sensommeren, og samtidig standser denitrifikationen, fordi der ikke længere produceres NO₃⁻ i bunden. Så snart der igen optræder O₂ i bundvandet, begynder produktionen af NO₃⁻ i havbunden, og denitrifikationen starter igen. Også PO₄³⁻-frigivelsen fra bunden øges i forbindelse med sensommerens totale iltsvind.

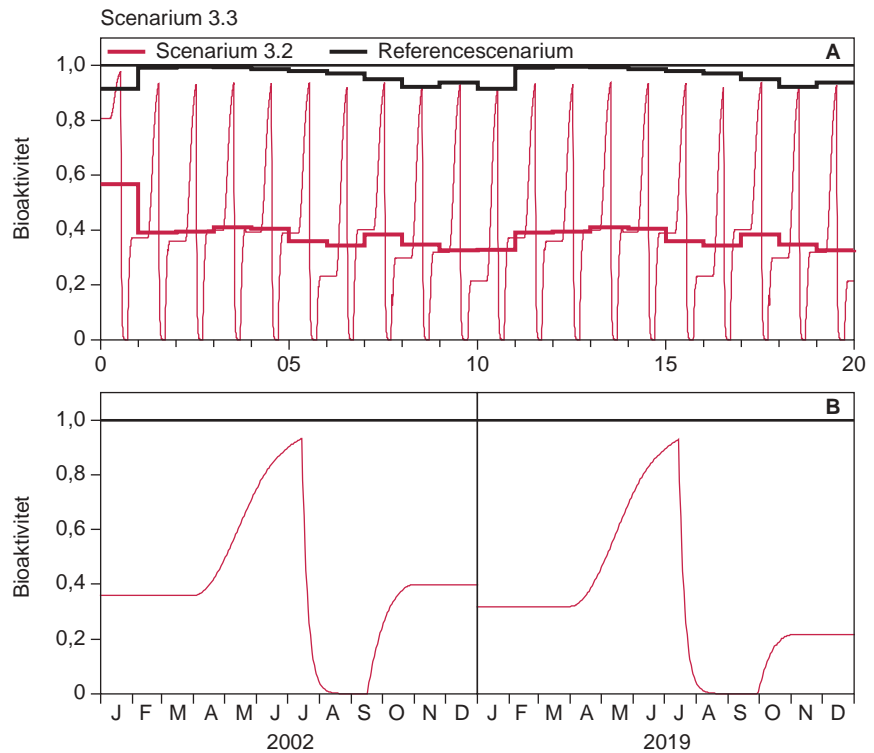
Det skyldes den stigende H_2S -produktion, der reducerer havbundens pulje af oxideret jern og dermed frigør det jernbundne fosfat, så det optræder frit i havbunden. Den stigende PO_4^{3-} -koncentration i havbunden fører derfor til, at PO_4^{3-} -fluxen ud af bunden nærmest fordobles i sensommeren.

4.3.3.0 Input til Scenarium 3.3

I dette scenarium optræder der totalt iltsvind ved havbunden i perioden 15.7-15.9, dvs. iltkoncentrationen er 0 μM i denne periode (Figur 4.72). Det totale iltsvind i bundvandet i sommermånederne påvirker de bioturberende og bioirrigerende dyr voldsomt, og bioaktiviteten falder i gennemsnit med mere end 60% i forhold til referencescenariet målt over en 20-årig periode (Figur 4.73). Effekten af iltsvindet rækker langt inde i vinterperioden og det efterfølgende forår, og dyrene når slet ikke at formere sig og vokse op i tilstrækkeligt omfang til at bringe bioaktiviteten op til det "normale niveau", som kendetegner referencescenariet, før et nyt dræbende iltsvind sætter ind det efterfølgende år. De årligt tilbagevendende iltsvind får derfor en langt mere dramatisk effekt for nedbrydningsprocesserne i havbunden, end det sås i det foregående scenarium (3.2).



Figur 4.72. Scenarium 3.3. A: Iltkoncentrationen i bundvandet, Århus Bugt (1.1. 2000–31.12.19) for hhv. referencescenariet og Scenarium 3.1, hvor der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019), der viser dag til dag variationen for hhv. Scenarium 3.1 og referencescenariet. Bemærk at iltindholdet i Scenarium 3.3 kun afviger fra referencescenariet i perioden 15.7–15.9.

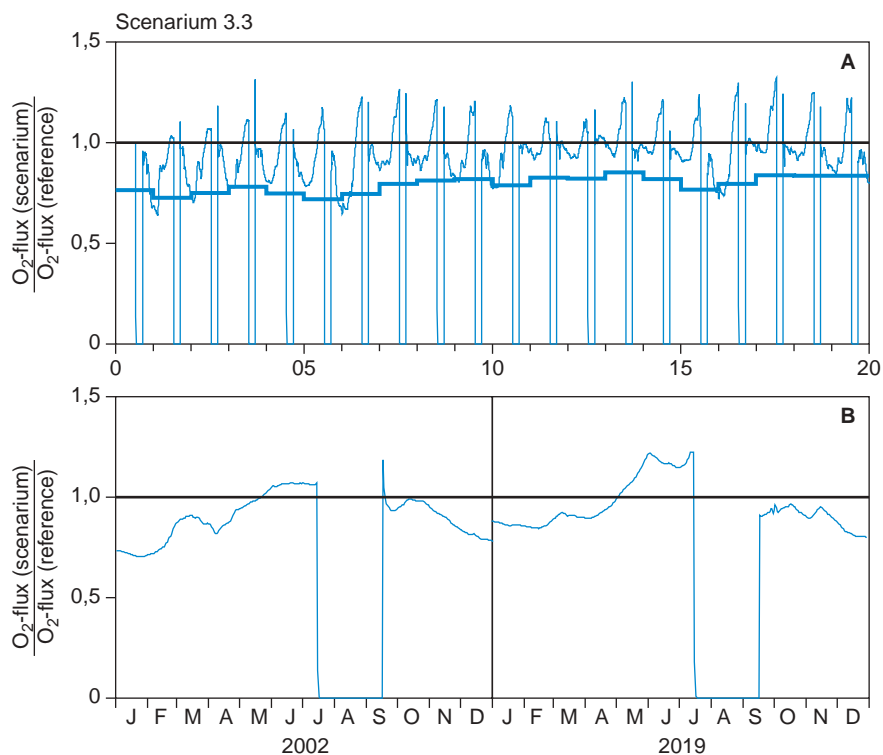


Figur 4.73. Scenarium 3.3. Bioaktiviteten i Århus Bugt (2000-19) når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7-15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 3.3. og referencescenariet.

4.3.3.1 Fluxen af ilt og kuldioxid

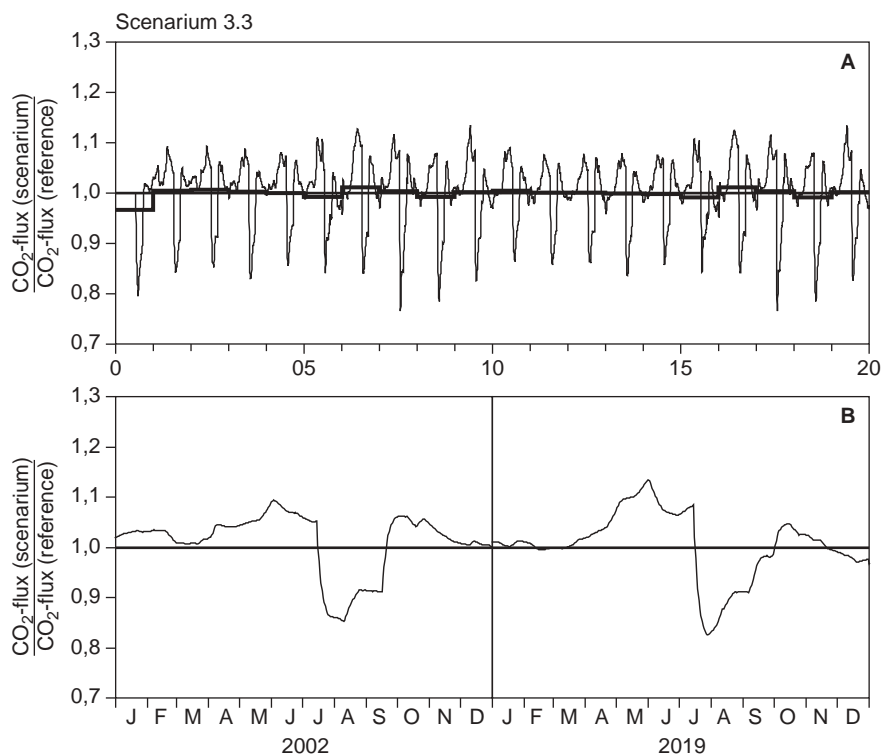
I den periode, hvor der ikke er ilt i bundvandet, optager havbunden selvsagt ikke ilt (Figur 4.74). Det betyder med andre ord, at al stofnedbrydning i perioden 15.7-15.9 foregår ved anaerob respiration. I samme periode stiger sedimentets indhold af reducerede affaldsstoffer, hvilket kan give anledning til en markant stigning i iltforbruget i samme øjeblik, hvor der igen kommer ilt i bundvandet. Den nedsatte bioaktivitet, som er en effekt af de dårlige iltforhold ved bunden, betyder også, at havbunden hverken bliver særlig godt bioturberet eller bioirriteret. Derfor stiger indholdet af iltforbrugende stoffer i sedimentet, og først i takt med, at bioaktiviteten stiger i foråret og forsommeren, kommer de reducerede forbindelser op i havbundens iltholdige zone med et forøget iltforbrug til følge, som det tydeligt ses fx. i 2019 (Figur 4.74B). Samlet set medfører de totale iltsvind juli-september og eftervirkningerne deraf en nedgang i det årlige O_2 -optag på 20% beregnet ud fra gennemsnittet af årsmiddelværdien.

Figur 4.74. Scenarium 3.3. A: O₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.8) når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7-15.9 (se Figur 3.8). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



Fluxen af CO₂ ændrer sig derimod ikke på årsbasis målt over en 20-årig periode, selvom der ses en betydelig dag til dag variation (Figur 4.75), som det er forklaret i afsnit 4.3.1.1. Altså omsættes der i Scenarium 3.3 ligeså meget organisk stof i havbunden som i referencescenariet, også selvom der optræder lange perioder med totalt iltsvind i bundvandet. En større del af det organiske kulstof nedbrydes blot gennem anaerobe processer. Da det årlige iltforbrug falder de anførte 20%, betyder det med andre ord, at en del af de dannede affaldsprodukter ikke bliver oxideret og derfor begravnes i havbunden.

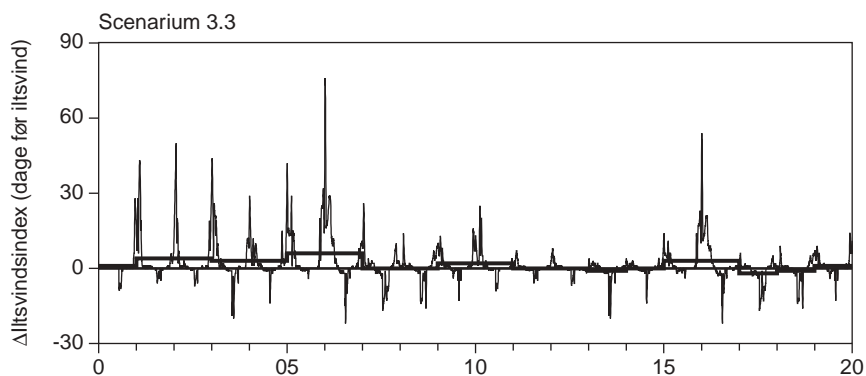
Figur 4.75. Scenarium 3.3. A: CO₂-fluxændringen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.10) når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7-15.9 (se Figur 3.8). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



De totale iltsvind i juni-september nedsætter bioaktiviteten, og i takt med at bioaktivitet falder, bliver mindre CO₂ bragt op i bundvandet ved bioturbation og bioirrigation. Når bioaktiviteten helt ophører (se Figur 4.73), bevæger CO₂ sig kun op mod sedimentoverfladen og ud i bundvandet ved diffusion, som er en meget langsom transport set i forhold til bioturbation og bioirrigation. I perioder, hvor bioaktiviteten ophører, kan CO₂-fluxen falde med op til 25%, da det kun er det CO₂, der dannes i de allerøverste få millimeter af sedimentet, der giver anledning til en øjeblikkelig CO₂-flux ud af havbunden. I den del af havbunden, hvor bioaktiviteten er ophørt, stiger koncentrationen af CO₂ derimod. Koncentrationsstigningen giver godt nok anledning til en forøget transport af CO₂ op mod sedimentoverfladen, men da transporten udelukkende foregår ved diffusion, tager det en rum tid, inden det dannede CO₂ når ud i bundvandet. Så snart der igen kommer ilt i bundvandet, og i takt med at de bioaktive dyr vokser op og formerer sig, øges bioaktiviteten. På den måde bliver mere CO₂ bragt op til sedimentoverfladen, hvilket resulterer i en forøget CO₂-flux.

4.3.3.2 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

Sedimentets 20% lavere iltforbrug påvirker kun iltsvindsindexet marginalt. På årsbasis forbedres indexet med ca. 4 dage (Figur 4.76). Det kommer især til udtryk i vinter- og forårsperioden, hvor indexet i gennemsnit forbedres med hhv. 5 og 2 dage, men det får ingen praktisk betydning, da indexet på denne tid af året alligevel er højt (>30 dage, se Figur 3.12). Værre er det, at indexet i sommer- og efterårsperioden går tilbage med hhv. 2 dage og 1 dag, fordi indexet på denne årstid allerede er meget lavt, hhv. 11 og 3 dage.

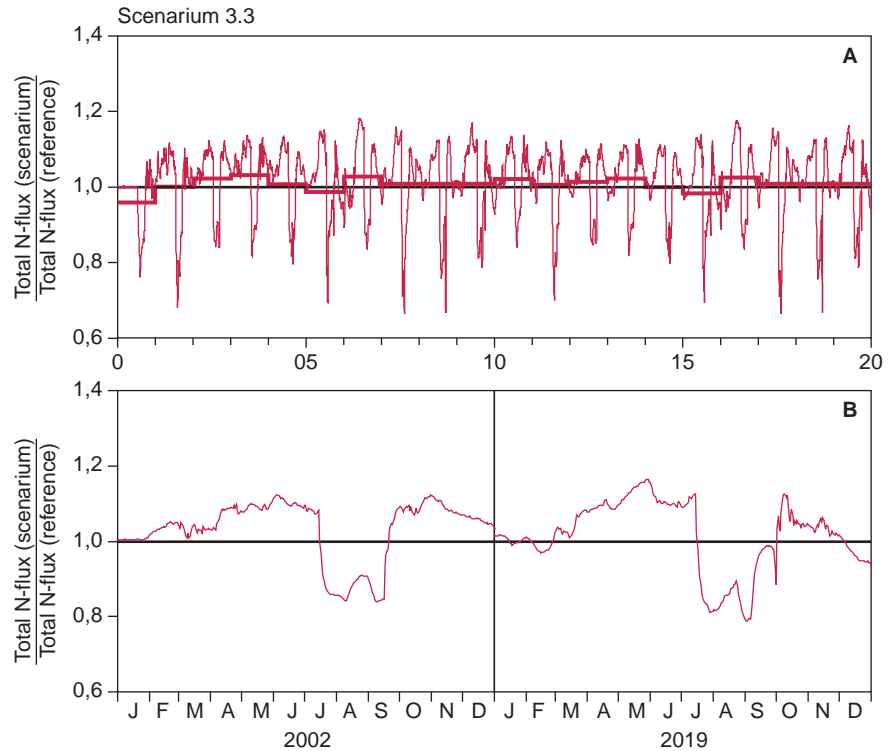


Figur 4.76. Scenarium 3.3. Den absolutte ændring af iltsvindsindexet (ΔI_{O_2}) i Århus Bugt (2000-19) når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7-15.9, hvor $\Delta I_{O_2} = I_{O_2(\text{scenarium})} - I_{O_2(\text{reference})}$, (se definition af I_{O_2} i afsnit 3.2.2). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Referencescenariet ses på Figur 3.12.

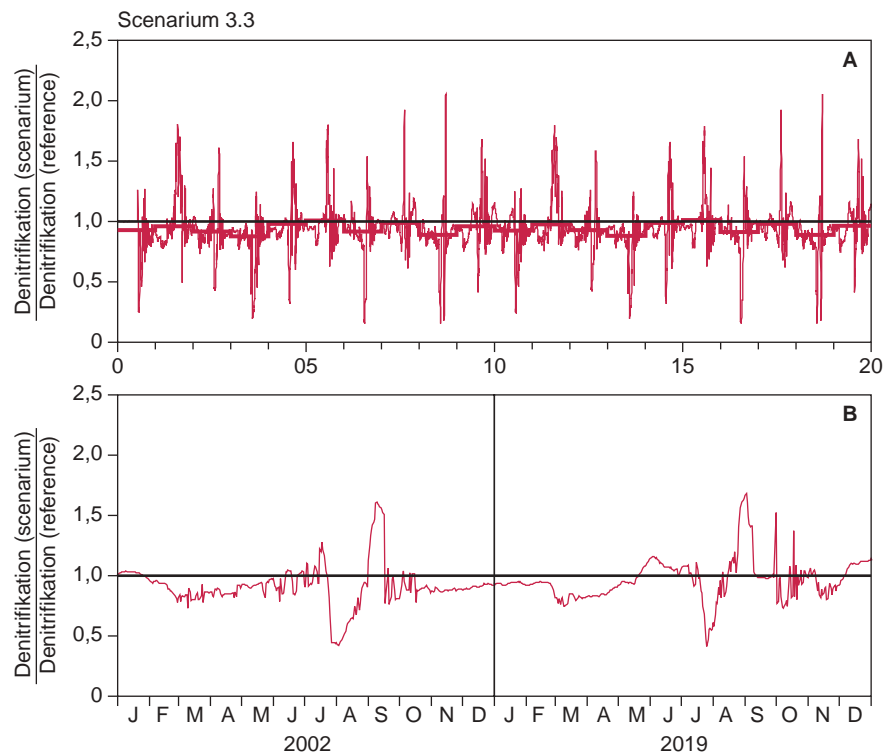
4.3.3.3 Kvælstofflux, denitrifikation og nitrifikation

Den totale årlige kvælstofflux ændrer sig ikke signifikant set over en 20-årig periode på trods af, at der optræder totalt iltsvind i sommerperioden, og bioaktiviteten dermed er voldsomt reduceret (Figur 4.77). Det samme kan siges om denitrifikationen (Figur 4.78). Betragter man derimod dag til dag variationen i kvælstoffluxen og denitrifikationen, optræder der betydeligt forskelle ift. referencescenariet (Figur 4.77B og Figur 4.78B).

Figur 4.77. Scenarium 3.3. Den totale kvælstoffluxændringen i Århus Bugt (2000-19) når O₂-indholdet i bundvandet er reduceret til 50% af referencescenariet i tidsrummet 15.7-15.9 relativt til referencescenariet. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



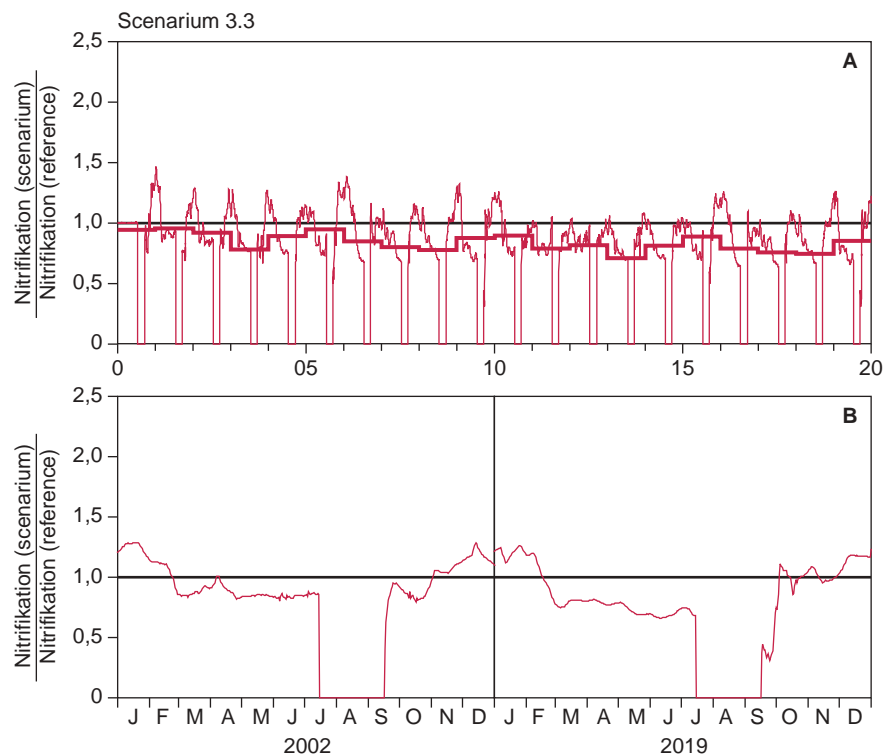
Figur 4.78. Scenarium 3.3. A: Denitrifikationen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.16) når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7-15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



På samme måde som bioaktiviteten påvirker udvekslingen af CO₂ mellem havbunden og bundvandet, påvirkes også alle andre kemiske forbindelse i havbunden. Det er derfor især pga. af variationen i bioaktiviteten, at kvælstoffluxen ændrer sig over året, og variationen i den totale kvælstofflux stemmer da også >90% overens med variationen i CO₂-fluxen (se Figur 4.75).

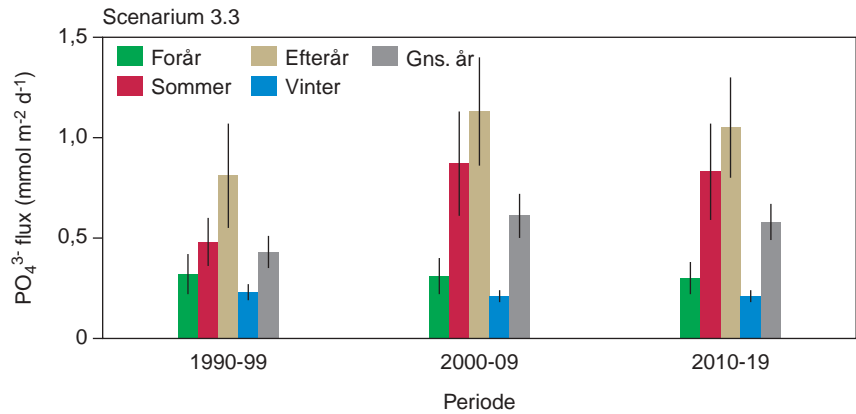
Ændringen i denitrifikationen ved totalt iltsvind i bundvandet minder meget om de ændringer, der optræder i Scenarium 3.2, hvor iltindholdet i bundvandet blev reduceret med 50% i perioden 15.7-15.9 (se Figur 4.63). Ligheden skyldes naturligvis, at denitrifikationen er tæt koblet til nitrifikationsprocessen, og denne proces afhænger af, at der er ilt i havbunden til at oxidere NH_4^+ til NO_3^- . Denne afhængighed er allerede beskrevet i forbindelse med Scenarium 3.2 og vil derfor ikke bliver yderligere diskuteret her. Bioaktiviteten påvirker også den koblede nitrifikation-denitrifikation. Efter de totale iltsvind, hvor bioturbationen og bioirrigationen helt ophører, stiger NH_4^+ -koncentrationen i havbunden. Når bundvandet så igen tilføres ilt, og bunddyrene igen bliver aktive, bliver der bragt mere NH_4^+ op i det iltholdige sediment, og på den måde bliver nitrifikationen og dermed denitrifikationen stimuleret (Figur 4.79).

Figur 4.79. Scenarium 3.3. A: Nitrifikationen i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7-15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



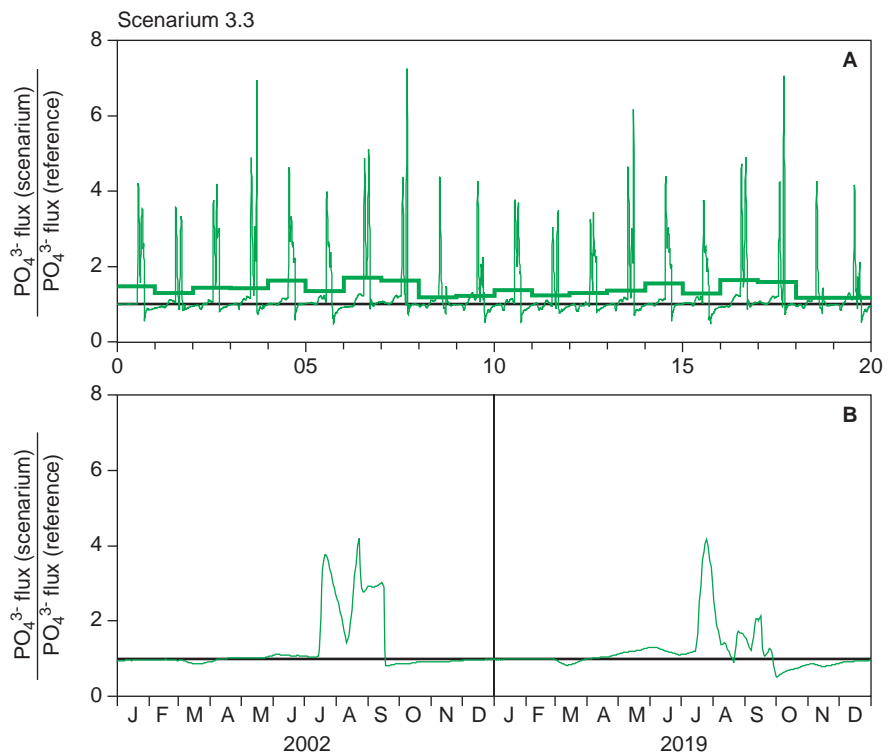
4.3.3.4 Fosfatflux og fosfatpuljer

Fosforafgivelsen fra havbunden stiger med 43% i perioden 2000-09, men falder herefter igen en smule. Set over perioden 2000-2019 stiger fosforfrigivelsen i gennemsnit fra $0,43 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ til $0,59 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figur 4.80 og Figur 4.81). Ligesom i Scenarium 3.2 begrænser fosforfrigivelsen sig til perioden 15.7-15.9, hvor fosforfluxen til gengæld i gennemsnit stiger med op til 90%. Det hænger naturligvis sammen med, at det er i denne periode, at der er totalt iltsvind ved bunden. Om vinteren og i foråret er fosforfrigivelsen praktisk taget uforandret sammenlignet med referencescenariet.

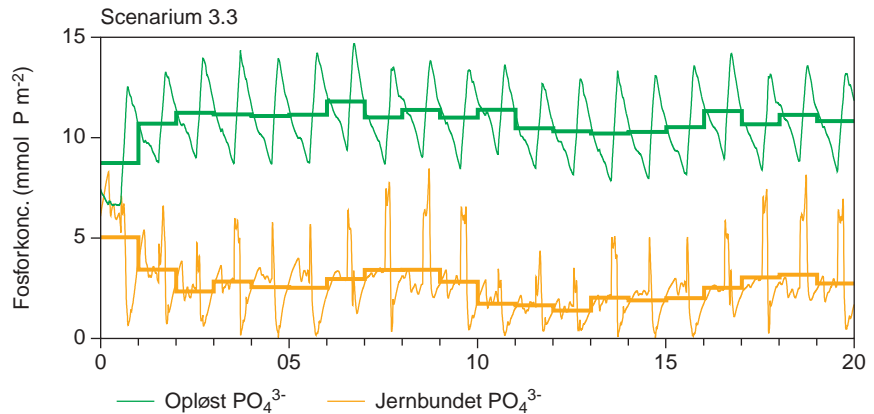


Figur 4.80. Scenarium 3.3. PO₄³⁻-fluxen i Århus Bugt (1990-2019). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.17) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 er der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9. PO₄³⁻-fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler ± σ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

Figur 4.81. Scenarium 3.3. A: Den totale PO₄³⁻-flux i Århus Bugt (2000-19) relativt til referencescenariet (se Figur 3.17) når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. B: To "tilfældigt" valgte år (2002 og 2019) der viser dag til dag variationen.



De iltfrie forhold ved bunden medfører som omtalt ovenfor, at en større del af den organiske stofomsætning foregår anaerobt. Sulfatreduktionen kommer på den måde til at dominere nedbrydningsprocessen, og H₂S-produktionen stiger. Med den stigende H₂S-koncentration i sedimentet bliver den oxiderede jernpulje reduceret, og i den forbindelse bliver der frigjort PO₄³⁻ til porevandet. Med andre ord stiger PO₄³⁻ i porevandet, mens puljen af jernbundet fosfat falder (Figur 4.82).

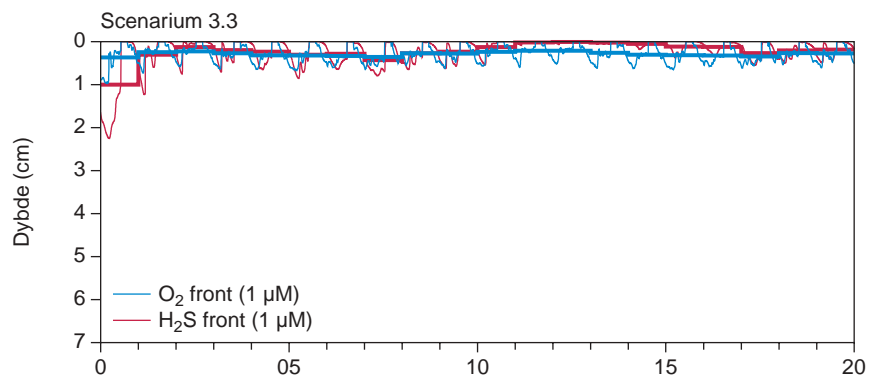


Figur 4.82. Scenarium 3.3. Udviklingen af hhv. opløst PO_4^{3-} i porevandet og letopløseligt jernbundet PO_4^{3-} i de øverste 20 cm af havbunden i Århus Bugt (2000-19) når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9. Variationen i puljerne før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.18. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Den forøgede flux af PO_4^{3-} ud af havbunden i sommermånederne skyldes, at der bliver reduceret mere fosfatbundet jern, end der bliver opløst PO_4^{3-} i porevandet, og det er dette PO_4^{3-} -overskud, der altså bliver tilført bundvandet.

4.3.3.5 Ilt- og svovlbrintefronten

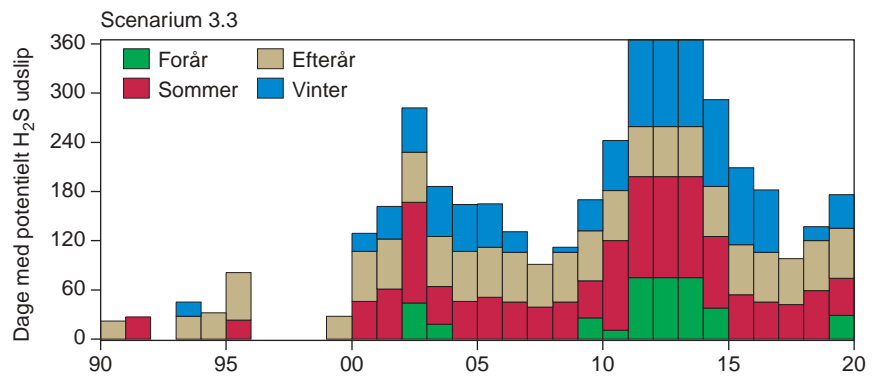
De tilbagevendende totale iltsvind ved havbunden kombineret med den lave bioaktivitet betyder, at ilt- og svovlbrintefronten flytter sig tættere op mod sedimentoverfladen (Figur 4.83). Ilt når i gennemsnit kun 0,28 cm ned i havbunden i perioden 2000-2019, og H_2S når i flere tilfælde helt op til sedimentoverfladen, hvilket ses af den gennemsnitlige dybde for svovlbrintefronten på 0,19 cm.



