

MILJØEFFEKTIVURDERING FOR HAVMILJØET DEL 2

3D PROCESBASERET MODELLERING AF
MILJØTILSTANDEN I DE ÅBNE INDRE
FARVANDE

OKTOBER 2003



Journal nr.: 2002-1434-001

ISBN.: 87-7992-014-4

Udarbejdet af : Ian Sehested Hansen, Thomas Uhrenholdt og Karl Iver Dahl-Madsen, DHI – Institut for Vand og Miljø

Projektmedarbejdere IMV: Anja Skjoldborg Hansen (projektansvarlig) og Dorte Vigsø

Udgivet: Oktober 2003

Version: 1.0

Bedes citeret som: Hansen, Ian Sehested, Uhrenholdt, Thomas & Dahl-Madsen, Karl Iver 2003. Miljøeffektvurdering for Havmiljøet Del 2: 3D procesbaseret modellering af miljøtilstanden i de åbne indre farvande. Rapport fra Institut for Miljøvurdering

©2003, Institut for Miljøvurdering

Henvendelse angående rapporten kan ske til:

Institut for Miljøvurdering

Linnésgade 18

1361 København K

Tlf.: 7226 5800

Fax: 7226 5839

e-mail: imv@imv.dk

www.imv.dk

Agern Allé 5
2970 Hørsholm

Tlf: 4516 9200
Fax: 4516 9292
Initialer: ish/msl
E-mail: dhi@dhi.dk
Web: www.dhi.dk

Miljøeffektvurdering for Havmiljøet

Del 2: 3D procesbaseret modellering af miljøtilstanden i de åbne indre farvande

Oktober 2003

Klient		Klientens repræsentant			
Institut for Miljøvurdering		Anja Skjoldborg Hansen			
Projekt		Projekt nr.			
Effektvurdering af VMPIII		52292			
Forfattere Ian Sehested Hansen Thomas Uhrenholdt		Dato Oktober 2003			
		Godkendt af Karl Iver Dahl-Madsen			
1	Endelig rapport	<i>ISH</i>	KDM	KDM	14. OKT 2003/MSL
o	Udkast til rapport	ISH	KDM	KDM	26. AUG 2003/MSL
Revision	Beskrivelse	Udført	Kontrolleret	Godkendt	Dato
Nøgleord Water Action Plan Scenario Modelling MIKE3 eutrophication Baltic Sea and North Sea		Klassifikation <input checked="" type="checkbox"/> Åben <input type="checkbox"/> Intern <input type="checkbox"/> Tilhører klienten			
Distribution Institut for Miljøvurdering: DHI:				Antal kopier	
ISH, THU, KDM, Bibl.				- 4	

SAMMENDRAG	3
1 INDLEDNING	5
2 RESUMÉ OG KONKLUSION	7
3 METODE	11
3.1 MIKE 3 MODELLEN	11
3.2 DATA	16
3.3 BIOTILGÆNGELIGHED AF KVÆLSTOF	20
3.4 KALIBRERING	21
3.5 VALIDERING	22
3.6 SCENARIER	22
3.6.1 NATURRÅDSSCENARIET	23
3.6.2 DANMARK I 80ERNE	23
3.6.3 NATURBELASTNING+50%	23
3.6.4 HELCOM/OSPAR SCENARIET	24
3.6.5 INTENSIVERET POLSK LANDBRUG	24
3.7 OPERATIONELLE EFFEKTMÅL	26
4 RESULTATER FRA KALIBRERING OG VALIDERING	27
4.1 KALIBRERINGSPERIODEN	27
4.1.1 SAMMENLIGNING MED MÅLINGER	27
4.1.2 MASSEBALANCER FOR OMRÅDET	29
4.1.3 OPERATIONELLE EFFEKTMÅL	31
4.2 VALIDERINGSPERIODEN	31
4.2.1 SAMMENLIGNING MED MÅLINGER	31
4.2.2 OPERATIONELLE EFFEKTMÅL 2002	33
4.3 DISKUSSION	35
5 SCENARIERESULTATER	37
5.1 RESULTATER	37
5.2 KOMMENTERING AF SCENARIERNE	38
5.2.1 NATURRÅD	38
5.2.2 DANMARK I 80ERNE	40
5.2.3 NATURBELASTNING+50%	40
5.2.4 HELCOM/OSPAR	41
5.2.5 INTENSIVERET POLSK LANDBRUG	41
5.3 GENERALISERING AF SCENARIERNE	42
5.4 DISKUSSION	46
REFERENCELISTE	49
BILAG	
BILAG A RESULTATER FRA KALIBRERINGEN ÅR 2000	
BILAG B RESULTATER FRA VALIDERINGEN ÅR 2002	
BILAG C RESULTATER FRA SCENARIERNE	

S A M M E N D R A G

Der er gennemført 3D dynamisk modelberegninger af næringssaltbelastningens betydning for de eutrofieringsmæssige forhold, med fokus på de indre farvande (området fra Darss/Drogden tærsklerne mod Østersøen til det nordligste Kattegat). Der er specifikt analyseret 2 danske belastningsscenarier og 3 regionale scenarier.

Det er fundet, at effekten af Vandmiljøplanens virkemidler frem til år 2000, svarende til en reduceret dansk kvælstofbelastning på 32% og en 76% fosforreduktion, har givet lokale effekter i de indre farvande, koncentreret i det vestlige Kattegat, hvor de største kilder udmunder (Limfjorden og Gudenåen). Der er dog tale om mindre forbedringer, uden væsentlig konsekvens for iltsvindsforholdene.

Naturrådets forslag om 75% reduktion i landbrugets belastning i forhold til 1980erne vil hjælpe yderligere, men væsentlige forbedringer i iltforholdene ses først i modelanalyserne ved en kombination af nationale og internationale belastningsreduktioner i hele Østersø/Nordsø området.

For scenariet *Naturbelastning+50%*, svarende til en skønnet natursituation med et tillæg på ekstra 50% belastning, viser modellen, at iltsvindsproblemet vil være marginalt.

Et scenario for en stigning i polsk belastning som følge af intensiveret polsk landbrug viser, at polske belastninger kan få stor betydning for forholdene i de indre danske farvande.

1 I N D L E D N I N G

Nærværende undersøgelse er gennemført i henhold til aftale mellem Institut for Miljøvurdering (IMV) og DHI Institut for Vand og Miljø af marts 2003.

DHI's analyse er ét af 2 bidrag til en effektvurdering af de eutrofieringsmæssige ændringer i de indre farvande ved ændringer i næringssaltbelastningen. DHI's analyse baserer sig på direkte 3D modellering af forholdene i de indre farvande og omkringliggende Østersø og Nordsø. Danmarks Miljøundersøgelser (DMU) har stået for den anden del af effektvurderingen, som er baseret på statistiske analyser af historiske data.

Arbejdet med de 2 bidrag har forløbet parallelt i perioden marts-august 2003. Arbejdet har været fulgt af en koordinationsgruppe med følgende deltagere:

- Anja Skjoldborg Hansen, IMV (koordinator)
- Dorte Vigsø, IMV
- Stiig Markager, DMU, Afdeling for Marin Økologi
- Lars Storm, DMU, Afdeling for Marin Økologi
- Ian Sehested Hansen, DHI - Institut for Vand og Miljø
- Karl Iver Dahl Madsen, DHI - Institut for Vand og Miljø
- Thomas Uhrenholdt, DHI – Institut for Vand og Miljø
- Anni Kær Pedersen, Fødevareministeriet (observatør)

Koordinationsgruppen har løbende holdt møder i projektperioden, hvor også de aktuelle scenarier i analyserne er fastlagt.

Nærværende rapport over DHI's analyser er alene DHI's ansvar mht. resultaterne af de foretagne scenarieberegninger.

Fra DHI har deltager følgende:

- Karl Iver Dahl Madsen: projektilsynsførende
- Ian Sehested Hansen: projektleder
- Thomas Uhrenholdt: modellør

Andre fra DHI har deltaget med mindre input, herunder Erik Koch Rasmussen og Flemming Møhlenberg.

2 RESUMÉ OG KONKLUSION

Der er etableret en 3D dynamisk simuleringsmodel for de indre farvande (området fra Darss og Drogden tærsklerne mod Østersøen til det nordlige Kattegat), Østersøen og Skagerrak/Nordsøen. Modellen er procesbaseret (deterministisk) og omfatter de hydrodynamiske forhold, som strøm, vandstand, temperatur og saltholdighed, og de eutrofieringsmæssige forhold, som næringssalt-, plankton-, detritus- (dødt organisk materiale) og iltforhold.

Modellen er baseret på en tidligere opsætning af DHI's 3D modelleringssystem MIKE3. Som led i nærværende undersøgelse er der imidlertid sket en række forbedringer i modelopsætningen, for at gøre modellen så egnet som muligt til at beskrive sammenhængen mellem næringssaltbelastning og eutrofieringsforholdene.

Den udvidede model er blevet grovkalibreret baseret på forholdene i året 2000, men der er ikke gennemført en fuld ny-kalibrering af alle processer mv. Efterfølgende er der foretaget et check (validering) af modellen for forholdene i 2002, hvor iltsvindet var det mest omfattende blandt dokumenterede iltsvindsår. Valideringen er gennemført med den grovkalibrerede modelopsætning, men med aktuelle drivdata fra året 2002, herunder meteorologiske forhold og afstrømningen fra Danmark.

Kalibreringen fra 2000 og checket fra 2002 har dokumenteret, at modellen kan reproducere i rimelig grad såvel de hydrodynamiske forhold, specielt vandskiftet og de vertikale blandingsforhold i vandsøjlen, som de eutrofieringsmæssige forhold, herunder den kritiske iltstærkning i sensommeren.

En af de efterfølgende scenarieanalyser omfatter en 50% forøget belastning i forhold til natursituationen uden menneskelig indgriben. Dette scenario kan betragtes som et yderligere check for, at modellen er tilstrækkelig følsom over for næringssaltbelastningens størrelse, da det svarer til 73% og 61% reduktion i henholdsvis kvælstof- og fosforbelastningen til det samlede modelområde Østersøen/Nordsøen. Scenariets resultater viser meget væsentlige forbedringer i eutrofieringsforholdene, i overensstemmelse med forventningerne for en sådan situation tæt på naturbelastningen.

Modellen er derfor fundet egnet til at gennemføre de ønskede scenarier for ændrede belastningsforhold.

De analyserede scenarier omfatter:

- *Naturrådsscenariet*, med yderligere reduktion i den danske kvælstofbelastning fra landbruget
- *Danmark i 80'erne*, med dansk belastning som før vandmiljøplanens tiltag
- *Naturbelastning+50%*, svarende til en skønnet natursituation med et tillæg på extra 50% belastning
- *HELCOM/OSPAR-scenariet*, med opfyldelse af internationale aftaler om reduktion af belastningen til 50% af niveauet i 1989
- *Intensiveret polsk landbrug*, baseret på en antagelse om intensiveret polsk landbrug, svarende til samme arealspecifikke belastning som fra dansk land

Der er fokuseret på følgende operationelle effektmål for scenarierne:

- koncentrationen af klorofyl: middelværdien for de øverste 10 m for perioden marts-oktober
- sigtdybden: middelværdien for perioden april-oktober
- primærproduktionen: årsproduktionen pr m² (g C/m²/år)
- litsvindsarealets størrelse: arealet af havbund udsat for en iltkoncentration mindre end 4 mg/l henholdsvis 2 mg/l.

Analysen viser, at de opnåede forbedringer i de indre farvande frem til år 2000 som følge af vandmiljøplanens tiltag er begrænsede (i størrelsesordenen 4-12% for de beregnede effektmål). *Naturrådsscenariet* vil give yderligere forbedringer af samme størrelsesorden. Dette viser, at væsentlige forbedringer i eutrofieringsforholdene i de indre farvande ikke kan opnås alene ved danske tiltag. For at opnå forbedringer i størrelsesordenen 50% reduktion af iltsvindsarealet kræver det yderligere kraftige reduktioner i de andre kilder til de indre farvande (svenske og tyske) samt indgriben over for belastningen i Østersøen og Nordsøen og atmosfærelastningen.

Samtidig viser scenariet med *intensiveret polsk landbrug*, at dette vil kunne medføre væsentlige forringelser i eutrofieringsforholdene i de indre farvande og i den danske del heraf.

Disse resultater er selvfølgelig behæftet med usikkerhed, men det er vurderet, at usikkerheden er begrænset, når der laves relative sammenligninger af ændringerne. Den relative usikkerhed af effekterne er vurderet at være i størrelsesordenen 20%, således at et scenario med en effekt på iltsvindsarealet på -40% er behæftet med en usikkerhed på $40\% * 20\% = 8\%$. Resultatet er således en relativ effekt på -40% ($\pm 8\%$).

Denne usikkerhed kan reduceres ved yderligere forbedringer og valideringer af modelsystemet, som beskrevet i DHI's oprindelige oplæg til relevante havmiljøundersøgelser i forbindelse med VMP processen (DHI 2003d).

Nærværende analyse stemmer rimeligt overens med tidligere analyser af belastningens betydning for eutrofieringsforholdene. Analysen giver imidlertid en nøjere geografisk og tidsmæssig beskrivelse af de forventede effekter, og er derfor et væsentligt skridt i retning af en mere dækkende beskrivelse af mulighederne for forbedringer ved begrænsning i belastningen. Samtidig er nærværende analyse nu baseret på en konsistent modellering af belastningseffekterne i hele området Østersøen/Nordsøen.

3 METODE

Nærværende analyse af næringssaltbelastningens betydning for eutrofieringsforholdene i specielt Kattegat og Bælthavet er baseret på simuleringer med en etableret 3 dimensional model, der dækker hele Østersø/Nordsø området. Modellen beskriver dels de hydrodynamiske forhold i området (variationerne i vandstand, strøm, salt og vandtemperatur), dels de eutrofieringsmæssige forhold (næringssalte, ilt, plankton mv.).

Modellen er som led i projektet blevet kalibreret mod foreliggende målinger, hvorved modellens evne til at reproducere historiske forhold er dokumenteret. Der er også sket et efterfølgende check (validering) af modellen på en uafhængig periode. Disse sammenligninger med målinger er grundlaget for vurderingen af modelusikkerheden, også i forhold til scenarieanalyser.

Modellen er efterfølgende blevet anvendt til at beregne effekten på vandkvaliteten i området af belastningen med næringssalte, idet der er ændret på belastningens størrelse i modellen og modellen derefter er kørt med de nye forhold.

3.1 MIKE 3 modellen

Den anvendte model er etableret i DHI's modelsystem MIKE 3. Dette modelsystem er et generelt 3D procesbaseret modelsystem (DHI 2003b og 2003c) for de hydrodynamiske og vandkvalitetsmæssige forhold i estuarielignende områder, som både er påvirket af tidevand og vind, men også af densitetsstrømninger og lagdelinger genereret af ferskvandstilledninger og luft/hav varmeudveksling.

De aktuelt anvendte moduler er det hydrodynamiske modul og eutrofieringsmodul.

Det hydrodynamiske model består grundlæggende af to dele, det hydrodynamiske modul (HD), der løser impuls- og kontinuitetsligningen med givne randbetingelser, samt transport modulet (AD) der løser ligningen for transport af salt og temperatur. Disse ligninger løses numerisk ved hjælp af finitte differenser på et rektangulært beregningsnet, der opløser modelområdet både horisontalt og vertikalt.

For at beskrive både de barotrope og barokline strømninger i området løses de hydrodynamiske ligninger og transportligningerne for salt og temperatur samtidigt. Det hydrodynamiske modul (HD) beskriver strømme og vandstande som en funkti-

on af salt- og temperaturforhold (densitetsgradienter), den meteorologiske påvirkning (vind og varmeudveksling), ferskvandskilder og andre tilløb, fordampning, forholdene langs de åbne rande til oceanet og tvungne cirkulationer. Strømfelterne benyttes dernæst til at beregne den tilhørende spredning og transport af salt og temperatur i området og hvorledes disse påvirkes af indstrømningen til modellen over de åbne rande samt fra interne kilder. Disse transportprocesser består af en kombination af en advektiv transport, bestemt af hastighedsfeltet i modellen, og en diffusiv transport, som er bestemt af dispersionen. Dispersionen afhænger af det 3-dimensionale hastighedsfelt og lagdelingen gennem en kobling til turbulensbeskrivelsen.

Eutrofieringsmodulet (EU) er dynamisk integreret med MIKE 3's advektiv/dispersionsmodel (AD), hvilket vil sige, at spredning/fortynding af opløste stoffer forårsaget af ikke-biologiske processer beregnes parallelt med de biologiske/kemiske processer. Ligeledes vil biologiske processer, der ændrer koncentrationen af et givent stof i vandfasen, automatisk indgå i transportberegningen.

Eutrofieringsmodulet er blevet udviklet over en periode på ca. 20 år. Modulet beskriver processer, der relaterer sig til fytoplankton, zooplankton, bundvegetation, næringssalte, dødt organisk stof (detritus) og iltkoncentration. Modellens drivende kraft er algevækstmodellen. Algevæksten er hovedsagelig reguleret af næringsstofftilførsel og lysindstråling. Sedimentation og græsning fra zooplankton (og eventuelt andre filtratorer) er dog også medregulerende.

Algevækstens afhængighed af næringsstoffer er beskrevet ved en tottrinsproces. Først optages næringssaltene fra vandet til en intern pulje i algecellerne. Herefter udnyttes næringsstofferne til produktion af organisk stof. Denne tottrinsproces gør det muligt at simulere de situationer, hvor algerne fortsætter med at vokse, selvom næringssaltene i vandet er opbrugt.

Ligeledes indgår der i makroalgernes vækstbeskrivelse en vægtning af intern næringssaltkoncentration, lokale lysforhold og vækstpotentiale i beregningen af den aktuelle vækst.

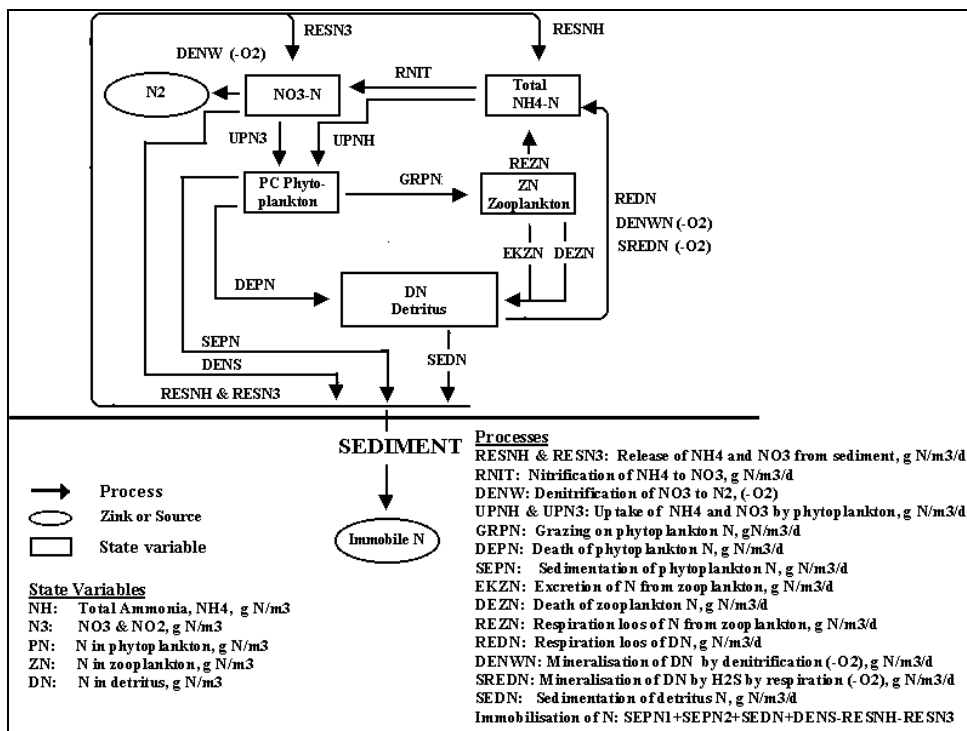
I EU modellen indgår der i alt 14 komponenter, hvoraf de 13 relaterer sig til vandfasen og føres rundt med strøm og diffusion:

PC	Phytoplankton kulstof
PN	Phytoplankton kvælstof
PP	Phytoplankton fosfor
CH	Chlorophyll-a
ZC	Zooplankton kulstof
DC	Detritus kulstof
DN	Detritus kvælstof
DP	Detritus fosfor
NO _x	Nitrat/nitrit kvælstof
NH ₄	Ammonium kvælstof
H ₂ S	Svovlbrinte
IP	Uorganisk fosfor
DO	Opløst ilt
BC	Bentisk kulstof (stationær på bunden)

Sedimentbeskrivelsen er eksplicit, dvs. der indgår ikke sedimentkomponenter i modellen. Tilbageholdelse eller frigivelse af næringsstoffer i sedimentet beregnes ved at holde regnskab med stoffluxer over vandsediment barrieren.

Modellen, som består af ca. 75 processer og 110 parametre, holder nøje regnskab med puljer i vandfase, alger, planter og omsætning af kulstof, kvælstof og fosfor i vandfase, alger, planter og sediment. Modellen er massebevarende og "flytter" dermed rundt på stof puljerne imellem afhængig af eksterne og interne kræfter. Box 3.1 viser de vigtigste processer i næringsstoffbalancen (C, N, P), eksemplificeret ved kvælstofs cyklus.

Box 3.1 - Skematisk fremstilling af den kvælstofcyklus, der beskrives i eutrofieringsmodulet.

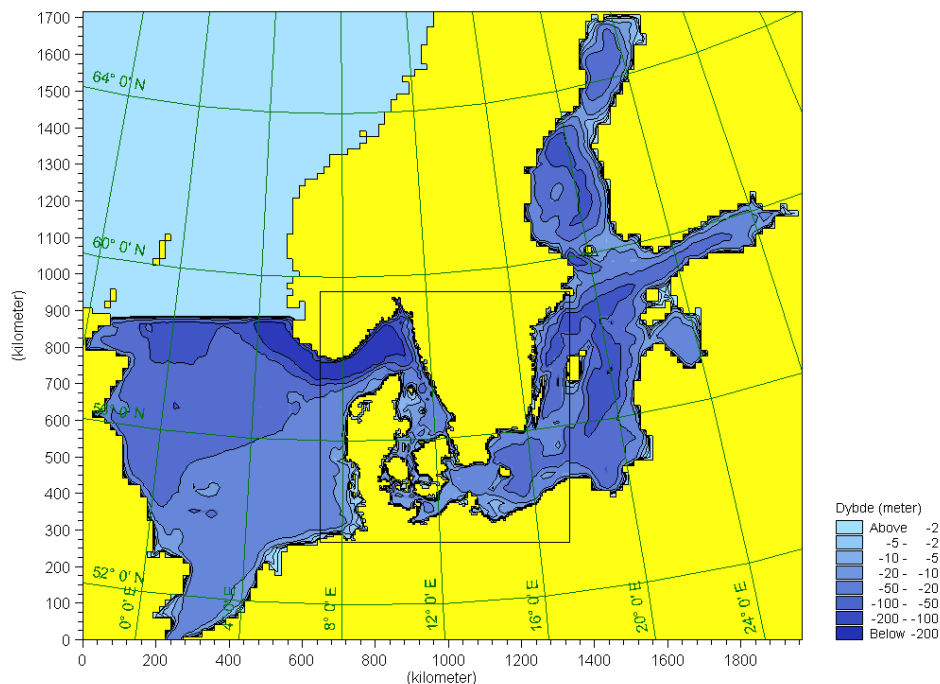


Den aktuelle modelopsætning er en videreudvikling af en modelopsætning, først anvendt i NOVA (Farvandsmodellen) og senere udvidet i NO COMMENTS, et projekt under Nordisk Ministerråd.

Farvandsmodellen under NOVA omfatter alene en 3D hydrodynamisk model af Østersøen/Nordsøen (DHI 2000a). Denne model blev etableret i 1998 og har været i drift siden. Modellen anvender en varierende horisontal opløsning (nestning) med 9 sømil opløsning i yderområderne, faldende til 3 sømil, 1 sømil og ned til 0,33 sømil i de snævrere sund (Snævringen i Lillebælt og Tragten i Øresund). Modellen har en vertikal opløsning på 2 m. Tykkelsen af overfladelaget varierer dog med aktuel vandstand og er i middel 5 m.

I NO COMMENTS (DHI 2002a, 2003a) blev modellen udvidet med et eutrofieringsmodul for beskrivelse af nærings- og iltforholdene i området. For at begrænse afviklingstiden blev den horisontale opløsning samtidig begrænset til 9 sømil i Nordsøen og Østersøen og 3 sømil i overgangsområdet fra Vesterhavet/Skagerrak til vest for Gotland i Østersøen. Fig. 3.1 viser den anvendte modelbathymetri.

Figur 3.1 - Modelbathymetrien med 9 sømils horsional opløsning i Nordsøen og Østersøen og 3 sømils opløsning i Vesterhavet, Skagerrak, Kattegat, Øresund, Bælthavet, Vestlige Østersø og Østersøen vest for Gotland. Anvendt i nærværende studie.



Det er generelt ikke muligt at repræsentere smalle sund med den valgte 3 sømils horisontale opløsning. Snævringen i Lillebælt er dog trods sin bredde på ned til 600 m medtaget, idet der er kompenseret for den overrepræsenterede bredde ved at indlægge ekstra strømningsmodstand i Snævringen. Herved sikres, at gennemstrømningen i Lillebælt bliver rigtigt repræsenteret.

Den smalle, østlige del af Limfjorden er ikke medtaget i modelbathymetrien. I stedet er medtaget en dræn/kilde kompensation, hvor vand suges ud af Løgstør Bredning og udledes ved udløbet af Limfjorden i Kattegat ved Hals. Gennempumpning er sat konstant til middelværdien af transporten østpå gennem Limfjorden (300 m³/s).

Denne modelopsætning blev i NO COMMENTS anvendt til at simulere forholdene i 2000 og 2001, og er siden også blevet anvendt for 2002. Modellen er blevet sammenlignet med målinger for disse år og har vist sig at give en rimelig beskrivelse af hydrodynamikken og af bl.a. iltforholdene, se også DMU (2003a).

NO COMMENTS modelopsætningen er grundlaget for den anvendte model i nærværende studie. Der er dog sket nogle væsentlige forbedringer i opsætningen. Disse

forbedringer skyldes specielle krav til nærværende analyser som langtidsstabilitet, men også erkendte svagheder ved den eksisterende opsætning.

De vigtigste forbedringer omfatter:

- en udvidelse af antallet af beregningslag i modellen fra 40 til 110, hvorved den fulde dybde i Østersøen er direkte repræsenteret i 2 m lag. Dette er nødvendigt for at kunne bevare lagdelingen i Østersøen over flere års simulering
- en udvidelse af antallet af tilstandsvariable i eutrofieringsmodulet med H_2S og NH_4 . Disse parametre er specielt vigtige i de dybe dele af Østersøen
- et skift fra inkludering af alle kvælstoffraktioner i modelleringen til kun at medtage de bioaktive fraktioner og udelade meget langsomt omsættelige fraktioner som humusstoffer (specielt DON). Herved bliver kalibreringen af eutrofieringsmodulets mineraliseringsprocesser lettere
- et massebalancemodul, som muliggør direkte analyser af de overordnede stofstrømme i selvvalgte delområder af modellen

Der er gennemført en fornyet grovkalibrering af modellen med den udvidede modelopsætning.

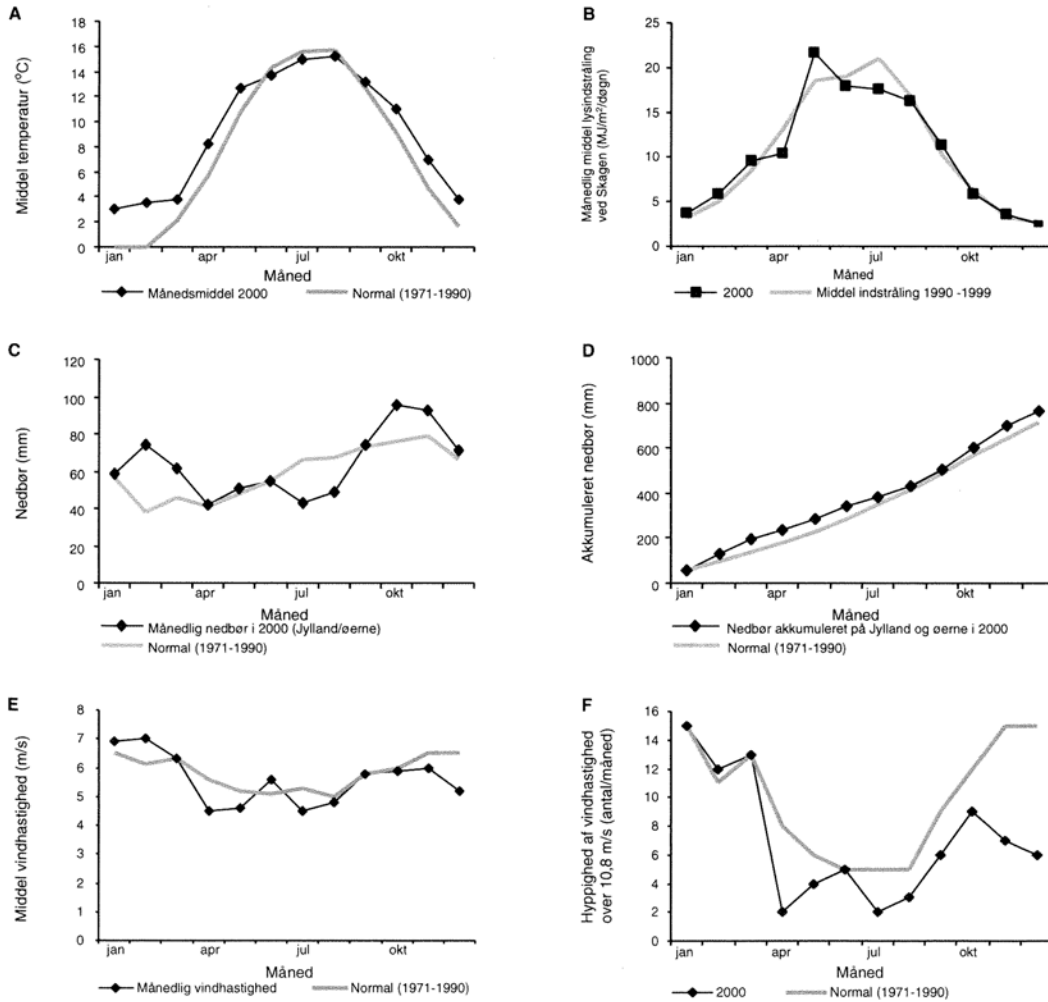
3.2 Data

Modelleringen omfatter et helt år for at kunne beskrive hele cyklussen i specielt eutrofieringsforholdene. Først er de hydrodynamiske forhold beregnet med et tidskridt på 300 s. Fra denne simulering er gemt midlede resultater hver time som grundlag for efterfølgende scenarieløbsler med eutrofieringsmodulet med varierende belastningsforhold.

Dette betyder at det hydrodynamiske grundlag er det samme for alle belastnings-scenarierne. Dekoblingen af simuleringen af hydrodynamik og eutrofieringsforhold betyder endvidere en reduktion på ca. 90% i afviklingstiden for scenarieløbslerne.

Valget af designår for simuleringerne er sket ud fra et ønske om at anvende et rimeligt typisk år. Grundet tidsbegrænsninger i projektet har det kun været muligt at vælge mellem år, hvor drivdata til modellen allerede forelå oparbejdet. Blandt årene 2000 og 2001 viser analyser fra DMU (DMU 2001a, 2002a) at de eksterne forhold for året 2000 lignede den typiske årstidsvariation mest, se fig. 3.1. Året 2000 har dog en større afstrømning fra dansk område (16.425 mio. m^3) end middel for perioden 1989-2000 (13.960 mio. m^3).

Figur 3.2 - Eksterne meteorologiske forhold i året 2000 sammenlignet med langtidsforholdene (kopi fra DMU 2001a)



Figur 2.1 Årsvariation i 2000 af A) temperatur og B) lysindstråling målt ved Skagen, C) nedbør, D) nedbør akkumuleret i 2000, E) middelvindhastighed og F) hyppighed af vindhændelser med hastigheder over 10,8 m/s.

Drivdata til modelkørslerne for året 2000 er gengivet i tabel 3.1.

