

Stenrev i Limfjorden: Fra naturgenopretning til supplerende virkemiddel



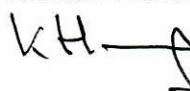
Foto: Peter Bondo Christensen

**By- og Landskabsstyrelsen
Skov- og Naturstyrelsen**

Faglig rapport

Stenrev i Limfjorden: Fra naturgenopretning til supplerende virkemiddel

16. september 2008

Klient		Klientens repræsentant			
By- og Landskabsstyrelsen Skov- og Naturstyrelsen		Johnny Reker			
Projekt		Projekt nr.			
Tilvejebringelse af et fagligt grundlag for genopretning af stenrev i Limfjorden		11700654			
Forfattere		Dato			
Flemming Møhlenberg Jesper H. Andersen Ciarán Murray Peter Bondo Christensen, DMU Tage Dalsgaard, DMU Henrik Fossing, DMU Dorte Krause-Jensen, DMU		16. september 2008			
		Godkendt af			
		Karsten Havnø 			
1	Endelig rapport	FLM/JHA	RMC/ISH	KAH	16/9-08
0	Udkast til rapport	FLM	JHA	JLN	2/6-08
Revision	Beskrivelse	Udført	Kontrolleret	Godkendt	Dato
Nøgleord		Klassifikation			
Limfjorden, stenrev, iltsvind, økologisk tilstand, bevaringstilstand, sedimenter, bufferkapacitet, hydromorfologiske kvalitetselementer, modellering, genopretning, supplerende virkemidler		☐ Åben ☐ Intern ☒ Tilhører klienten			
Distribution					Antal kopier
SNS/BLST: Johnny Reker					1 + pdf
DHI: FLM, JHA, CMU, JLN, RMC, KAH, Bib.					7
DMU: PBC, TD, HFO, DKJ, BRI					5 + pdf

INDHOLDSFORTEGNELSE

1	FORORD	1
2	INDLEDNING	2
2.1	Er "god økologisk tilstand" og "gunstig bevaringsstatus" to sider af samme sag?	2
2.2	Fra "biologi vs. fysik" til "biologi og fysik"	3
2.3	Betydning af rev i kystvande	5
3	ETABLERING AF KUNSTIGE REV, NATIONALT OG INTERNATIONALT	8
4	VERIFIKATION AF KONCEPT	11
4.1	Makroalgers effekter på næringsstoffer og iltbalance	12
4.1.1	Kolonisationsrater for makroalger og konkurrence fra epifauna	13
4.1.2	Dækningsgrader for makroalger	14
4.1.3	Vækstrater og iltproduktion af makroalger	16
4.2	Forudsætninger for 3D vandsøjle modelleringen	18
4.3	Kalibrering	21
4.4	Scenarier	21
4.5	Resultater	21
4.5.1	Effekt af rev under en vindsvag sommer med udbredt iltvind	24
4.5.2	Effekt af rev under en vindsvag sommer i fremtidigt varmere klima	34
5	DISKUSSION OG KONKLUSIONER	36
6	TAKSIGELSER	42
7	REFERENCER	43

BILAG

- A Oversigtskort over Limfjorden med placering af overvågningsstationer
- B Kalibrering af model mod måleresultater af vandstand ved Løgstør samt salt og temperatur i de centrale bredninger
- C Modellerede iltforhold i de centrale Limfjordsbredninger efter etablering af iltproducerende stenrev på forskellige positioner og med forskellig størrelse af iltproduktion
- D Oversigt over iltvind i de centrale og sydlige dele af Limfjorden, 1997-2007



(tom side)

1 **FORORD**

Denne rapport¹ er udarbejdet af DHI's Afdeling for Økologi og Miljø ved DHI og DMU's Afdeling for Marin Økologi, Århus Universitet, og er resultatet af et pilotprojekt igangsat og finansieret af Skov- og Naturstyrelsen i 2007.

Pilotprojektets overordnede formål var:

- at tilvejebringe et fagligt grundlag for at vurdere, om genetablering af stenrev i Limfjorden kan udgøre et supplerende virkemiddel, der på sigt kan reducere den interne næringsstofbelastning og samtidig forbedre både den økologiske tilstand og bevaringstilstanden, jf. Vandrammedirektivet og Habitatdirektivet.

Som følge af en organisationsændring i Miljøministeriet i efteråret 2007 har By- og Landskabsstyrelsen overtaget ejerskabet til pilotprojektet fra Skov- og Naturstyrelsen, herunder været DHI's og DMU's referencepunkt i den periode, projektet har fundet sted.

Pilotprojektet blev fulgt af en følgegruppe med deltagere fra følgende institutioner: By- og Landskabsstyrelsen, Miljøcenter Ringkøbing, Miljøcenter Ålborg, Danmarks Miljøundersøgelser, Århus Universitet (Afdeling for Marin Økologi) samt DHI (Afdeling for Økologi og Miljø).

Pilotprojektet er efter aftale med Skov- og Naturstyrelsen og By- og Landskabsstyrelsen gennemført som et "desk study" og har omfattet følgende forhold:

1. Tilvejebringelse af et datagrundlag til beregning af makroalgesamfunds betydning for nærings- og iltforhold i Limfjorden.
2. En række modelscenarier, der kvantificerer vigtige effekter af genetablering af rev, herunder (a) udvekslingen af næringsstoffer mellem vand og sediment, og (b) bundvandets iltindhold i den centrale del af Limfjorden.

Der er desuden i forbindelse med ovenstående to forhold også tilvejebragt et begrænset datagrundlag for at modellere optagelse (og udveksling) af ilt i Limfjordens havbund. Endelig er der efter aftale skitseret et projekt om genetablering af rev i Limfjorden, som dels inddrager erfaringer fra tidligere og igangværende projekter om genetablering af rev samt tager højde for pilotprojektets resultater.

Et første udkast til rapporten blev præsenteret og drøftet på et møde i følgegruppen den 9. juni 2008. Her blev en række justeringer aftalt. Den nærværende reviderede og endelige rapport er fremsendt til By- og Landskabsstyrelsen den 12. september 2008.

¹ Bedes citeret som: Møhlenberg, F., J.H. Andersen (red.), C. Murray, P.B. Christensen, T. Dalsgaard, H. Fossing & D. Krause-Jensen (2008): Stenrev i Limfjorden: Fra naturgenopretning til supplerende virkemiddel. DHI rapport, 45 sider + bilag.

2 INDLEDNING

Motivationen for at genetablere stenrev i Limfjorden er, at langt hovedparten af de danske kystvande endnu ikke lever op til de fastsatte målsætninger for hhv. ”bevaringsstatus” *sensu* Habitatdirektivet og ”økologisk tilstand” *sensu* Vandrammedirektivet (Ærtebjerg et al., 2003a; HELCOM, 2006 og Andersen & Kaas, 2008), og at der er mulighed for, at stenrev kan bidrage positivt til forbedring af forholdene.

I Danmark er gennemførelsen af Vandrammedirektivet og Habitatdirektivet tæt koblet bl.a. via planprocesserne i Miljømålsloven. Specielt for de marine områder er denne kobling vigtig, fordi de indre danske farvande og de tilstødende fjord- og sundsystemer er indbyrdes forbundet via komplekse og dynamiske strømningsmønstre, og fordi natur og miljø dybest set er to sider af samme sag.

Denne tætte kobling har været anerkendt og søgt styrket siden september 2003, hvor DMU i samarbejde med Miljøstyrelsen og Skov- og Naturstyrelsen arrangerede en workshop med det formål at drøfte det faglige grundlag for integration af miljø- og naturbeskyttelse i kystvandene. Konkret gav workshoppen desuden anledning til en styrket koordinering mellem forskellige marine projekter igangsat og finansieret af Miljøstyrelsen og Skov- og Naturstyrelsen.

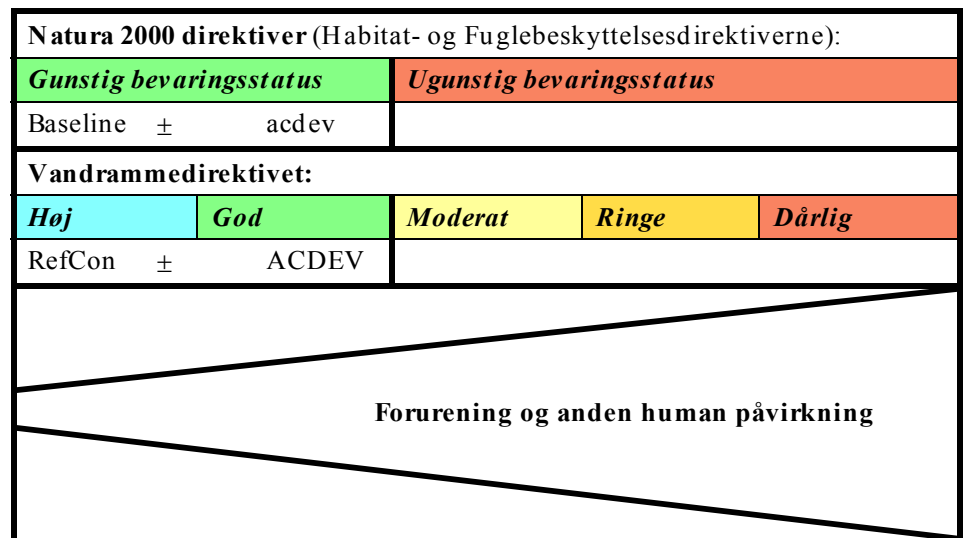
Styrelserne har efterfølgende lagt vægt på at udarbejde analyser af sammenhænge og overlap mellem Vandrammedirektivets normative definitioner af ”god tilstand” med hovedvægt på grænsen mellem god og moderat tilstand og Habitatdirektivets principper for opnåelse af ”gunstig bevaringsstatus” (Andersen & Skov, 2005). Et væsentligt spørgsmål i den forbindelse har været sammenhængen mellem ”god økologisk tilstand” og ”gunstig bevaringsstatus” og de praktiske konsekvenser heraf.

Senest har By- og Landskabsstyrelsen gennemført et projekt om marine biodiversitetsindikatorer og test af et værktøj til at vurdere bevaringsstatus, jf. Habitatdirektivet (Josefson et al., in prep.). Dette arbejde har til dels taget udgangspunkt i Vandrammedirektivet og derved, selv om formålet har været specifikt, bidraget til en styrket sammenhæng mellem de to direktiver.

2.1 ***Er ”god økologisk tilstand” og ”gunstig bevaringsstatus” to sider af samme sag?***

Det er efterhånden generelt accepteret, at Vandrammedirektivets mål om ”god økologisk tilstand” og Habitatdirektivets tilsvarende om ”gunstig bevaringsstatus” er sammenfaldende som illustreret i Figur 1 (se Andersen & Skov, 2005 og Josefson et al., in prep.).

En vigtig konsekvens er, at de virkemidler, der skal til i praksis, vil være sammenfaldende. Forudsætningen herfor er dog, at årsagen til den manglende målsætningsopfyldelse beror på den samme påvirkningsfaktor. Den forudsætning er stort set opfyldt for samtlige danske kystvande og for de åbne dele af Kattegat, bælterne, Øresund og den vestlige del af Østersøen, som alle er eutrofierede (se bl.a. Conley et al., 2000; OSPAR, 2001; HELCOM, 2006 og Carstensen et al., 2006).



Figur 1. Skitse af sammenhængen mellem Natura 2000-direktiverne (Habitatdirektivet og fuglebeskyttelsesdirektivet) og Vandrammedirektivet. RefCon = referenceforhold, ACDEV og acdev = acceptabel afvigelse fra RefCon (se Josefson et al. (in prep.) for yderligere oplysninger).

Den skitserede sammenhæng mellem ”god økologisk tilstand” og ”gunstig bevaringsstatus” gælder indtil videre alene for de biologiske kvalitetselementer, som er afhængige af vandkvaliteten og omfattet af Vandrammedirektivet, dvs. fytoplankton, undervandsvegetation, benthiske invertebrater og fisk. Lignende analyser er ikke udført for marine pattedyr og fugle, da disse ikke er omfattet af Vandrammedirektivet. Tilsvarende er der endnu ikke gennemført analyser af, hvordan ”hydromorfologiske kvalitetselementer” *sensu* Vandrammedirektivet relaterer sig til de beskyttede habitattyper *sensu* Habitatdirektivet, som alle er geomorfologisk baseret.

Kravet om opnåelse af ”god økologisk tilstand” gælder vandområder, der ikke er stærkt fysisk modificerede. Et uafklaret spørgsmål trænger sig derfor på: *Kan Limfjorden, som følge af flere års stenfiskeri og muslingeskrab, betragtes som værende stærkt fysisk modificeret?* Hvis dette er tilfældet, skal fjorden alene oppebære såkaldt ”godt økologisk potentiale”. Der er ingen tvivl om, at dele af fjorden er fysisk modificerede, men det springende punkt er, om der er tale om stærk modifikation. By- og Landskabsstyrelsen har for nyligt udarbejdet retningslinier for udpegning af stærkt fysisk modificerede områder og i den forbindelse listet en række eksempler på, hvad der kan udpeges (By- og Landskabsstyrelsen, 2008). Eksemplerne er bl.a.: (1) klappladser, (2) broer og større vejdæmninger, (3) kystsikringsområder, (4) havneanlæg, (5) sejlrender, og (6) inddæmmede områder. Det er i retningslinierne understreget, at stenrev, som er ødelagt pga. stenfiskeri, eksempelvis kan genoprettes, så de kan opnå ”god økologisk tilstand” i 2015. På dette grundlag vurderer vi, at Limfjorden generelt set ikke kan karakteriseres som stærkt fysisk modificeret.

2.2 Fra ”biologi vs. fysik” til ”biologi og fysik”

De væsentligste presfaktorer og dermed årsagen til, at miljø- og naturtilstanden i de danske farvande endnu ikke lever op til de fastsatte mål, er mange, bl.a. (1) top-down kontrol (fiskeri og i nogen grad jagt), (2) forurening (især næringsstoffer og i visse farvandsområder også miljøfarlige stoffer), (3) fysisk modifikation, (4) introduktion af ikke-hjemmehørende (invasive) arter og (5) klimaforandringer (se Jackson et al., 2001 og Bach et al., 2005).

Forvaltningen af miljø- og naturforholdene i de danske farvande har traditionelt taget udgangspunkt i det forhold, at den vigtigste presfaktor er tilførsler af forurenende stoffer, først og fremmest næringsstoffer. Listen over ”indsatsplaner” er lang og omfatter bl.a. NPo-planen fra 1985, Vandmiljøplan I fra 1987, Bæredygtighedsplanen fra 1991, Vandmiljøplan II fra 1998 og Vandmiljøplan III fra 2004 (Kronvang et al., 2008). For miljøfarlige stoffer er der parallelle initiativer, først og fremmest Pesticidhandlingsplan I og II fra hhv. 1986 og 2004. Den bagved liggende tankegang er enkel: (1) menneskelige aktiviteter kan føre til et utilsigtet tab af næringsstoffer til vandmiljøet, (2) næringsstofferne transporteres via grundvand og/eller vandløb ud i havet, hvor (3) koncentrationerne af næringsstoffer (først og fremmest kvælstof) stiger, (4) øgede næringsstofkoncentration fører til en øget vækst af planktonalger samt en række negative ændringer i kystvandenes økologiske struktur og funktion som følge af et stigende iltforbrug ved nedbrydningen af den forøgede organiske stofmængde. De typiske negative ændringer i de danske kystvande omfatter mange forhold, men oftest er der fokus på følgende to ”spor”:

Spor 1: Planktonalger og undervandsvegetation

- øget produktion og sedimentation af planktonalger,
- reduceret nedtrængning af lys i vandsøjlen, og
- udskygning og reduceret udbredelse af bundplanter (bl.a. ålegræs og tang).

Spor 2: Planktonalger, sedimentation, mineralisering og iltsvind

- øget produktion og sedimentation af planktonalger,
- øget mineralisering i havbunden under forbrug af ilt,
- reduceret bufferkapacitet i havbunden (dvs. evnen til at modvirke effekter af iltsvind i havbunden), og
- øget udbredelse og varighed af iltsvind.

Beriges et farvandsområde med næringsstoffer, fører det som skitseret til en større produktion af planktonalger, som har en lang række afledte og oftest særdeles negative effekter på de planter og dyr, der lever i det pågældende område. I de værste tilfælde kan kombinationen af næringsstofberigelse og ugunstige klimatiske forhold føre til omfattende iltsvind, bundvendinger og frigivelse af næringsstoffer. Dette øger igen algerne produktion og kan frigive svovlbrinte, der i yderste konsekvens kan slå alle former for højere liv ihjel, som det skete i Mariager Fjord i 1997 (Fallesen et al., 2000) og i dele af de indre danske farvande i 2002 (Ærtebjerg et al., 2003b).

Et til tider overset forhold er, at der er en række væsentlige koblinger mellem biologien og de fysisk-kemiske forhold. Eksempler på dette er bl.a.: (1) fytoplankton, der kan opnå maksimale koncentrationer i springlaget mellem det lys-eksponerede overfladevand og det næringsrige bundvand, (2) ålegræs kan ikke vokse på stenet eller mudret bund, (3) tang kan kun vokse på sten eller klippe og (4) gravende fauna lever kun på mudder eller sandbund. Det følger heraf, at de hydromorfologiske kvalitetselementer er meget vigtige, og at de derfor ikke er sekundære i forhold til de biologiske kvalitetselementer, når Vandrammedirektivet skal gennemføres. I praksis betyder det, at der for de morfologiske forhold, herunder specielt dybdevariation og bundforhold (substrat og dets struktur), skal tilvejebringes en forståelse for referencetilstand og fastlægges en grænse mellem ”god” og ”moderat” økologisk tilstand specifikt for udvalgte hydromorfologiske kvalitetselementer.

Der er en direkte kobling mellem hydromorfologiske kvalitetselementer og naturtypen ”stenrev”, der, som navnet siger, er defineret ud fra forekomst af sten. ”Gunstig bevaringsstatus” for naturtypen stenrev forudsætter, at (1) den særlige struktur og de særlige funktioner, der er nødvendige for opretholdelsen af gunstig bevaringsstatus, er til stede på lang sigt og sandsynligvis fortsat vil være det i en overskuelig fremtid, jf. Habitatdirektivet, og at (2) bevaringsstatus for de arter, der er karakteristiske for eller afhængige af den pågældende naturtype, er gunstig, jf. Habitat- og Fuglebeskyttelsesdirektivernes afsnit om bevaringsstatus for arter.

I områder, hvor stenrevenes udbredelsesområde enten er ustabilt eller unaturligt reduceret, kan genopretning af stenrevene være påkrævet, fordi forekomsten af sten(rev) netop er en integreret del af marine økosystemers struktur og funktion.

2.3 Betydning af rev i kystvande

Rev er, jf. Skov- og Naturstyrelsens hjemmeside om BlueReef-projektet:

- *områder, hvor havbunden hæver sig fra den omliggende havbund og har stenet eller anden hård bund. Revet kan være blottet ved ebbe. Fra havbunden og op efter indeholder revene ofte en ubrudt lagdeling af forskellige dyre- og plantesamfund. Det giver de enkelte rev en stor rigdom af dyr og planter, som ofte er helt forskellige fra andre, selv nærtliggende rev. Det er især den faldende saltholdighed ned gennem de danske farvande fra Kattegat gennem bæltene til Østersøen omkring Bornholm, der er årsag til at dyre- og plantelivet er meget forskelligt fra rev til rev. Forskelle i bølger, strøm, vanddybde, tætheden af sten og stenenes størrelse og lysnedtrængning er også med til at gøre de enkelte stenrev unikke. En særlig natur knytter sig til stenrevet, hvis mangfoldighed af dyr og planter netop kræver et hårdt og solidt underlag at hæfte sig til. Især de specielle huledannende stenrev, hvor stenene ligger i bunker oven på hinanden, rummer et meget artsrigt dyre- og planteliv. Stenrevene kan være meget forskellige. Nogle rev har store sammenhængende formationer af ofte store sten på havbunden, der skarpt adskiller sig fra den omgivende sand- eller grusbund. Andre rev har mere glidende overgang til sand- eller grusbunden, og andre har stengrupper eller stenbanker vekslende med sandede partier (<http://www.skovognatur.dk/Natur/Naturprojekter/LIFE/BlueReef>).*

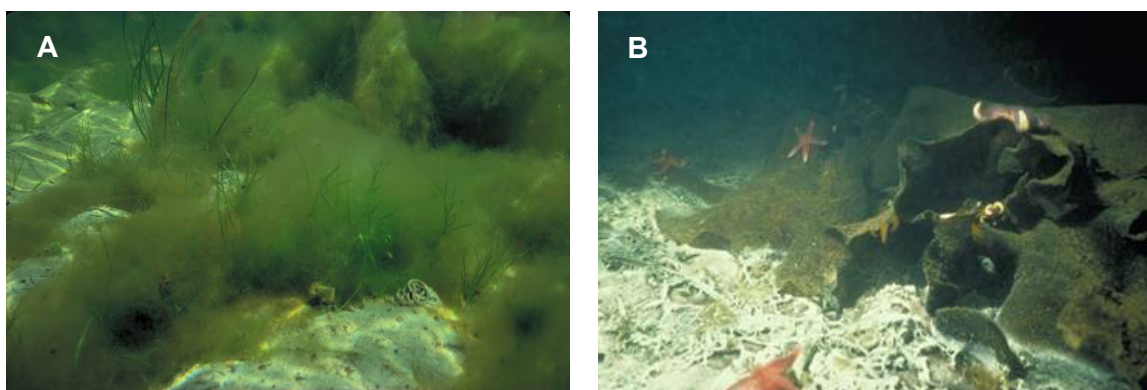
I de ”gode gamle dage”, før eutrofiering og fjernelse af sten førte til ændringer af de danske farvandes struktur og funktion, eksisterede der omkring 32 km² huledannende stenrev (jf. Habitatdirektivets definition) i de indre danske farvande. Det er skønnet, at der nu kun er ca. 2 km² tilbage (Stig Helmig, *pers. com.*).

Stenrevene og den øvrige hårde bund var, er og vil være et vigtigt substrat for fasthæftede flerårige makroalger og den dertil knyttede flora og fauna. Stenrev og stenet havbund har qua de vedhæftede planter (tang) desuden betydning for iltforholdene, da planterne producerer ilt i dagtimerne (hvis der trænger tilstrækkeligt lys ned til revene). Om natten kan planternes iltforbrug i særlige tilfælde påvirke iltforholdene i negativ retning. Endelig kan stenene i visse situationer også have betydning for den vertikale opblanding af vandmasserne. Figur 2 viser, hvordan et lavvandet stenrev kan fremstå i relativt upåvirket tilstand.



Figur 2. Lavvandet stenrev. Foto: Peter Bondo Christensen.

Når mange kystvande med stenrev i dag ikke er i naturtilstand, skyldes det især to forhold, nemlig eutrofiering og stenfiskeri. Landbruget er overordnet set den væsentligste årsag til eutrofieringsproblemerne i de indre danske farvande, som har medført, (1) at vegetationen ikke vokser på så dybt vand som tidligere, og (2) at der i ”våde år”, dvs. år med øget nedbør og afstrømning, kan forekomme iltsvindsproblemer. Figur 3 illustrerer, hvordan en sandbund i et eutrofieret kystområde og et iltsvindsramt område kan se ud.



Figur 3. A: Havbund med ålegræs og eutrofierings-betingende enårige alger i et område uden store sten. B: Iltsvindsramt havbund – søstjerne forsøger at krybe opad for at undgå iltsvindet og svovlbrinte ”siver” ud fra havbunden og resulterer i en hvid belægning af svovlbakterier (”liglagen”). Fotos er venligst udlånt af Nanna Rask.

Udover en tilsigtet fjernelse af sten ved stenfiskeri kan der også fjernes sten ved fiskeri efter muslinger. For Limfjorden er det skønsmæssigt beregnet, at der i perioden 1989-2008 er fjernet 550.000 tons sten, skaller og små muslinger i forbindelse med skrabning efter blåmuslinger (MCÅ, 2008). Fordelingen mellem undermåls-muslinger, skaller og sten i det fjernede materiale kendes ikke, men hvis det antages, at 33% af vægten bestod af sten ($\approx$ vol på 15% af det fjernede materiale), og at disse havde en gennemsnitlig di-

ameter på 7,5 cm, svarer det til et projiceret areal² på ca. 1,5 km² hårbund som er fjernet. Ændres forudsætningerne for beregningen, vil det selvfølgelig påvirke størrelsen af det beregnede hårbundsareal, som er fjernet.

Fjernelsen af stenrev har som udgangspunkt haft en række negative effekter, som der kun i begrænset omfang er gjort rede for, ligesom der ikke er gennemført analyser af de kombinerede effekter af eutrofiering og stenfiskeri. Denne rapport har til formål at undersøge, om naturgenopretning af stenrev kan vende en negativ udvikling og føre til såvel bedre miljøkvalitet ("økologisk tilstand" jf. Vandrammedirektivet) og bedre naturforhold ("bevaringsstatus" jf. Habitatdirektivet).

² Forudsætninger: sten med kugleform, halvt dækket af sediment, vægtfylde på 2,6 kg/dm³.

3 **ETABLERING AF KUNSTIGE REV, NATIONALT OG INTERNATIONALT**

I en nyligt udgivet bog er stenrev meget betegnende beskrevet som ”havets oaser” (Dahl et al., 2003). Dette skyldes, at disse habitater har langt større artsrigdom og biologisk produktion end den ensformige flade bund, som ofte omgiver stenrev. Med indførelse af Habitatdirektivet i 1992 og øget fokus på bevarelse af den biologiske mangfoldighed er der stigende interesse for at genetablere de hårbundshabitater, som tidligere er blevet fjernet primært gennem stenfiskeri eller med skrabende fiskeredskaber. Der foreligger en meget omfattende litteratur omkring ”de positive effekter” af kunstige rev på tæthed af bunddyr, fisk og makroalger (fx Baine, 2001; Jensen et al., 2000; Angel et al., 2005). Negative effekter er sjældent omtalt (fx Wilding, 2006), men i mindst ét tilfælde er man i gang med at fjerne et ”rev” pga. et forkert valg af materialer (bildæk).

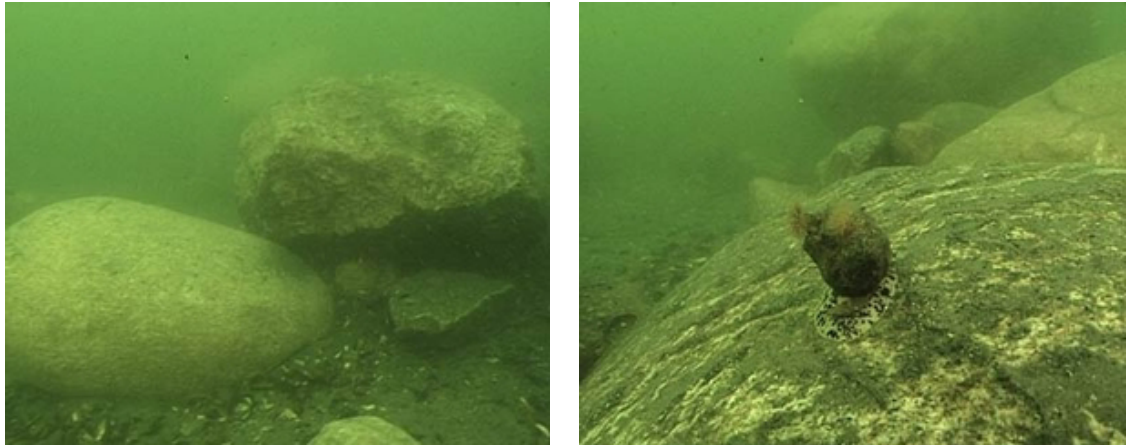
Der er kun tre eksempler på etablering af rev i Danmark: (1) den storstilede genopretning af Læsø Trindel, (2) etableringen af et kunstigt stenrev i den østlige Limfjord og (3) etableringen af kunstige ”rev” i Vejle Fjord.

”Blue Reef-projektet” ved Læsø Trindel (<http://www.BlueReef.dk>) er et godt eksempel, hvor de fysiske og biologiske forudsætninger er grundigt undersøgt, før der er anvendt naturlige materialer til reetablering af stenrevet. Formålet med BlueReef-projektet er at genoprette og beskytte et næsten 7 ha stort stenrev ved Læsø Trindel, herunder stabilisere ca. 6 ha af det eksisterende stenrev. Genopretningen sker med 60.000 m³ nye sten udlagt i 2008. De enkelte stenblokke vejer hver ca. 1-3 ton, udlægningen af disse fremgår af Fig. 4.



Figur 4. Udlægning af sten på Læsø Trindel (BlueReef-projektet).

Et andet dansk eksempel på etablering af et rev stammer fra den østlige del af Limfjorden. Ved Dynen vest for Ålborg blev der i 2002 etableret et egentligt stenrev på 50 m³. Den samlede pris herfor var 25.000 kr. Stenrevet er huledannende og det forventes, at hummeren, der de senere år er vendt tilbage til Limfjorden, på et tidspunkt vil ”flytte ind”.



Figur 5. Sten udlagt i området Dynen vest for Ålborg i 2002. Fotos: Dan Kaasby.

Yderligere et dansk eksempel er ”etableringen” af ”rev” i Vejle Fjord. Her blev der i 2005 etableret en række kunstige ”rev” bestående af muslingeskaller holdt sammen af kraftige ”sække” af net (”rev”-moduler). I et område på ca. 300 x 500 meter er der udlagt 100 sådanne ”rev”-moduler. Formålet var at undersøge, om man hermed kunne forbedre livsbetingelserne for fisk og dyr i fjorden. Undersøgelser i 2008 (fiskeri og dykkerundersøgelser) har efter etableringen vist, at de kunstige ”rev” har en række positive effekter for fisk og bunddyr i området. Figur 6 viser, hvordan ”revene” ser ud efter ”etableringen”.



Figur 6. Dyr og planter på ”revene” i Vejle Fjord i 2008. Billederne viser hhv. søanemoner, søpunge og brunalger. ”Rev”-modulerne (netsækkene) kan anes på billedet af brunalgerne. Fotos: Per Dolmer, DTU Aqua.

I en række andre lande har det igennem mange år været en udbredt praksis at etablere rev med forskellige formål: (1) beskytte, favorisere og udvikle fiskeressourcer, (2) beskytte kyster mod erosion, og (3) genetablere tabte habitater. Sidstnævnte formål dog kun i begrænset omfang.

Det er forholdsvis dyrt at bruge sten ved etableringen af rev, og derfor er ”revene” blevet konstrueret på en billigere måde, f.eks. af aske fra affaldsforbrændingsanlæg og fra oliefyrede kraftværker, som er stabiliseret i forskellige cementblandinger og indstøbt i store blokke. Fra USA er der også mange eksempler på rev bygget af skibs- og bilvrak,

brugte bildæk, kasserede togvogne samt olieplatforme. Effekten af disse konstruktioner har været blandede, og i Florida er man begyndt at fjerne de mere end én mio. bildæk, som blev dumpet i 1972 for at forbedre fiskefangsten hos lystfiskere. Den positive effekt på fiskeriet udeblev. I enkelte projekter har der været særlig fokus på reetablering af bestande af makroalger, selv om udformningen af ”rev”-elementer ligger langt fra de naturlige habitater for makroalger. Ønsket hos den norske producent har været at op-
hjelpe de reducerede bestande af makroalger i de norske fjorde.

Selv om intentionerne har været gode, har forberedelserne ved etablering af rev, herunder også dokumentation og gennemregning af effekter, inden revene blev etableret, været mindre overbevisende. Et godt eksempel på de overvejelser, man bør gøre, når man planlægger etableringen af et rev, er sammenfattet af Challinor & Hall (2008). Også de danske rapporter redigeret af Støttrup & Stokholm (1997) giver en grundig gennemgang af erfaringerne indtil 1995. Endelig har Oslo-Paris Kommissionen (OSPAR) udformet en vejledning for etablering af kunstige rev herunder også krav til materialer.



Figur 7. *Eksempler på forskellige former for kunstige rev.*

4 VERIFIKATION AF KONCEPT

Dette kapitel beskriver resultaterne af de modelscenarier, der er gennemført med henblik på at verificere, at genetablering af stenrev kan bidrage til forbedring af de økologiske forhold i kystvande, herunder om denne form for naturgenopretning samtidigt kan ansues som ”supplerende virkemidler” i regi af Vandrammedirektivet.

Hypotese: Etablering af stenrev og/eller et større areal med sten har mindst tre positive konsekvenser for Limfjorden:

1. Genetablering af hård bund, som alger og dyr kan kolonisere og dermed bidrage til at øge biodiversiteten i fjorden.
2. Stenrev på større dybde vil mindske udbredelsen af iltsvind ved at bidrage til en øget iltproduktion i dybere områder af Limfjorden. Dette forudsætter dog, (a) at iltproduktionen blandt de alger, der koloniserer revet, er større end de koloniserende alger og dyrs eget iltforbrug (dvs. at netto-iltproduktion > 0), og (b) at revets netto-iltproduktion også er større end den iltproduktionen, der eventuelt fandt sted på den eksisterende bløde bund, før revet blev etableret.
3. Stenrev på større dybde vil mindske udbredelsen af iltsvind ved at bidrage til en øget vertikal opblanding af vandsøjlen og vil dermed bringe iltrigt overfladevand til de bundnære lag.

Formålet med verifikationen er at teste hypotesen ovenfor. Det vil blive gjort ad flere veje:

1. Litteraturstudium af, hvilke organismer der koloniserer nye overflader i marine områder, og hvor hurtigt koloniseringen foregår.
2. Litteraturstudium, der skal afklare, hvilken dækningsgrad af alger man kan forvente på rev-dybden i Limfjorden, samt hvilken produktion disse alger kan forventes at have.
3. Modelstudium af, hvilken effekt et stenrev kan have på iltforhold, når man tager højde for a) iltproduktion/forbrug hos de organismer, der forventes at kolonisere revet, og b) revets effekt på vertikal opblanding af vandsøjlen. Scenarierne skal sammenlignes med den eksisterende situation med mikroalger mm. på en blød bund.