Figur 4.83. Scenarium 3.3. O_2 - og H_2S frontens placering ($1 \mu\text{M}$ isopleten) i bunden af Århus Bugt når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9. Fronternes placering før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.19. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Den tætte kontakt, H_2S har med sedimentoverfladen, ses også af, at antallet af dage med potentiel mulighed for H_2S -udslip er meget høj, når der hver sommer efter år 2000 optræder totalt iltsvind ved bunden (Figur 4.84).

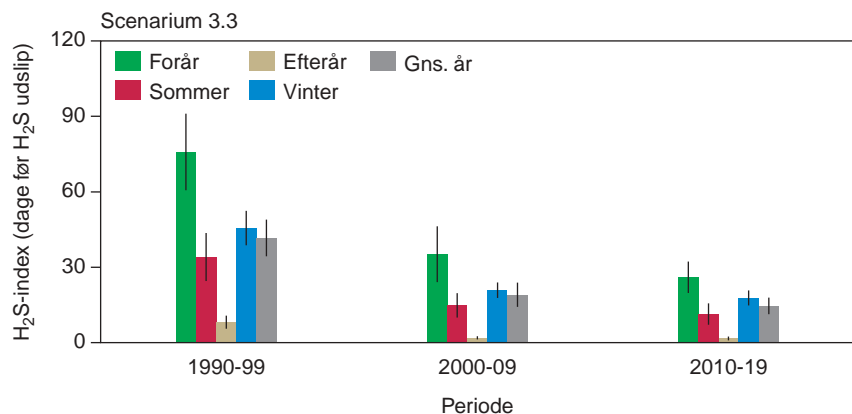
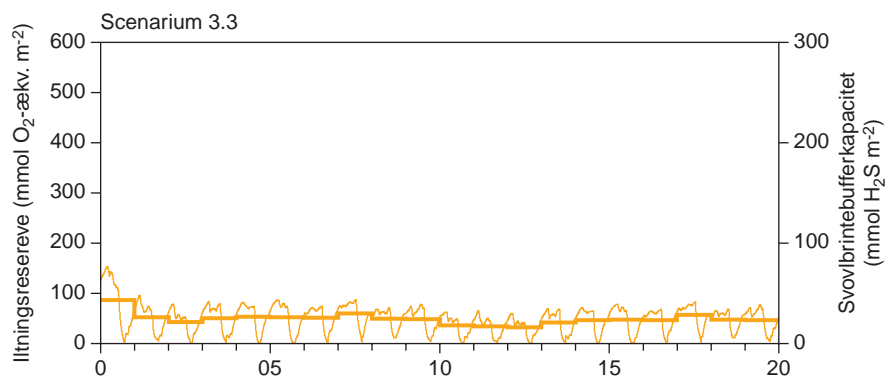
Figur 4.84. Scenarium 3.3. Det potentielle H_2S -udslip, dvs. antallet af dage, hvor H_2S -fronten ligger <1 mm fra sedimentoverfladen fordelt på årstiderne, hhv. forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10) og vinter (1.11–14.2; det flg. år). Århus Bugt 1990-2019. Perioden 1990-99 svarer til referencescenariet (se Figur 3.20), og fra 2000 og fremefter er der intet ilt i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9.



4.3.3.6 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

Havbundens iltningreserve eller svovlbrintebufferkapacitet falder i gennemsnit 60% i tiden efter, at det totale iltsvind i bundvandet bliver en tilbagevendende begivenhed (Figur 4.85). Den reducerede iltningreserve betyder også, at sedimentet bliver dårligere til at holde på produktionen af H_2S , hvilket ses af, at H_2S -indexet på årsbasis falder med omkring 26 dage fra 42 dage i perioden 1990-99 til i gennemsnit 16 dage i tidsrummet 2010-2019 (Figur 4.86). Det er nedgangen i den oxiderede jernpulje, som er skyld i den faldende svovlbrintebufferkapacitet, som er så katastrofal lav, at H_2S -indenxet når ned under 2 dage netop i den periode, hvor der optræder totalt iltsvind ved bunden.

Figur 4.85. Scenarium 3.3. Iltningreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Århus Bugt når der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9. Iltningreservens størrelse før 2000, dvs. referencescenariet, ses på Figur 3.21. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Figur 4.86. Scenarium 3.3. H_2S -indexet, dvs. antallet af dage, havbunden er i stand til at tilbageholde produktionen af H_2S og dermed hindrer H_2S udslip (se også definitionen af indexet i afsnit 3.2.6). Perioden 1990-99 svarer til reference scenariet (se Figur 3.22) og i perioderne 2000-09 og 2010-19 er der intet ilt er i bundvandet i tidsrummet 15.7–15.9. H_2S -indexet er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året.

[Tom side]

5 Referencescenarium – Mariager Fjord 1992-1996

I dette kapitel vil ilt- og næringsstoffluxmodellen blive gennemregnet ved brug af overvågningsdata fra Mariager Fjord for perioden 1.1.92-31.12.96. Modellens inputdata (dvs. overvågningsdata) og resultatet af modelberegningerne kalder vi et *referencescenarium*, da dette scenarium gengiver en referencetilstand for Mariager Fjord eller en normal tilstand, om man vil. Det er dog først nødvendigt at tilpasse ilt- og næringsstoffluxmodellen fra Århus Bugt, så den kan anvendes i Mariager Fjord, men det kommer vi nærmere ind på nedenfor.

Nordjyllands Amt og Århus Amt har et stort lokalkendskab til miljøforholdene i Mariager Fjord, og i samarbejde med dem har vi valgt perioden 1992-96 til at være repræsentativ for de fysiske, kemiske og biologiske forhold i fjorden. I modsætning til Århus Bugt, hvor den repræsentative periode strakte sig over 10 år – fra 1990-99 – er den repræsentative periode i Mariager Fjord altså kun på 5 år. Vi har bevidst valgt, at perioden kun skal strække sig frem til den 31.12.96, da Mariager Fjord som bekendt "afgik ved døden" i 1997 mellem den 23. og 25. august. Med andre ord kan 1997 ikke regnes med til den repræsentative periode for Mariager Fjord, og det kan årene, der fulgte efter, for den sags skyld heller ikke. Da det samtidig ikke har været muligt at tilvejebringe tilstrækkeligt med repræsentative data for Mariager Fjord fra før 1990, var den længste repræsentative periode, vi kunne komme op på, 7 år, nemlig fra 1990-96. For overskuelighedens skyld har vi dog begrænset perioden til "blot" 5 år, fordi det har den umiddelbare fordel, at det er lettere at sammenligne scenarier, hvor perioderne gentager sig hvert femte år frem for hvert syvende.

Mariager Fjord er med sine 42 km den længste af de østjyske fjorde (Figur 5.1). Fjorden er en tærskelfjord med en dyb indre del og en lavvandet ydre del. I inderfjorden er vanddybden stor, op til ca. 30 m ud for Mariager, mens Yderfjorden er 0-2 m dyb, med en smal 7 m dyb sejlrende. En tredjedel af vandet i Mariager Fjord stammer fra oplandet, mens to tredjedele stammer fra Kattegat. Grundvandstilførslerne til vandløbene udgør en forholdsvis stor del, omkring 60%, af den samlede ferskvandstilførsel.

Figur 5.1. Mariager Fjord med 12-meter stationen, hvor ilt- og næringsstoffluxmodellen for fjorden er opstillet, og hvor der i 1999 og 2000 blev indsamlet data til at justere modellen (se tekst). Stationen er repræsentativ for den del af fjorden, hvor der optræder periodisk iltsvind ved bunden sommer og efterår.



5.1 Ilt- og næringsstoffluxmodellen fra Århus Bugt tilpasset Mariager Fjord

I kapitel 2 beskrev vi i detaljer, hvordan ilt- og næringsstoffluxmodellen blev bygget op for Århus Bugt. Med ganske små justeringer bruger vi nu den samme model til at beskrive processerne i bunden af Mariager Fjord. Af flere grunde har vi dog "været nødt til" at ændre på nogle få af de konstanter og variable, der blev brugt i Århus Bugt-modellen (se Tabel 2.2) for at kunne beskrive de observationer, vi gjorde i Mariager Fjord i 1999 og 2000 (se Scenarium97).

Vandindholdet i bunden af Mariager Fjord var betydeligt større end i bunden af Århus Bugt. Fjordbunden havde derfor en meget mere løs struktur end havbunden, og det påvirkede derfor bundens porøsitet (ϕ) og dermed de mange matematiske udtryk, hvor variabelen ϕ indgik (se Kapitel 2). Porøsiteten for Mariager Fjord blev bestemt ved at tilpasse det kurveforløb, der bedst beskrev de værdier, der blev målt i en-centimeter intervaller fra sedimentoverfladen og ned til ca. 12 cm og kunne udtrykkes ved: $\phi = 0,919 - 0,099x$, hvor x er dybden i cm ($R^2 = 0.93$; data ikke vist). Densiteten (dvs. vægtfylden, ρ_s) af det faste materiale som fjordbunden bestod af, var den samme som i Århus Bugt.

Det organiske materiale, der landede på bunden, er i modellen opdelt i tre puljer: organisk stof, der omsættes hurtigt (OM_f), stof der omsættes langsomt (OM_s), og organisk stof, der slet ikke omsættes (OM_n). I Århus Bugt fordelte det organiske stof sig på de tre puljer i forholdene 0,50:0,42:0,08. Med andre ord var halvdelen af det omsættelige organiske stof hurtigt nedbrudt (på under 20 timer), mens lidt under halvdelen, dvs. 42%, blev omsat langsomt. I forbindelse med tilpasningen af Mariager Fjord-modellen forsøgte vi først at lade de to organiske puljer OM_f og OM_s fordele sig som i Århus Bugt, dvs. 0,55:0,45. Resultatet blev, at OM_f -puljen førte til et alt for voldsomt O_2 -forbrug forstået på den måde, at iltforbruget i modellen langt oversteg de faktiske målinger, vi foretog i 1999 og 2000. Vi nedsatte derfor gradvis størrelsen på den hurtigt omsættelige organiske stofpulje, indtil det modellerede iltoptag var i overensstemmelse med det målte. Det skete først, da alt organisk stof var overført til den langsomme pulje, altså da $OM_f:OM_s$ var 0:1. Lidt bagklogt kan vi sige os selv, at selvfølgelig må det være sådan, hvilket vi forklarer på flg. måde:

Primærproduktionen i Århus Bugt (se Figur 3.3) og Mariager Fjord (5.2.2) var størrelsesmæssigt meget forskelligt, hhv. $40,6 \pm 2,6$ og $197,9 \pm 26,5$ mmol C m⁻² d⁻¹ beregnet som gennemsnittet af hhv. 10 og 5 års middelværdier. Derimod var forskellen langt mindre, når det drejede sig om mængden af organisk stof, der blev omsat i sedimentet de to steder, hvor der i gennemsnit blev omsat 25,6 og 13,8 mmol C m⁻² d⁻¹ i hhv. Århus Bugt og Mariager Fjord. Med andre ord landede der over en tiårs periode i gennemsnit ($25,6/40,6 \approx$) 63% på bunden af Århus Bugt, mens langt mindre af produktionen landede på bunden af Mariager Fjord, nemlig "kun" 7%. Det betyder altså, at omsætningen af organisk stof måtte være meget høj i fjordvandet, hvilket dels medførte et meget omfattende iltforbrug i vandsøjlen, dels at alt det let-

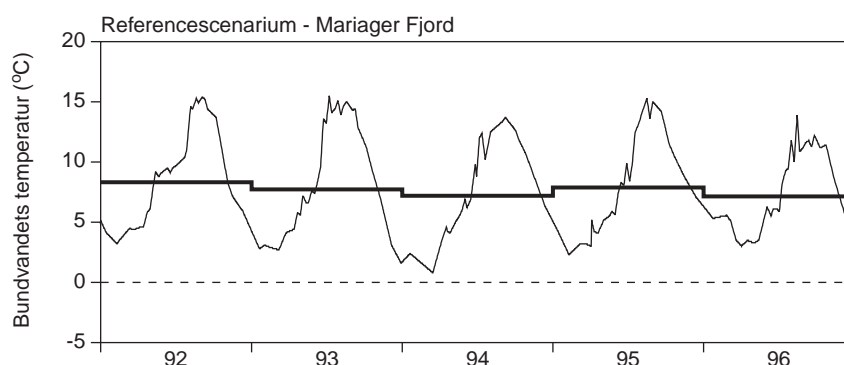
omsættelige organiske stof var omsat lang tid, før det nåede ned på bunden.

Puljen af uomsætteligt organisk stof (OM_n) blev ikke bestemt i Mariager Fjord, men da størrelsen af denne pulje ikke har betydning for de biogeokemiske processer i havbunden, kun for hvor meget organiske stof der så at sige forsvinder ud af systemet, har det ingen betydning for Mariager Fjord-modellen, om størrelsen af denne pulje gøres op eller ej.

5.2 Overvågningsdata fra Mariager Fjord 1992-97 – input til modellen

5.2.1 Temperatur

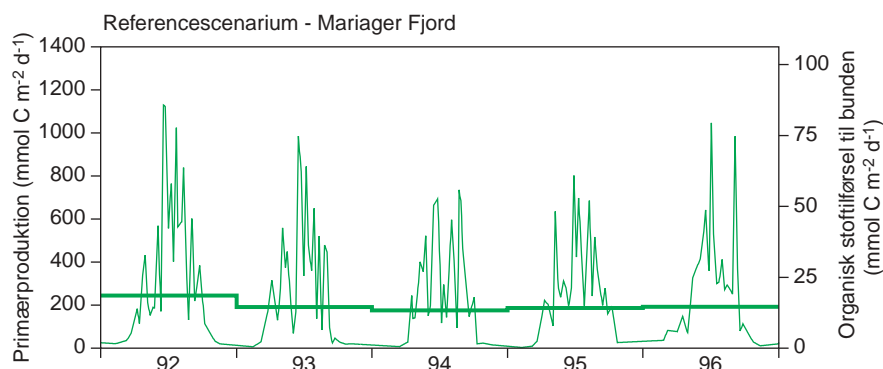
I 12 meters dybde, ved bunden af Mariager Fjord på Station 2, varierede temperaturen i perioden fra 1992-96 mellem 1°C og 14°C. De laveste temperaturer (1-3°C) blev målt fra december til marts, mens bundvandet var varmest i august-september måned – omkring 14°C (Figur 5.2).



Figur 5.2. Temperaturen i bundvandet, Mariager Fjord (1.1.92–31.12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

5.2.2 Primærproduktion i vandsøjlen og organisk stoftilførsel til havbunden

Primærproduktionen i Mariager Fjord er den højeste blandt Danmarks mange fjorde. I den femårige periode (1992-96) blev der i gennemsnit produceret $72 \pm 10 \text{ mol C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ svarende til $862 \text{ g C m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ eller $2,4 \text{ kg plankton m}^{-2} \text{ år}^{-1}$. Det svarer godt og vel til det årlige udbytte af en dyrket kornmark. Planktonproduktionen begyndte i det tidlige forår, sædvanligvis i april måned, og i løbet af sommerhalvåret optrådte der yderligere 5-7 meget markante perioder med algeopblomstringer, hvor de højeste rater nåede helt op til $1130 \text{ mmol C m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i perioden juni-august (Figur 5.3).

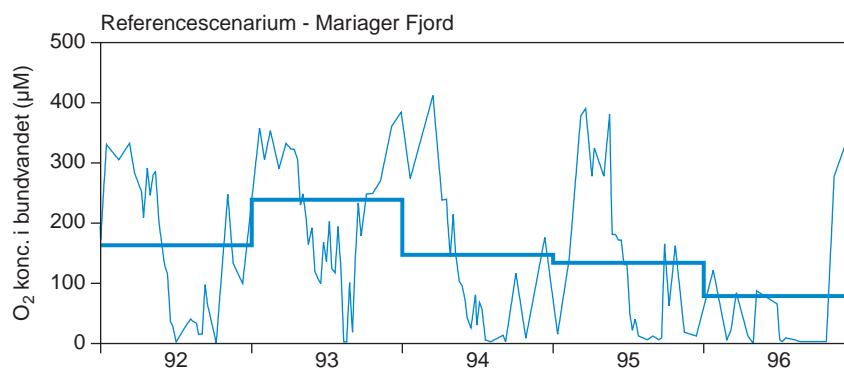


Figur 5.3. Primærproduktionen i Mariager Fjord (1.1.92-31.12.96). Den organiske stoftilførsel til bunden svarer til 7% af primærproduktionen (se Tabel 2.3) og viser i sedimentflux-modellen samme variation som primærproduktionen. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Ligesom det var tilfældet i Århus Bugt, eksisterer der heller ikke for Mariager Fjord oplysninger om, hvornår og hvor meget organisk stof der blev tilført fjordbunden fra 1992-96. Derimod blev CO_2 -produktionen i bunden af Mariager Fjord målt flere gange i løbet af 2000, og ud fra forholdet mellem CO_2 -produktion og primærproduktionen har vi beregnet, at omkring 6,6% af primærproduktionen blev omsat i fjordbunden i 2000. Under antagelse af at den organiske stoftransport til bunden i 2000 var repræsentativ for perioden 1.1.92-31.12..96, er stoftransporten til fjordbunden beregnet, som det er gennemgået i afsnit 2.9.2.

5.2.3 Ilt i bundvandet

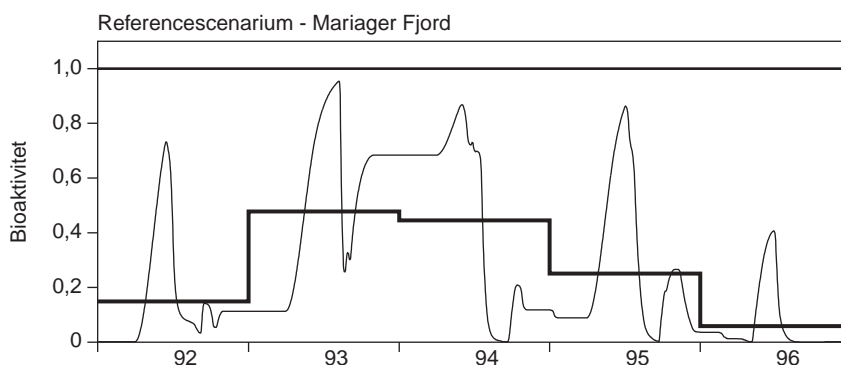
Set over den femårige referenceperiode var iltindholdet i Mariager Fjord lavt i bundvandet, når der sammenlignes med den tilsvarende periode i Århus Bugt (Figur 5.4 og Figur 3.4). I Mariager Fjord varierede iltindholdet markant fra nær luftmætning om foråret til ofte slet intet ilt ved bunden i efteråret, og hvor sensommer og efterår i mere end halvdelen af tiden var præget af iltsvind, dvs. i gennemsnit $< 125 \mu\text{M O}_2$ ($\approx 4 \text{ mg O}_2 \text{ liter}^{-1}$). Den længste iltsvindperiode strakte sig over et helt år fra 30.10.95 til 1.11.96, og på den måde kom 1996 til at markere sig som et særligt "iltfattigt" år, hvad iltforholdene i bundvandet angik.



Figur 5.4. Iltkoncentrationen i bundvandet, Mariager Fjord (1.1.92-31.12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

5.2.4 Bioaktivitet

De bundlevende dyrs grave- og irrigationsaktivitet kalder vi for bioaktiviteten (se 1.5), og i afsnit 2.2.2.1 beskrev vi, hvordan iltkoncentrationen i bundvandet påvirkede denne aktivitet. På de lavvandede områder af Mariager Fjord var der som netop vist ofte iltsvind ved bunden (Figur 5.4), så bioaktiviteten i Mariager Fjord var betydeligt lavere end i Århus Bugt (se fx. Figur 4.59). Den beregnede bioaktivitet var lavest i september måned, hvor aktiviteten flere år helt ophørte (Figur 5.5), men i takt med, at der kom mere ilt til bunden på de lavvandede områder, og at dyrene på og i fjordbunden igen blev aktive eller formerede sig i forårsperioden (se 2.2.2.1), steg bioaktiviteten. Den maksimale bioaktivitet optrådte derfor i sommermånederne umiddelbart før, tiltagende iltsvind i bundvandet førte til nedsat aktivitet eller endda slog en del af dyrene på bunden ihjel.

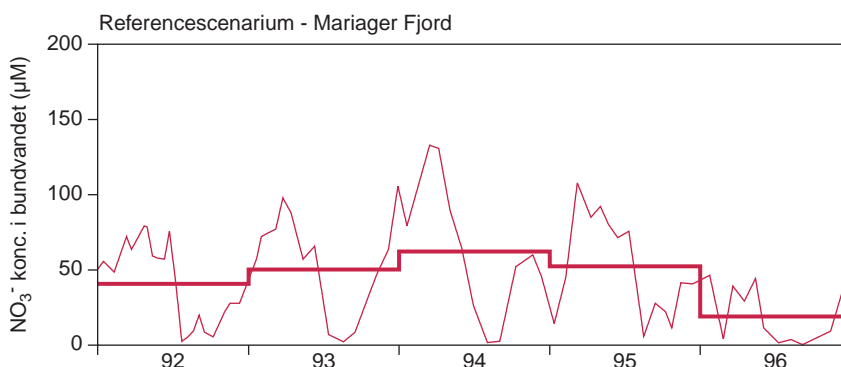


Figur 5.5. Bioaktiviteten i bunden af Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

5.2.5 Næringsalte (N og P)

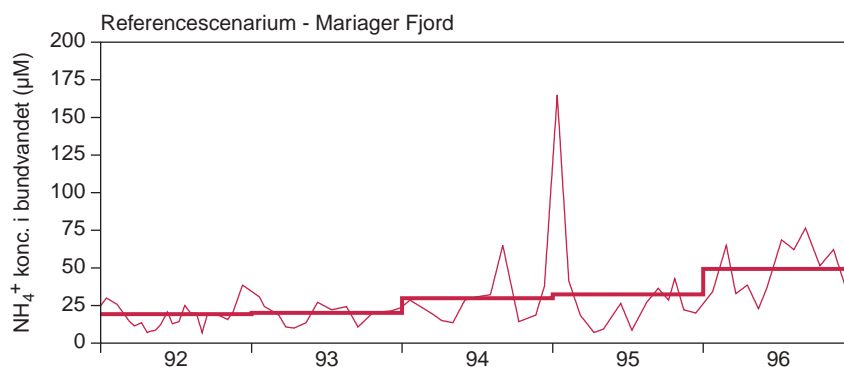
I Mariager Fjord var koncentrationen af næringsaltene nitrat, ammonium og fosfat i bundvandet meget høj, i hvert tilfælde når vi sammenligner med de tilsvarende år i Århus Bugt (Figur 3.5, 3.6 og 3.7).

Koncentrationen af NO_3^- var særlig høj i forårs månederne, hvor de højeste koncentrationer med værdier omkring $100 \mu\text{M NO}_3^-$ blev observeret i marts måned (Figur 5.6) umiddelbart før, forårsopblomstringen satte ind. Nitratkoncentrationen faldt derefter mere eller mindre stejlt for i august at nå den laveste koncentration på $1-5 \mu\text{M NO}_3^-$. Ligesom iltforsvælgelsen i fjorden i 1996 adskilte sig markant fra de øvrige år i perioden, var den gennemsnitlige NO_3^- -koncentration i 1996 på $19,1 \mu\text{M}$ og altså betydeligt lavere end gennemsnitsværdien på $51,5 \mu\text{M}$ for de foregående.



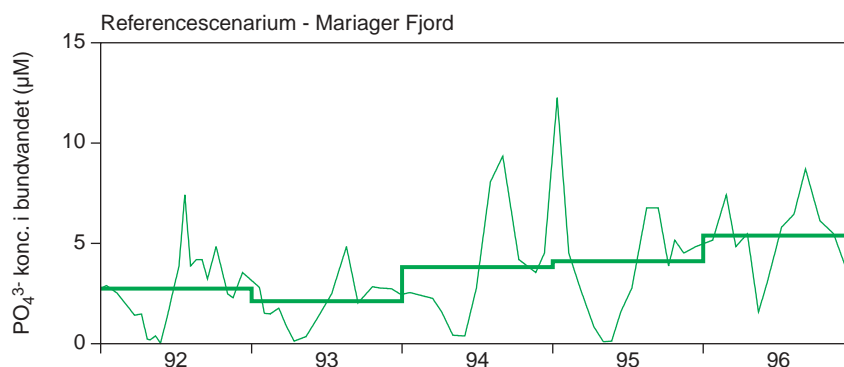
Figur 5.6. Nitratkoncentrationen i bundvandet, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Ammoniumkoncentrationen var generelt set højest i vintermånederne, hvor koncentrationen var omkring $30 \mu\text{M NH}_4^+$, når vi ser bort fra den meget høje NH_4^+ -koncentration i vinteren 94/95 (Figur 5.7). Hen over foråret faldt NH_4^+ -indholdet i bundvandet for så igen at stige i løbet af sommeren i forbindelse med perioder med iltsvind i bundvandet. Også hvad angår NH_4^+ , er der en iøjnefaldende forskel mellem 1996 og den foranliggende fireårige periode, idet NH_4^+ -koncentrationen i sommer og efteråret 1996 i gennemsnit lå betydeligt over "normalen", dvs. $55 \mu\text{M NH}_4^+$ i 96 vs. omkring $23 \mu\text{M NH}_4^+$ i perioden 1992-95.



Figur 5.7. Ammoniumkoncentrationen i bundvandet, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

Koncentrationen af PO_4^{3-} i bundvandet fulgte samme stigende og faldende tendens, som kendetegnede NH_4^+ -koncentrationen. I den forbindelse skal det dog bemærkes, at bundvandet sædvanligvis indeholdt mest PO_4^{3-} i august/september, hvor også iltsvindet i Mariager Fjord var mest intenst, mens det for NH_4^+ vedkommende var om vinteren, at koncentrationen var størst. Fosfatkoncentrationen var absolut lavest i maj måned ($< 1 \mu\text{M PO}_4^{3-}$) umiddelbart efter, at primærproduktionen havde toppet i foråret (Figur 5.8).



Figur 5.8. Fosfatkoncentrationen i bundvandet, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

5.3 Output fra modelkørslen i perioden 1992-1996

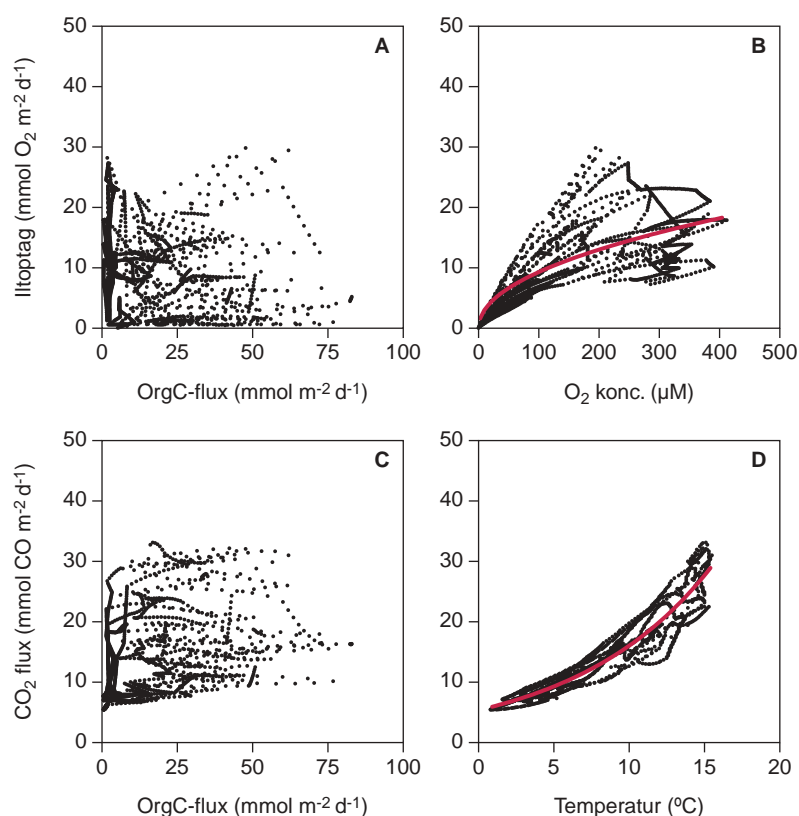
I Kapitel 5.2 og i Tabel 2.2 beskrev vi de input, som er nødvendige for, at Mariager Fjord-modellen kan beregne den lange række af data, som ikke blev målt i forbindelse med amternes overvågning af fjorden. Nedenfor præsenterer vi disse output, som både beskriver de biogeokemiske processer i fjordbunden i perioden 1992-96, og som

senere (i Kapitel 6) skal bruges til at sammenligne med de output, vi får, når modellen afvikles under forskellige handlingsscenerier (dvs. påtvungne miljøforandringer).

5.3.1 Fluxen af ilt- og kuldioxid

I Mariager Fjord havde iltkoncentrationen i bundvandet indflydelse på fjordbundens iltoptagelse (Figur 5.9B), ligesom det var tilfældet i Århus Bugt (Figur 3.8). Det samme kunne ikke siges om den organiske stof tilførsel til bunden (Figur 5.9A). Først og fremmest forklarer vi den manglende sammenhæng ved, at det kun var omkring 5% af det organiske stof, der nåede fjordbunden, der rent faktisk blev omsat ved respiration med ilt, mens det i Århus Bugt var mere end fem gange så meget, nemlig 27% (Tabel 5.1). Det har også stor betydning, at alt det stof, der nåede ned på bunden af Mariager Fjord, kun langsomt blev omsat (se Tabel 5.1), og derfor ikke med det samme resulterede i et øget iltforbrug, som det ville have været tilfældet, hvis det organiske stof ligesom i Århus Bugt var let omsætteligt.

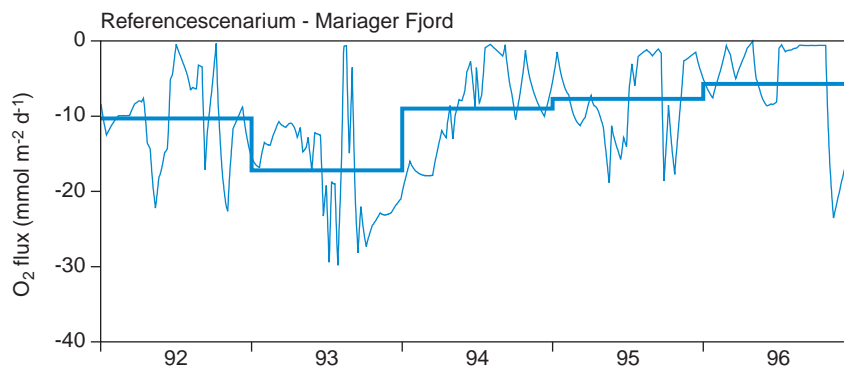
Figur 5.9. O₂-optaget i Mariager Fjord (modelleret) som funktion af hhv. den organiske stoftilførsel til bunden (A) og O₂-koncentrationen i bundvandet (B) samt den modellerede CO₂-flux som funktion af hhv. den organiske stoftilførsel til bunden (C) og temperaturen ved bunden (D). Regressionslinien er beregnet for perioden 1.1.92-31.12.96 med i alt 1825 dagsværdier.