Tabel 3.1 - Drivdata til år 2000 simuleringen

HYDRODYNAMISK MODUL	
VANDSTAND PÅ MARINE RANDE (SNITTET NORGE/SKOTLAND OG I DEN EN- GELSKKE KANAL	ASTRONOMISK TIDEVANDSFORUDSIGELSE LANGS SNITTENE KORRIGERET FOR AK- TUEL LUFTRYKSVARIATION KLIMATOLOGISKE MÅNEDSVÆRDIER FOR SALT- OG TEMPERATURFORHOLDENE I SNITTENE, BASERET PÅ DATA FRA ICES
AFSTRØMNING FRA LAND	MÅNEDSVÆRDIER AF VANDFØRINGEN: ÅRET 2000'S DANSKE KILDER FRA DMU'S OVERVÅGNINGSDATA (2. ORDENS OP- LANDSNIVEAU, DMU 2001A) ÅRET 2000'S SVENSKE/TYSKE KILDER TIL DE INDRE FARVANDE LEVERET FRA DMU ØVRIGE KILDER TIL ØSTERSØEN BASERET PÅ HELCOM (2002A) OPGØRELSER FOR ÅRET 1995 ÅRET 2000'S SKAGERRAK/NORDSØ KILDER FRA OSPAR (2002A)
VIND OG LUFTRYK	3 timers værdier fra DMI (ANALYSEFELTER)
LUFTEMPERATUR	3 TIMERS VÆRDIER FRA DMI (ANALYSEFELTER)
NETTONEDBØR	KLIMATOLOGISKE MÅNEDSMIDLER
SKYDÆKKE	AKTUEL INTENSITET FRA BELDRINGE (FYNS AMT)
EUTROFIERINGSMODUL	
KONCENTRATIONER PÅ MARINE RANDE	KLIMATOLOGISKE MÅNEDSVÆRDIER BASERET PÅ DATA FRA ICES
BELASTNING FRA LAND	MÅNEDSVÆRDIER AF KVÆLSTOF- OG FOSFORBELASTNING: ÅRET 2000'S DANSKE KILDER FRA DMU'S OVERVÅGNINGSDATA (2. ORDENS- OPLANDSNIVEAU FRA DMU 2001A) ÅRET 2000'S SVENSKE/TYSKE KILDER TIL DE INDRE FARVANDE LEVERET FRA DMU ØVRIGE KILDER TIL ØSTERSØEN BASERET PÅ HELCOM (2002A) OPGØRELSER FOR ÅRET 1995 ÅRET 2000'S SKAGERRAK/NORDSØ KILDER FRA OSPAR (2002A)
ATMOSFÆREDEPOSITION	KONSTANT KVÆLSTOFDEPOSITION BASERET PÅ: DANSKE OMRÅDER: AKTUEL 2000 DEPOSITION FRA DMU'S OVERVÅGNINGSDATA (DMU 2001A) SKAGERRAK/NORDSØ: SOM OVENFOR ØSTERSØ: MIDDELVERDI FRA HELCOM (2002A) FORDELT MED AFTAGENDE IN- TENSITET I NORDLIG RETNING
BIOAKTIVT LYS	AKTUEL INTENSITET FRA TAASTRUP MÅLER

De anvendte danske belastningsdata fra DMU's 2. ordens oplande er korrigeret for tilbageholdelse i de fjorde, som ikke direkte er repræsenteret i modellen (tilbageholdelser rapporteret af DMU eller skønnet):

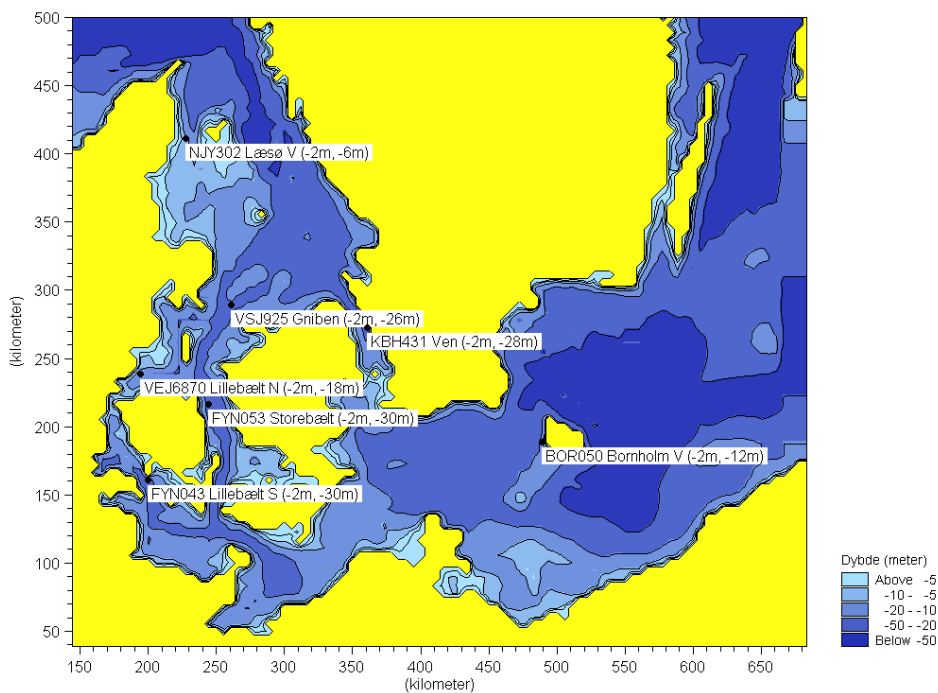
- Nissum Fjord: 38% reduktion på kvælstoftilledning
- Ringkøbing Fjord: 48% reduktion på kvælstoftilledning
- Limfjorden: 10% reduktion på kvælstoftilledning, idet hovedparten af Limfjorden er repræsenteret (DMU skønner ca. 40% tilbageholdelse i hele fjorden)
- Isefjord-Roskilde Fjord: 80% reduktion på kvælstoftilledning
- Mariager Fjord: 12% reduktion på kvælstoftilledning
- Randers Fjord: 57% reduktion på kvælstoftilledning
- Odense Fjord: 24% reduktion på kvælstoftilledning
- Horsens, Vejle, Kolding, Åbenrå og Flensborg Fjord: 5% reduktion på kvælstoftilledning

Drivdata for året 2000 er således i så høj grad som muligt aktuelle og varierende data. For stofbelastningen fra Østersølandene har der imidlertid ikke foreligget aktuelle data for året 2000, men her er i stedet anvendt data for året 1995, som er tæt på at være et middellår for perioden 1994-98 afrapporteret i den nyeste HELCOM (2002a) opgørelse.

Modellens initialfelter for salt, temperatur og vandstand pr. 1. januar 2000 er genereret på baggrund af modelkørsler for året 1999 med Farvandsmodellen, dog er salt og temperatur i den dybere del af Østersøen, som nu opløses med de 110 lag, baseret på klimatologiske værdier for december-januar måned. Initialfelterne for eutrofieringsmodulets tilstandsvariable er genereret på baggrund af målinger fra ICES onlinedatabase for vintermånederne 1995-1999.

Moniteringsdata til kalibrering og validering af modellen er udtrukket fra Vandmiljøplanens Marine Overvågningsprogram (www.dmu.dk/1_viden/2_Miljoe-tilstand/3_vand/4_mads). Herfra er anvendt data fra 7 hovedstationer med en god datadækning, repræsenterende de indre danske farvande og Arkonabassinet, se figur 3.3.

Figur 3.3 - De anvendte intensive profilstationer fra overvågningsprogrammet ved kalibreringen fra modellen. Niveauer for sammenligning med målinger er angivet.



Der er hovedsageligt anvendt måledata tæt på overfladen (middel 0-5 m) og ved bunden til sammenligningen med modelresultaterne.

3.3 Biotilgængelighed af kvælstof

Modellen anvender følgende tilstandsvariable for kvælstoffraktionerne: NO_x , NH_4 , detritus kvælstof, plankton kvælstof og zooplankton kvælstof.

Modellsystemet har således ikke en speciel tilstandsvariable for de langsomt omsættelige fraktioner af totalkvælstof i humusstoffer m.v., som udgør en stor del af totalkvælstoffet i Østersøen og en mindre del i de indre farvande og Nordsøen. Disse stoffer, hovedsageligt i form af opløste organiske fraktioner (DON), har omsætningsrater som er større end opholdstiden i de indre farvande og af størrelsesorden som opholdstiden i Østersøen.

Traditionelt er den ikke-bioaktive fraktion blevet indregnet i detritus fraktionen, og der er samtidig indført korrektioner i detritus faldhastigheder og omsætningsrater.

I nærværende studie er det dog valgt kun at medtage den bioaktive del i modelopsætningen. Herved bliver det nemmere at kalibrere passende procesrater, idet de så skal passe til litteraturværdierne.

Dette medfører, at kalibreringen skal tage udgangspunkt i et initialfelt for kvælstofkomponenterne, som er "renset" for det ikke-bioaktive bidrag.

Desværre er datagrundlaget for de ikke-bioaktive fraktioner meget begrænset. I Kaas et al (1994) er søgt bestemt størrelsen af den bioaktive fraktion af DON. Resultatet er en middelværdi for den bioaktive fraktion på $2,3 \mu\text{mol/l}$, gældende både for Østersøen og Skagerrak, men en kort analyseperiode gør at dette ikke kan betragtes som et maksimumestimat.

DMU (2002a) antager, at den bioaktive del af DON for Skagerrakvand kan sættes til 10% (af typisk DON på $12 \mu\text{mol/l}$) som følge af lyspåvirkning når bundvand bringes op i overfladen i de indre farvande, mens der argumenteres for, at den er 0 for Østersøvand (DON typisk $22 \mu\text{mol/l}$).

I praksis er korrektionen gennemført ved at reducere målingerne af TN i Østersøen med $20 \mu\text{mol/l}$ og i Skagerrak med $10 \mu\text{mol/l}$ for at nå til det bioaktive TN.

De steder i Nordsøen hvor TN er under 15 $\mu\text{mol/l}$, er det bioaktive TN blevet sat til 5 $\mu\text{mol/l}$.

Herefter er initialfeltet af detritus kvælstof beregnet ud fra $\text{TN}_{\text{aktiv}} - \text{NO}_x - \text{NH}_4 - \text{N}_{\text{plankton}} - \text{N}_{\text{zooplankton}}$.

Der er sket en tilsvarende korrektion på randdata for detrituskvælstof.

3.4 Kalibrering

Den fornyede kalibrering af modellen efter udvidelsen til 110 lag og tilføjelsen af de 2 nye tilstandsvariable i eutrofieringsmodulet er sket ved sammenligning af modelresultaterne med monitoringsdata for året 2000. Først er kalibreringen foretaget for det hydrodynamiske modul og herefter for eutrofieringsmodulets tilstandsvariable.

Under kalibreringen er de vigtigste procesratespecifikationer justeret inden for deres kendte variationsinterval i litteratur indtil der opnås en god overensstemmelse mellem modellerede og målte værdier. I forbindelse med den fornyede kalibrering er der specielt justeret ved:

- parametrene for kulstof/klorofyl forholdet i plankton
- sedimentationshastigheden
- sedimentets frigivelse af kvælstof og fosfor

Foruden check af overensstemmelsen med monitoringsdata er der foretaget en sammenligning af modellens overordnede stofstrømme med lignende opgørelser i litteraturen. Der er specielt kigget på den overordnede massebalance for totalkvælstof og totalfosfor.

Modellen er testet for utilsigtet drift i tilstandsparametrene ved cyklisk at gentage år 2000 simuleringen med slutresultaterne fra den foregående simulering som initialværdier for den næste.

Det skal bemærkes at der ikke er gennemført en fuld nykalibrering af modellen som foreslået i DHI's oprindelige oplæg til undersøgelser forud for en Vandmiljøplan III (DHI 2003d).

3.5 Validering

NO COMMENTS opsætning, der er grundlaget for nærværende modelopsætning, er som tidligere nævnt valideret ved sammenligning af simulering af året 2001 med målinger (DHI 2003a).

Der er imidlertid også gennemført et check (validering) med den fornyede modelopsætning. Denne validering er gennemført for året 2002, der med hensyn til iltsvind var meget mere kritisk end året 2000.

Valideringen er gennemført med et drivdatasæt parallelt til det anvendte for året 2000 (jvf. tabel 3.1). Ved igangsættelsen af simuleringen var belastningsinformati-
onerne dog ikke så dækkende som for året 2000:

- for de danske kilder forelå fra DMU's overvågningsdatabase kun vandføringen (2. ordensoplandsniveau). Belastningen er derfor baseret på en antagelse om at koncentrationerne er de samme som i året 2000
- for de internationale kilder er anvendt både afstrømnings- og belastningstal fra 2000 simuleringen
- atmosfæredepositionen er antaget at være den samme som i året 2000

Belastningsgrundlaget for 2002 simuleringen er således dårligere end for kalibreringsperioden (året 2000).

Der er af tidsmæssige grunde kun gennemført en sammenligning af modelresultater med målinger fra én station, FYN053 i Storebælt. Desuden er der beregnet de operationelle effektmål (se afsnit 3.7) for 2002 simuleringen til sammenligning med effektmålene for året 2000.

3.6 Scenarier

Sammen med IMV er der udvalgt 5 konkrete scenarier for ændrede belastningsforhold i området Østersøen/Nordsøen.

Scenarierne er udvalgt med henblik på at belyse betydningen af dels de lokale belastninger til de indre farvande (området fra tærsklerne Darss/Drogden mod Østersøen til den nordlige del af Kattegat), dels effekterne af kombinerede regionale/lokale belastninger for hele området Østersøen-Nordsøen. Endelig er der valgt et scenario, hvor alene polske kilder forøges.

Scenarierne tager alle sammen udgangspunkt i referencesimuleringen af forholdene i året 2000. De 5 scenarier er:

3.6.1 Naturrådsscenarioet

Dette scenario er defineret som en reduktion i landbrugets kvælstoftab på 75% i forhold til niveauet i 1989 (som repræsenterer de første detaljerede opgørelser af tillædningen til havmiljøet). Scenariet er opkaldt efter Naturrådet, som konkluderer at kvælstofudledningen formentlig skal reduceres til ca. dette niveau hvis naturens tålegrænser ikke skal overskrides (se Vismandsrapporten "Det Fede Landskab" fra 2002).

Samtidig er der foretaget en tilsvarende reduktion i den danske andel i atmosfæredepositionen af kvælstof, svarende til ca. 5% reduktion i den samlede deposition i Vesterhavet, Skagerrak og videre ind i Østersøen. I den øvrige del af Nordsøen er Naturrådsscenarioet antaget ikke at påvirke atmosfæredepositionen signifikant.

3.6.2 Danmark i 80'erne

I dette scenario er den danske belastning med kvælstof og fosfor sat til at være på niveauet for belastningen i 1989, mens øvrige internationale kilder (lokale og regionale) fastholdes på niveauet for år 2000 (referenceåret). Dette scenario viser dermed indirekte den foreløbige effekt af vandmiljøplanens danske tiltag (i et år med nær middel vejr).

Scenariet er baseret på at den danske kvælstofbelastning samlet er reduceret ca. 32% siden slutningen af 1980'erne (DMU 2001a) og fosforbelastningen ca. 76% (FEI, 2002a). Der er ikke foretaget nogen ændring i atmosfæredepositionen i dette scenario.

3.6.3 Naturbelastning +50%

Scenariet er defineret som den basale belastning fra naturen i de forskellige områder med et tillæg på 50%. Dette scenario kan betragtes som et eksempel på en minimumstilledning af næringsalte i et menneskeskabt landskab. Det vides ikke præcist hvornår tillædningerne har været på dette niveau, så det kan ikke nærmere tidsfastsættes end, at det er senere end urtidslandskabet uden mennesker og formentlig før intensiveringen af landbruget.

Belastningen fra dansk land er baseret på informationer fra DMU (pers. komm. Jens Bøgestrand), som har oplyst at naturbelastningen ved år 2000 vejrforholdene kan sættes til 2,36 kg N/ha/år og 0,07 kg P/ha/år. De aktuelle afstrømninger for året 2000 er derfor skaleret ned til at svare til 150% af denne værdi. Samme årsværdi er antaget for de svenske og tyske belastninger til lokalområdet og regionale kilder til Nordsøen. For Østersøen er anvendt en arealspecifik kvælstofbelastning på 1,5 kg N/ha/år, svarende til at der er sket en ca. 4 ganges forøgelse af kvælstofafstrømningen fra natursituationen og frem til dagens niveau (Larsson et. al, 1985).

Atmosfæredepositionen er i dette scenario sat til 1 kg N/ha/år, svarende til i størrelsesordenen 5% af den nuværende belastning (pers. komm. Ole Hertel, DMU). Til sammenligning er estimerede værdier for 1958-59 for den nordligste del af Østersøen opgjort til ca. 1 kg N/ha/år (HELCOM, 1987).

3.6.4 HELCOM/OSPAR scenariet

Dette scenario forudsætter at de internationale aftaler om belastningerne til Østersøen og Nordsøen i hhv. HELCOM og OSPAR regi overholdes. Målet er i begge aftaler at alle lande reducerer deres totale tilledninger med både kvælstof og fosfor med 50% i forhold til 1980erne. Dette scenario giver altså et bud på den resulterende effekt i danske farvande hvis disse aftaler effektueres.

Atmosfæredepositionen er ikke ændret i dette scenario.

3.6.5 Intensiveret polsk landbrug

Intensivt polsk landbrug er et scenario medtaget for at illustrere konsekvensen af et muligt intensiveret landbrug i de østeuropæiske lande, der indgår i Østersøens opland. Det baserer sig på en antagelse om at belastningen fra Polen (7 kg TN/ha/år og 0,46 kg P/ha/år i år 2000 referencen) øges til samme kvælstof- og fosforudvaskning pr. ha som Danmark havde i 2000 (19,1 kg TN/ha/år og 0,58 kg TP/ha/år).

Dette hypotetisk scenario giver en væsentlig forøgelse i belastningen til Østersøen, men den resulterende totale belastning af Østersøen ligger inden for kendte historiske bud på den samlede tilledning før 1991. Alle øvrige belastninger (incl. atmosfæredepositionen) er uændret fra år 2000 referencen.

Tabel 3.2 viser en oversigt over belastningerne i 2000 situationen og tabel 3.3 i de forskellige scenarier.

Tabel 3.2 - Oversigt over belastningen fordeling i år 2000 referencesituationen. Danske belastninger reduceret for tilbageholdelse i fjorde, der ikke direkte er repræsenteret i modellen.

	BELASTNING	
	TON N	TON P
ØSTERSØEN	856.000	31.300
FRA DANMARK (LANDAFSTRØMNING)	1.600	40
FRA ØSTERSØLANDENE (LANDAFSTRØMNING)	646.000	31.300
ATMOSFÆREDEPOSITION	208.000	0
LOKALOMRÅDET INDRE FARVANDE (DARSS/DROGDEN- KATTEGAT)	166.000	3.140
FRA DANMARK (LANDAFSTRØMNING)	50.600	1.790
FRA TYSKLAND (LANDAFSTRØMNING)	10.500	290
FRA SVERIGE (LANDAFSTRØMNING)	46.300	1.060
ATMOSFÆREDEPOSITION	58.800	0
NORDSØEN/SKAGERRAK	1.613.000	64.500
DANMARK (LANDAFSTRØMNING)	20.000	690
ØVRIGE LANDAFSTRØMNINGER	985.000	63.800
ATMOSFÆREDEPOSITION	608.000	0
TOTALT ØSTERSØ-NORDSØ	2.635.000	99.000
FRA LAND	1.760.000	99.000
ATMOSFÆREDEPOSITION	875.000	0

Tabel 3.3 - Oversigt over belastning i år 2000 og i scenarierne.

SCENARIER	INDRE FARVANDE		TOTALT ØSTERSØ/NORDSØ	
	TON N	TON P	TON N	TON P
ÅR 2000	159.800	3.140	2.635.000	99.000
FRA LAND	107.200	3.140	1.760.000	99.000
ATMOSFÆREDEPOSITION	52.600	0	875.000	0
NATURRÅD	127.300	3.140	2.580.000	99.000
FRA LAND	77.400	3.140	1.720.000	99.000
ATMOSFÆREDEPOSITION	49.900	0	860.000	0
DK I 80ERNE	186.800	8.880	2.675.000	107.000
FRA LAND	134.200	8.880	1.800.000	107.000
ATMOSFÆREDEPOSITION	52.600	0	875.000	0
NATURBELASTNING+50%	44.000	1.200	640.000	26.100
FRA LAND	41.300	1.200	553.000	26.100
ATMOSFÆREDEPOSITION	2.700	0	87.000	0
HELCOM/OSPAR	124.200	2.700	1.967.000	61.800
FRA LAND	71.600	2.700	1.092.000	61.800
ATMOSFÆREDEPOSITION	52.600	0	875.000	0
POLSK LANDBRUG	159.800	3.140	3.012.000	102.700
FRA LAND	107.200	3.140	2.137.000	102.700
ATMOSFÆREDEPOSITION	52.600	0	875.000	0

Proceduren for scenariesimuleringerne har været følgende:

- scenariets belastningsforhold er indbygget i modelopsætningen
- ved de regionale belastningsscenarier (*Naturbelastning+50%* og *HELCOM/OSPAR*) er der foretaget en skønsmæssig tilpasning af initialfelterne

til de nye belastningsforhold, mens de øvrige scenarier er startet med år 2000 initialfelterne

- der er gennemført 1. års simulering med scenarieforholdene
- slutfelterne for eutrofieringsmodulets tilstandsvariable er herefter anvendt som initialfelt for en ny cyklisk års simulering (2. år)
- proceduren med cykliske genberegninger er fortsat indtil der er opnået en omtrentlig balance mellem modellens initialfelt og slutfelt

Ovenstående procedure skulle sikre, at den endelige scenariosimulering er baseret på et initialfelt, der er i balance med scenariets belastningsforhold.

I praksis er de lokale belastningsscenarier (*Naturråd og Danmark i 80'erne*) gennemregnet 3 gange og de regionale belastningsscenarier 5 gange, hvorefter balancen var opnået.

3.7 Operationelle effektmål

I nærværende analyse er det aftalt at fokusere på følgende effektmål:

- koncentrationen af klorofyl: middelværdien for de øverste 10 m for perioden marts-oktober
- sigtddybden: middelværdien for perioden april-oktober
- primærproduktionen: årsproduktionen pr m^2 ($g\ C/m^2/år$)
- iltsvindsarealets størrelse: arealet af havbund udsat for en iltkoncentration mindre end 4 mg/l henholdsvis 2 mg/l

For iltsvindsarealet er der opgjort udviklingen i arealets størrelse gennem året, samt det samlede årlige iltsvindsareal, dvs. det samlede havbundsareal, der har været udsat for iltsvind på et eller flere tidspunkter gennem året.

Af pladsmæssige hensyn er analyserne af scenarierne baseret på gemte 3D felter fra simuleringen hvert 2. døgn gennem simuleringsperioden.

4 RESULTATER FRA KALIBRERING OG VALIDERING

4.1 Kalibreringsperioden

4.1.1 Sammenligning med målinger

I bilag A er vist tidsserier af modelresultaterne sammenlignet med monitoringsdata fra de udvalgte 7 målestationer.

Det skal generelt bemærkes, at modellens horisontale opløsning i de indre farvande er 3 sømil, så modelværdien i et punkt repræsenterer et middel for et areal på ca. 25 km², og er således af en helt anden størrelsesorden end punktmålingens udstrækning. Dette kan være forklaringen på en vis afvigelse mellem målte og modellerede koncentrationer, specielt for iltværdierne ved bunden, hvor der må forventes at være en stor horisontal variation i virkeligheden som følge af den ret varierende bathymetri i de indre farvande.

Modellens overflade- og bundsaltholdigheder (bilag A.1) ses generelt at stemme godt overens med profilmålingerne. Det bemærkes, at modellen reproducerer den aftagende lagdeling gennem vinteren frem til næsten fuld opblanding i begyndelsen af marts, og den hurtige opbygning af lagdelingen i slutningen af marts i forbindelse med udstrømning af Østersøvand i overfladen. Lagdelingen ses generelt at være bevaret gennem hele forårs- og sommerperioden helt frem til december måned, i god overensstemmelse med monitoringsdata. I det nordlige og sydlige Lillebælt synes modellen dog at overvurdere lagdelingen i årets sidste 2 måneder. Denne uoverensstemmelse kan muligvis skyldes en for lav vindhastighed i de meteorologiske drivdata.

Vandtemperaturen ved overflade og bund (bilag A.2) udviser den generelle årstidsvariation og er i god overensstemmelse med monitoringsdata. Undervurderingen af vandtemperaturen i overfladen i maj menes at skyldes en for lav lufttemperatur over vandet i drivdatasættet i denne periode, men fra juni er modellen igen i overensstemmelse med målingerne. I oktober giver modellen på flere stationer et fald i bundtemperaturen, hvor målingerne først falder senere. Faldet sker i forbindelse med tilstrømning af nyt saltere vand, som har for lav tempertur. Årsagen til afvigelsen synes at skyldes initialfeltet for vandtemperatur, der ikke er tilstrækkelig godt kendt.

Nitrat/nitrit (NO_x) sammenligningen er vist i bilag A.3. Sammenligningen for overfladeværdierne udviser generelt en god overensstemmelse, med et kraftigt fald under forårsopblomstringen i marts måned, potentiel kvælstofbegrænsning med koncentrationer tæt på nul frem til oktober og herefter en stigende koncentration. Før forårsopblomstringen udviser flere af sammenligningerne dog for lave modellerede NO_x koncentrationer, både i overfladen og for det dybere niveau. I det dybe niveau beskriver modellen generelt en mindre dynamik i NO_x koncentrationen gennem året og sommeren end målingerne viser.

Sammenligningen for totalkvælstof (TN, bilag A.4) er gennemført idet der er korri-geret for den skønnede bidrag af ikke-bioaktivt kvælstof ved en forskydning af ak-sen for målte TN værdier (se afsnit 3.3 vedr. biotilgængelighed af kvælstof).

Overensstemmelsen for TN ved Læsø V og ved Ven er god. Ved Griben er målinger-ne ved overfladen generelt højere end modelresultaterne og også højere end må-lingerne fra de øvrige stationer. Eventuelt er Griben position mere udsat for resus-pension af bundmateriale og efterfølgende opblanding over vandsøjlen end de øv-rige positioner. Resuspensionen indgår ikke i modellen. For stationerne Lillebælt N og S og stationen i Storebælt er årsagen til afvigelsen mellem model og målinger i januar-marts meget sandsynlig den manglende resuspension.

For fosfat (IP, bilag A.5) er overensstemmelsen generelt god, dog falder modellens bundværdier ved Griben ikke i juli som for målingerne, og i Storebælt overvurderer modellen koncentrationerne i sommerperioden. Både målinger og modelresultater viser fosfatkoncentrationer i produktionsperioden over niveauet for fosfatbe-grænsning.

For totalfosfor (bilag A.6) går afvigelsen for bundvandet ved Griben i fosfat igen, mens modellen passer bedre i Storebælt trods afvigelsen i fosfat for bundvandet. For de øvrige stationer er der en god overensstemmelse.

Modellens klorofyl er sammenlignet med overflademålinger i bilag A.7. Målingerne for Læsø V er behæftet med en systematisk analysefejl, og ligger betydeligt under modellens koncentrationer. For de øvrige stationer synes modellen at overvurdere forårsopblomstringen, mens sommer og efterårskoncentrationerne er bedre be-skrevet.

Sammenligningen for sigtdybden (bilag A.8) viser en god overensstemmelse for produktionsperioden medio marts-oktober for stationerne Læsø V, Ven og Bornholm, men en noget overvurderet værdi for stationerne Lillebælt N og S og Storebælt. I vinterperioden, hvor klorofylen er lav, giver modellen for høje sigtdybder, formodentlig på grund af den manglende proces med resuspension af sediment.

For primærproduktionen viser bilag A.9, at modellen generelt giver værdier, som passer godt med de målingsbaserede værdiers variation over året. Der er dog en tendens til at modellen giver lidt for lave værdier i (sen-) sommerperioden. Hovedparten af denne afvigelse relaterer sig til, at modellen beregner nettoproduktionen, mens målemetoden i danske farvande siden 1998 generelt tilnærmer bruttoproduktionen.

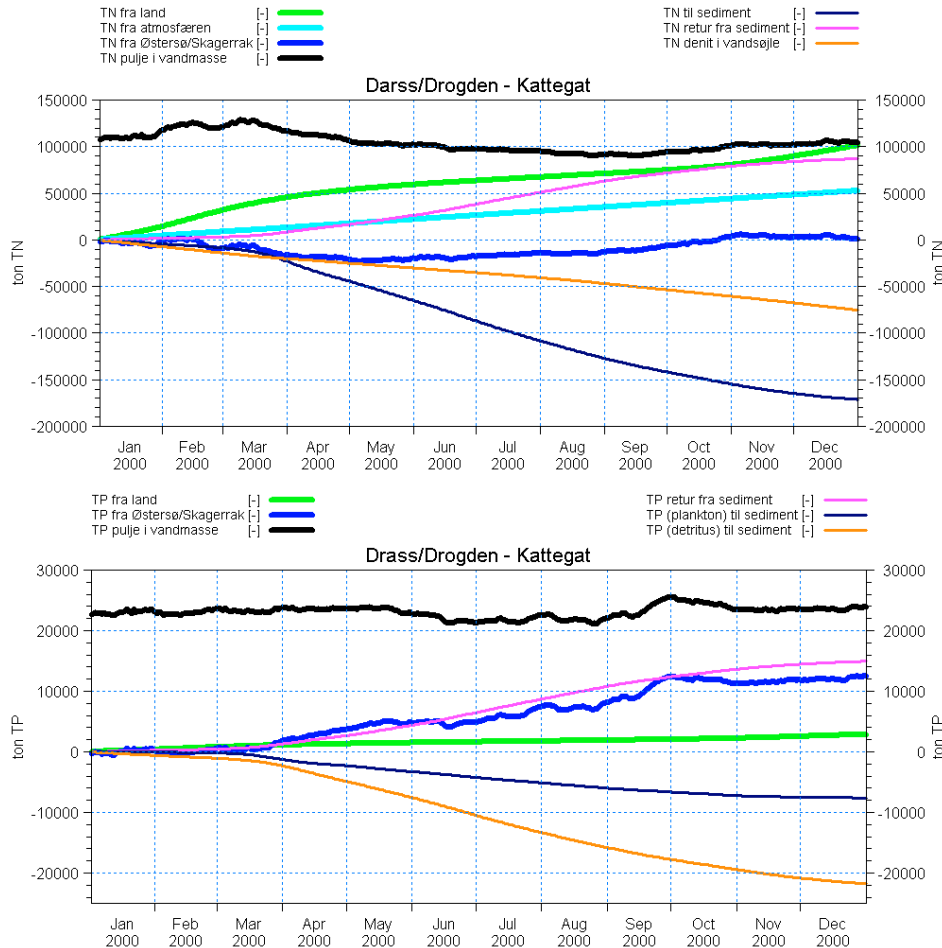
Endelig er sammenligningen for iltkoncentrationerne vist i bilag A.10. Modellen reproducerer den sæsonmæssige variation i overfladen og ved bunden godt. Ved bunden ses modellen at fange sænkningen i iltkoncentration i april i forbindelse med sedimentationen af forårsopblomstringen, dog med reduceret værdi. Den videre sænkning i juni, juli, august og september reproduceres godt af modellen, med stigninger i koncentrationen betinget af hydrodynamiske hændelser som i september på Lillebælt N stationen. For Gniben stationen fanger modellen ikke den laveste målte iltkoncentration, mens den på stationerne i Bælthavet og ved Ven fanger minimumssituationen rimeligt. Her skal igen bemærkes, at modellen repræsenterer middelforholdene for beregningsceller af størrelsesordenen 25 km², hvilket formodentlig langt overstiger den skala som målingerne repræsenterer. På stationen ved Bornholm passer modellens iltkoncentrationer dårligt med målingerne efter juli. De målte iltkoncentrationer fra august og fremad virker dog urealistisk lave.

4.1.2 Massebalancer for området

Figur 4.1 viser den akkumulerende stofbalance for de indre farvande. Den samlede tilledning af kvælstof fra land er 101.400 ton TN (efter fjordtilbageholdelse alle fjorde incl. Limfjorden). Fra atmosfæren tilføres 52.600 ton TN. Den samlede netto-transport af bioaktivt kvælstof fra Østersøen og Skagerrak ind i området er 900 ton TN (bestående af 96.100 ton TN import fra Østersøen og 92.500 ton TN eksport til Skagerrak). Internt i området er sedimentationen 171.100 ton TN, denitrifikation i vandsøjlen 75.300 ton TN og frigivelse fra sedimentet 87.000 ton TN. Netto er der således en fjernelse (denitrifikation + begravelse) på 159.400 ton eller 3,9 g N/m²/år. Den samlede fjernelse i 2000 kan sammenlignes med andre estimater,

f.eks. refereret i DMU (2002a): en begravelse på 47.000 ton TN og 50.000-88.000 ton TN denitrifikation, samlet 97.000-135.000 ton TN.

Figur 4.1 - Massebalancen for området Darss/Drogden – Kattegat (indre farvande) for totalkvælstof og totalfosfor gennem år 2000 (referencen)



For fosfor er de tilsvarende tal en belastning fra land på 2.900 ton TP, antaget 0 fra atmosfæren, nettotransport fra Østersøen/Skagerrak ind i området på 12.500 ton TP (bestående af 22.600 ton TP import fra Østersøen og 10.100 ton TP export til Skagerrak). Internt i området er sedimentationen $7.600 + 21.700 = 29.300$ ton TP og frigivelsen fra sedimentet 14.900 ton TP, svarende til en nettofjernelse på 14.400 ton TP ($0,35 \text{ g TP/m}^2/\text{år}$).

4.1.3 Operationelle effekt mål

Figur 4.2 og tabel 4.1 viser opgørelsen af de operationelle effekt mål for året 2000.

Tabel 4.1 - Årligt iltsvindsareal for 4 mg/l og 2 mg/l kriteriet, året 2000 (referencen)

ÅRLIGT ILTSVINDSAREAL (KM ²)	4 MG/L			2 MG/L		
	INDRE FAR- VANDE	INDRE FAR- VANDE (DK DEL)	ARKONA	INDRE FAR- VANDE	INDRE FAR- VANDE (DK DEL)	ARKONA
2000 (REFERENCEN)	16.330	10.249	1.605	7.409	4.383	617

Det årlige iltsvindsareal i 2000 for de indre farvande er beregnet til 16.330 km² baseret på 4 mg/l kriteriet og 7.409 km² baseret på 2 mg/l kriteriet. Kraftigt iltsvind (< 2 mg/l) er beregnet at have optrådt i en stor del af den Vestlige Østersø, i Lillebælt, nogle steder i Storebælt og i området nord for Fyn op mod Århus. Modellen viser endvidere at iltsvind (< 4 mg/l) optrådte i det sydlige Kattegat, i Hevring Bugt og spredte steder i resten af Kattegat. Figur 4.2 viser at det største øjeblikkelige iltsvindsareal optrådte i begyndelsen af september og dækkede 11.000 km² og 3.700 km² for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l kriterierne.

Middelværdien af klorofyl i overfladelaget i de indre farvande er beregnet til 3,7 µg/l (marts-oktober), sigtddybden til 10,2 m (april-oktober) og den årlige primærproduktion til 144 g C/m².