I modelsimuleringerne er revene placeret på dybder mellem 6,5 og 7,0 m (i et enkelt scenarium også ud til 7,5 m dybde), der i Løgstør Bredning dækker et område på ca. 60 km², og det er dette areal, som især rammes af iltsvind.

Limfjorden er valgt som modelområde, da foreløbige beregninger har indikeret, at genetablering af rev i de centrale dele af fjorden vil have væsentlige effekter på bl.a. iltproduktionen, sedimentets bufferkapacitet og dermed iltbalancen og forekomsten af iltsvind i store dele af Limfjorden. Andre grunde til, at Limfjorden er valgt som modelområde, er bl.a.: (1) at der tidligere, men i anden sammenhæng, er opsat modeller for området, og (2) store dele af fjorden er udlagt som Natura 2000 områder, og at fjorden derfor på et tidspunkt skal have både en ”god økologisk tilstand” og en ”gunstig bevaringsstatus”.

4.1 Makroalgers effekter på næringsstoffer og iltbalance

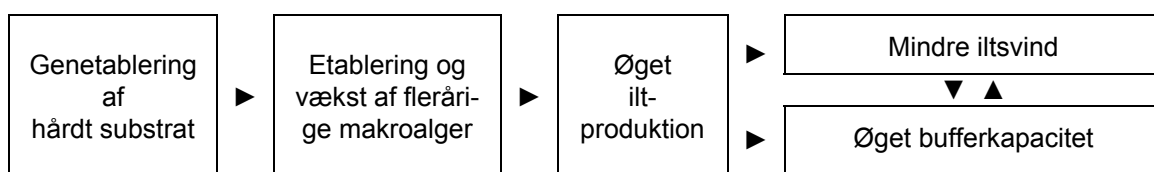
Hvis tilstanden i kystvandene ikke lever op til de fastsatte mål, har der i Danmark og de omgivende lande været tradition for, at forbedringer skulle nås ved at skrue ned for den væsentligste årsag til problemet, nemlig udledningerne af næringsstoffer. Rækken af "indsatsplaner", som frem for alt opererer med såkaldte basale virkemidler, er allerede lang, bl.a. NPo-planen fra 1985, Vandmiljøplan I fra 1987, Bæredygtighedsplanen fra 1991, Vandmiljøplan II fra 1998 og Vandmiljøplan III fra 2004 og vil blive endnu længere med den påbegyndte gennemførelse af Vandrammedirektivet og den varslede Vandmiljøplan IV. Der har, i forhold til ønsket om at forbedre det danske vandmiljø tilstand, kun i begrænset omfang været taget supplerende virkemidler i brug og indtil videre kun i forhold til forbedring af de økologiske forhold i vandløb og søer.

Det er indlysende, at forbedringer i de danske kystvande alt overvejende skal nås ved at reducere årsagen til problemet. I den forbindelse er det vigtigt at være opmærksom på, at problemet ikke nødvendigvis kun er "øgede næringsstofkoncentrationer" (Fig. 8), men også kan skyldes mange andre forhold, f.eks. fjernelse af tilgængeligt og egnet substrat for makroalgernes fasthæftelse.



Figur 8. Konceptuel model af spor 1, hvor næringsstofberigelse resulterer i reduceret udbredelse af undervandsvegetation, se spor 1, afsnit 2.2.

Forbedringer af bundplanternes udbredelse vil kunne nås med genetablering af et vel-egnet substrat i de kystområder, hvor der tidligere har været stenrev eller mere spredte stev, bl.a. i Limfjorden. En sådan effekt er skitseret i Figur 9. Denne form for naturgenopretning vil herved kunne ansues som et basalt virkemiddel i forhold til Habitatdirektivet og samtidig fungere som et såkaldt supplerende virkemiddel jf. Vandrammedirektivet.



Figur 9. Konceptuel model for den primære effekt af genetablering af stenrev. Bemærk, at der opstår en ny ligevægt mellem "mindre iltsvind" og "øget bufferkapacitet" i sedimentet.



Figur 10. Rev og de dertil knyttede makroalger er vigtige for den biologiske diversitet og udgør vigtige refugier for bundlevende krebsdyr, bl.a. hummer og fisk. Foto: (A) Karsten Dahl, DMU og (B) Jan Nicolaisen, Orbicon.

4.1.1 Kolonisationsrater for makroalger og konkurrence fra epifauna

En litteraturgennemgang viser adskillige eksempler på, at overflader på vanddybder med tilstrækkelig lysintensitet koloniseres af enten makroalger eller eksempelvis rurer eller muslinger.

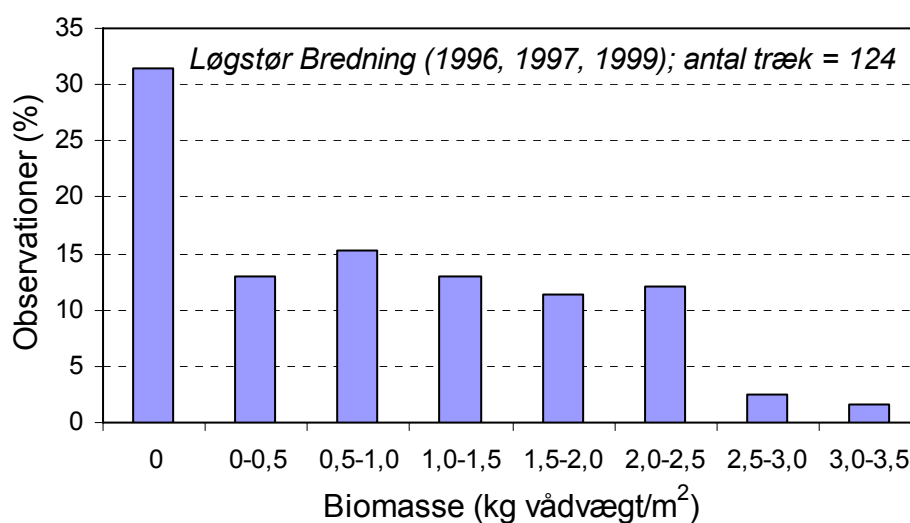
Petratis & Methratta (2006) ryddede et stort antal flader af forskellig størrelse langs en klippekyst udfor Maine, USA og fulgte koloniseringen af fladerne. De fandt, at enten alger, rurer eller muslinger koloniserede fladerne og foreslog derfor, at der findes flere typer af (stabile) samfund, der kan etablere sig på sådanne overflader i lavvandede områder. Lignende observationer er også gjort i danske farvande, som nedenstående eksempler viser.

På stenrevet 'Ebbelykke Rev' blev algebevoksningen fjernet fuldstændig fra tilfældigt udvalgte sten mellem de andre begroede sten i revet. Efter 1-2 år var der ikke etableret et nyt algesamfund på de rensede sten, hvilket muligvis skyldes 'piskeeffekt' eller skyggeeffekt fra algerne på nabosten (Karsten Dahl *pers. com.*).

Algekoloniseringen blev også fulgt på en ny ydermole ved Århus Havn (Majland, 2005). Den nye mole var i kontakt med den gamle mole, som derved kunne fungere som kolonisationskilde af alger til det nye område. Det tog 2-3 år, før der var etableret et samfund af opportunistiske makroalger med spredte flerårige alger. *Laminaria* kom først til efter det 3. år, og på dette tidspunkt udgjorde algebiomassen i gennemsnit ca. 400 g tørvægt/m². På den (9 år) gamle mole var algebiomassen væsentligt højere: ca. 1400 g tørvægt/m². I modsætning til ydermolen ved Århus Havn blev der på en ny mole ved Grenå Havn ikke observeret algevækst 3-4 år efter at molen var etableret, og her var molen domineret af rurer (Karsten Dahl, *pers. com.*).

I den vestlige Østersø ud for Rostock, hvor både natursten og 4 forskellige kunstige rev-elementer blev placeret på 11 m's dybde, var der det første år efter etableringen opbygget en biomasse af makroalger på ca. 30 g tørvægt m⁻², mens der efter 2 år blev målt en biomasse på ca. 100 g tørvægt m⁻² og dækningsgrader mellem 50 og 90% (Schubert & Schygula 2006). Samtidigt reduceredes dækningsgraden af epifauna, især blåmuslinger som dominerede efter det første år.

Muslinger og andre filtratorer såsom sækdyr er fødebegrænsede på den jævne bund i Løgstør Bredning pga. en i gennemsnit lav tilførsel af alger fra overfladelaget og lave strømhastigheder ved bunden. Det betyder, at tætte sammenhængende bestande ikke kan etablere sig på større arealer (f.eks. et sammenhængende rev på $\frac{1}{2}$ km² i Løgstør Bredning), hvor dybden er større end 6 m, fordi muslingerne i randen af et sådant rev vil fjerne fødegrundlaget for muslinger placeret midt på revet. Dette bekræftes også af de bestandsopgørelser, der er gennemført af DTU Aqua (tidligere Danmarks Fiskeriundersøgelser) hvert eller hvert andet år over en årrække. I mere end 30% af de gennemførte trawltræk i årene 1996, 1997 og 1999 var der ingen muslinger, i ca. 60% af trawltrækene fordelte biomassen sig ligeligt indenfor intervallerne 0-0,5, 0,5-1,0, 1,0-1,5, 1,5-2,0 og 2,0-2,5 kg vådvægt m⁻², mens de højeste biomasser (>2,5 kg vådvægt m⁻²) kun forekom i 5 ud af 124 trawltræk (Fig. 11).



Figur 11. Frekvensfordeling af blåmuslingers biomasse i Løgstør Bredning. Diagram er baseret på 124 trawltræk a 200 m² gennemført i 1996, 1997 og 1999. Dybder lavere end 3 m indgår ikke (data tilsendt fra Erik Hoffmann, DTU Aqua).

En større sammenhængende muslingebestand vil kræve en større vandbevægelse end de 2-3 cm s⁻¹, som er typisk for det bundnære vand i Løgstør Bredning. Man kan derfor ikke drage umiddelbare paralleler fra observationer i de snævre løb i Limfjorden, hvor den vertikale blanding og horisontale transport ved bunden er langt større end på den jævne bund i f.eks. Løgstør Bredning.

På baggrund af ovenstående iagttagelser er konklusionen, at det tager tid (minimum 5 år) at opbygge en høj permanent biomasse på større vanddybde, hvor lysforholdene er sub-optimale. Det er heller ikke givet, at revene i sidste ende bliver koloniseret af alger.

4.1.2 Dækningsgrader for makroalger

En generaliseret lineær "algemodell", som beskriver algesamfundets dækningsgrad på den hårde bund langs dybdegradienter i danske kystområder, er blevet udviklet gennem de seneste år (Krause-Jensen et al., 2007a og b; Carstensen et al., in prep.). Modellen bygger på et landsdækkende datasæt om makroalger, som er indsamlet via NOVANA-programmet i årene 2001, 2003 og 2005. Modellen forudsætter, at den observerede dækning af algesamfundet afhænger af kystområde, delområde (indre eller ydre del af en fjord eller åbent kystområde), lokalitet, vanddybde, vanddybde i kombination med

substratsammensætning, indsamlingsår og -måned samt ”dykkereffekter”. Modellen beregner marginale fordelinger for område-, dybde-, års- og årstidsvariationer. Marginale fordelinger beskriver variationen i en specifik faktor, idet de tager alle øvrige variationer i betragtning. Derved kan modellen beregne de forventede dækningsgrader, som kan sammenlignes mellem områder. I denne rapport benyttes modellen til at beregne forventede dækningsgrader for algesamfundet i Løgstør Bredning som gennemsnit for de tre indsamlingsår (2001, 2003, 2005), for sommerperioden (maj-september) og for et substrat, som udelukkende består af sten. Makroalgernes dækning i Løgstør Bredning (modellerede værdier for områder med hård bund) er modelleret af Jacob Carstensen (DMU) efter samme model som i Carstensen et al. (in prep.).

Modelleringen omfatter både den totale dækningsgrad af oprette alger i forhold til den hårde bund, som maksimalt kan udgøre 100%, og den kumulerede dækningsgrad af de enkelte oprette alger i samfundet, som kan udgøre flere hundrede %, eftersom algerne under gode vækstforhold kan vokse i flere etager (Tabel 1). De modellerede dækningsgrader udtrykker et gennemsnit for hele Løgstør Bredning. Man må forvente, at vækstforholdene varierer indenfor bredningen, men uden denne information forudsætter vi i modelscenariene, at dækningsgraderne angivet i Tabel 1 er repræsentative for de områder, hvor der i modelscenariene er placeret rev.

Tabel 1. *Modellerede dækningsgrader for oprette alger i Løgstør Bredning: Total dækning af algesamfundet i forhold til den hårde bund, som maksimalt kan udgøre 100%, og kumuleret dækning af de enkelte alger i samfundet, som kan udgøre flere 100%, eftersom algerne kan vokse i flere etager. Modelleringen repræsenterer relativt store vanddybder, da et eventuelt rev skal placeres relativt dybt.*

Dybde (m)	Total dækningsgrad (%)	Kumuleret dækningsgrad (%)
4,0	60	71
4,5	54	63
5,0	48	55
5,5	42	49
6,0	37	43
6,5	31	38
7,0	26	34

Data fra det nationale overvågningsprogram viser, at de dybest voksende makroalger i Løgstør Bredning forekommer på 4-6 m dybde (Tabel 2). Den mest udbredte alge på denne dybde er Sargassotang, og de næstmest dominerende arter er røde og brune skorpeformede alger (Tabel 2). Derfor er det sandsynligt, at disse arter også vil spille den største rolle på et evt. nyudlagt stenrev i fjorden placeret på dybder omkring 6-7 m.

I de øvrige Limfjordsbredninger er makroalgesamfundets dækningsgrad på 7 m's dybde modelleret til:

- V f. Mors: Total dækning: 10% (0-33%), kumuleret dækning: 23% (12-42%).
- NV f. Mors: Total dækning: 9% (0-32%), kumuleret dækning: 16% (8-30%).
- Skive Yderfjord: Total dækning: 7% (0-33%), kumuleret dækning: 14% (7-30%).
- Skive Inderfjord: Total dækning: 6% (0-31%), kumuleret dækning: 19% (9-38%).
- Nissum Bredning: Total dækning: 53% (24-80%), kumuleret dækning: 63% (34-117%).

Tabel 2. Oprette og skorpeformede makroalgearter og deres dækningsgrad på 4-6 m dybde i Løgstør Bredning i 2005.

Art	Dækning (%)
St. DMU0116	
• <i>Acrochaetium secundatum</i>	1,0
• <i>Aglaothamnion bipinnatum</i>	0,3
• <i>Ceramium tenuicorne</i>	0,3
• <i>Chondrus crispus</i>	1,0
• <i>Dictyosiphon foeniculaceus</i>	1,7
• <i>Ectocarpus fasciculatus</i>	0,3
• <i>Halidrys siliquosa</i>	0,7
• "Røde skorper"	5,0
• <i>Sargassum muticum</i>	26,7
• <i>Seirospora interrupta</i>	0,3
St. DMU0134	
• <i>Aglaothamnion bipinnatum</i>	0,5
• "Brune skorper"	4,2
• <i>Ceramium tenuicorne</i>	0,8
• <i>Heterosiphonia japonica</i>	3,3
• "Røde skorper"	10,0
• <i>Sargassum muticum</i>	8,0

4.1.3 Vækstrater og iltproduktion af makroalger

Vækstrater og iltproduktion hos makroalger afhænger af: (1) algeart, (2) næringsstatus i algerne, og (3) lystilgængelighed (som bl.a. påvirkes af algerne dækningsgrad/selvskygning eller af høj tæthed af planktonalger i vandsøjlen).

Langt hovedparten af eksisterende data for algers udbredelse refererer til deres dækningsgrad og ikke deres biomasse, som er den relevante parameter, når næringsstofakkumulering og iltproduktion skal beregnes. Det er derfor nødvendigt at basere vurderingerne på flere kilder.

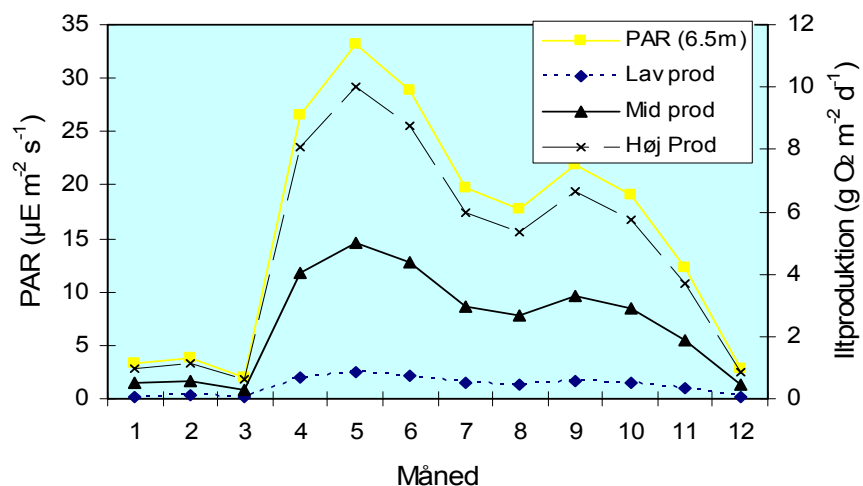
Under antagelse af, at brunalgen Sargassotang (*Sargassum muticum*) også vil dominere på fast substrat på dybere vand i Limfjorden og under forudsætning af, at nedenstående forhold er opfyldt, kan iltproduktionen beregnes:

1. Dækningsgrad: Der opbygges en dækningsgrad på 20% på 6,5 m i Løgstør og Bjørnsholm Bugt (Tabel 1 & 2).
2. Biomasse: 20% dækningsgrad svarer, afhængigt af årstid, til en biomasse på 40-80 g tørvægt per m² under forudsætning af, at relationen kan ekstrapoleres fra det undersøgte dybdeinterval på 3 m til 6,5 meters vanddybde (Pedersen et al., 2005).
3. Lyskompensationspunkt: Lyskompensationspunktet for vækst af thallus af brunalgerne *Petalonia fascia* og *Fucus serratus* er hhv. 1,61 og 1,12 $\mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{s}^{-1}$ i en lys:mørke cyklus på 14:10 (Markager & Sand-Jensen, 1992). Det antages, at Sargassotangs lyskompensationspunkt ligger på samme niveau. Det antages også, at en lav dækningsgrad på 20% medfører ringe selvskygning, så lyskompensationsværdien for thallus (frem for hele samfund) kan anvendes.
4. Maksimal vækstrate: Feltundersøgelser i Limfjorden viser, at Sargassotang opnår en maksimal vækstrate på 0,1 d⁻¹ i juni måned og har en årlig middelvækstrate på 0,05

d^{-1} (Pedersen et al., 2005). Med en dækningsgrad på 40-80 g tørvægt per m^2 svarer den maksimale vækstrate på $0,1 \text{ d}^{-1}$ til en maksimal iltproduktionsrate på $3,4\text{-}6,8 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (antaget: C indholdet udgør 32% af tørvægten (Plus et al., 2005); netto iltproduktionen viser en simpel 1:1 støkiometri til produktionen af organisk stof $\rightarrow 40 (80) \times 0,32/12 \times 32$). Tæt undervandsvegetation, der vokser under optimale forhold, kan opnå en maksimal bruttoproduktion på ca. $25\text{-}36 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (Middelboe et al. (2006), omregnet fra $0,8 \text{ mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; Krause-Jensen & Sand-Jensen (1998), omregnet fra $60 \text{ mmol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$ multiplikation med 12 timer; Binzer et al. (2006), omregnet fra $26,3 \text{ } \mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ved opskalering til 12 timer). Da algesamfundet på stenrev på 6,5 meter dybde formentlig kun vil dække 20% af revet, kan dets maksimale bruttoproduktion kun blive $5\text{-}7 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Hvis respirationen udgør 15% (Binzer et al., 2006), svarer det til en nettoproduktion på $4\text{-}6 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, forudsat at lyset mætter produktionen.

5. Lysmætning af fotosyntesen: Thallusstykker opnår den maksimale vækstrate på $0,05\text{-}0,1 \text{ d}^{-1}$ ved en middel lysintensitet gennem døgnet på $60 \text{ } \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Markager & Sand-Jensen, 1992; Johansson & Snoeijis, 2002). Vi antager, at denne lysmætning også tilnærmelsesvist gælder algerne på stenrevne, da vi tager udgangspunkt i, at de har en lav dækningsgrad på ca. 20%. For tætte algesamfund mætter fotosyntesen dog først ved væsentligt højere lysintensiteter (fx Middelboe et al., 2006).
6. Lysintensiteten på 6,5 m kan beregnes ud fra månedsmiddelværdier for Secchidybde og overfladeindstråling (se Fig. 12).
7. Vi antager på basis af ovenstående, at algerne nettovækst er nul ved en lystensitet på $1,12\text{-}1,61 \text{ } \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, og at væksten stiger lineært som funktion af stigende lysintensitet til sit maksimum ved $60 \text{ } \mu\text{mol fotoner m}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Den maksimale nettoproduktion på 6,5 meters dybde og ved en algedækningsgrad på ca. 20% antages at udgøre $5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ i maj, hvor lysnedtrængen er størst. Der er dog en betydelig usikkerhed ved at fastlægge den realistiske iltproduktion, og derfor gennemføres hovedparten af de senere beregninger og modelleringer med 3 niveauer af iltproduktionen med maksimum i maj på hhv. 2,5, 5,0 og $10,0 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2}$. Figur 12 viser den årlige variation i iltproduktionen på hypotetiske rev i de tre niveauer.

Det fremgår af Fig. 12, at for alle måneder er lysintensiteten tilstrækkelig til nettotilvækst og nettoiltproduktion ved bunden, men på intet tidspunkt opnås mætning af iltproduktionen.



Figur 12. Beregnet lysintensitet (PAR) og tilhørende iltproduktion (i 3 niveauer) på hårdt substrat placeret på 6,5 meters dybde i Løgstør Bredning og Bjørnsholm Bugt. PAR beregnet ved $I_m \cdot \exp(-1,7/SD_m \cdot 6,5)$, hvor I_m er månedsmidler af lysindstråling ved overfladen og SD_m er månedsmidler af Secchidybden.

4.2 Forudsætninger for 3D vandsøjle modelleringen

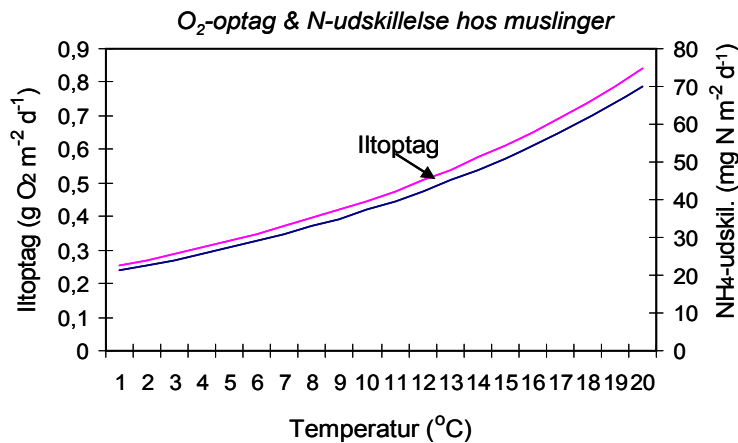
For at beregne effekten af rev og den tilknyttede flora og fauna på iltforhold og kvælstofstoffsfluxe mellem sediment og vand er der opstillet en 3D vandsøjlemodel. Den anvendte model er opsat i MIKE 3 flexible mesh (FM) og med sigma-koordinater (10 lag). Hydrografi og transporter drives af modellerede vindfelter (20 x 20 km opløsning), lufttemperatur, -tryk, vandstande ved Hals i øst og Thyborøn i vest, samt ferskvandsafstrømning til Limfjorden fordelt på 40 kilder. Modellen er kalibreret mod vandstand i Løgstør samt mod salt- og temperaturprofiler målt ca. ugentligt på 5 hovedstationer i den centrale Limfjord. Modellen repræsenterer ikke saltholdigheder overalt i fjorden korrekt, men den eksisterende modelopsætning er tilstrækkelig god til at beskrive de hydrodynamiske forhold i den centrale del af Limfjorden.

Kalibrering mod målte iltkoncentrationer ved bunden er alene sket ved en begrænset variation af ilt dispersionen ("horizontal og vertikal blanding af ilt"), mens iltfluxe er indlagt i modellen som faste rater beregnet på basis af målinger foretaget i perioden 1999-2002.

Ud over detaljerede hydrografiske procesbeskrivelser indgår flg. processer i modellen:

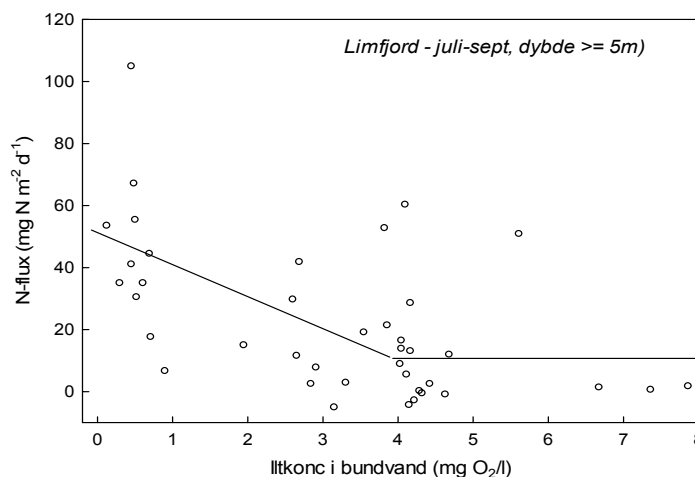
1. Iltfluxe over sediment-vand fladen. Fluxene baseres på målinger gennemført i Limfjorden samt et beregnet bidrag fra makrofauna - især muslinger. Iltoptag i muslingebestanden er beregnet udfra temperatur, størrelsesfordeling samt samlet biomasse (Hamburger et al., 1983).
2. Det er antaget, at nedbrydningen af makroalgebiomassen sker i et tidsrum, som er afkoblet med den kritiske periode for iltvind.
3. Det antages også i et af scenarierne, at en øget blåmuslingebiomasse på revene har det samme iltforbrug per kg. blåmusling som den eksisterende gennemsnitlige bestand af blåmuslinger, der ligger på den jævne bund.

4. Biomasse, størrelsesfordeling samt dybdefordeling af muslinger i Limfjordens centrale bredninger er baseret på DTU Aqua's bestandsopgørelser, samt de tidligere Limfjordsamters årlige opgørelser i Skive Fjord. Det er antaget, at dybdefordelingen i Skive Fjord også repræsenterer dybdefordelingen i Lovns Bredning.



Figur 13. Iltoptag i og N-udskillelse fra muslingebestanden i Limfjorden som funktion af temperatur. Hvis dele af muslingebestanden dør som følge af iltsvind reduceres iltoptag og N-udskillelse proportionelt.

5. N-fluxe over sediment-vand grænsefladen. Næringsstoffluxene baseres på målinger gennemført i Limfjorden. Med udgangspunkt i disse målinger er der indført en iltafhængighed af N-fluxen, som kommer til udtryk ved en iltkoncentration $<4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ i bundvandet (se Fig. 14). N-fluxen er koblet til iltoptag med støkiometri på $1 \text{ mg NH}_4\text{-N}$ udledt per 13 mg O_2 optaget, hvilket afspejler C:N-forholdet (7,3:1) i det organiske stof, som omsættes i havbunden. Ud over sedimentfluxene bidrager muslingerne til næringsfluxe dels i form af N-udskillelse koblet til iltoptaget i levende muslinger (se Fig. 13), dels en N-flux fra mineralisering af døde muslinger. Her er der anvendt et C:N forhold på 6:1.



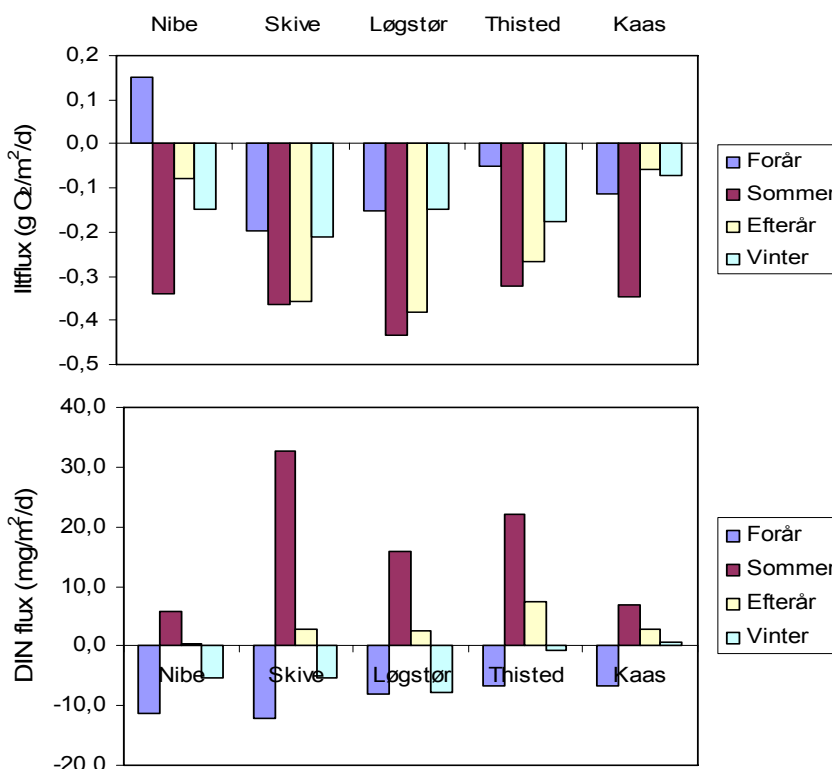
Figur 14. N-flux mellem sediment og vand om sommeren i Limfjordens dybere dele som funktion af bundvandets iltindhold. Ved iltkoncentrationer lavere end $4 \text{ mg O}_2/\text{l}$ øges N-fluxen fra bunden. Baseret på målinger udført under NOVANA.

6. Opbygning af iltgæld i sediment efter længerevarende ilt-sænkninger i bundvandet defineret ved iltkoncentration lavere end $1 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$ blev midlet over 14 dage. Processen dækker bl.a. over, at makrofaunaen (som vægtemæssigt er helt domineret af blåmuslinger) begynder at dø ved længerevarende ilt-sænkninger som følge af H_2S udvikling. Under iltfrie forhold foregår nedbrydning af muslingerne mikrobielt under ophobning af bl.a. fede syrer, H_2S etc., mens fisk såsom ål vil æde en del af resterne, hvis iltforholdene igen bliver gode. Vi har antaget, at muslingernes bløddele

minus lukkemuskler³ nedbrydes mikrobielt på bunden, mens lukkemuskler vil blive konsumeret af fisk og krabber, med det hertil knyttede iltforbrug fordelt over forholdsvis lang tid, og som ikke nødvendigvis sker på stedet, hvor muslingerne døde. Det kumulerede bundnære iltforbrug kan opgøres til $120 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2}$, hvis 1) alle muslinger dør, 2) middel biomassen af blåmuslinger over hele den centrale Limfjord er $1 \text{ kg vådvægt/m}^2 \approx 60 \text{ gC m}^{-2}$, og 3) lukkemuskler udgør 25% af bløddelstørvægten (Theisen, 1982; Kautsky et al., 1990), og nedbrydningen af disse bidrager ikke til iltforbruget ved bunden.

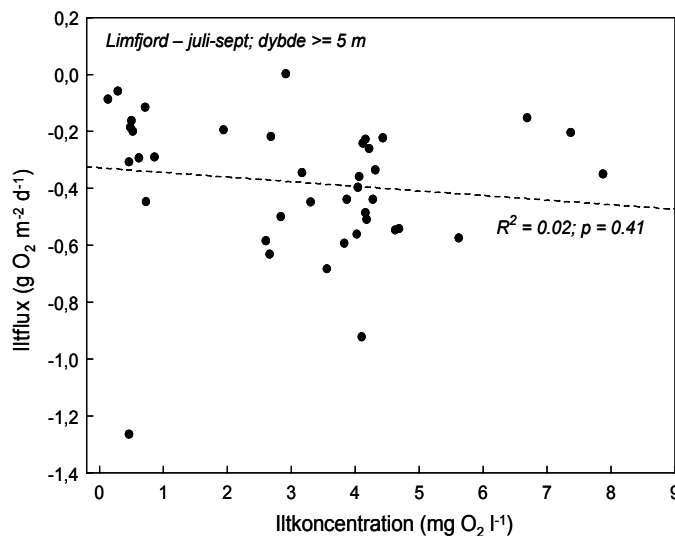
I modellen nedbrydes de døde muslinger med en hastighed på 15% per dag (ved 20°C). Udover egne akvarieobservationer er der ikke relevante undersøgelser, som kan bekræfte dette, men raten blev indirekte beregnet under kalibrering af SUSTAINEX-modellen opsat for Løgstør Bredning (Møhlenberg et al., 2004).

Iltkoncentrationer modelleres dynamisk og kan også antage negative værdier som udtryk for ophobning af f.eks. H_2S i bundvandet. Sæsonvariation i ilt- og næringsstoffluxe samt forskelle mellem områder i Limfjorden er beregnet ud fra de omfattende målinger, som blev gennemført under NOVANA i 1999, 2000 og 2002. Medianværdier for sedimentfluxe er opgjort på sæsonbasis og Bredning (Fig. 15), og disse værdier er indlagt som tvangsfunktioner i modellen, da der i modsætning til N-fluxe ikke kunne påvises en effekt af bundvandets iltkoncentration på iltfluxen (Fig. 16).