Tabel 5.1. Omsætningen af organisk stof fordelt på de primære processer.

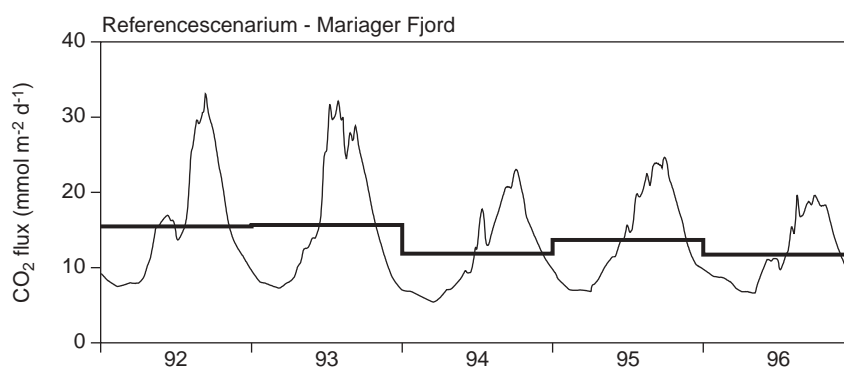
Åndingsmiddel	Mariager Fjord		Århus Bugt	
	mmol C m ⁻² d ⁻¹		mmol C m ⁻² d ⁻¹	
Ilt	0,7	(5,0%)	6,8	(26,6%)
Nitrat	1,4	(9,8%)	0,5	(1,9%)
Mangan	0,3	(2,0%)	1,2	(4,7%)
Jern	0,6	(4,0%)	7,0	(27,3%)
Sulfat	10,8	(79,2%)	10,1	(39,5%)
Total	13,8	(100,0%)	25,6	(100,0%)

Det, at den anaerobe stofomsætning dominerede i Mariager Fjord, betød, at der stort set året rundt blev dannet en betydelig mængde reducerede forbindelser i sedimentet, især H_2S . I de perioder, hvor der var ilt ved bunden, var det derfor især oxidationen af disse forbindelser, der styrede fjordbundens iltforbrug (Figur 5.10). Fra 1992 til 1996 udgjorde den bakterielle nedbrydning af organisk stof med ilt således kun mellem 3 og 11% af fjordbundens samlede iltoptag.



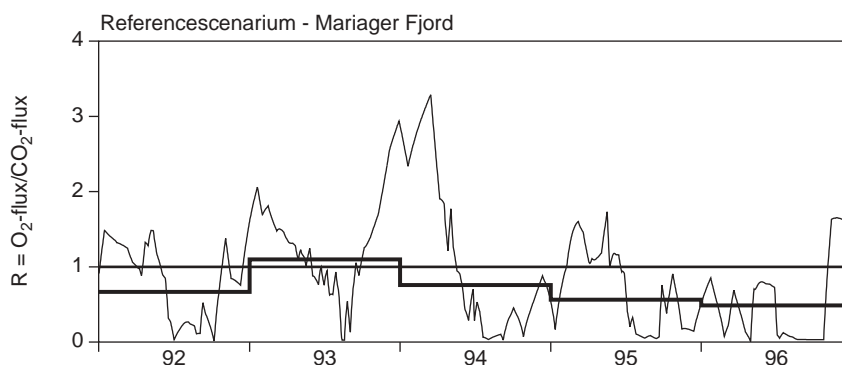
Figur 5.10. Den modellerede O_2 -flux, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Negative værdier svarer til iltoptagelse.

Ved nedbrydningen af organisk stof bliver der bl.a. dannet CO_2 , men i bunden af Mariager Fjord blev det organiske stof kun langsomt omsat. Derfor var der ingen umiddelbar sammenhæng mellem ændringer i CO_2 -fluxen og den organiske stoftilførsel til fjordbunden (Figur 5.9C). Dertil kommer, at den aerobe omsætning ikke havde særlig stor betydning for omsætningen og dermed CO_2 -produktionen i fjordbunden. Faktisk blev næsten 80% af det organiske stof omsat gennem sulfatreducerende bakterier (Tabel 5.1). Det betød med andre ord, at den allerstørste del af CO_2 -produktionen fandt sted ved sulfatreducerende bakterier, hvis aktivitet til gengæld er kendt for at vise en betydelig afhængighed af temperaturen i fjordbunden (Figur 5.9D). Da CO_2 -produktionen altså var stærkt påvirket af sulfatreduktionen, kan det derfor heller ikke undre, at CO_2 -fluxen fra fjordbunden viste samme variation som netop sulfatreduktionen og derfor også fulgte temperaturvariationen (Figur 5.11).



Figur 5.11. Den modellerede CO_2 -flux, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Positive værdier svarer til frigivelse af CO_2 fra fjordbunden.

Forholdet mellem ilt- og CO₂ fluxen ($R = O_2\text{flux}/CO_2\text{flux}$), viste, at det især var i vinterhalvåret, at fjordbundens iltforbrug oversteg CO₂-produktionen, hvis vi ellers ser bort fra vinteren 95/96 (Figur 5.12), men som en gennemsnitsbetragtning var $R < 1$. Over den femårige periode, som referencescenariet beskriver, blev fjordbundens reducerede forbindelser primært H₂S, FeS og FeS₂ altså ikke oxideret i tilstrækkelig grad til at opretholde en balance mellem CO₂-produktionen og iltoptaget. I gennemsnit oversteg den årlige CO₂-produktion iltforbruget med op til 85 % (i 1996). Vi konkluderer derfor, at der enten måtte ligge et meget stort lager af reducerede svovlforbindelser i bunden af Mariager Fjord, eller der måtte være et betydeligt udslip fra bunden af reducerede forbindelser som fx. H₂S, Fe²⁺ og Mn²⁺. I den femårige periode svarede overproduktionen af CO₂ til, at ca. 1/3 af alt det organiske stof, der nåede ned på bunden af Mariager Fjord ikke førte til et direkte iltoptag i fjordbunden, enten fordi de reducerede forbindelser fra omsætningen af det organiske stof blev begravet i bunden, eller fordi de simpelthen forsvandt op i vandsøjlen. Med andre ord blev der i fjordbunden produceret en meget stor mængde af iltforbrugende kemiske forbindelser, som enten slap ud i bundvandet og straks brugte løs af den ilt, der måtte være i vandet, eller som midlertidigt blev lagret i fjordbunden for blot at ligge og vente på at kunne bruge løs af ilt, i takt med at det igen blev tilført fjordbunden.



Figur 5.12. Det modellerede forhold (R) mellem O₂-fluxen og CO₂-fluxen, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. For $R = 1$ er O₂-fluxen og CO₂-fluxen i balance.

5.3.2 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

Det var de forringede iltforhold i bundvandet, der var skyld i, at de reducerede stoffer i fjordbunden ikke blev oxideret i tilstrækkelig grad. Den store koncentration af iltforbrugende stoffer førte derfor til et betydeligt iltoptag i samme øjeblik, der kom ilt til bunden (se Figur 5.10). Den tid vandsøjlen kan modstå iltsvind i den nederste meter, når det kun er fjordbundens iltoptag, der fjerner O₂ fra bundvandet og altså ikke også egenrespirationen, udtrykker vi ved iltsvindsindexet. I Mariager Fjord beregner vi iltsvindsindexet (i dage) ved

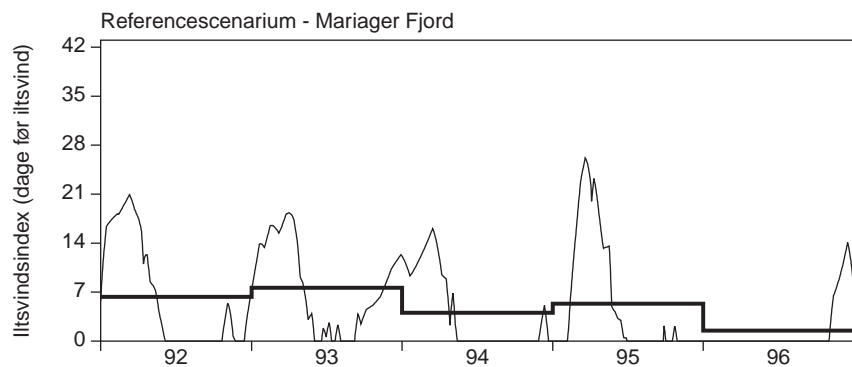
$$I_{O_2} = \frac{O_2\text{konc}}{O_2\text{flux}}$$

hvor $O_2\text{konc}$ er den gennemsnitlige iltkoncentration i den nederste meter af bundvandet (μM), og $O_2\text{flux}$ er sedimentets iltoptag målt i

mmol O₂ m⁻² d⁻¹. Bemærk at iltsvindsindexet i Mariager Fjord ikke er beregnet på samme måde som i Århus Bugt (se afsnit 3.2.2).

Figur 5.13 viser med al tydelighed, at der inden for få dage/uger ville optræde iltsvind (< 4 mg O₂ liter⁻¹) i bundvandet i Mariager Fjord pga. sedimentets høje iltoptag. I gennemsnit lå det årlige iltsvindsindex på mellem 3 og 7 dage, dog med op til 3 ugers modstand mod iltsvind i vintermånederne, hvor iltindholdet i bundvandet var nær luftmætning.

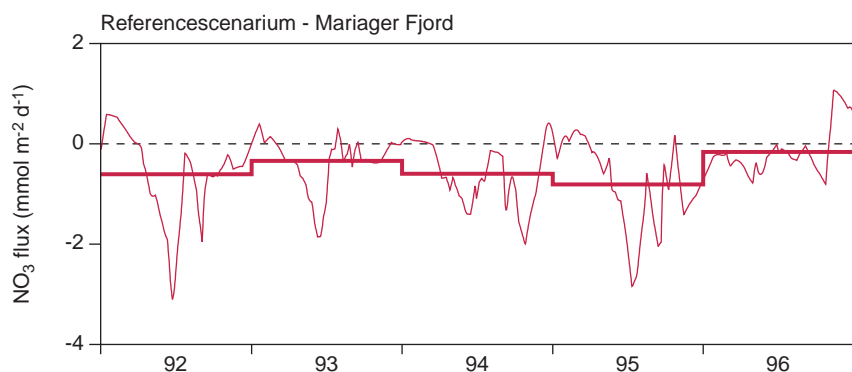
Figur 5.13. Det modellerede iltsvindsindex, Mariager Fjord (1.1.92-31.12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Indexet viser, hvor mange dage der vil gå, før der opstår iltsvind i den nederste meter af bundvandet under de kemiske og fysiske betingelser, der hersker den dag, indexet er beregnet.



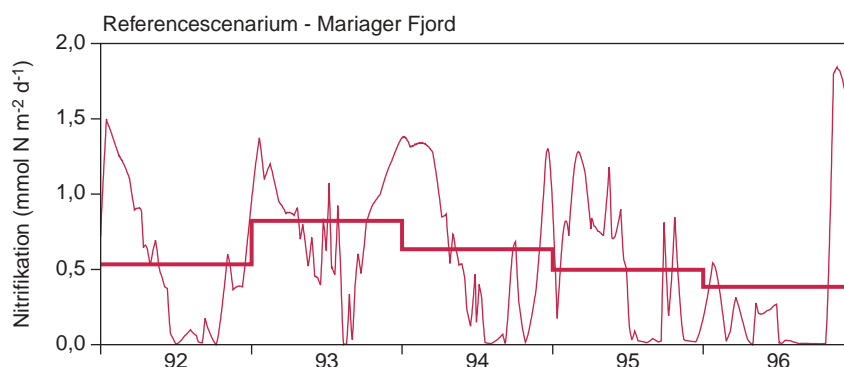
5.3.3. Kvælstofflux og denitrifikation

Fluxen af nitrat var altovervejende negativ, dvs., at NO₃⁻ blev optaget i fjordbunden det meste af tiden fra 1992 til 1996 svarende til omkring 2,6 g N m⁻² år⁻¹ (≈ 0,5 mmol m⁻² d⁻¹; Figur 5.14). Det var kun i vintermånederne november-februar, at fjordbunden afgav NO₃⁻ til bundvandet – i gennemsnit 0,28 mmol NO₃⁻ m⁻² d⁻¹, når vi ser bort fra de ganske få dage i juli-august 1993, hvor fjordbunden i løbet af 13 dage afgav 2,1 mmol NO₃⁻ m⁻² (≈ 0,16 mmol m⁻² d⁻¹). Frigivelsen af NO₃⁻ fra fjordbunden indtraf på de tidspunkter af året, hvor iltindholdet i bundvandet var højt, hvilket naturligvis påvirkede nitrifikationen og dermed intensiverede NO₃⁻-produktionen (Figur 5.15). Derfor slap NO₃⁻ ud fra bunden om vinteren, selvom nitratkoncentrationen var høj i bundvandet (Figur 5.6).

Figur 5.14. Den modellerede NO₃⁻-flux, Mariager Fjord (1.1.92-31.12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Positive værdier svarer til frigivelse af NO₃⁻ fra fjordbunden – negative værdier svarer til optagelse.

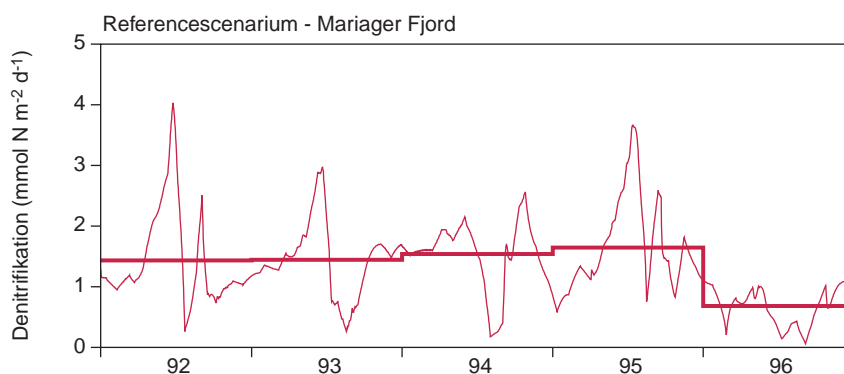


Figur 5.15. Den modellerede nitrifikation, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



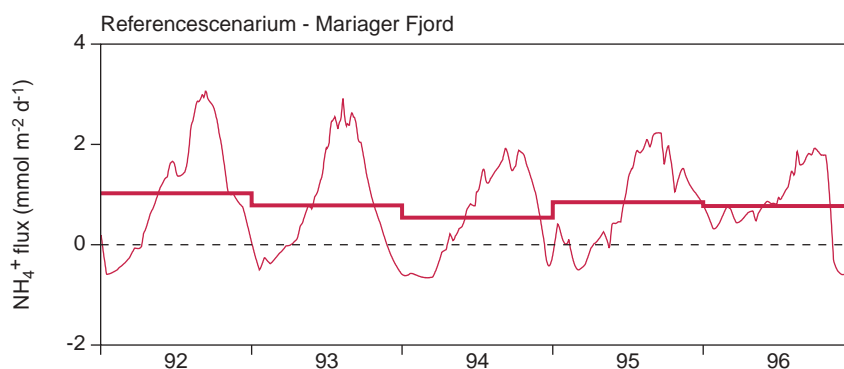
Koncentrationen af NO_3^- i bundvandet påvirkede denitrifikationen i en positiv retning, dvs., at høje NO_3^- -koncentrationer førte til en øget denitrifikation i den iltfrie del af fjordbunden (Figur 5.16). Omvendt førte denitrifikationen sammen med den organiske stofproduktion i foråret og sommeren til, at NO_3^- -koncentrationen i vandsøjlen faldt. Det påvirkede naturligvis intensiteten af denitrifikationen, som i løbet af juli og august nåede ned på årets laveste niveau på 2-3 $\text{mmol NO}_3^- \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, hvor også NO_3^- -koncentrationen var lavest.

Figur 5.16. Den modellerede denitrifikation, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.



Ammoniumfluxen var absolut højest i september med frigivelsesrater på op til 3 $\text{mmol NH}_4^+ \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Figur 5.17). Frigivelsen af NH_4^+ hang sammen med, at iltkoncentrationen var lav, og derfor blev NH_4^+ nede i fjordbunden ikke længere omsat til NO_3^- , fordi nitrifikationen var gået helt i stå (Figur 5.15). Det resulterede i en stigning af NH_4^+ -indholdet i bundvandet i sommermånederne. I vintermånederne var NH_4^+ -koncentrationen i bundvandet også høj, men på denne tid af året pga. tilledninger fra land. Også iltindholdet var højt, hvilket førte til en øget nitrifikation i sedimentet. Summa summarum, NH_4^+ -koncentrationen i fjordbunden blev hurtigt lavere end i bundvandet, og derfor optog fjordbunden NH_4^+ .

Figur 5.17. Den modellerede NH_4^+ -flux, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Positive værdier svarer til frigivelse af NH_4^+ fra fjordbunden – negative værdier svarer til optagelse.

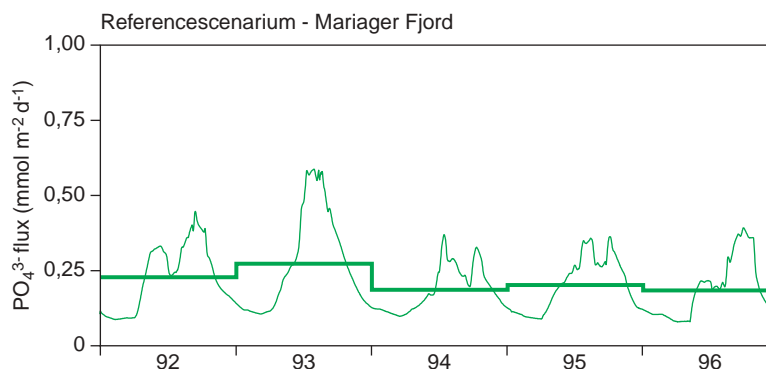


Betragter vi fluxen af NO_3^- og NH_4^+ under et, viser det sig, at optaget af nitrat nogenlunde balancerede frigivelsen af ammonium, hvilket resulterede i en samlet kvælstoffrigivelse fra bunden af Mariager Fjord på omkring $0,3 \text{ mmol N m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\approx 1,5 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$). Det svarede til 15% af den kvælstofmængde, der blev frigivet fra bunden af Århus Bugt i samme tidsrum.

5.3.4 Fosfatflux og fosfatpuljer

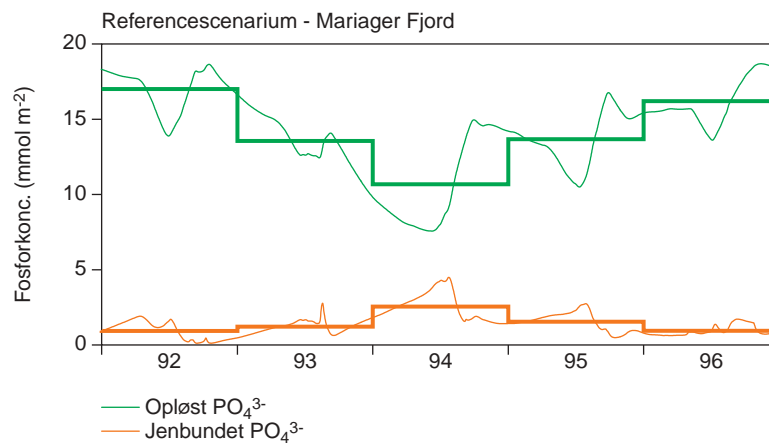
Fjordbunden afgav fosfor året rundt - i gennemsnit $0,2 \text{ mmol PO}_4^{3-} \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ ($\approx 2,5 \text{ g fosfor m}^{-2} \text{ år}^{-1}$; Figur 5.18). Ligesom i Århus Bugt afgav fjordbunden mest fosfor i perioder med iltsvind, som i Mariager Fjord strakte sig over det meste af sommeren og efteråret, hvor der blev målt rater på op til $0,6 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Lavest var fosforfluxen omkring februar med rater ned til ca. $0,1 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Kigger vi nærmere på PO_4^{3-} -koncentrationen i bundvandet (Figur 5.8), bemærker vi, at den stigende fosforkoncentration i sommermånederne tydeligvis faldt sammen med en forøget fosforflux fra fjordbunden. Det er derfor nærliggende at antage, at i sommermånederne kom der meget PO_4^{3-} i bundvandet fra fjordbunden, fordi koncentrationen af opløst PO_4^{3-} i fjordbunden var betydeligt større end koncentrationen i bundvandet.

Figur 5.18. Den modellerede PO_4^{3-} -flux, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit. Positive værdier svarer til frigivelse af PO_4^{3-} fra fjordbunden.



I vintermånederne var PO_4^{3-} -koncentrationen i bundvandet også stigende i perioder (fx. vinteren 94/95), men PO_4^{3-} -fluxen var faldende, ja endda minimal. På denne tid af året var afstrømningen fra land høj, og det er derfor givet, at den stigende koncentration af fosfor i bundvandet skyldtes denne afstrømning.

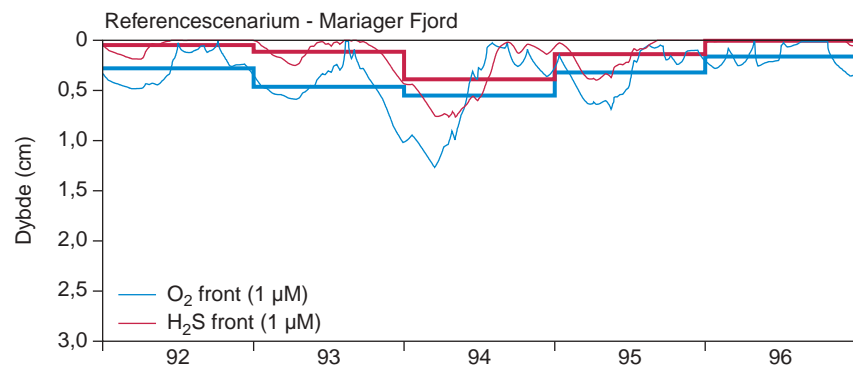
Indholdet af den jernbundne letomsættelige fosfatpulje i Mariager Fjord var næsten 5 gange mindre end i Århus Bugt, hvilket skyldes, at fjordbunden var betydeligt mere reduceret end bunden af Århus Bugt. I Mariager Fjord var årstidsdynamikken i jernpuljen derfor heller ikke så iøjnefaldende (Figur 5.19) som i Århus Bugt (Figur 3.19). Der var dog trods alt en årstidsvariation med stigende koncentration af jernbundet fosfat fra omkring årsskiftet frem til midt på sommeren og derefter et fald i løbet af sensommeren og efteråret. Faldet i den jernbundne fosfatpulje blev fulgt af en stigning i puljen af opløst PO_4^{3-} ; men den observerede stigning kunne ikke udelukkende stamme fra den jernbundne fosfat. En betydelig mængde PO_4^{3-} blev derfor også frigivet fra det organiske stof, hvis omsætning i løbet af sommeren blev mere og mere betydende.



Figur 5.19. Det modellerede indhold af hhv. opløst PO_4^{3-} i porevandet og letopløseligt jernbundet PO_4^{3-} i fjordbundens øverste 20 cm, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

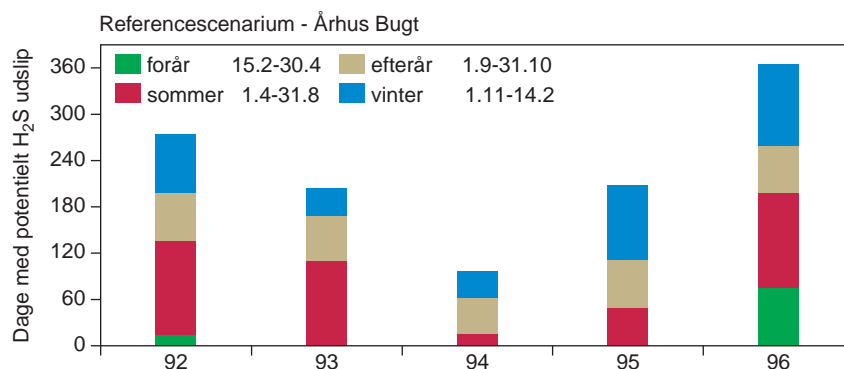
5.3.5 Ilt- og svovlbrintefronten

I sommer- og efterårsmånederne trængte ilt om overhovedet så i hvert tilfælde kun nogle ganske få tiendedele millimeter ned i fjordbunden (Figur 5.20). I vinterhalvåret nåede ilten derimod lidt længere ned i bunden - i gennemsnit 6,1 mm, men der blev dog registreret ilt helt ned i 13 mm dybde (16.3-94). Den meget begrænsede iltning af overfladesedimentet betød også, at H_2S dominerede i fjordbunden helt op til overfladen i sommer- og efterårsmånederne.



Figur 5.20. 1- μM fronten af hhv. O_2 og H_2S i fjordbunden, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

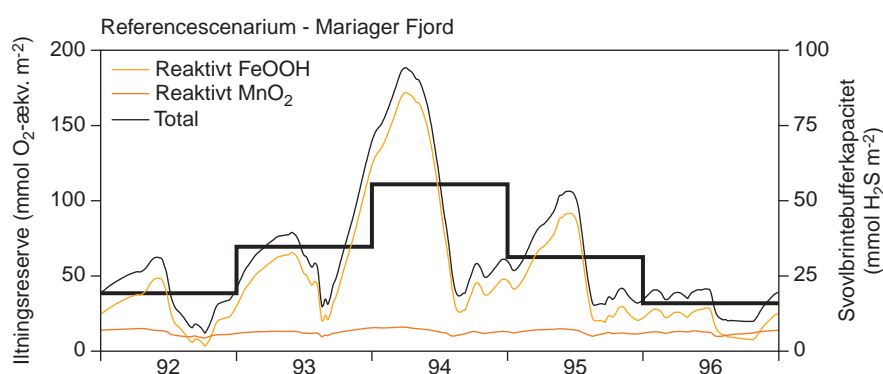
De dage på året, hvor H_2S -fronten nåede op i en afstand på $<1\text{mm}$ fra sedimentoverfladen, var der mulighed for, at H_2S kunne slippe ud i bundvandet. Disse perioder strakte sig de fleste år (bortset fra 1994) over hele efterårsperioden og mere end $\frac{3}{4}$ af sommerperioden (Figur 5.21). Også når det drejede sig om H_2S -udslip til bundvandet, var 1996 et specielt år, da der var risiko for H_2S -udslip til bundvandet alle årets 365 dage. Denne observation understreger endnu engang, i hvor ringe grad bunden i Mariager Fjord var i stand til at oxidere alt det H_2S , der blev dannet ved den organiske stofnedbrydning med sulfat og derfor permanent var i en meget dårlig miljøtilstand.



Figur 5.21. Det modellerede potentielle H₂S-udslip, dvs. antallet af dage, hvor H₂S-fronten ligger < 1 mm fra sedimentoverfladen fordelt på årstiderne hhv. forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10) og vinter (1.11–14.2; det flg. år). Mariager Fjord (1.1.92–31-12.96).

5.3.6 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

I Mariager Fjord var det koncentrationen af reaktivt oxideret jern og mangan, der havde betydning for sedimentets iltningsreserve og dermed svovlbrintebufferkapacitet. Selvom puljen af reaktivt MnO₂ udgjorde ca. 20% af den totale iltningsreserve set over den femårige periode, var det praktisk taget kun FeOOH-puljen, der påvirkede iltningsreservens årstidsdynamik (Figur 5.22). Iltningsreserven var mindst i sensommeren og efteråret, hvor reserven nåede ned på 10-35 mmol O₂-ækv. m⁻² (≈ 5-18 mmol H₂S-ækv. m⁻²), hvilket var markant mindre end i Århus Bugt (Figur 3.22). Iltningsreserven steg så i løbet af vinteren, foråret og den tidlige sommer, men nåede dog aldrig op på samme høje niveau som i Århus Bugt. Helt slemt udviklede svovlbrintebufferkapaciteten sig i 1996, hvor den maksimale kapacitet knap oversteg 40 mmol H₂S-ækv. m⁻². I perioden 92-96 var den årlige svovlbrintebufferkapacitet på omkring 31 mmol H₂S-ækv. m⁻², hvilket svarede til godt og vel 25% af kapaciteten i Århus Bugt i samme tidsrum.



Figur 5.22. Den modellerede iltningreserve eller svovlbrintebufferkapacitet, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

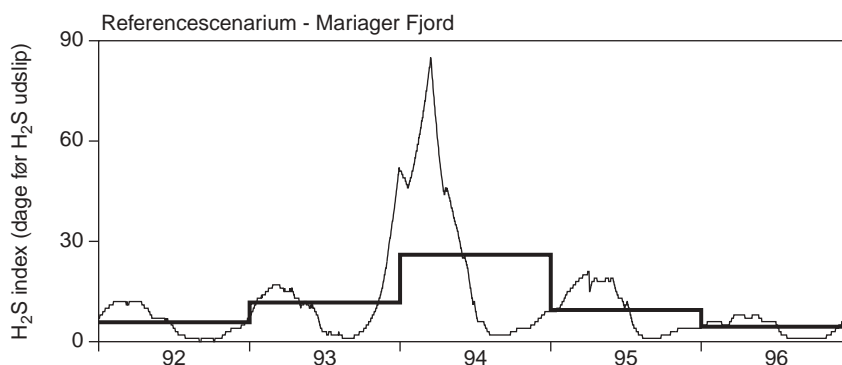
Modellen beregnede også sulfatreduktionsraten eller H₂S-produktionen, om man vil. Det var derfor forholdsvis enkelt at udregne, i hvor mange dage sedimentet havde oxiderede forbindelser nok til at oxidere det H₂S, der blev dannet. Med andre ord kunne vi beregne, hvor mange dage der ville gå, før H₂S-produktionen oversteg ilt-

ningsreserven, og H_2S dermed slap ud i bundvandet. H_2S -indexet (I_{H_2S}) i dage beregnede vi for hver eneste dag i året på flg. måde

$$I_{H_2S} = \frac{H_2S_{buffer}}{H_2S_{prod}}$$

hvor H_2S_{buffer} er havbundens svovlbrintebufferkapacitet (mmol H_2S -ækv. m^{-2}) og H_2S_{prod} er svovlbrinteproduktionen eller sulfatreduktionsraten (mmol $m^{-2} d^{-1}$, se de primære processer Tabel 2.1).

H_2S -indexet var lavest i september, hvor antallet af dage før H_2S udslip knap oversteg en dag (Figur 5.23). I afsnit 5.3.7 vil vi se, at et lavt H_2S -index i praksis betød, at sedimentets ilttingsreserve var opbrugt, og H_2S derfor strømmede ud af fjordbunden. Selv i vintermåneder nåede H_2S -indexet ikke op på meget mere end 1-3 uger, når vi ser bort fra vinteren 93/94. På årsbasis var H_2S -indexet derfor lavt; godt og vel en uge. Det tyder på, at fjordbunden ikke var "alt for sund" sammenlignet med det tilsvarende årsindex for Århus Bugt, som i gennemsnit nåede op over en måned (Figur 3.23).