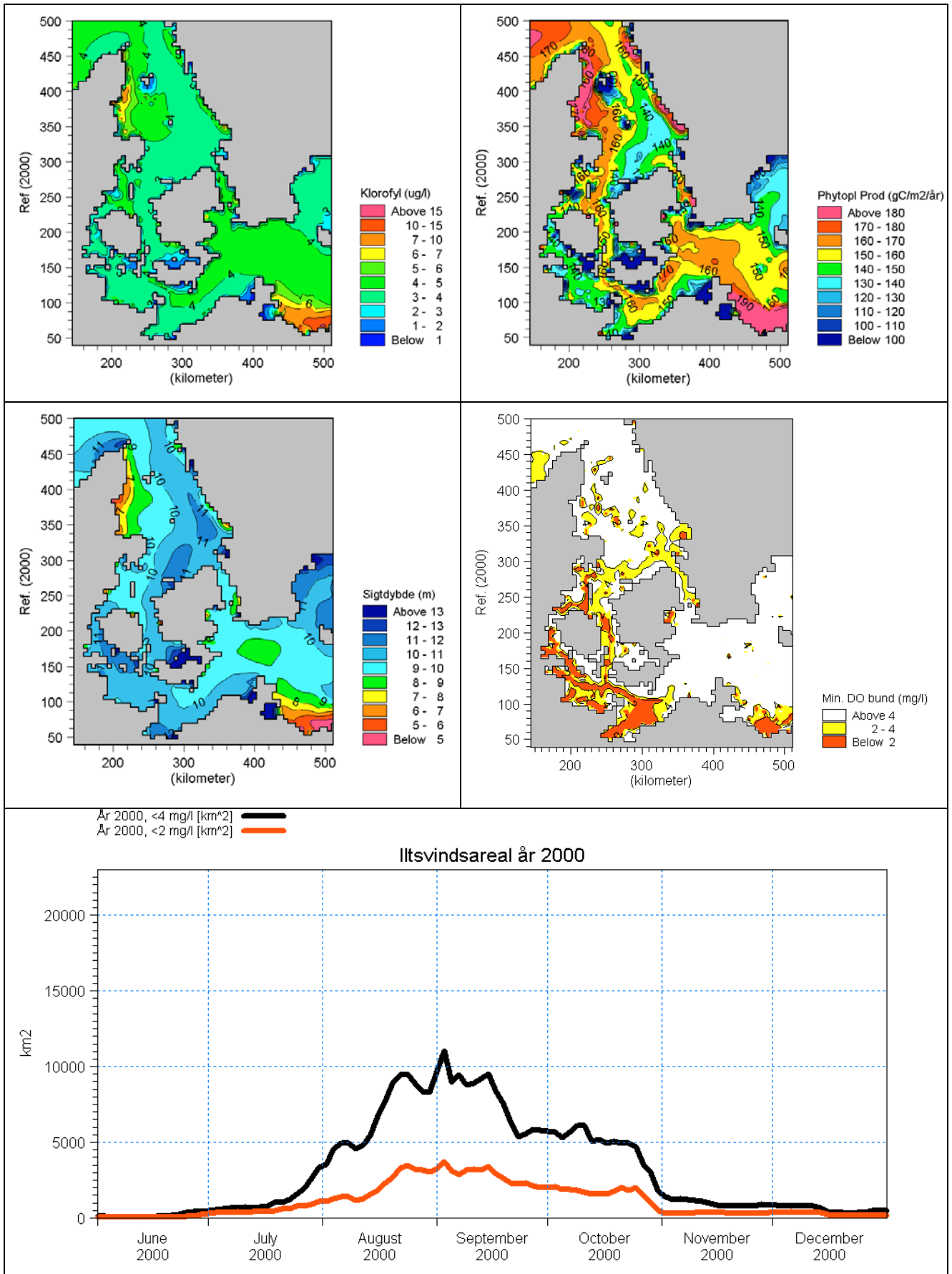
4.2 Valideringsperioden

4.2.1 Sammenligning med målinger

Tidsseriesammenligningerne for station FYN053 i Storebælt er vist i bilag B.1. Overensstemmelsen for saltholdighed og temperatur for året 2002 er lige så god som for kalibreringsåret 2000.

Forårsopblomstringen sker i modellen 1-2 uger tidligere end ifølge målingerne, hvorved NO_x opbruges i overfladelaget lidt for tidligt. Ved bunden viser målingerne NO_x koncentrationer tæt på 0 i august, hvor modellens koncentration først falder i september. For fosfat ses det samme lidt tidlige fald i overfladekoncentrationen, men ellers er overensstemmelsen rimelig.

Figur 4.2 - Resultatet af de operationelle effektmål for året 2000 (referencen) kørslen (base- ret på 3. cykliske års resultater).



Modellen giver som i 2000 en kraftig klorofyltop, der optræder lidt tidligt, men målinger fra sidst i marts bekræfter størrelsen af klorofyltoppen. Hen på sommeren er overensstemmelsen god, mens klorofyltoppen i november kun delvis repræsenteres i modellen. Modellens sigtddybde er stabil gennem sommeren, men i overkanten af målingerne. Primærproduktionen på stationen er som for året 2000 mindre end målingerne hen gennem sommeren.

Endelig viser iltkoncentrationen ved bunden en lidt dårligere overensstemmelse med målinger end for året 2000. Modellens ilt er mindre dynamisk end målingerne og afviger typisk 1-1,5 mg/l. Den kraftige forbedring på stationen i slutningen af oktober fanger modellen godt.

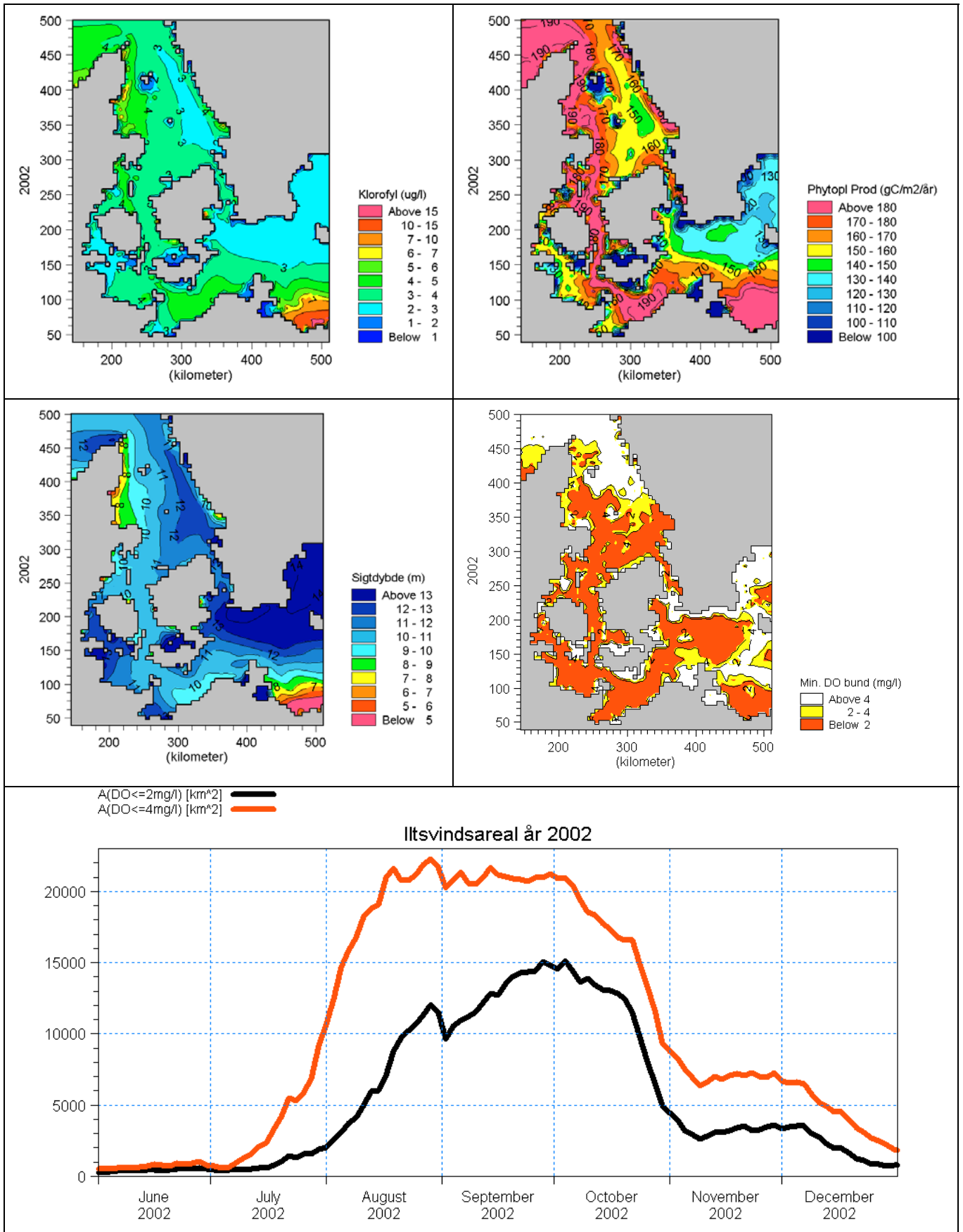
4.2.2 Operationelle effektmål 2002

De operationelle effektmål for året 2002 er vist i figur 4.3 og tabel 4.2. Specielt iltsvindsarealet udviser en forværring i forhold til år 2000 modelresultaterne, i overensstemmelse med at 2002 var det værste iltsvind i de indre farvande i mange år. Det årlige iltsvindsareal blev således beregnet til 29.850 km² (72% af den samlede areal) for 4 mg/l kriteriet og 22.750 km² for 2 mg/l kriteriet. Ved sammenligning med figur 4.2 ses de forværrede forhold i 2002 at have bredt sig langt op i Kattegat, foruden at forholdene i Arkonabassinet var kritiske.

Tabel 4.2 - Årligt iltsvindsareal for 4 mg/l og 2 mg/l kriteriet, valideringsåret 2002

ÅRLIGT ILTSVINDSAREAL (KM ²).	4 MG/L			2 MG/L		
	INDRE FARVANDE	INDRE FARVANDE (DK DEL)	ARKONA	INDRE FARVANDE	INDRE FARVANDE (DK DEL)	ARKONA
ÅRET 2002	29.850	21.207	13.552	22.750	16.021	9.477

Figur 4.3 - Resultatet af de operationelle effektmål for året 2002 (valideringen)



4.3 Diskussion

Den gennemførte kalibrering for året 2000 og den efterfølgende validering for 2002 viser, at modellen er i stand til at beskrive de overordnede variationer i de hydrodynamiske og eutrofieringsmæssige forhold i de indre farvande og i Arkonabassinnet.

På trods af modellens ret grove opløsning i de indre farvande (3 sømil eller ca. 5 km) beskriver modellen udviklingen i lagdeling gennem året, hvilket tages som udtryk for at vandskiftet og de lodrette transporter i modellen er rimeligt beskrevet. Dette er afgørende for at modellens eutrofieringsmodul kan kalibreres til at give en rimelig og korrekt årsagssammenhængende beskrivelse af eutrofieringsforholdene.

Den største afvigelse mellem eutrofieringsmodulets resultater og målingerne optræder for sigtdybden. Denne afvigelse er delvist et resultat af et kompromis mellem at få tilstrækkelig høj primærproduktion i modellen i sommerperioden og have en rimelig sigtdybde, også i Østersøen. Der er lagt mest vægt på at få primærproduktionen tilstrækkelig høj på bekostning af den lokale sigtdybde. Den bagvedliggende forklaring er formodentlig, at modellens plankton har en simpel lysafhængighedsbeskrivelse for produktion med en temperaturkorrektur. I virkeligheden vil plankton gennem sommeren adapteres til mindre lys, idet de frie næringsalte da findes langt nede i vandsøjlen ved haloklinen (springet i saltholdighed mellem øvre og nedre lag).

For de øvrige tilstandsvariable er der en bedre overensstemmelse.

År 2000 og 2002 repræsenterer ikke væsentlige forskelle i belastningsniveau, men stor forskel i de meteorologiske forhold og dermed i vandskifte- og opblandingsforhold.

Det har ikke været muligt inden for rammerne af nærværende projekt at gennemføre en anden validering på et meget forskelligt belastningsniveau. Dette var oprindeligt foreslået i DHI's oplæg til relevante undersøgelser i forbindelse med VMPIII udredningen (DHI, 2003d). Dog kan scenariet med *Naturbelastning+50%* (se kapitel 5) betragtes som et check af at modellen er følsom over for belastningsniveauets størrelse, hvilket resultaterne fra scenariet bekræfter.

Modellens absolutte usikkerhed for et givet års meteorologi og belastning fremgår af afvigelsen mellem modelresultater og målinger. Dog skal afvigelsen også ses i lyset af skalaen for et modelresultat (et modelpunkt dækker ca. 25 km² havområde) contra skalaen for repræsentativiteten af en profilmåling.

Samlet vurderes det, at modellen repræsenterer et tilstrækkelig godt grundlag for gennemførelse af scenarieanalyserne.

På længere sigt vil modellens usikkerhed kunne reduceres ved følgende udvidelser af modelsystemet:

1. indregning af resuspension af bundsediment i modellens specifikation af baggrundsværdien for lyssvækkelse i vandet
2. udbygning af algebeskrivelsen til at omfatte mindst 3 funktionelle hovedtyper: kiselalger, furealger og blågrønalger
3. udvidelse af antallet af tilstandsvariable med en eller flere for de meget svært nedbrydelige kvælstoffraktioner

Arbejdet med inkludering af flere algetyper i eutrofieringsmodulet har kørt parallelt med nærværende undersøgelse, men har ikke kunnet integreres inden for rammen for nærværende undersøgelse.

5 SCENARIERESULTATER

5.1 Resultater

For de gennemførte scenariesimuleringer er udtrukket de operationelle effektmål.

Resultaterne er vist i form af:

- den arealmæssige fordeling af ændringerne i de operationelle effektmål i forhold til år 2000's effektmål, se bilag C
- middelværdien for ændringerne i de operationelle effektmål for farvandsområderne Kattegat, Øresund (ned til Drogden tærsklen ved Saltholm), Storebælt/Lillebælt (fra Gniben ved Sjællands Odde til Langelands sydspids), Vestlige Østersø (vest for Darss tærsklen ved Gedser), Arkonabassinet (området fra Bornholm til tærsklerne Darss og Drogden) samt samlet for de indre farvande (uden Arkona), se tabel 5.1-5.3
- ændringen i det årlige iltsvindsareal opgjort for de indre farvande samlet, den danske del heraf og for Arkonabassinet, se tabel 5.4
- størrelsen af det øjeblikkelige iltsvindsareal, se figur. 5.1

Tabel 5.1 - Scenariernes effekt på klorofylkoncentrationen

ÆNDRING I KLOROFYL (µG/L, ØVERSTE 10 M, MARTS-OKTOBER)	KATTEGAT	ØRESUND	STOREBÆLT /LILLEBÆLT	V.ØSTERSØ	ARKONA	INDRE FAR- VANDE (-ARKONA)
<i>2000 (REFERENCEN)</i>	<i>4,0</i>	<i>4,4</i>	<i>3,5</i>	<i>3,7</i>	<i>4,4</i>	<i>3,8</i>
NATURRÅD	-0,4	-0,1	-0,4	-0,1	-0,1	-0,3
DK 1980ERNE	+0,4	+0,1	+0,4	+0,1	0,0	+0,3
NATUR+50%	-2,6	-3,3	-2,6	-2,8	-3,5	-2,7
HELCOM/OSPAR	-0,8	-1,0	-0,7	-0,7	-0,9	-0,7
POLSK LANDBRUG	+0,8	+2,2	+1,1	+1,6	+2,3	+1,1

Tabel 5.2 - Scenariernes effekt på sigtdybden

ÆNDRING I SIGTDYBDE (M, APRIL-OKTOBER)	KATTEGAT	ØRESUND	STOREBÆLT /LILLEBÆLT	V.ØSTERSØ	ARKONA	INDRE FAR- VANDE (-ARKONA)
<i>2000 (REFERENCEN)</i>	<i>9,9</i>	<i>9,5</i>	<i>10,6</i>	<i>10,5</i>	<i>9,5</i>	<i>10,2</i>
NATURRÅD	+0,6	+0,2	+0,7	+0,3	+0,1	+0,6
DK 1980ERNE	-0,5	-0,1	-0,6	-0,2	-0,1	-0,4
NATUR+50%	+10,6	+12,9	+13,3	+14,0	+15,5	+12,0
HELCOM/OSPAR	+1,9	+2,2	+1,9	+1,9	+2,2	+1,9
POLSK LANDBRUG	-1,3	-2,1	-1,7	-2,1	-2,4	-1,6

Tabel 5.3 - Scenariernes effekt på primærproduktionen

ÆNDRING I PRIMÆRPRODUKTION (GC/M ² /ÅR)	KATTEGAT	ØRESUND	STOREBÆLT /LILLEBÆLT	V.ØSTERSØ	ARKONA	INDRE FARVANDE (-ARKONA)
2000 (REFERENCEN)	154	156	136	141	154	147
NATURRÅD	-9	-3	-9	-4	-2	-8
DK 1980ERNE	+8	+2	+8	+2	+1	+7
NATUR+50%	-75	-95	-88	-95	-111	-82
HELCOM/OSPAR	-18	-22	-16	-17	-21	-18
POLSK LANDBRUG	+15	+37	+24	+33	+47	+21

Tabel 5.4 - Scenariernes effekt på det årlige iltsvindsareal

ÆNDRING I ÅRLIGT ILTSVINDAREAL (KM ²)	4 MG/L			2 MG/L		
	INDRE FARVANDE	INDRE FARVANDE (DK DEL)	ARKONA	INDRE FARVANDE	INDRE FARVANDE (DK DEL)	ARKONA
2000 (REFERENCEN)	16330	10249	1605	7409	4383	617
NATURRÅD	-1389	-1080	-31	-957	-587	0
DK 1980ERNE	+1574	+1297	+31	+833	+556	0
NATUR+50%	-14848	-9367	-1501	-6766	-4085	-587
HELCOM/OSPAR	-3704	-2709	-593	-2706	-1627	-185
POLSK LANDBRUG	+4477	+3590	+3001	+4026	+1826	+926

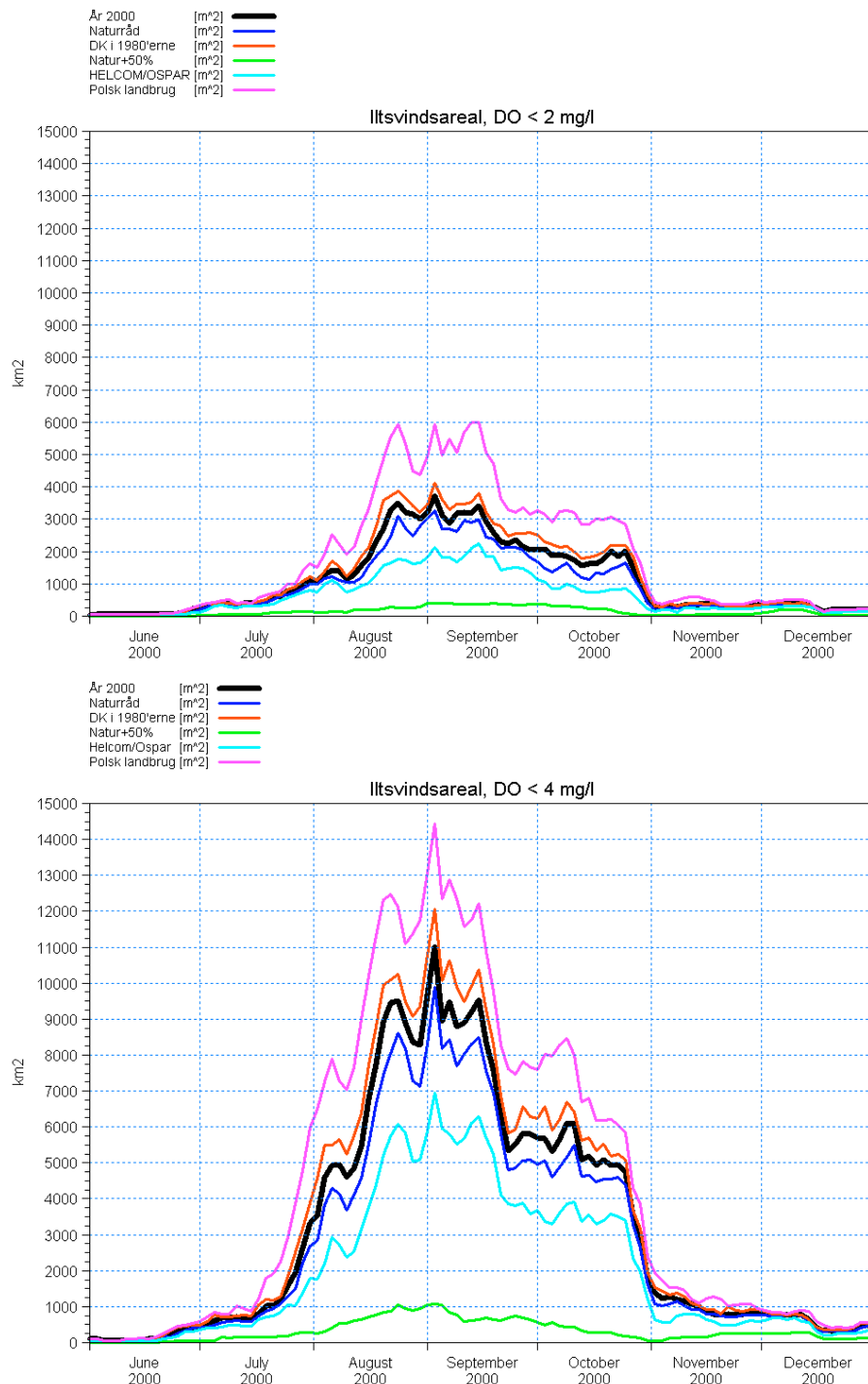
5.2 Kommentering af scenarierne

5.2.1 Naturråd

Naturrådsscenariets kraftige reduktion i den danske kvælstofafstrømning (ca.

30.000 ton TN mindre end i år 2000) og den tilhørende reduktion i atmosfæredepositionen (3.000 ton TN) svarer til en samlet reduktion i den lokale kvælstofbelastning af de indre farvande på 20%. Effekten af denne reduktion skulle forventes at være størst langs de danske kyster, hvilket modellen også viser.

Figur 5.1 - Den modellerede variation i det øjeblikkelige iltsvindsareal for scenarierne. Øverst: 2 mg/l kriteriet. Nederst: 4 mg/l kriteriet



For klorofyl fås reduktioner op til 3 µg/l i den vestlige del af Kattegat, men ellers generelt små reduktioner i de indre farvande på 0,1-0,5 µg/l. Den tilhørende effekt på sigtdybden er en forøgelse på op til 2 m lokalt i Kattegat, men typisk kun ca. 0,6 m (+6%) i de indre farvande. Primærproduktionen reduceres. Effekten på primærproduktionen når op på 60 g C/m²/år tæt på Nordjyllands østkyst, men ligger

ellers i størrelsesordenen af 2 til 20 g C/m²/år, med en middel for de indre farvande på 8 g C/m²/år (-6%).

De største forbedringer i iltkoncentrationen ved bunden fremkommer ligeledes i det vestlige Kattegat, men iltkoncentrationen er ikke så kritisk i dette område som i Bælthavet og Vestlige Østersø. I disse kritiske områder er forbedringen kun op til 0,3 mg/l. Det beregnede årlige iltsvindsareal (4 mg/l kriteriet) reduceres derfor kun 1080 km² (-11%) for den danske del af de indre farvande (1389 km², svarende til -9% for indre farvande). Den relative reduktionen i øjeblikkeligt iltsvindsareal er omtrent ligeligt fordelt over iltsvindssæsonen.

5.2.2 Danmark i 80'erne

Scenariet med danske kilder som i 1980'erne, før virkningen af vandmiljøplanerne, har 16% større samlet lokal kvælstofbelastning og 180% større fosforbelastning af de indre farvande end i år 2000. Som forventet giver modellen igen størst effekter af merbelastningen tæt ved kysten i den danske del af området. Scenariets effekter er i øvrigt nærmest en spejling af effekterne i *Naturrådsscenariet*.

Den gennemsnitlige effekt i de indre farvande på klorofyl er en forøgelse på 0,3 µg/l (+8%), med værdier op til ca. 3 µg/l ved den jyske Kattegat-kyst. Tilsvarende reduceres sigtdybden i middel 0,4 m (-4%) med værdier op til 2 m ved Jyllandskysten.

Forøgelsen i primærproduktion er på op til 60 g C/m²/år, men med en middelværdi for de indre farvande på kun 7 g C/m²/år (+5%).

Reduktionen i minimal iltkoncentration ved bunden er generel 0,1-0,3 mg/l, hvilket er beregnet at ville øge det årlige iltsvindsareal i den danske del af de indre farvande med 1297 km² (+13%) baseret på 4 mg/l kriteriet (1574 km², svarende til +10% i samlede indre farvande). For 2 mg/l kriteriet er forøgelsen 556 km² i den danske del (+13%).

5.2.3 Naturbelastning +50%

Scenariet med *Naturbelastning+50%* på lokale og regionale afstrømninger og atmosfæriske depositioner giver en kraftig reduktion i de samlede lokale kilder til de indre farvande på 73% for kvælstof og 61% for fosfor. For de samlede lokale/regionale kilder er reduktionen 76% for kvælstof og 74% for fosfor. Konsekvensen er meget kraftigt ændrede modelresultater.

Klorofyl reduceres generelt med 2,5-3,5 mg/l både i de indre farvande, i Østersøen og i Skagerrak. Scenariets klorofyl er således nede på ca. 1 µg/l.

Modellen giver samtidig en væsentlig forøgelse i sigtdybden til ca. 22 m (+118%). Denne tilvækst kan være overvurderet som følge af den lavt satte baggrundsskygning (jvf. afsnit 4.3). Primærproduktionen er samtidig reduceret til 62 g C/m²/år i middel for de indre farvande (-55% reduktion).

Resultatet for iltforholdene ved bunden er at der med år 2000 meteorologien kun ville have været meget små og spredte områder med iltproblemer (1482 km² i de indre farvande, svarende til 9% af 2000 arealet, baseret på 4 mg/l kriteriet). For 2 mg/l kriteriet er reduktionen fra 7409 km² til 643 km², svarende til 9% af år 2000 arealet.

Det skal bemærkes at scenariet *Naturbelastning+50%* får så lave næringssaltkoncentrationer, at der muligvis vil være tale om en strukturændring i det biologiske system. Modellen tager ikke automatisk hensyn til strukturændringer og der er heller ikke lavet manuelle korrektioner for at repræsentere strukturændringer.

5.2.4 HELCOM/OSPAR

HELCOM/OSPAR scenariet har i lokalområder (indre farvande) 21% lavere belastning for kvælstof og 14% lavere for fosfor. For det samlede område er reduktionen 25% henholdsvis 37% (i forhold til år 2000).

Reduktionen i klorofyl er i middel for de indre farvande 0,7 µg/l (-19%) og for Arko-nabassinet lokalt over 1 µg/l. Sigtdybden er tilsvarende forøget i middel ca. 2 m (+19%) og primærproduktionen reduceret ca. 18 g C/m²/år (-13%).

For iltforholdene fås forbedringer på ca. 0,5 mg/l, hvilket reducerer det årlige iltsvindsareal med 3704 km² (-23%) for 4 mg/l kriteriet og 2706 km² (-37%) for 2 mg/l kriteriet. Der vil dog stadig være store områder med iltsvind i den sydvestlige del af de indre farvande.

5.2.5 Intensiveret polsk landbrug

Scenariet med forøgelse af den *polske belastning* har 377.000 ton større kvælstoftilledning (+14% af modellens totale belastning) end i 2000 referencen. Det skal bemærkes, at en stor del af den ekstra tilledning ligger umiddelbart øst for de indre

farvandes afgrænsning mod Østersøen (floden Oder). Der kan derfor forventes en aftagende effekt ud gennem de indre farvande.

For klorofyl er fundet en stigning på 2,2 µg/l i Øresund aftagende til 0,8 µg/l i Kattegat, med et middel for de indre farvande på 1,1 µg/l (+30%). Samtidig falder sigtddybden i middel 1,6 m (-16%), og primærproduktionen stiger med 37 g C/m²/år i Øresund til 15 g C/m²/år i Kattegat (i middel 21 g C/m²/år, svarende til +15%).

Effekten på iltforholdene er også kraftige, med et fald på 0,3 mg/l til mere end 1 mg/l i den største del af de indre farvande. Dette er beregnet til at resultere i en stigning i iltsvindsarealet på 4477 km² (+27%) og 4026 km² (+54%) for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l kriteriet.

Det skal bemærkes at scenariet for et industrialiseret polsk landbrug giver negative effekter, der langt overstiger de opnåede forbedringer fra 1980erne til år 2000 som følge af vandmiljøplanen.

5.3 Generalisering af scenarierne

På baggrund af de gennemførte scenarieanalyser er det forsøgt at give en generaliseret fremstilling af de mulige effekter af ændringer i næringsaltbelastningen.

De gennemførte scenarier har generelt ændringer både for kvælstof- og fosforbelastningen. Kun for *Naturråds-scenariet* sker der alene en ændring i kvælstofbelastningen. Ved sammenligning af dette scenario med *Danmark i 80erne* er det fundet, at ændringen i effektparametrene er næsten proportional med kvælstofbelastningen, mens der ikke ser ud til at være nogen signifikant korrelation mellem ændringerne i effektmål og fosforbelastningen.

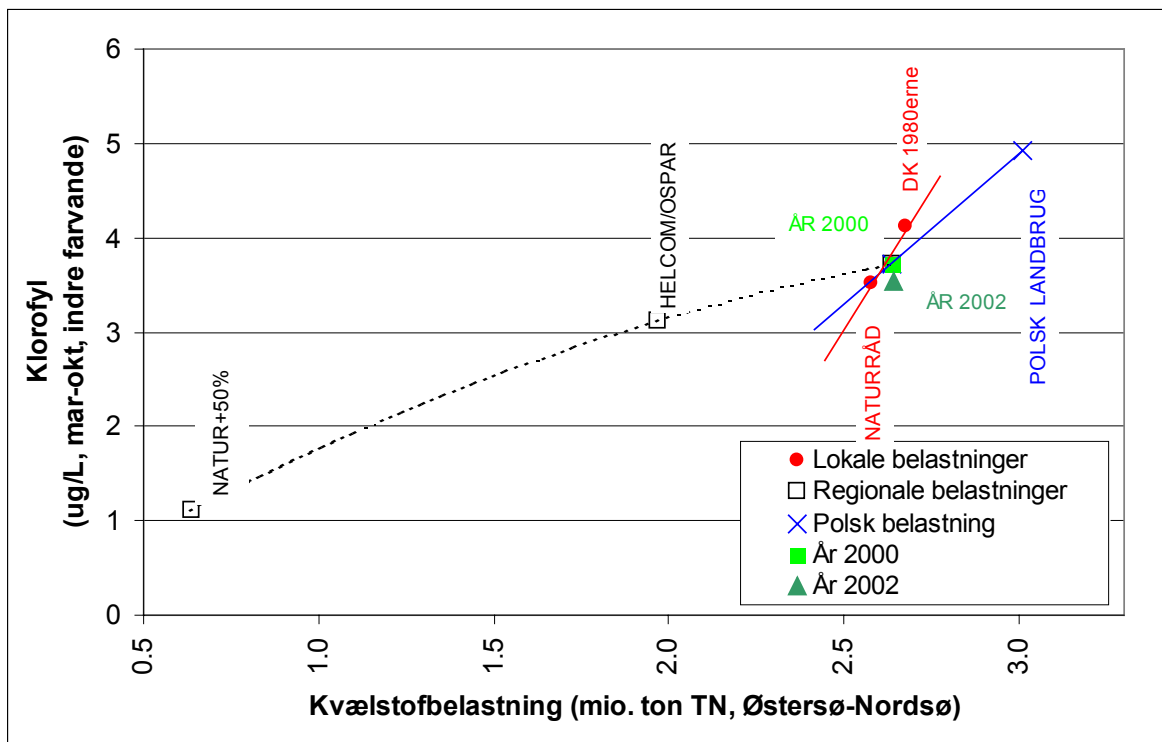
Den generaliserede fremstilling af betydningen af belastningen er derfor gennemført alene baseret på størrelsen af kvælstofbelastningen. Figurerne 5.2-5.5 viser resultaterne.

Bemærk at der i figurerne er indlagt trendlinier. Trendlinien for de lokale belastninger og for polsk belastning er forlænget nedad svarende til ingen belastning for de respektive kilder. Det er således ikke muligt at opnå yderligere reduktion i den samlede belastning via disse kilder end trendlinien viser.

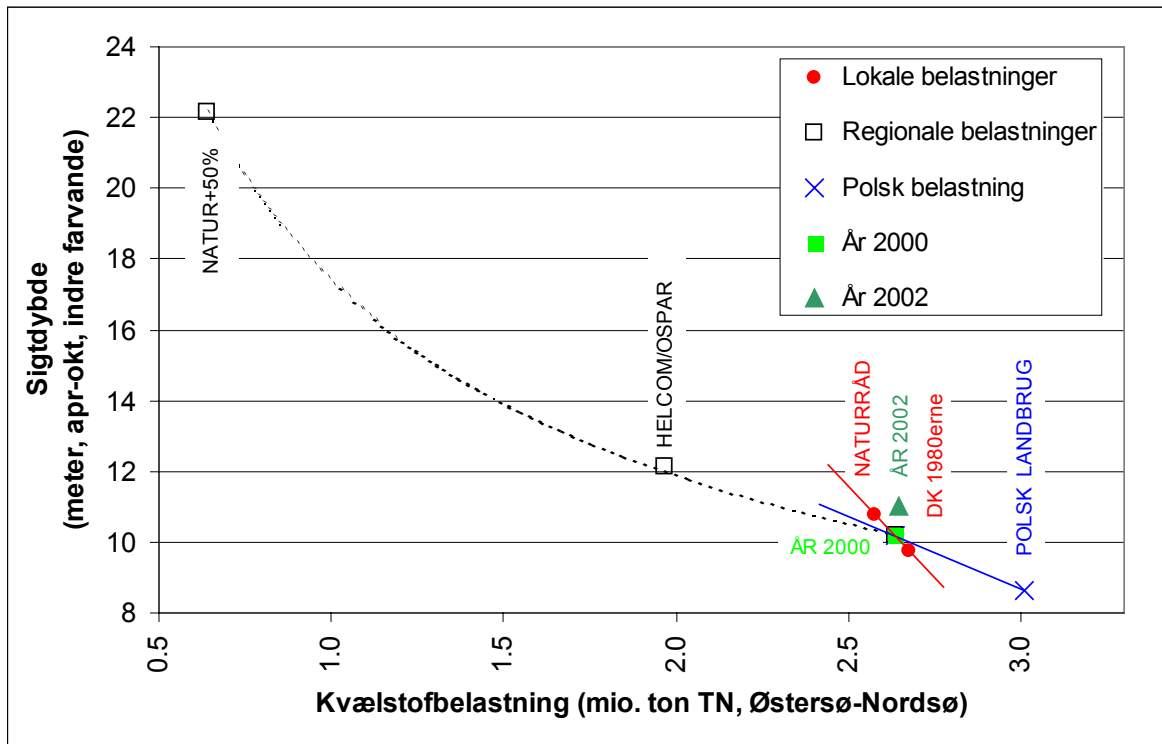
For de regionale scenarier er trendlinien stipleet, idet HELCOM/OSPAR scenariet har reduceret kvælstofbelastningen forholdsvis mest i Nordsøen, da Østeuropa af andre grunde i dag allerede har reduceret belastningen og således pt. ikke mangler så meget i at opfylde 50% reduktionsmålet i HELCOM. Sammenholdes dette med at effekten for forholdene i de indre farvande af reduktioner i Østersøen er større end af Nordsø reduktioner, repræsenterer HELCOM/OSPAR scenariet således ikke en optimal reduktionsindsats. Dette viser sig også ved at trendlinien er hul.