Figur 15. Medianværdier af iltfluxe og N-fluxe mellem sediment og vand i 5 af Limfjordens Bredninger beregnet på basis af 3 års målinger. Positive iltfluxe indikerer transport af O_2 fra sediment til vandfase, og negative fluxe viser et O_2 -optag i sedimentet; negative N-fluxe indikerer optag i sediment (forår og vinter) og positive N-fluxe transport fra sediment til vandfase.

³ I "glemte" akvarieforsøg med manglende beluftning sker der en hurtig nedbrydning af muslingers "bløde" dele, mens den bageste lukkemuskel ikke viser tegn på nedbrydning selv efter 1 måned.



Figur 16. O_2 -flux mellem sediment og vand om sommeren i Limfjordens dybere dele som funktion af bundvandets iltindhold. Lineær regression viste ingen effekt af bundvandets iltkoncentration på fluxen, selv om der er tendens til lavere O_2 -flux ved iltkoncentrationer lavere end $1 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$. Et evt. lavere iltoptag i sedimentet ved lave iltkoncentrationer dækker over en øget anaerob omsætning og ophobning af reducerede stoffer, som senere giver anledning til øget iltoptag, når bundvandets iltkoncentration øges.

4.3 Kalibrering

Den hydrodynamiske model er kalibreret mod en række målinger foretaget i de centrale bredninger samt tidligere beregninger over transporten gennem Limfjorden foretaget med en kalibreret model (MIKE11) (Sv. Aa. Bentsen, *pers. com.*). Resultater er vist i Bilag B.

4.4 Scenarier

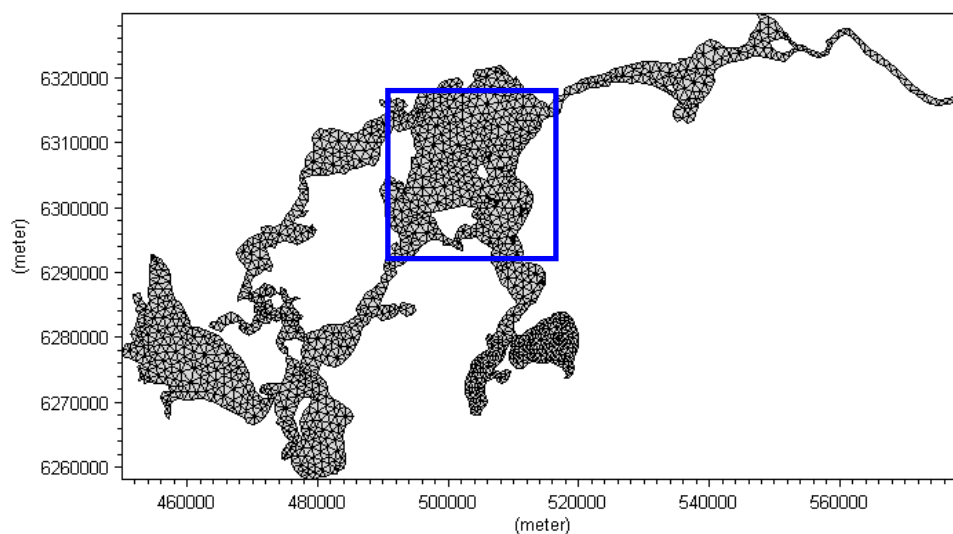
I modelscenarierne er ”revene” indført som:

- en øget bundruhed svarende til $\frac{1}{2}$ m store sten placeret i ét kontinuerligt lag indenfor ”revets” afgrænsning, hvor de mindste dimensioner er defineret af modellens størrelse af gridceller (ca. $\frac{1}{2} \text{ km}^2$),
- substrat for iltproducerende alger og en tilhørende iltproduktion indlagt som kilder i gridceller med rev.

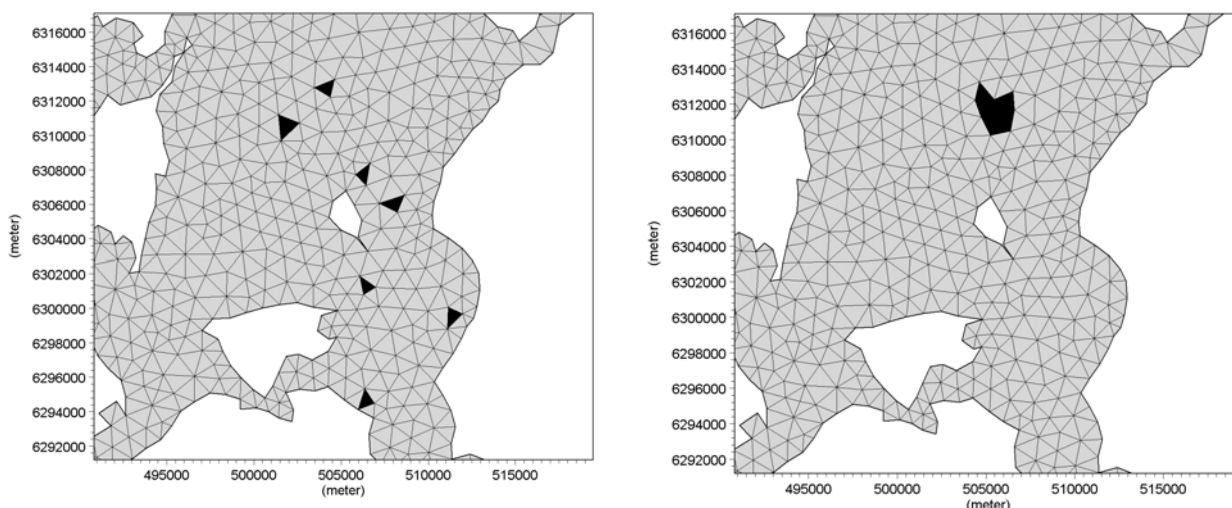
Der er udført 25 modelscenarier, hvor placering af ”rev” med tilhørende iltproduktion er varieret, f.eks. 4 km^2 i ét samlet rev eller opdeling af revet i flere mindre enheder placeret på forskellige positioner i Risgårde Bredning, Løgstør Bredning og Bjørnsholm Bugt. Der er endvidere undersøgt for effekt af ”rev” på den vertikale blanding ved at indføre maksimale bundruheder i de modelpunkter, hvor der er udlagt rev. Figur 17 og 18 viser MIKE3 modelopsætningen samt to af flere placeringer af ”rev”. Det samlede areal af rev udgør i disse opsætninger $3,95$ og $4,1 \text{ km}^2$.

4.5 Resultater

Sommeren i modelåret 2005 var blæsende og uden nævneværdigt iltsvind. Placering af iltproducerende stenrev ville derfor have ringe effekt, fordi iltf forholdene allerede var gode i Løgstør Bredning og bortset fra en demonstration af modellens evne til at beskrive iltf forholdene, vil forholdene dette år ikke blive omtalt nærmere.



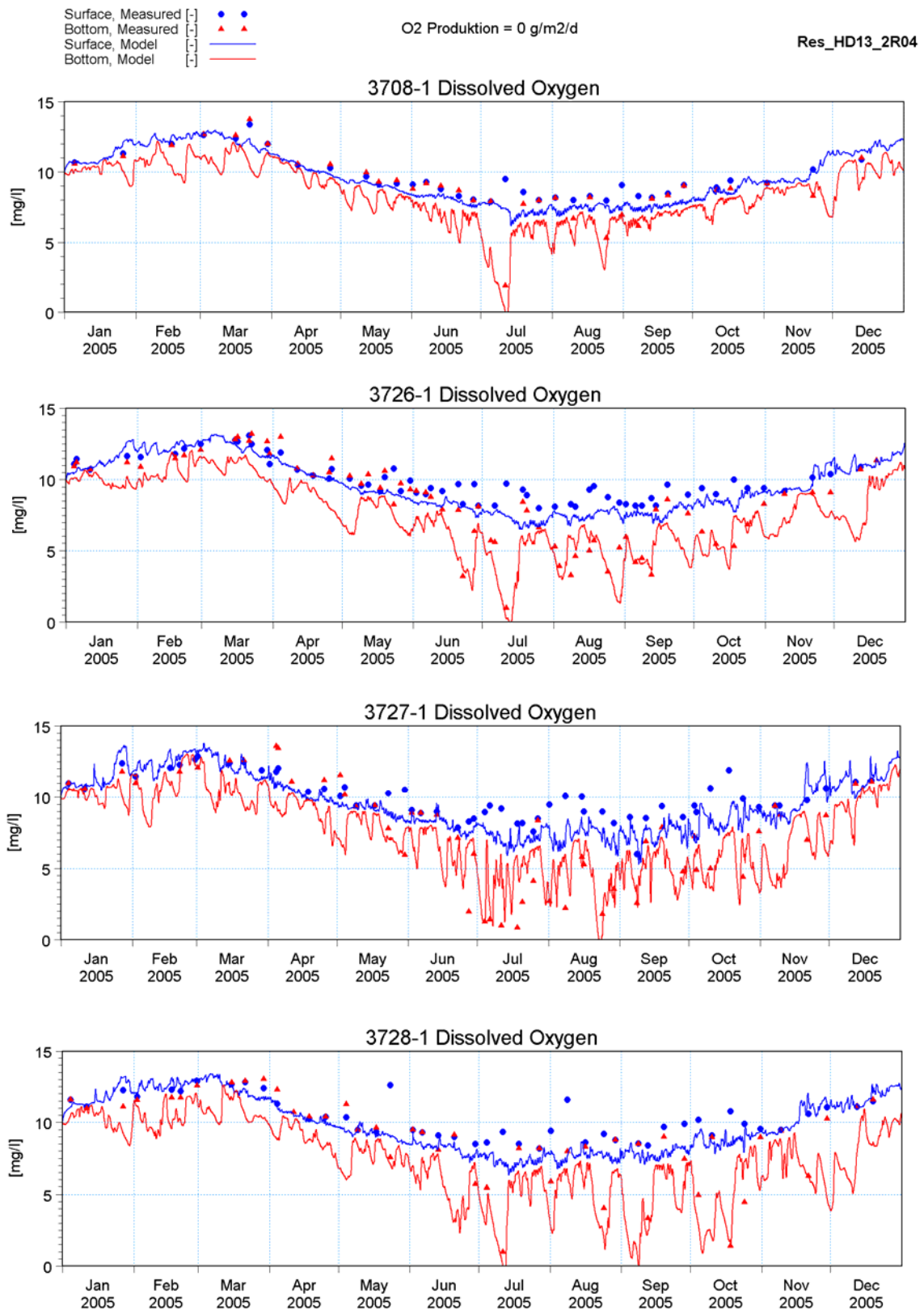
Figur 17. Rumlign opløsning af MIKE 3 FM model af Limfjorden.



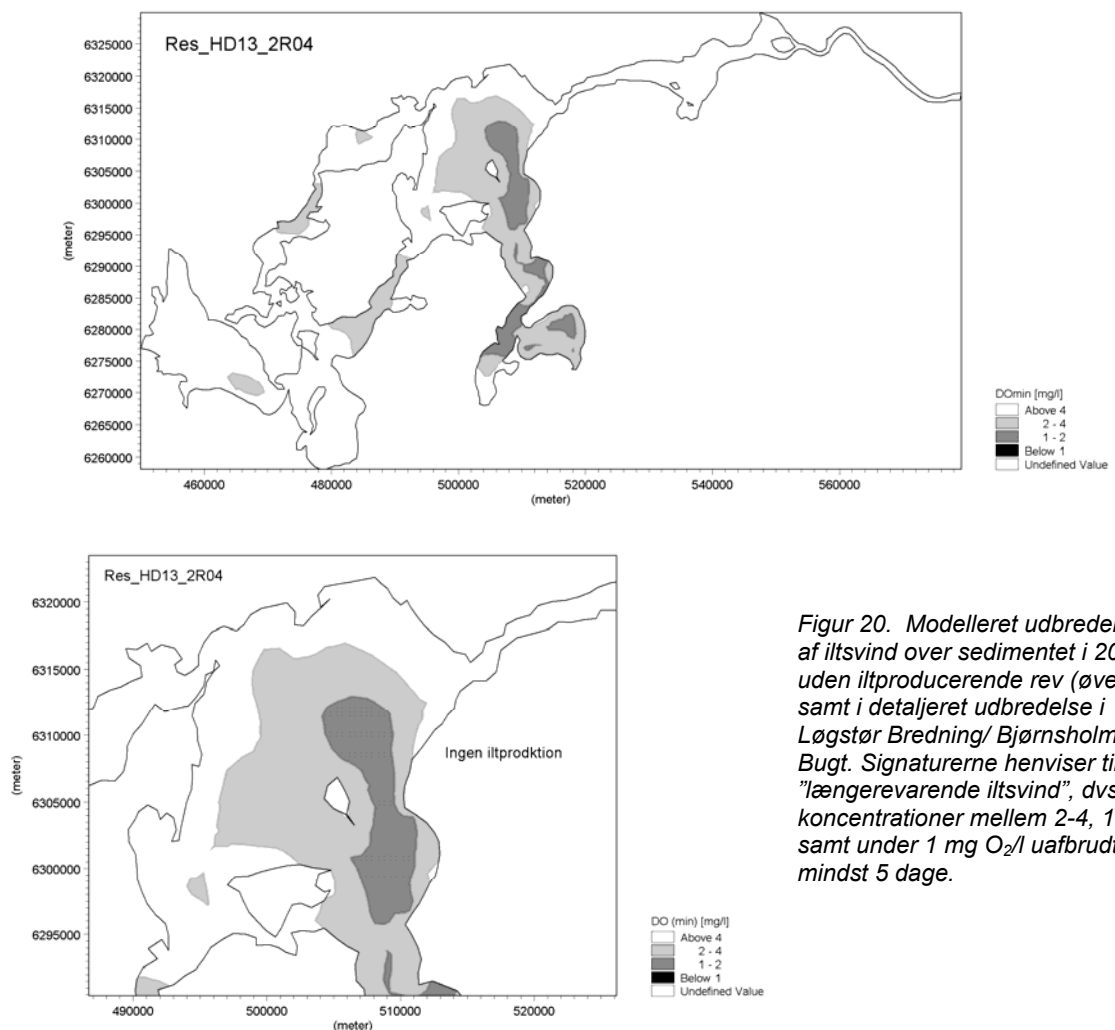
Figur 18. Eksempler på placering af 7 rev-elementer (sorte felter, samlet areal 3,95 km²) i Risgård Bredning, Bjørnsholm Bugt og Løgstør Bredning (tv.) samt placering af rev i ét samlet område (total areal 4,1 km²) nord for Livø.

Det fremgår af Figur 19, at modellen er i stand til at beskrive observationerne i iltkoncentration ved bunden med rimelig god præcision, men at modellen konsekvent underestimerer iltkoncentrationen i overfladen. Dette skyldes, at modellen ikke indeholder en dynamisk beskrivelse af planktonalgernes primærproduktion og den tilhørende iltproduktion i vandsøjlen. Forholdet i overfladen er imidlertid vurderet at være uden væsentlig betydning for målet med modellens anvendelse.

Den rumlige udbredelse af iltsvind i 2005 er vist for hele Limfjorden og i et reduceret område i Fig. 20. Det fremgår heraf, at udbredelsen af iltsvind var begrænset, og at der på intet tidspunkt blev modelleret meget kraftigt iltsvind (< 1 mg O₂/l) af længere varighed.



Figur 19. Basisscenarium for 2005 uden etablering af rev. Tidlig udvikling i overflade- og bundvands iltkoncentration på "hovedstationerne" i Limfjorden (model: blå linier = overflade/ røde linier = bundvand; målinger cirkler & trekanter). Fra oven: Løgstør Bredning (3708-1), Risgårde Bredning (3726-1), Lovns Bredning (3727-1) og Skive Fjord (3728-1). Se Bilag A for kort over Limfjorden med placering af monitoringsstationer.



Figur 20. Modelleret udbredelse af iltvind over sedimentet i 2005 uden iltproducerende rev (øverst) samt i detaljeret udbredelse i Løgstør Bredning/ Bjørnsholm Bugt. Signaturene henviser til "længerevarende iltvind", dvs. koncentrationer mellem 2-4, 1-2 samt under 1 mg O₂/l uafbrudt i mindst 5 dage.

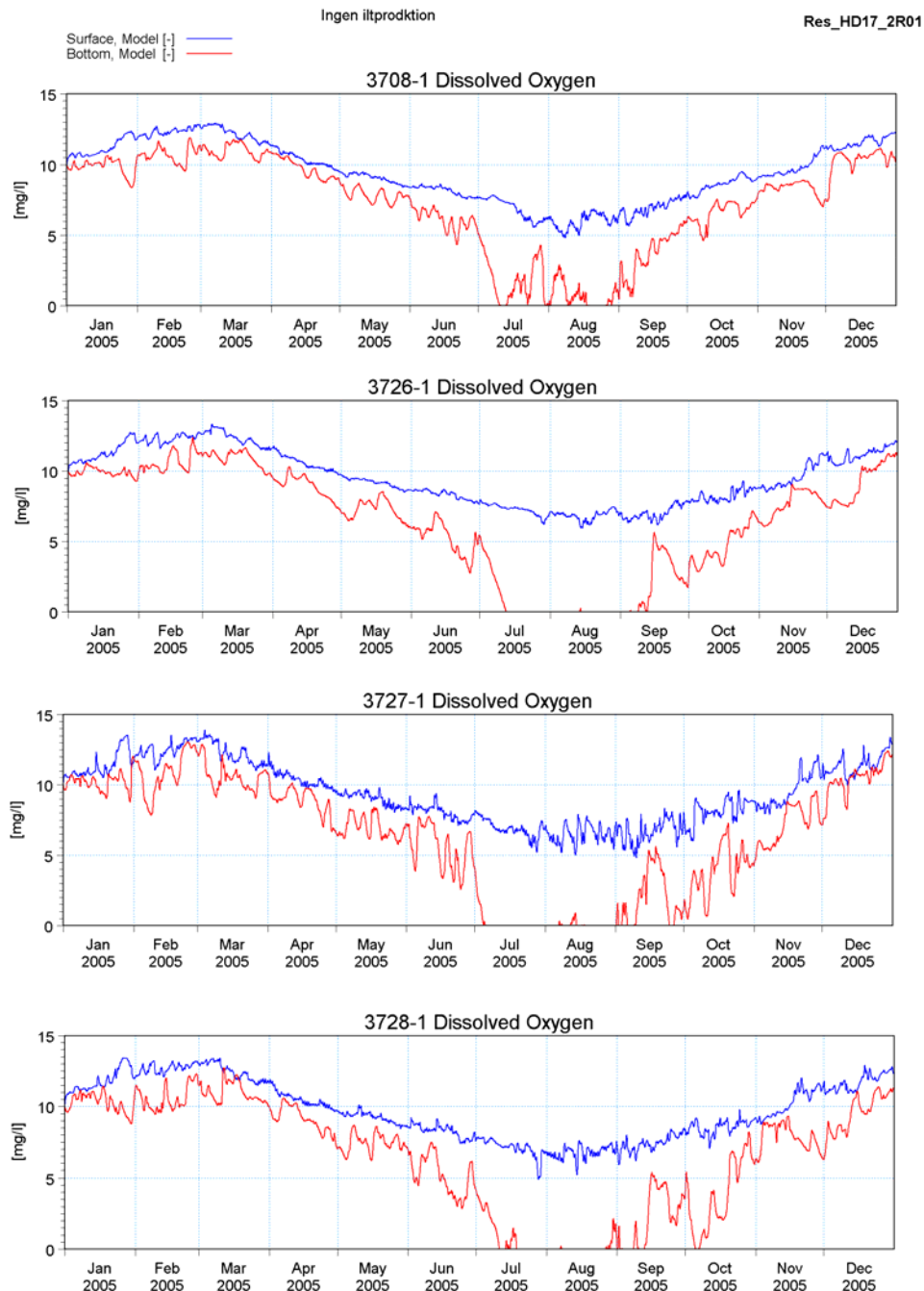
4.5.1 Effekt af rev under en vindsvag sommer med udbredt iltvind

År 2005 havde en forholdsvis blæsende sommer med en kontinuert østgående strøm og med kun få observationer af iltvind i Løgstør Bredning (primo juli 2005, se Fig. 19). For at simulere forholdene under en stille og varm sommer med mere udbredt iltvind i Løgstør Bredning blev der ændret på modellens tvangsfunktioner: (1) vindhastigheden reduceredes med 50% i juli og august, (2) vandstandsforskellen mellem Hals og Thyborøn ændredes 1,7 cm, således at der blev påtrykt en svag vestgående strøm, og (3) vandafstrømningen til hele Limfjorden reduceredes med 50% i denne sommerperiode, hvilket er typisk under varme somre.

For at belyse effekten på iltforhold og N-fluxe af forskellige revplaceringer og udformninger (i én samlet enhed eller opdelt i flere delrev) er der modelleret 7 forskellige placeringer og udformninger af rev. Som udgangspunkt blev revarealet fastsat til 4 km², mens den daglige iltproduktion blev varieret på 3 niveauer som vist på Fig. 12 (hhv. lav, middel og høj, maksimal produktion). Disse 3 niveauer repræsenterer en betydelig del af den usikkerhed, der relaterer sig til algerne fotosynteseeffektivitet samt omregningen fra dækningsgrad til biomasse.

Effekt på iltsvindsarealer

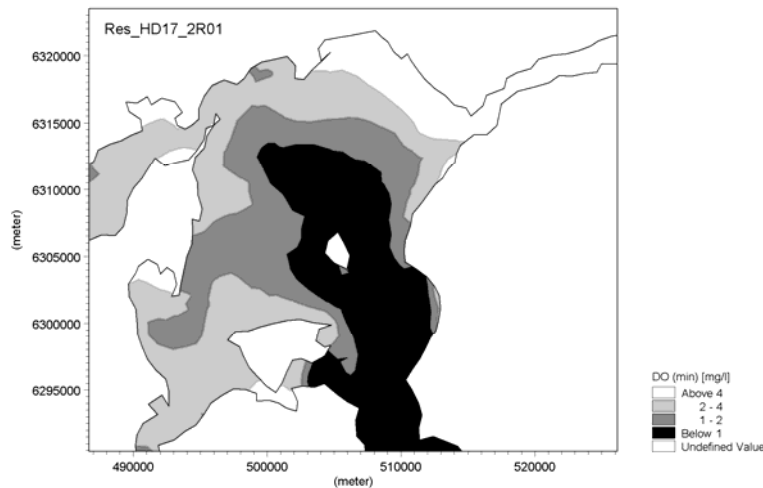
Ved ændring af randbetingelserne (vandstande, vind, afstrømning) blev der udløst et betydeligt iltsvind af lang varighed også i Løgstør Bredning (Fig. 21). I de sydlige bredninger var bundvandet på hovedstationerne praktisk talt uden ilt i en periode på 2 måneder (Figur 21). Så omfattende iltsvind er tidligere forekommet i 1988, 1995 og 1997, så selvom det påtrykte iltsvind synes voldsomt, er det ikke urealistisk (se Bilag D).



Figur 21.

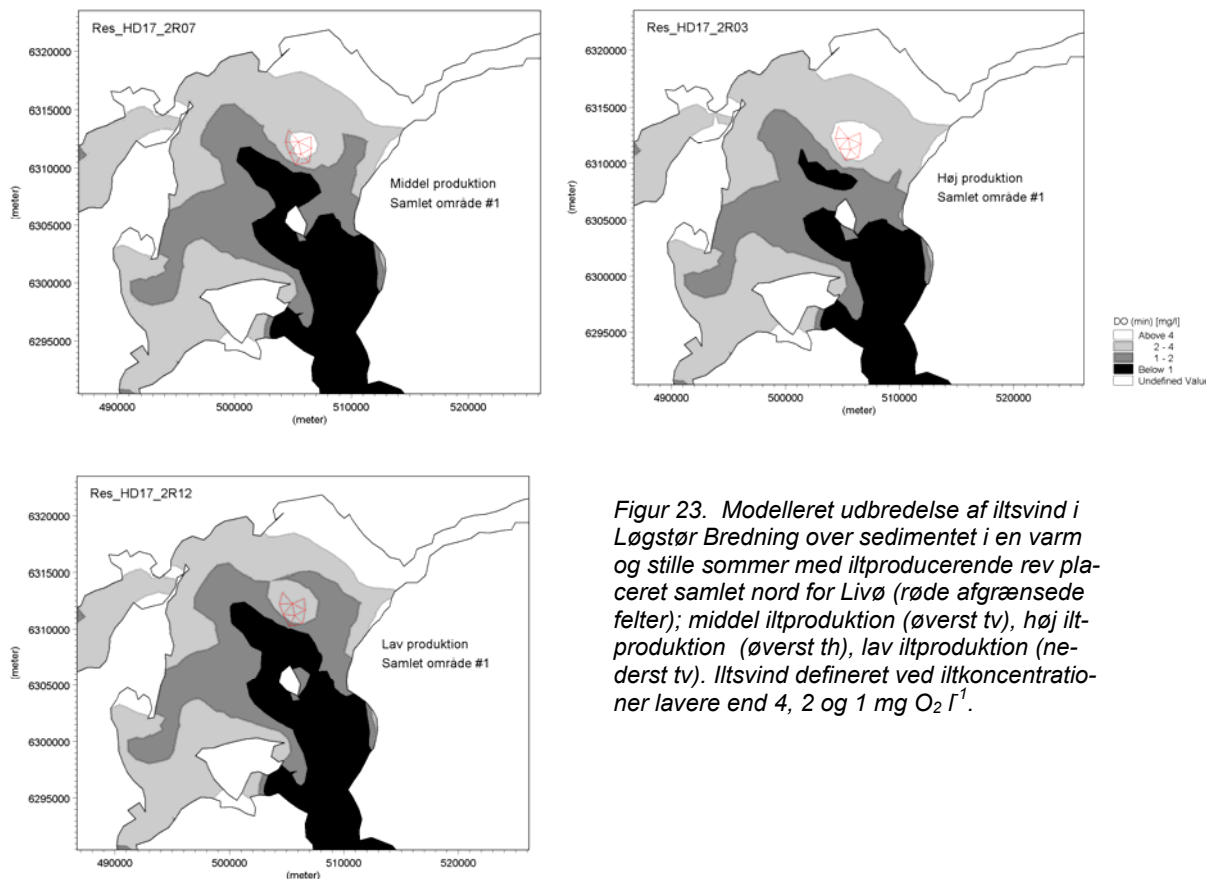
Scenarium for varm og stille sommer uden etablering af rev og uden iltproduktion ved bunden. Tidlig udvikling af overflade- og bundvandets iltkoncentration på de centrale "hovedstationer" i Limfjorden. Fra oven: Løgstør Bredning (3708-1), Risgårde Bredning (3726-1), Lovns Bredning (3727-1) og Skive Fjord (3728-1). Se Bilag A for kort over Limfjorden med placering af monitoringsstationer.

I Løgstør Bredning blev der modelleret et meget kraftigt iltsvind i den sydlige og centrale del, og kun i den lavvandede nordlige del var de modellerede iltsforhold gode (Fig. 22).

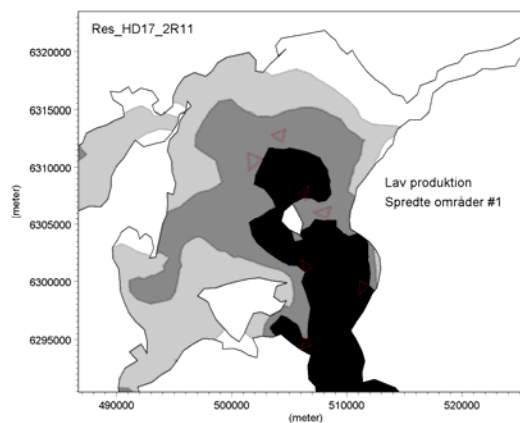
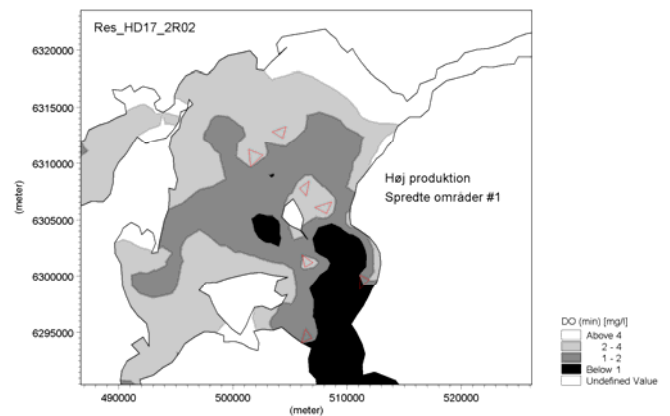
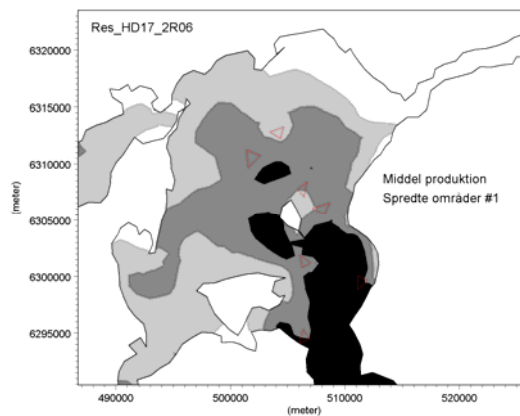


Figur 22. Modelleret udbredelse af iltsvind i en vindstille varm sommer uden iltproducerende rev i Løgstør Bredning/ Bjørns-holm Bugt. Signaturene henviser til "længerevarende iltsvind", dvs. koncentrationer mellem 2-4, 1-2 samt under 1 mg O₂/l uafbrudt i mindst 5 dage.

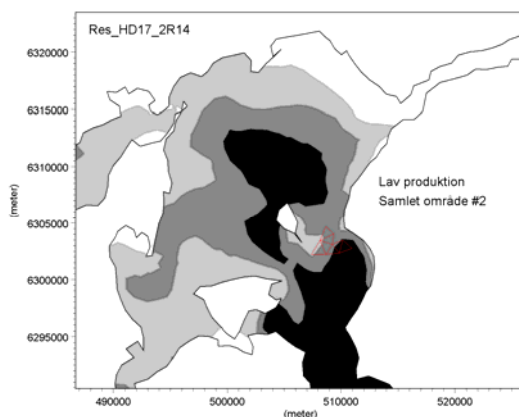
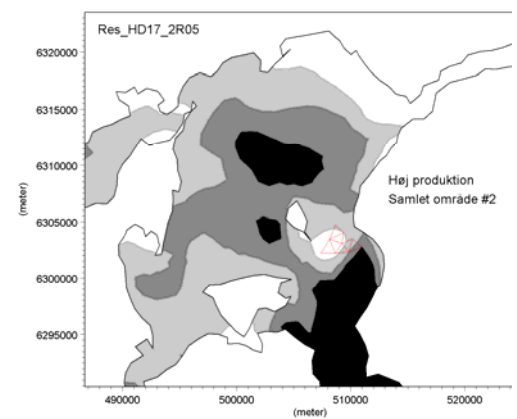
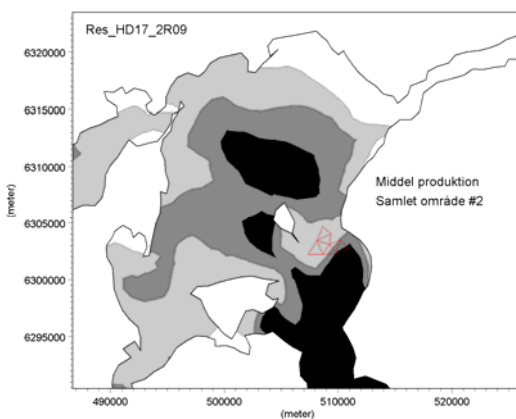
Figurene 23–26 viser udbredelsen af iltsvind i Løgstør Bredning under påvirkning af forskellig placering af rev med hhv. lav, middel og høj O₂-produktion (se Fig. 12). For at vurdere effekten af etablering af rev i Løgstør Bredning skal udbredelsen af iltsvind (Fig. 23–26) sammenlignes med det modellerede iltsvind uden iltproducerende rev (Fig. 22).