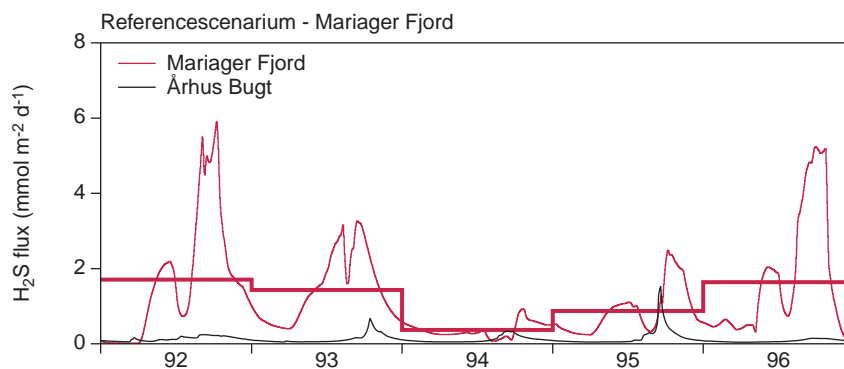


Figur 5.23 Det modellerede H_2S -index, dvs. antallet af dage, fjordbunden er i stand til at tilbageholde produktionen af H_2S og dermed hindrer H_2S udslip; modelleret under de kemiske og fysiske betingelser, der hersker den dag, indexet er beregnet. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit.

5.3.6 Sulfidpuljer og H_2S -udslip fra bunden

Vi har lige beskrevet, at H_2S en stor del af året nåede helt op til sedimentoverfladen, fordi fjordbundens ilttingsreserve var meget lav. Af den grund var H_2S -indexet også lavt, og vi forventede derfor, at der i hvert tilfælde i sommer- og efterårsmånederne slap H_2S ud fra fjordbunden og op i bundvandet. Hvor meget H_2S der slap ud af fjordbunden, har vi beregnet vha. modellen og viser resultatet på Figur 5.24. Heraf fremgår det tydeligt, at det især er i september og oktober, at H_2S slipper ud i bundvandet med rater på op til ca. 6 mmol $m^{-2} d^{-1}$. Omvendt er H_2S -udslippet ubetydeligt i foråret, hvilket falder sammen med gode iltforhold i bundvandet, lav temperatur og deraf følgende ringe stofomsætning og H_2S -produktion. Sammenlignet med H_2S -udslippet i Århus Bugt, er udslippet i Mariager Fjord beregnet over den femårige periode omkring 10 gange højere.

Figur 5.24. Den modellerede H_2S -flux, Mariager Fjord (1.1.92-31-12.96) og H_2S -flux-en fra bunden af Århus Bugt i samme tidsrum. Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit for Mariager Fjord. Positive værdier svarer til frigivelse af H_2S fra fjordbunden.



5.4 Brug af referencescenariet

Vi har ovenfor beskrevet nogle af de output, som modellen kan levere, når vi over en periode på fx. 5 år overfører input til modellen i form af temperatur, bundvandskoncentrationer af O_2 , NO_3^- , NH_4^+ og PO_4^{3-} og organisk stof til bunden. Ligesom det var tilfældet for Århus Bugt, vil vi i næste afsnit afvikle en række handlingsscenarier i Mariager Fjord og sammenligne dem med referencescenariet, som vi netop har præsenteret.

6 Handlingsscenarier – Mariager Fjord

I Kapitel 5 gennemgik vi referencescenariet for Mariager Fjord for perioden 1992-96 eller om man vil: Vi beskrev det, vi definerer som fjordens normale tilstand. Vi forudsætter nemlig, at hvis der ikke sker væsentlige ændringer i fjordens fysiske, kemiske eller biologiske tilstand, så vil vi kunne gøre de samme observationer i fjorden i løbet af de kommende mange år, hvor den 5-årige periode gentager sig igen og igen. Referencescenariet bruger vi i dette kapitel til at sammenligne med en række handlingsscenarier, der skal fortælle os, hvilke forandringer vi kan forvente i fjordbunden, hvis miljøet i Mariager Fjord ændres på en måde, der afviger fra betingelserne i referencescenariet.

I det følgende diskuterer vi resultatet af tre handlingsscenarier:

- Scenarium 97 fokuserer primært på perioden 1.1.97 – 31.12.2001 og beskriver stofskifteprocesserne i fjordbunden og stoffluxene mellem fjordbund og bundvand i tiden før, under og efter det alvorlige iltsvind i 1997. Scenariet er også brugt til at verificere modellen ud fra observationer fra perioden 1998-2000.
- Scenarium VMP2 beskriver effekten af en 24% nedsat kvælstofkoncentration i vandet og en stoftilførsel til bunden af fjorden, der er reduceret med 27%. Denne reduktion forventes skønsmæssigt at svare til effekten af Vandmiljøplan II.
- Scenarium 7025 beskriver effekten af en nedsat koncentration i vandfasen af total kvælstof og fosfor på hhv. 42% og 18%. Derudover er stoftilførselen til bunden af fjorden reduceret med 60%. Denne reduktion forventes skønsmæssigt at svare til effekten af en optimal reduktion af næringsstofftilførslen fra land til fjorden på 70% og 25% for hhv. N- og P-belastningen.

6.1 Scenarium 97 – stofskifteprocesser i fjordbunden og stoffluxer mellem fjordbund og bundvand i tiden før, under og efter det alvorlige iltsvind i 1997

Resume: Udviklingen i Scenarium 97 tog sin begyndelse i august måned 1997, hvor Mariager Fjord blev ramt af et voldsomt iltsvind, og fjorden "døde". Det langvarige iltsvind, som blev ledsaget af et betydeligt H_2S -udslip, påvirkede især bioaktiviteten i fjordbunden, som helt frem til sommeren 1998 var stærkt nedsat. Dårlige iltforhold ved bunden i 1997 og 1998 betød også, at en større del af det organiske stof blev nedbrudt anaerobt især af de sulfat-reducerende bakterier eller, om man vil, de H_2S -producerende bakterier. Den forøgede produktion af H_2S efter august 1997 førte til, at der i 1998 faktisk blev frigivet en endnu større mængde H_2S fra bunden end det foregående år, men med den væsentlige forskel, at der i de kritiske sensommermåneder

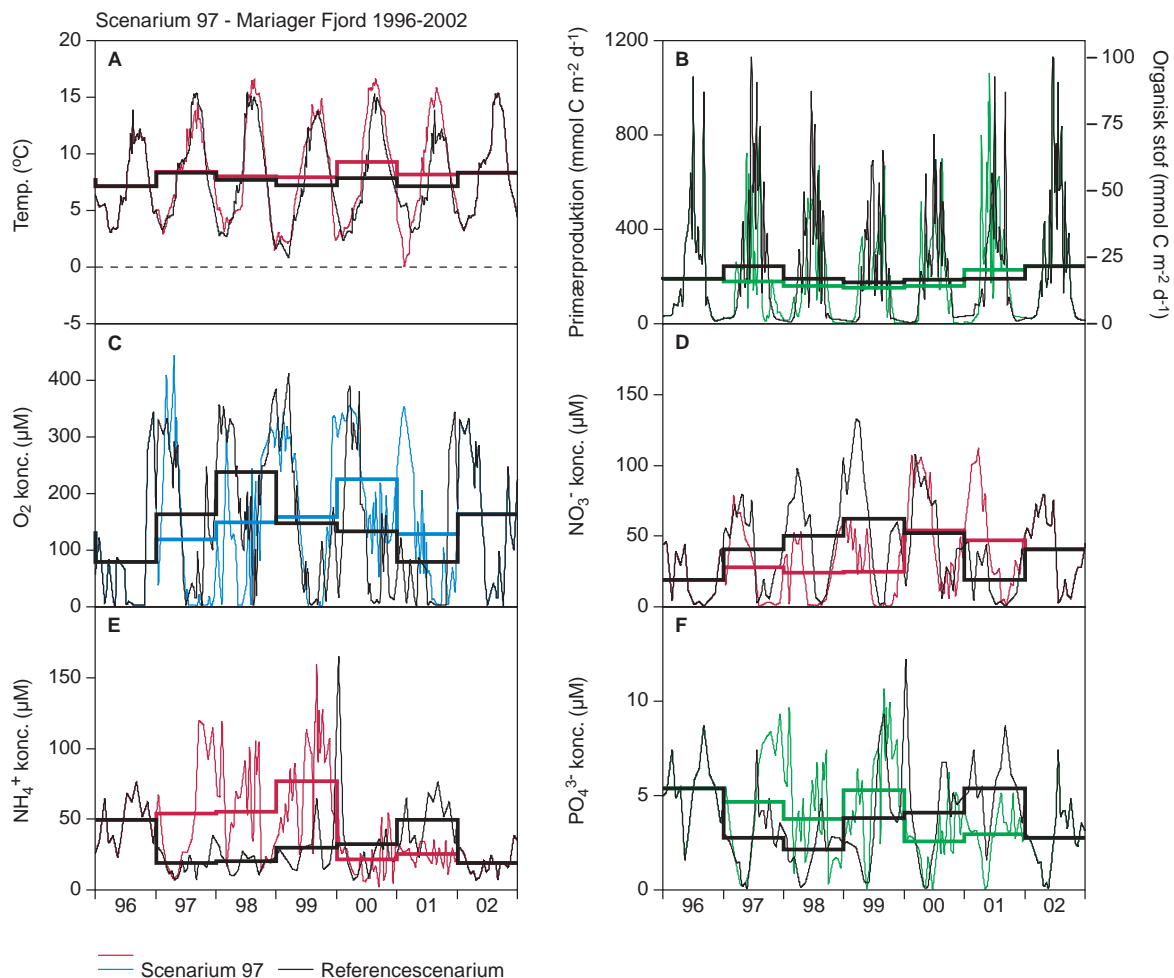
(august-oktober) blev ført tilstrækkeligt med ilt ned til bunden, så det udstrømmende H_2S hurtigt blev iltet og forsvandt fra vandet. Derfor "overlevede" Mariager Fjord så at sige på trods af det alvorlige H_2S -udslip. Iltforbruget og det deraf følgende iltsvind ved bunden førte også til, at nitrifikationen i 1997/98 var reduceret i forhold til normaltstanden, og derfor blev der kun fjernet ganske lidt NH_4^+ ved nitrifikation. Ammonium fortsatte altså med at strømme ud fra bunden, også selvom NH_4^+ -koncentrationen i bundvandet i 97/98 lå næsten 3 gange over det normale årsgennemsnit. Nitratkoncentrationen i fjordbunden var meget lavt, primært fordi det meste NO_3^- blev brugt i det iltfrie bundvand, og derfor optog fjordbunden kun ganske lidt NO_3^- i 1997 og 98. Af samme grund var også denitrifikationen begrænset sammenlignet med normaltstanden. På 12-meter stationen blev fosfatfluxen derimod ikke påvirket væsentligt af iltsvindet, fordi bundeni denne del af Mariager Fjord allerede var stærkt reduceret, inden det alvorlige iltsvind satte ind i 1997. Af samme grund fik iltsvindet heller ikke den store effekt på fjordbundens pulje af jernbundet PO_4^{3-} , som i forvejen var forsvindende, da PO_4^{3-} tidligere var frigivet fra fjordbunden til bundvandet. I år 2000 steg iltindholdet i Mariager Fjord betydeligt, hvilket påvirkede de fleste processer i fjordbunden dramatisk. Bioturbationen blev væsentlig forøget, og ilt trængte i gennemsnit mere end 3 mm længere ned i bunden til en dybde af 5-6 mm, hvilket skubbede H_2S endnu dybere ned i sedimentet. Det satte skub i nitrifikationsprocessen, og på den måde faldt NH_4^+ -koncentrationen øverst i sedimentet og dermed også NH_4^+ -fluxen ud fra bunden. Nitrifikationen dannede NO_3^- , som i bundens iltfrie zone straks blev omsat til N_2 , hvilket også førte til, at denitrifikationen i fjordbunden steg betragteligt efter 1999. De veliltede forhold ved fjordbunden påvirkede også PO_4^{3-} -puljerne. Puljen af opløst PO_4^{3-} faldt, fordi der blev dannet mere oxideret jern i fjordbunden, som bandt en større del af det PO_4^{3-} , der tidligere var opløst i porevandet. På trods af at der de senere år var kommet mere ilt til bunden, var produktionen af H_2S stadig betydelig. Modellen beregnede derfor også både før og efter iltsvindet i 1997 et meget lavt iltsvindsindex på under en uge, dvs. den tid, det tog fjordbunden af optage så meget ilt fra bundvandet, at der kunne opstå iltsvind. Ligeledes var H_2S -indexet lavt, af størrelsesordenen 1-2 uger, dvs. den tidshorisont fjordbunden var i stand til at holde på det producerede H_2S , hvis O_2 -tilførslen til bunden blev afbrudt, fx. på grund af springlagsdannelse. Fremskrives udviklingen for Mariager Fjord ind i det 21. århundrede ved at bruge input fra referencescenariet (begyndende 1.1.2002) kan vi beregne, at bunden af Mariager Fjord har en "hukommelse" på mellem 1 og 5 år. Med andre ord alt efter hvilken parameter vi betragter, er der en målelig effekt i fjordbunden, der rækker 1 til 5 år frem efter årsskiftet 2001/02. De processer, der er særligt afhængige af O_2 i bundvandet (fx. bioturbation og nitrifikation), vil hurtigst nå normaltstanden, mens det vil tage noget længere tid for de processer, der forløber dybere nede i sedimentet fx. H_2S -produktionen, som så at sige blev stimuleret af de iltfrie forhold ved bunden i 1997 og 98. Scenarium 97 blev også brugt til at verificere ilt- og næringsstoffluxmodellen for Mariager Fjord ved sammenligning med målte data fra perioden 1998-2000. Vi konkluderer, at ilt- og næringsstoffluxmodellen kan modellere virkningen af det alvorlige iltsvind i 1997 og ikke mindst eftervirkningerne i årene, der fulgte. Fraset en mindre uoverensstemmelse mellem de observerede fluxrater af NO_3^- og PO_4^{3-} , som opstod pga. meget små fluxrater, og som endda ændrede retning under laboratoriemålingerne, var der en meget fin overensstemmelse mellem de målte værdier og de resultater, vi opnåede ved at benytte ilt- og næringsstoffluxmodellen på Mariager Fjord sedimentet.

6.1.1 Input til Scenarium 97

Scenarium 97 svarede til referencescenariet gentaget med femårige intervaller blot med den væsentlige ændring, at input til modellen i perioden 1997-2001 blev erstattet af de aktuelle observationer fra denne periode. Det betød med andre ord, at det fra og med 2002 igen var input fra referencescenariet, der drev modellen.

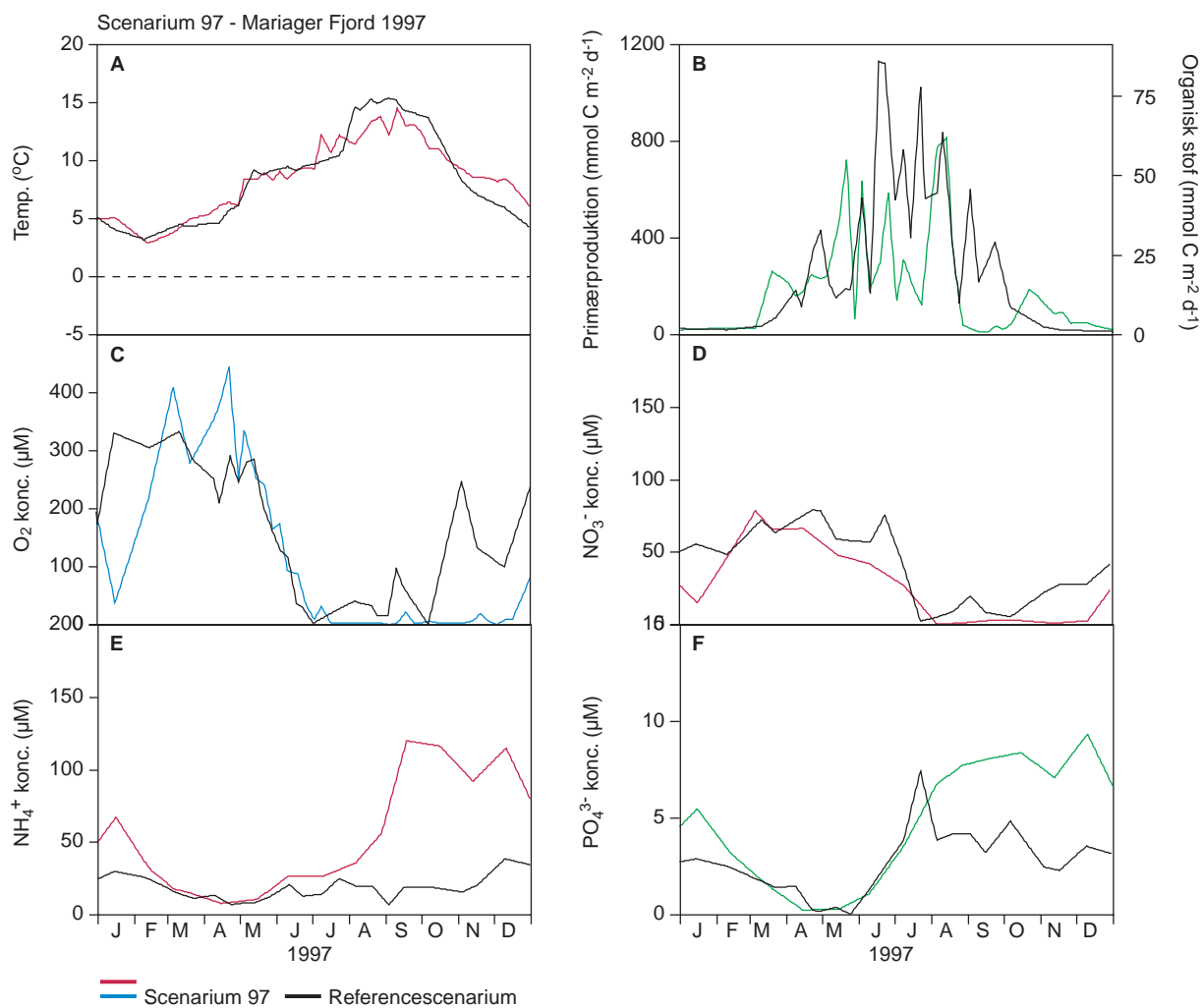
Ideen med at gennemregne Scenarium 97 var dels at afprøve, 1) om Mariager Fjord-modellen var i stand til at genskabe situationen i forbindelse med det alvorlige iltsvind i sommeren 97, 2) at se om modellens forudsigelser svarede til vore målinger i 1999 og 2000, og 3) at vurdere fjordbundens hukommelse, altså hvor lang tid der gik, fra modellen igen blev "fodret" med input fra referencescenariet (fra 1.1.2002–31.12.2011) til Scenarium 97 var i balance med referencescenariet.

I Scenarium 97 er der ændret på så mange inputdata (temperatur og koncentrationer), der driver modellen, at det ikke er muligt præcist af vise, hvor stor en effekt de enkelte parametre har på udfaldet af beregninger i scenariet. Figur 6.1 viser input til modellen for perioden 1996-2002, hvor årene hhv. før 1997 og efter 2001 svarer til referencescenariets input.



Figur 6.1. Scenarium 97. Temperatur (A), primærproduktion og organisk stofbelastning (B) og bundvandskoncentrationer af hhv. ilt (C), nitrat (D), ammonium (E) og fosfat (F) i Mariager Fjord 1.1.96–31.12.02. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet (se Figur 5.2, 5.3, 5.4, 5.6, 5.7 og 5.8). Bemærk, at Scenarium 97 kun adskiller sig fra referencescenariet i det femårige tidsrum fra 1.1.97–31.12.01.

Kort fortalt var temperaturen i bundvandet næsten sammenfaldende med temperaturen i referencescenariet (Figur 6.2A), og primærproduktionen og dermed sedimentationen var 15-25% lavere i Scenarium 97 i årene 1997-2000 (Figur 6.2B). Iltindholdet i bundvandet var 1,5 og 3 mg O₂ lavere pr. liter bundvand i hhv. 1997 og 1998 (Figur 6.2C). Den lave O₂-koncentration i 1997 opstod som følge af, at der nærmest ikke var ilt i bundvandet i over 4 mdr. fra begyndelsen af august til midt i december (Figur 6.2C). I årene 2000 og 2001 var iltindholdet forøget ift. referencescenariet.



Figur 6.2. Sammenligning af input data til Scenarium 97 og referencescenariet for Mariager Fjord i perioden 1.1.97-31.12.97. Temperatur (A), primærproduktion og organisk stofbelastning (B) og bundvandskoncentrationer af hhv. ilt (C), nitrat (D), ammonium (E) og fosfat (F).

I forhold til referencescenariet var indholdet af næringssaltene NH₄⁺ og PO₄³⁻ væsentligt forøget i bundvandet mellem 1997 og 1999 (Figur 6.2E og F). Koncentrationen af NH₄⁺ var næsten 3 gange højere end i referencescenariet, og PO₄³⁻-koncentrationen var omkring 1,5 gange højere. I 2000 og 2001 var koncentrationerne lavere end i referencescenariet. For NO₃⁻ var forholdet nærmest omvendt. Efter at NO₃⁻-koncentrationen var omtrent halveret ift. referencescenariet i årene 1997-99, fordobledes NO₃⁻ koncentrationen i 2001 (Figur 6.2D).

Det er på baggrund af disse input, vi gennemgår, hvordan sedimentet reagerede på den alvorlige iltvindshændelse i august 1997 og årene derefter, dvs. frem til 21.12.2001.

6.1.2 Output fra Scenarium 97

Gennemregningen af Scenarium 97 gav en række output, som vi diskuterer nedenfor i sammenligning med referencescenariet. Figureerne viser resultatet af modelberegningerne fra og med 1996 indtil det år, hvor der igen var balance mellem output fra Scenarium 97 og referencescenariet. Denne balance definerede vi som det første af to år, hvor forskellen mellem output fra de to scenarier var ens inden for en usikkerhed på 5 %. Tidsrummet inden, denne balance indtraf, er også vist i Tabel 6.1.

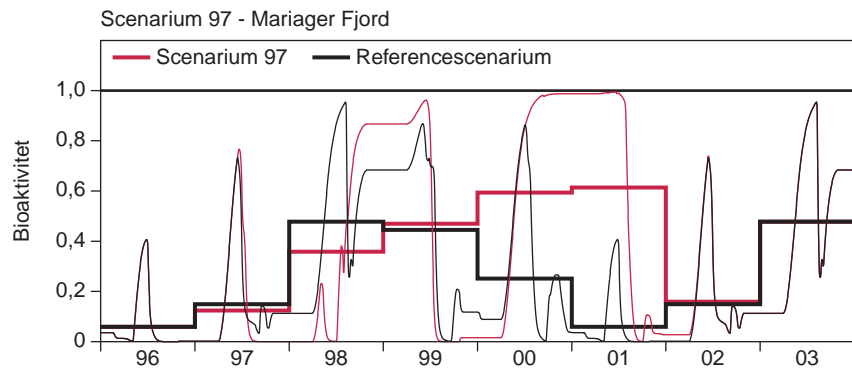
Tabel 6.1. Balance mellem Scenarium 97 og referencescenarium.

Parameter	Scenarium 97 og referencescenarium i balance *	
	år	år siden 2001
Fluxe		
O ₂ flux	2006	4
CO ₂ flux	2005	3
NH ₄ ⁺ flux	2007	5
NO ₃ ⁻ flux	2007	5
PO ₄ ³⁻ flux	2005	3
H ₂ S flux	2010	8
Aktivitet og rater		
Bioaktivitet	2003	1
Nitrifikation	2004	2
Denitrifikation	2004	2
Puljer		
PO ₄ ³⁻	2005	3
Jernbundet PO ₄ ³⁻	2008	6
O ₂ front	2006	4
H ₂ S front	2011	9
Index		
Iltsvindsindex	2006	4
H ₂ S index	2008	6
Iltningsreserve	2007	5
Potentielt H ₂ S udslip	2006	4

* < 5% forskel mellem modellerede værdier

6.1.2.1 Bioaktivitet

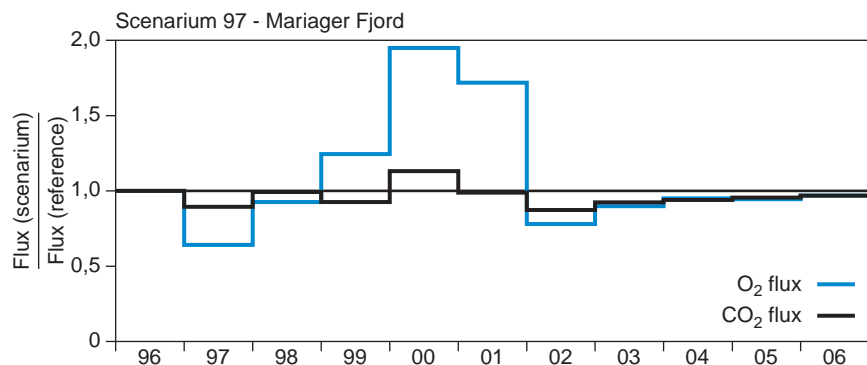
Den beregnede bioturbation afhang af iltforholdene i bundvandet, så iltsvindet i 1997 fik udover en umiddelbar effekt samme år og også betydning for bioaktiviteten i det følgende år (Figur 6.3). Det forøgede iltindhold i bundvandet i 2000 og 2001 påvirkede bioaktiviteten i positiv retning, og i 2003, dvs. året efter at bioaktiviteten igen blev beregnet med input fra referencescenariet, var der balance mellem de to scenarier.



Figur 6.3. Scenarium 97. Bioaktiviteten i Mariager Fjord (1996-03). Den kraftigt optrukne linie viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet.

6.1.2.2 Fluxen af ilt og kuldioxid

I forbindelse med iltsvindet i 1997, hvor der i en meget lang periode kun var ganske lidt eller slet intet ilt i bundvandet (se Figur 6.2C), faldt iltoptagelsen med ca. 35% (Figur 6.4). I årene 1999, 2000 og 2001 var iltindholdet i bundvandet derimod højere end i referencescenariet (se Figur 6.2C), og iltoptagelsen i fjordbunden var derfor også større. Med andre ord afhang iltoptagelsen i fjordbunden til en vis grad af iltforholdene i bundvandet, som det også blev diskuteret i det foregående kapitel (5.3.2.) og vist på Figur 5.9B. Foruden iltindholdet i bundvandet påvirkede også fjordbundens iltforbrugende stoffer, særligt H_2S , iltoptagelsen. Som vi skal se i næste afsnit, blev H_2S først oxideret langt tid efter, at det blev dannet, og derfor kom fjordbundens iltoptagelse først i balance med referencescenariet i 2006.

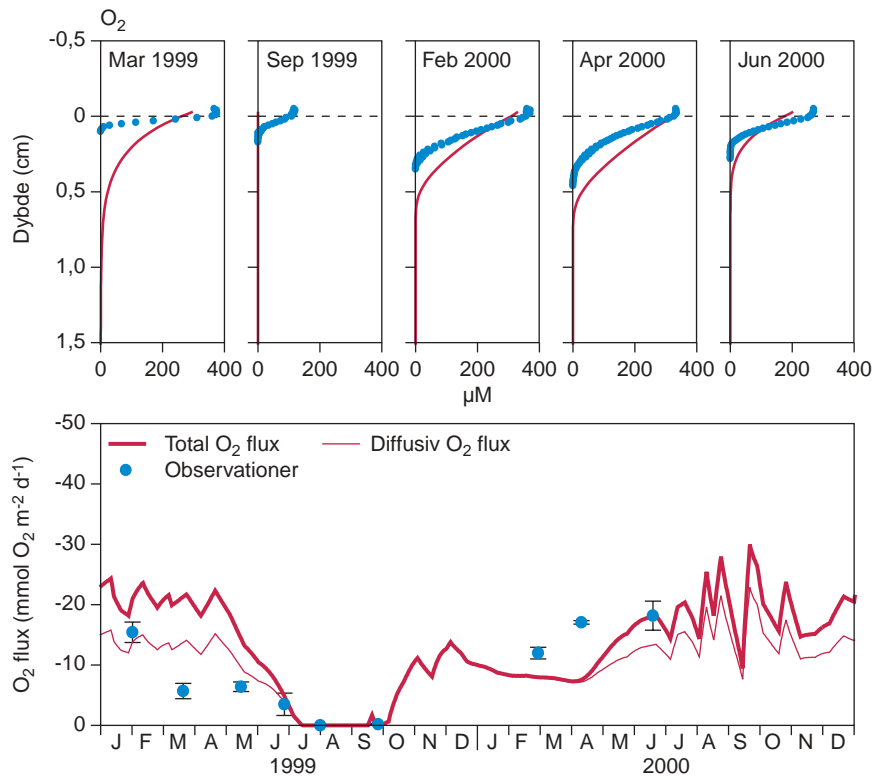


Figur 6.4 Scenarium 97. Fluxændringen vist ved det årlige gennemsnit for hhv. O_2 og CO_2 i Mariager Fjord (1996-06) relativt til referencescenariet (se hhv. Figur 5.10 og Figur 5.11) når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1.

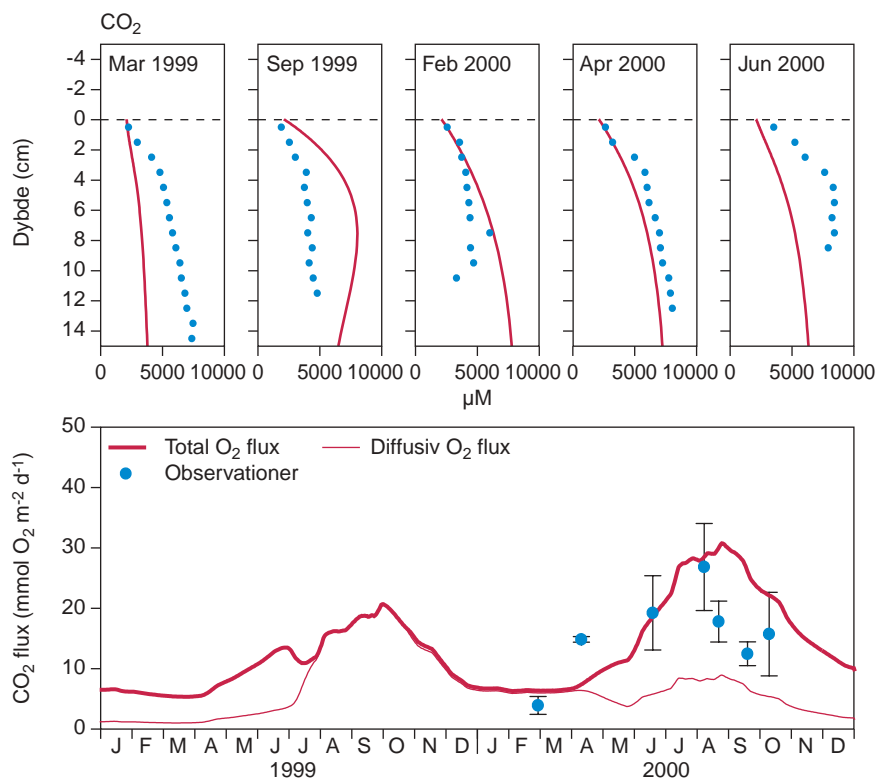
Den lavere tilførsel af organisk stof til bunden af Mariager Fjord i perioden 1997-2000 (se Figur 6.2B) medførte ikke, at CO_2 -fluxen med det samme blev tilsvarende mindre. Der var en betydelig forsinkelse, dels fordi det organiske stof kun blev nedbrudt langsomt, dels fordi omsætningen af det organiske stof især blev nedbrudt af sulfatreducerende (dvs. H_2S -producerende) bakterier, som befandt sig i hele fjordbundens udstrækning. Alt i alt medførte forsinkelsen i omsætningen af det organiske stof, at fluxen af CO_2 ikke var så forskellig fra referencescenariet som O_2 -fluxen, men alligevel først kom komme i balance med referencescenariet i 2005 altså et år tidligere end O_2 -fluxen.