Generelt ses det, at lokale begrænsninger i tilledningen (danske, svenske og tyske reduktioner til de indre farvande) har størst effekt på de operationelle effektmål.

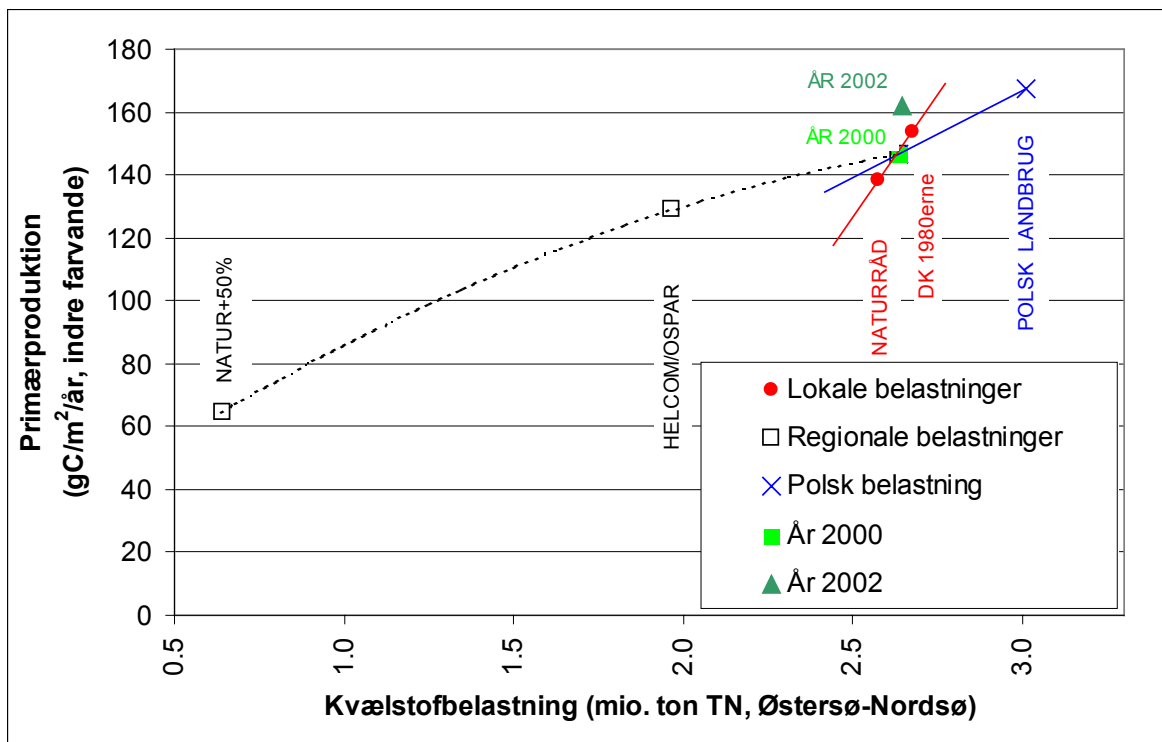
Figur 5.2 - Betydningen af kvælstofbelastningen for middelværdien af klorofylkoncentration i de indre farvande.



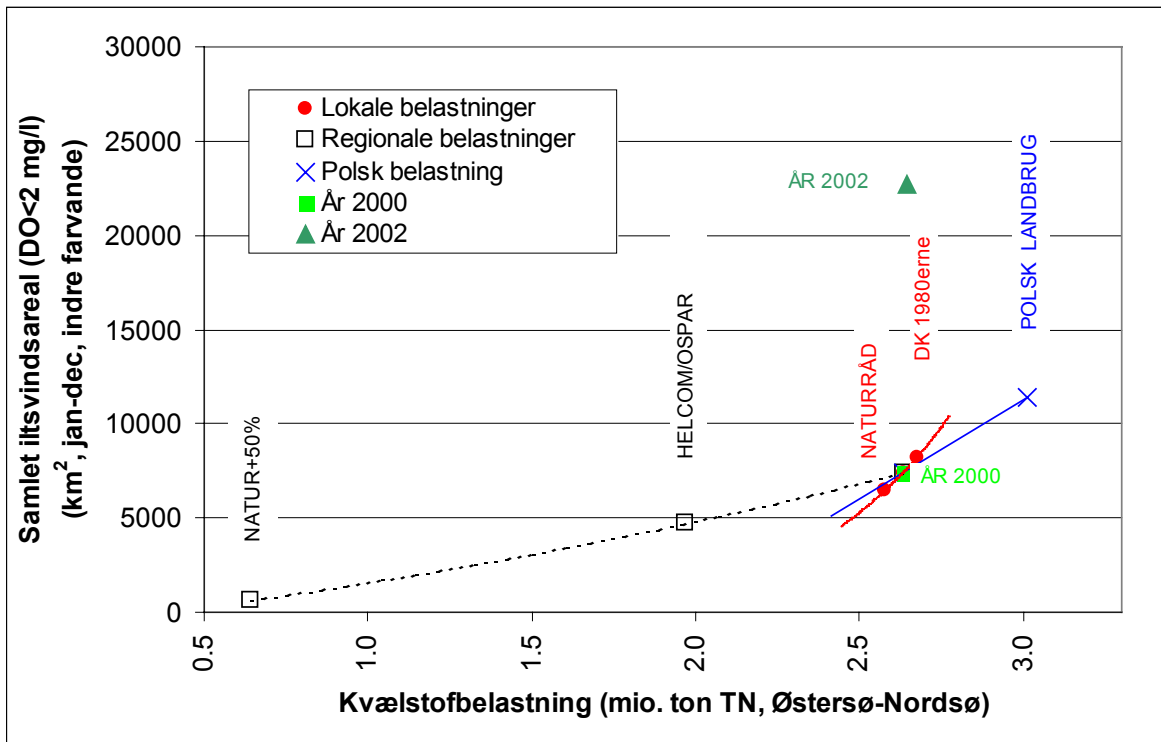
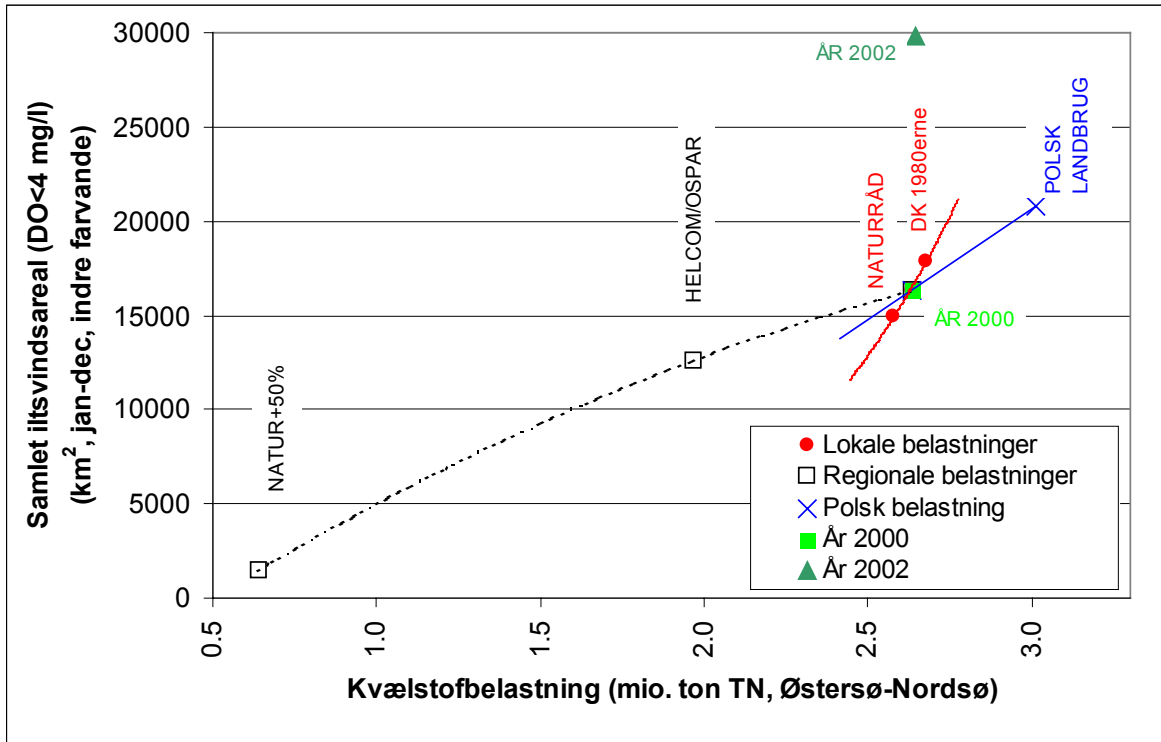
Figur 5.3 - Betydningen af kvælstofbelastningen for middelværdien af sigtdybde i de indre farvande.



Figur 5.4 - Betydningen af kvælstofbelastningen for middelværdien af primærproduktion i de indre farvande.



Figur 5.5 - Betydningen af kvælstofbelastningen for det årlige iltvindssareal i de indre farvande. Øverst: 4 mg/l kriteriet. Nederst: 2 mg/l kriteriet.



5.4 Diskussion

Samlet viser scenarieanalyserne, at væsentlig forbedring af iltforholdene i de indre (danske) farvande ikke kan opnås alene ved danske virkemidler (og heller ikke i kombination med lokale svenske og tyske virkemidler).

En forbedring på mere end 50% i iltvindets udbredelse kræver en kombination af både danske, svenske og tyske indgreb over for den lokale belastning og indgreb over for regionale kilder i øvrigt, herunder atmosfæredepositionen.

Det ses endvidere, at forøgelse i polsk belastning vil kunne reducere eller ligefrem mere end ophæve positive effekter af lokale belastningsreduktioner. Det skal bemærkes at scenariet med polsk landbrug mere skal betragtes som et hypotetisk scenario, idet det ikke bygger på en egentlig forventet fremskrivning af polsk landbrug, men en simpel antagelse om samme arealspecifikke belastning som for dansk land som helhed pr. 2000.

Endelig viser en sammenligning af år 2000 resultaterne med simuleringen for året 2002, at variationen i meteorologiske forhold fra år til år har en betydning for iltvindet, som er større end effekten af de undersøgte scenarier. Det skal samtidig bemærkes, at det må forventes at effekten af begrænsninger i belastningen også vil være større for et kritisk år som 2002 end for det mere typiske år 2000.

De beregnede forhold i de enkelte belastningsscenarier er behæftet med relativt stor usikkerhed. Det er dog en stor støtte for resultaterne, at de beregnede forhold i *Naturbelastning+50%* scenariet er i rimelig god overensstemmelse med forventningerne for dette meget radikale scenario.

Ved scenarieberegninger, hvor resultaterne sammenlignes med resultatet fra en referenceberegning (her året 2000), er bidraget til usikkerheden fra skalaproblemet omtalt under diskussionen af kalibreringen og valideringen (afsnit 4.3) elimineret. Samtidig sikrer den procesbaserede tilgang i modellen et godt grundlag for scenarieberegninger. Det må derfor forventes, at scenarieresultaterne relativt set er beskrevet med væsentlig mindre usikkerhed end de fundne absolutte afvigelser i kalibreringen og valideringen.

Generelt vurderes usikkerheden på de fundne scenarieeffekter at være af størrelsen "den absolutte afvigelse i forhold til den absolutte effekt". Dette betyder f.eks.

at med en afvigelse mellem målt og modelkoncentration på 1,5 mg/l i kalibreringen, i forhold til en ilt-sækning på 7 mg/l (fra mætning til 2 mg/l), fås 20% usikkerhed på kalibreringen og tilsvarende en usikkerhed på scenarieeffekten på 20% af effekten.

Den største usikkerhed i de fundne effekter forventes at ligge i resultaterne for sigtddybde, idet denne parameter har en tendens til systematisk at være overvurderet på flere kalibreringsstationer.

Usikkerheden hidrørende fra den manglende viden om biotilgængeligheden af totalkvælstoffet i Østersøen (og Nordsøen) påvirker analysens resultater i den retning, at en mindre biotilgængelig fraktion end den antagede værdi vil gøre forholdene i de indre farvande mere afhængigt af de lokale kilder og mindre af belastningen fra de regionale kilder. Omvendt vil en højere bioaktiv fraktion betyde, at de lokale kilders betydning reduceres.

Nærværende undersøgelses resultater kan sammenlignes med tidligere analyser af betydningen af belastningen for eutrofieringsforholdene i de indre farvande. I VKI (1984) blev rapporteret en analyse baseret på en simpel boksmodel. Her fandtes, at 50% reduktion i den danske belastning ville give mindst 7% reduktion i primærproduktionen og at international reduktion på 50% ville give ca. 25% reduktion i primærproduktionen. Nærværende analyse giver lidt højere effekter på primærproduktionen.

VMI (1987) fandt med en simpel en-boks model frem til at den antropogene effekt på iltkoncentrationen i bundvandet i de indre danske farvande var en sækning på ca. 2 mg/l, og at Vandmiljøplanen ville forbedre iltforholdene i Kattegats bundvand med ca. 0,3 mg/l. Nærværende analyse giver midlet over området lignende resultater, men differentierer effekternes geografiske fordeling og dermed betydningen væsentligt.

I DHI (1994) blev anvendt en 2-lags kanalmodel (MIKE12) til analyserne. Analysen gav at Vandmiljøplanen ville resultere i 0,6 mg/l højere minimal bundiltkoncentration i middel for de indre danske farvande og at den tilsvarende forbedring ville være 1,6-1,8 mg/l for en generel 50% reduktion af lokal og international belastning fra land kombineret med 30% reduktion i atmosfæredepositionen. De tilsvarende forbedringer i nærværende undersøgelse er ca. 0,3 mg/l og 1,5 mg/l.

Nærværende undersøgelse giver således ikke væsentlige afvigelser fra tidligere estimater af belastningens betydning, men giver en geografisk fordeling af effekterne og en mere direkte repræsentation af iltsvindsproblemet ved at beregne effekterne på iltsvindsarealet. Samtidig er den baseret på en samlet model for hele Nordsøen/Østersøen og repræsenterer derfor effekter af de internationale reduktioner på en mere konsistent måde.

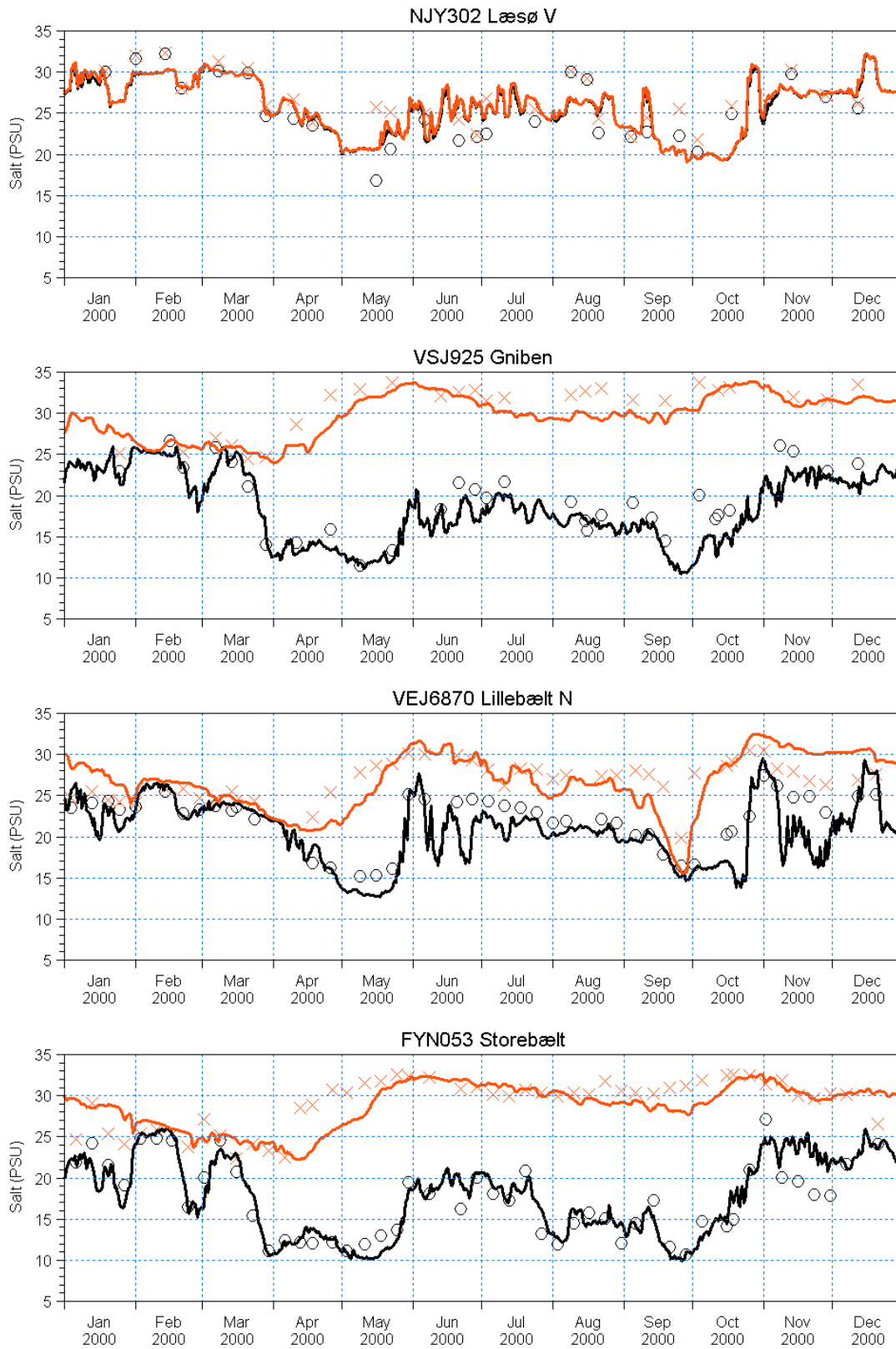
R E F E R E N C E L I S T E

- DMU 2001a: *Marine områder 2000 – Miljøtilstand og udvikling, NOVA 2003*. Faglig rapport fra DMU nr. 375. December 2001
- DMU 2002a: *Marine områder 2001 – Miljøtilstand og udvikling, NOVA 2003*. Faglig rapport fra DMU nr. 419. December 2002
- DMU 2003a: *Modeller til beskrivelse af iltvind. Analyse af data fra 2002*. Jacob Carstensen (DMU) og Anders Christian Erichsen (DHI) Faglig rapport fra DMU nr. 445. Juni 2003
- DHI 2000a: *Farvandsmodellen, modeletablering*. DHI for Miljøstyrelsen, April 2000
- DHI 2002a: *Baltic Sea –North Sea Transition Area, Environmental Status Year 2000. NO COMMENTS Project, Nordic Council of Ministers*. Technical Note. DHI, August 2002
- DHI 2003a: *Baltic Sea –North Sea Transition Area, Environmental Status Year 2001. NO COMMENTS Project, Nordic Council of Ministers*. Technical Note, DHI, February 2003
- DHI 2003b: *MIKE 3 Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography, Hydrodynamic Module, Scientific Documentation*, DHI Software 2003
- DHI 2003c: *MIKE 3 Estuarine and Coastal Hydraulics and Oceanography, Eutrophication Module, Scientific Documentation*, DHI Software 2003
- DHI 2003d: *VMP III & Havmiljøet. Nationale målsætninger & rammebetingelser. Notat til VMP processen*. Karl Iver Dahl-Madsen, februar 2003
- HELCOM 1987: *First Baltic Sea Pollution Load Compilation. Helsinki Commission, Baltic Sea Environment Protection Commission*. Baltic Sea Environment Proceedings No. 20, 1987
- HELCOM 2002a: *Environment of the Baltic Sea 1994-98. Helsinki Commission, Baltic Sea Environment Protection Commission*. Baltic Sea Environment Proceedings No. 82B, December 2002
- FEI 2002a: *Evaluation of the Implementation of the Ministerial Declaration regarding Nutrient Load Reductions in the Baltic Sea Catchment Area*. Ain Lääne

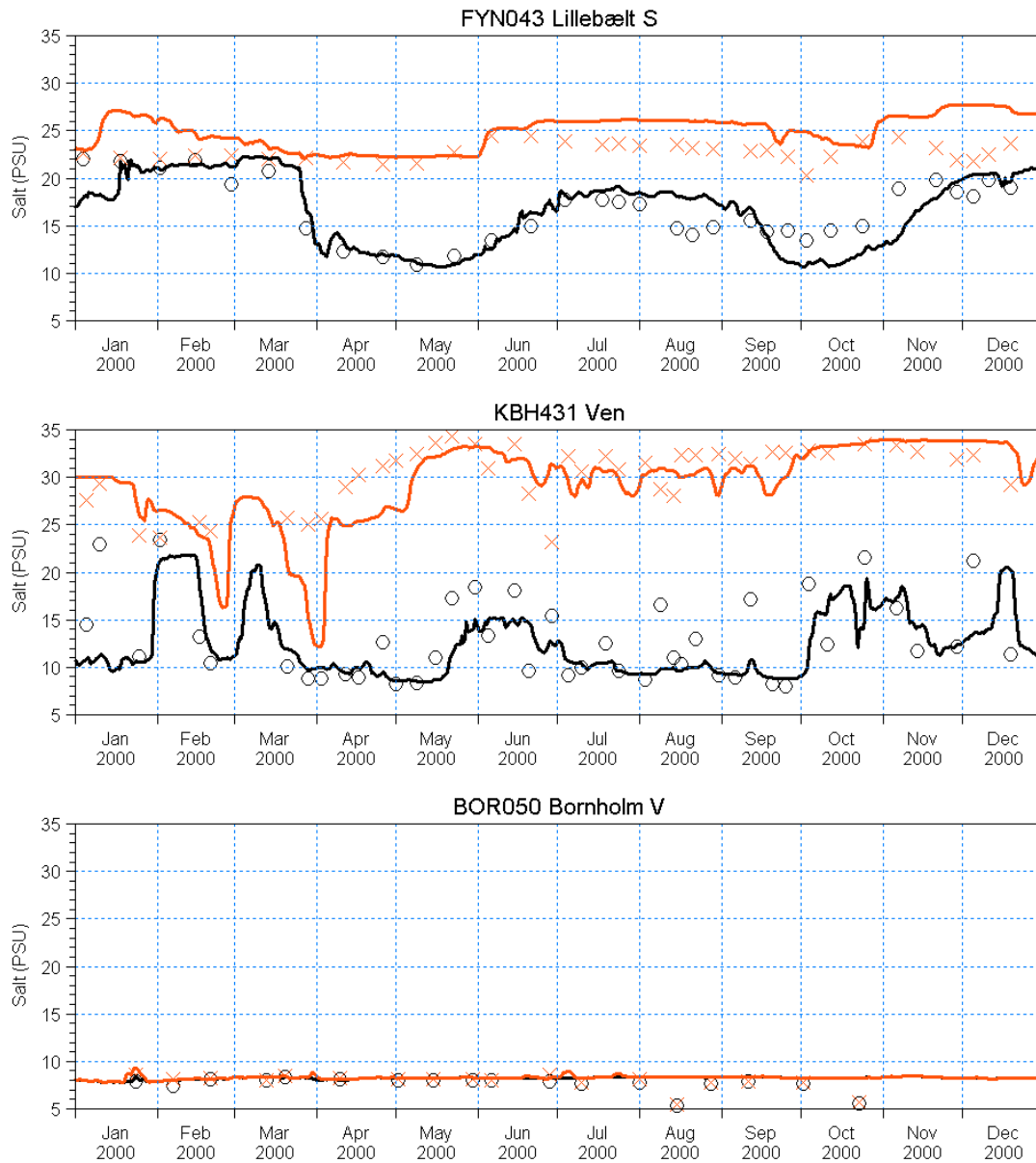
- et al. Finnish Environmental Institute. The Finnish Environment, No. 524 2002.
- OSPAR 2002a: *Data Report on the Comprehensive Study on the Riverine Inputs and Direct Discharges (RID) in 2000*. Assessment and monitoring Series. OSPAR Commission. 2002
- Larsson et al. 1985: *Eutrophication and the Baltic Sea: Causes and Consequences*. Ulf Larsson, Ragnar Elmgren and Fredrik Wulff. AMBIO, Vol XIV, No. 1, 1985
- Kaas et al, 1994: *Biotilgængelighed af kvælstof og fosfor. Kvælstof- og fosforforbindelser tilført Kattegat fra Østersøen og Skagerrak*. Hanne Kaas, Flemming Møhlenberg, Valery Forbes og Britta Pedersen, Danmarks Miljøundersøgelser. Havforskning fra Miljøstyrelsen, Nr. 40, 1994
- VKI (1984): *Modelberegninger for Kattegat*. Vandkvalitetsinstituttet for Miljøministeriet, Miljøstyrelsen. Miljø-projekter, Nr. 59. November, 1984.
- VMI (1988): *Vandmiljøplanen, kvælstoffet og ilten i havet, - årsager til iltvind i havet omkring Danmark og vandmiljøplanens muligheder for at forbedre iltforholdene i havet*. Vandmiljøinstitutterne. November 1988.
- DHI (1994): *Kvæstofreduktioners effekt på iltforhold i indre danske farvande*. Havforskning fra Miljøstyrelsen, nr. 29. 1994

B I L A G

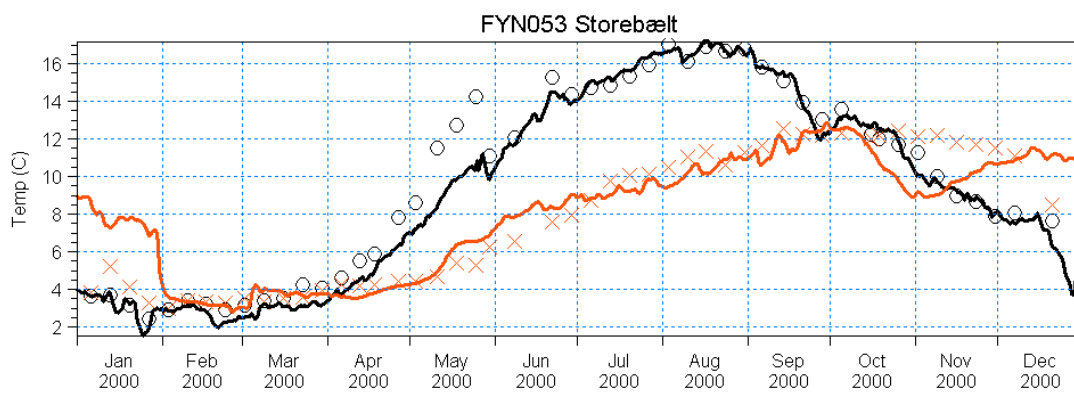
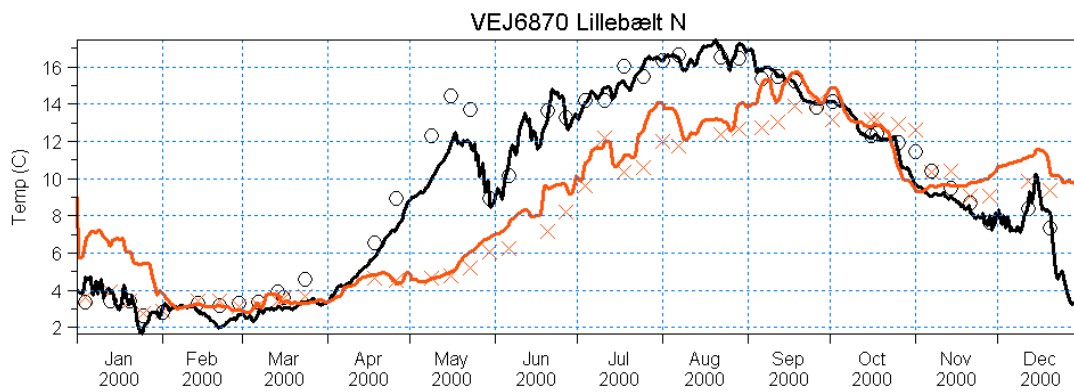
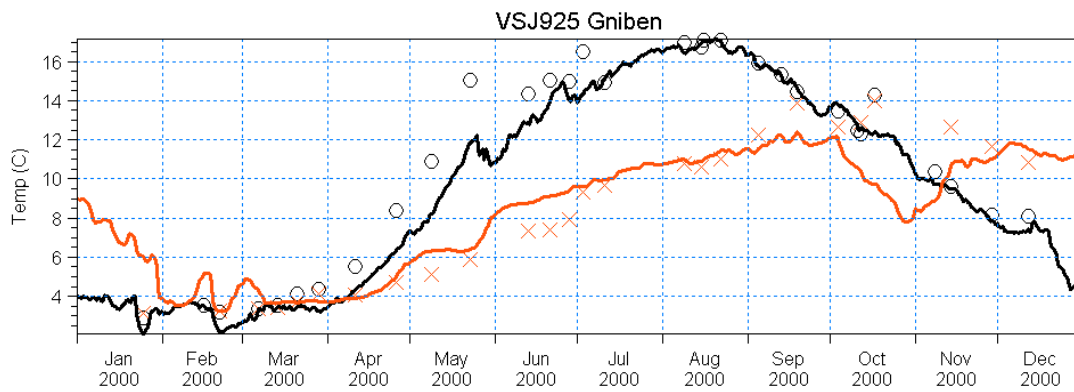
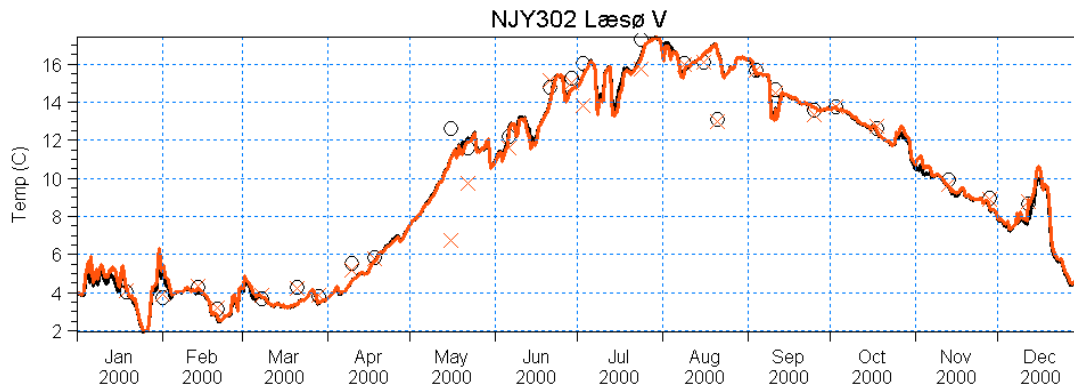
Bilag A Resultater fra kalibreringen år 2000



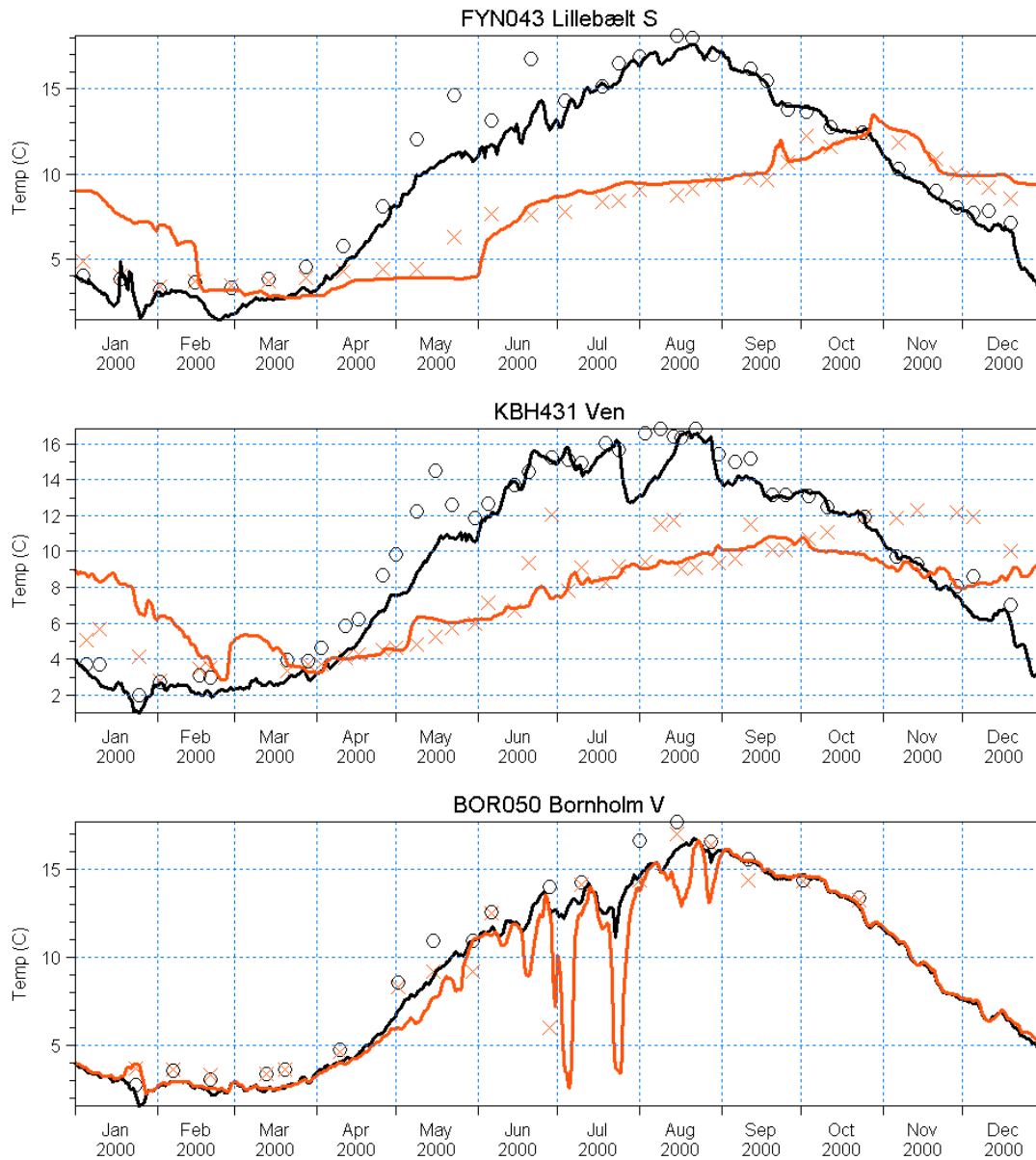
Bilag A.1 Overflade- og bundværdier af saltholdighed fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