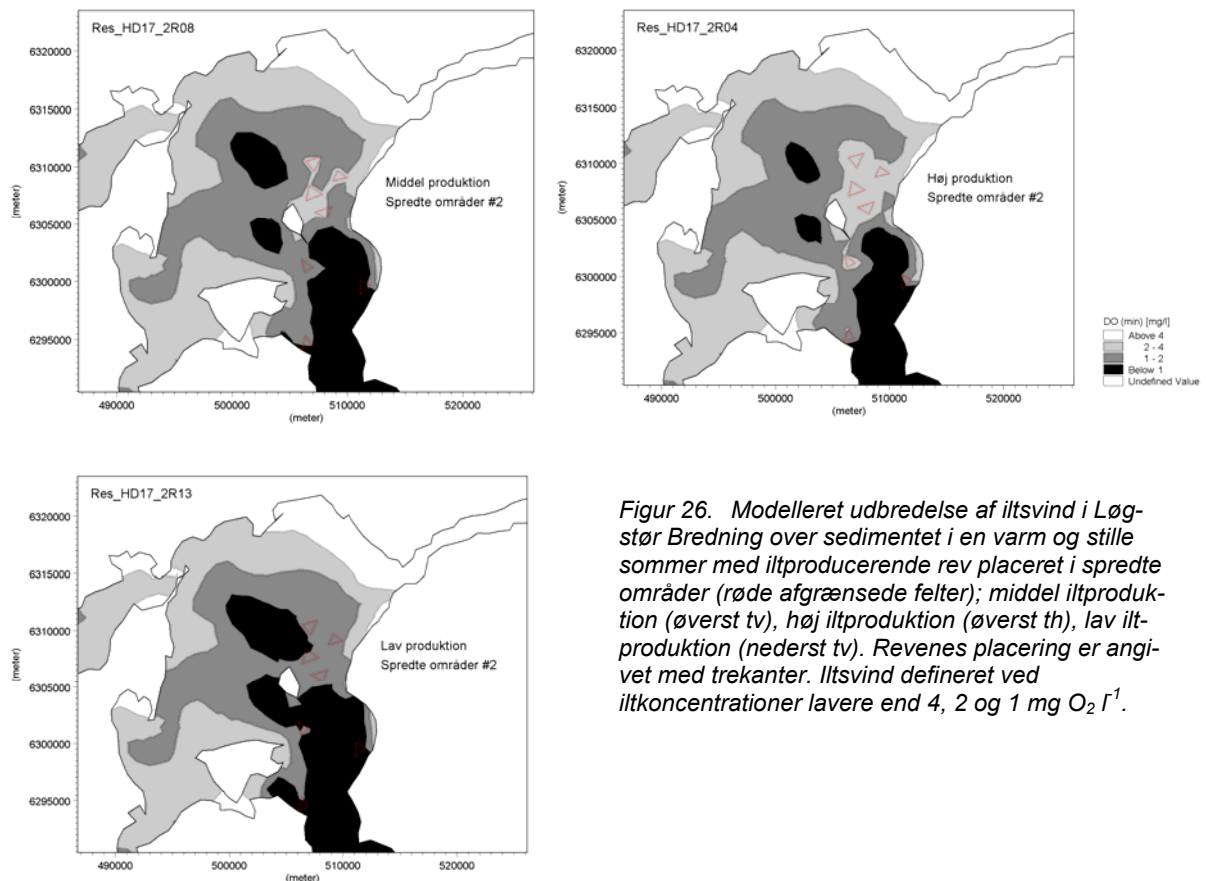
Figur 23. Modelleret udbredelse af iltsvind i Løgstør Bredning over sedimentet i en varm og stille sommer med iltproducerende rev placeret samlet nord for Livø (røde afgrænsede felter); middel iltproduktion (øverst tv), høj iltproduktion (øverst th), lav iltproduktion (nederst tv). Iltsvind defineret ved iltskoncentrationer lavere end 4, 2 og 1 mg O₂ l⁻¹.



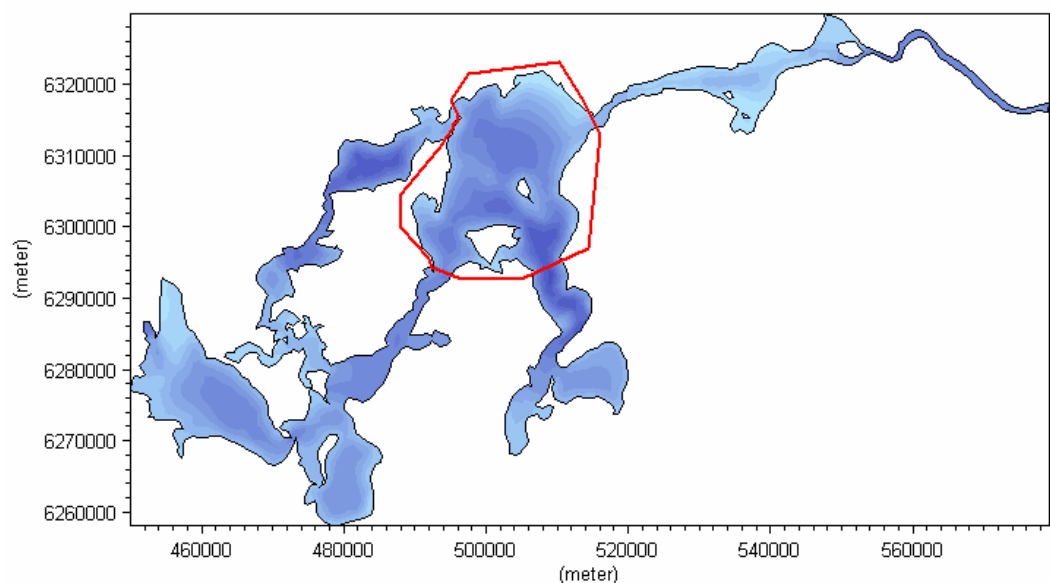
Figur 24. Modelleret udbredelse af iltsvind i Løgstør Bredning over sedimentet i en varm og stille sommer med iltproducerende rev placeret i spredte områder (røde afgrænsede felter); middel iltproduktion (øverst tv), høj iltproduktion (øverst th), lav iltproduktion (nederst tv). Revenes placering er angivet med trekanter. Iltsvind defineret ved iltkoncentrationer lavere end 4, 2 og 1 mg O₂ l⁻¹.



Figur 25. Modelleret udbredelse af iltsvind i Løgstør Bredning over sedimentet i en varm og stille sommer med iltproducerende rev placeret i ét samlet område SV for Livø (røde afgrænsede felter); middel iltproduktion (øverst tv), høj iltproduktion (øverst th), lav iltproduktion (nederst tv). Revenes placering er angivet med trekanter. Iltsvind defineret ved iltkoncentrationer lavere end 4, 2 og 1 mg O₂ l⁻¹.

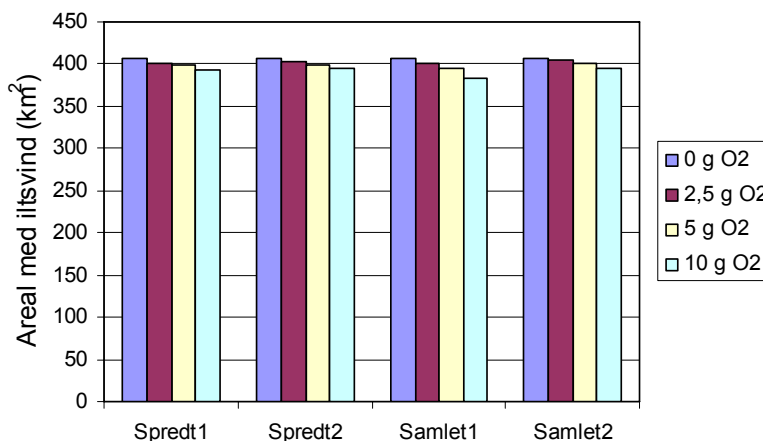


I alle disse scenarier ses en tydelig og positiv effekt af revenes placering og især effekt af størrelsen af den maksimale iltproduktionen. I det følgende er iltsvindsarealer (samt N-fluxe) opgjort numerisk indenfor et område vist i Figur 27.



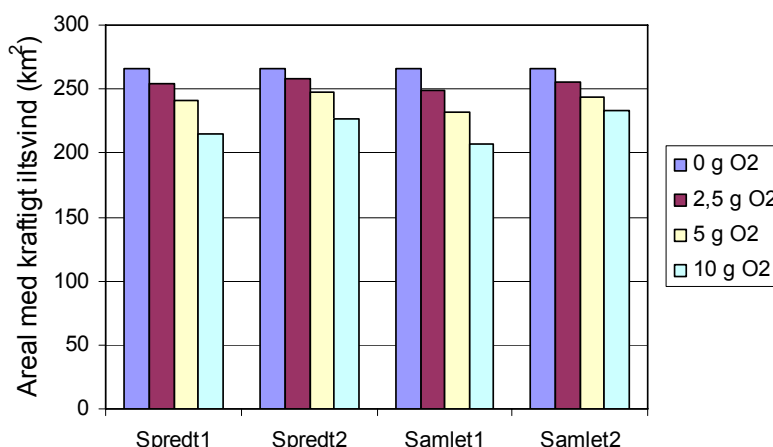
Figur 27. Afgrænsning af beregningsareal for iltsvind og næringsstofflux i Limfjorden.

Beregninger viser, at områder der rammes af iltsvind ($<4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) kan reduceres med op til 23 km^2 , hvis der etableres iltproducerende rev i området, hvilket svarer til en reduktion af områderne med iltsvind på omkring ($23/410 =$) 6% (Fig. 23). Effekten af revene er endnu tydeligere, når revene placeres i de områder, hvor der optræder alvorligt iltsvind ($<2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) (Fig. 24). Disse områder har en udstrækning på omkring 265 km^2 , men kan reduceres med op til 60 km^2 ved at etablere rev i området. Dette svarer til en reduktion af områderne med alvorligt iltsvind på ca. 23%. Den forholdsvis begrænsede effekt af revene skyldes, at opgørelsen ikke tager hensyn til, om et område rammes én eller flere gange af iltsvind, og et givet område/areal, hvor der opstår iltsvind 5 gange i løbet af et år, indregnes kun som arealet (se f.eks. Fig. 21; St 3708-1).



Figur 28. Modelleret areal af iltsvind ($<4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) i en vindstille varm sommer uden iltproducerende rev i Løgstør Bredning/ Bjørnsholm Bugt (0 g O_2 = reference uden iltproduktion) og med maksimalproduktioner af ilt på 2,5, 5 og $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (se Fig. 12) på 4 km^2 rev placeret på 4 forskellige positioner (se Fig. 23-26).

Den største iltforbedrende effekt på iltsvindsarealerne havde rev etableret i én samlet gruppe nord for Livø (Samlet1; Figur 24 og Figur 18).

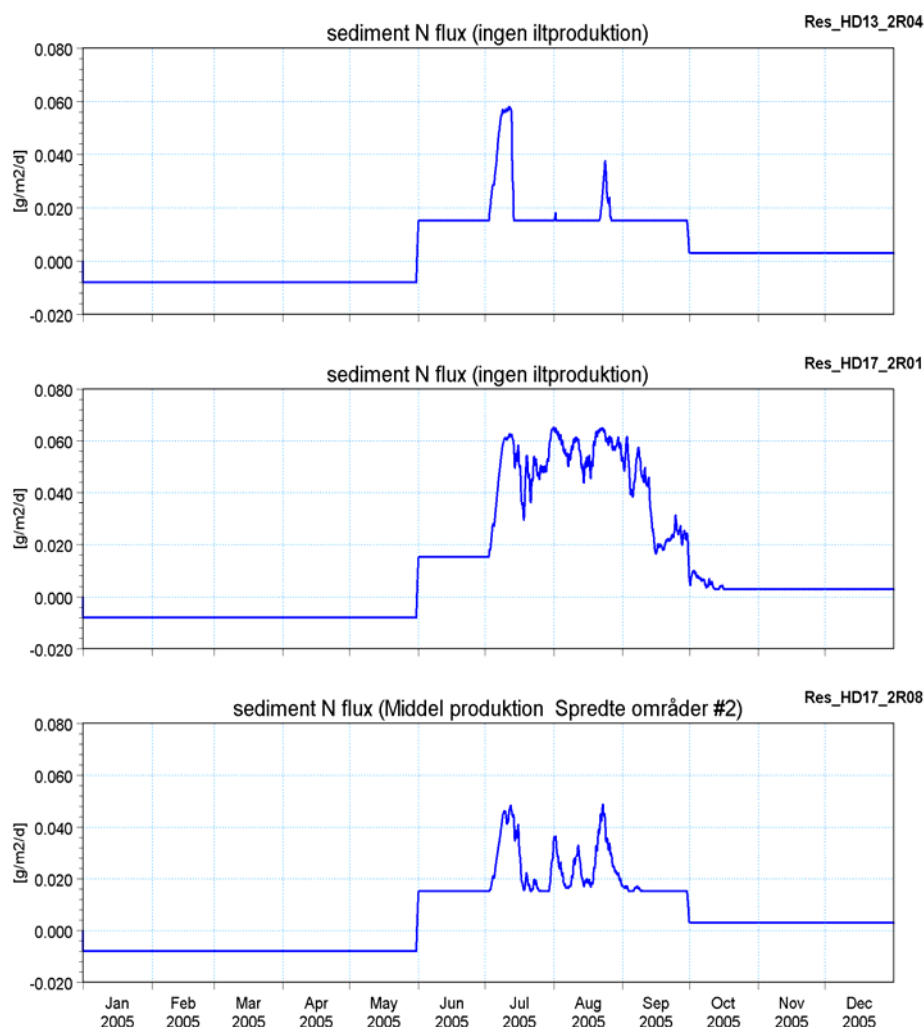


Figur 29. Modelleret areal af kraftigt iltsvind ($<2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) i en vindstille varm sommer uden iltproducerende rev i Løgstør Bredning/ Bjørnsholm Bugt (0 g O_2) og med maksimalproduktioner af ilt på 2,5, 5 og $10 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ (se Fig. 8) på 4 km^2 rev placeret på 4 forskellige positioner (se Fig. 23-26).

Effekt af rev på N-fluxe

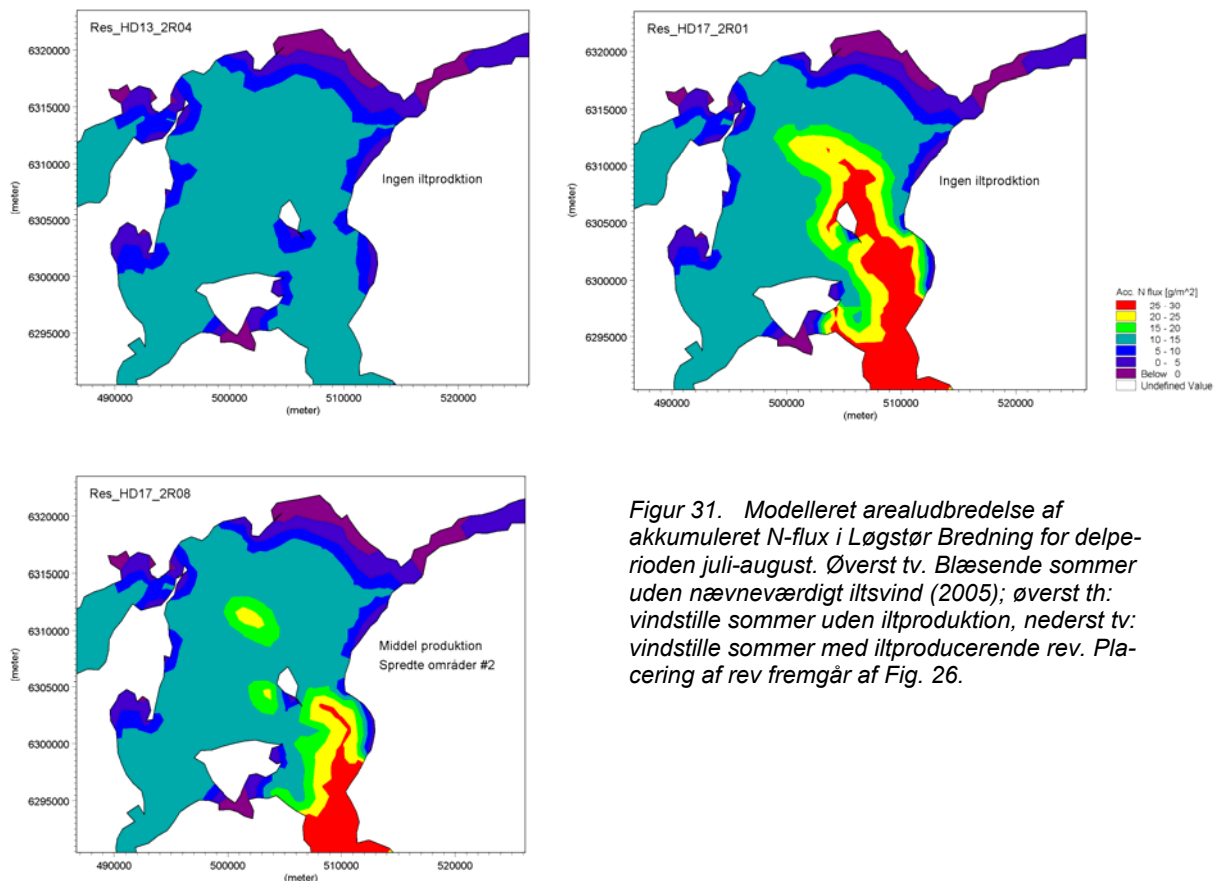
I modelscenarierne varieres N-fluxen på basis af målinger gennemført i 1999, 2000 og 2002 samt med en funktion, som betyder en øget N-flux ud af sedimentet under iltsvind (se Fig. 14). Figur 30 viser modellerede N-fluxe på monitoringsstationen i Løgstør Bredning (St. 3708) for scenariet uden væsentligt iltsvind (2005), for scenariet med iltsvind og uden iltproducerende rev samt for scenariet med iltproduktion i spredte områ-

der (se Figur 24 for placering af rev). I scenariet uden iltproducerende rev mere end fordobledes N-fluxen over en 2 måneders periode i den vindstille sommer sammenlignet med den kortvarigt forøgede N-flux i begyndelsen af juli i den blæsende sommer 2005. Effekten af iltproducerende rev på denne station var både en reduktion af den maksimale N-flux og især en reduktion i varigheden af høje N-fluxe (Fig. 30 nederst).



Figur 30. Modellerede N-fluxe i Løgstør Bredning i 2005; øverst: blæsende sommer uden væsentligt iltvind; m: vindstille sommer uden iltproducerende rev; nederst: vindstille sommer med iltproducerende rev (middel iltproduktion i "spredte områder #2"). Bemærk, at N-fluxen er "negativ" i perioden januar-maj, dvs. sedimentet optager uorganisk N.

Tre eksempler på den arealmæssige fordeling af akkumulerede N-fluxe i Løgstør Bredning er vist i Fig. 31. Uden iltproducerende rev fordobles den akkumulerede N-flux i den sydlige og østlige del af Løgstør Bredning i en vindstille sommer sammenlignet med en blæsende sommer, men hvis der etableres rev med iltproducerende alger i området (se Fig. 21), kan revene føre til en markant reduktion af N-fluxen.

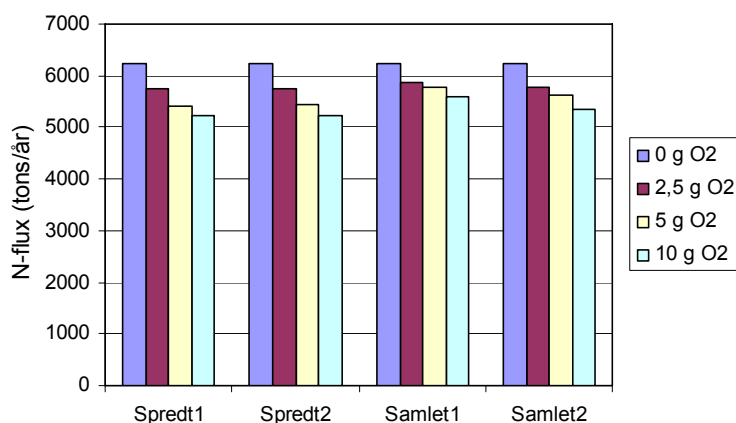


Figur 31. Modelleret arealudbredelse af akkumuleret N-flux i Løgstør Bredning for delperioden juli-august. Øverst tv. Blæsende sommer uden nævneværdigt iltsvind (2005); øverst th: vindstille sommer uden iltproduktion, nederst tv: vindstille sommer med iltproducerende rev. Placering af rev fremgår af Fig. 26.

Sammenlignet med den begrænsede effekt af rev på iltsvindsarealer, var effekten af rev på de akkumulerede N-fluxe forholdsvist større (Fig. 31), og effekten af opsplittede rev (spredt) var betydeligt større, end hvis revene placeredes i samlede grupper. Ved den mest sandsynlige iltproduktion på revene reduceredes N-fluxen med op til 850 tons/år i Løgstør Bredning, hvilket svarer til $(850/6300 =)$ ca. 13% i forhold til en vindstille sommer uden rev. Denne reduktion sker om sommeren, hvor planktonsamfundet er stærkt N-begrænset, og omregnet til planktonproduktion svarer den reducerede N-flux (850 tons/år) til en reduktion i planktonalgeproduktion på ca. 40 µg Chl-a over sommeren (hvis hele N-fluxen blev indbygget i planktonalger).

Derfor vil reduktioner i N-fluxe om sommeren have betydeligt større positiv effekt, end hvis en tilsvarende stor N-reduktion fordeltes gennem året, fordi en betydelig del af det kvælstof, som tilføres i vinterhalvåret fra land, ”skylles” ud af fjorden og ”tabes” til atmosfæren ved denitrifikation, inden det kan indbygges i primærproducenterne. Det skønnes derfor, at reduktionen i N-fluxe om sommeren på op til 850 tons kan ligestilles med reduktioner i N-tilførslen fra land på 1200-1500 tons per år.

I diskussionsafsnittet er vist en oversigt over iltsvindsarealer og N-fluxe fra alle gennemførte scenarier.



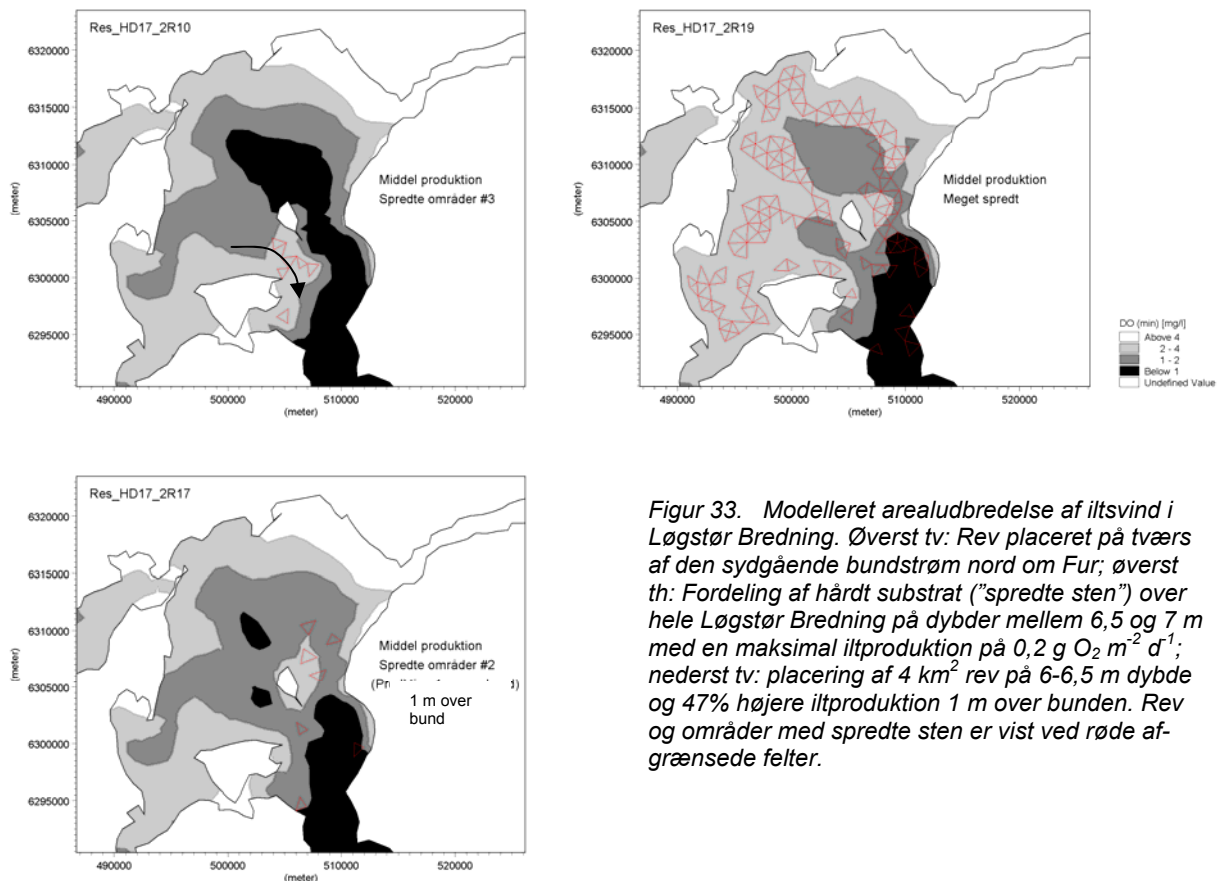
Figur 32. Akkumulerede N-fluxe gennem et år med en vindstille sommer uden iltproducerende rev i Løgstør Bredning/ Bjørnsholm Bugt, uden iltproduktion på bunden og med maksimalproduktioner af ilt på 2,5, 5 og 10 g O₂ m⁻² d⁻¹ på 4 km² rev placeret på 4 forskellige positioner (se Fig. 23-26).

Alternativ placering og udformning af rev

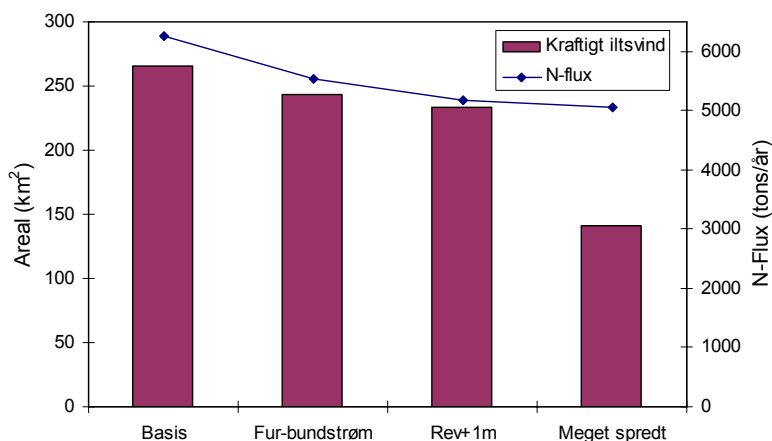
Som vist overfor vil effekten af en forøget iltproduktion ved bunden for udbredelsen af iltvindsområder og N-fluxe (på større skala) afhænge af, hvor revene placeres, og hvor store revene er. Vi har derfor gennemført scenarier, som skal belyse, om der kan opnås yderligere effekt ved:

- (1) placering af rev på tværs af bundstrømmen nord om Fur for at øge iltindholdet i det bundvand, som strømmer mod syd,
- (2) en meget spredt placering af ”rev” over hele Løgstør Bredning. I dette scenarie er der ikke indlagt en forøget ruhed af bunden, da scenariet skal efterligne spredtliggende sten. I modelscenariet er den arealspecifikke iltproduktion på de spredte rev afpasset, således at den ækvivalerer den samme totalproduktion på 4 km² rev med en maksimal iltproduktion på 5 g O₂ m⁻² d⁻¹.
- (3) at hæve rev én meter over bunden og herved øge iltproduktionen p.g.a. forbedrede lysforhold for algerne. Ved etablering af rev vil tilknyttede alger blive placeret et stykke over bunden. Med øget vækst hos modelalgen Sargassotang, som under gunstige forhold kan strække sig én m over bunden, vil den maksimale iltproduktion reelt ske ca. 1 m over bunden og ikke i det mest bundnære vand. Denne effekt er undersøgt ved at øge den maksimale iltproduktion med 47% p.g.a. bedre lysforhold 1 m over bunden samt ved at ”placere” hele denne iltproduktion i det næstnederste modellag.

Effekten af rev placeret på tværs af den sydgående bundstrøm nord om Fur var klart mindre end de 2 øvrige scenarier. Ved at placere iltproduktionen 1 m over bunden var reduktionen i N-fluxene højere (1065 tons N/år) end ved en tilsvarende revplacering og anvendelse af en maks. iltproduktion på 10 g O₂ m⁻² d⁻¹ i bundvandet (1023 tons/år) (Fig. 33 & 34). Dette tilskrives en hurtigere horisontal transport af iltigt vand 1 m over bunden, som mere end opvejer effekten af en 50% højere iltproduktion ved bunden. Den største effekt på N-flux og især iltvindssareal blev opnået, hvis revene blev etableret som store sten spredt over store arealer af Løgstør Bredning (Fig. 33 & 34).



Figur 33. Modelleret arealudbredelse af iltvind i Løgstør Bredning. Øverst tv: Rev placeret på tværs af den sydgående bundstrøm nord om Fur; øverst th: Fordeling af hårdt substrat ("spredte sten") over hele Løgstør Bredning på dybder mellem 6,5 og 7 m med en maksimal iltproduktion på $0,2 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; nederst tv: placering af 4 km^2 rev på 6-6,5 m dybde og 47% højere iltproduktion 1 m over bunden. Rev og områder med spredte sten er vist ved røde afgrænsede felter.



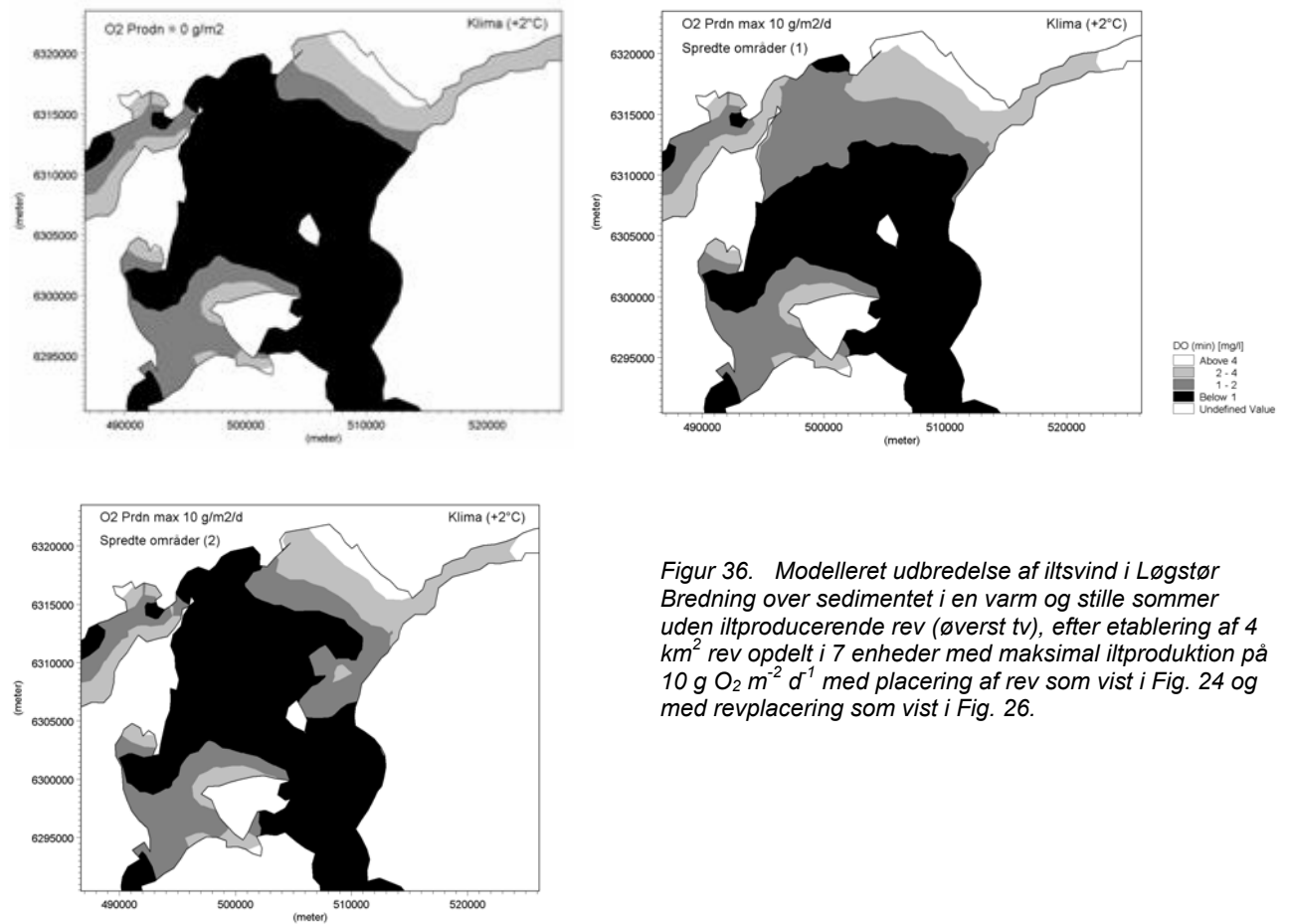
Figur 34. Areal med kraftigt iltvind samt akkumuleret N-flux i Løgstør Bredning i en vindstille sommer uden iltproducerende rev i (basis), 4 km^2 rev placeret på tværs af den sydgående bundstrøm nord for Fur, rev og tilhørende iltproduktion placeret 1 m over bunden samt iltproduktion fordelt over hele Løgstør Bredning på dybder mellem 6,5 og 7 m.

Effekt af 5 gange forøget påvækst af epifauna på revene

Som nævnt ovenfor forventes en vis kolonisering af epifauna såsom blåmuslinger på revene, som kan være større end den nuværende biomasse på bunden (ca. $0-2,5 \text{ kg}$ vådvægt/ m^2 ; se Figur 11. Da en øget biomasse vil bidrage med et større iltforbrug og N-flux, kan den positive effekt af revene på iltproduktionen blive mindre. Der er derfor gennemført 2 modelscenarier, hvor den naturlige bestand af muslinger på bunden er øget 5 gange (fra 1 kg til 5 kg vådvægt/ m^2). 5 kg vådvægt/ m^2 anses for den absolut maksimale biomasse, der kan opbygges på sammenhængende arealer på minimum $0,5 \text{ km}^2$.

4.5.2 Effekt af rev under en vindsvag sommer i fremtidigt varmere klima

Eksempler på effekt af en øget temperatur på 2°C er vist i Fig. 36 Reduktion i N-fluxe i Løgstør Bredning efter etablering af rev varierede mellem 117 tons og 1936 tons per år afhængig af revenes placering og især afhængig af den maksimale iltproduktion, som blev knyttet til revene. Beregnede iltsvindarealer samt N-fluxe er yderligere kommenteret i diskussionsafsnittet.



Figur 36. Modelleret udbredelse af iltsvind i Løgstør Bredning over sedimentet i en varm og stille sommer uden iltproducerende rev (øverst tv), efter etablering af 4 km² rev opdelt i 7 enheder med maksimal iltproduktion på 10 g O₂ m⁻² d⁻¹ med placering af rev som vist i Fig. 24 og med revplacering som vist i Fig. 26.