Både koncentrationsprofilen og fluxen af O_2 og CO_2 blev målt flere gange i løbet af 1999 og 2000. Resultatet af disse målinger er sammen med de modellerede værdier vist på Figur 6.5 og Figur 6.6. De observerede og modellerede værdier stemmer ganske godt overens, når man tager i betragtning, at de modellerede koncentrationsprofiler alle er vist for den 15. i den pågældende måned, mens den observerede profil typisk stammer fra en anden dag i samme måned (se figurteksten).

Figur 6.5. Scenarium 97. Målte og modellerede O_2 -koncentrationsprofiler og fluxe i Mariager Fjord. Øverste panel viser de målte koncentrationer (blå punkter) de fem gange, disse er målt, mens de modellerede profiler (rød linie) er vist den 15. kl. 12 middag samme måned. Nederste panel viser den modellerede totale og diffusive ilt-flux sammenlignet med målte værdier. Bemærk at koncentrationsprofilerne ikke er målt så hyppigt som O_2 -fluxene.

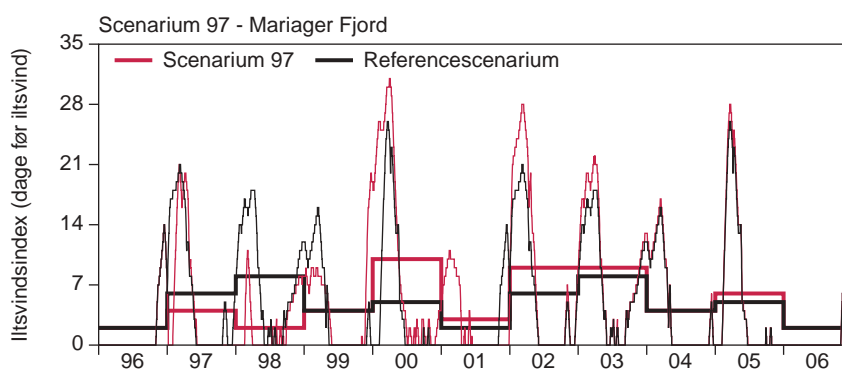


Figur 6.6 Scenarium 97. Målte og modellerede CO_2 -koncentrationsprofiler og fluxe i Mariager Fjord. Øverste panel viser de målte koncentrationer (blå punkter) de fem gange, disse er målt, mens de modellerede profiler (rød linie) er vist den 15. kl. 12 middag samme måned. Nederste panel viser den modellerede totale og diffusive CO_2 -flux sammenlignet med målte værdier. Bemærk at koncentrationsprofilerne ikke er målt så hyppigt som CO_2 -fluxene.



6.1.2.3 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

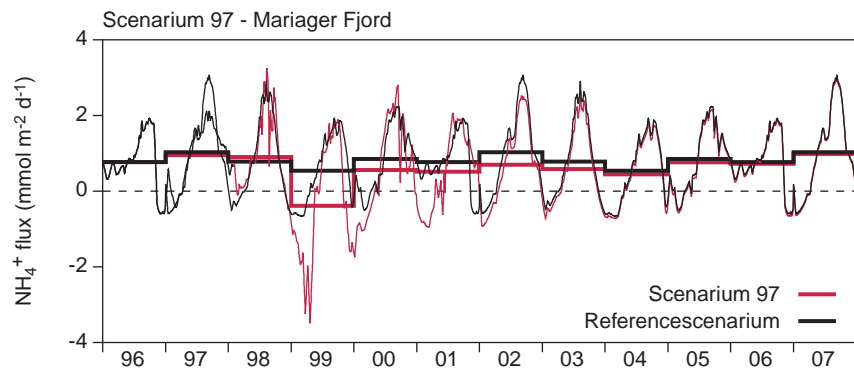
Det var forholdet mellem bundvandets iltindhold og fjordbundens iltoptagelse, der bestemte størrelsen af iltsvindsindexet (se 5.3.2). I 1997-98 var både iltindholdet og iltoptagelsen lavere end i referencescenariet, men iltindholdet var trods alt så meget lavere, at iltsvindsindexet i Scenarium 97 i hhv. 97 og 98 var reduceret med 2 og 6 dage ift. referencescenariet. Med andre ord var iltindholdet i bundvandet i 97 og 98 så lavt, at iltoptagelsen i fjordbunden i løbet af hhv. 4 og 2 dage kunne føre til iltsvind i bundvandet, hvis ikke der blev ført iltet overfladevand ned til bunden (Figur 6.7). I årene 2000 og 2001 steg iltindholdet i bundvandet forholdsvis mere end fjordbundens iltoptagelse, hvilket resulterede i et højere iltsvindsindex end i referencescenariet. I 2006 var der igen sammenfald mellem de to scenarier efter, at fjordbundens iltoptagelse igen svarede til referencescenariet (Figur 6.4).



Figur 6.7. Scenarium 97. Det modellerede iltsvindsindex, Mariager Fjord (1999-06) når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet. Indexet viser, hvor mange dage der vil gå, før der opstår iltsvind i den nederste meter af bundvandet under de kemiske og fysiske betingelser, der hersker den dag, indexet er beregnet.

6.1.2.4 Kvælstofflux, nitrifikation og denitrifikation

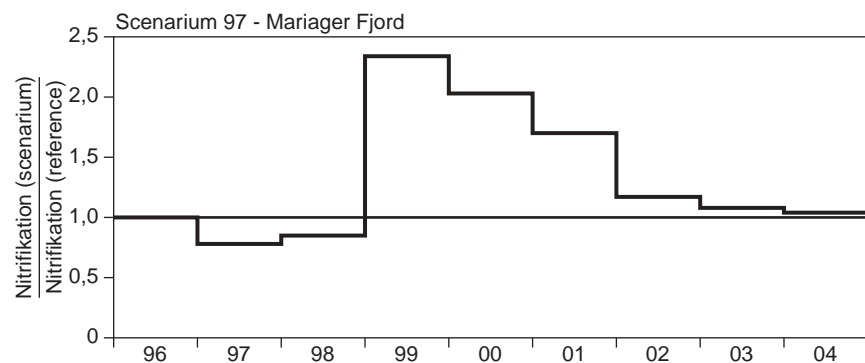
I fjordbunden blev NH_4^+ produceret gennem nedbrydningen af organisk stof. Omvendt forsvandt NH_4^+ fra fjordbunden dels ved nitrifikation, dels ved diffusion ud af bunden, når NH_4^+ -koncentrationen i fjordbunden oversteg koncentrationen i bundvandet, og jo større forskellen var, des større var fluxen. Beregninger fra Scenarium 97 viste, at NH_4^+ -fluxen i 97 og 98 ikke var forskellige fra referencescenariet (Figur 6.8), hvorimod NH_4^+ -koncentrationen i bundvandet var voldsomt forøget (Figur 6.2E). Hvordan hænger det sammen? Når NH_4^+ -fluxen ifht. referencescenariet var uforandret, og NH_4^+ -koncentrationen i bundvandet i 1997 og 98 i (års)gennemsnit var godt og vel tre gange højere, betød det alt andet lige, at også NH_4^+ -koncentrationen i bunden måtte være større, fordi fluxen i modsat fald ville blive mindre eller måske endda ændre retning.



Figur 6.8. Scenarium 97. Ammoniumfluxen i Mariager Fjord (1996-07) når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet. Positive værdier svarer til frigivelse af NH_4^+ fra fjordbunden – negative værdier svarer til optagelse.

Koncentration af NH_4^+ i bunden kunne stige både ved 1) en større nettoproduktion af NH_4^+ , dvs. forskellen mellem NH_4^+ -produktion og forbrug ved hhv. stofomsætning og nitrifikation og 2) alene ved en forøget organisk stofomsætning. Stofomsætningen var ikke forøget i 1997 og 98 snarere tværtimod (Figur 6.4), altså måtte nitrifikationen falde, hvis nettoproduktionen af NH_4^+ skulle stige. Selvom nitrifikationen kunne have mindre betydning for NH_4^+ -forbruget i sommermånederne, fordi iltforholdene ved bunden ofte var dårlige, blev der trods alt dannet NO_3^- i fjordbunden ved nitrifikation. Af samme grund fik de meget alvorlige iltsvind i 1997 og 98 også betydning for nitrifikationen, som i de pågældende år faldt med hhv. 22 og 15% ift. referencescenariet (Figur 6.9). Alt i alt blev der altså fjernet mindre NH_4^+ fra sedimentet ved nitrifikation i 1997 og 98. Derfor steg NH_4^+ -koncentration i fjordbunden, og selvom koncentrationen i bundvandet var ganske høj, strømmede der altså fortsat NH_4^+ ud af bunden og op i vandet.

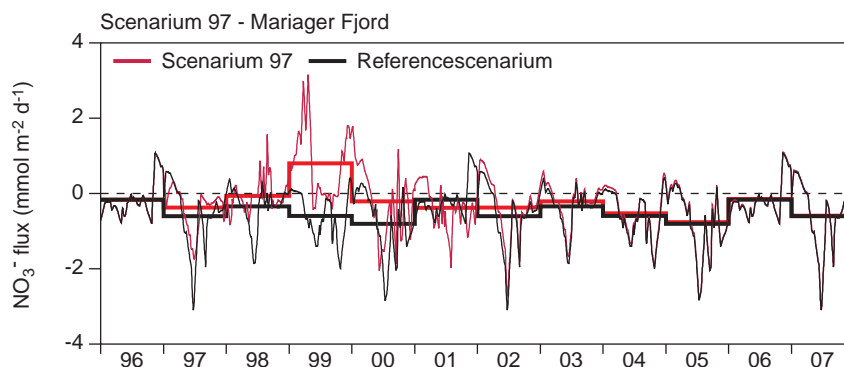
Figur 6.9. Scenarium 97. Ændringen i det årlige gennemsnit for nitrifikationsraten i Mariager Fjord (1996-04) relativt til referencescenariet (se Figur 5.15), når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1.



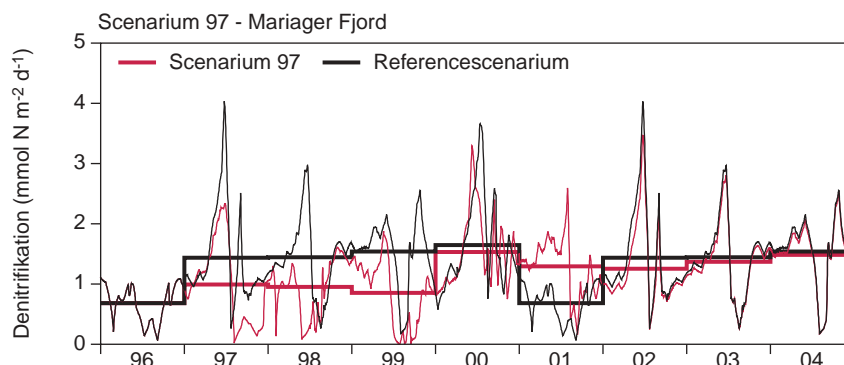
Spørgsmålet er så, om NH_4^+ -fluxen fra fjordbunden kunne føre til den meget høje NH_4^+ -koncentration, som vi observerede i bundvandet? Både ja og nej. Nej – hvis vi mener, at det NH_4^+ , der strømmede ud i bundvandet, blev opblandet i hele vandsøjlen, men i så tilfælde måtte NH_4^+ jo komme et andet sted fra, fx. fra land, og det lyder ikke særlig sandsynligt. Alene det forhold, at iltforholdene ved bunden var dårlige, underbygger vores antagelse om, at der var en meget ringe eller slet ingen opblanding af vandsøjlen. Vi hælder derfor til at besvare spørgsmålet med et "Ja": Det forøgede NH_4^+ indhold i bundvandet kom fra bunden, fordi bundvandet var isoleret fra det ovenstående vand pga. af en springlagsdannelse, som efter al sandsynlighed blev

skabt af de meget rolige vindforhold, der herskede i netop somrene 1997 og 1998.

Nitratkoncentrationen i bundvandet var lav i 1997 og 98 (Figur 6,2D). I efteråret 1997, hvor bundvandet var helt uden O_2 , og fjorden "døde", var der stort set heller ikke NO_3^- tilbage i bundvandet. Vi mener derfor, at NO_3^- i det iltfrie bundvand forsvandt ved denitrifikation, men det er modellen ikke i stand til at påvise, da den så at sige kun "arbejder" nede i fjordbunden. Den lavere NO_3^- -koncentration i bundvandet betød, at fjordbundens NO_3^- -optagelse faldt (Figur 6.10) og dermed også denitrifikationen i bunden (Figur 6.11).



Figur 6.10. Scenarium 97. Nitratfluxen i Mariager Fjord (1996-07) når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet. Positive værdier svarer til frigivelse af NO_3^- fra fjordbunden – negative værdier svarer til optagelse.



Figur 6.11. Scenarium 97. Denitrifikationen i Mariager Fjord (1996-04) når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet.

Efter to år med forringede iltforhold ved bunden (1997 og 98) kom der igen mere ilt i bundvandet (Figur 6.2C). Det førte i 1999 til mere end en fordobling af nitrifikationen i fjordbunden sammenlignet med referencescenariet (Figur 6.9), men med en aftagende rate, indtil nitrifikationen i Scenarium 97 igen var i balance med referencescenariet i 2004. Åbenbart blev der i fjordbunden forbrugt så meget NH_4^+ , at koncentrationen især i forårsmånederne blev lavere end i bundvandet, og fjordbunden begyndte derfor at optage NH_4^+ i foråret. I 1999 var der endda tale om en netto NH_4^+ -optagelse på årsbasis. Den øgede omsætning af NH_4^+ førte til en betydelig produktion af NO_3^- , som blev fjernet fra havbunden dels ved denitrifikation (Figur 6.11), dels ved at NO_3^- forsvandt op i bundvandet, når koncentrationen i bunden

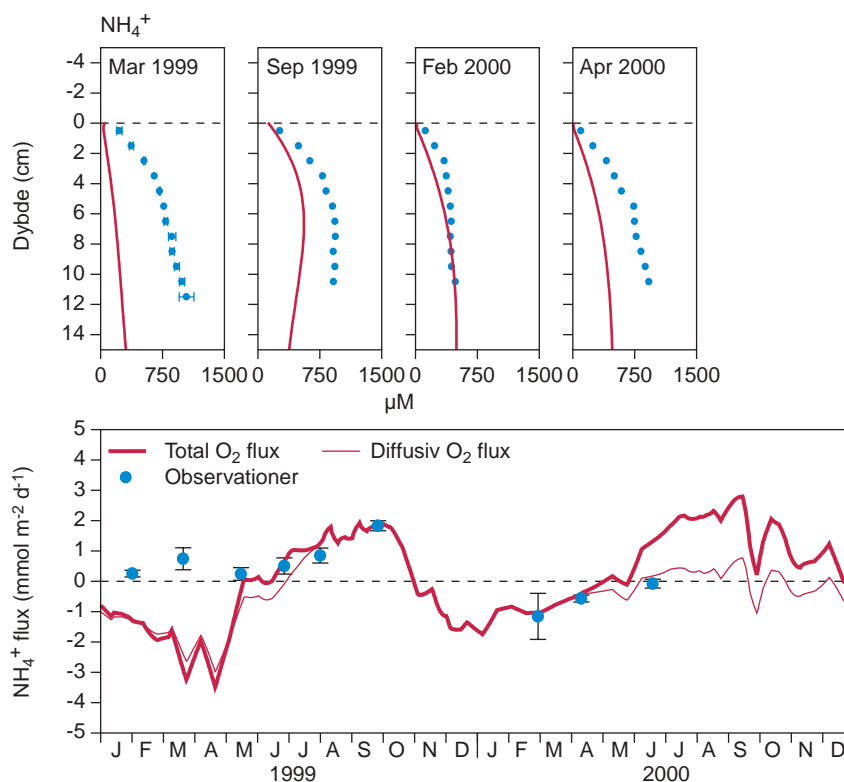
oversteg koncentrationen i vandet, som det var tilfældet i 1999 (Figur 6.10).

I takt med de forbedrede iltforhold ved bunden fra 1999 og fremefter trængte O_2 også længere ned i bunden (se 6.1.2.6 nedenfor); men alligevel aftog nitrifikationen, samtidig med at denitrifikation steg. Med andre ord faldt NO_3^- -koncentrationen i bunden, og NO_3^- -fluxen ændrede igen retning til en NO_3^- -optagelse, hjulpet godt på vej af den højere NO_3^- -koncentration i bundvandet.

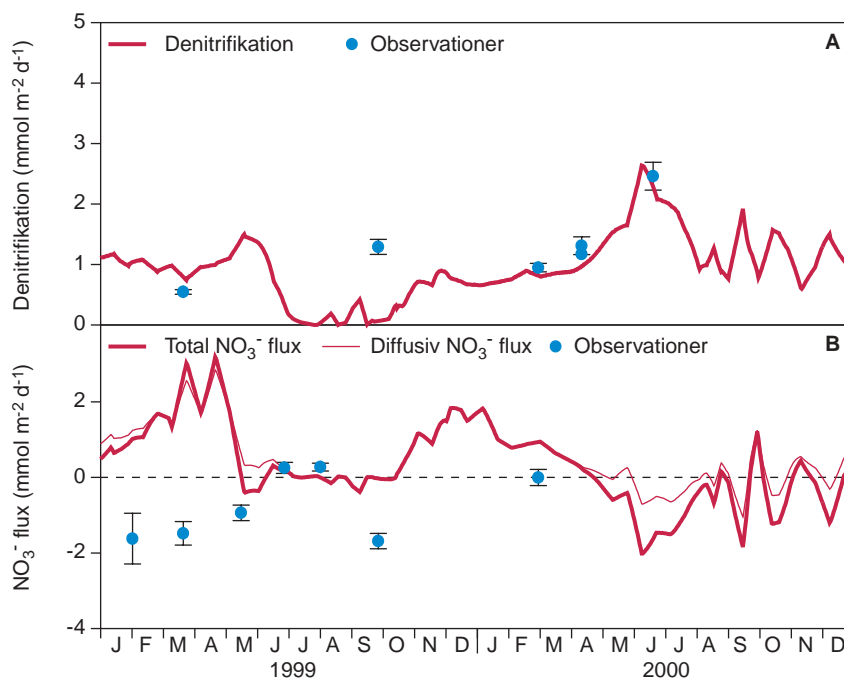
På grund af at indholdet af NO_3^- og NH_4^+ i bundvandet varierede betragteligt mellem 1997 og 2001, er det vanskeligt entydigt at forklare, hvordan de enkelte processer, nitrifikation og denitrifikation samt koblingen imellem disse processer, styrede fluxen af NO_3^- og NH_4^+ ud og ind af fjordbunden. En entydig forklaring på modellens forudsigelser bliver yderligere vanskeliggjort af, at både denitrifikationen og nitrifikationen i afgørende grad blev påvirket af iltkoncentrationen ved og i fjordbunden. Af Tabel 6.1 fremgår det, hvor hurtigt N-fluxene og de tilknyttede processer igen kom i balance med referencescenariet.

Ligesom det var tilfældet for ilt- og kuldioxidfluxene, blev også NH_4^+ og NO_3^- -fluxene målt ved samme lejlighed samtidig med denitrifikationen og NH_4^+ -koncentrationen i fjordbunden. Resultaterne af målingerne er vist på Figur 6.12 og Figur 6.13 sammen med de modellerede værdier. Profilet for NH_4^+ -koncentrationen viste, bortset fra marts 1999-målingen, en god overensstemmelse med de modellerede koncentrationsprofiler, hvilket også var tilfælde for NH_4^+ -fluxen, når vi igen ser bort fra de målte fluxe i februar og marts 1999.

Figur 6.12. Scenarium 97. Målte og modellerede NH_4^+ -koncentrationsprofiler og fluxe i Mariager Fjord. Øverste panel viser de målte koncentrationer (blå punkter) de fem gange, disse er målt, mens de modellerede profiler (rød linie) er vist den 15. kl. 12 middag samme måned. Nederste panel viser den modellerede totale og diffusive NH_4^+ -flux sammenlignet med målte værdier. Bemærk at koncentrationsprofilerne ikke er målt så hyppigt som NH_4^+ -fluxene.



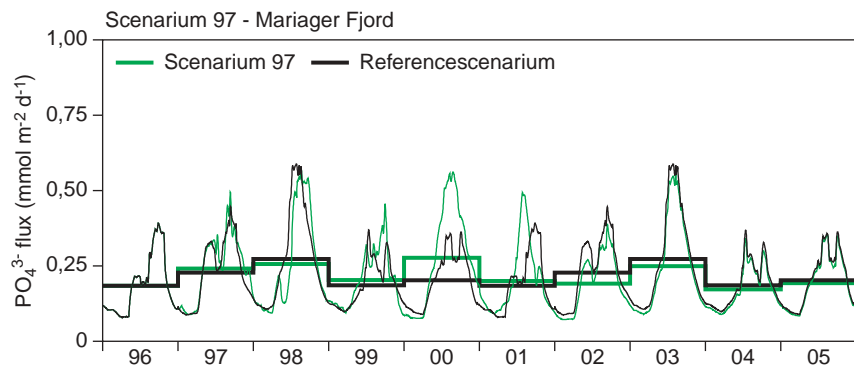
Figur 6.13. Scenarium 97. Målt og modelleret denitrifikationsrate (øverste figur) og NO_3^- -flux (nederste figur) i Mariager Fjord, hvor positive flux-værdier svarer til frigivelse af NO_3^- fra fjordbunden – negative værdier svarer til optagelse.



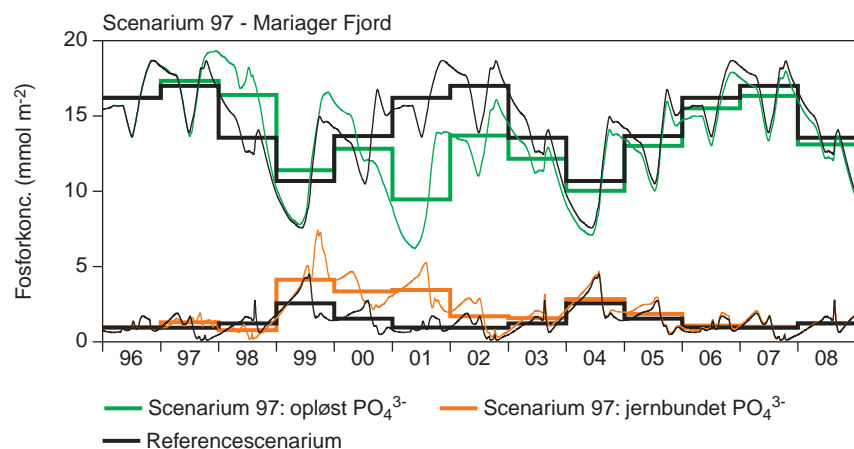
Også når det drejede sig om verifikation af denitrifikationsraterne, var der, det sparsomme antal observationer taget i betragtning, en god overensstemmelse mellem de målte og de modellerede rater. Til gengæld faldt den målte NO_3^- -flux noget ved siden af de modellerede værdier. Generelt viste målingerne en NO_3^- -optagelse, mens de modellerede resultater snarere tydede på en (mindre) NO_3^- -afgivelse. Man kan vel derfor med nogen ret diskutere, hvor godt modellen er i stand til at reproducere NO_3^- -fluxen, men man kan faktisk med ligeså god ret diskutere, om den målte NO_3^- -flux repræsenterede den virkelige *in situ* flux. Ved en laboriemåling kan NO_3^- -fluxen nemlig afvige fra *in situ* fluxen – ja, endda ændre sig fra en NO_3^- -afgivelse til en NO_3^- -optagelse, hvis blot koncentrationen i bundvandet stiger så meget, at den nedadrettede koncentrationsgradient overstiger koncentrationsgradienten mellem bunden og bundvandet. Hvis dette var tilfældet ved fluxmålingerne, der skulle bruges til at verificere de modellerede NO_3^- -fluxe i Scenarium 97, ja, så ville de målte værdier selvfølgelig falde ved siden af de modellerede resultater.

6.1.2.5 Fosfatflux og fosfatpuljer

Fosfatfluxen var stor set uforandret ($\pm 5\%$) i Scenarium 97 sammenlignet med referencescenariet bortset fra 2000, hvor fluxen var forøget med omkring 35% (Figur 6.14). Ligesom det var tilfældet for NH_4^+ -koncentrationen, var også PO_4^{3-} -koncentrationen i bundvandet betydeligt forøget i 1997-99 (Figur 6.2F). For at opnå den samme PO_4^{3-} -flux i Scenarium 97 som i referencescenariet måtte PO_4^{3-} koncentrationen i fjordbunden derfor være forøget i 1997-99, ellers ville PO_4^{3-} -fluxen have været mindre eller endda måske have resulteret i en PO_4^{3-} -optagelse. At PO_4^{3-} -puljen i fjordbunden rent faktisk også var forøget fra 1997 til 1999 ift. referencescenariet ses på Figur 6.15, tydeligst i 1998, hvor PO_4^{3-} -indholdet oversteg referencescenariet med mere end 20%. Med samme argumentation som vi brugte for NH_4^+ -forøgelsen i bundvandet (se 6.1.2.4), påstår vi, at den forøgede PO_4^{3-} -koncentration i bundvandet skyldtes frigivelse af PO_4^{3-} fra fjordbunden, som i sidste ende blev udløst af de forringede iltforhold i fjorden.



Figur 6.14. Scenarium 97. Fosfatfluxen i Mariager Fjord (1996-05) når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet. Positive værdier svarer til frigivelse af PO_4^{3-} fra fjordbunden.



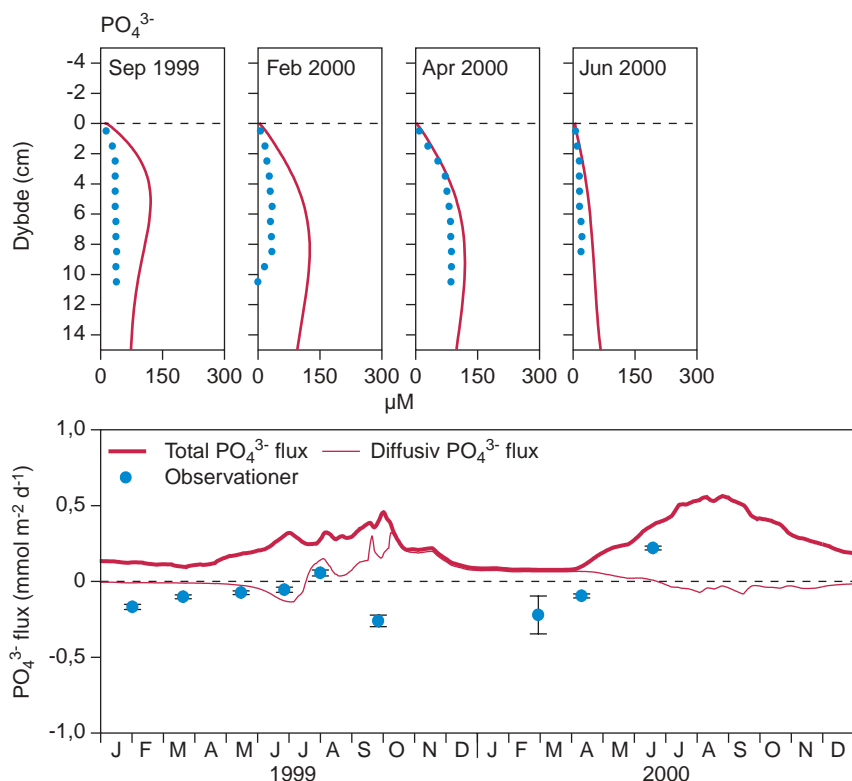
Figur 6.15. Scenarium 97. Udviklingen af hhv. opløst PO_4^{3-} i porevandet og letopløseligt jernbundet PO_4^{3-} i de øverste 20 cm af fjordbunden i Mariager Fjord (1996-08) når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet.

De forbedrede iltforhold i bundvandet førte i 2000 og 2001 til, at puljen af oxideret jern steg og derfor bandt en større del af det PO_4^{3-} , der var opløst i porevandet (Figur 6.15). Puljen af PO_4^{3-} i bunden af fjorden blev derfor reduceret ift. referencescenariet med op til 40%. Samtidig faldt koncentrationen af PO_4^{3-} i bundvandet, men i 2000 relativt mindre end koncentrationen i fjordbunden. Koncentrationsforskellen mellem porevandet og bundvandet blev derfor markant større, hvilket altså resulterede i, at PO_4^{3-} -fluxen i 2000 steg med de ovenfor omtalte 35%. I 2001 faldt puljen af PO_4^{3-} i porevandet med yderligere 25%, hvilket resulterede i en lavere PO_4^{3-} -flux, fordi PO_4^{3-} koncentrationen i bundvandet i Scenarium 97 stort set ikke ændrede sig fra 2000 til 2001. På den måde matchede PO_4^{3-} -fluxen i de to scenarier i 2001 stort set hinanden. Fosfatfluxen og PO_4^{3-} -puljen kom igen i balance med referencescenariet i 2005, mens det tog 3 år længere for den jernbundne PO_4^{3-} -pulje (Tabel 6.1).

Figur 6.16 viser PO_4^{3-} -koncentrationen i fjordbunden og fluxen, som de blev målt i 1999 og 2000 og siden modelleret. De målte koncentrationer af opløst PO_4^{3-} i fjordbunden stemte rimeligt godt overens med

de modellerede koncentrationsprofiler, derimod var der en lidt større uoverensstemmelse mellem de målte og modellerede PO_4^{3-} -fluxe. På det område delte PO_4^{3-} -fluxen så at sige skæbne med NO_3^- -fluxen (se Figur 6.13), selvom den modellerede PO_4^{3-} -flux "ramte" den modellerede flux bedre, end det var tilfældet for NO_3^- . Kigger vi nærmere på de målte PO_4^{3-} -profiler (Figur 6.16), viser profilernes krumning, at der må være tale om en opadrettet PO_4^{3-} -flux og dermed PO_4^{3-} -afgivelse fra fjordbunden. Imidlertid modsvares denne konklusion af de reelle PO_4^{3-} -fluxmålinger, som viste en PO_4^{3-} -optagelse i fjordbunden. Ligesom det var tilfældet ved laboratoriemålingerne af NO_3^- -fluxen, kan vi forklare uoverensstemmelsen mellem den PO_4^{3-} -flux, vi modellerede ud fra koncentrationsprofilerne, og den PO_4^{3-} -flux, der blev målt i laboratoriet. Fordi PO_4^{3-} -fluxen var så tæt på 0, som det var tilfældet i Mariager Fjord, var fluxen meget følsom over for selv små ændringer i PO_4^{3-} -koncentrationen i bundvandet. En PO_4^{3-} -flux som *in situ* svarede til en svag PO_4^{3-} -afgivelse fra fjordbunden, kunne derfor ved bestemmelsen i laboratoriet hurtigt ændre sig til en PO_4^{3-} -optagelse, hvis bundvandet, dvs. det vand, der blev brugt ved laboratoriemålingen, af en eller anden grund blot havde en lidt højere PO_4^{3-} -koncentration, end der var *in situ*.