**Bilag A.1 (fort.)**

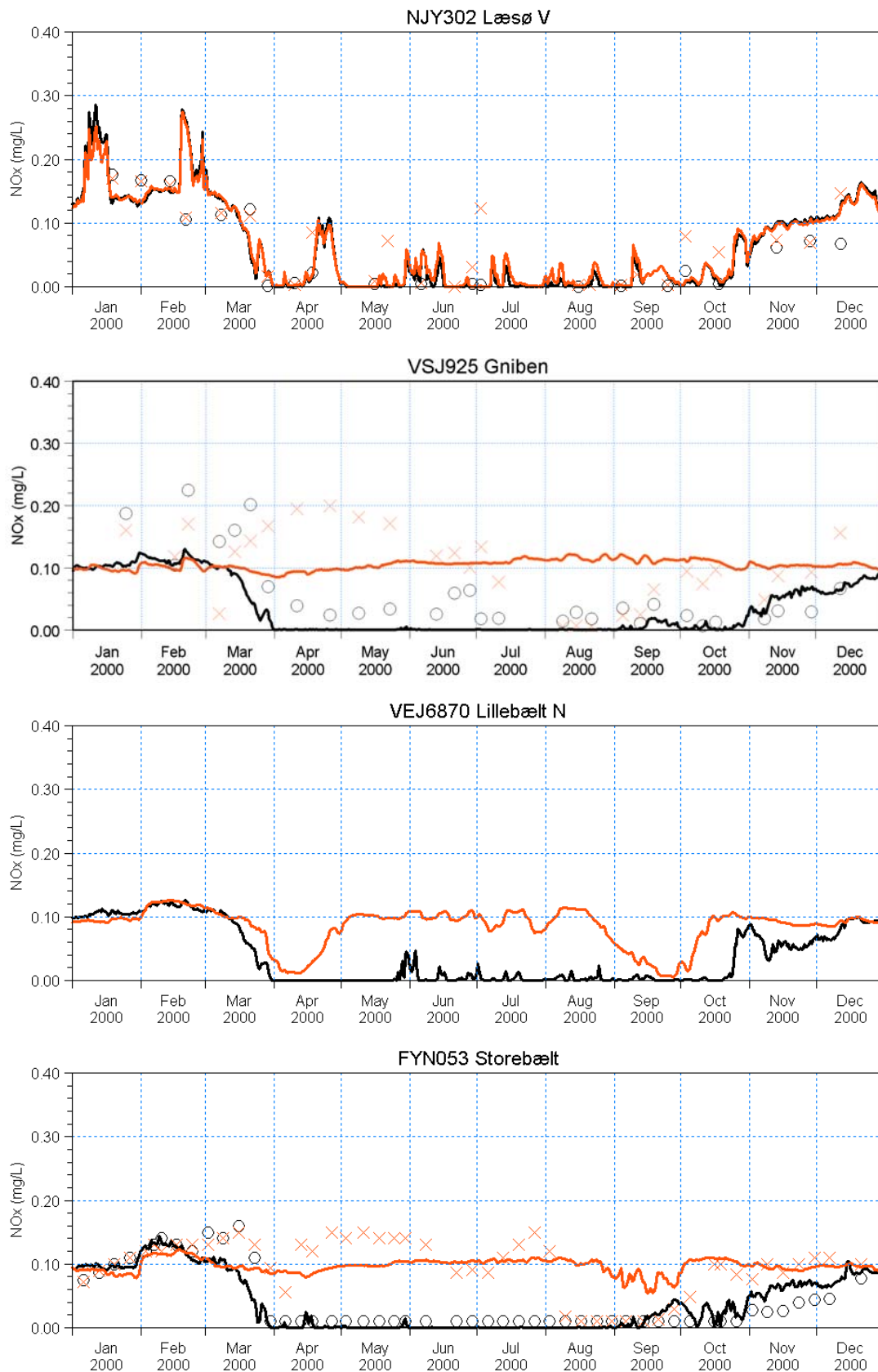
Overflade- og bundværdier af saltholdighed fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)



Bilag A.2 Overflade- og bundværdier af temperatur fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

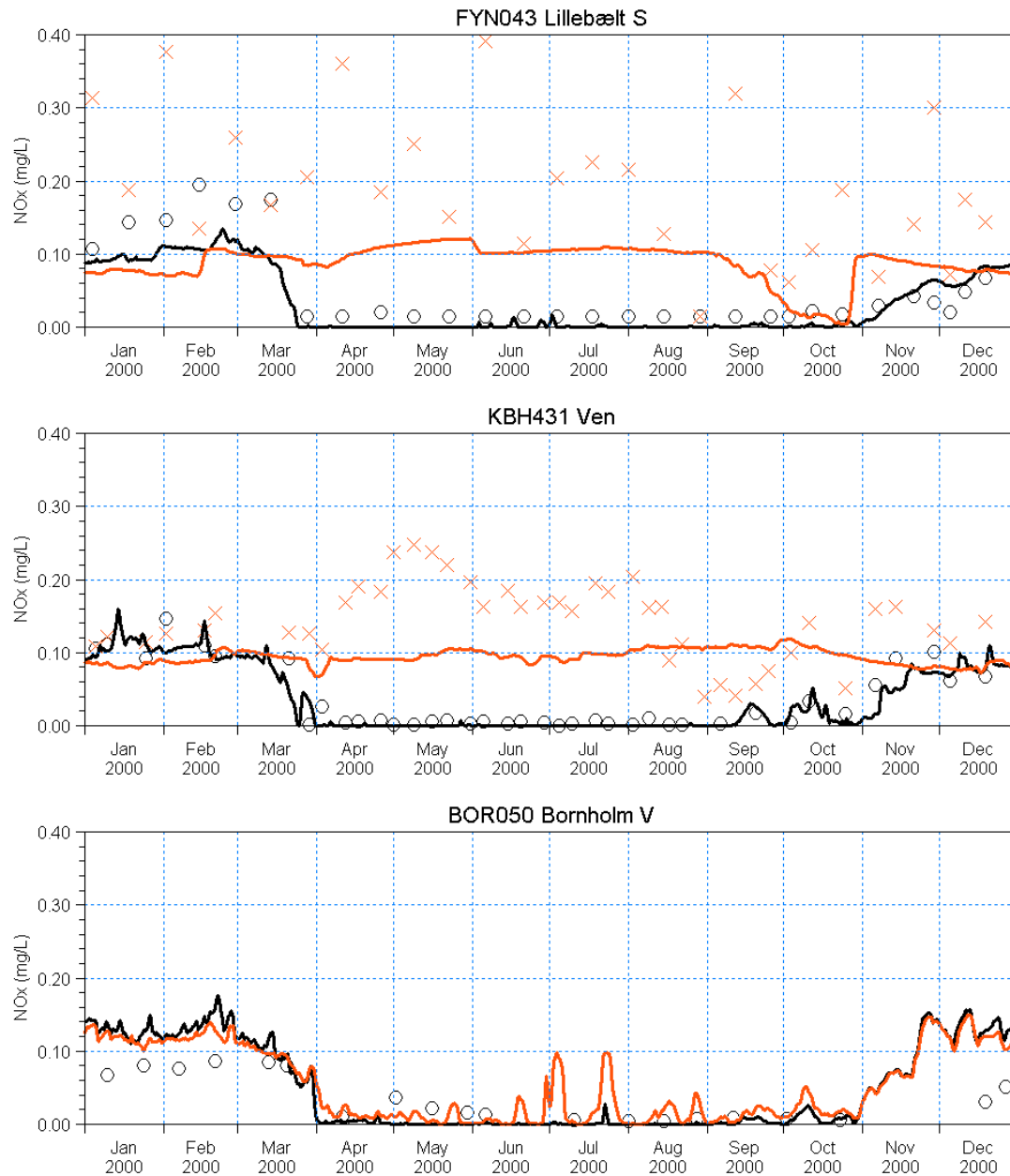
**Bilag A.2 (fort.)**

Overflade- og bundværdier af temperatur fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

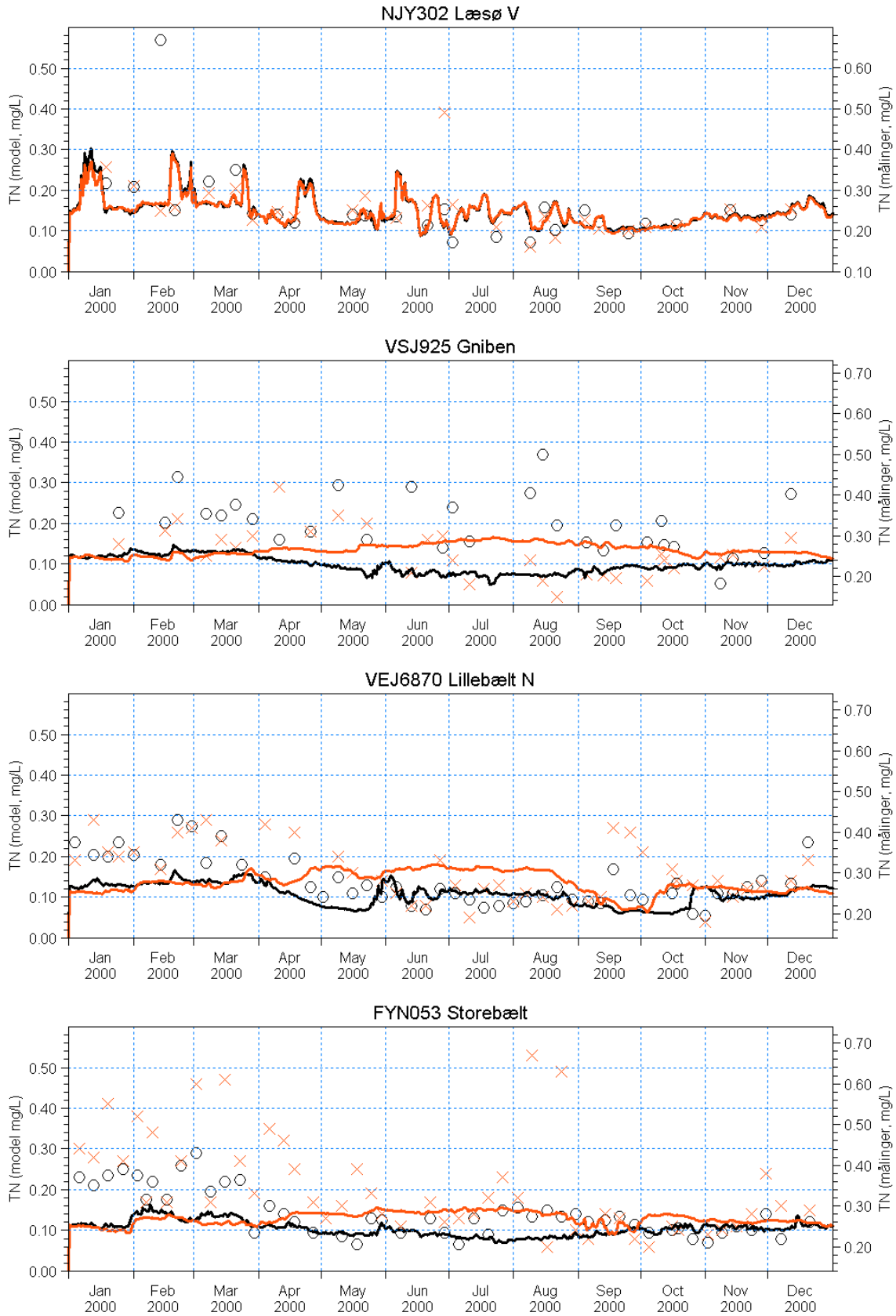


Bilag A.3

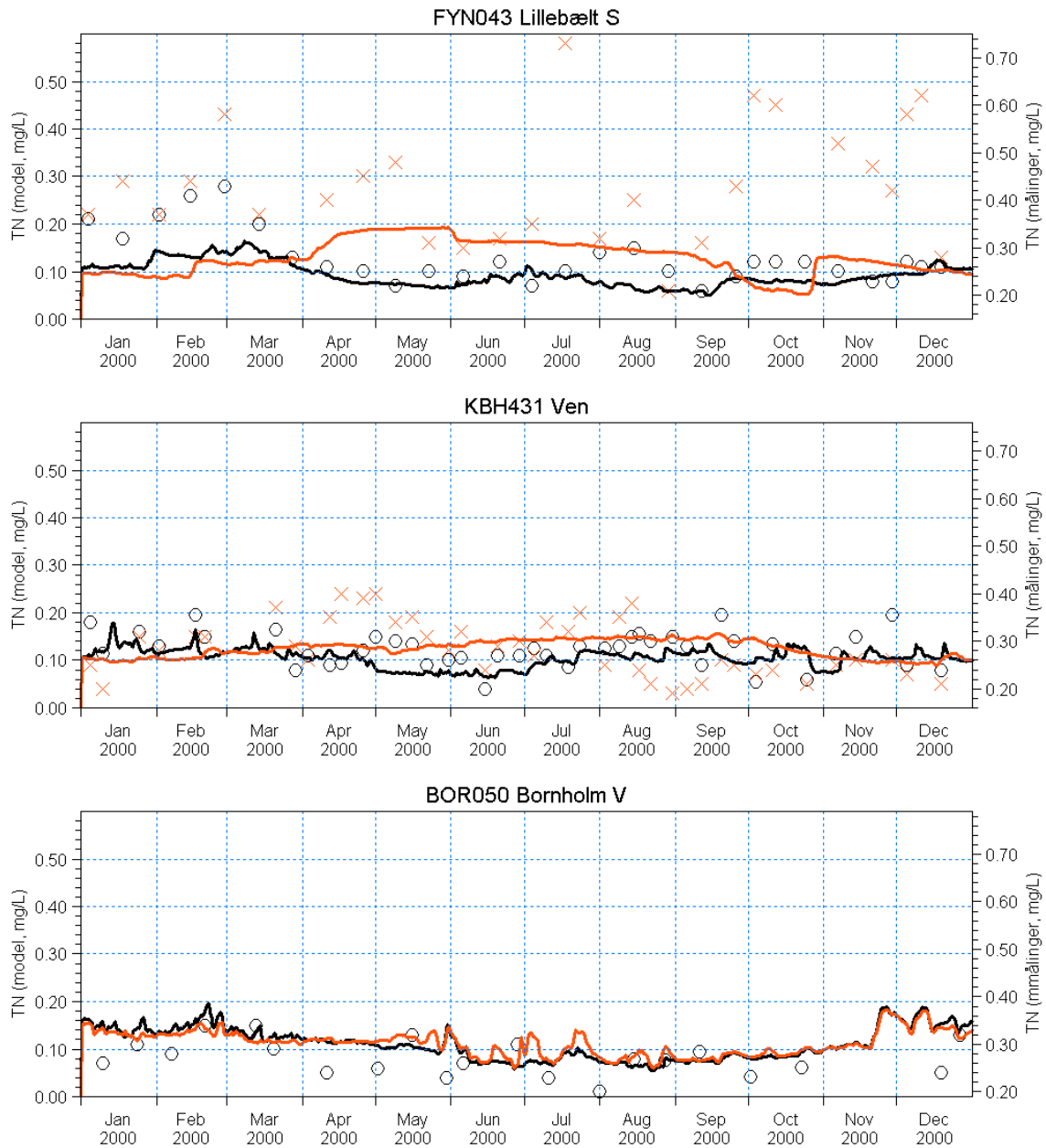
Overflade- og bundværdier af kvælstofoxider (NO) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)



Bilag A.3 (fort.) Overflade- og bundværdier af kvælstofoxider (NO) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

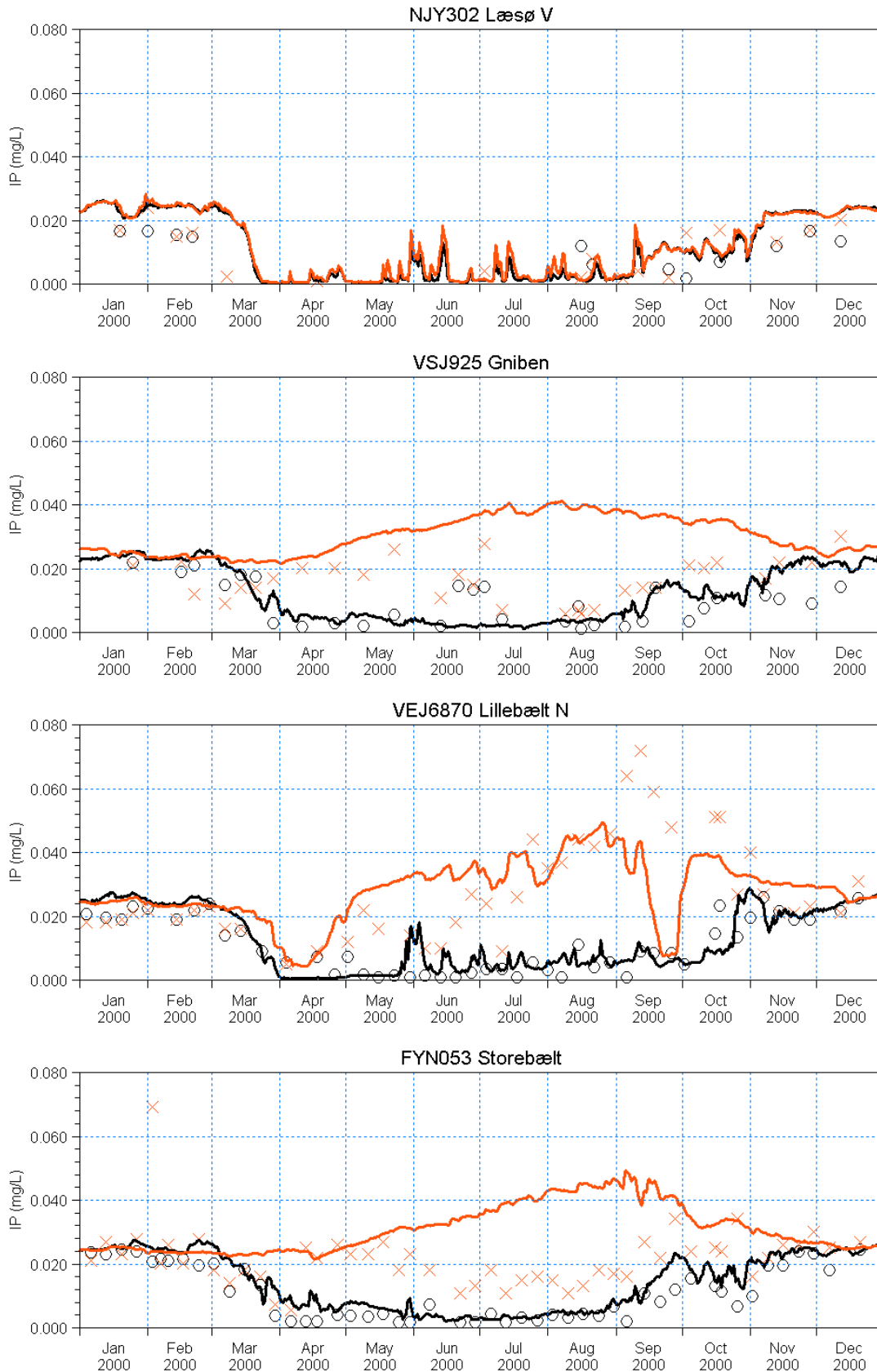


Bilag A.4 Overflade- og bundværdier af totalkvælstof (TN) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

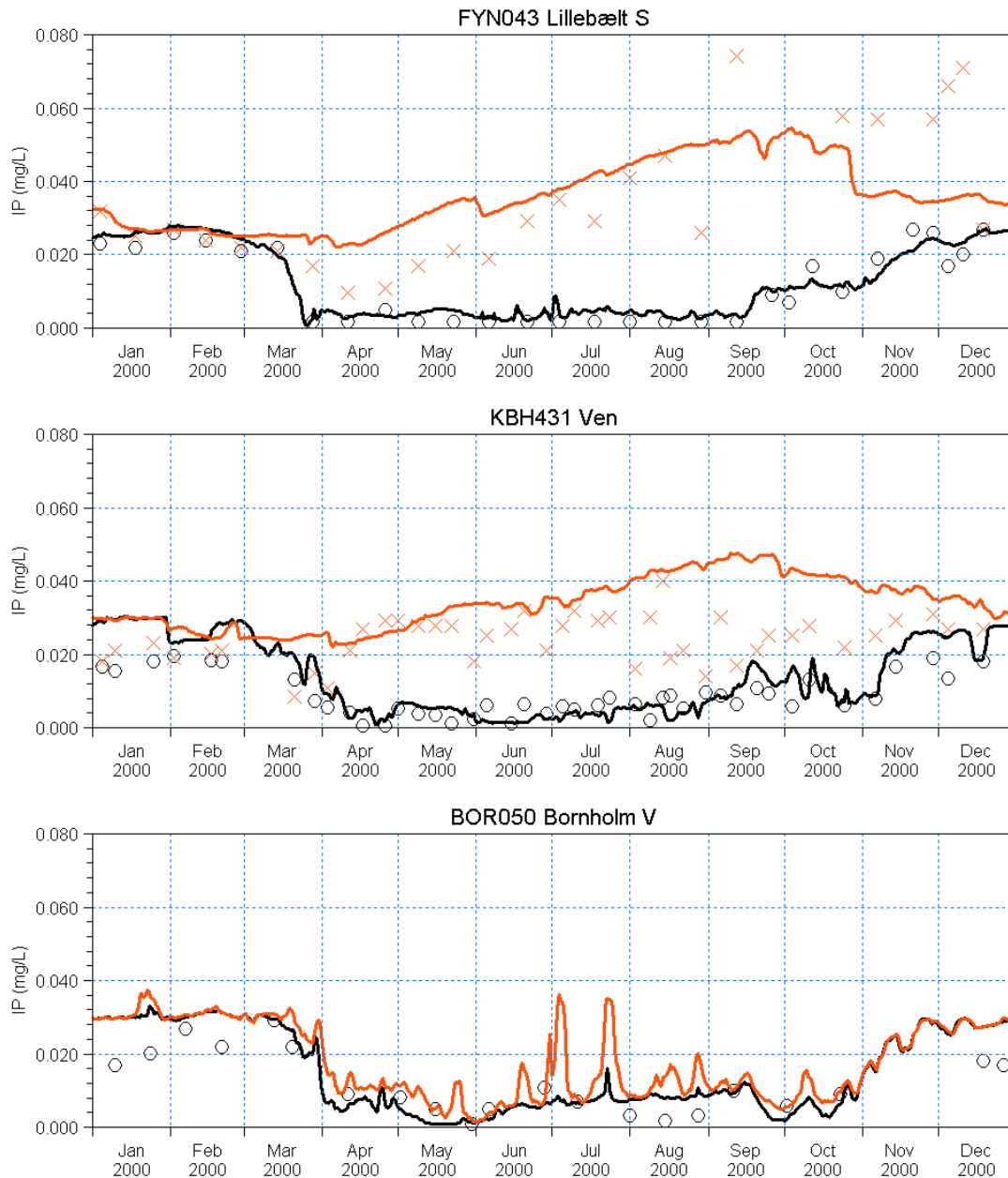


Bilag A.4 (fort.)

Overflade- og bundværdier af totalkvælstof (TN) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

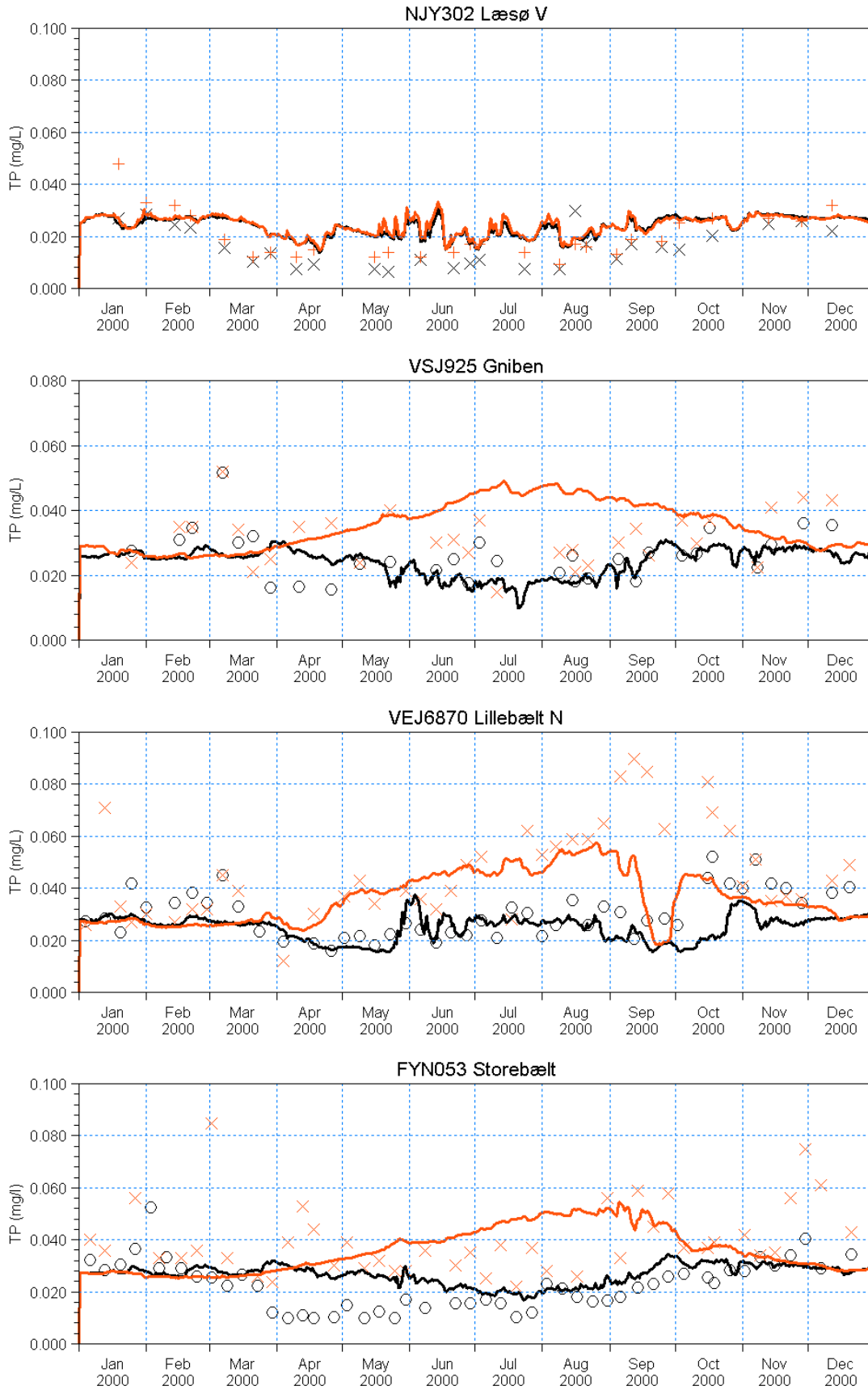


Bilag A.5 Overflade- og bundværdier af fosfat (IP) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

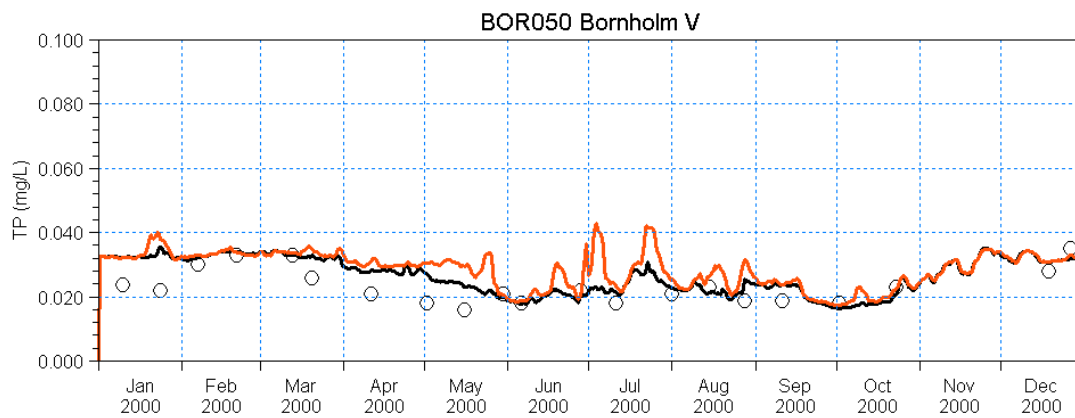
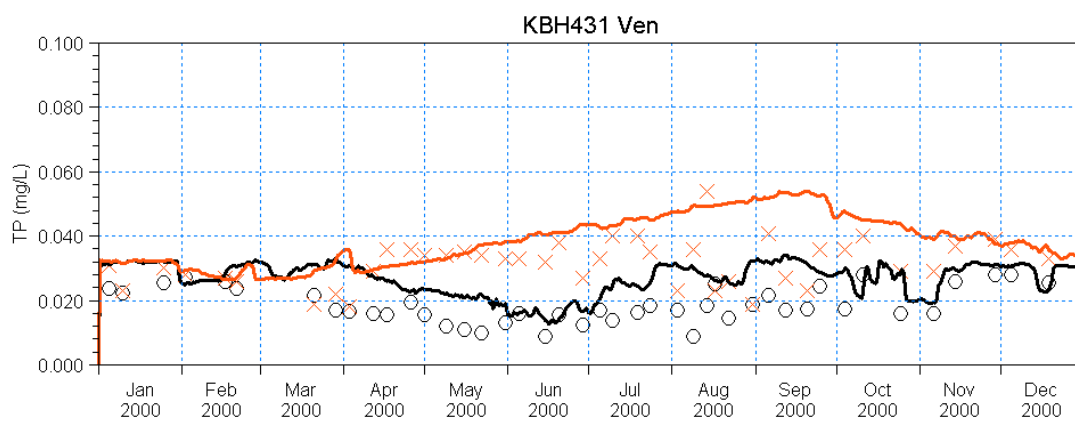
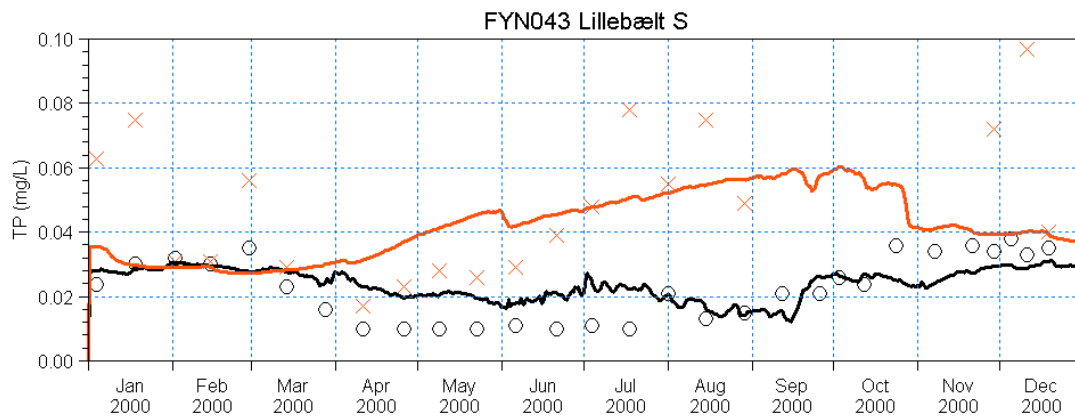


Bilag A.5 (fort.)