5 DISKUSSION OG KONKLUSIONER

På trods af mange indsatsplaner er der endnu ikke en ”god økologisk tilstand” i Limfjorden, og for den sags skyld heller ikke en ”gunstig bevaringstilstand” i Natura 2000-områderne. Dette skyldes først og fremmest to forhold: dels næringsstofberigelse ud over fjordens tålegrænse og dels fysisk modifikation, hvor små og store sten, som normalt udgør et substrat for makroalger, er fjernet. Den aktuelle tilstand er med andre ord et kombineret resultat af ”multiple stressfaktorer”, først og fremmest næringsstofberigelse og stenfiskeri. Varig forbedring af de økologiske forhold kan derfor opnås ved en samtidig forbedring af de faktorer, som påvirker fjorden i negativ retning. Ensidig satsning på enkelt-faktorer vil være uhensigtsmæssig og antagelig også være mindre kosteffektiv end en kombination af indsatser.

Formålet med denne rapport har været at vise, om genopretning af stenrev og reetablering af hårdt bundsubstrat kan være et tiltag, som i kombination med yderligere reduktioner af udledningerne af næringsstoffer til Limfjorden kan bidrage til opfyldelsen af målet om en ”god økologisk tilstand”.

Forudsætninger – målinger fra Limfjorden samt litteratur

Analyserne har taget udgangspunkt i en række forudsætninger samt modellering af vandbevægelser og udvalgte økologiske processer. Der er med andre ord truffet nogle valg / opstillet en række forudsætninger for på den måde at ”reducere” Limfjordens økosystem til en række ligninger, der kan indarbejdes i en model. På den ene side er disse valg selvsagt repræsentative for, hvad der sker i Limfjorden. På den anden side er der også valgt dele af økosystemet fra, bl.a. af beregningstekniske årsager. Det er på det foreliggende grundlag ikke hensigtsmæssig at gå ind i en diskussion af til- og fravalg. Det væsentligste er dels en fælles forståelse for, at ingen modeller er 100% korrekte i forhold til de systemer, de beskriver, og dels at modeller på trods af eventuelle mangler er et endog meget nyttigt værktøj, som kan understøtte en vidensbaseret forvaltning af eksempelvis Limfjorden.

En anden væsentlig fælles forståelse er, at stenrev på én og samme tid udgør et hydro-morfologisk kvalitetselement, for hvilket der som udgangspunkt skal opnås ”god økologisk status” i 2015, og et supplerende virkemiddel, som sammen med basale virkemidler (læs: reduktion af udledninger) skal bidrage til opfyldelse af målet om ”god økologisk tilstand”.

De gennemførte beregninger af effekter ved genetablering af rev er baseret på en række målinger gennemført i Limfjorden samt antagelser, hvoraf de vigtigste er:

- Den hydrodynamiske model er forceret med målte vandstande, målte (ca. 65% af oplandet) og modellerede (35% af oplandet) afstrømninger, samt modelleret meteorologi. Modellen er efterfølgende kalibreret mod ugentlige målinger af salt og temperatur gennemført i de centrale dele af fjorden.
- For at simulere en varm og vindsvag sommer er vindhastigheden og afstrømningen reduceret med 50%, og vandstanden på modelrandene er ændret således, at der påtrykkes en svag vestgående strøm gennem Limfjorden gennem 2 måneder. Disse ændringer er en forudsætning for etablering af iltvind i Limfjorden og i store træk en ”kopi” af forholdene i 1995, 1997, 2003 og 2006.

- Ilt- og N-fluxe mellem sediment og vand er indlagt i modellen med rater, som er baseret på målinger gennemført i Limfjorden gennem 3 år. Den modellerede effekt af bundvandets iltindhold på N-fluxe fra sedimentet er også udledt fra disse målinger.
- Beskrivelse af makroalgernes iltproduktion i modellen baseres på (1) overvågningsresultater og statistiske modeller af forskellige makroalgers dækningsgrad på hårdt substrat i Løgstør Bredning, (2) litteraturværdier, som tillader beregning af algebiomasse ud fra dækningsgrader, (3) litteraturværdier for relevante algearters iltproduktion under forskellige lysforhold, og (4) lysintensitet ved bunden (6,5 – 7 m) baseret på sigtddybdemålinger under NOVANA-programmet.

Overordnet vil det være makroalgernes realiserede iltproduktion, som er behæftet med den største usikkerhed, først og fremmest fordi der mangler data om vegetationens biomasse og produktion fra dybereliggende dele af Limfjorden. Omregningen fra dækningsprocent til biomasse for *Sargassum* tang beror på en ekstrapolation, der ligger væsentligt uden for de dybdeintervaller, som data baseres på. *Sargassum muticum* kan miste op til 60% af løvet fra juli til august, hvorved produktionen i sensommeren kan være betydeligt overestimeret, såfremt det er den dominerende alge.

Som konsekvens heraf er de fleste modelscenarier gennemført med 3 niveauer af en års-tidsrelateret iltproduktion på revene, nemlig (1) mest sandsynlige iltproduktion, (2) halvdelen af den mest sandsynlige iltproduktion og (3) den dobbelte iltproduktion.

Modelresultater – oversigt

Resultaterne af de gennemførte scenarier er sammenfattet i Tabel 3 og 4. For en given maksimal iltproduktion på revene blev de største effekter på N-fluxen opnået, når revene blev opbygget af mindre enheder, fx spredt1, spredt2 og ”meget spredt” med N-flux reduktioner mellem 710 og 1197 tons N/år ved anvendelse af en maksimal iltproduktion på $5 \text{ g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$. Til sammenligning var reduktionen i N-flux mellem 478 og 616 tons/år, hvis det samme revareal blev placeret samlet i én gruppe.

I næsten alle scenarier blev revene placeret på dybder mellem 6,5 og 7,0 m, og algenes iltproduktion blev beregnet for denne dybde. I ét enkelt scenarie blev iltproduktionen placeret i dybdeintervallet mellem 6,0 og 6,5 m for at simulere, at algerne strækker sig 0,5-1 m over bunden og på den måde får større lystilgængelighed. Effekten var udpræget positiv (øgning på 33%) og sammenlignelig med scenarierne, hvor der blev anvendt den højeste maksimale iltproduktion.

I modsætning til påvirkning af N-fluxen var effekten af iltproducerende rev på de arealer, som blev ramt af iltsvind noget mindre, men det skyldes, at opgørelsen af iltsvindsarealer ikke indeholder den samlede varighed af iltsvind indenfor et givet område.

Optimale revarealer

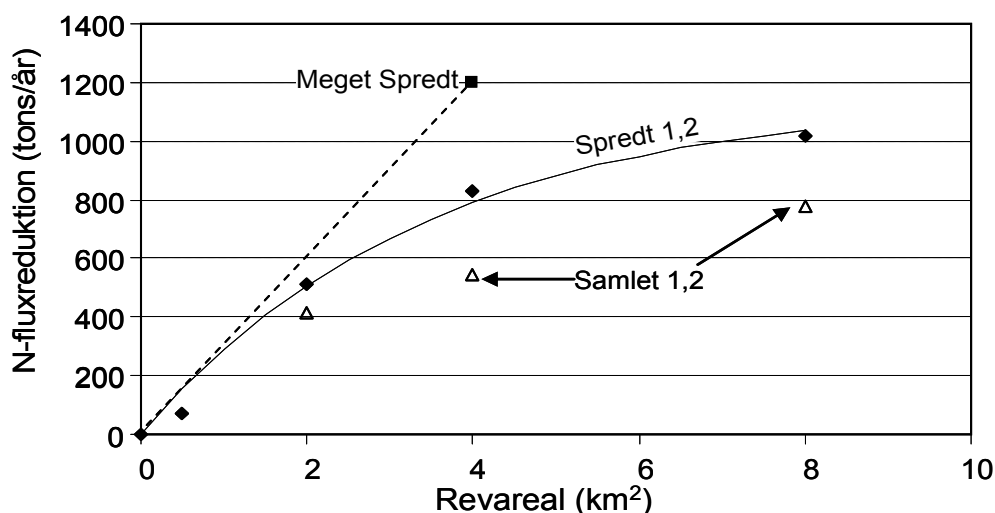
I Fig. 37 er vist sammenhængen mellem etableret revareal og beregnet effekt på N-flux fra sedimentet. Sammenhængene er lavet under en række forudsætninger, som fremgår af figurteksten. For revarealer større end 2 km^2 aftager effekten af yderligere revareal gradvist, mens effekten af et revareal på $\frac{1}{2} \text{ km}^2$ tilsyneladende kun er halvt så effektivt som forventet. Da arealet af rev, som evt. skal etableres direkte, skalerer til anlægsudgifterne, kan sammenhængene i Fig. 37 give en første indikation om den mest kost-effektive udformning af rev.

Tabel 3. Oversigt over gennemførte scenarier samt beregnede arealer med kraftigt iltsvind ($< 2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) og iltsvind ($< 4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) i Løgstør Bredning/Bjørnsholm Bugt og N-flux ud af sedimentet samt frigivelse fra levende og døde muslinger under en vindsvag sommer. diff angiver differencen til scenarie HD 17_2R01, dvs. en vindsvag sommer uden iltproducerende rev (i scenarierne HD17_2R02 - HD17_2R017 var revarealet nominelt 4 km^2)

Scenarie	Revtype med iltproduktion	Max ilt-prod.	DIN-flux		Kraftigt iltsvind ($< 2 \text{ mg O}_2/\text{l}$)		Iltsvind ($< 4 \text{ mg O}_2/\text{l}$)	
		$\text{g O}_2/\text{m}^2/\text{d}$	ton/år	diff	km^2	diff	km^2	diff
HD13_2R04	Ingen (2005 vindrig sommer)	0	4213		71,6		256,1	
HD17_2R01	Ingen (vindsvag sommer;reference)	0	6248		265,8		406,3	
HD17_2R02	spredt1	10	5230	-1018	215,0	-50,9	393,5	-12,8
HD17_2R03	samlet1	10	5588	-660	206,5	-59,3	383,9	-22,4
HD17_2R04	spredt2	10	5226	-1023	226,7	-39,2	394,0	-12,3
HD17_2R05	samlet2	10	5357	-891	233,6	-32,2	395,0	-11,3
HD17_2R06	spredt1	5	5397	-851	241,0	-24,9	399,5	-6,8
HD17_2R07	samlet1	5	5770	-478	232,5	-33,3	395,4	-10,9
HD17_2R08	spredt2	5	5445	-803	247,3	-18,6	399,0	-7,3
HD17_2R09	samlet2	5	5632	-616	247,7	-18,2	401,9	-4,4
HD17_2R10	Fur-bundstrøm	5	5539	-710	243,8	-22,0	400,2	-6,1
HD17_2R11	spredt1	2,5	5740	-509	254,6	-11,2	401,5	-4,8
HD17_2R12	samlet1	2,5	5875	-373	249,3	-16,6	400,3	-6,0
HD17_2R13	spredt2	2,5	5735	-513	257,9	-8,0	402,2	-4,1
HD17_2R14	samlet2	2,5	5791	-457	255,7	-10,2	404,6	-1,7
HD17_2R15	spredt1 + 5xmuslinger på rev	5	6040	-208	252,5	-13,4	418,9	12,6
HD17_2R16	spredt2 + 5xmuslinger på rev	5	6355	-107	246,9	-19,0	421,1	14,8
HD17_2R17	spredt2 + 1m prdn147%	5	5183	-1065	233,6	-32,2	397,2	-9,1
HD17_2R18	enkelt celle (0.424 km^2)	5	6174	-74	263,8	-2,0	405,5	-0,8
HD17_2R19	meget spredt (104 km^2)	0,2	5051	-1197	141,2	-124,6	382,0	-24,3

Sammenhænge i Fig. 37 viser, at kost-effektiviteten af et revareal på $\frac{1}{2} \text{ km}^2$ er lav, at arealer på 2 km^2 antagelig er tæt på det optimale, og hvis der skal etableres endnu større revarealer, skal revene opbrydes i små enheder ($\ll \frac{1}{2} \text{ km}^2$) for at kost-effektiviteten skal forblive høj. Dette vil selvfølgelig sætte fysiske begrænsninger på fiskeri og især muslingeskrab.

Hvis man lægger sig fast på et revareal på 2 km^2 , må man i stille somre forvente reduktioner i sedimentets N-flux (intern belastning) på mellem 510 og 650 tons (ved iltproduktion 0,5-1 m over bunden). Reduktioner i N-tilførsel om sommeren, hvor primærproduktionen normalt er N-begrænset, vil alt andet lige have en større positiv effekt, end hvis en tilsvarende stor N-reduktion sker om vinteren, fordi en større del af det tilførte N vil tabes (denitrifikation) eller transporteres ud af fjordsystemet om vinteren. Det vurderes, at en reduktion i N-tilførslen om sommeren på 500-650 tons kan sammenlignes med en reduktion i tilførslerne fra oplandet på 800-1000 tons N.



Figur 37. Sammenhæng mellem revareal og beregnet reduktion i N-flux fra sediment for rev etableret i samlede enheder, ét enkelt element på $\frac{1}{2}$ km², rev opdelt i 6-7 grupper eller meget spredt, alle med en maksimal iltproduktion på 5 g O₂ m² d⁻¹. Det er antaget, at modelscenariet for 4 km² rev (samlet eller opdelt) med maksimal iltproduktion på 2,5 og 10 g O₂ m² d⁻¹ kan ligestilles med effekten af rev på 2 og 8 km² med en maksimal iltproduktion på 5 g O₂ m² d⁻¹. For modelscenariet med meget spredte rev er det antaget, at iltproduktionen på 0,2 g O₂ m² d⁻¹ fordelt over 104 km² ($0,2 \times 104 = 20,8$ g O₂ d⁻¹) kan ligestilles med 4 km² rev med specifik maksimal iltproduktion på 5 g O₂ m² d⁻¹.

Kost-effektivitet af stenrev

Der er store usikkerheder ved at anslå udgifter til etablering af rev. Den dyreste løsning med natursten fuldt dækkende et samlet område på 2 km² vil skønsmæssigt koste mellem 100-300 mio. kr. og omregnet til N-reduktionsenheder mellem 125 og 300 kr/kg N; men vel at mærke kvælstof-enheder, der på det tidspunkt, de bliver tilført vandmiljøet (fra sedimentet), øjeblikkeligt indgår i forøget produktion. Hvis der vælges andre løsninger, f.eks. revelementer af beton, kan en betydeligt lavere pris forventes. Endelig kan man også tænke sig en mere åben revkonstruktion, og med en maksimal forventet dækningsgrad af alger på 20-30% kan dette være et udgangspunkt for dækningsgraden af sten. Dette vil sandsynligvis reducere anlægsomkostningerne med 50-60%.

Traditionelt opgøres kost-effektiviteten af de forskellige virkemidler til opfyldelse af Vandrammedirektivet i N-reduktionsenheder, selv om store reduktioner i N-tilførsel fra Limfjordens opland ikke er garanti for, at en "god økologisk" tilstand kan opnås; selv hvis N-tilførslen blev halveret, ville der stadig mangle hårdt substrat til makroalger.

Varmere klima

I Tabel 4 er vist effekterne af rev i et fremtidigt varmere klima. Alene en øgning i temperaturen på 2°C vil medføre øgning i N-fluxen fra 6248 til 9865 tons/år (uden iltproducerende rev). Baseret på forholdsvis få scenarier var de positive effekter af rev størst, hvis de blev samlet i én gruppe i stedet for i mindre enheder. Det skal dog pointeres, at "klimascenariet" nok er for simple, da der ikke er taget hensyn til ændringer i afstrømningsforhold (som over en mindre årrække også vil påvirke sedimentkoncentrationer). Også tætheden af muslinger må formodes at blive reduceret, fordi varighed af lagdelinger – og iltsvind bliver mere hyppige.

Biologiske effekter af rev

I projektet er alene undersøgt effekten af iltproducerende rev på iltsvind og N-fluxe, mens andre (positive) effekter ikke er søgt kvantificeret.

Det er angivet fra adskillige undersøgelser, at artsantal og biodiversitet typisk er 10-25 gange højere per projiceret revareal sammenlignet med en jævn sedimentationsbund, og hvis revene blot rejser sig ½ m over den flade bund, kan de bedre iltforhold på toppen være vigtige for overlevelse af mobile bunddyr under iltsvindshændelser.

Det forventes også, at filtrationen af planktonalger hos de muslinger, som vil kolonisere revene, vil blive mere effektiv og dermed forbedre lysnedtrængningen og dermed iltproduktionen på revet. Endelig forventes der også en større tæthed og diversitet af kommercielle fisk og skaldyr, fx sorthummer, som direkte eller indirekte er afhængig af hulheder og hårdt substrat. De forbedrede iltforhold på bunden udenfor revene, og især den modellerede kortere varighed af iltsvindshændelser, vil få en positiv effekt på bunddyrenes tæthed, biomasse og sammensætning, da iltsvind isoleret set er langt den største trussel for bunddyrene i Limfjorden.

Tabel 4. *Oversigt over gennemførte scenarier samt beregnede arealer med kraftigt iltsvind ($< 2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) og iltsvind ($< 4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$) i Løgstør Bredning/Bjørnsholm Bugt og N-flux ud af sedimentet samt N-frigivelse fra levende og døde muslinger i et fremtidigt 2°C varmere klima og under en vindsvag sommer.*

Scenario	Revtype	Max ilt-prod.	DIN-flux		Kraftigt iltsvind ($< 2 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$)		Iltsvind ($< 4 \text{ mg O}_2 \text{ l}^{-1}$)	
		$\text{g O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$	ton/år	diff	km^2	diff	km^2	diff
HD17_KLIMA_R01	Ingen	0	9865		391,9		441,0	
HD17_KLIMA_R08	spredt1	5	9606	-259	383,3	-8,7	439,4	-1,6
HD17_KLIMA_R09	samlet1	5	9119	-746	366,8	-25,1	437,5	-3,5
HD17_KLIMA_R10	spredt2	5	9748	-117	386,3	-5,7	441,0	0,0
HD17_KLIMA_R13	samlet2	5	9615	-251	384,5	-7,5	441,4	0,4

Andre forhold

Selv om baggrunden for reetablering af rev i Limfjorden er begrundet i forbedring af de biologiske forhold i Limfjorden, så vil der også være rekreative gevinster for lokalsamfundet, herunder især dykkerturisme og et mere spændende og divers lystfiskeri.

Direkte negative effekter af nyetablerede rev vil inkludere en arealreduktion for muslingeskrab. På den anden side forventes det, at de positive effekter af forøget iltproduktion ved bunden og mindre faunadød under iltsvind vil mere end opveje de forholdsvis begrænsede arealer, som tages ud af produktionen, fordi der etableres rev. Hvis der vælges den mest kost-effektive løsning med udlægning af sten over hele Løgstør Bredning, vil muslingefiskeriet i praksis blive umuliggjort i dette område.

Andre potentielt negative effekter kunne være, at der skete en stor kolonisering af muslinger på revene og en stor øgning i biomassen med et højere iltforbrug som konsekvens. I modelscenarierne (HD17_2_R15 og 16) kunne der påvises et øget iltforbrug og en øget N-flux sammenlignet med rev med normal tæthed af muslinger, men revene havde alligevel positive effekter på ilt og N-fluxe.

Konklusion

Samlet set kan der på baggrund af de gennemførte modelkørsler, og med de forbehold og antagelser, der ligger til grund, konkluderes følgende:

- Etablering af stenrev i Løgstør Bredning vil med stor sandsynlighed forbedre iltforholdene ved bunden efter en koloniseringsperiode for makroalger på 2-5 år.

- Når makroalger på revene er fuldt etablerede, forventes primært i vindsvage somre en betydelig reduktion i den interne N-flux fra sedimentet med en lavere planktonvækst til følge.
- Hvis der etableres 2 km², rev forventes en reduceret N-flux svarende til en reduktion i N-tilførslen fra land på 800-1000 tons/år.
- Et højere iltindhold i bundvandet under vindsvage perioder vil markant forbedre forholdene for bunddyr, deres artsrigdom og biomasse.

Forslag til videre aktiviteter

Rapporten etablerer et fagligt grundlag for at vurdere, om der skal etableres stenrev i Limfjorden. Der vil dog være behov for en yderligere optimering af revdesign og den mest optimale placering af rev, før de første sten evt. kastes i vandet. Og parallelt med, at de første delrev etableres, er det afgørende at følge koloniseringer med alger og verificere/korrigere de iltproduktionsrater under feltforhold, som er den mest kritiske antagelse i modelleringen samt effekten på det omgivende sediment. Usikkerheder omkring algebiomasser, faunabiomasser og netto iltproduktion på de berørte dybder (lysintensiteter) bør afklares. Et første og uforpligtende forslag til aktivitetsplan er summarisk vist nedenfor.

År	Aktivitet	Hvorfor
2009-2010	Detailbeskrivelse af revprojekt Feltarbejde vedr. netto iltproduktion Økosystem modellering Udlægning af sten på 3 positioner, i alt 0,25 km ²	• Udbygning og validering af model • Optimering af revdesign & placering af rev • Sammenligning af a) effektivitet af revetablering, b) de afledte reduktioner i N-frigivelse fra sedimentet, og c) samtidige reduktioner i den landbaserede N-tilførsel, for at kunne vurdere den fremtidige økologiske tilstand • Kolonisering & iltproduktion (input til model) • Overvågning af udvikling og effektivitet
2011	Udlægning af sten på optimale positioner Overvågning	• Forbedring af iltforhold i bundvand • Kontrol af effektiviteten
2012	Overvågning	• Kontrol af effektiviteten
2013	Overvågning Evaluering	• Kontrol af effektiviteten • Erfaringsopsamling og dokumentation

Afsluttende bemærkninger

De gennemførte analyser er alle specifikke for de centrale dele af Limfjorden og bekræfter den opstillede hypotese, nemlig at genetablering af stenrev og/eller et større areal med sten vil have en række positive effekter på miljø- og naturforholdene i Limfjorden. Det følger heraf, at genetablering af stenrev kan anskues som et supplerende, og på baggrund af de gennemførte analyser også effektivt, virkemiddel, jf. Vandrammedirektivet. Der er i projektet, og efter aftale med By- og Landskabsstyrelsen, ikke gennemført en egentlig usikkerhedsanalyse. Baggrunden herfor er en fælles vurdering af 'rammebetingelserne'. Det er således vurderet, at mulige usikkerheder er reduceret i fornødent omfang, dels ved at anvende afprøvede modelværktøjer, dels ved at forudsætningerne for de gennemførte modelscenarier er gældende for de centrale dele af Limfjorden.

Effektiviteten af genetablering af stenrev, som i denne rapport alene er dokumenteret for de centrale dele af Limfjorden, kan ikke umiddelbart overføres til andre lavvandede kystområder. Der er ingen tvivl om, at konceptet som sådan vil kunne bruges i andre områder, men det kræver sted-specifikke analyser, hvis effektiviteten i disse områder skal vurderes.

6 **TAKSIGELSER**

Skov- og Naturstyrelsen og By- og Landsskabsstyrelsen takkes for hhv. finansiering og god kommunikation gennem hele projektforsløbet. Desuden tak til Miljøcenter Ringkøbing og Miljøcenter Ålborg for deltagelse i følgegruppen og aktiv dialog omkring lokale forhold i Limfjorden.

Tak til vore kolleger på DHI: Ian Sehested Hansen, Jørgen Erik Larsen og Ole S. Petersen for god dialog og assistance undervejs i forløbet.

Tak skal også lyde til Karsten Dahl, Peter Henriksen og Karen Timmermann (alle DMU) for kommentarer til tidligere udgaver af rapporten.

En særlig tak skal lyde til Peter Bondo Christensen, Dan Kaasby, Per Dolmer, Karsten Dahl, Nanna Rask og Jan Nicolaisen hvis illustrative fotos bidrager til formidlingen af revenes betydning i de danske kystvande.

Desuden tak til Erik Hoffman, DTU Aqua, for information om bestandsopgørelser af muslinger i Limfjorden.

Endelig takkes Marianne Sleth Madsen og Bo Riemann for assistance i forbindelse med redigeringen af den endelige version af rapporten.

7 **REFERENCER**

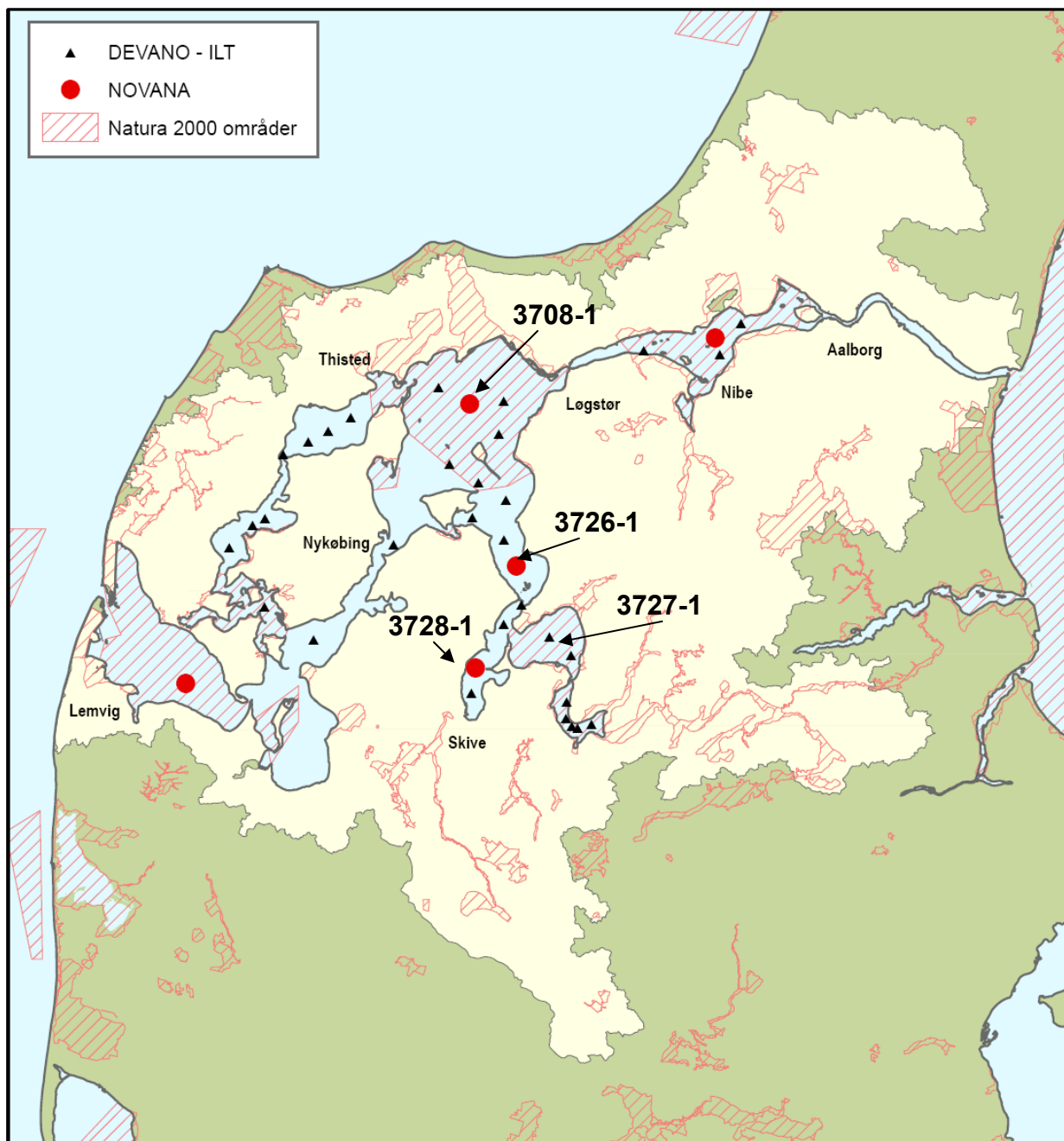
- Andersen, J.H. & H. Kaas (2008): Danish Assessment of eutrophication status in the North Sea, Skagerrak and Kattegat: OSPAR Common Procedure 2001-2005. DHI Technical Report to the Danish Spatial and Environmental Planning Agency. 86 pp.
- Andersen, J.H. & H. Skov (2005): Synergi og overlap mellem Habitattdirektivet, Fuglebeskyttelsesdirektivet og Vandrammedirektivet – med fokus på kystvand. DHI Teknisk Rapport til Skov- og Naturstyrelsen og Miljøstyrelsen. 55 pp.
- Angel, D., T. Katz, N. Eden, E. Spanier & K. Black (2005): Damage Control in the Coastal Zone: Improving Water Quality by Harvesting Aquaculture-Derived Nutrients. Chapter 1 in: NATO Science Series: IV: Earth and Environmental Sciences Vol. 50.
- Bach, H., N. Christensen, H. Gudmundsson, T.S. Jensen & B. Normander (red.) (2005): Natur og Miljø 2005. Påvirkninger og tilstand. Danmarks Miljøundersøgelser. – Faglig rapport fra DMU nr. 550, 208 pp.
- Baine, M. (2001): Artificial reefs: a review of their design, application, management and performance. *Ocean & Coastal Management* 44:241-259.
- Binzer, T., K. Sand-Jensen & A.L. Middelboe (2006): Community photosynthesis of aquatic macrophytes. *Limnology & Oceanology* 51:2722-2733.
- By- og Landskabsstyrelsen (2008): Retningslinjer for definition og udpegning af stærkt modificerede vandområder. Miljøministeriet. 22 pp.
- Carstensen, J., D.J. Conley, J.H. Andersen & G. Ærtebjerg (2006): Coastal eutrophication and trend reversal: A Danish case study. *Limnology & Oceanology* 51:398-408.
- Carstensen, J., D. Krause-Jensen, K. Dahl & P. Henriksen (In prep.): Macroalgae and phytoplankton as indicators of ecological status of Danish coastal waters. NERI Technical Report.
- Challinor, S. & H. Hall (2008): Multi-functional artificial reefs scoping study. CIRIA C673, London, 69 pp.
- Conley, D.J., H. Kaas, F. Møhlenberg, B. Rasmussen & J. Windolf (2000): Characteristics of Danish Estuaries. *Estuaries*, 23(6):820–837.
- Dahl K., S. Lundsteen & S.A. Helmig (2003): Stenrev-havets oaser. Gads Forlag, 94 p.
- Fallesen, G., F. Andersen & B. Larsen (2000): Life, death and revival of the hypertrophic Mariager Fjord, Denmark. *Journal of Marine Systems* 25:313-321.
- Hamburger, K., F. Møhlenberg, A. Randløv & H.U. Riisgård (1983): Size, oxygen consumption and growth in the mussel *Mytilus edulis*. *Mar. Biol.* 75(2/3):303-306.

- HELCOM (2006): Development of tools for assessment of eutrophication in the Baltic Sea. Edited by: Andersen, J.H., J. Aigars, U. Claussen, B. Håkansson, H. Karup, M. Laamanen, E. Łysiak-Pastuszek, G. Martin & G. Nausch Baltic Sea Environmental Proceedings 104, 62 pp.
- Jackson, J.B.C, M.X. Kirby, W.H. Berger, K.A. Bjorndal, L.W. Botsford, B.J. Bourque, R.H. Bradbury, R. Cooke, J. Erlandson, J.A. Estes, T.P. Hughes, S. Kidwell, C.B. Lange, H.S. Lenihan, J.M. Pandolfi, C.H. Peterson, R.S. Steneck, M.J. Tegner & R.R. Warner (2001): Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems. *Science* 293:629-638.
- Jensen, A.C., K.J. Collins & A.P.M. Lockwood (Eds.) (2000): Artificial reefs in European seas. Kluwer Academic Publishers, 508 pp.
- Johansson, G. & P. Snoeijs (2002): Macroalgal photosynthetic responses to light in relation to thallus morphology and depth zonation. *Mar Ecol Progr Ser* 244: 63–72.
- Josefson, A., P. Henriksen, D. Krause-Jensen, M.B. Rasmussen & J.H. Andersen (in prep.): Udvikling af indikatorer og tilstandsvurderingsværktøj for marine Natura 2000 områder. Faglig rapport fra DMU.
- Krause-Jensen, D. & K. Sand-Jensen (1998): Light attenuation and photosynthesis of aquatic plant communities. *Limnology & Oceanography* 43:396-407.
- Krause-Jensen, D., J. Carstensen, & K. Dahl (2007a): Total and opportunistic algal cover in relation to environmental variables. *Marine Pollution Bulletin* 55:114-125.
- Krause-Jensen, D., A.L. Middelboe, J. Carstensen & K. Dahl (2007b): Spatial patterns of macroalgal abundance in relation to eutrophication. *Marine Biology* 152:25-36.
- Kronvang, B., H.E. Andersen, C. Børgesen, T. Dalgaard, S.E. Larsen, J. Bøgestrand & G. Blicher-Madsen (2008): Effects of policy measures implemented in Denmark on nitrogen pollution of the aquatic environment. *Environmental Science and Policy* 11:144-152.
- Majland, P. (2005): Succession and algae communities on the eastern breakwater protecting the harbour of Aarhus. Specialerapport, Århus Universitet 1-96.
- Markager, S. & K. Sand-Jensen (1992): Light requirements and depth zonation of marine macroalgae. *Marine Ecology Progress Series* 88:83-92.
- Middelboe, A.L., K. Sand-Jensen & T. Binzer (2006): Highly predictable photosynthetic production in natural macroalgal communities from incoming and absorbed light. *Oecologia* 150:464-476.
- MCÅ (2008): Sten og skaller fjernet ved skrabning efter blåmuslinger. Miljøcenter Ålborg, notat af 11-06-2008.
- Møhlenberg, F., S. Petersen, A.H. Petersen & C. Gameiro (2004): Long-term trends and short-term variability of water quality in Skive Fjord, Denmark – mussels and nutrient load are the primary forcings of estuarine conditions. *Environmental Monitoring and Assessment* 127:503-521.