Figur 6.16. Scenarium 97. Målte og modellerede PO_4^{3-} -koncentrationsprofiler og fluxe i Mariager Fjord. Øverste panel viser de målte koncentrationer (blå punkter) de fire gange, disse er målt, mens de modellerede profiler (rød linie) er vist den 15. kl. 12 middag samme måned. Nederste panel viser den modellerede totale og diffusiv PO_4^{3-} -flux sammenlignet med målte værdier. Bemærk at koncentrationsprofilerne ikke er målt så hyppigt som PO_4^{3-} -fluxene.

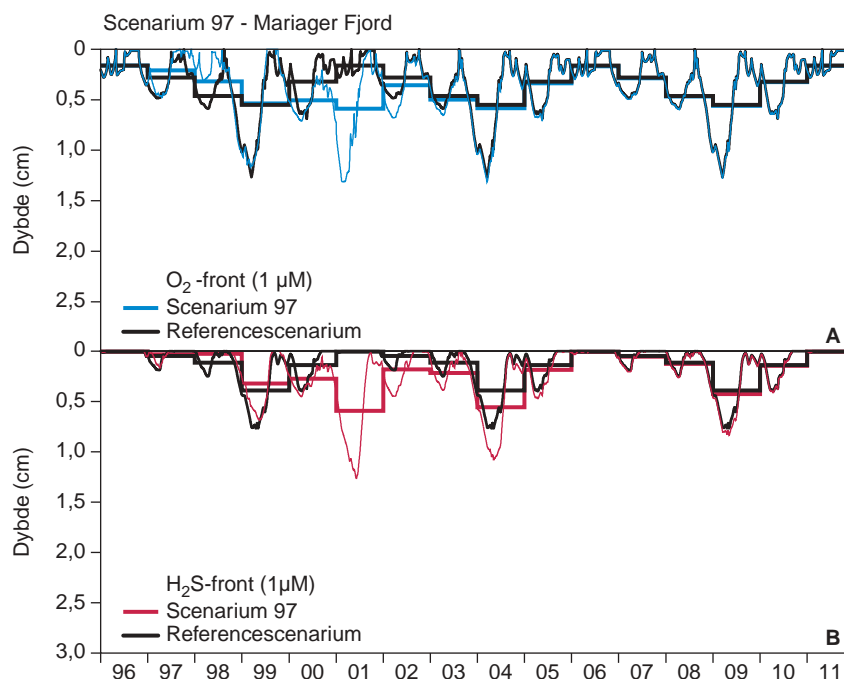


6.1.2.6 Ilt- og svovlbrintefronten

Iltnedtrængningen reagerede med det samme på iltforholdene ved bunden. I august 1997, hvor Mariager Fjord døde, var der naturligvis ingen ilt i og ved bunden, og pga. en ophobning af iltforbrugende stoffer i fjordbunden blev det ilt, der var tilført bunden i løbet af 1998, brugt så hurtigt, at O_2 i gennemsnit kun trængte omkring 3 mm ned (Figur 6.17A). De forbedrede iltforhold i 2000 og 2001 havde omvendt en positiv effekt på iltforholdene i bunden, hvor O_2 de pågældende år trængte hhv. 5 og 6 mm ned i fjordbunden. Ilt reagerer med H_2S , og de to fronter, hhv. O_2 og H_2S påvirkede derfor gensidigt hinandens

dybdeplacering i fjordbunden. Det kan derfor heller ikke undre, at H_2S i 1997 og 1998 nåede helt op til, ja ofte op i bundvandet (Figur 6.17B). Først i takt med at iltforholdene i 2000 og 2001 blev forbedret, trængte O_2 længere ned i bunden og skubbede så at sige H_2S -fronten længere ned i fjordbunden.

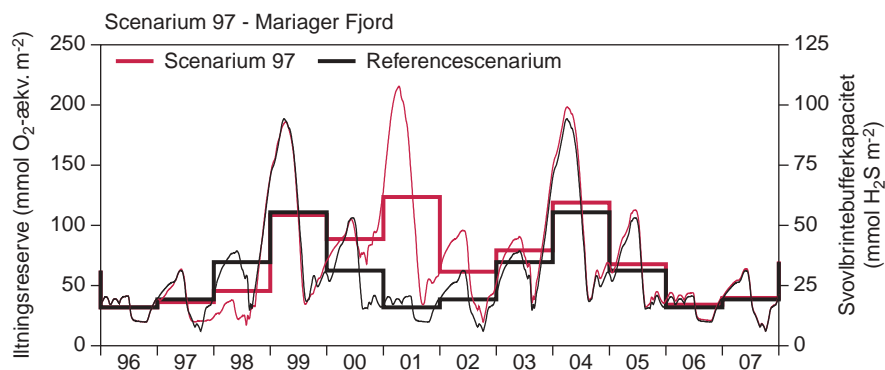
Iltnedtrængningen reagerede som sagt både på iltforholdene ved bunden og de iltforbrugende processer øverst i fjordbunden. Iltfronten kom derfor i balance med referencescenariet samtidig med iltfluxen, dvs. i 2006 (Tabel 6.1). Svovlbrintefronten indstillede sig langsommere, fordi H_2S -produktionen afhæng af processer dybere i sedimentet, så først i 2011 var der balance mellem Scenarium 97 og referencescenariet.



Figur 6.17. Scenarium 97. O_2 -frontens placering ($1 \mu M$ isoplethen) (A) og H_2S -frontens placering (B) i bunden af Mariager fjord når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet.

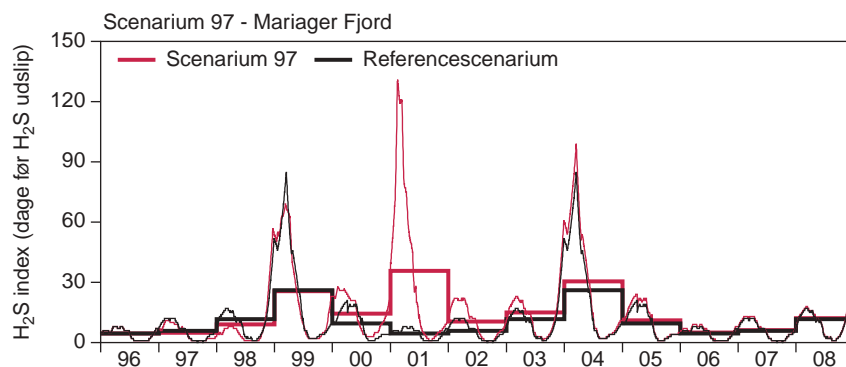
6.1.2.7 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

I Mariager Fjord var iltningsreserven allerede meget lav hvert efterår (Figur 5.22), så derfor fik det alvorlige iltsvind i 1997 ikke større effekt på iltningsreserven netop det år (Figur 6.18). Først i 1998 var iltningsreserven betydeligt reduceret sammenlignet med referencescenariet, fordi der i løbet af vinteren ikke fandt en tilstrækkelig geniltning sted af de reducerede forbindelser, der var dannet i løbet af 1997, og som var så vigtig for at genoprette iltningsreserven i fjordbunden. Først da iltindholdet ved fjordbunden i 1999 igen blev højt nok til at genilte fjordbunden i tilstrækkeligt omfang, steg iltningsreserven og kom atter i balance med referencescenariet i 2007 (Tabel 6.1).



Figur 6.18. Scenarium 97. Iltingsreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Mariager Fjord når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet.

Den lave iltingsreserve kombineret med en betydelig H_2S -produktion (Tabel 5.1) betød, at fjordbunden kun i ringe grad var i stand til at holde på H_2S , og H_2S -indexet var derfor meget lavt (Figur 6.19). Det afslørede vi allerede, da vi diskuterede referencescenariet (Figur 5.22), og det bekræftes igen her, hvor det ses, at H_2S -indexet i referencescenariet åbenbart var så lavt, at selv det alvorlige iltsvind i 1997 og eftervirkningerne deraf næsten ikke var i stand til at reducere H_2S -indexet yderligere. Først da de reducerede stoffer var genillet, steg H_2S -indexet betydeligt og kom i balance med referencescenariet i 2008.

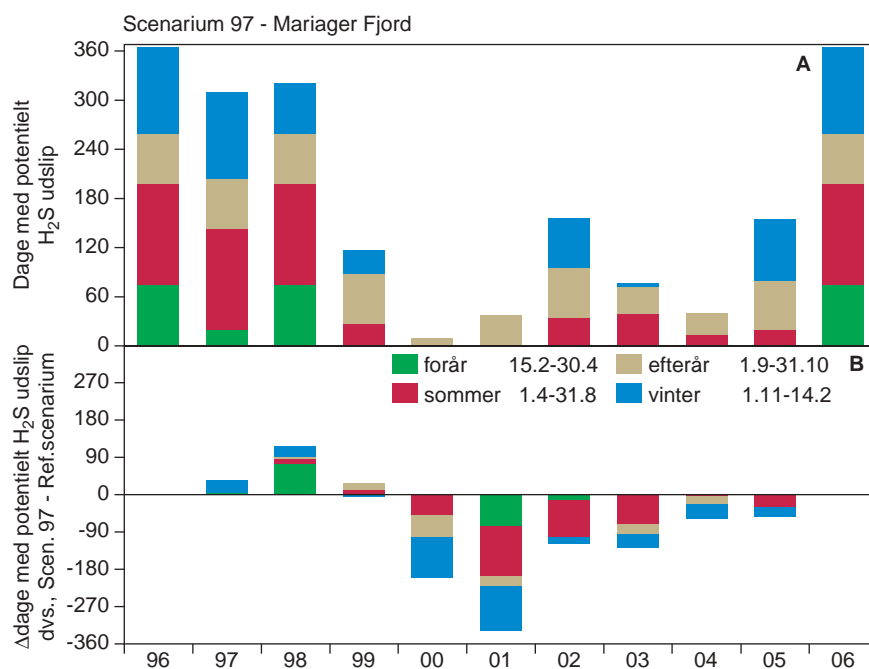


Figur 6.19. Scenarium 97. H_2S -indexet, dvs. antallet af dage, fjordbunden i Mariager Fjord er i stand til at tilbageholde produktionen af H_2S og dermed hindrer H_2S udslip, når input til modellen ændres som vist på Figur 6.1. De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet.

Sidst, men ikke mindst, betød iltsvindet i 1997, at modellen for de efterfølgende år beregnede flere dage med potentielt H_2S -udslip, dvs. dage, hvor H_2S -fronten var < 1 mm i at nå op til bundvandet (Figur 6.20A). Iltsvindet i august 97 øgede umiddelbart risikoen for, at H_2S slap ud i bundvandet i løbet af vinteren 97/98 og hele det efterfølgende år (Figur 6.20B). Af Figur 6.20B fremgår det, at der i efteråret 1998 ikke skete en forøgelse af antallet af dage med potentielt H_2S -udslip, men det skyldtes alene, at det ikke var muligt at forøge antallet, da der iflg. referencescenariet allerede var mulighed for H_2S -udslip i alle efterårets 61 dage. Først i forbindelse med de forbedrede iltforhold ved bunden reduceres antallet af dage med H_2S -udslip, hvilket på Figur 6.20B ses af de nedadrettede søjler.

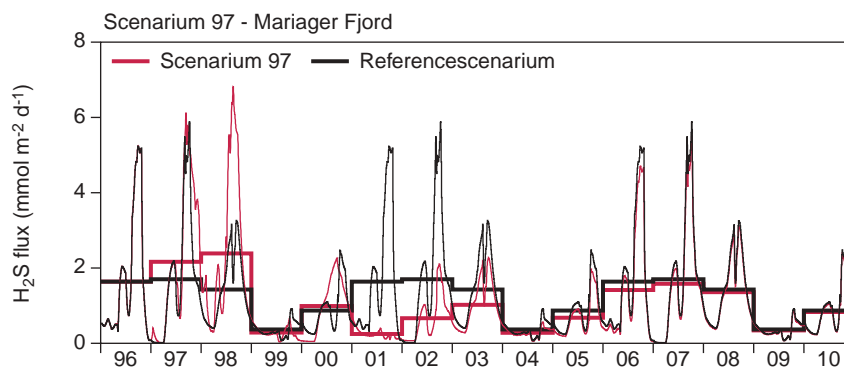
Figur 6.20. Scenarium 97.

(A) Det potentielle H_2S -udslip, dvs. antallet af dage, hvor H_2S -fronten ligger < 1 mm fra sedimentoverfladen - Mariager Fjord 1999-06. (B) Forskellen mellem Scenarium 97 og referencescenariet, hvor positive værdier viser en stigning i antallet af dage med potentielt H_2S -udslip, og negative værdier viser et fald. Antallet af dage med potentielt H_2S -udslip er fordelt på årstiderne, hhv. forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10) og vinter (1.11–14.2; det flg. år).

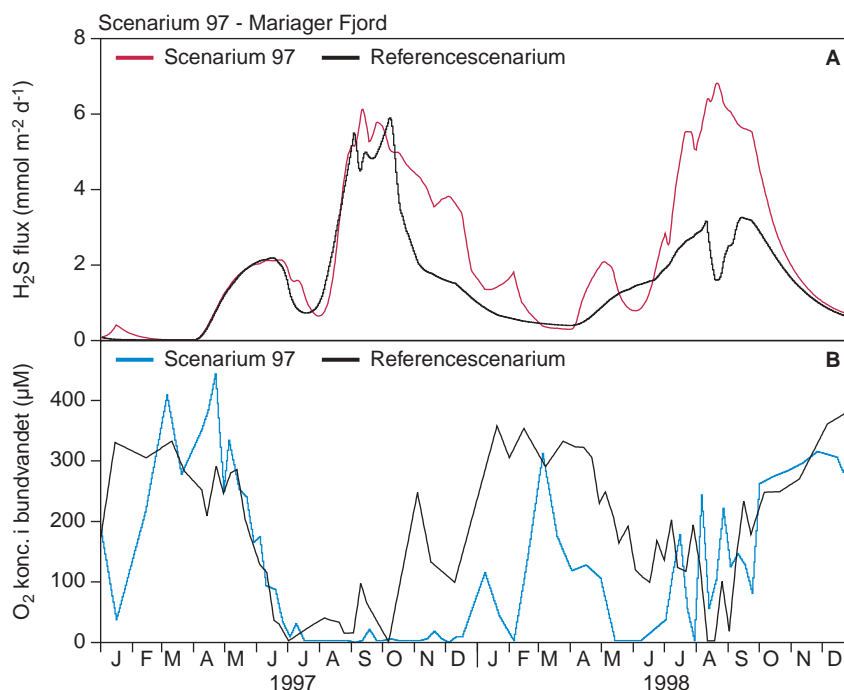


6.1.2.8 Sulfidpuljer og H_2S -udslip fra bunden

Når vi vurderer betydningen af Scenarium 97 for H_2S -udslip fra bunden, tyder ovenstående betragtninger på, at vi især bør koncentrere os om årene 97 og 98. Det kommer derfor heller ikke som en overraskelse, at modellen beregner et forøget udslip af H_2S netop disse to år (Figur 6.21 og Figur 6.22). Faktisk fortæller referencescenariet, at der ville komme et betydeligt udslip af svovlbrinte i sensommeren og efteråret 1997 (august–oktober) under de betingelser, der var opstillet for dette scenarium. Input til Scenarium 97 lignede referencescenariet i hver fald frem til midt på sommeren 97 (Figur 6.2), men fra august måned afveg Scenarium 97 fra referencescenariet, idet al ilten forsvandt fra bundvandet, fordi der opstod en stabil lagdeling af vandsøjlen – det skete ikke i lige så udtalt grad i referencescenariet (Figur 6.22B). Det var iltsvindet i sensommeren og efteråret 1997, der var den egentlige årsag til, at H_2S -udslippet fik lov til at udvikle sig så voldsomt, hvilket yderligere gav næring til et betydeligt forbrug af O_2 i vandet. Først helt fremme i december var der igen O_2 i bundvandet, som i nogen grad var med til at ilte H_2S , i samme øjeblik, det slap ud i bundvandet, og derved blev H_2S -udslippet begrænset. Den høje H_2S -produktion i fjordbunden kombineret med en manglende geniltning af de reducerede forbindelser i fjordbunden i vinteren 97/98 (se diskussionen ovenfor) betød, at fjordbunden var disponeret for et forøget iltforbrug i 1998. I 1998 var sandsynligheden for et meget alvorligt iltsvind faktisk derfor endnu større end i 1997. At iltsvindet alligevel ikke indtraf skyldes, at der åbenbart var en tilstrækkelig O_2 -tilførsel til fjordbunden gennem sommeren, hvilket modvirkede, at hele vandsøjlen blev ”fyldt” med H_2S , selvom H_2S -fluxen var større i 1998 end i 97. De meget bedre iltforhold i Mariager Fjord specielt i 2000 og 2001 betød, at H_2S -fluxen i 2001 var 85% lavere end i referencescenariet, men først i 2010 var de to scenarier i balance, hvad angår H_2S -fluxen.



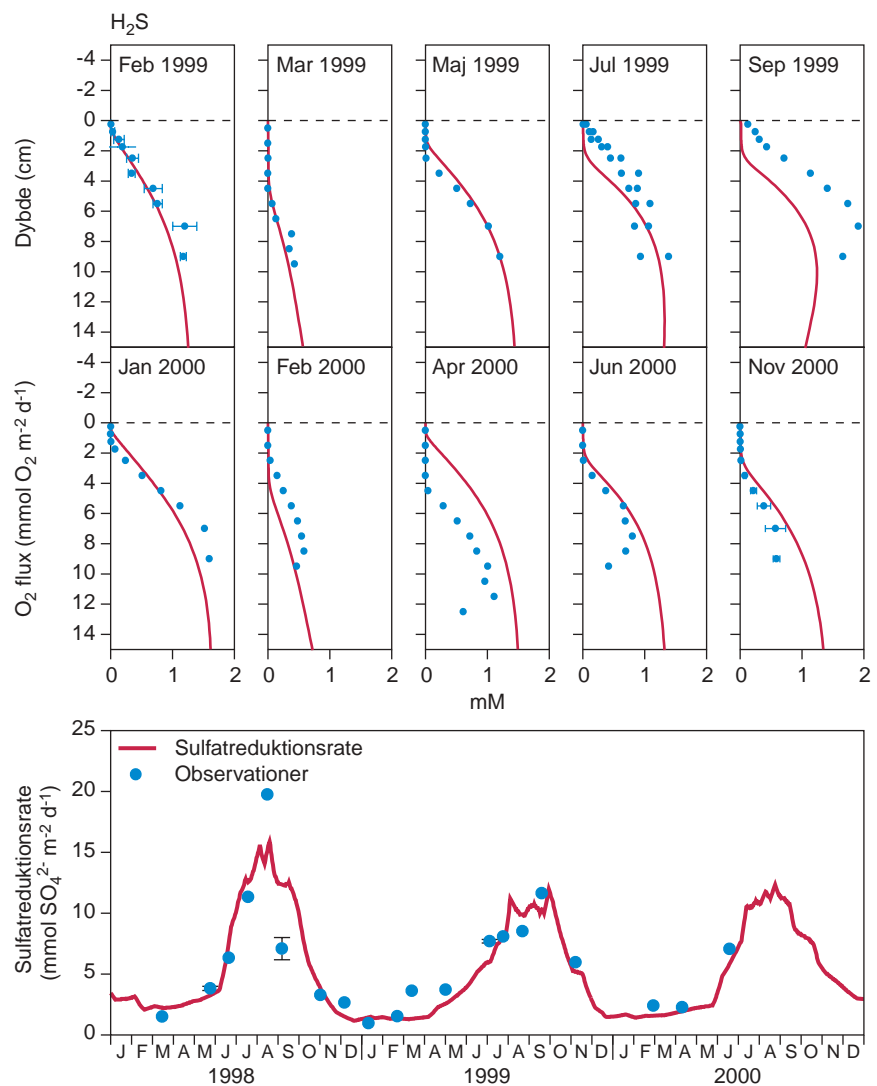
Figur 6.21. Scenarium 97. H₂S-fluxen i Mariager Fjord (1996-10). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 97 og referencescenariet. Positive værdier svarer til frigivelse af H₂S fra fjordbunden.



Figur 6.22. Scenarium 97 - Mariager Fjord (1997 og 98). (A) H₂S-fluxen i sammenlignet med referencescenariet. (B) O₂-koncentrationen i bundvandet sammenlignet med referencescenariet.

Observationer af svovlbrinteproduktionen, også kaldet sulfatreduktionsraten, og koncentrationen af H₂S i fjordbunden blev målt flere gange i løbet af den treårige periode fra 1998 til 2000. Både den målte sulfatreduktionsrate og H₂S-koncentrationsprofilerne stemte meget fint overens med den modellede rate (Figur 6.23), og modellen bekræftede på den måde tydeligt de målte rater og koncentrationer.

Figur 6.23. Scenarium 97. Målte og modellerede H_2S -koncentrationsprofiler og sulfatreduktionsrater i Mariager Fjord. Øverste panel viser de målte koncentrationer (blå punkter) de ti gange, disse er målt, mens de modellerede profiler (rød linie) er vist den 15. kl. 12 middag samme måned. Nederste panel viser den modellerede sulfatreduktionsrate (dvs. H_2S -produktion) sammenlignet med målte værdier. Bemærk at koncentrationprofilerne ikke er målt så hyppigt som sulfatreduktionsraterne.



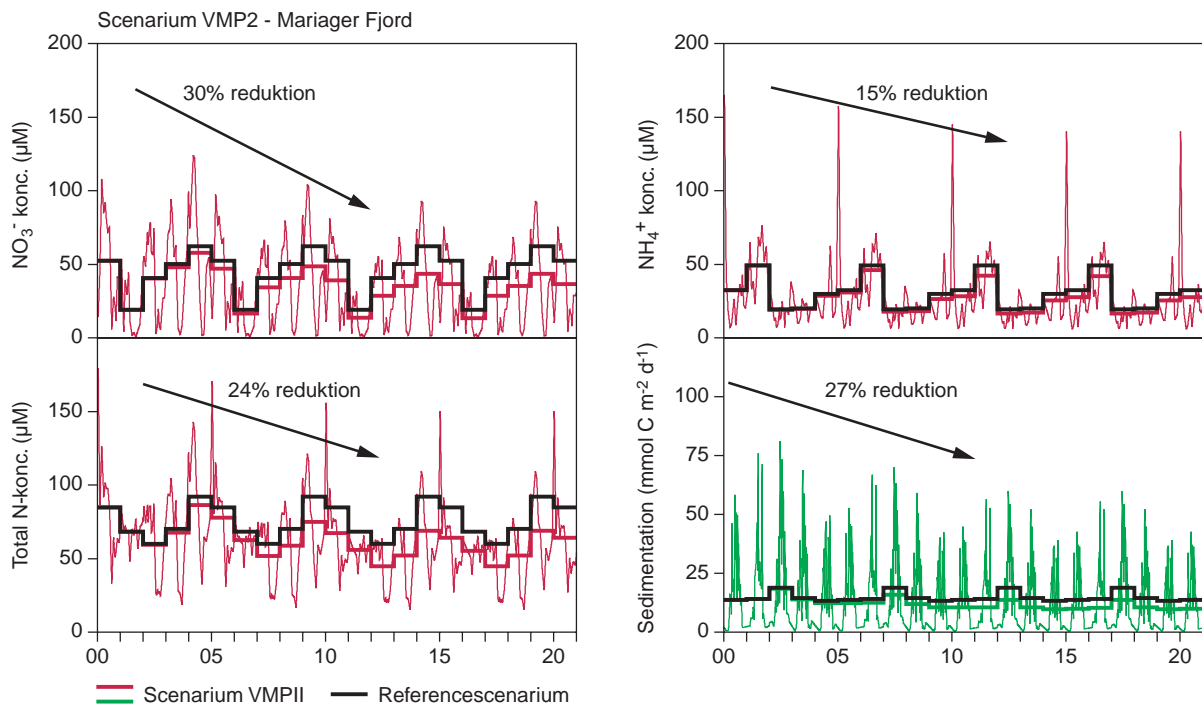
6.2 Scenarier, der beskriver effekterne af at nedsætte koncentrationen af næringsstoffer i Mariager Fjord og reducere tilførslen af organisk stof til bunden

Resume: Scenarium VMP2 og Scenarium 70 25 beskriver begge to, hvordan fjordbunden reagerer, hvis koncentrationen af kvælstof og fosfor i vandsøjlen nedsættes, og den organiske stofstoftilførsel til fjordbunden reduceres. I Scenarium VMP2 nedsættes den totale kvælstofkoncentration i vandet med 24% i perioden 1.1.2002–31.12.2011, hvilket forventes at svare til effekten af Vandmiljøplan II, hvor kvælstoftilførslen fra land reduceres med 50%. I Scenarium 70 25 er den totale kvælstofkoncentration reduceret med 42%, og fosforkoncentrationen er reduceret med 18% over en tiårig periode. Denne betydelige næringsstofreduktion forventes at indtræffe, hvis næringsstofbelastningen fra land reduceres med 70% og 25% for hhv. kvælstof og fosfor. I begge scenarier resulterede den nedsatte næringsstofbelastning i en mindre primærproduktion og dermed også en reduceret sedimentation af organisk stof til bunden af fjorde på hhv. 27% og 60% for Scenarium VMP2 og 70 25. Produktionen af CO₂ i bunden af fjorden faldt i takt med, at sedimentationen af organisk stof til bunden aftog, og efterhånden som effekten forplantede sig længere og længere ned i bunden, faldt CO₂-fluxen også. Fjordbun-

dens iltoptagelse reagerede ikke nær så markant på den nedsatte organiske belastning som CO_2 -fluxen, fordi en relativt større del af fjordbundens reducerede forbindelser, primært H_2S og jernsulfider, brugte en stadig større andel af fjordbundens iltoptagelse til deres egen oxidation. Reduktionen i den organiske stoftilførsel til bunden af Mariager Fjord førte trods alt til en mindre iltoptagelse i bunden, og det betød, at et iltsvind i bundvandet ville kunne forsinkes i yderligere op til 12 dage, ift. situationen før næringsstofbegrænsningen, og hvor et iltsvind i sommermånederne sædvanligvis optrådte 3–7 dage efter, at O_2 -tilførslen til bunden blev afbrudt. Den interne belastning af fjorden med kvælstof og fosfor, dvs. fluxen mellem bunden og vandet, faldt også efterhånden som næringsstofbelastningen af fjorden aftog. Den største effekt blev opnået i Scenarium 70 25, hvor den interne N- og P-belastning aftog med hhv. 45% og 50%, mens reduktionen i Scenarium VMP2 var mere begrænset, nemlig 2% for kvælstof og 22% for fosfor. Det viste sig, at både NO_3^- -optagelsen og NH_4^+ -afgivelsen faldt, men altså med den samlede effekt at den totale interne N-belastning aftog. Den lavere NO_3^- -koncentration i vandfasen kombineret med en mindre NO_3^- -optagelse i bunden, lavere NH_4^+ -produktion og stort set uændret nitrifikation betød samlet set, at denitrifikationen i fjordbunden faldt med op til omkring 60% i Scenarium 70 25. Reduktionen i PO_4^{3-} -fluxen var en effekt af, at der både blev produceret mindre PO_4^{3-} i bunden som følge af den mindre sedimentation, og at der samtidig blev bundet mere PO_4^{3-} til den jernpulje, som efterhånden blev opbygget i sedimentet, fordi overfladesedimentet blev mere og mere oxideret. Produktionen af H_2S i bunden af Mariager Fjord faldt, ikke kun fordi der blev tilført mindre organisk stof til bunden, men også fordi en relativt mindre del af det organiske stof blev nedbrudt af H_2S -producerende bakterier. Den reducerede næringsstofbelastning af fjorden medførte derfor, at ilten trængte længere ned i fjordbunden og så at sige skubbede H_2S dybere ned. Effekten af de forbedrede oxidationsforhold i fjordbunden og den lavere H_2S -produktion betød, at sandsynligheden for hyppige og alvorlige H_2S -udslip fra bunden blev markant nedsat, men forsvandt ikke helt, idet H_2S -fluxen til bundvandet over en tiårig periode i gennemsnit var reduceret med 54% og 90% i hhv. Scenarium VMP2 og 70 25. Efter at næringsstoffreduktionen var gennemført (efter 2011), kunne man observere, at fjordbunden i sommermånederne i gennemsnit kunne holde på produktionen af H_2S i helt op til 15 dage (Scenarium 70 25), hvilket var en klar forbedring ift. den tidligere situation, hvor sedimentet kun kunne tilbageholde H_2S produktionen i 1–3 dage. I Scenarium VMP2 blev bundens evne til at tilbageholde H_2S -produktionen kun forøget med et par dage.

6.2.1 Input til Scenarium VMP2 og Scenarium 70 25

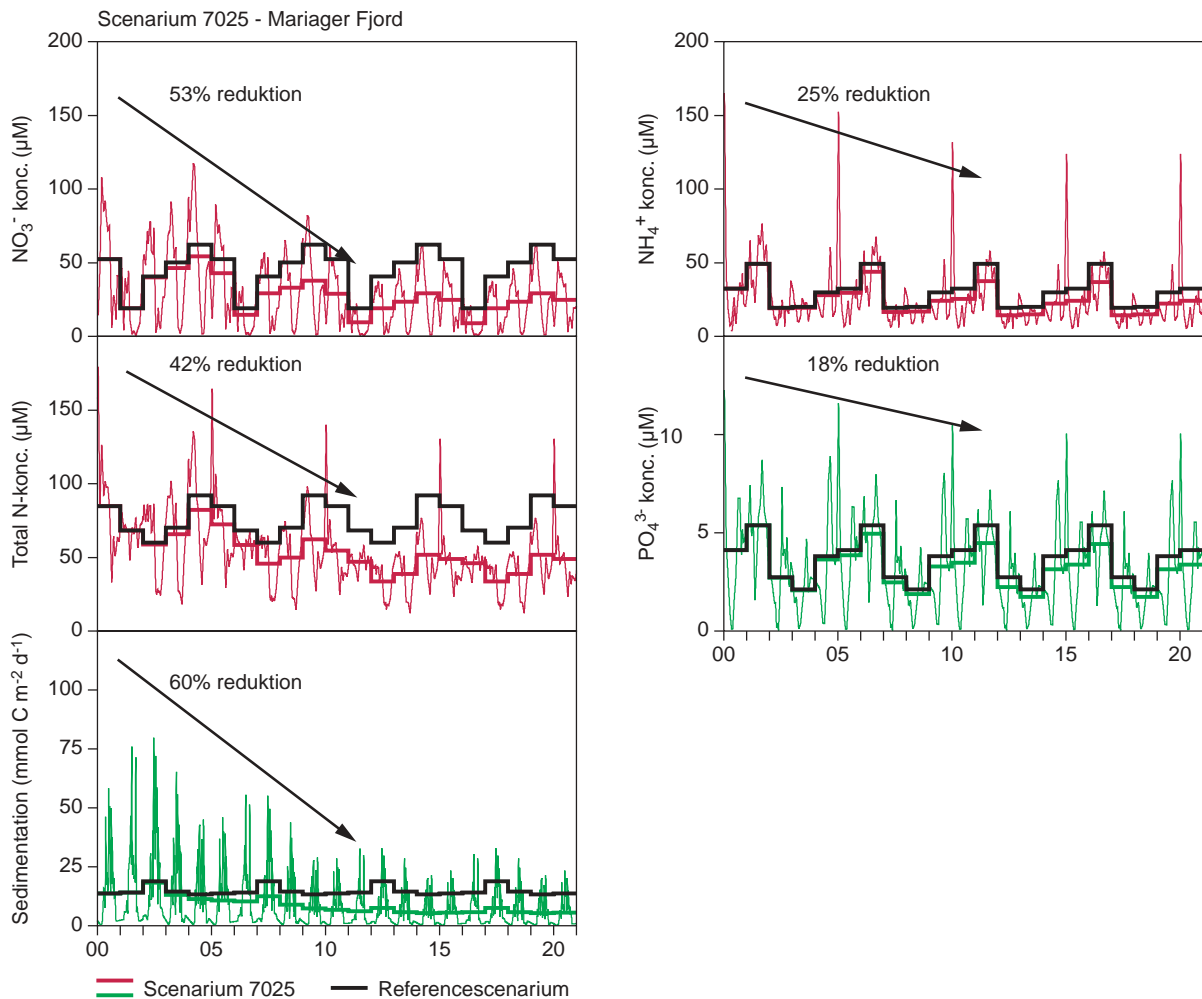
I Scenarium VMP2 har Århus Amt og Nordjyllands Amt vurderet, at hvis kravene til Vandmiljøplan II vedr. N-belastningen fra land gennemføres, dvs. nedsættes med 50%, vil koncentrationen af NO_3^- og NH_4^+ i fjorden falde til hhv. 70% og 85% af referencescenariet (Figur 6.24). Dette svarer til en samlet kvælstofreduktion i Mariager Fjord på ca. 24% og vil anslået resultere i en 27% nedgang i primærproduktionen og sedimentationen. Både i dette scenarium og Scenarium 70 25 forudsættes det, at disse ændringer sker lineært over en tiårig periode fra 1.1.2002 og 31.12.2011.