Overflade- og bundværdier af fosfat (IP) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

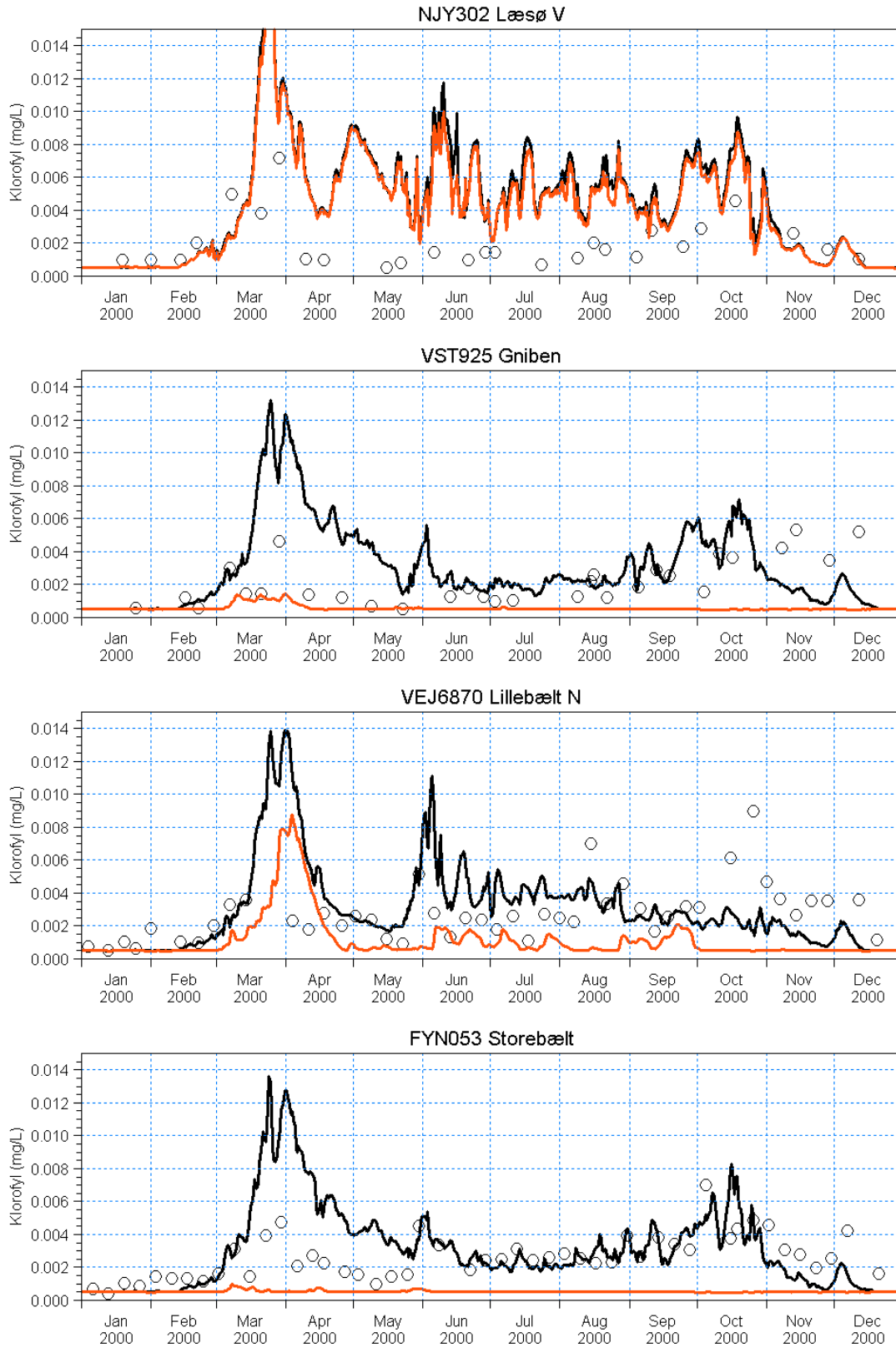


Bilag A.6 Overflade- og bundværdi af totalfosfor (TP) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

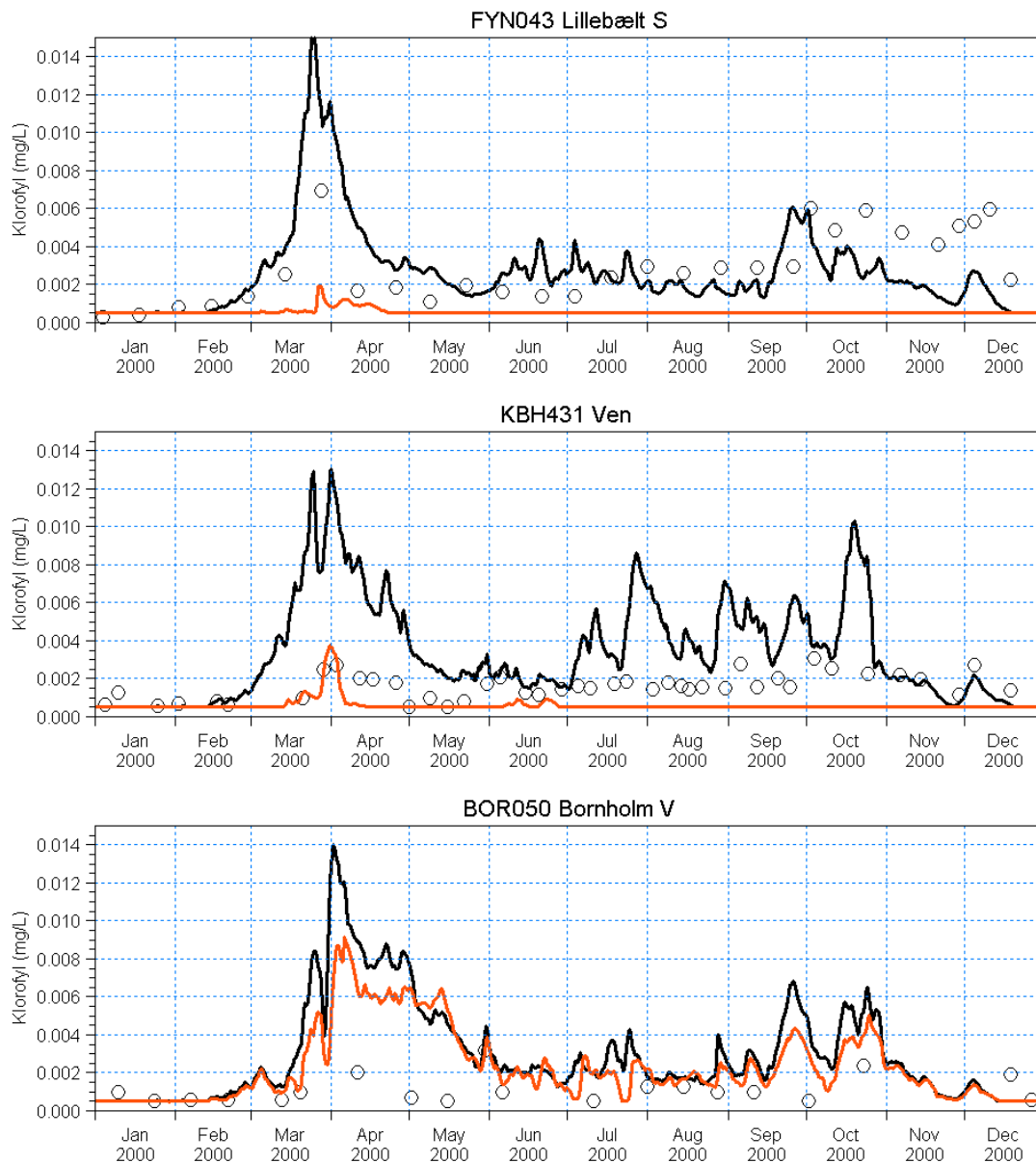


Bilag A.6 (fort.)

Overflade- og bundværdier af totalfosfor (TP) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

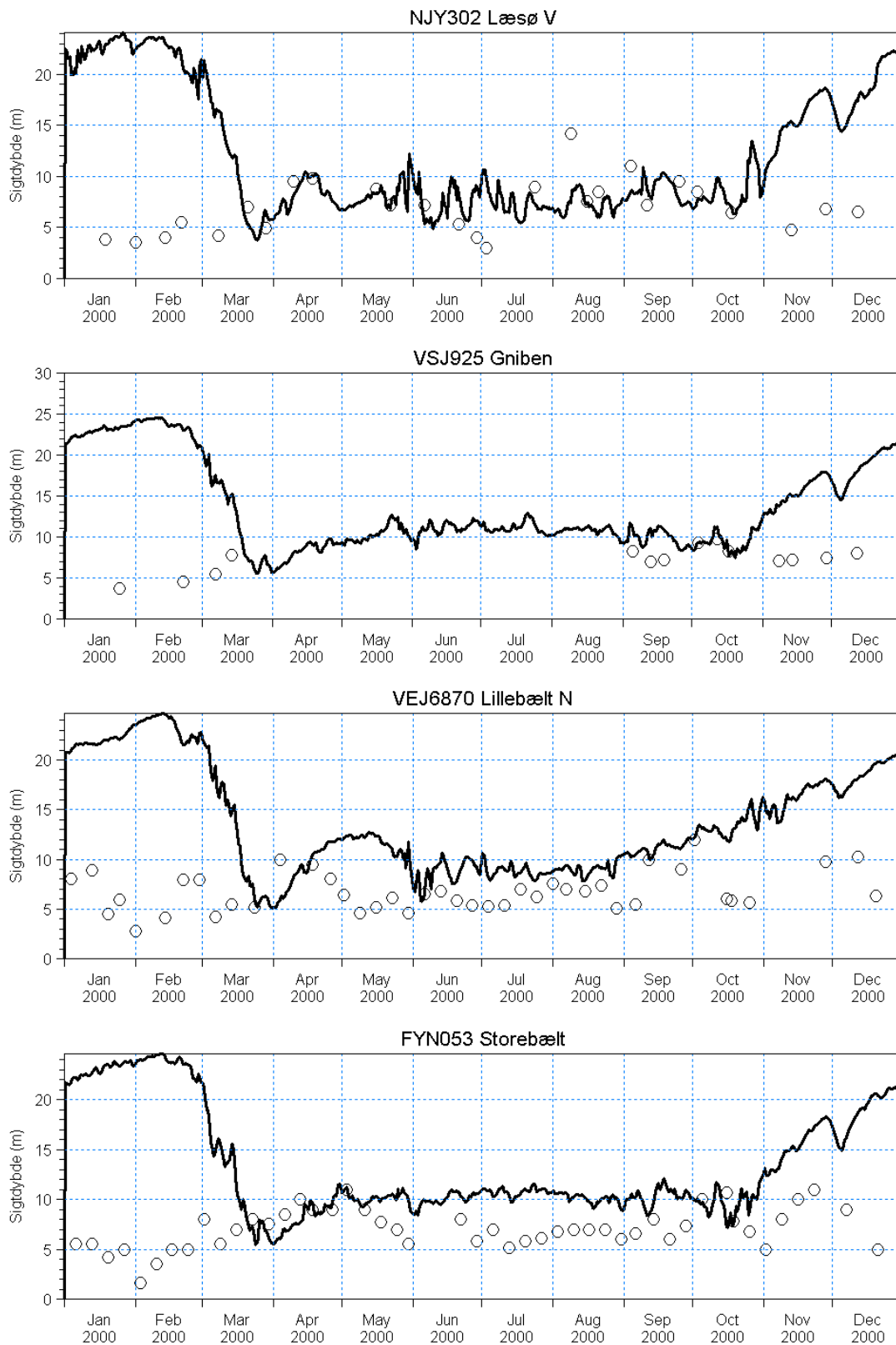


Bilag A.7 Overflade- og bundværdier af klorofyl fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning). Bemærk at Læsø klorofyldata menes at være systematisk fejlbehæftede.

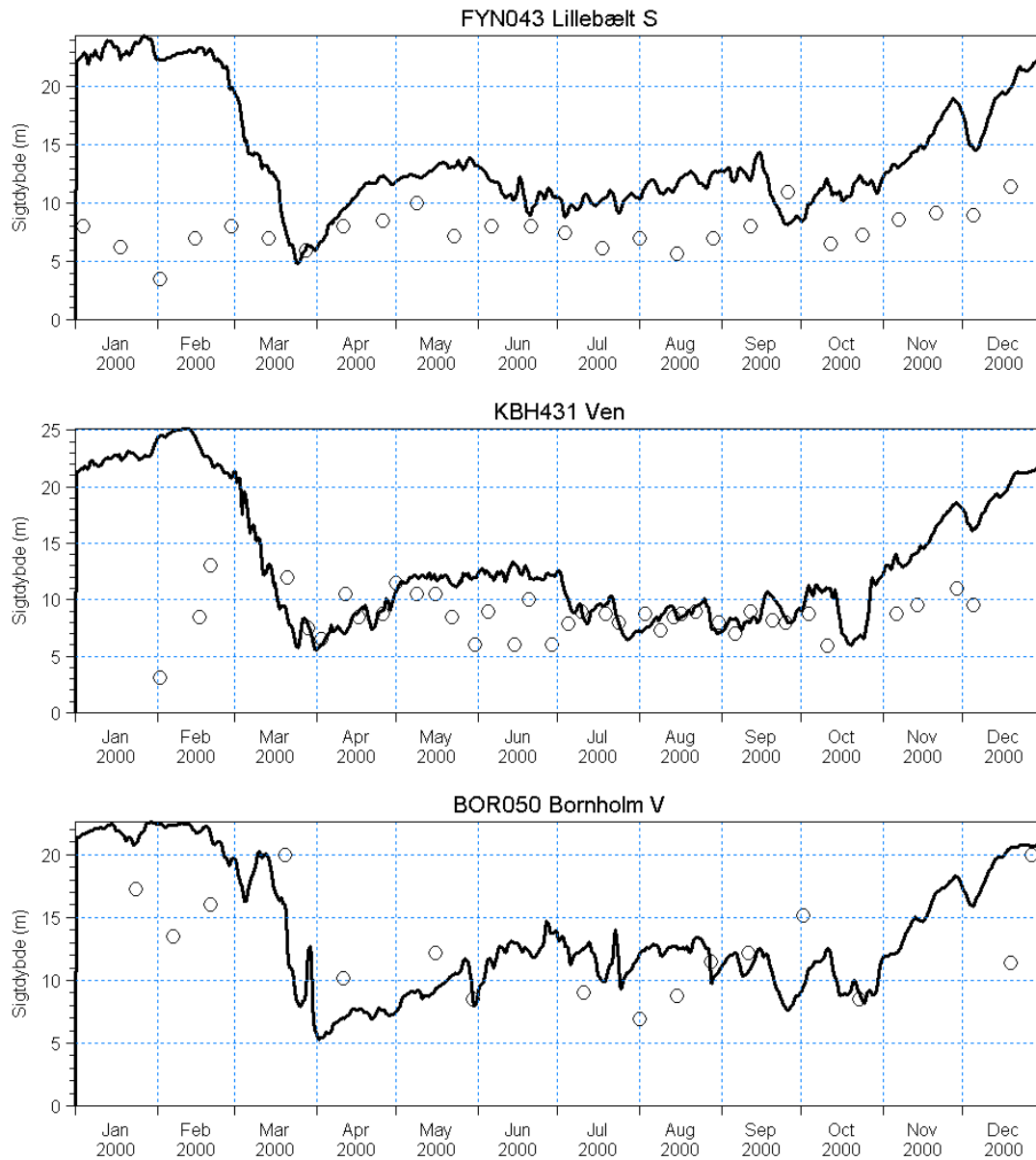


Bilag A.7 (fort.)

Overflade- og bundværdier af klorofyl fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

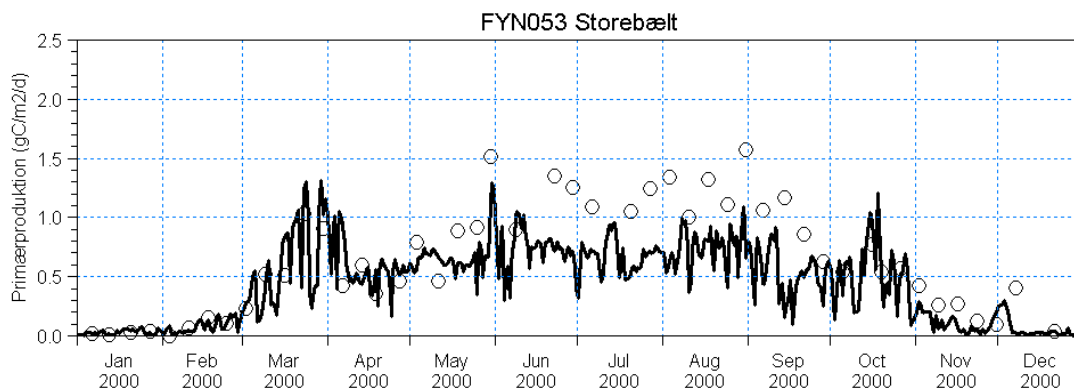
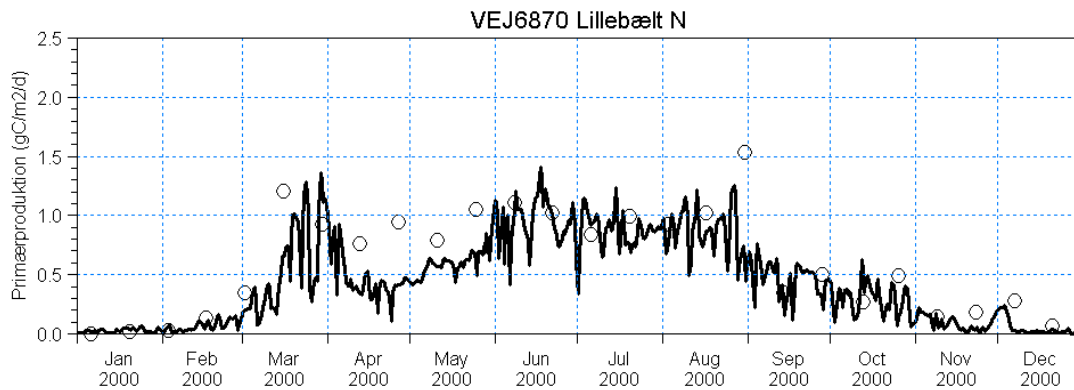
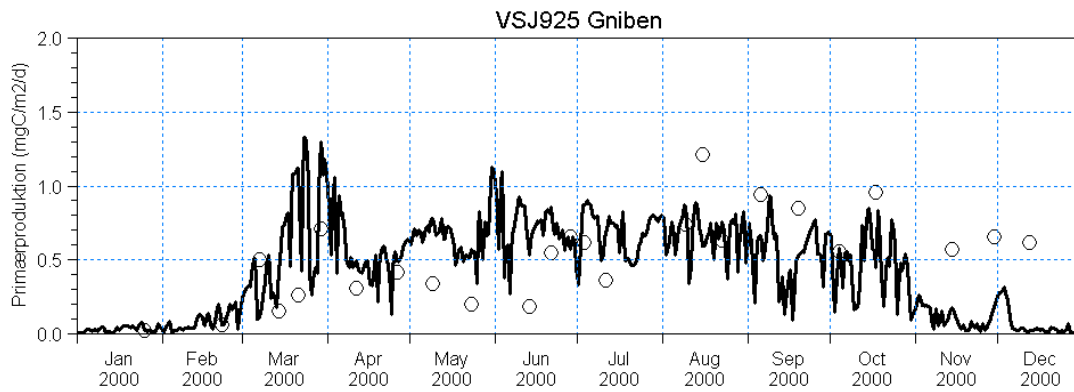
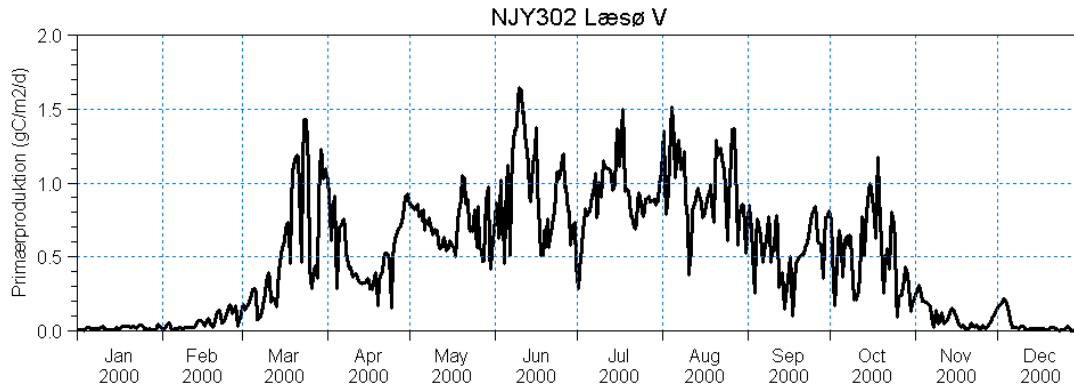


Bilag A.8 Sigtdybde fra model (sort linie) sammenlignet med målinger (sort cirkel). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

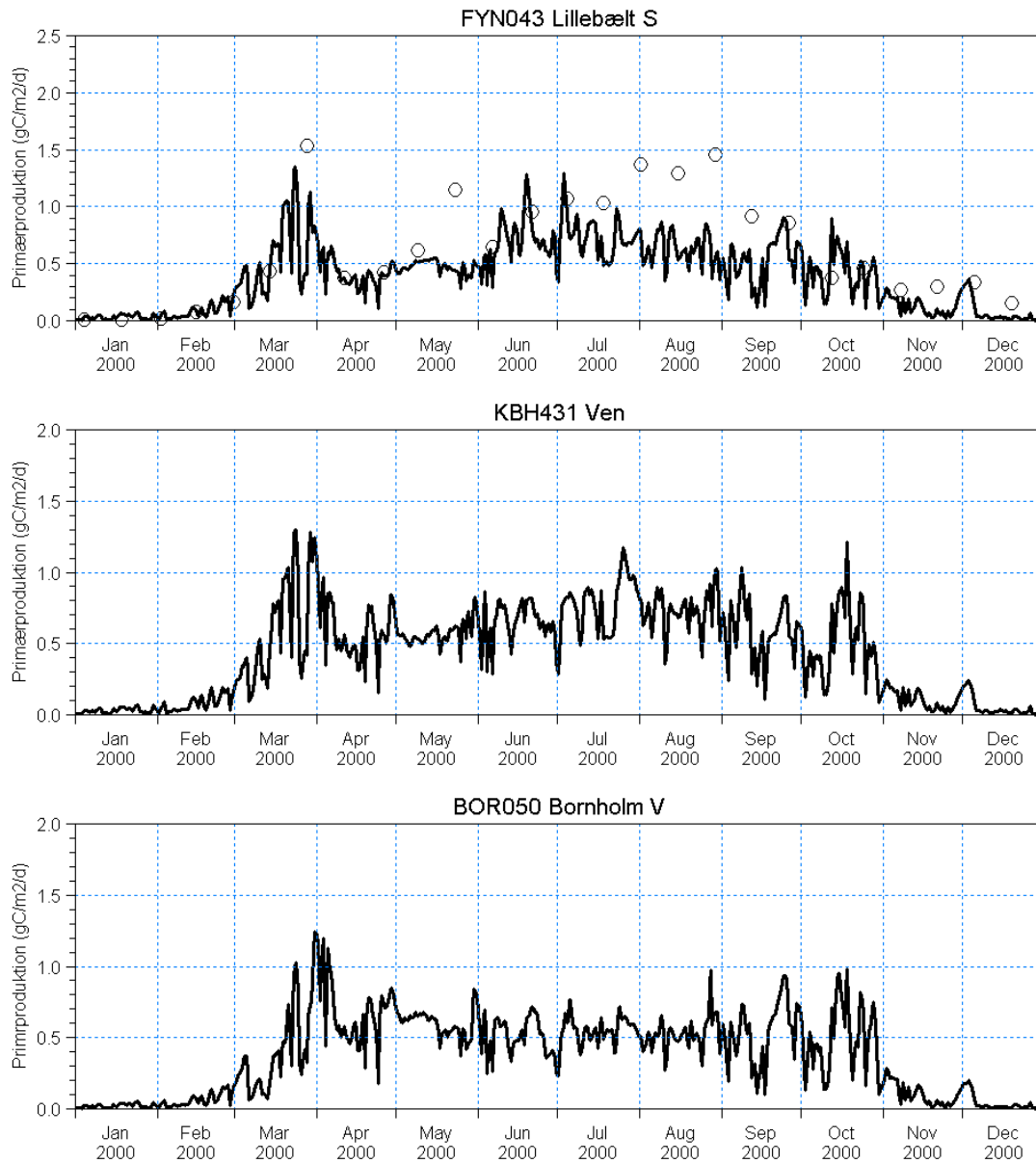


Bilag A.8 (fort.)

Sigdybde fra model (sort linie) sammenlignet med målinger (sort cirkel). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

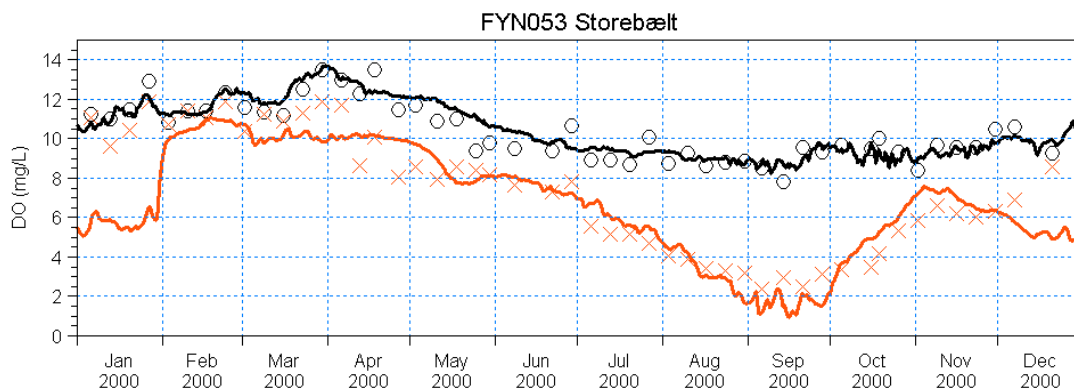
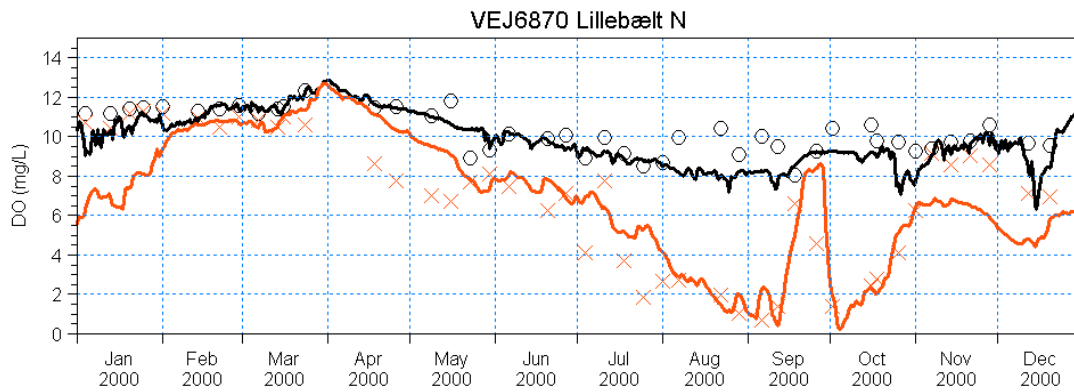
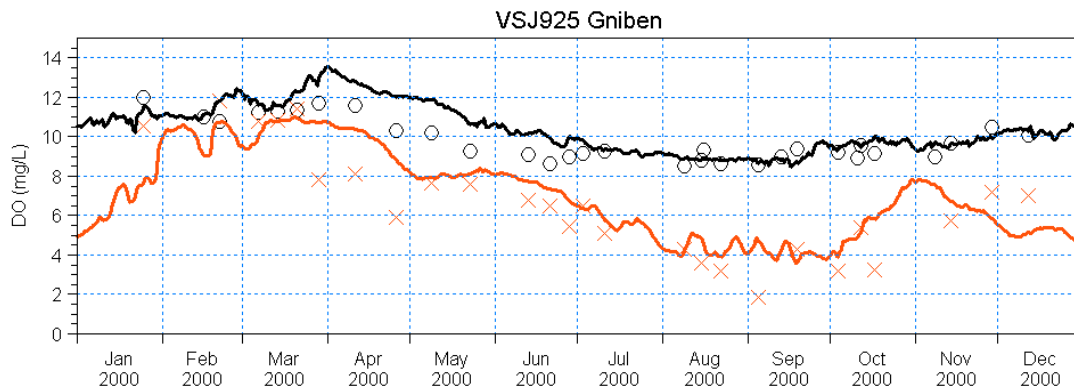
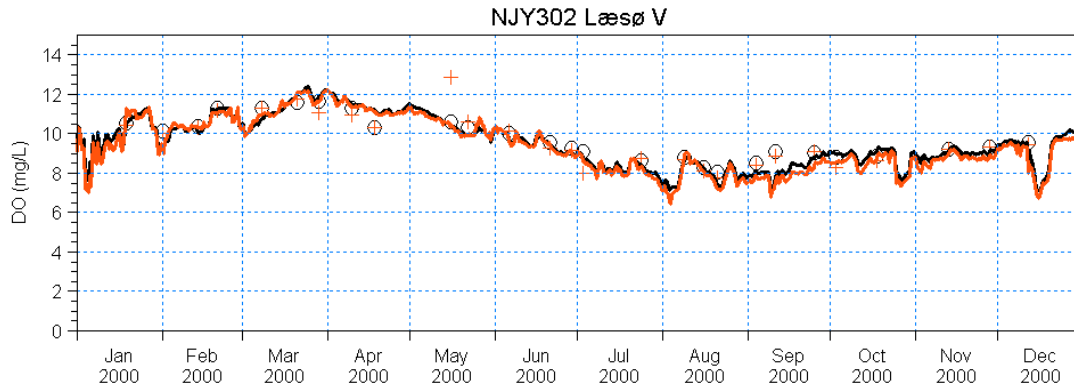


Bilag A.9 Primærproduktion fra model (sort linie) sammenlignet med målinger (sort cirkel). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

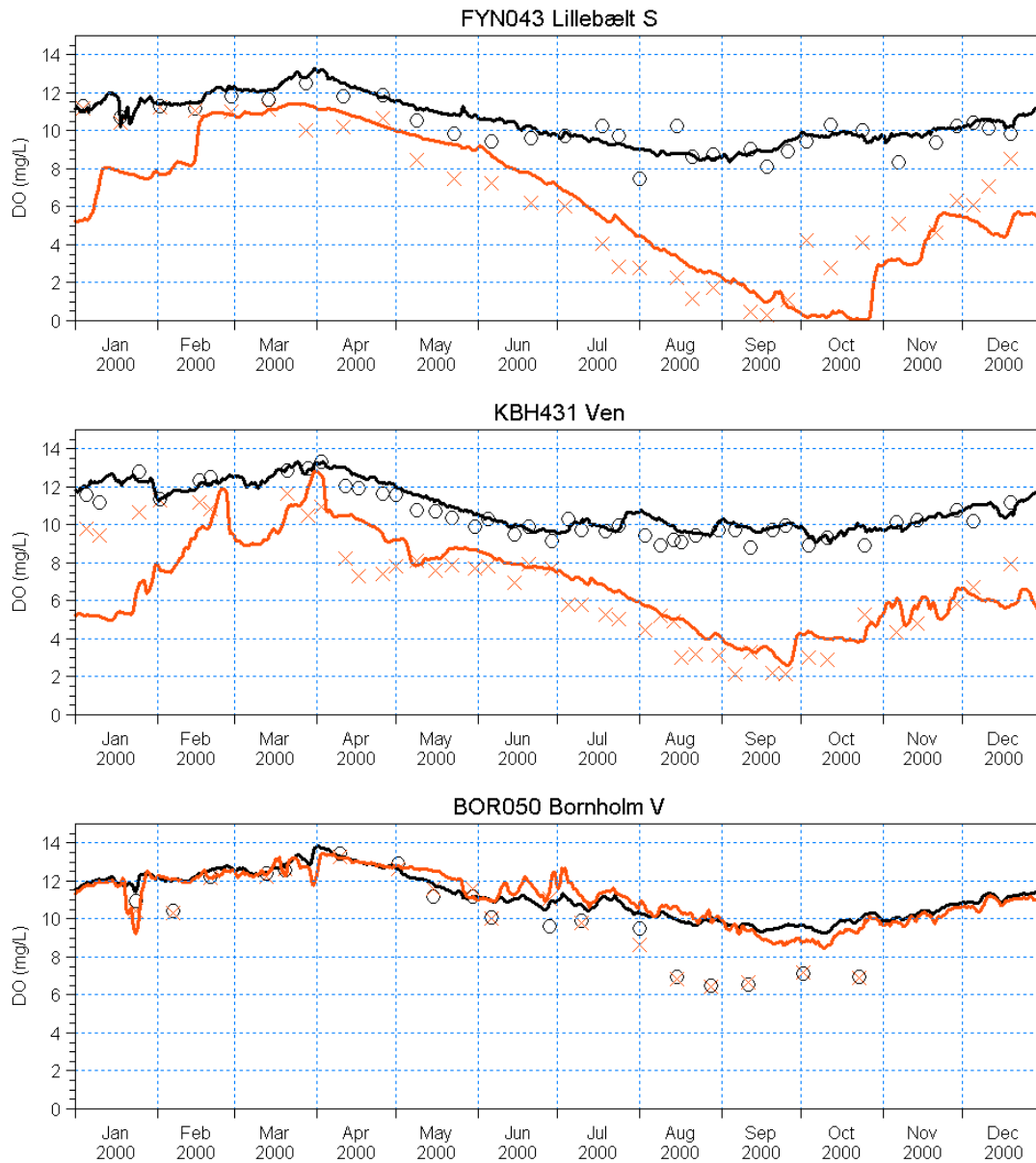


Bilag A.9 (fort.)