- OSPAR (2003): OSPAR Integrated Report 2003 on the Eutrophication Status of the OSPAR Maritime Area Based Upon the First Application of the Comprehensive Procedure. Eutrophication Series, 59 pp.
- Pedersen, M.F., P.A. Stæhr, T. Wernberg & M.S. Thomsen (2005): Biomass dynamics of exotic *Sargassum muticum* and native *Halidrys siliquosa* in Limfjorden, Denmark - implications of species replacement on turnover rates. *Aquatic Botany* 83:31-47.
- Petraitis, P.S. & E.T. Methratta (2006): Using patterns of variability to test for multiple community states on rocky intertidal shores. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 338:222–232.
- Plus, M., I. Auby, M. Verlaque & G. Levavasseur (2005): Seasonal variation in photosynthetic irradiance response curves of macrophytes from a Mediterranean coastal lagoon. *Aquatic Botany* 81:157-173.
- Schubert, H. & C. Schygula (2006): Ansiedlung und Produktion von Makrophyten. Riff Nienhagen, Jahresbericht 2005; Januar 2006.
- Skriver, J. (2006): Limfjorden. 171 pp.
- Støttrup, J.G. & H. Stokholm (eds.) (1997): Kunstige rev. Review om formål, anvendelse og potentiale i danske farvande. DFU rapport 42 og 42a.
- UNEP (2005): Lääne, A., E. Kraav & G. Titova: "Baltic Sea, GIWA Regional assessment 17". University of Kalmar, Sweden, 69 pp.
- Wilding, T.A. (2006): The benthic impacts of the Loch Linnhe Artificial Reef. *Hydrobiologia* 555:345-353.
- Ærtebjerg, G., J.H. Andersen & O.S. Hansen (Eds.) (2003a): Nutrients and Eutrophication in Danish Marine Waters. A Challenge to Science and Management. National Environmental Research Institute, 126 p.
- Ærtebjerg, G., J. Carstensen, P. Axe, J.-N. Druon & A. Stips (2003b): The 2002 Oxygen Depletion Event in the Kattegat, Belt Sea and Western Baltic. *Baltic Sea Environment Proceedings No. 90* Helsinki Commission. Baltic Marine Environment Protection Commission, 64 pp.
- Ærtebjerg, G. (Ed.) (2005): Marine områder 2004 – Tilstand og udvikling i miljø- og naturkvaliteten. NOVANA. – Faglig rapport fra DMU nr. 551, 94 pp.
- Öberg, J. (2006): Primary production by macroalgae in Kattegat, estimated from monitoring data, seafloor properties, and model simulations. *Continental Shelf Res* 26:2415-2432.

B I L A G A

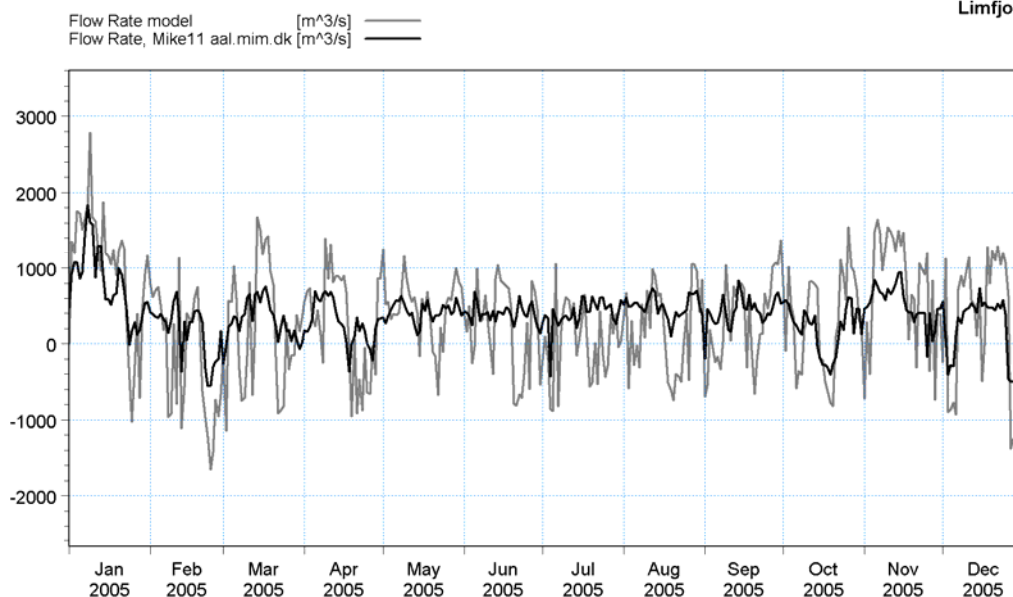
Oversigtskort over Limfjorden med placering af overvågningsstationer



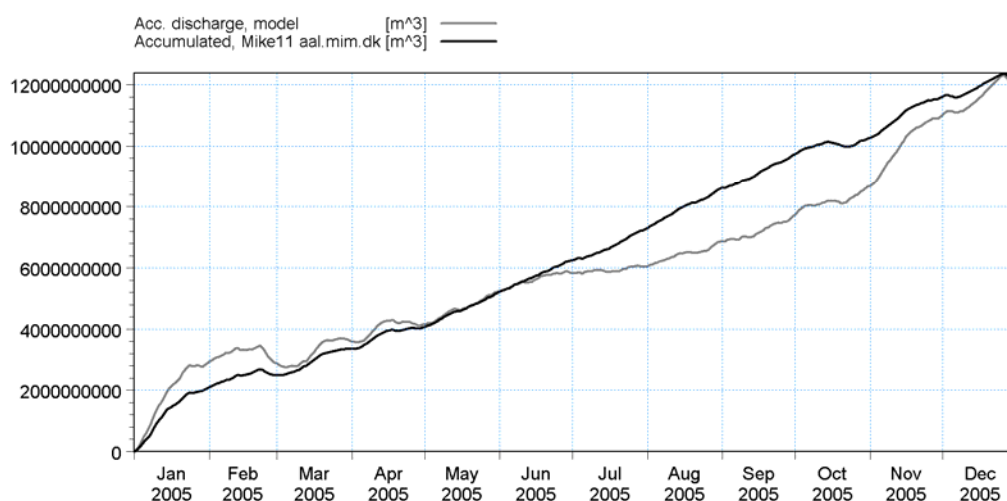
B I L A G B

Kalibrering af model mod måleresultater af vandstand ved Løgstør samt salt og temperatur i de centrale bredninger

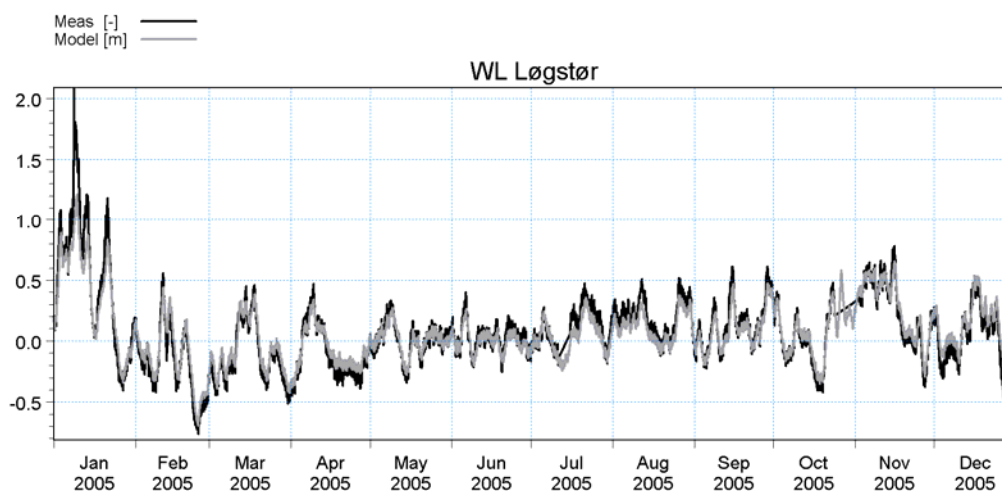
Limfjorden 3-07 NC



F:\Limfjordmodelresults\07Discharge_agggrund.dfo
F:\Limfjordmeasured\0net Daily Aggrund.dfo

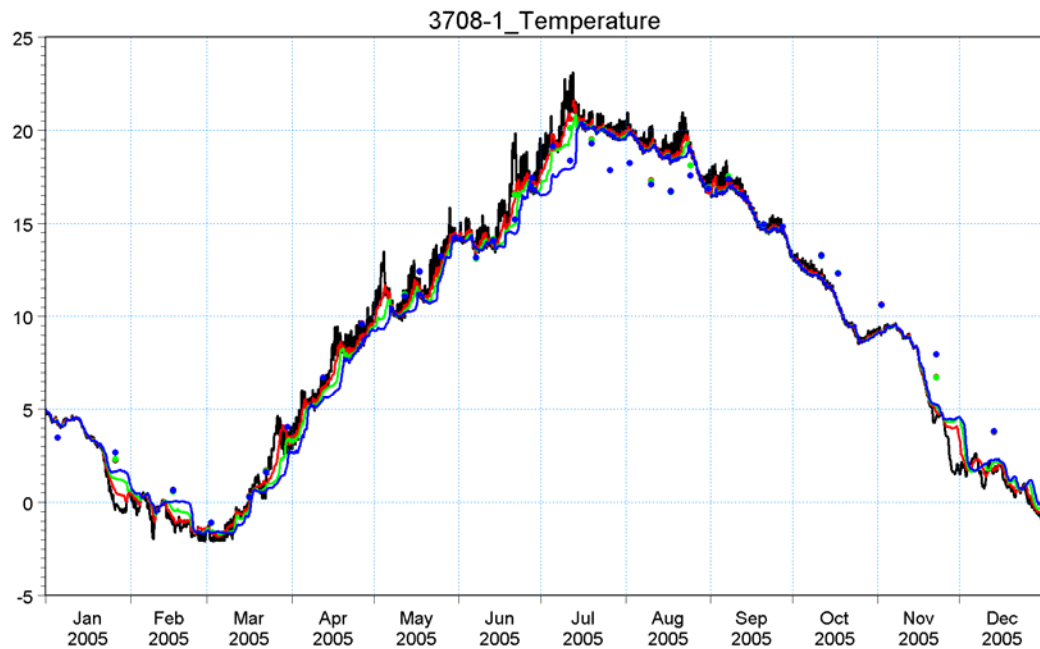


F:\Limfjordmodelresults\07Discharge_agggrund.dfo
F:\Limfjordmeasured\0net Daily Aggrund.dfo

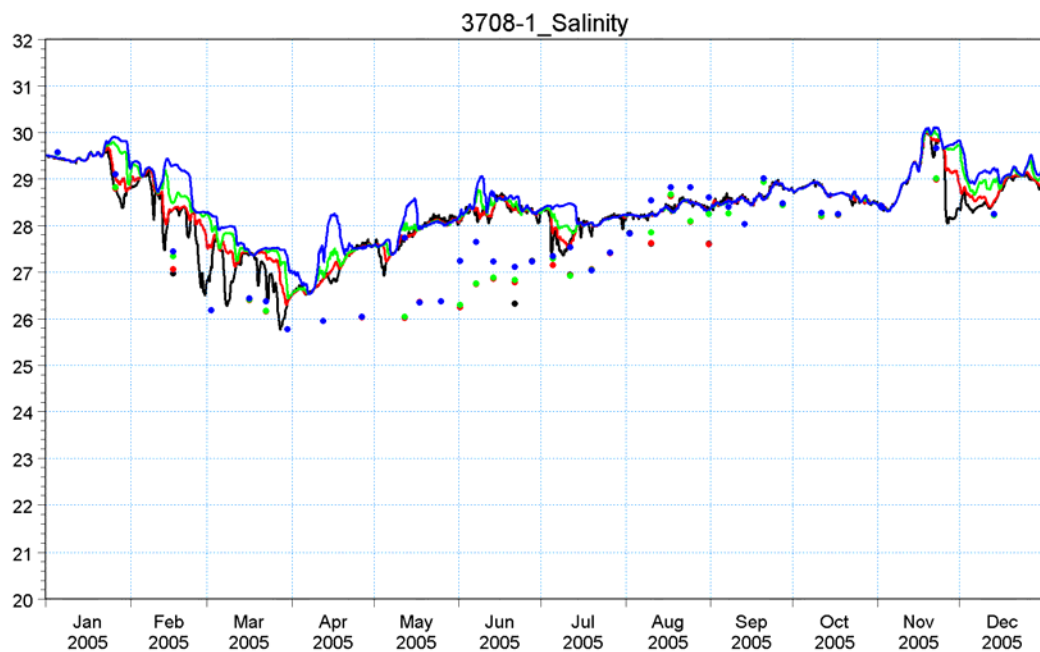


F:\Limfjordmeasured\WL_Løgstør_nonEO.dfo
F:\Limfjordmodelresults\07WL_Løgstør.dfo

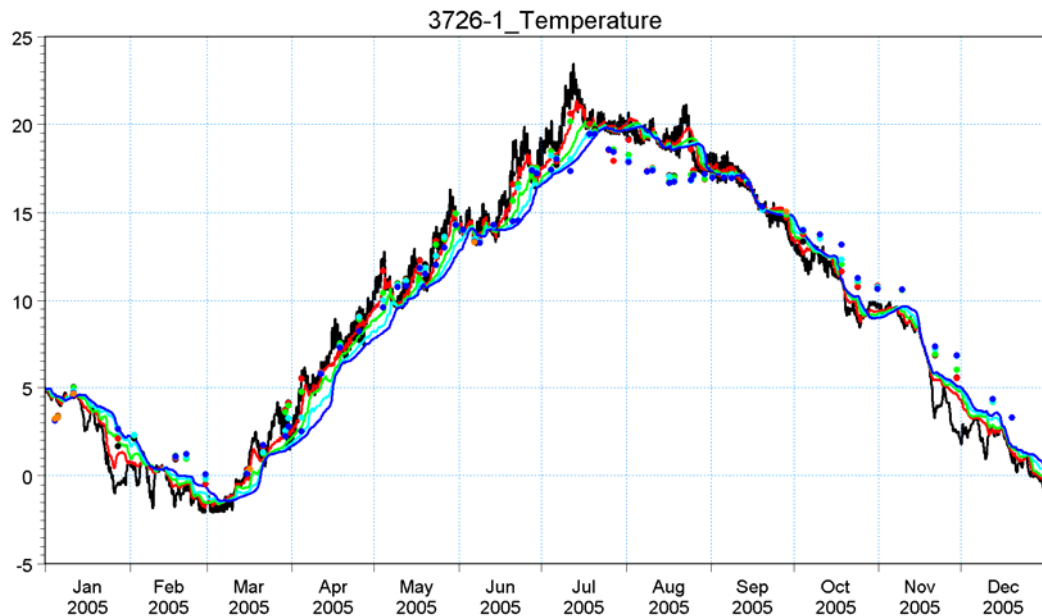
-0.75 m [deg C] —
 -2.75 m [deg C] —
 -4.75 m [deg C] —
 -6.75 m [deg C] —
 -0.75 m_obs [-] •
 -2.75 m_obs [-] •
 -4.75 m_obs [-] •
 -6.75 m_obs [-] •



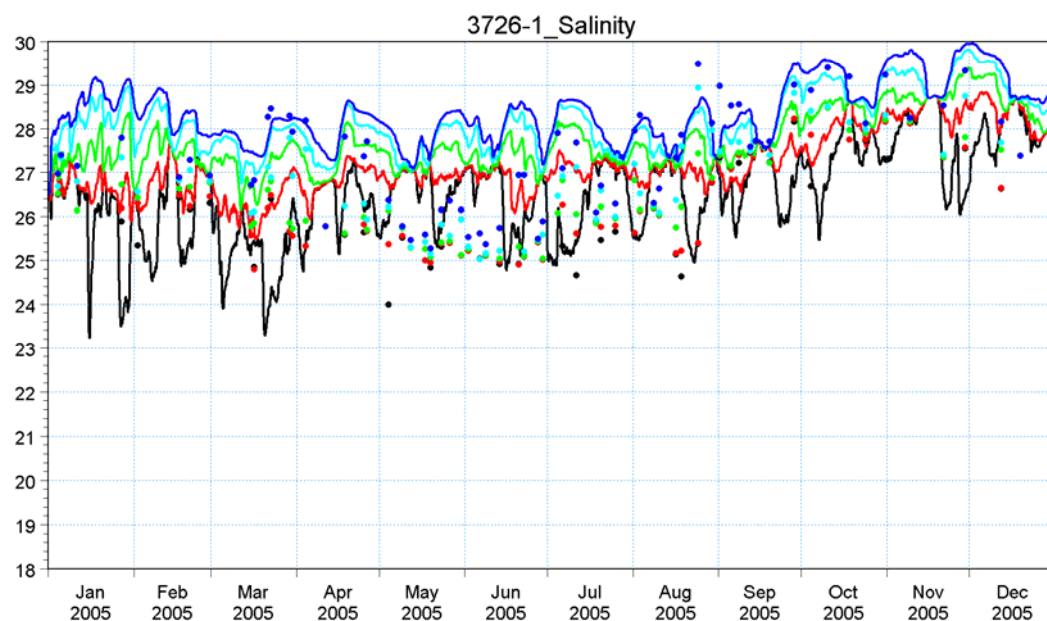
-0.75 m [PSU] —
 -2.75 m [PSU] —
 -4.75 m [PSU] —
 -6.75 m [PSU] —
 -0.75 m_obs [-] •
 -2.75 m_obs [-] •
 -4.75 m_obs [-] •
 -6.75 m_obs [-] •



-0.75 m: Temperature	[deg C]	—
-2.75 m: Temperature	[deg C]	—
-4.75 m: Temperature	[deg C]	—
-6.75 m: Temperature	[deg C]	—
-8.75 m: Temperature	[deg C]	—
-10.75 m: Temperature	[deg C]	—
-0.75 m_obs	[]	•
-2.75 m_obs	[]	•
-4.75 m_obs	[]	•
-6.75 m_obs	[]	•
-8.75 m_obs	[]	•
-10.75 m_obs	[]	•

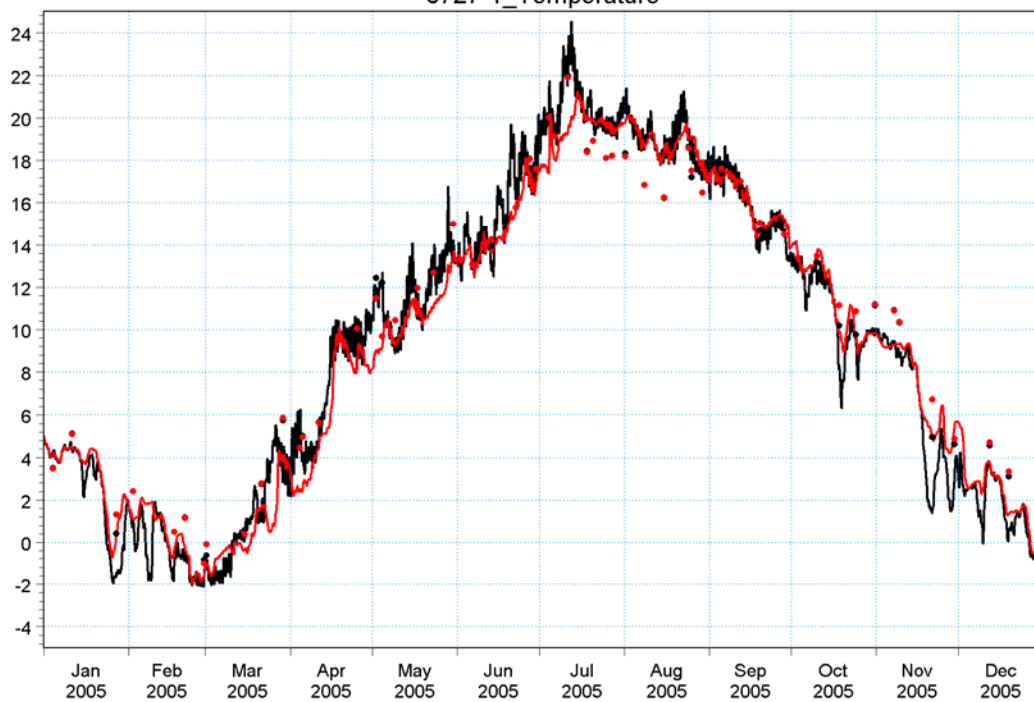


-0.75 m: Salinity [PSU]	—
-2.75 m: Salinity [PSU]	—
-4.75 m: Salinity [PSU]	—
-6.75 m: Salinity [PSU]	—
-8.75 m: Salinity [PSU]	—
-0.75 m_obs	[]
-2.75 m_obs	[]
-4.75 m_obs	[]
-6.75 m_obs	[]
-8.75 m_obs	[]



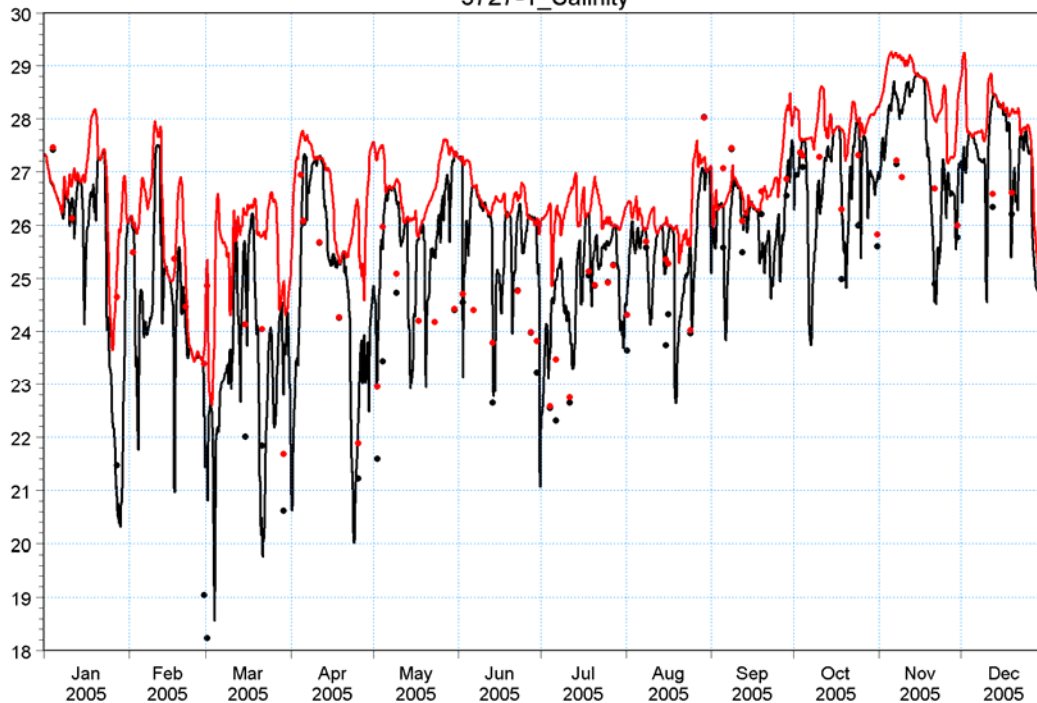
-0.75 m [deg C] —
 -2.75 m [deg C] —
 -0.75 m_obs [-] •
 -2.75 m_obs [-] •

3727-1_Temperature

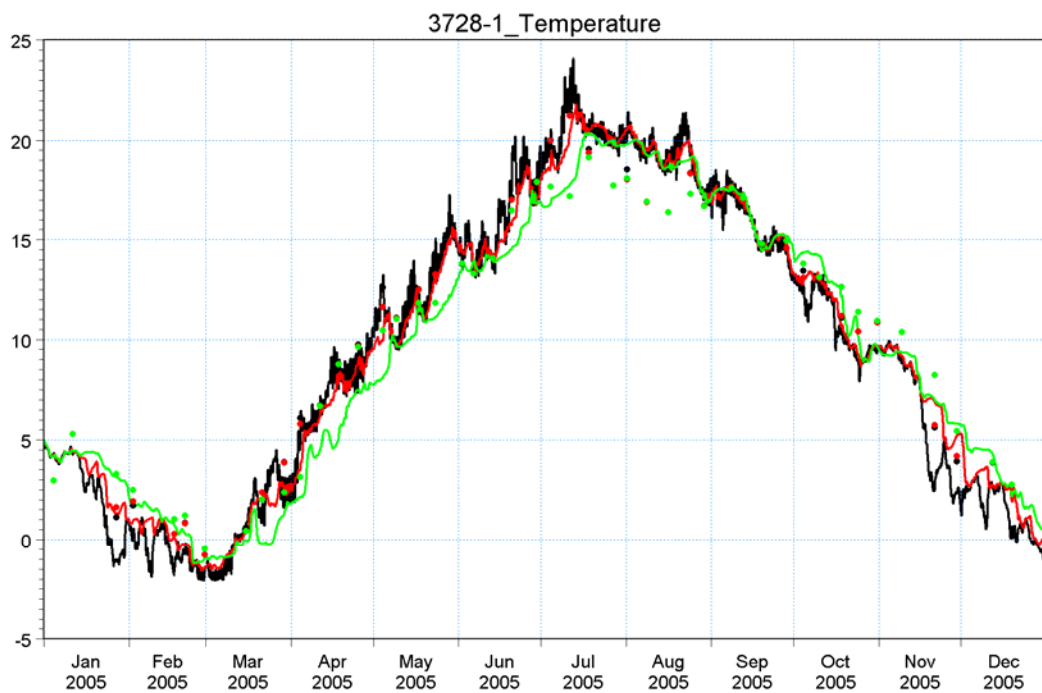


-0.75 m [PSU] —
 -2.75 m [PSU] —
 -0.75 m_obs [-] •
 -2.75 m_obs [-] •

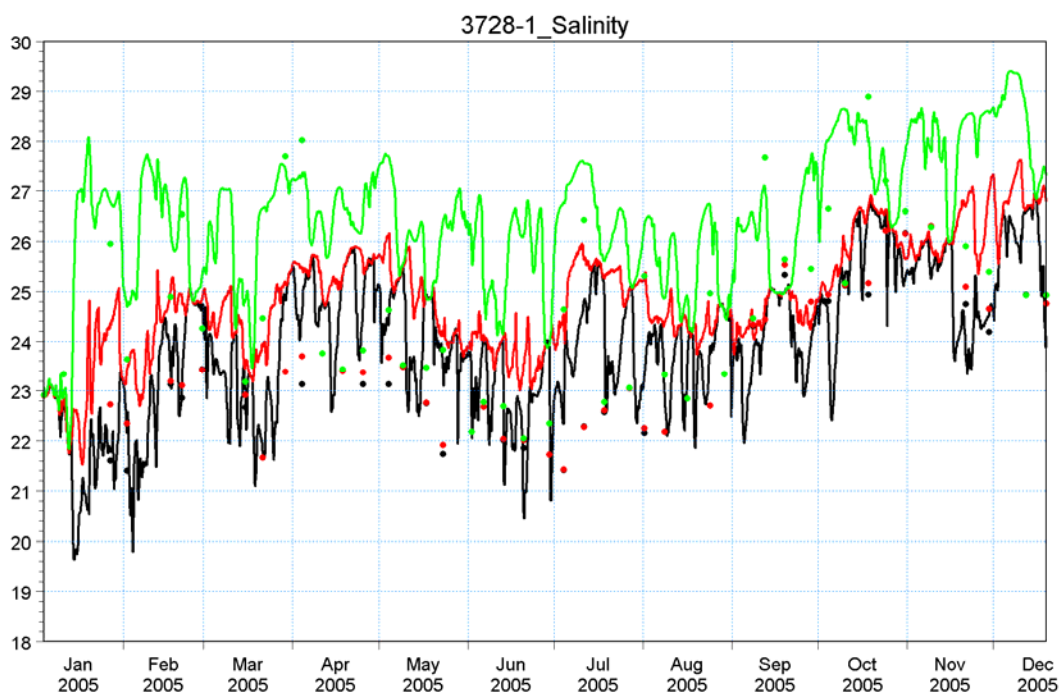
3727-1_Salinity



-0.75 m [deg C] —
 -2.75 m [deg C] —
 -4.75 m [deg C] —
 -0.75 m_obs [-] •
 -2.75 m_obs [-] •
 -4.75 m_obs [-] •



-0.75 m [PSU] —
 -2.75 m [PSU] —
 -4.75 m [PSU] —
 -0.75 m_obs [-] •
 -2.75 m_obs [-] •
 -4.75 m_obs [-] •

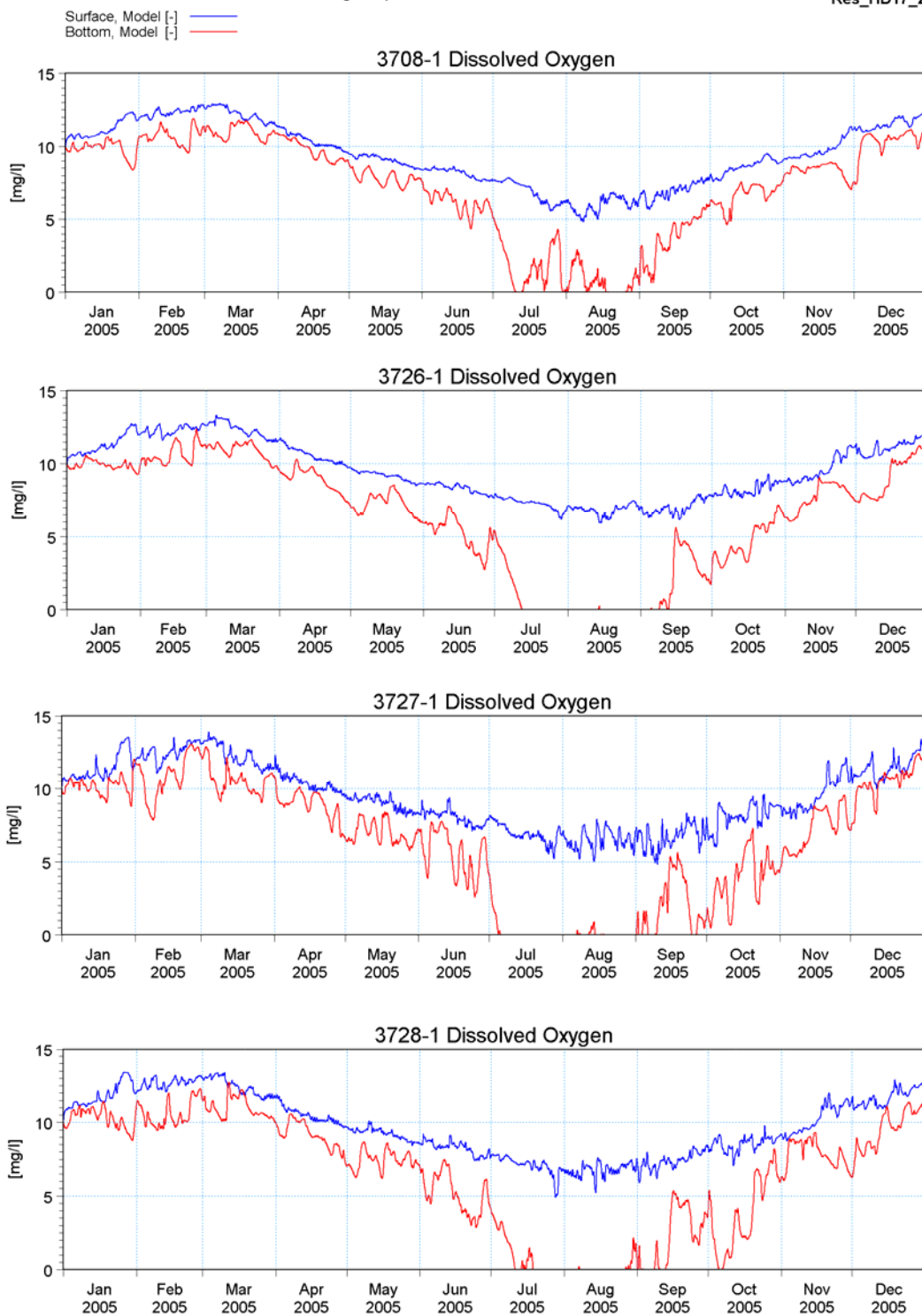


B I L A G C

Modellerede iltforhold i de centrale Limfjordsbredninger efter etablering af iltproducerende stenrev på forskellige positioner og med forskellig størrelse af iltproduktion