Figur 6.24. Scenarium VMP2. Bundvandskoncentrationer af hhv. nitrat, ammonium og total N samt sedimentationen af organisk stof i Mariager Fjord 2000-21. Næringsstofkoncentrationen nedsættes lineært i tidsrummet 1.1.2002 til 31.12.2011 for derefter at fortsætte med reduceret koncentration frem til 2021 (se afsnit 6.2.1). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium VMP2 og referencescenariet (se Figur 5.3, 5.6 og 5.7).

I Scenarium 70 25 medfører næringsstofforøgningen i Mariager Fjord, at de aktuelle koncentrationer af NO_3^- , NH_4^+ og PO_4^{3-} falder med hhv. 53%, 25% og 18 % (Figur 6.25). Det svarer til en samlet N-reduktion i fjorden på 42% og et lineært fald i primærproduktionen og sedimentationen på 60%.

Ligesom det også var tilfældet i Scenarium 97, er så mange input-parametre ændret i Scenarierne VMP2 og 70 25, at det ikke er muligt præcist at afgøre, hvor stor en effekt ændringen af de enkelte input har på udfaldet af modellens beregninger (dvs. output).



Figur 6.25. Scenarium 70 25. Bundvandskoncentrationer af hhv. nitrat, ammonium, total N og fosfat samt sedimentationen af organisk stof i Mariager Fjord 2000-21. Næringsstofkoncentrationen nedsættes lineært i tidsrummet 1.1.2002 til 31.12.2011 for derefter at fortsætte med reduceret koncentration frem til 2021 (se afsnit 6.2.1). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium 70 25 og referencescenariet (se også Figur 5.3, 5.6 og 5.7).

6.2.2 Output fra Scenarium VMP2 og Scenarium 70 25

Nedenfor er modellens forudsigelser vedr. effekten af en reduktion i næringsstofftilførslen diskuteret i relation til referencescenariet. Vi ved fra gennemgangen af handlingsscenerierne i Århus Bugt, hvor vanskeligt det kan være at sammenligne handlingsscenerier med referencescenariet, når vi alene ser på de direkte output. I sådanne situationer benytter vi samme præsentationsteknik af modellens forudsigelser som i Kapitel 4 og viser i stedet for det relative forhold (F_j)

mellem de to scenarier, dvs. $F_j = \frac{S_j}{R_j}$, hvor S_j og R_j er værdien af output for en bestemt parameter til datoen j for hhv. handlingssceneriet og referencescenariet.

Der er som skrevet en stor lighed mellem Scenarium VMP2 og Scenarium 70 25, idet begge scenarier forudsiger effekten af en reduktion i næringsstofftilførslen til Mariager Fjord. For at kunne foretage en di-

rekte sammenligning, har vi derfor valgt at vise den tidlige udvikling for begge scenarier på en og samme figur dog oftest opdelt f.eks. som figur A og B for hhv. Scenarium VMP2 og Scenarium 70 25. Resultaterne af de to scenarier er også sammenfattet i Tabel 6.2.

Tabel 6.2A. Effekt af nedsat næringsstofbelastning af Mariager Fjord ved to handlingsscenarier. Scenarium VMP2 beskriver en 50%-reduktion af kvælstof belastningen fra land, som forventes iflg. Vandmiljøplan II, mens Scenarium 70 25 viser effekten af en optimal reduktion af næringsstofftilførslen fra land til fjorden på 70% og 25% for hhv. belastningen med kvælstof og fosfor. Næringsstofbelastningen forudsættes at falde lineært i perioden 2002-2011. Perioden 1992-2001 beskriver Mariager Fjords nuværende miljøtilstand, og perioden 2012-2021 viser den forventede miljøtilstand efter, begrænsningen af næringsstofftilførslen til fjorden er gennemført. Alle værdier er vist som gennemsnittet af 10 års middelværdier fra sediment-flux modellen ($\pm \sigma$; n=10).

Parameter		1992-2001		2002-2011		2012-2021					
				VMP2	70 25	VMP2	70 25				
Fluxe											
O ₂ flux	mmol m ⁻² d ⁻¹	-9,98	(4,13)	-9,61	(4,13)	-9,10	(4,21)	-8,53	(3,78)	-6,45	(3,20)
CO ₂ flux	mmol m ⁻² d ⁻¹	13,68	(1,78)	12,60	(2,12)	11,28	(2,81)	10,26	(1,47)	6,09	(1,19)
R = O ₂ flux/CO ₂ flux		0,71	(0,22)	0,74	(0,23)	0,79	(0,25)	0,81	(0,28)	1,04	(0,41)
NH ₄ ⁺ flux	mmol m ⁻² d ⁻¹	0,79	(0,16)	0,70	(0,18)	0,58	(0,25)	0,47	(0,14)	0,03	(0,13)
NO ₃ ⁻ flux	mmol m ⁻² d ⁻¹	-0,50	(0,24)	-0,37	(0,22)	-0,25	(0,25)	-0,18	(0,17)	0,13	(0,13)
N _{total} flux	mmol m ⁻² d ⁻¹	0,29	(0,27)	0,33	(0,23)	0,33	(0,20)	0,28	(0,20)	0,16	(0,13)
PO ₄ ³⁻ flux	mmol m ⁻² d ⁻¹	0,21	(0,03)	0,20	(0,04)	0,18	(0,05)	0,17	(0,03)	0,11	(0,03)
H ₂ S flux	mmol m ⁻² d ⁻¹	1,20	(0,54)	1,00	(0,50)	0,80	(0,53)	0,56	(0,30)	0,13	(0,13)
Aktivitet og rater											
Bioaktivitet		0,28	(0,17)	0,28	(0,17)	0,28	(0,17)	0,28	(0,17)	0,28	(0,17)
Denitrifikation	mmol m ⁻² d ⁻¹	1,35	(0,36)	1,16	(0,35)	1,00	(0,37)	0,93	(0,25)	0,57	(0,14)
Puljer											
PO ₄ ³⁻	mmol P m ⁻²	14,22	(2,35)	13,67	(2,35)	12,95	(2,54)	11,43	(2,00)	8,06	(1,87)
Jernbundet PO ₄ ³⁻	mmol P m ⁻²	1,44	(0,63)	1,60	(0,66)	1,91	(0,85)	2,18	(0,71)	4,41	(1,27)
O ₂ front	mm	3,6	(1,4)	3,7	(1,5)	3,9	(1,5)	4,1	(1,5)	5,5	(1,5)
H ₂ S front	mm	1,4	(1,5)	1,6	(1,6)	2,2	(2,1)	2,8	(2,3)	8,7	(4,6)
Index											
Illtsvindsindex	dage	5,0	(2,1)	5,2	(2,2)	5,5	(2,4)	6,0	(2,6)	8,2	(3,8)
H ₂ S index	dage	11,5	(8,1)	12,8	(8,8)	15,7	(10,6)	18,5	(11,7)	49,3	(26,2)
Illtningsreserve	mmol O ₂ m ⁻²	62,64	(29,42)	65,80	(29,90)	71,62	(31,24)	76,32	(31,44)	112,14	(34,78)
H ₂ S bufferkapacitet	mmol H ₂ S-ækv. m ⁻²	31,32	(14,71)	32,90	(14,95)	35,81	(15,62)	38,16	(15,72)	56,07	(17,39)

Tabel 6.2B. Svarer til Tabel 6.2A, men hvor mmol m⁻² d⁻¹ er omregnet til g stof m⁻² år⁻¹. Alle værdier er vist som gennemsnittet af 10 års middelværdier fra sediment-flux modellen ($\pm \sigma$; n=10).

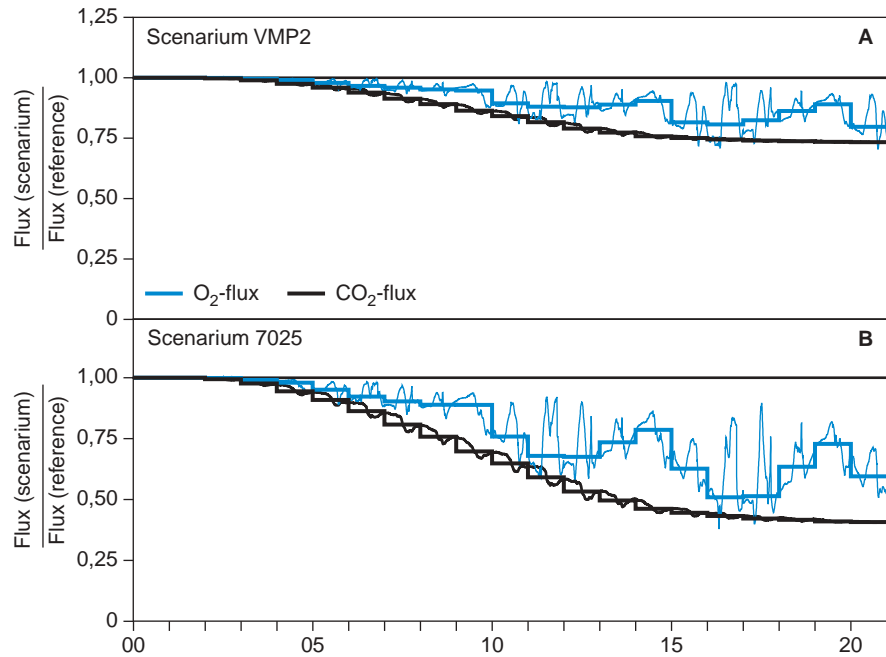
Parameter		1992-2001		2002-2011		2012-2021					
				VMP2	70 25	VMP2	70 25				
Fluxe											
O ₂ flux	g O ₂ m ⁻² år ⁻¹	-116,6	(48,2)	-112,2	(48,3)	-106,3	(49,2)	-99,7	(44,1)	-75,4	(37,3)
CO ₂ flux	g C m ⁻² år ⁻¹	59,9	(7,8)	55,2	(9,3)	49,4	(12,3)	44,9	(6,4)	26,7	(5,2)
NH ₄ ⁺ flux	g N m ⁻² år ⁻¹	4,1	(0,8)	3,6	(0,9)	3,0	(1,3)	2,4	(0,7)	0,2	(0,7)
NO ₃ ⁻ flux	g N m ⁻² år ⁻¹	-2,6	(1,2)	-1,9	(1,1)	-1,3	(1,3)	-0,9	(0,9)	0,6	(0,7)
N _{total} flux	g N m ⁻² år ⁻¹	1,5	(1,4)	1,7	(1,2)	1,7	(1,0)	1,5	(1,0)	0,8	(0,7)
PO ₄ ³⁻ flux	g P m ⁻² år ⁻¹	2,4	(0,4)	2,3	(0,4)	2,0	(0,5)	1,9	(0,3)	1,2	(0,39)
H ₂ S flux	g S m ⁻² år ⁻¹	14,0	(6,3)	11,7	(5,9)	9,4	(6,2)	6,5	(3,59)	1,5	(1,6)
Aktivitet og rater											
Denitrifikation	g N m ⁻² år ⁻¹	6,9	(1,8)	6,0	(1,8)	5,1	(1,9)	4,8	(1,3)	2,9	(0,7)
Puljer											
PO ₄ ³⁻	mg P m ⁻²	440,9	(73,0)	423,7	(72,8)	401,5	(78,8)	354,3	(61,9)	249,7	(58,0)
Jernbundet PO ₄ ³⁻	mg P m ⁻²	44,5	(19,6)	49,5	(20,6)	59,2	(26,5)	67,6	(22,0)	136,7	(39,4)

6.2.2.1 Bioaktivitet

Bioturbationen reagerede udelukkende på iltforholdene ved bunden, og disse ændrede sig ikke i de to scenarier. Bioaktiviteten svarede derfor til aktiviteten i referencescenariet (se Figur 5.5).

6.2.2.2 Fluxen af ilt og kuldioxid

Fluxen af CO₂ afspejlede så at sige omsætningen af organisk stof i fjordbunden. Derfor var det også umiddelbart indlysende, at CO₂-fluxen faldt i takt med, at tilførslen af organisk stof til bunden af Mariager Fjord aftog (Figur 6.26). Efter at kvælstofreduktionen var gennemført ved udgangen af 2011, var CO₂-fluxen i Scenarium VMP2 og 70 25 reduceret til hhv. 80 % og 50% af referencescenariet, og efter blot endnu 6 år stemte tilførslen af organisk stof til bunden af Mariager Fjord i begge scenarier overens med CO₂-fluxen inden for $\pm 1\%$. Det, at CO₂-fluxen reagerede forsinket i forhold til sedimentationen, skyldtes udelukkende, at en del af CO₂-produktionen foregik dybere nede i fjordbunden, og at det tog tid, inden effekten af den reducerede reduktion forplantede sig ned i bunden. Omvendt ser man på Figur 6.26, at den største ændring i CO₂-fluxen skete inden for det tiår, hvor også sedimentationen aftog, hvilket bekræfter, at det meste af den organiske stofomsætning trods alt fandt sted i de allerøverste mm/cm af fjordbunden.



Figur 6.26. O₂-fluxen i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 (A) og 70 25 (B) relativt til referencescenariet (se Figur 5.10) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. handlingsscenarierne og referencescenariet.

Iltfluxen aftog samtidig med CO₂-fluxen, men det fremgår tydeligt af Figur 6.26, at O₂-fluxen både aftog mere ujævnt end CO₂-fluxen, og at den slet ikke nåede samme lave niveau. Det ujævne forløb skyldtes især, at sedimentets iltoptagelse afhang af iltkoncentrationen ved bunden, og den varierede både meget fra år til år og i løbet af året (se Figur 5.4). Reduktionen i den organiske stoftilførsel påvirkede åbenbart O₂-fluxen mindre end CO₂-fluxen, idet der for begge scenarier gjaldt, at

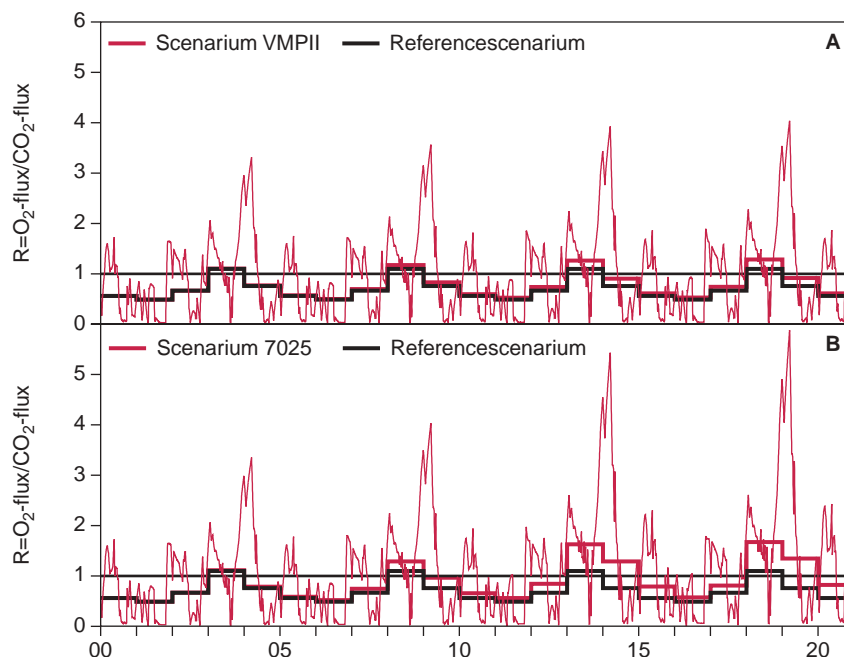
$$\frac{FO_{2scen}}{FO_{2ref}} > \frac{FCO_{2scen}}{FCO_{2ref}}, \text{ hvilket altså betød, at}$$

$$\frac{FO_{2scen7025}}{FCO_{2scen7025}} > \frac{FO_{2scenVMP2}}{FCO_{2scenVMP2}} > \frac{FO_{2ref}}{FCO_{2ref}} \text{ (Figur 6.27). Med andre ord, i}$$

takt med at stoftilførslen til bunden faldt, blev en relativt større andel af de reducerede forbindelser (dannet ved de anaerobe respirationsprocesser) geniltet, og derfor faldt iltoptagelsen ikke helt så meget, som man ellers ville have forventet ud fra ændringen af den organiske sedimentation. Figur 6.27 viser også, at O₂-fluxen nogle år var større end CO₂-fluxen (dvs., $R = \frac{FO_2}{FCO_2} > 1$), hvilket betød, at en del

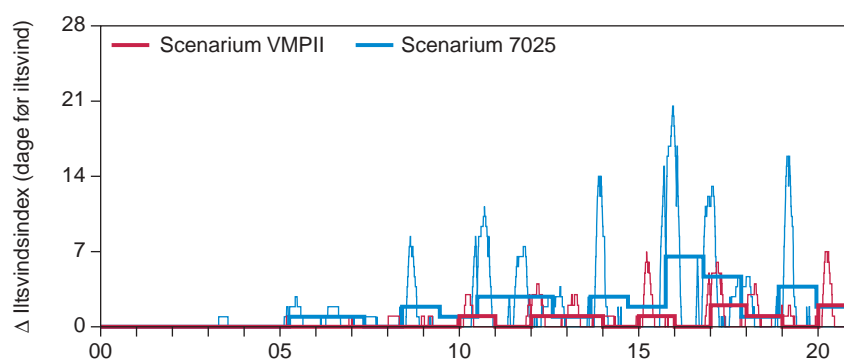
af de reducerede forbindelser, der var lagret i fjordbunden i årene forud, blev iltet det pågældende år. Set over en tiårig periode nærmede R sig 1, hvilket viste, at med den nedsatte organiske belastning af fjordbunden blev der begravet færre reducerede forbindelser (primært H₂S, FeS og FeS₂) end i referencescenariet (Tabel 6.2), og fluxen af reducerede forbindelser ud af fjordbunden var lavere.

Figur 6.27. Forholdet (R) mellem O_2 -fluxen og CO_2 -fluxen, Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 (A) og 70 25 (B). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. handlingsscenarierne og referencescenariet. For $R = 1$ er O_2 -fluxen og CO_2 -fluxen i balance.



6.2.2.3 Iltforbrug og iltsvind i bundvandet

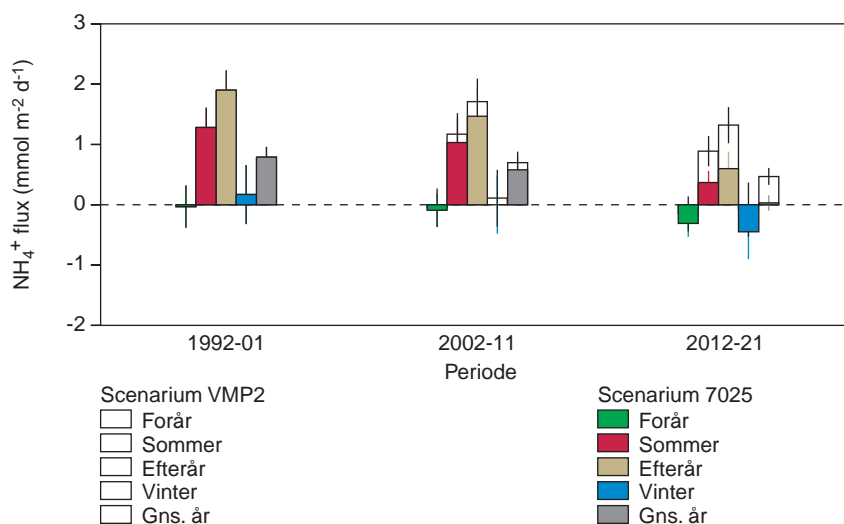
I handlingsscenarierne var O_2 -koncentrationen ved bunden uforandret i forhold til referencescenariet. Dette, kombineret med at fjordbundens iltoptagelse aftog som følge af, at der blev tilført mindre organisk stof til bunden, betød alt andet lige, at vi forventede et stigende iltsvindsindex. Antallet af dage, hvor Mariager Fjord kunne modstå et iltsvind, steg da også i begge scenarier, men ikke særligt iøjnefaldende i Scenarium VMP2 – i gennemsnit kun 1–2 dage og kun i vinterhalvåret (Figur 6.28). Selv ved en yderligere nedsættelse af næringsstofbelastningen af Mariager Fjord som i Scenarium 70 25 steg antallet af dage, hvor fjorden kunne modstå iltsvind, på årsbasis blot et par dage ift. Scenarium VMP2 (Tabel 6.2).



Figur 6.28. Den absolutte ændring af iltsvindsindexet (ΔI_{O_2}) i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). $\Delta I_{O_2} = I_{O_2(\text{scenarium})} - I_{O_2(\text{reference})}$, (se definition af I_{O_2} i afsnit 5.3.2). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25. Referencescenariet ses på Figur 5.13.

6.2.2.4 Kvælstofflux, nitrifikation og denitrifikation

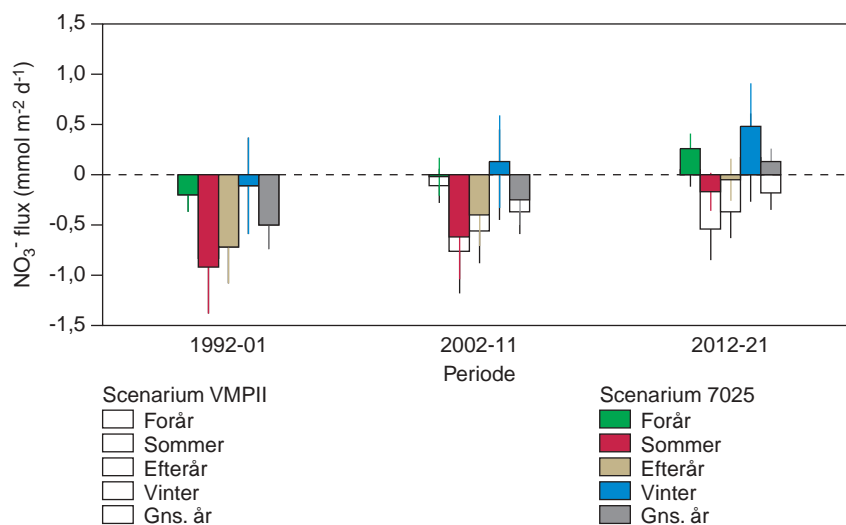
Tilførslen af organisk stof til fjordbunden faldt i perioden (2002-11) med 27% og 60% for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 (Figur 6.24 og 6.25). Den lavere organiske belastning af fjordbunden medførte, at NH_4^+ -produktionen i bunden faldt tilsvarende. Samtidig blev NH_4^+ -koncentrationen i bundvandet reduceret med 15% og 25% i hhv. Scenarium VMP2 og 70 25. Med andre ord faldt NH_4^+ -koncentrationen i bunden mere end i bundvandet. Det var derfor forventeligt, at NH_4^+ -fluxen ud i bundvandet ville aftage, ja måske endda blive nedadrettet, hvis NH_4^+ -koncentrationen i bundvandet oversteg NH_4^+ -koncentrationen i fjordbunden (Figur 6.29). I tiårsperioden 2012-21 beregnede vi for Scenarium VMP2, at den årlige NH_4^+ -flux ud af fjordbunden ville være knap og nap halveret (dvs. reduceret med 41% ift. referenceperioden 1992-01), hvilket svarede til en reduktion på ca. $1,8 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$. I Scenarium 70 25 var ændringen i den årlige NH_4^+ -flux endnu mere markant, idet NH_4^+ -fluxen ud af bunden faldt fra gennemsnitlig $0,79 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ til $0,03 \text{ mmol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, hvilket svarede til en reduktion af den interne belastning på ca. $3,9 \text{ g N m}^{-2} \text{ år}^{-1}$. Den årlige gennemsnitsværdi dækkede naturligvis over betydelige ændringer for de fire årstider, hvor reduktionen i NH_4^+ -fluxen om efteråret var mest markant og med en tydelig NH_4^+ -optagelse i vinterhalvåret, dvs. vinter og forår.



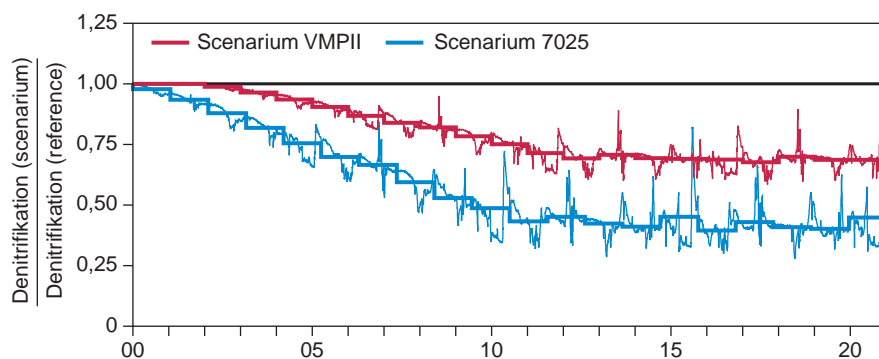
Figur 6.29. NH_4^+ -fluxen i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). Perioden 1992-01 svarer til referencescenariet (se Figur 5.17), perioden 2002-11 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstoffreduktion er gennemført. NH_4^+ -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året. Positive flux-værdier svarer til frigivelse af NH_4^+ fra fjordbunden – negative værdier svarer til optagelse.

Samtidig med NH_4^+ -koncentrationen faldt også NO_3^- -koncentrationen i bundvandet - i Scenarium VMP2 og 70 25 hhv. 30% og 53% (Figur 6.24 og 6.25). I bunden blev nitrifikationen kun stimuleret ganske lidt (data ikke vist), dels fordi iltindholdet i de to scenarier ikke ændrede sig i bundvandet, og dels fordi NH_4^+ -produktionen og dermed koncentrationen i bunden på samme tid blev betydeligt mindre.

Vi forventede derfor, at eventuelle ændringer i NO_3^- -fluxen primært var bestemt af det fald i NO_3^- -koncentrationen, som indtraf i bundvandet mellem 2002 og 2011. Scenarium VMP2 viste da også, at fjordbunden optog omkring 64% mindre NO_3^- , og at der i vinter- og forårs månederne endda var tale om NO_3^- -frigivelse fra bunden (Figur 6.30). I Scenarium 70 25 var ændringen forventeligt mere udtalt, idet der på årsbasis var tale om en nettofrigivelse af NO_3^- fra bunden, og der var faktisk kun tale om NO_3^- -optagelse i sommermånederne. Med andre ord blev der altså optaget mindre NO_3^- i fjordbunden, når næringsstofbelastningen af fjorden blev reduceret samtidig med, at produktionen af NO_3^- i fjordbunden åbenbart ikke ændrede sig væsentligt. Samlet set betød det, at der blev mindre NO_3^- tilgængeligt i bunden til denitrifikationen, som faldt med omkring 30% og 60% i hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 (Figur 6.31).



Figur 6.30. NO_3^- -fluxen i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). Perioden 1992-01 svarer til referencescenariet (se Figur 5.17), perioden 2002-11 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstoffreduktionen er gennemført. NO_3^- -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året. Positive flux-værdier svarer til frigivelse af NO_3^- fra fjordbunden – negative værdier svarer til optagelse.

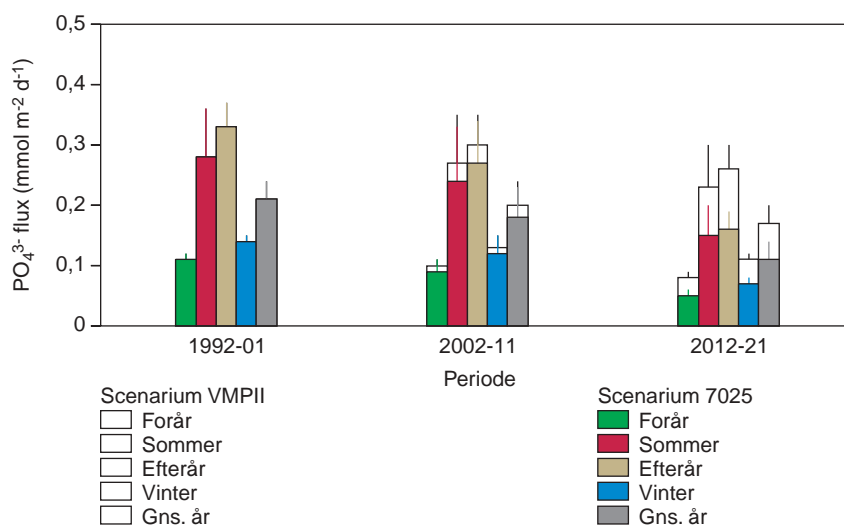


Figur 6.31. Denitrifikationen i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 relativt til referencescenariet (se Figur 5.16) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for de to scenarier.

Frigivelsen af NH_4^+ fra fjordbunden faldt forholdsvis mere end NO_3^- -optagelsen ændrede sig, og selvom NO_3^- -fluxen i Scenarium 70 25 endda skiftede fra en optagelse til en NO_3^- -afgivelse, betød den samlede ændring et fald i den totale interne kvælstofbelastning på 2 og 45% i hhv. Scenarium 97 og 70 25. Det absolutte fald i den interne belastning var derfor meget begrænset i Scenarium 97 (ca. 30 mg N m^{-2} år^{-1}), mens faldet i Scenarium 70 25 var væsentlig større, nemlig 640 mg N m^{-2} år^{-1} .