Primærproduktion fra model (sort linie) sammenlignet med målinger (sort cirkel). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)



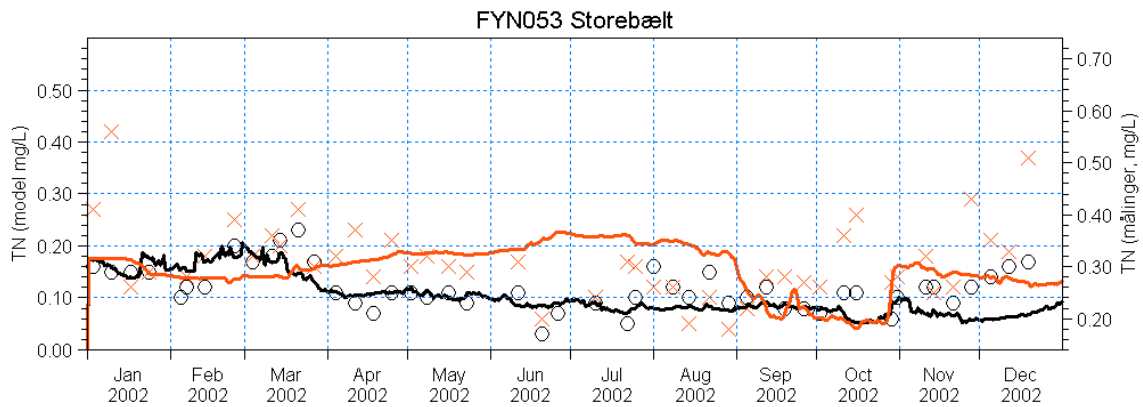
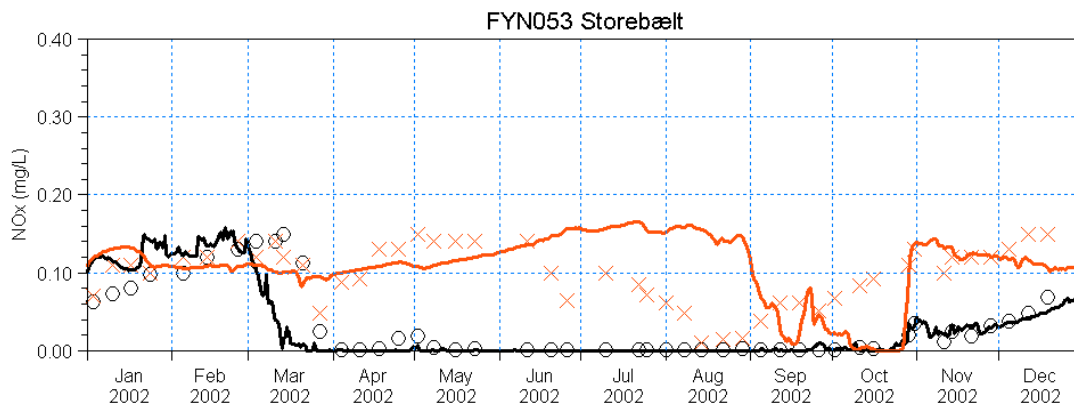
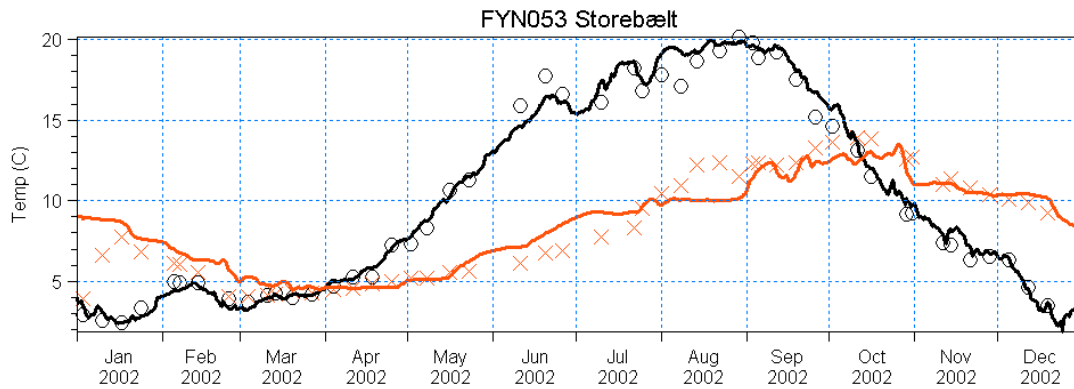
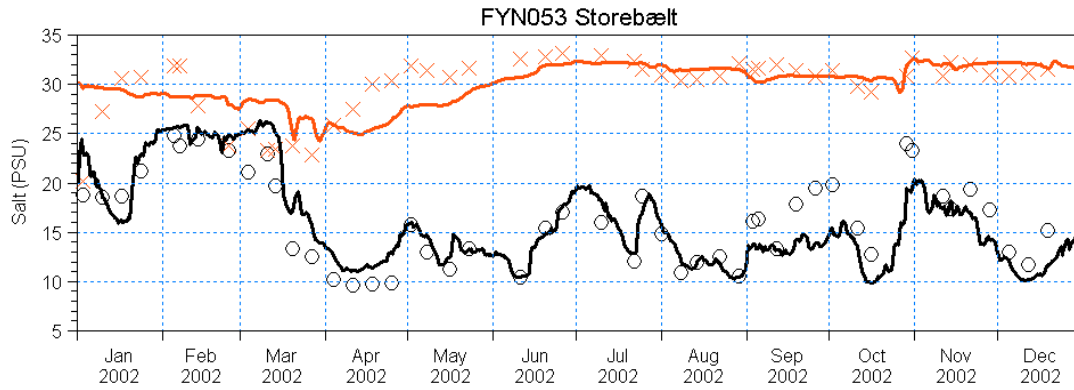
Bilag A.10 Overflade- og bundværdier af iltkoncentration (DO) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)



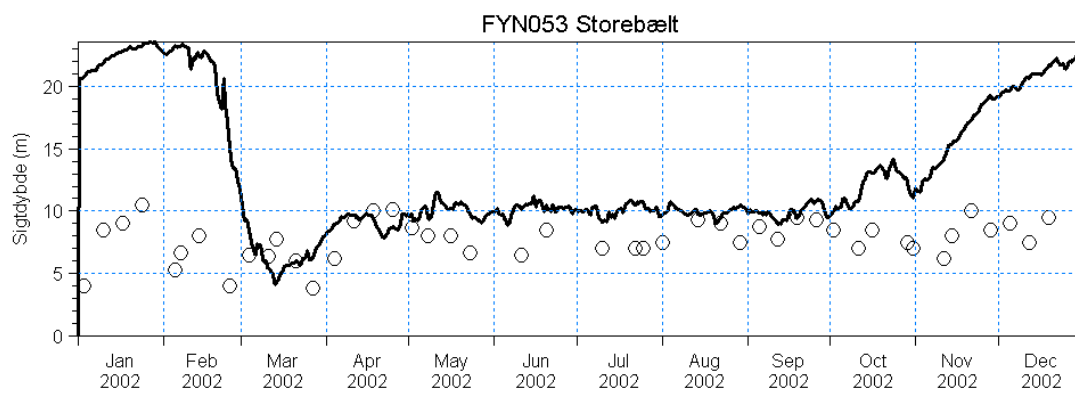
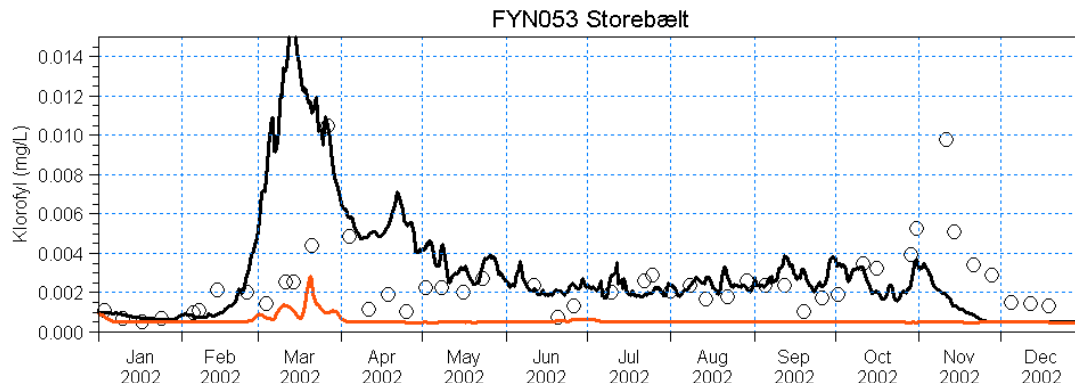
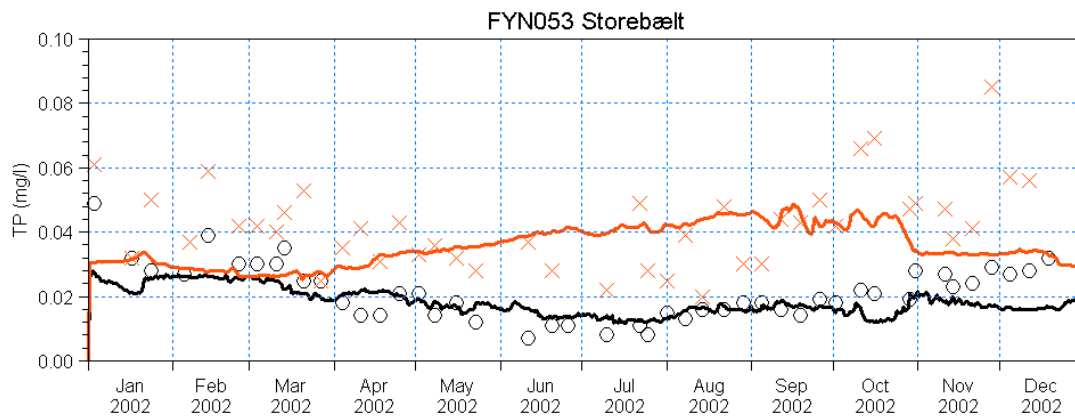
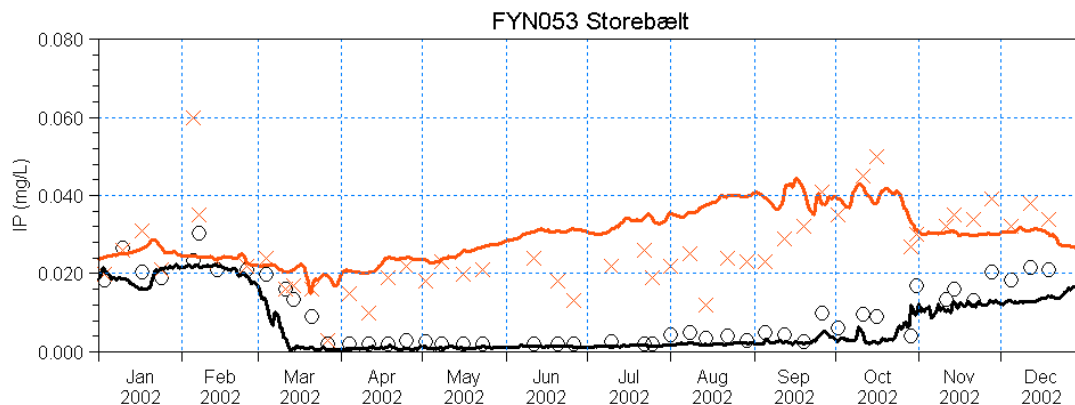
Bilag A.10 (fort.)

Overflade- og bundværdier af iltkoncentration (DO) fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2000 simulering (3. cykliske gennemregning)

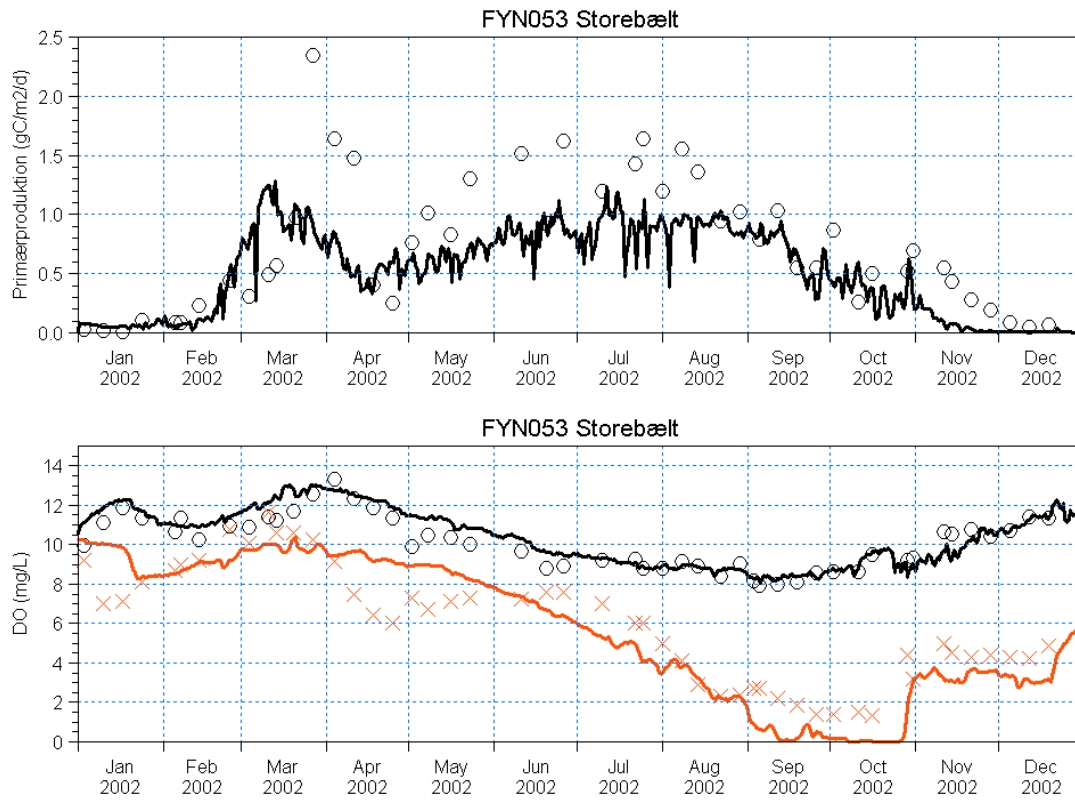
Bilag B Resultater fra valideringen år 2002



Bilag B.1 Overflade- og bundværdier fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2002 simulering

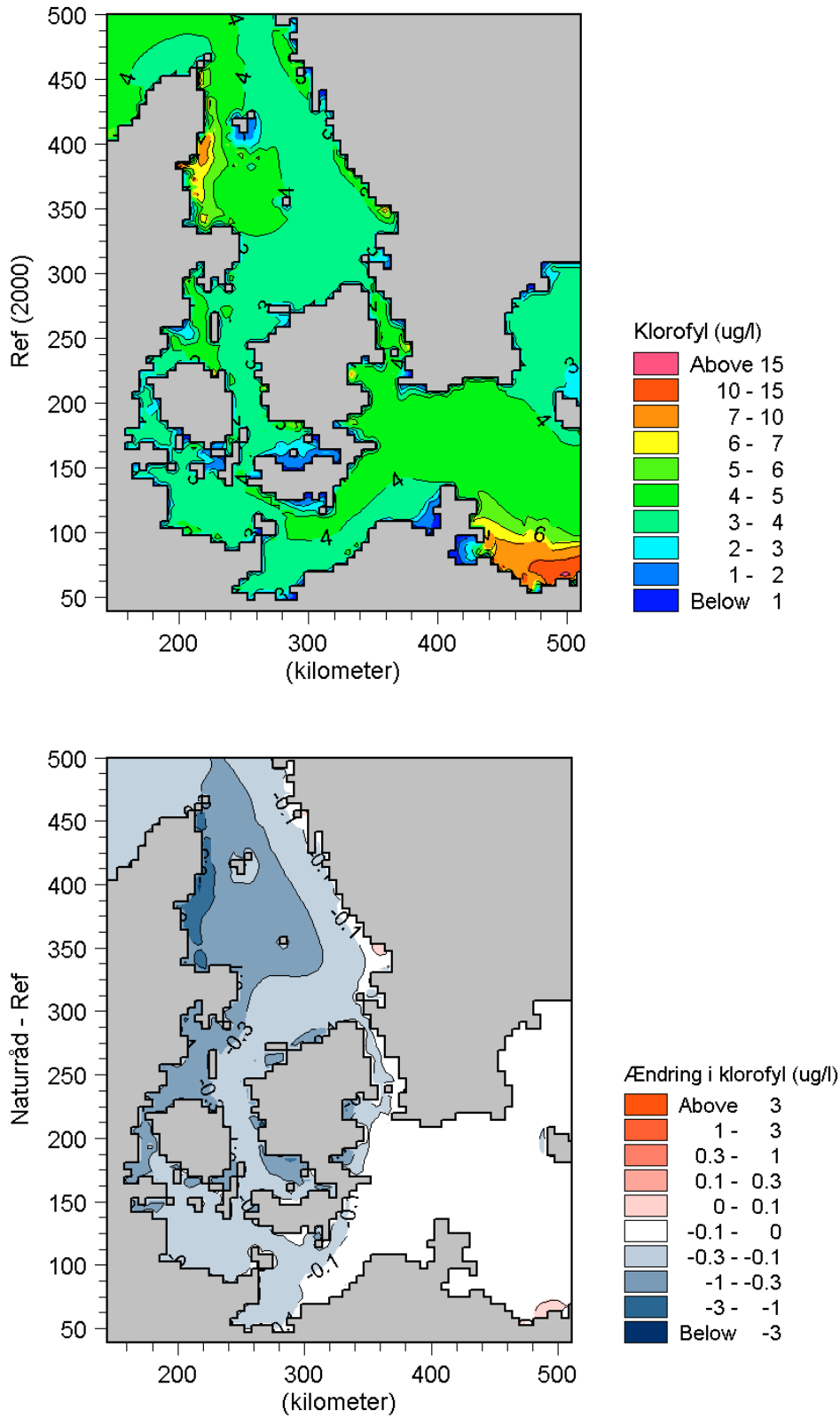


Bilag B.1 (fort.) Overflade- og bundværdier fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2002 simulering

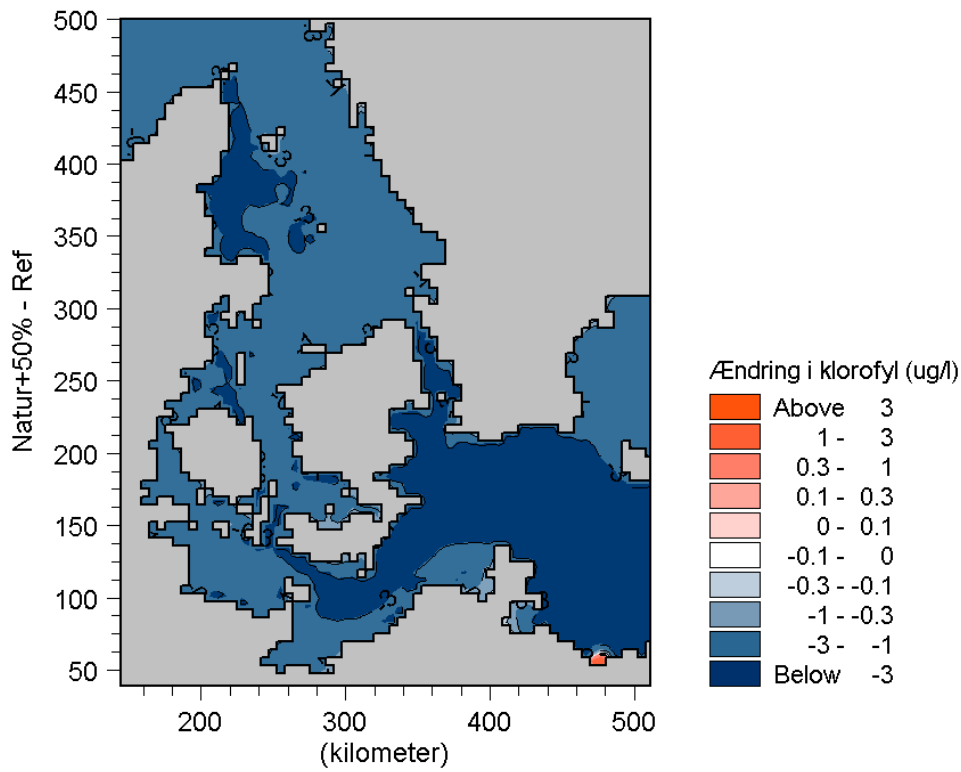
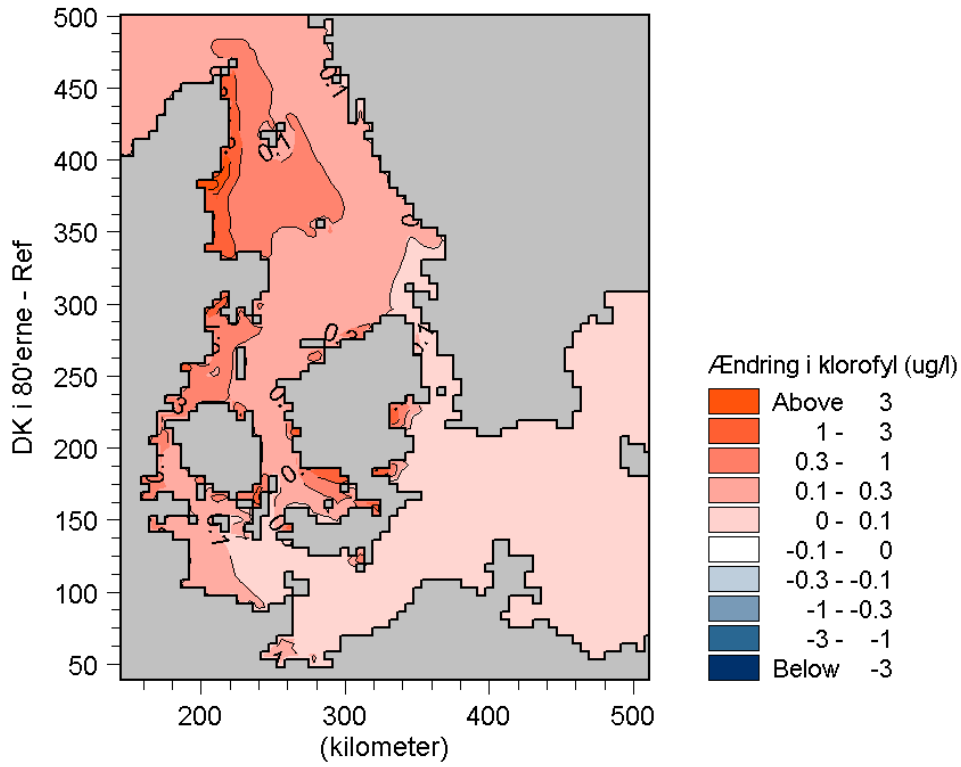
**Bilag B.1 (fort.)**

Overflade- og bundværdier fra model (sort linie: overflade; rød linie: bund) sammenlignet med målinger (sort cirkel: overflade; rødt X: bund). År 2002 simulering

Bilag C Resultater fra scenarierne

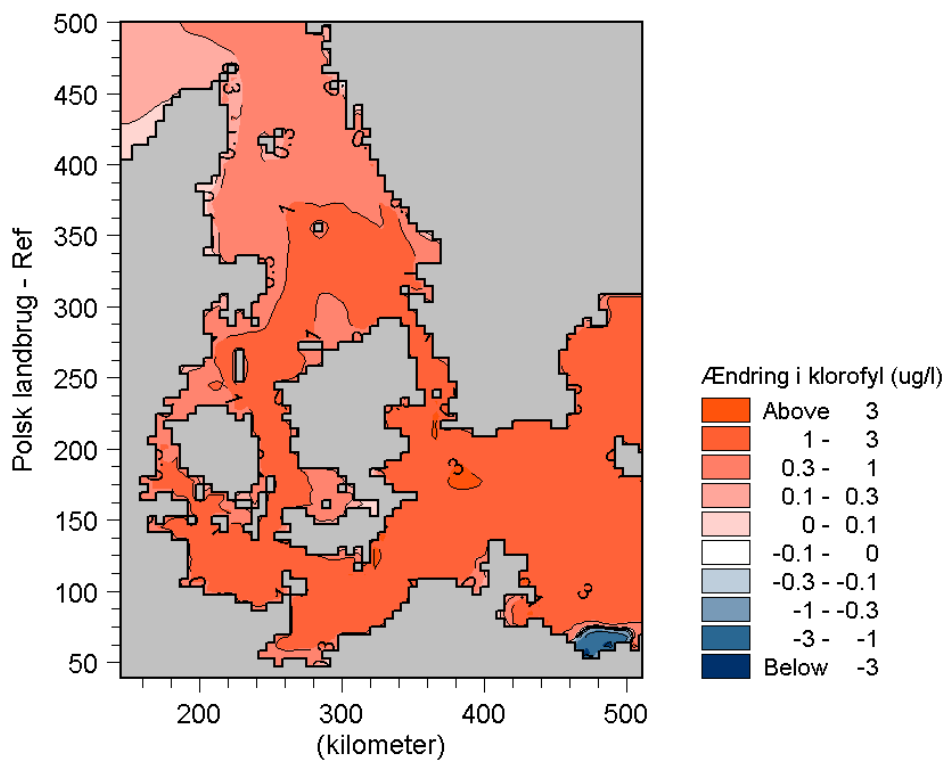
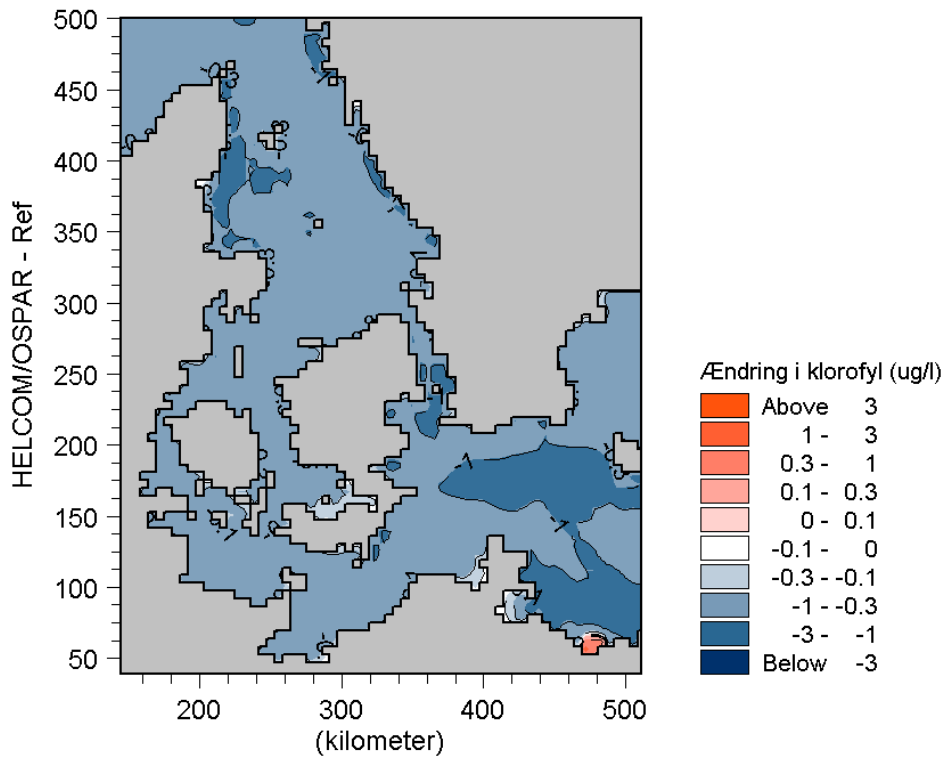


Bilag C.1 Fordelingen af klorofyl (middel for øverste 10 m, marts-oktober) i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).



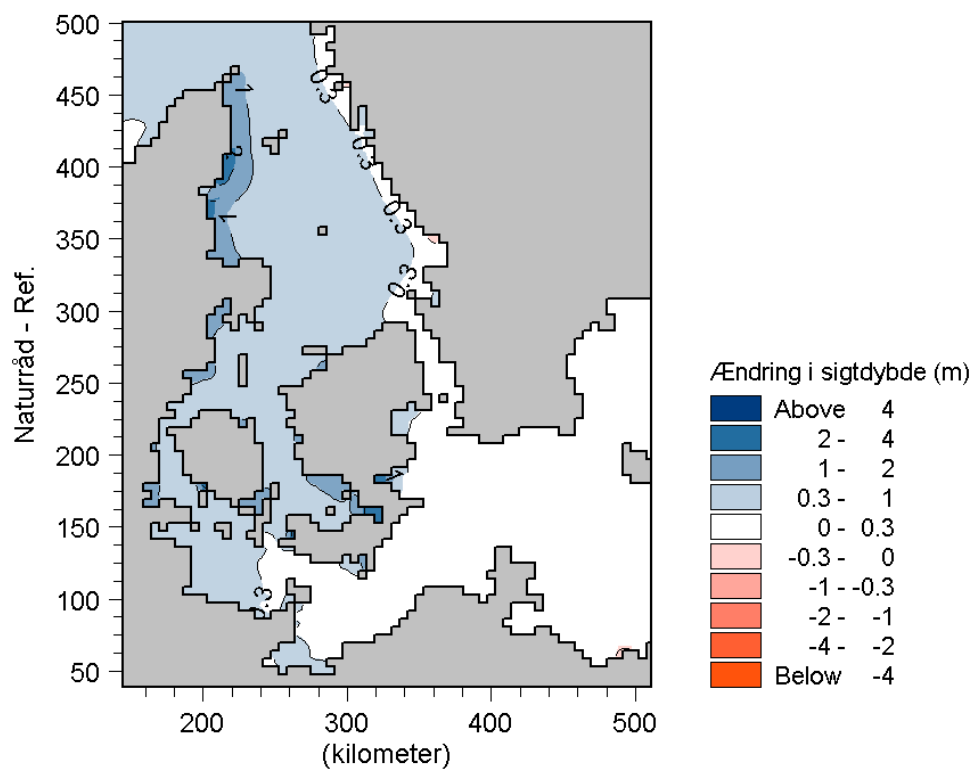
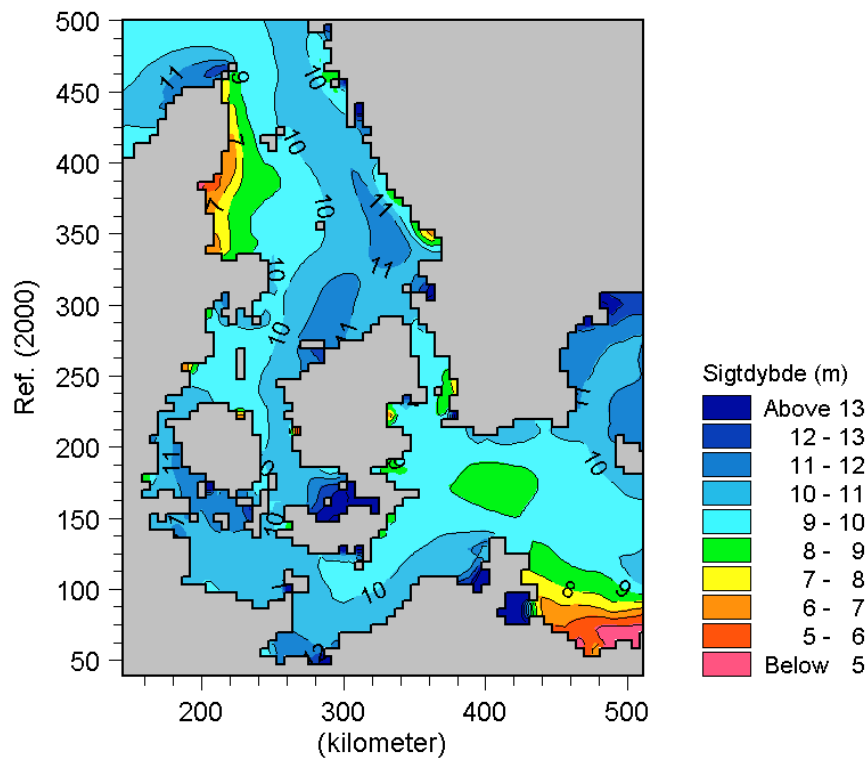
Bilag C.1 (fort.)

Fordelingen af klorofyl (middel for øverste 10 m, marts-oktober) i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).

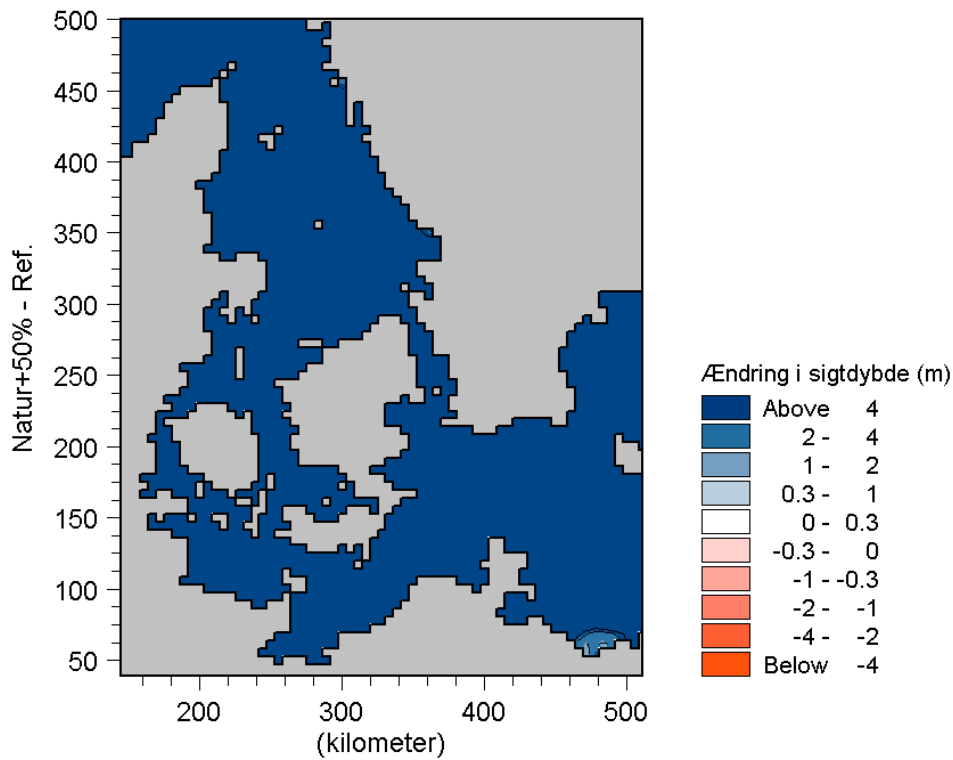
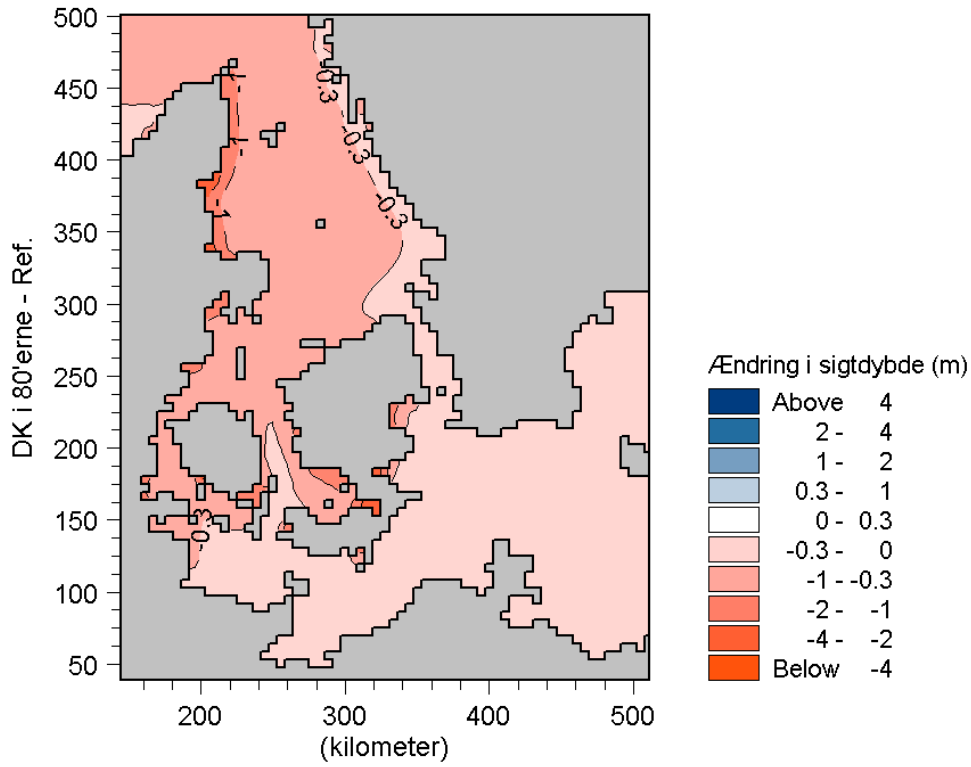


Bilag C.1 (fort.)