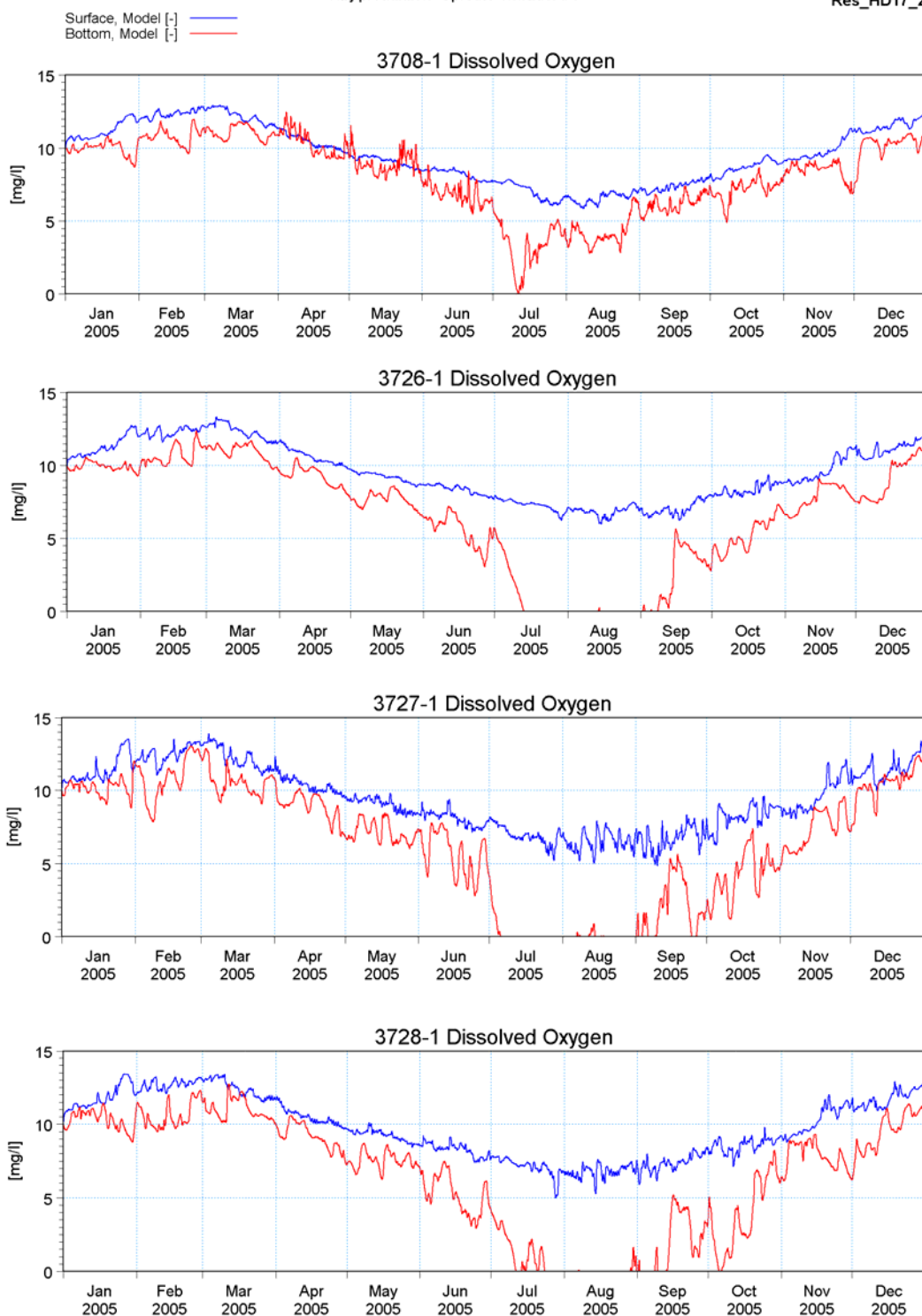
Ingen iltproduktion

Res_HD17_2R01



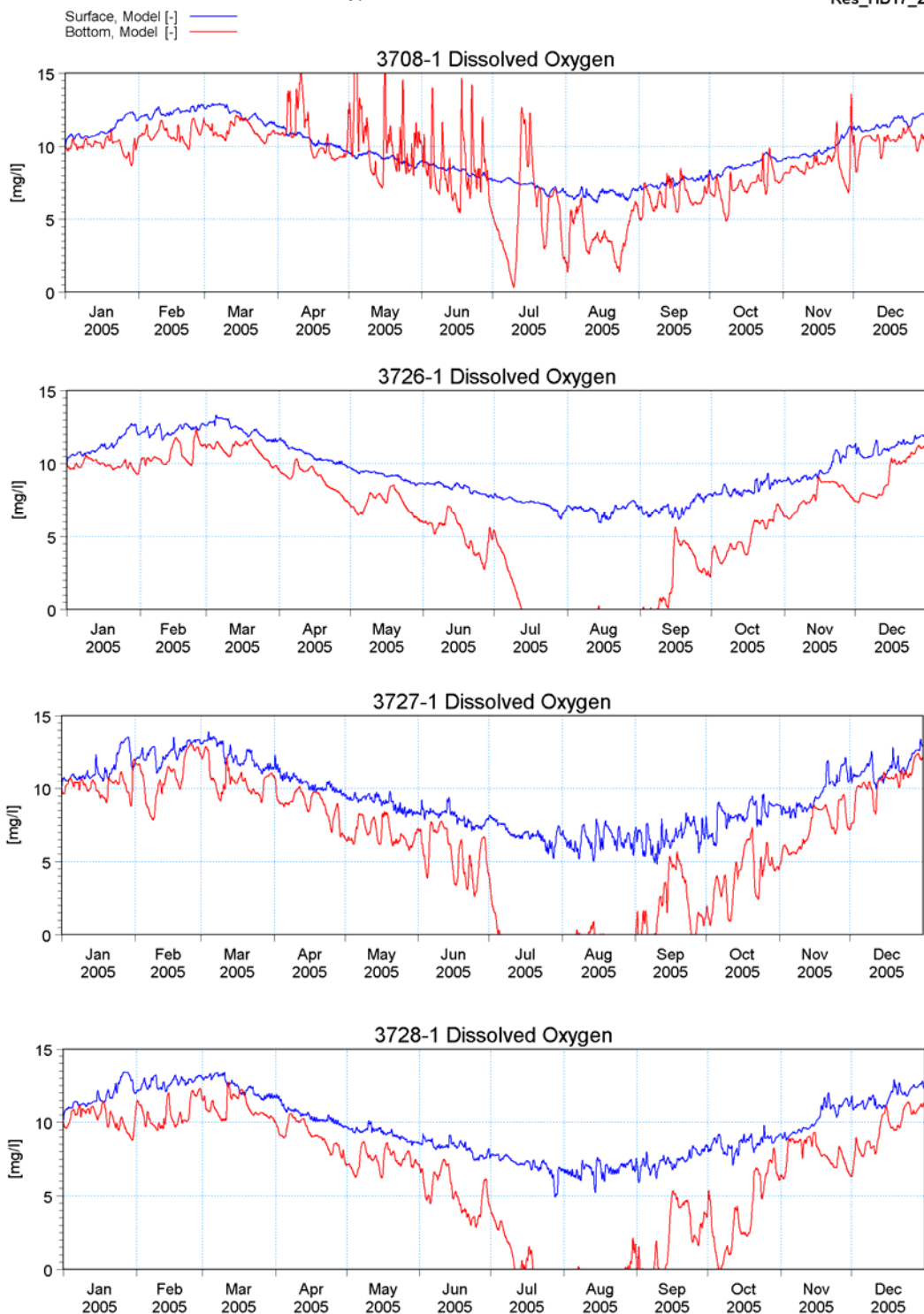
Høj produktion Spredte områder #1

Res_HD17_2R02



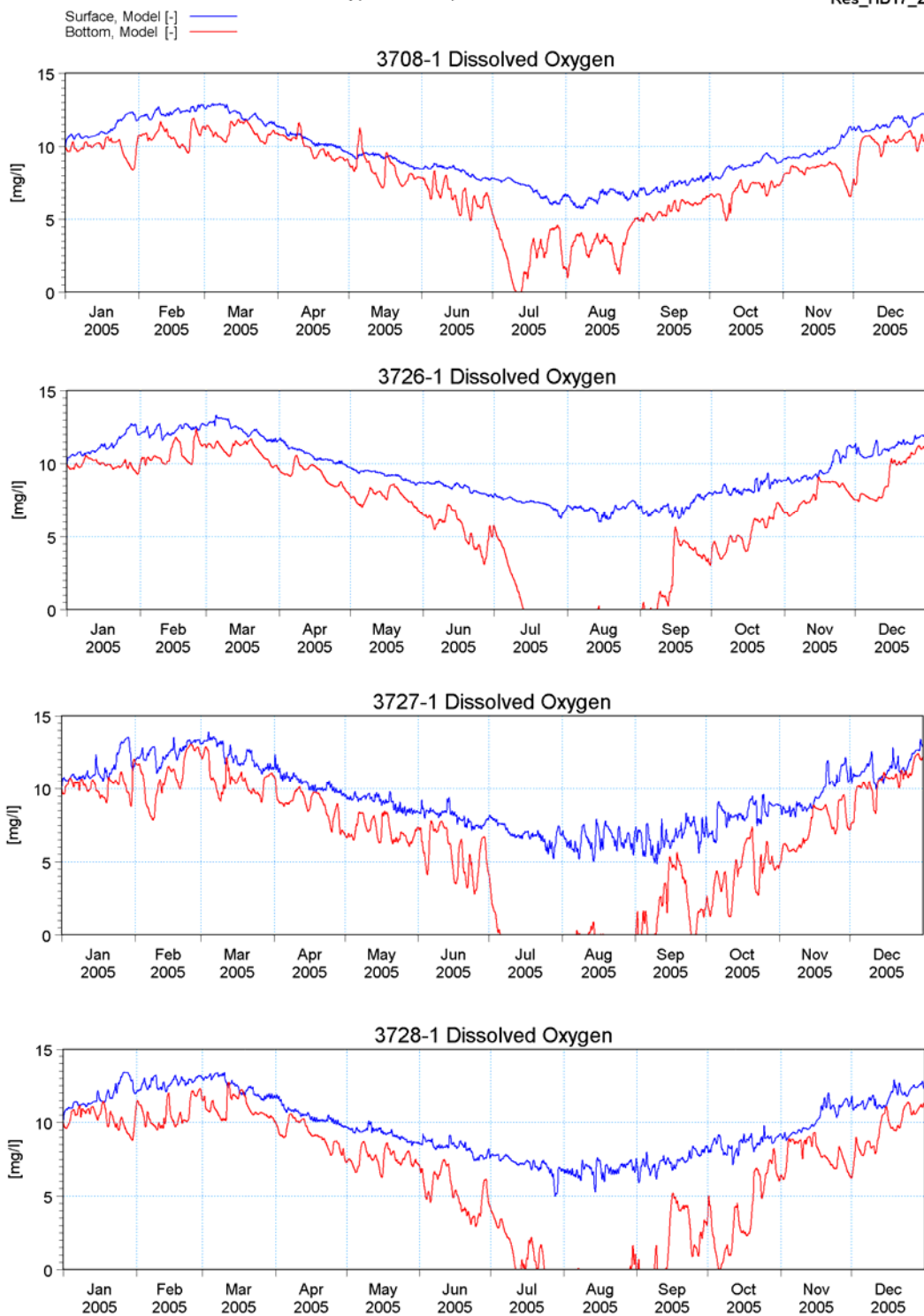
Høj produktion Samlet område #1

Res_HD17_2R03



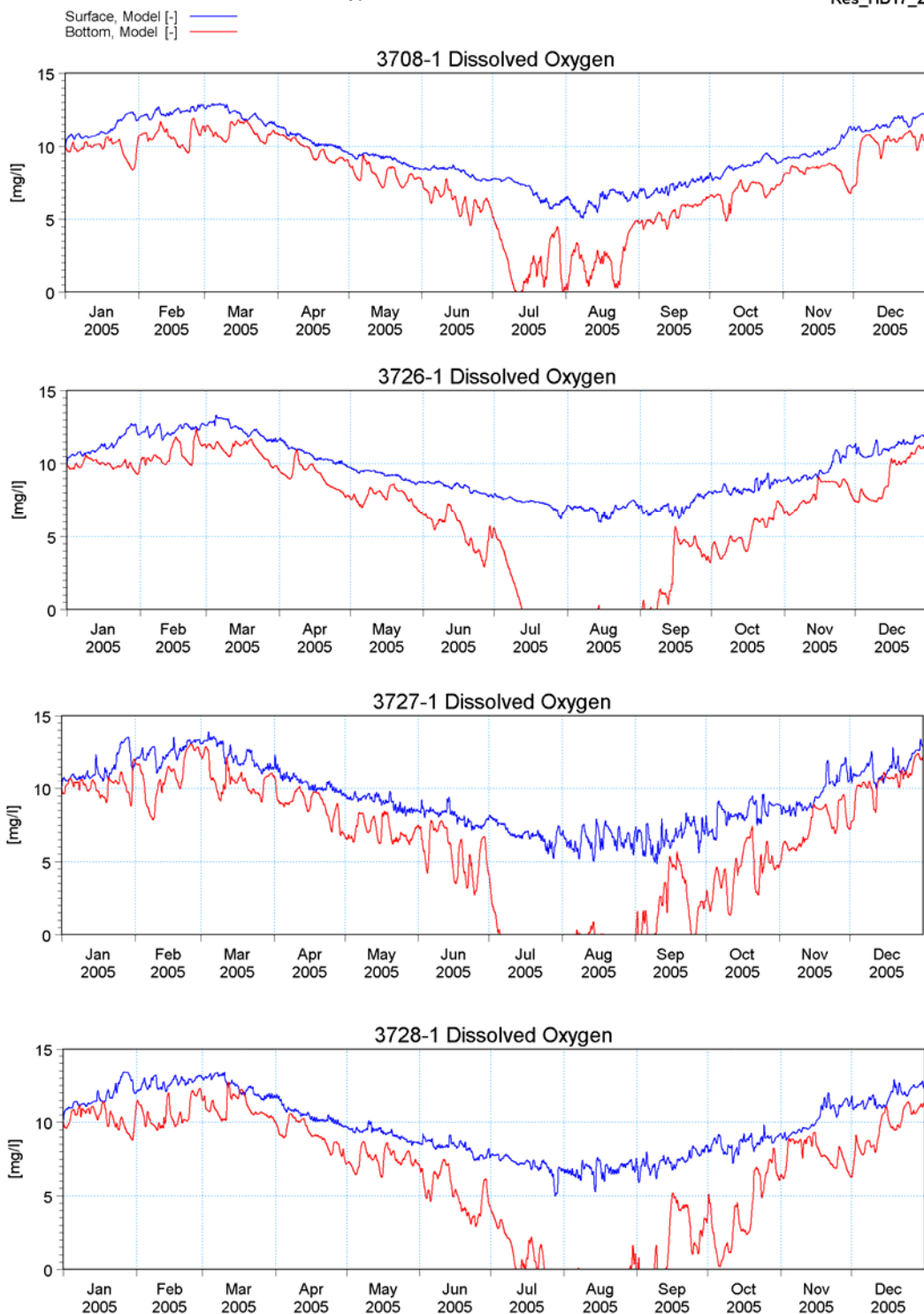
Høj produktion Spredte områder #2

Res_HD17_2R04



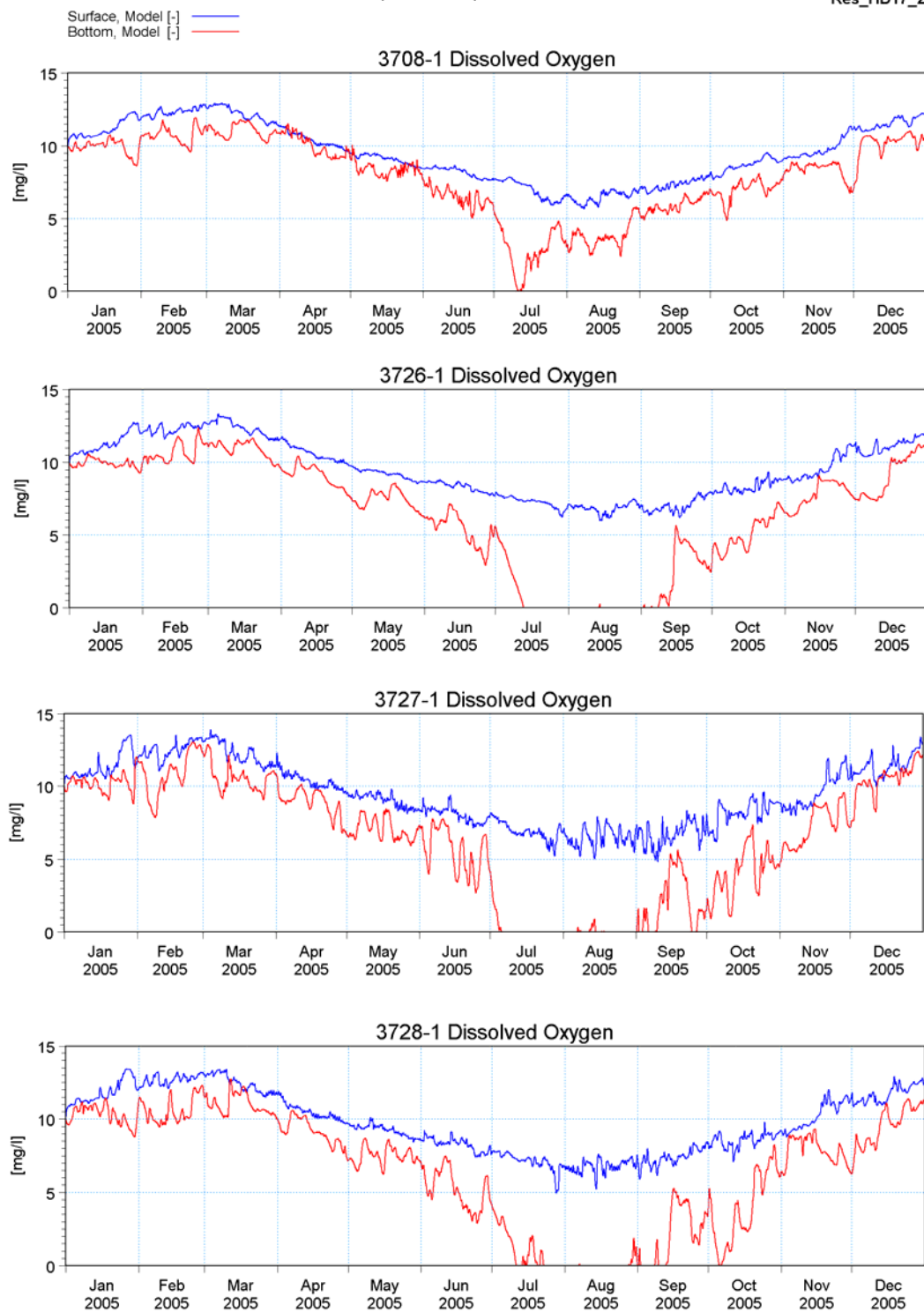
Høj produktion Samlet område #2

Res_HD17_2R05



Middel produktion Spredte områder #1

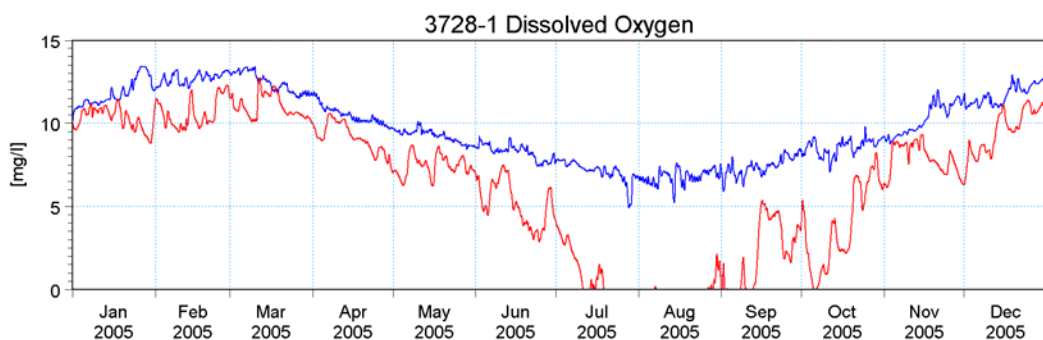
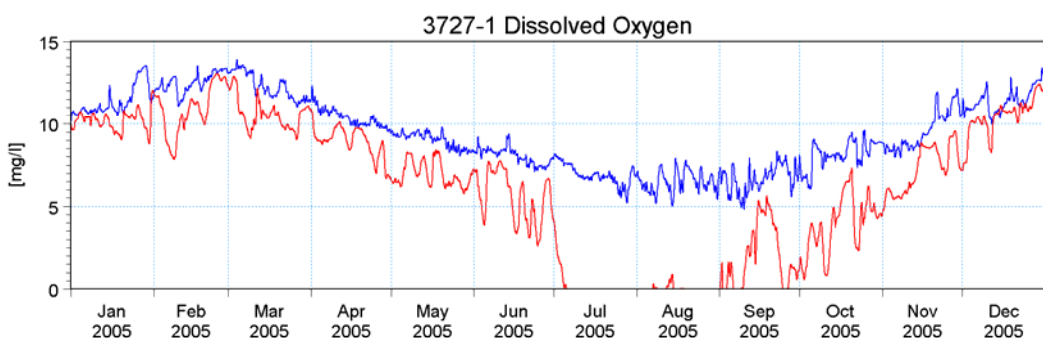
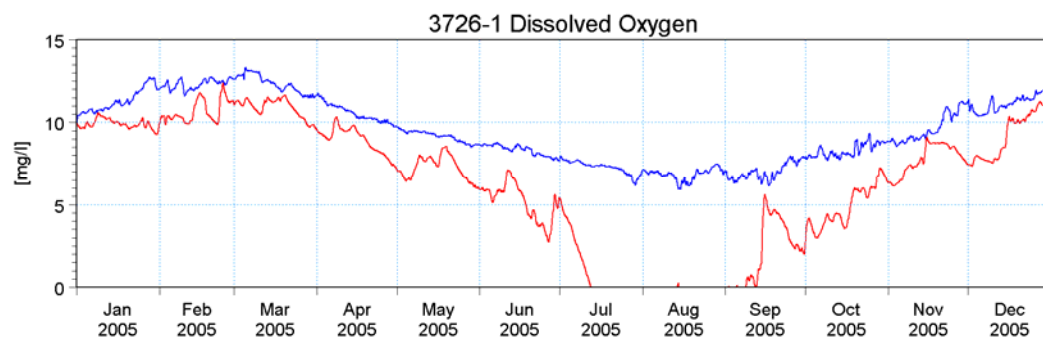
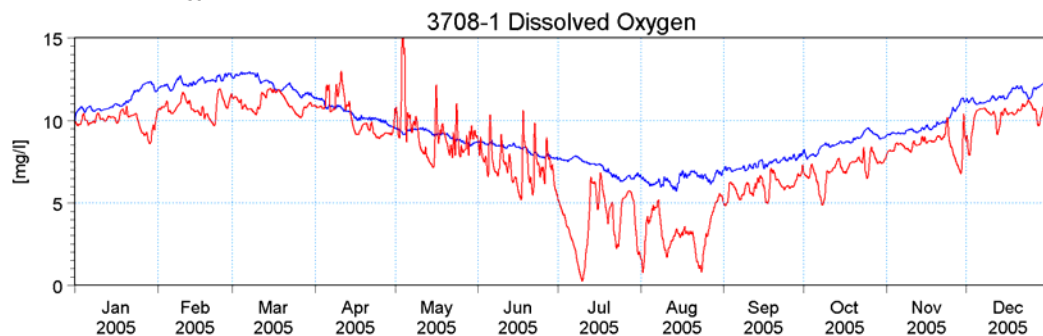
Res_HD17_2R06



Middel produktion Samlet område #1

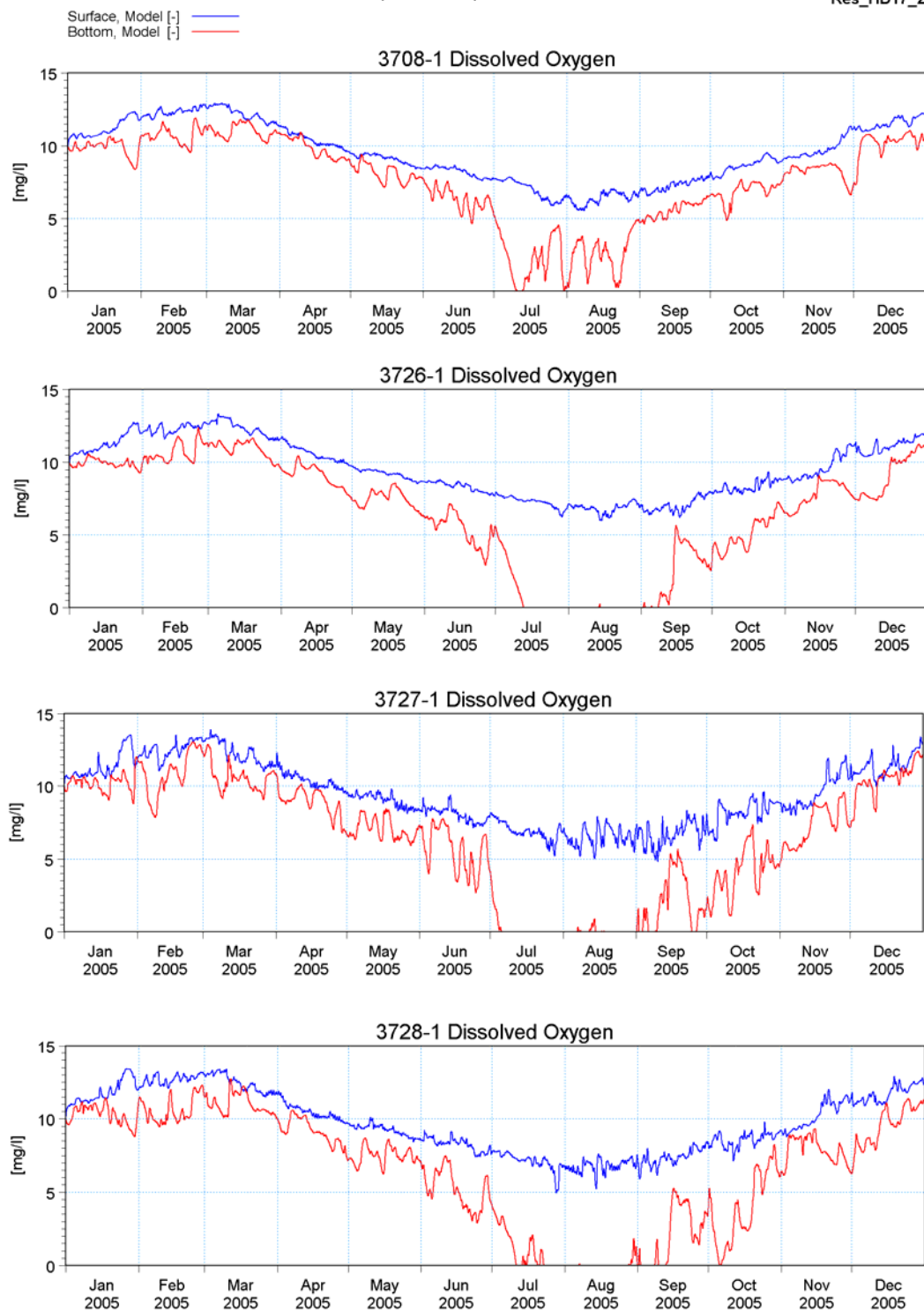
Res_HD17_2R07

Surface, Model [-] —
Bottom, Model [-] —



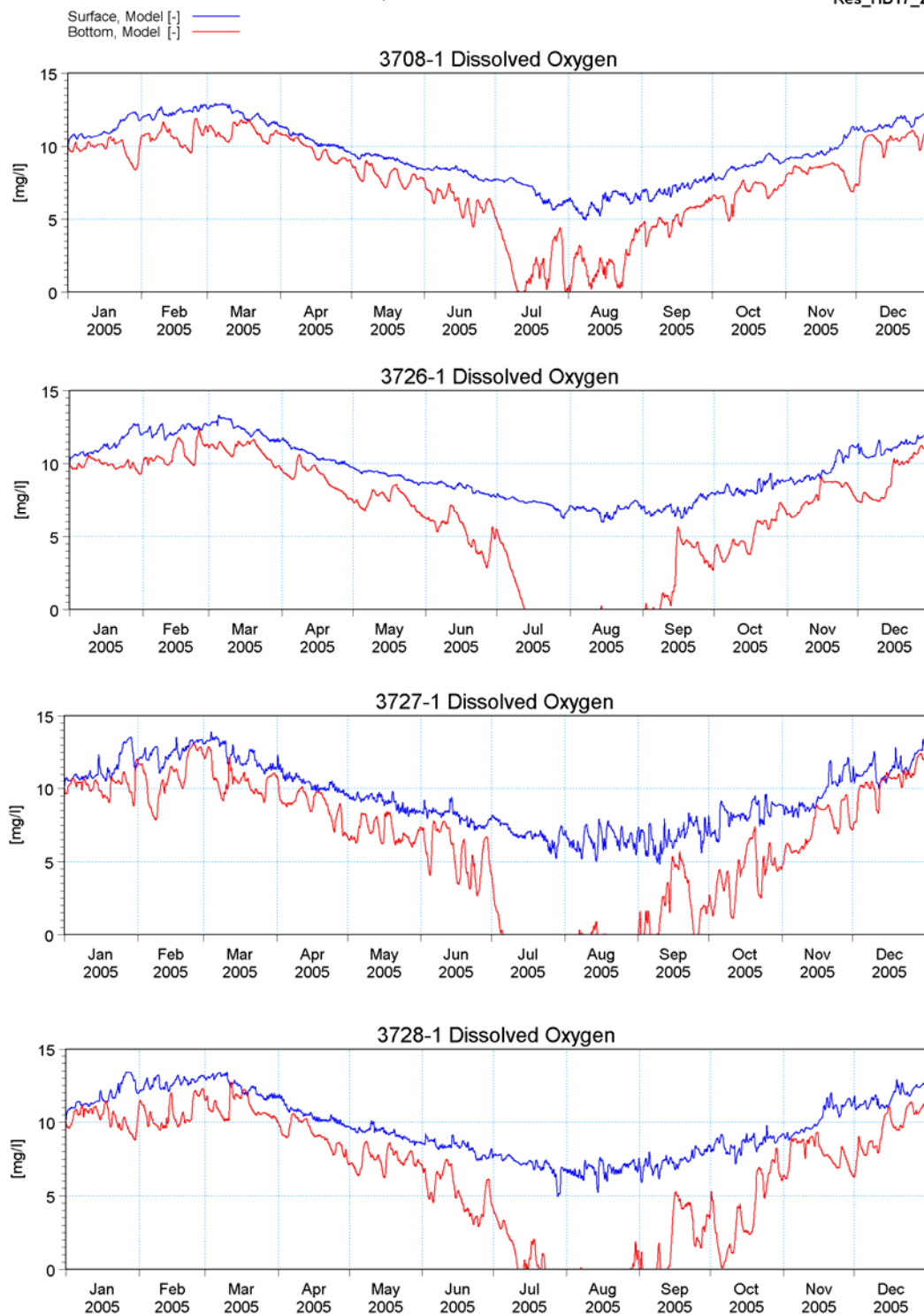
Middel produktion Spredte områder #2

Res_HD17_2R08



Middel produktion Samlet område #2

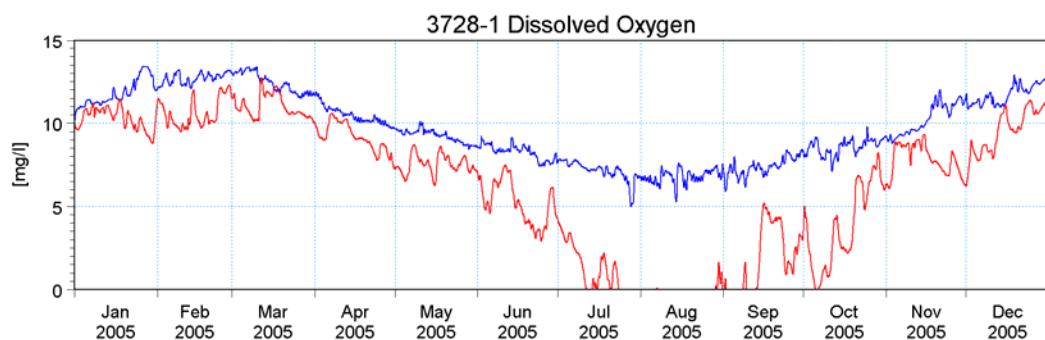
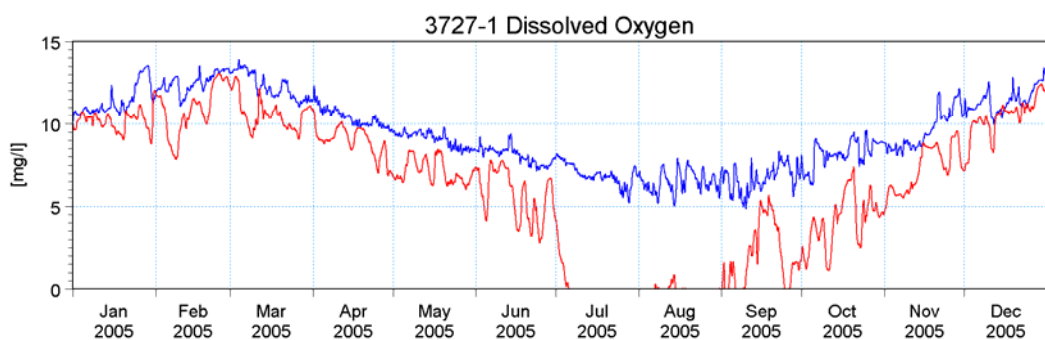
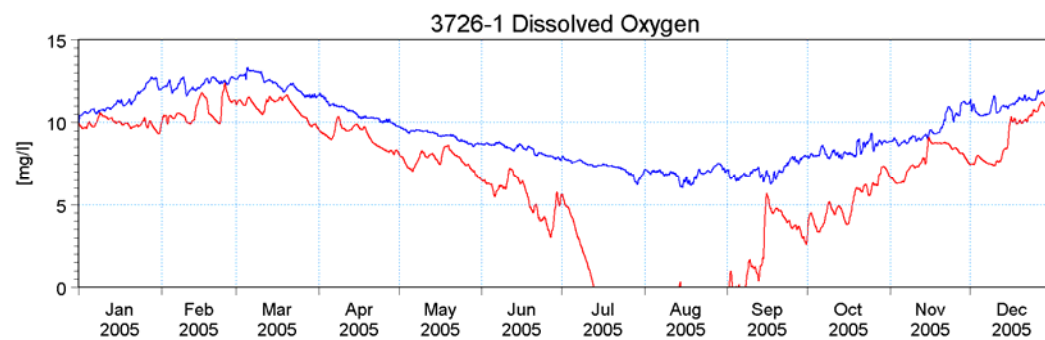
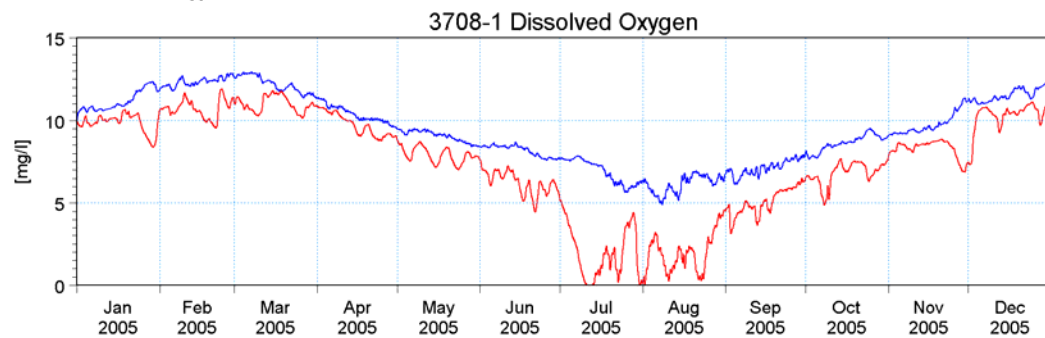
Res_HD17_2R09