6.2.2.5 Fosfatflux og fosfatpuljer

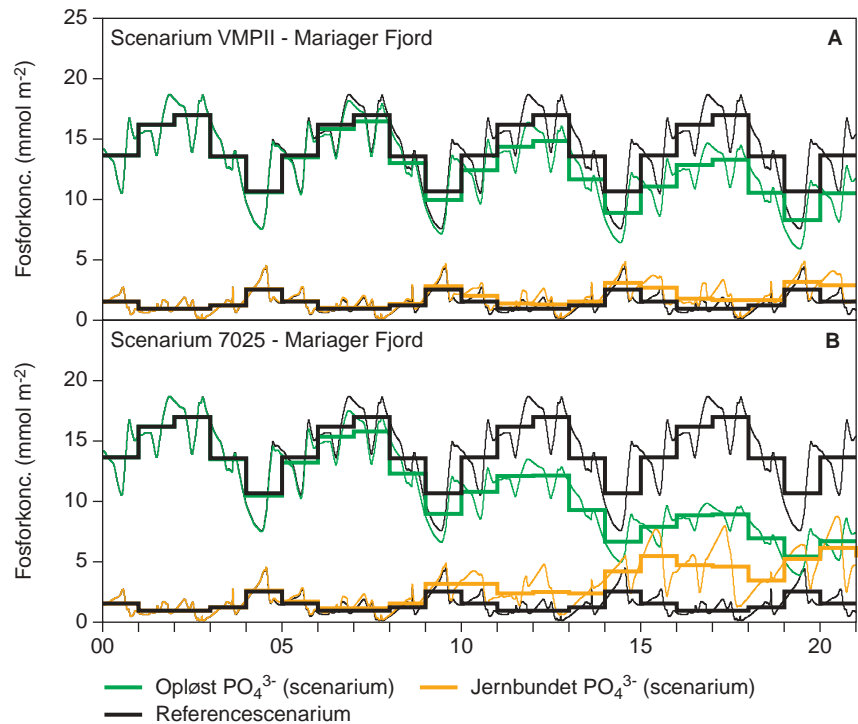
I takt med at den organiske stoftilførsel til bunden aftog, faldt produktionen af PO_4^{3-} naturligvis også i fjordbunden. I Scenarium VMP 2 ændrede PO_4^{3-} -koncentrationen i bundvandet sig ikke ift. reference-scenariet, og derfor forventede vi, at den faldende PO_4^{3-} -koncentration i fjordbunden førte til et fald i PO_4^{3-} -udslippet fra bunden, hvilket også blev bekræftet ved gennemregningen af Scenarium VMP2 (Figur 6.32). I Scenarium 70 25 var faldet i den organiske belastning endnu mere markant og dermed også PO_4^{3-} -produktionen i bunden af fjorden. Den mindre organiske stofbelastning af fjordbunden, som blev fulgt af et relativt mindre fald i bundvandets PO_4^{3-} -koncentration, betød alt i alt en så stor ændring i sedimentets PO_4^{3-} -koncentration, at PO_4^{3-} -fluxen også aftog – og endda væsentlig mere end i Scenarium VMP2.



Figur 6.32. PO_4^{3-} -fluxen i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). Perioden 1992-01 svarer til referencescenariet (se Figur 5.18), perioden 2002-11 er det tidsrum, hvor næringsstofbelastning nedsættes, og perioden 2010-19 er tiden efter at næringsstoffreduktion er gennemført. PO_4^{3-} -fluxen er i hver periode beregnet som gennemsnittet af 10 årsmidler $\pm \sigma$ for både forår (15.2–30.4), sommer (1.5–31.8), efterår (1.9–31.10), vinter (1.11–14.2; det flg. år) og hele året. Positive flux-værdier svarer til frigivelse af PO_4^{3-} fra fjordbunden.

Den mindre organiske belastning af fjordbunden medførte også, at H_2S -produktionen faldt, og derfor var det forventeligt, at puljen af oxideret jern steg. Figur 6.33 viser puljen af jernbundet og opløst PO_4^{3-} og det ses tydeligt, hvordan den jernbundne PO_4^{3-} -pulje steg især i Scenarium 70 25, efterhånden som der kom mere oxideret jern i

fjordbunden. Samtidig faldt koncentrationen af opløst PO_4^{3-} . Det er den kombinerede effekt af, at der blev omsat mindre organisk stof, og at en større andel af det opløste PO_4^{3-} bandt sig til jern, der medførte, at PO_4^{3-} -fluxen faldt fra $2,5 \text{ g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ til ca. $2,0 \text{ g}$ og $1,3 \text{ g P m}^{-2} \text{ år}^{-1}$ i hhv. Scenarium VMP2 og 70 25.

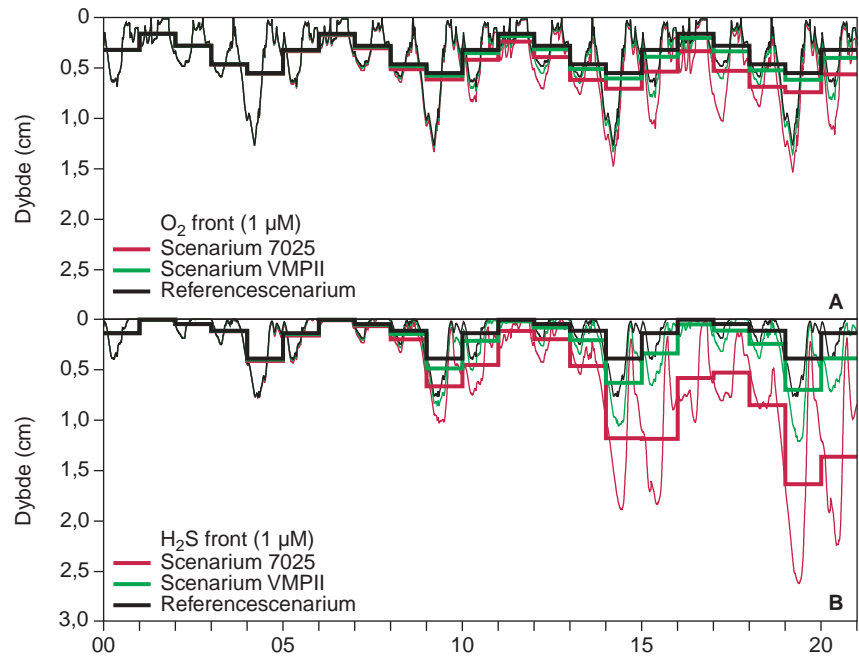


Figur 6.33. Udviklingen af hhv. opløst PO_4^{3-} i porevandet og letopløseligt jernbundet PO_4^{3-} i de øverste 20 cm af fjordbunden i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 (A) og 70 25 (B) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for de to scenarier og referencescenariet.

6.2.2.6 Ilt- og svovlbrintefronten

Efter at den organiske sedimentation var reduceret med 27% og 60% i hhv. Scenarium VMP2 og 70 25, trængte O_2 lidt længere ned i fjordbunden – i gennemsnit omkring 4,1 mm og 5,5 mm i hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 (Figur 6.34). Det synes måske ikke af meget, men til gengæld var den dybere O_2 -nedtrængning alene en effekt af den mindre organiske belastning af fjordbunden. Selvom det allerede er skrevet flere gange, gentager vi det alligevel: O_2 -koncentrationen i bundvandet var den samme i de to scenarier og referencescenariet. I virkelighedens verden vil O_2 -koncentrationen i bundvandet nok stige, når den organiske stofproduktion aftager, fordi der vil være et mindre iltforbrug i vandsøjlen. Det er derfor højst sandsynligt, at O_2 vil trænge endnu længere ned i fjordbunden end de ”modellerede” 4–6 mm, men sediment-flux-modellen beregner jo ikke iltforbruget i vandet, og et eventuelt mindre iltforbrug i vandsøjlen får derfor ingen betydning for iltkoncentrationen ved bunden i modelmæssig henseende. Den eneste måde at modellere effekten af en forøget O_2 -koncentration i bundvandet vil være at ændre på iltindholdet, som modellen bruger som input til beregningerne, ligesom det er gjort i Scenarierne 3.1, 3.2 og 3.3 (se 4.3).

Figur 6.34. O₂-frontens placering (1 μM isoplethen) (A) og H₂S-frontens placering (B) i bunden af Mariager fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for de to scenarier og referencescenariet.

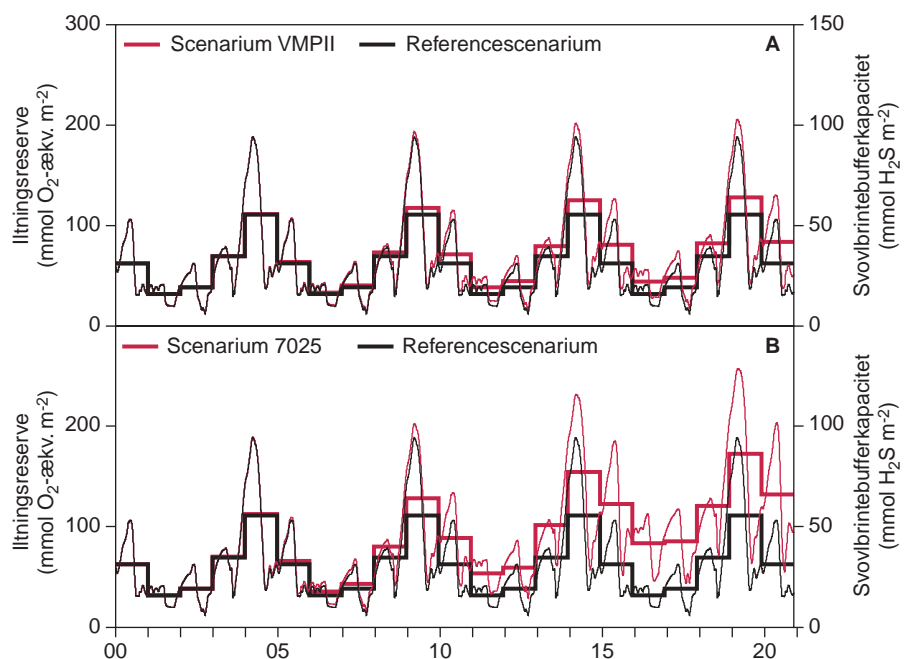


Svovlbrintefronten indstillede sig i gennemsnit 1,4 mm dybere nede i bunden efter, at kvælstofreduktionen var gennemført i Scenarium VMP2 (Figur 6.34B) og omkring 7,1 mm dybere efter næringsstofkoncentrationerne var reduceret i Scenarium 70 25. Det var den reducerede stofomsætning og den dybere ilt nedtrængning, der så at sige var med til at trykke svovlbrintefronten længere ned i bunden.

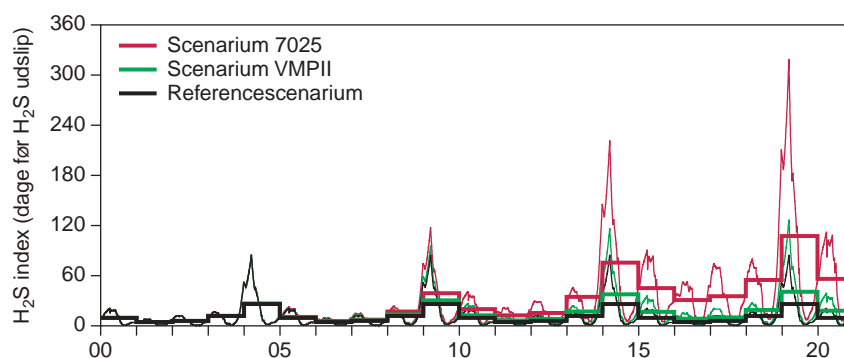
6.2.2.7 Iltningsreserve og svovlbrintebufferkapacitet

I gennemsnit blev iltningsreserven i Scenarium 70 25 forøget med næsten 80% i tiårsperioden 2012-21, sammenlignet med iltningsreserven for tiåret umiddelbart før, næringsstofbelastningen af Mariager Fjord blev reduceret, dvs. 1992-2001 (Figur 6.35). I Scenarium VMP2, hvor miljøforbedringen i Mariager Fjord var mindre udtalt, var der "kun" tale om en ca. 20% forbedring i fjordbundens iltningsreserve.

Figur 6.35. Iltningsreserven eller svovlbrintebufferkapaciteten i bunden af Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 (A) og 70 25 (B) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for de to scenarier og referencescenariet.

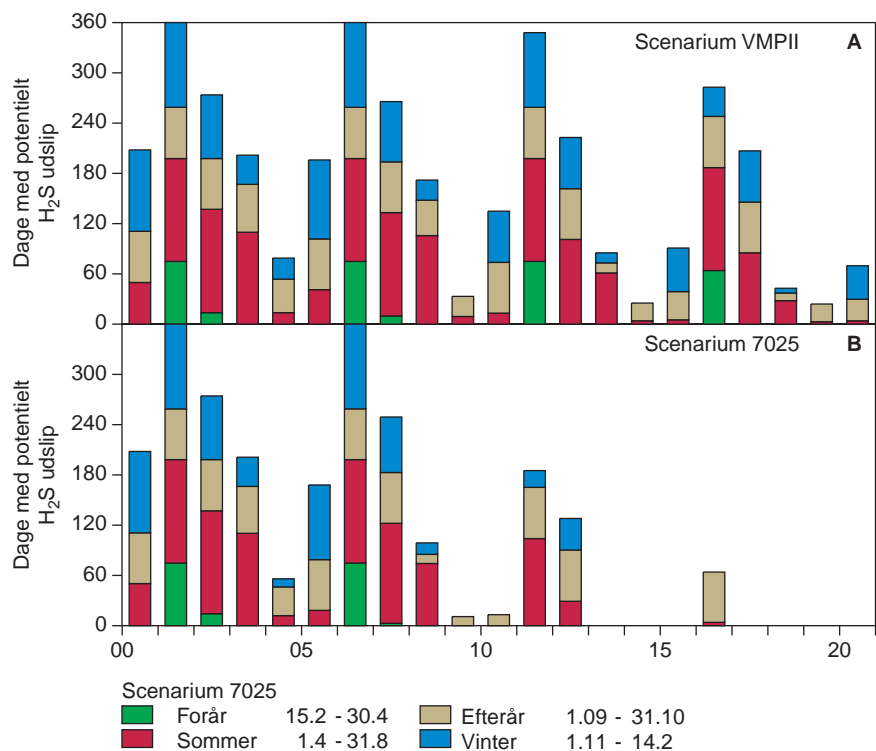


Den relativt største forbedring i iltningsreserven, beregnede modellen, ville indtræde om efteråret, hvor en forøget iltningsreserve også "ville gøre mest nytte", fordi det var på denne årstid, at iltningsreserven i referencescenariet var allerlavest. Ser vi på iltningsreservens absolutte stigning, var den derimod mindst i efteråret, så den relative forbedring fik derfor alligevel kun mindre betydning for fjordbundens iltningsreserve. Det kunne vi også konstatere ud fra H_2S -indexet, dvs., antallet af dage, som fjordbunden kunne modstå et udslip af H_2S , under de forudsætninger, som karakteriserede den pågældende dag mht. iltningsreserve og H_2S -produktion. H_2S -indexet viste, at fjordbundens evne til at modstå et svovlbrinteudslip i gennemsnit steg med en uge fra ca. 12 til 19 dage om året i Scenarium VMP2, mens stigningen i Scenarium 70 25 var på lidt over en måned (Figur 6.36). Den største forbedring indtraf i foråret, hvor H_2S -indexet i Scenarium VMP2 i gennemsnit steg med små 2 uger (fra 23 til 36 dage) og i Scenarium 70 25 med mere end 2 måneder, mens forbedringen i efterårsmånederne var mindst, hhv. 1-3 og 5-15 dage. På grund af den lavere næringsstofbelastning faldt H_2S -indholdet altså i fjordbunden (især i overfladen), og antallet af dage, hvor der potentielt kunne forekomme udslip af H_2S til bundvandet, faldt markant. Modellen beregnede for Scenarium VMP2, at antallet af dage, hvor man kunne regne med en mulighed for H_2S udslip, i gennemsnit faldt fra mellem 5-11 mdr. til et sted mellem 1 og 8 måneder. I Scenarium 70 25 var forbedringen endnu mere udtalt, idet man i den tiårige periode 2012-22 med god ret kunne forvente, at der fraset enkelte år (2016 og 2021) slet ikke ville være mulighed for H_2S -udslip til bundvandet (Figur 6.37). Hvad der er nok så interessant, forudsiger modellen også, at selv om der gennemføres en markant reduktion i udledningen af næringsstoffer til Mariager Fjord i stil med Scenarium 7025, vil der stadig kunne forekomme dage i efteråret, hvor der i forbindelse med dårlige iltforhold i bundvandet vil ske udslip af H_2S fra fjordbunden.



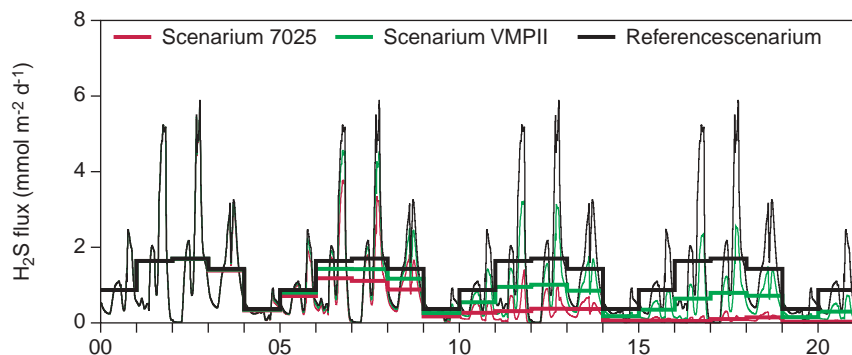
Figur 6.36. H_2S -indexet, dvs. antallet af dage, fjordbunden i Mariager Fjord er i stand til at tilbageholde produktionen af H_2S og dermed hindrer H_2S udslip for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for de to scenarier og referencescenariet.

Figur 6.37. Det potentielle H_2S -udslip, dvs. antallet af dage, hvor H_2S -fronten ligger < 1 mm fra sediment-overfladen i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 (A) og 70 25 (B) i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). Antallet af dage med potentielt H_2S -udslip er fordelt på årstiderne, hhv. forår (15.2–30.4), sommer (1.4–31.8), efterår (1.09–31.10) og vinter (1.11–14.2; det flg. år).



6.2.2.8 Sulfidpuljer og H_2S -udslip fra bunden

Vi har ovenfor beskrevet, hvordan svovlbrintefronten flyttede dybere ned i fjordbunden, iltreserven steg og antallet af dage med potentielt H_2S -udslip faldt. Derfor kommer det heller ikke som den helt store overraskelse, at modellen forudsagde et mindre H_2S -udslip fra fjordbunden, når næringsstofbelastningen til fjorden faldt (Figur 6.38). Den kendsgerning, at der kom mindre organisk stof ned til bunden, og at en relativt mindre del af dette stof blev omsat af de sulfatreducerende bakterier, betød, at H_2S produktionen faldt. Oven i købet blev en større del af det H_2S , der blev produceret i fjordbunden, oxideret, fordi puljerne af O_2 og $FeOOH$ var forøget i begge scenarier. Samlet set betød det, at svovlbrinte-fluxen i Scenarium VMP2 og Scenarium 70 25 i gennemsnit faldt med hhv. 57% og 92%. Svovlbrinte-udslippet fra bunden faldt altså betydeligt mere end nedgangen i sedimentationen alene lod forvente.



Figur 6.38. H_2S -fluxen i Mariager Fjord (2000-21) for hhv. Scenarium VMP2 og 70 25 i forbindelse med en nedsat næringsstofbelastning af fjorden (se Figur 6.24 og 6.25 for input til hhv. Scenarium VMP2 og 70 25). De kraftigt optrukne linier viser det årlige gennemsnit for hhv. handlingsscenarierne og referencescenariet. Positive værdier svarer til frigivelse af H_2S fra fjordbunden.

[Tom side]

7 Hvor kan jeg læse mere?

I det følgende er en oversigt over danske pjecer, rapporter og bøger mv. om havmiljøet i de danske farvande primært Århus Bugt og Mariager Fjord. Der er desuden henvisninger til hjemmesider med informationer om miljø- og naturforhold i Århus Bugt og Mariager Fjord.

Christensen, P.B., Dalsgaard, T., Fossing, H., Rysgaard, S. & N. Sloth (2002): Stofomsætning i havbunden. Temarapport fra DMU, nr. 42/2002.

Christensen, P.B. (1996): Havmiljøet under forandring? Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 61.

Fossing, H. og Christensen, P.B. (1999): Produktion og forekomst af svovlbrinte i Mariager Fjord 1998. Danmarks Miljøundersøgelser. 19 s. – Faglig rapport fra DMU, nr. 270.

Fossing, H. (2000): Sedimentprocesser og næringsstofudveksling i Mariager Fjord 1999. Danmarks Miljøundersøgelser.

Fossing, H. og H. M. Sørensen (2000): Svovlbrinte i Mariager Fjord 1998 og 1999.

Fossing, H. (2001): Betydningen af iltforbruget i fjordbunden og vandsøjlen for iltsvind i bund-vandet på Mariager Fjords lavvandede områder. Notat til Nordjyllands Amt og Aarhus Amt. Danmarks Miljøundersøgelser.

Hav90, nr. 14: Valeur, J.R., Pejrup, M. & Jensen, A. (1992): Partikulære næringsstoffluxer i Vejle Fjord og Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 14.

Hav90, nr. 15: Fossing, H., Thamdrup, B. & Jørgensen, B.B. (1992): Havbundens svovl-, jern- og mangankredsløb i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 15.

Hav90, nr. 16: Lomstein, B.Aa & Blackburn, T.H. (1992): Havbundens kvælstofomsætning i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 16.

Hav90, nr. 17: Mortensen, P.B., Jensen, H.S., Rasmussen, E.K. & Andersen, F.Ø. (1992): Fosforomsætning i sedimentet i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 17.

Hav90, nr. 18: Floderus, S. (1992): Sedimentation og resuspension i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 18.

Hav90, nr. 23: Nielsen, J., Lynggaard-Jensen, A., Hansen, H.P. & Simonsen, C. (1993): Dynamik og kompleksitet i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 23.

Hav90, nr. 36: Hansen, J.W., Thamdrup, B., Fossing, H. & Jørgensen, B.B. (1994): Redoxbalancen og mineraliseringens temperaturafhængighed i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 36.

Hav90, nr. 39: Christiansen, C., Lund-Hansen, L.C. & Skyum, P. (1994): Hydrografi og stoftransport i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 39.

Hav90, nr. 57: Gundersen, J.K., Glud, R.N. & Jørgensen, B.B. (1995): Havbundens iltomsætning. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 57.

Hav90, nr. 59: Jørgensen, B.B. (Ed.) (1995): Stoftransport og stofomsætning i Århus Bugt. Havforskning fra Miljøstyrelsen, 59.

Lomstein, B. 1999: Havmiljøet ved årtusindskiftet. Olsen & Olsen – Fredensborg.

Nordjyllands Amt og Århus Amt (2002): Vestlige Kattegat og tilstødende fjorde 2001. Tilstand og udvikling. ISBN 87-7774-469-7.

Nordjyllands Amt og Århus Amt (2002): Debatoplæg om Mariager Fjord, februar 2002. ISBN 87-7775-440-9.

Nordjyllands Amt og Århus Amt (2001): Vestlige Kattegat og tilstødende fjorde 2000. Tilstand og udvikling. ISBN: 87-7775-413-1.

Petersen, J.K., Markager S., Stedmon, C. og E. Stenalt (2000): Mariager Fjord -primærproduktion, iltomsætning og blåmuslinger efter iltsvindet i 1997. Rapporten er udfærdiget af Danmarks Miljøundersøgelser i samarbejde m. Århus Amt og Nordjyllands Amt, Juli 2000.

Århus Amt og Nordjyllands Amt (2002): Mariager Fjord – Tilførslen af næringsstoffer fra land. ISBN: 87-7906-196-6.

Århus Amt og Nordjyllands Amt (2002): Mariager Fjord – Fjordbundens dyreliv – Status for Miljøtilstanden 2000. ISBN: 87-7906-175-3.

Århus Amt (2001): Århus Bugt 2000. ISBN: 87-7906-162-1.

Hjemmesider

Danmarks Miljøundersøgelser: www.dmu.dk

Miljøstyrelsen: www.mst.dk

Mariager Fjord: www.mariager-fjord.dk

Natur- og miljøafdelingen – Århus Amt: www.aaa.dk/nm

Natur- og Miljøafdelingen – Nordjyllands Amt:
www.nja.dk/Serviceomraader/NaturOgMiljoe

Danmarks Miljøundersøgelser

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

Henvendelser kan rettes til:

URL: <http://www.dmu.dk>

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

Direktion
Personale- og Økonomisekretariat
Forsknings- og Udviklingssektion
Afd. for Systemanalyse
Afd. for Atmosfærisk Miljø
Afd. for Marin Økologi
Afd. for Miljøkemi og Mikrobiologi
Afd. for Arktisk Miljø
Projektchef for kvalitets- og analyseområdet

Danmarks Miljøundersøgelser
Vejlsovej 25
Postboks 314
8600 Silkeborg
Tlf.: 89 20 14 00
Fax: 89 20 14 14

Overvågningssektionen
Afd. for Terrestrisk Økologi
Afd. for Ferskvandsøkologi
Afd. for Marin Økologi
Projektchef for det akvatiske område

Danmarks Miljøundersøgelser
Grenåvej 12-14, Kalø
8410 Rønde
Tlf.: 89 20 17 00
Fax: 89 20 15 15

Afd. for Landskabsøkologi
Afd. for Kystzoneøkologi

Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger, temarapporter, samt årsberetninger. Et katalog over DMU's aktuelle forsknings- og udviklingsprojekter er tilgængeligt via World Wide Web.

I årsberetningen findes en oversigt over det pågældende års publikationer.

Faglige rapporter fra DMU/NERI Technical Reports

2001

- Nr. 383: Pesticider 2 i overfladevand. Metodaoprøvning. Af Nyeland, B. & Kvamm, B. 45 s. + Annex 1, 75,00 kr.
Nr. 384: Natural Resources in the Nanortalik Area. An Interview Study on Fishing, Hunting and Tourism in the Area around the Nalunaq Gold Project. By Glahder, C.M. 81 pp., 125,00 kr.
Nr. 385: Natur og Miljø 2001. Påvirkninger og tilstand. Af Bach, H., Christensen, N. & Kristensen, P. 368 s., 200,00 kr.
Nr. 386: Pesticider 3 i overfladevand. Metodeoprøvning. Af Nyeland, B. & Kvamm, B. 94 s., 75,00 kr.
Nr. 387: Improving Fuel Statistics for Danish Aviation. By Winther, M. 56 pp., 75,00 DKK.

2002

- Nr. 388: Microorganisms as Indicators of Soil Health. By Nielsen, M.N. & Winding, A. 82 pp., 90,00 DKK.
Nr. 389: Naturnær skovrejsning – et bæredygtigt alternativ? Af Aude, E. et al. 47 s. (elektronisk)
Nr. 390: Metoder til at vurdere referencetilstanden i kystvande – eksempel fra Randers Fjord. Vandrammedirektiv-projekt. Fase II. Af Nielsen, K. et al. 43 s. (elektronisk)
Nr. 391: Biologiske effekter af råstofindvinding på epifauna. Af Lisbjerg, D. et al. 54 s. (elektronisk)
Nr. 392: Næringssaltbegrænsning af makroalger i danske kystområder. Et samarbejdsprojekt mellem Ringkøbing Amt, Nordjyllands Amt, Viborg Amt, Århus Amt, Ribe Amt, Sønderjyllands Amt, Fyns Amt, Roskilde Universitetscenter og Danmarks Miljøundersøgelser. Af Krause-Jensen, D. et al. 112 s. (elektronisk)
Nr. 393: Vildtudbyttet i Danmark i jagtsæsonen 2000/2001. Af Asferg, T. 34 s., 40,00 kr.
Nr. 394: Søerne i De Østlige Vejler. Af Jeppesen, E. et al. 90 s., 100,00 kr.
Nr. 395: Menneskelig færdsels effekt på rastende vandfugle i saltvandssøen. Af Laursen, K. & Rasmussen, L.M. 36 s., 50,00 kr.
Nr. 396: Miljøundersøgelser ved Maarmorilik 1999-2000. Af Møller, P. et al. 53 s. (elektronisk).
Nr. 397: Effekt af lystfiskeri på overvintrende troldeænder i Store Kattinge Sø. Af Madsen, J. 23 s. (elektronisk)
Nr. 398: Danske duehøges populationsøkologi og forvandling. Af Drachmann, J. & Nielsen, J.T. 51 s., 75,00 kr.
Nr. 399: NEXT 1998-2003, Pesticider 1 i drikkevand. Samlet rapport over 3 præstationsprøvningsrunder. Af Nyeland, B. & Kvamm, B.L. 43 s. (elektronisk)
Nr. 400: Population Structure of West Greenland Narwhals. A Multidisciplinary Approach. By Riget, F. et al. 53 pp. (electronic)
Nr. 401: Dansk tilpasning til et ændret klima. Af Fenger, J. & Frich, P. 36 s. (elektronisk)
Nr. 402: Persistent Organic Pollutants in Soil, Sludge and Sediment. A Multianalytical Field Study of Selected Organic Chlorinated and Brominated Compounds. By Vikelsøe et al. 96 pp. (electronic)
Nr. 403: Vingeindsamling fra jagtsæsonen 2001/02 i Danmark. Wing Survey from the 2001/02 hunting season in Denmark. Af Clausager, I. 62 s., 50,00 kr.
Nr. 404: Analytical Chemical Control of Phthalates in Toys. Analytical Chemical Control of Chemical Substances and Products. By Rastogi, S.C., Jensen, G.H. & Worsøe, I.M. 25 pp. (electronic)
Nr. 405: Indikatorer for Bæredygtig Transport – oplæg til indhold og strategi. Af Gudmundsen, H. 112 s., 100,00 kr.
Nr. 408: Blykontaminering af havfugle i Grønland fra jagt med blyhagl. Af Johansen, P., Asmund, G. & Riget, F. 31 s. (elektronisk)
Nr. 409: The State of the Environment in Denmark 2001. Bach, H., Christensen, N. & Kristensen, P. (eds). 368 pp., 200,00 DKK.
Nr. 411: Satellite Tracking of Humpback Whales in West Greenland. Dietz, R. et al. 38 pp. (electronic)
Nr. 412: Control of Pesticides 2001. Chemical Substances and Chemical Preparations. By Krongaard, T. Petersen, K.K. & Christoffersen, C. 28 pp. (electronic)
Nr. 413: Vegetation i farvandet omkring Fyn 2001. Af Rasmussen, M.B. 138 s. (elektronisk)
Nr. 418: Atmosfærisk deposition 2001. NOVA 2003. Af Ellermann, T. (elektronisk)
Nr. 419: Marine områder 2001 - Miljøtilstand og udvikling. NOVA 2003. Af Ærtebjerg, G. (red.) (elektronisk)
Nr. 420: Landovervågningsoplande 2001. NOVA 2003. Af Grant, R. (elektronisk)
Nr. 421: Søer 2001. NOVA 2003. Af Jensen, J.P. (elektronisk)
Nr. 422: Vandløb og kilder 2001. NOVA 2003. Af Bøgestrand, J. (elektronisk)
Nr. 423: Vandmiljø 2002. Tilstand og udvikling - faglig sammenfatning. Af Andersen, J.M. et al. 56 s., 100,00 kr.