Middel produktion Spredte områder #3

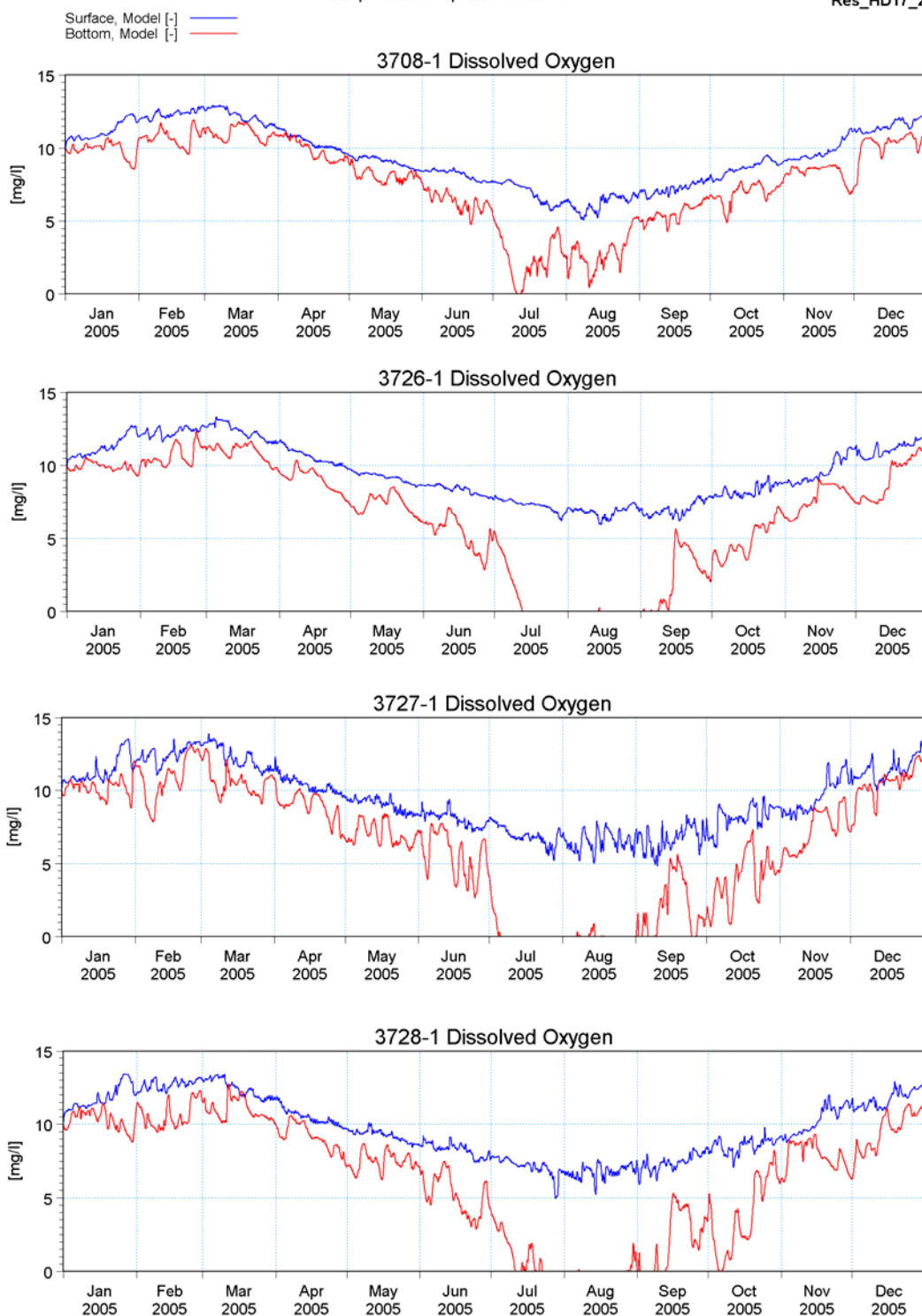
Res_HD17_2R10

Surface, Model [-] —
Bottom, Model [-] —



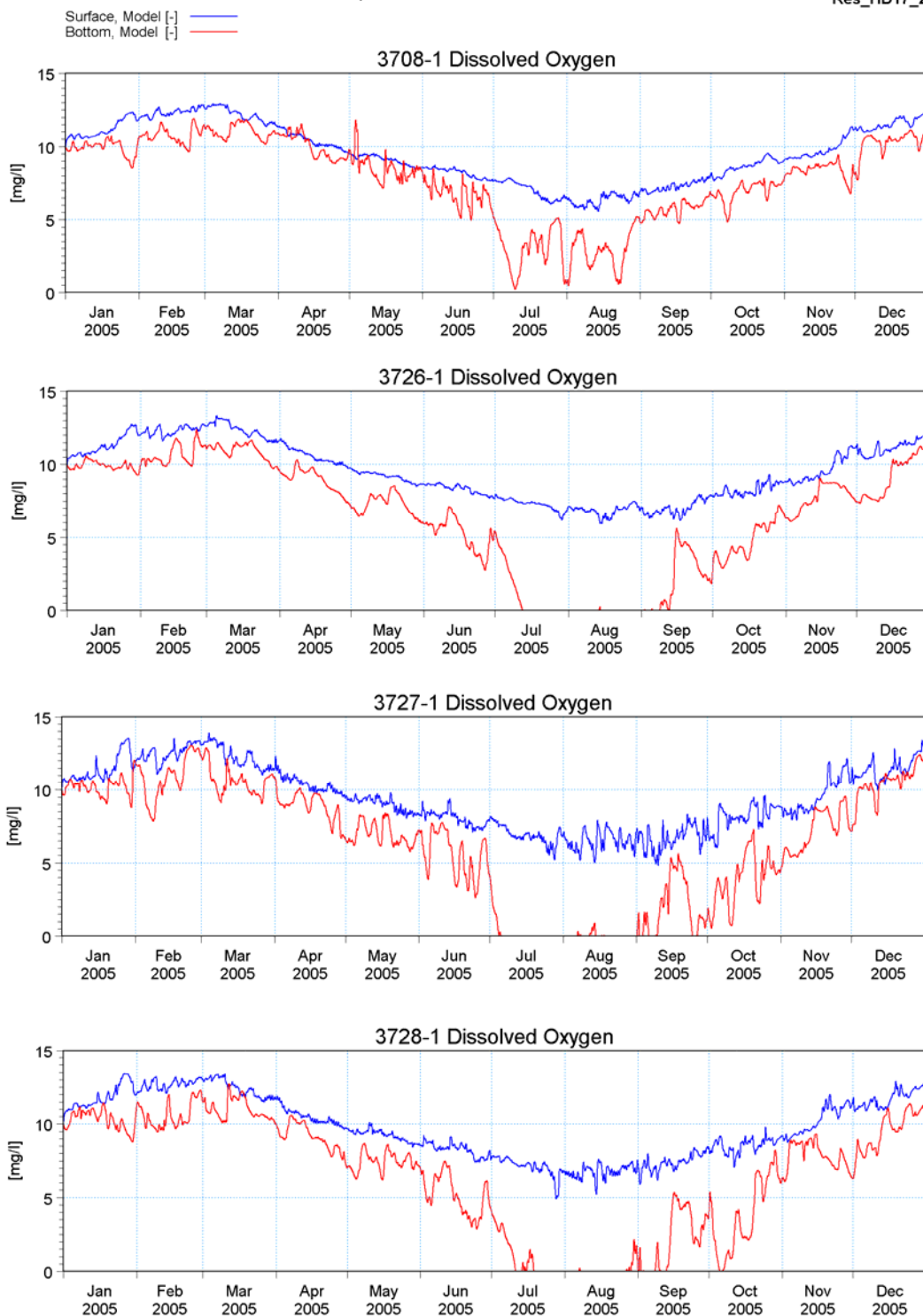
Lav produktion Spredte områder #1

Res_HD17_2R11



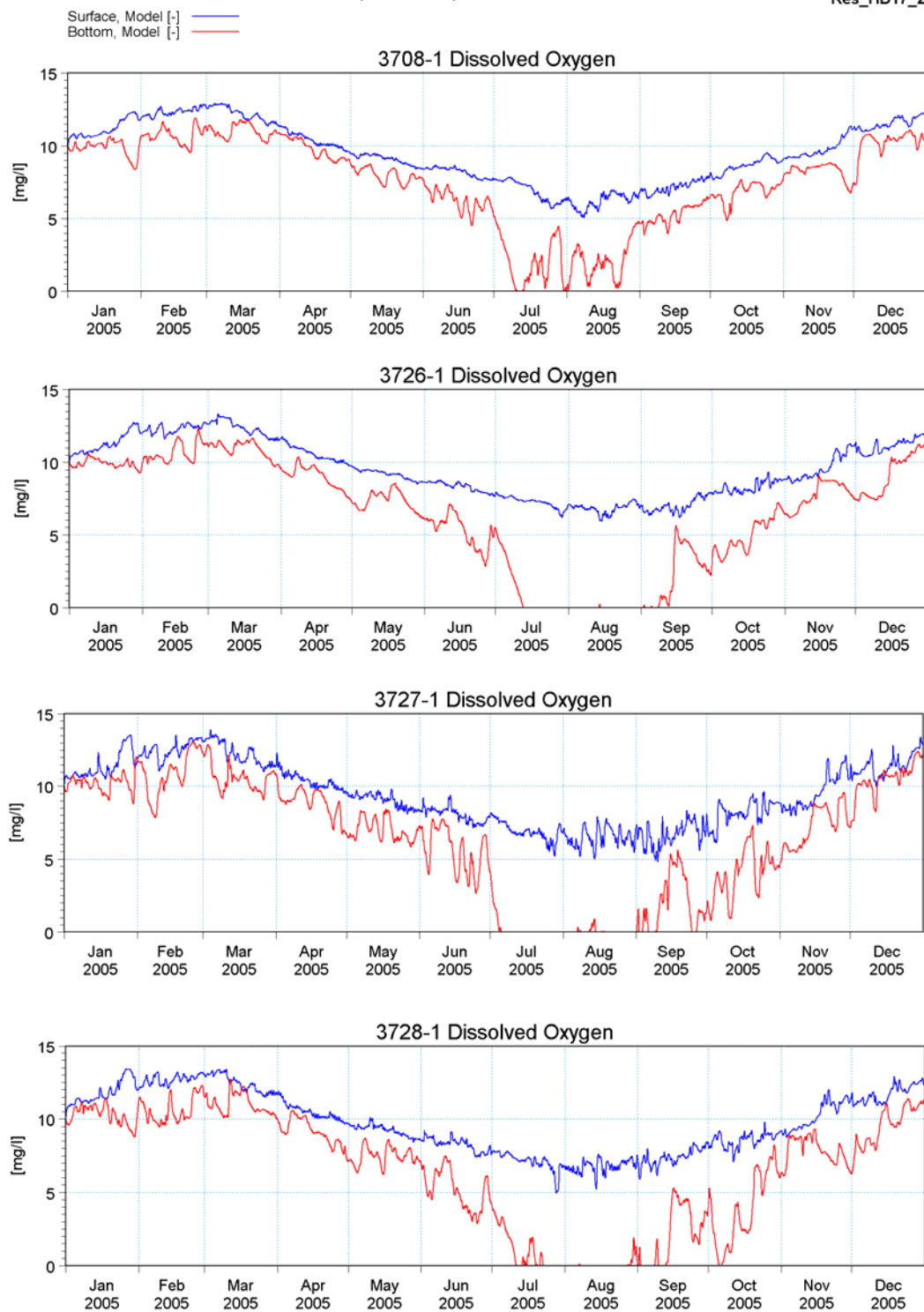
Lav produktion Samlet område #1

Res_HD17_2R12



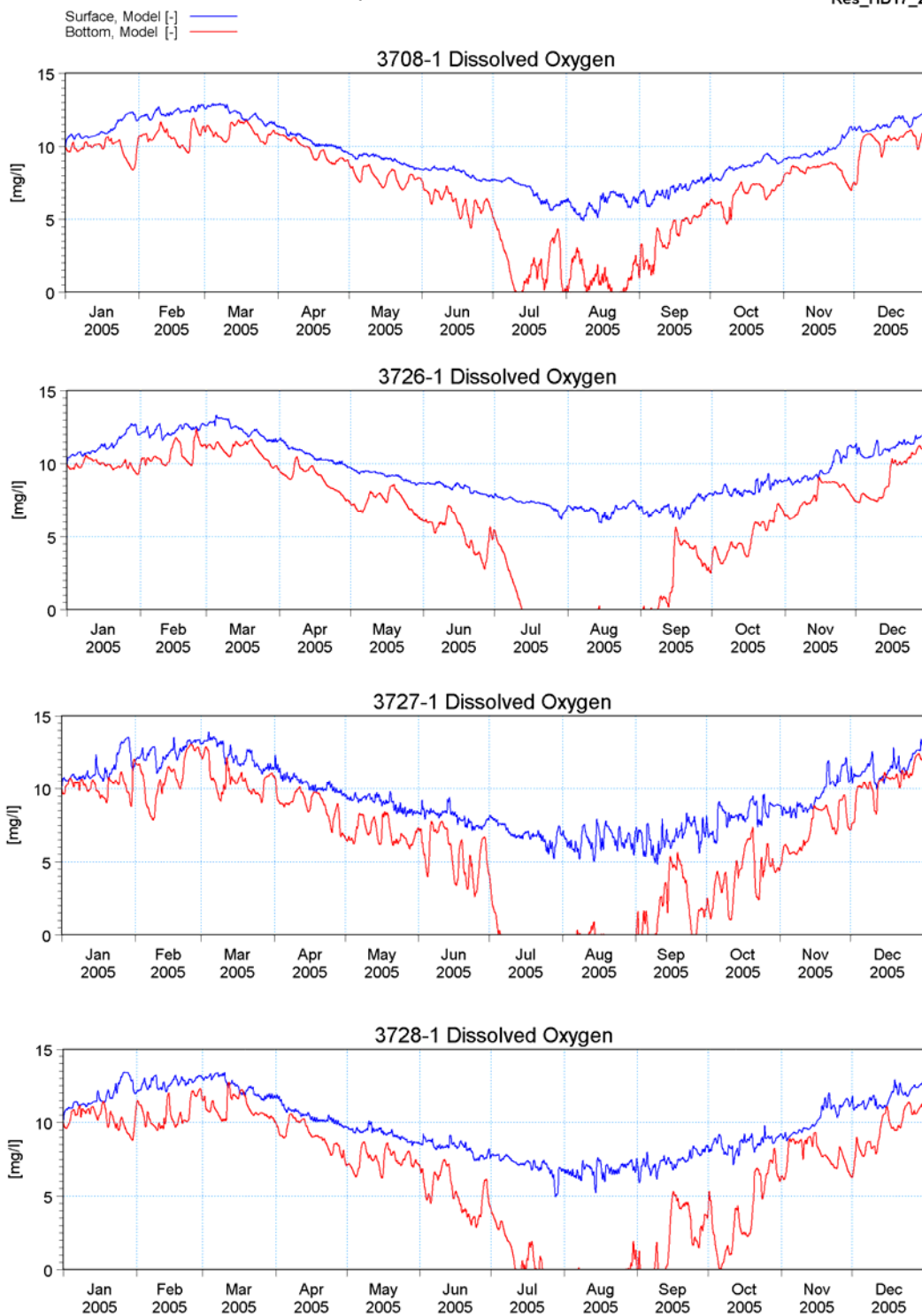
Lav produktion Spredte områder #2

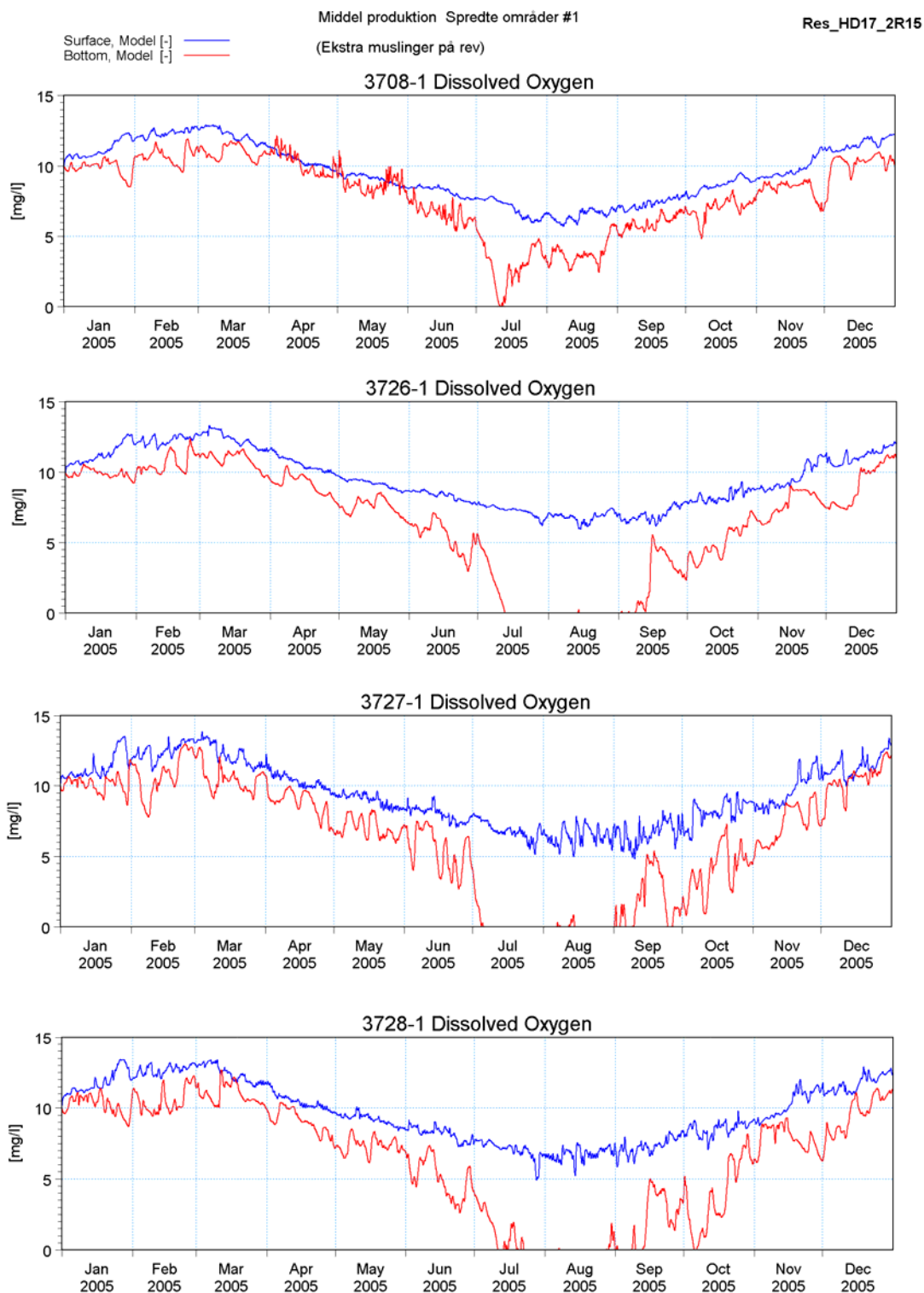
Res_HD17_2R13

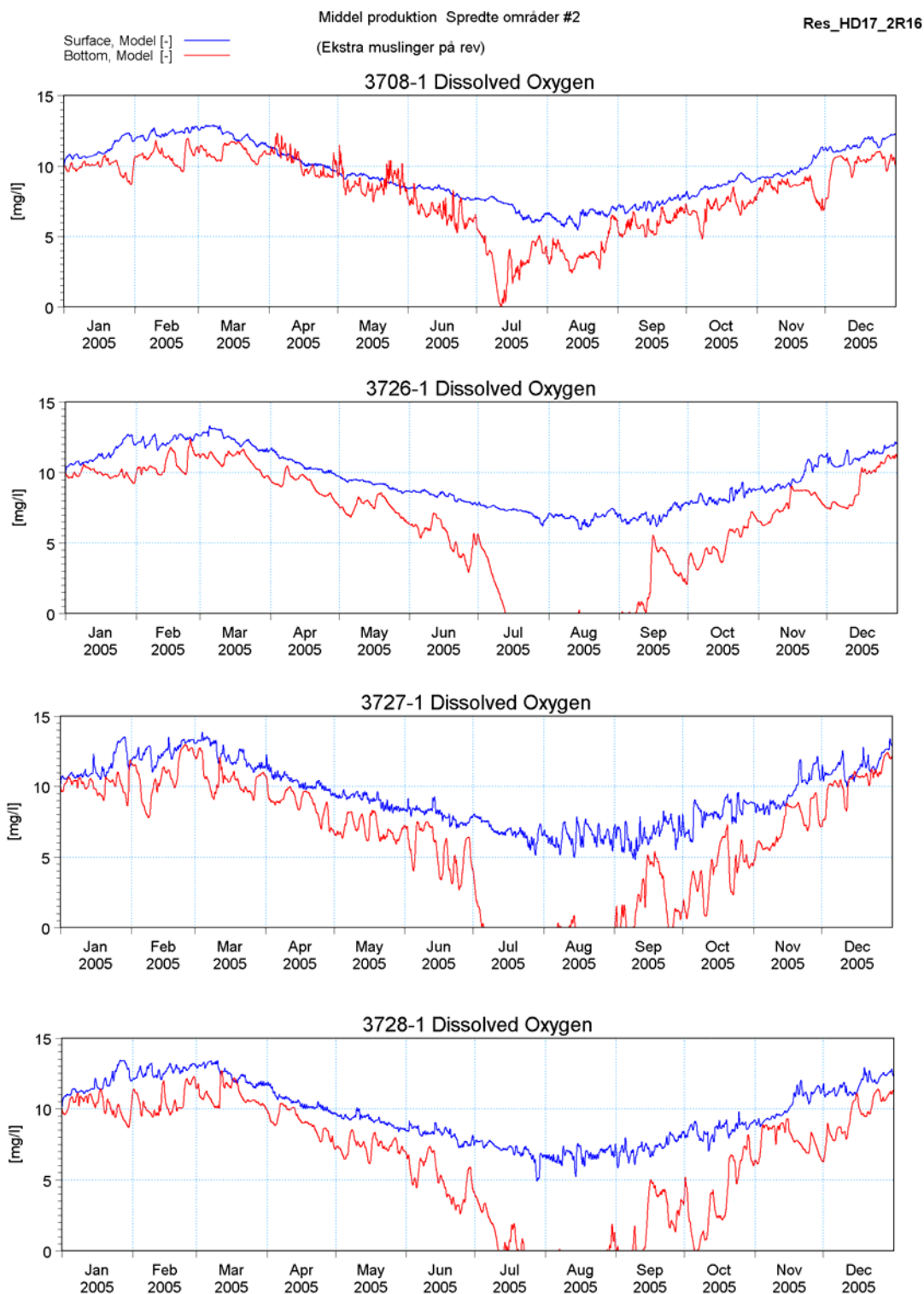


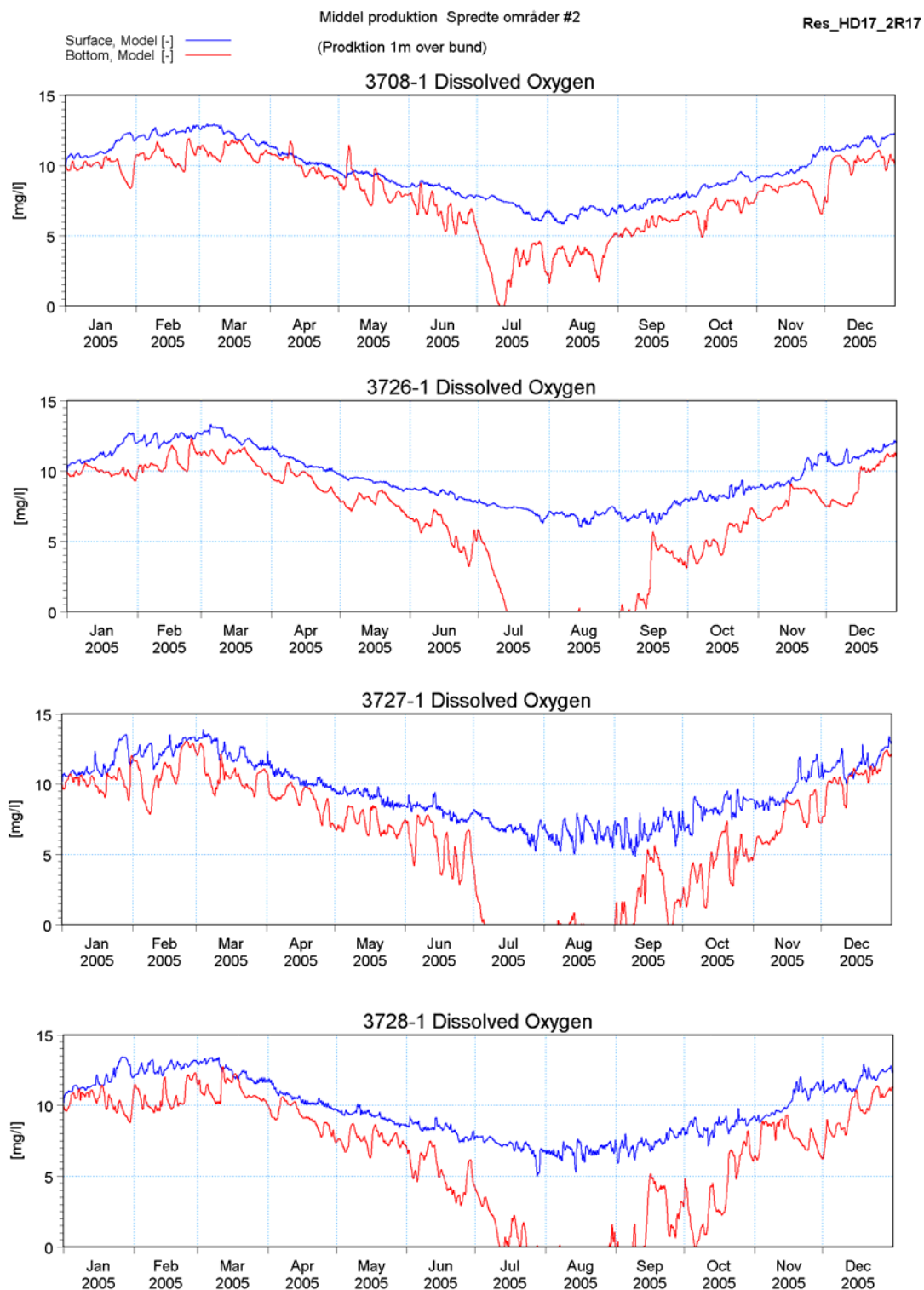
Lav produktion Samlet område #2

Res_HD17_2R14



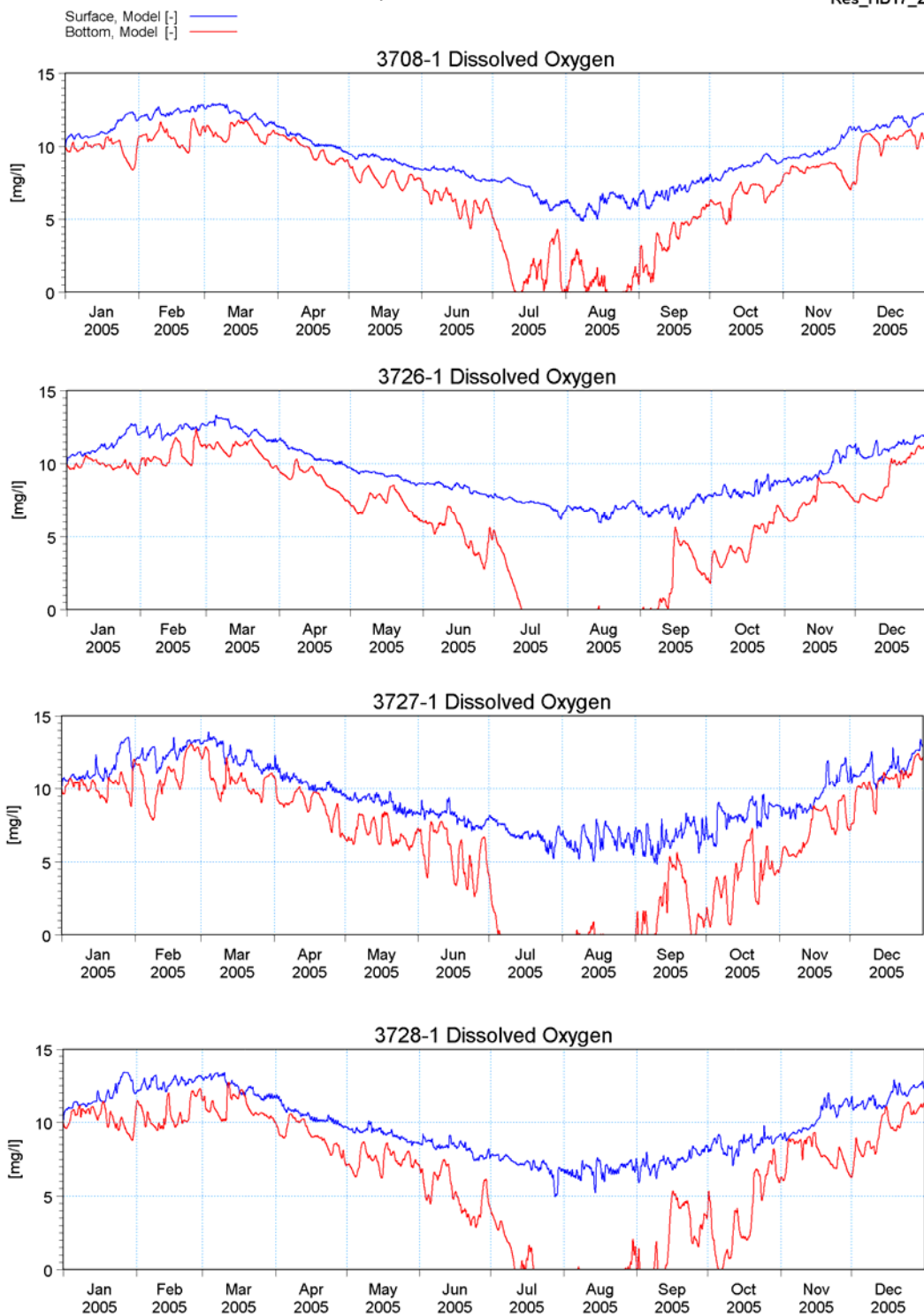






Middel produktion Enkelt cell

Res_HD17_2R18





(tom side)

B I L A G D

Oversigt over iltsvind i de centrale og sydlige dele af Limfjorden, 1997-2007

Samtlige refererede iltsvindsrapporter i perioden 1997-2007 er tilgængelige fra DMU's hjemmeside via <http://www.dmu.dk/Vand/Iltsvind/>. Iltsvindsrapporterne fra 1995 og 1996 forefindes tilsyneladende ikke i elektroniske udgaver.

År	Løgstør Bred.	Risgaarde Bred.	Lovns Bred.	Skive Fjord	Reference
2007					
• November	-	-	+	-	DMU
• Oktober	+/-	+	+	+	DMU
• September	-	-	+	-	DMU
• Juli/august	-	+	+	+	DMU
2006					
• November	-	-	-	-	DMU
• Oktober	+/-	+	+	+	DMU
• September	+/-	+	+	+	DMU
• Juli/august	+	+	+	+	DMU
2005					
• November	-	-	-	-	DMU
• Oktober	-	-	+	+	DMU
• September	-	+	+	+	DMU
• Juli/august	+	+	+	+	DMU
2004					
• November	-	-	-	-	DMU
• Oktober	-	-	+	-	DMU
• September	+	+	+	+	DMU
• Juli/August	+/-	+	+	+	DMU
2003					
• Oktober	+/-	+/-	-	+	DMU
• September	+	+	+	+	DMU
• August	+	+	+	+	DMU
2002					
• November	-	-	+	-	DMU
• Oktober	-	-	-	-	DMU
• September	+/-	+	+	+	DMU
• August	+	+	+	+	DMU
2001					
• Oktober	-	-	+	-	DMU
• September	+/-	+	+	+	DMU
• August	+/-	+	+	+	DMU
2000					
• Oktober	-	+	+	+	DMU
• September	-	+	+	-	DMU
• August	-	+	+	+	DMU
1999					
• Oktober	-	-	+	+	MST
• September	+/-	+	+	+	MST
• August	+	+	+	+	MST
1998					
• Oktober	-	-	+	+	MST
• September	-	+	+	+	MST
• August	+/-	+	+	+	MST
1997					
• Oktober	-	-	-	+	MST
• September	-	+	+	+	MST
• August	+	+	+	+	MST