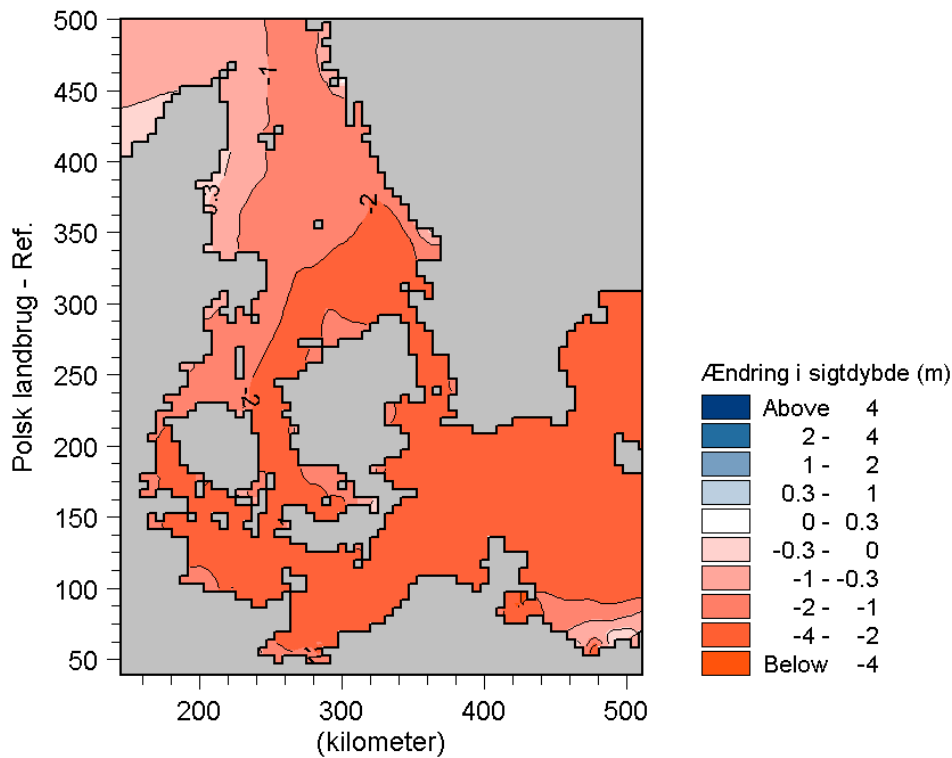
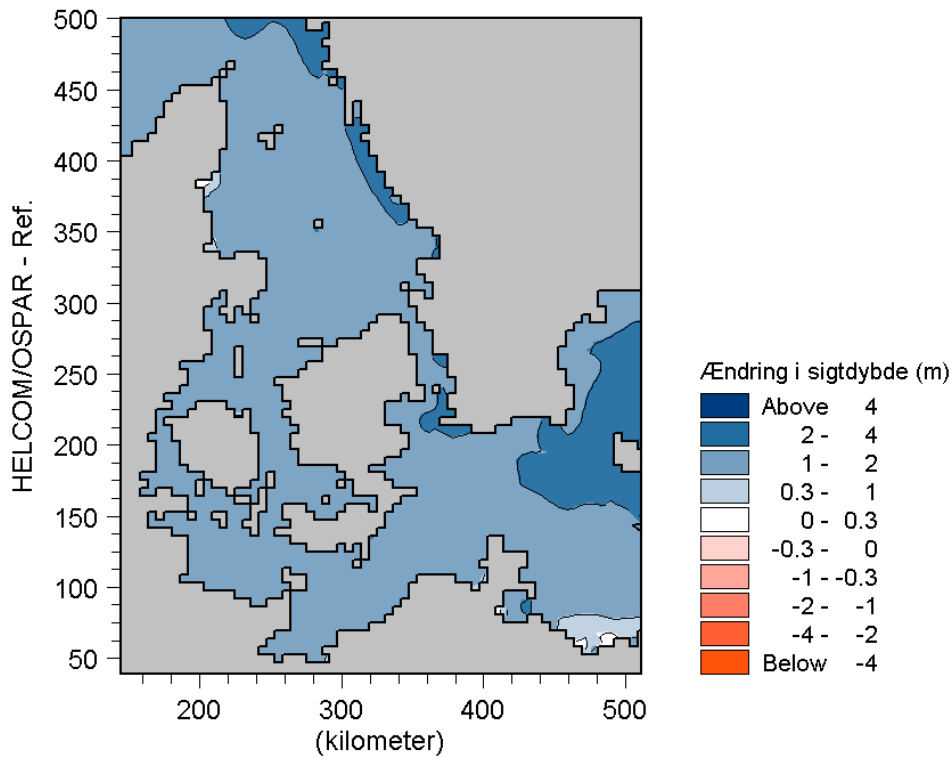
Fordelingen af klorofyl (middel for øverste 10 m, marts-oktober) i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 (se scenarionavn til venstre).



Bilag C.2 Fordelingen af sigtdybde (april-oktober) i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).

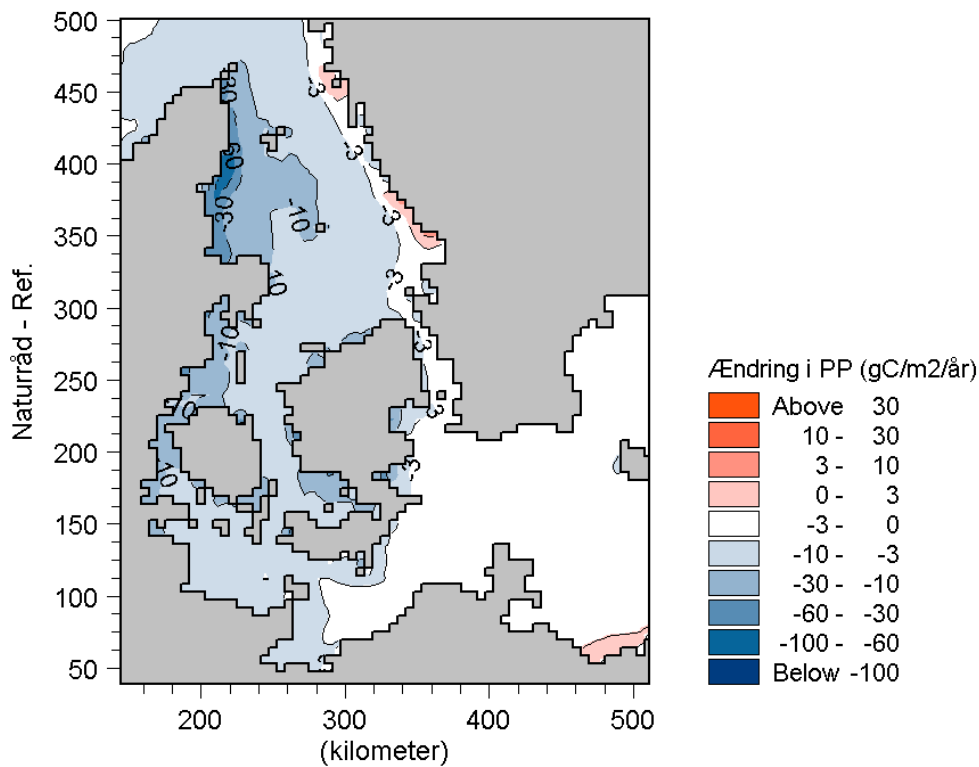
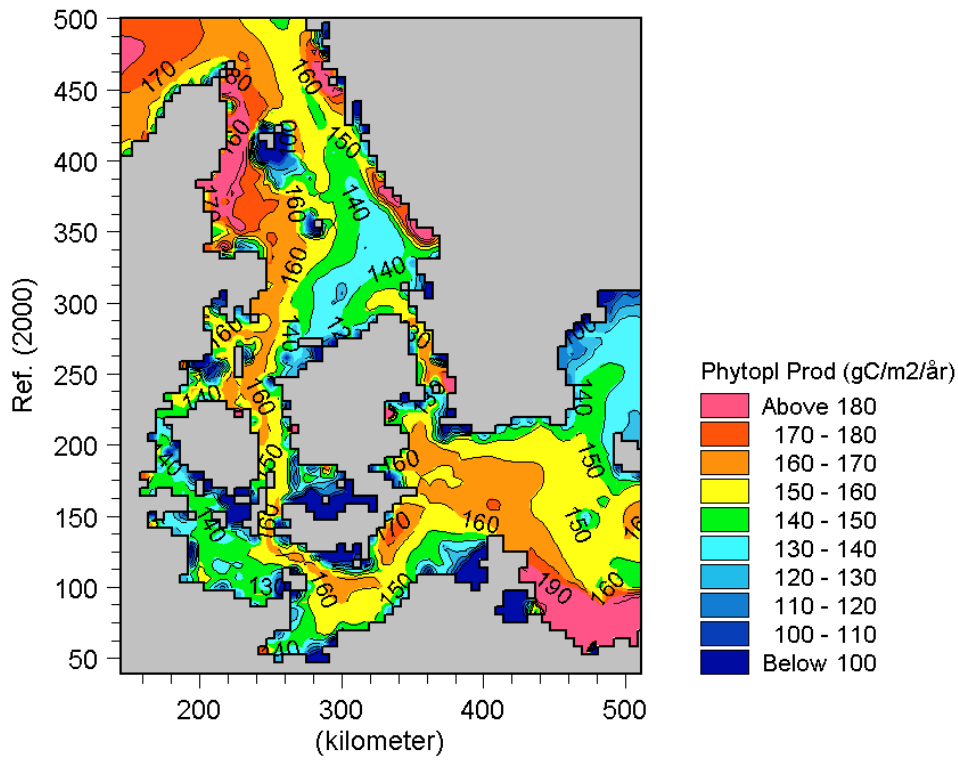


Bilag C.2 (fort.) Fordelingen af sigtdybde (april-oktober) i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).

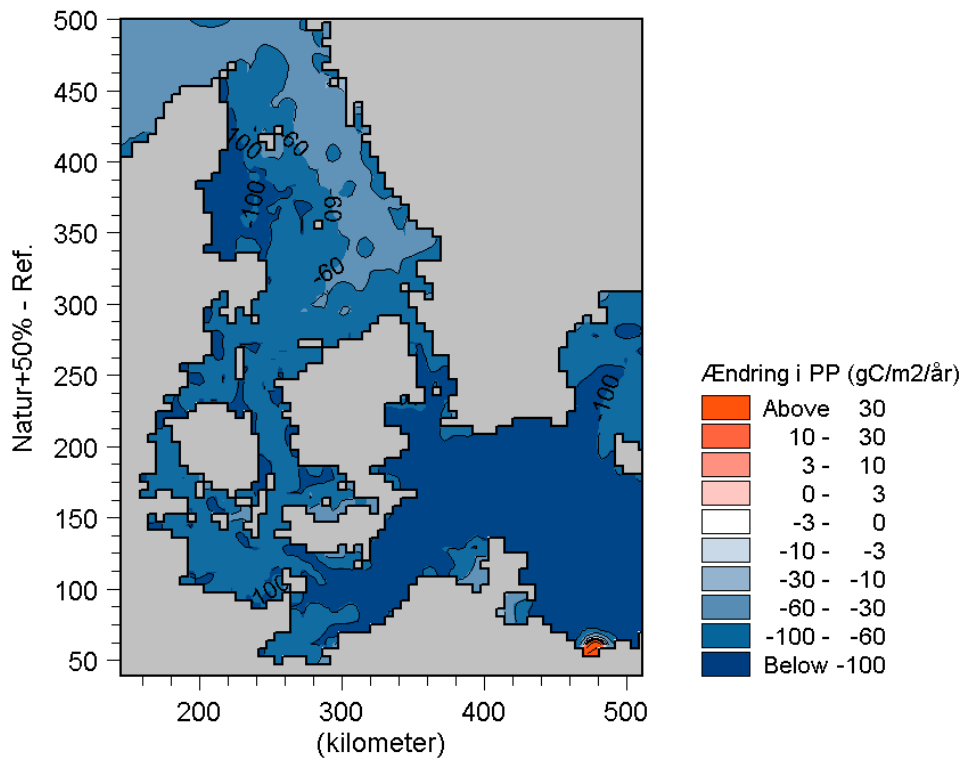
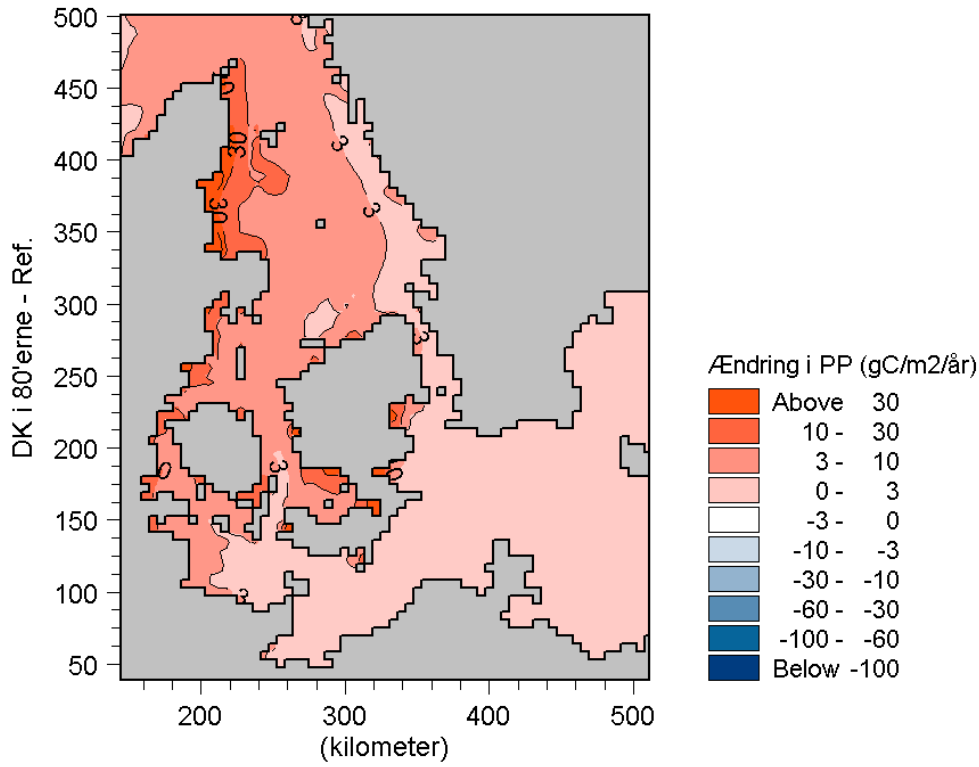


Bilag C.2 (fort.)

Fordelingen af sigtdybde (april-oktober) i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).

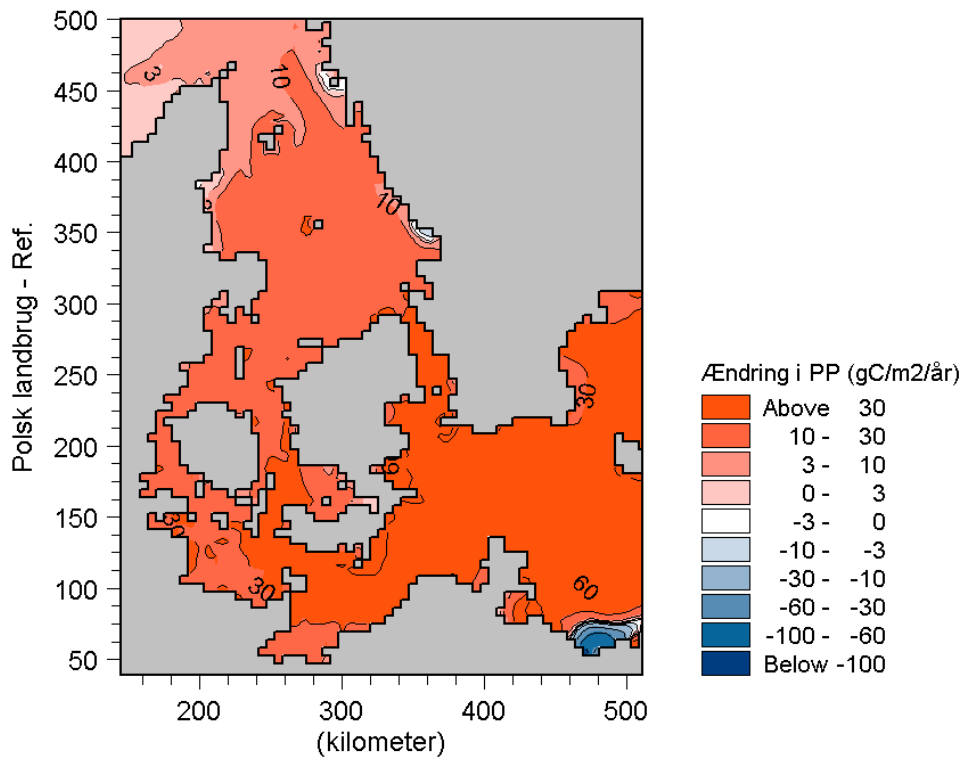
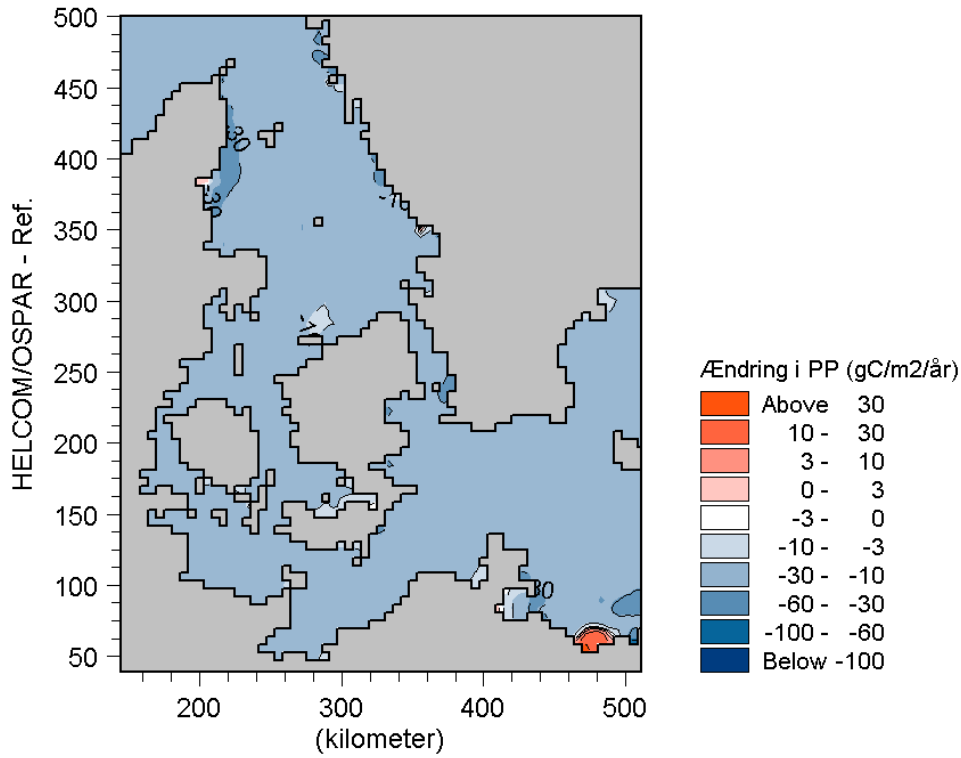


Bilag C.3 Fordelingen af den årlige primærproduktion i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).



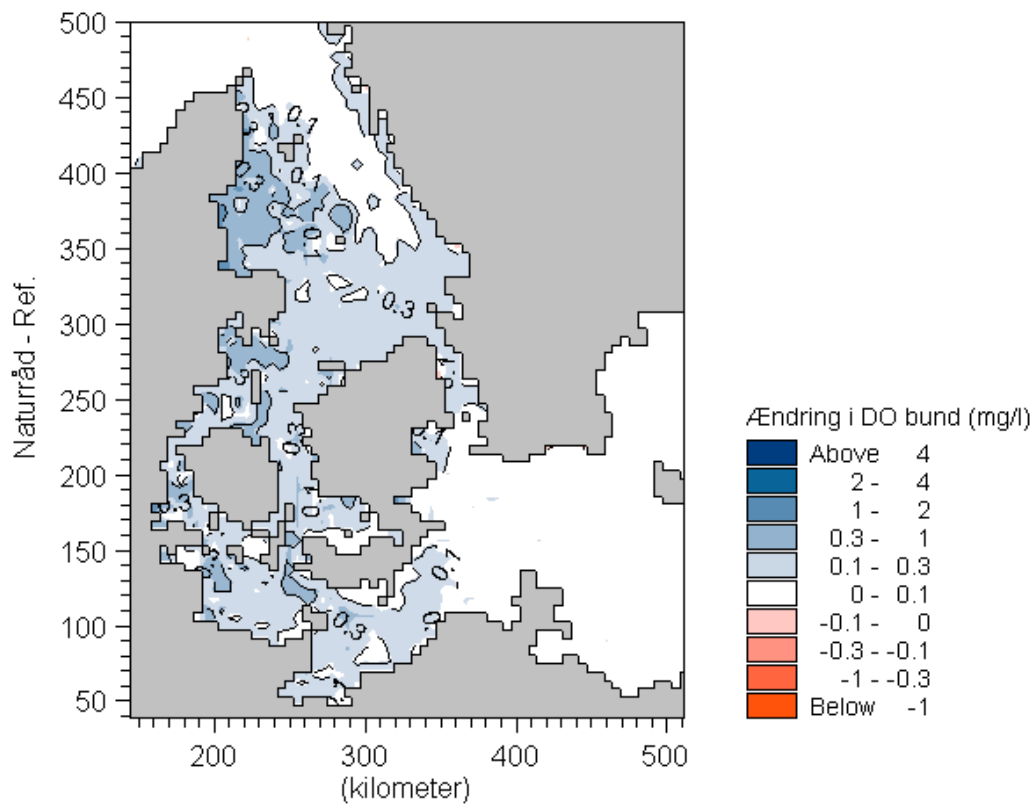
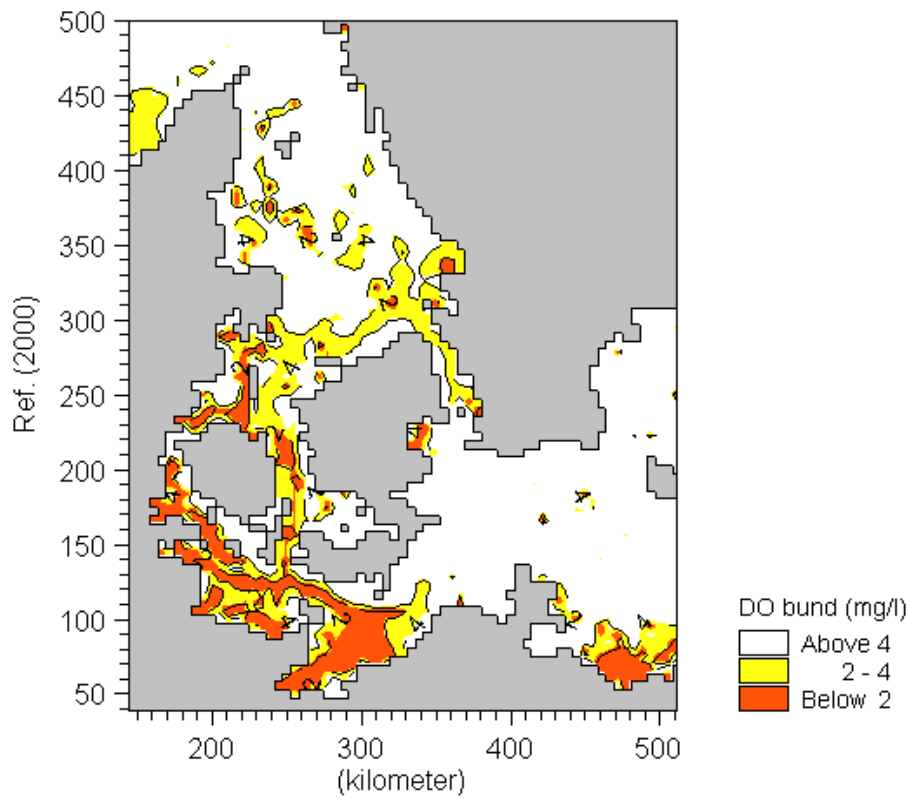
Bilag C.3 (fort.)

Fordelingen af den årlige primærproduktion i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).

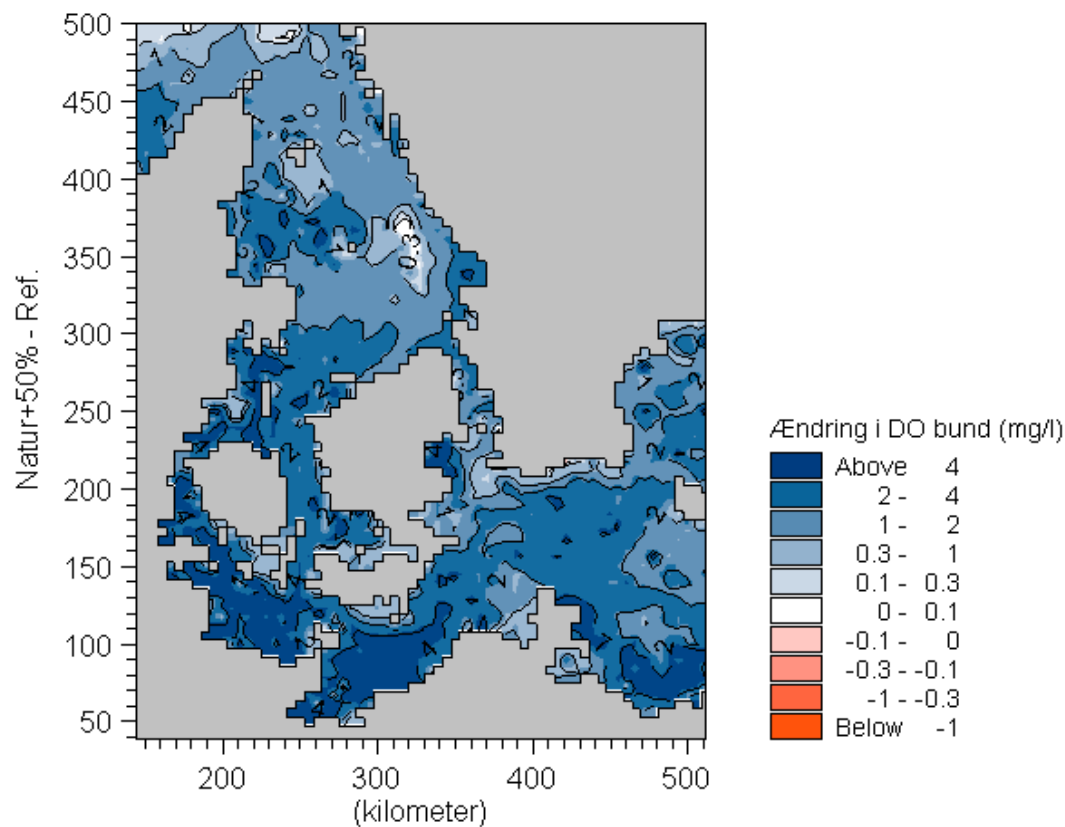
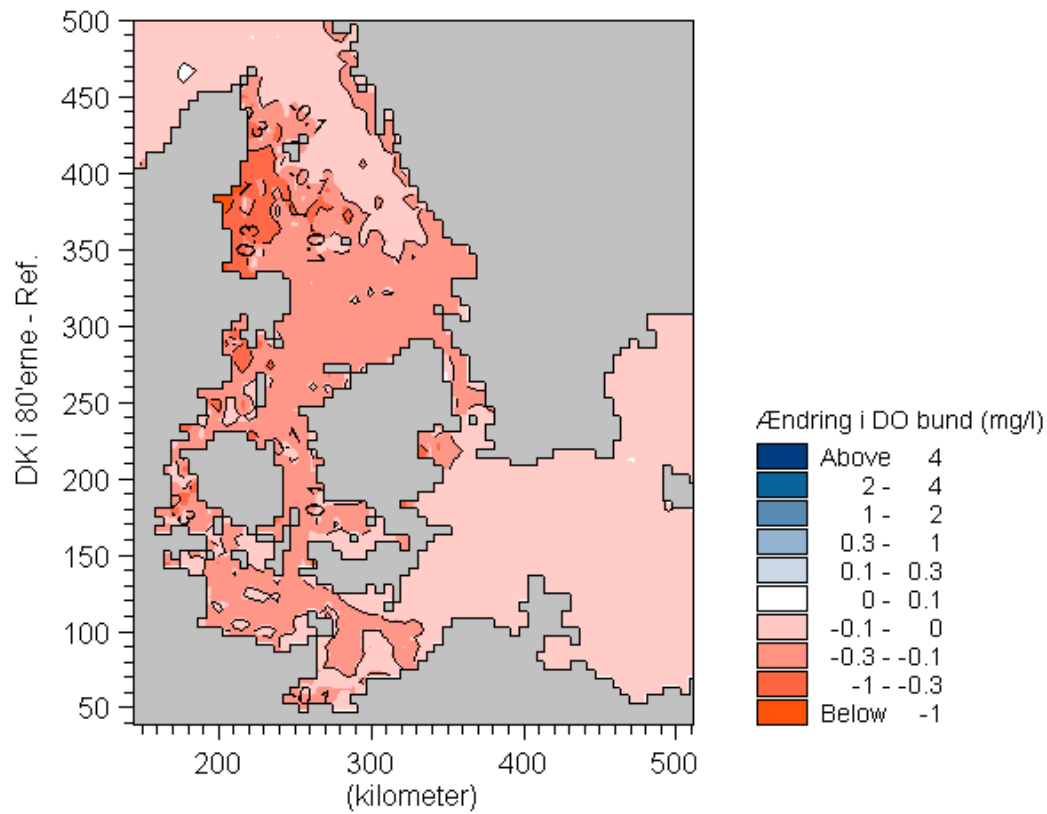


Bilag C.3 (fort.)

Fordelingen af den årlige primærproduktion i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).

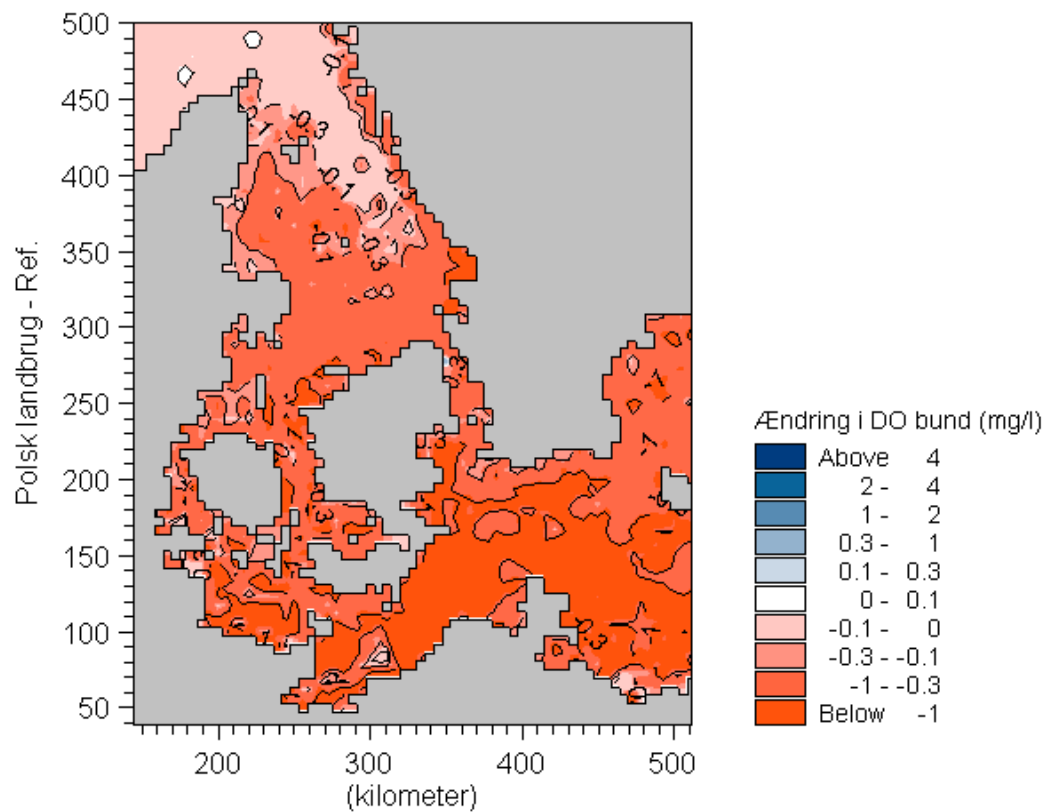
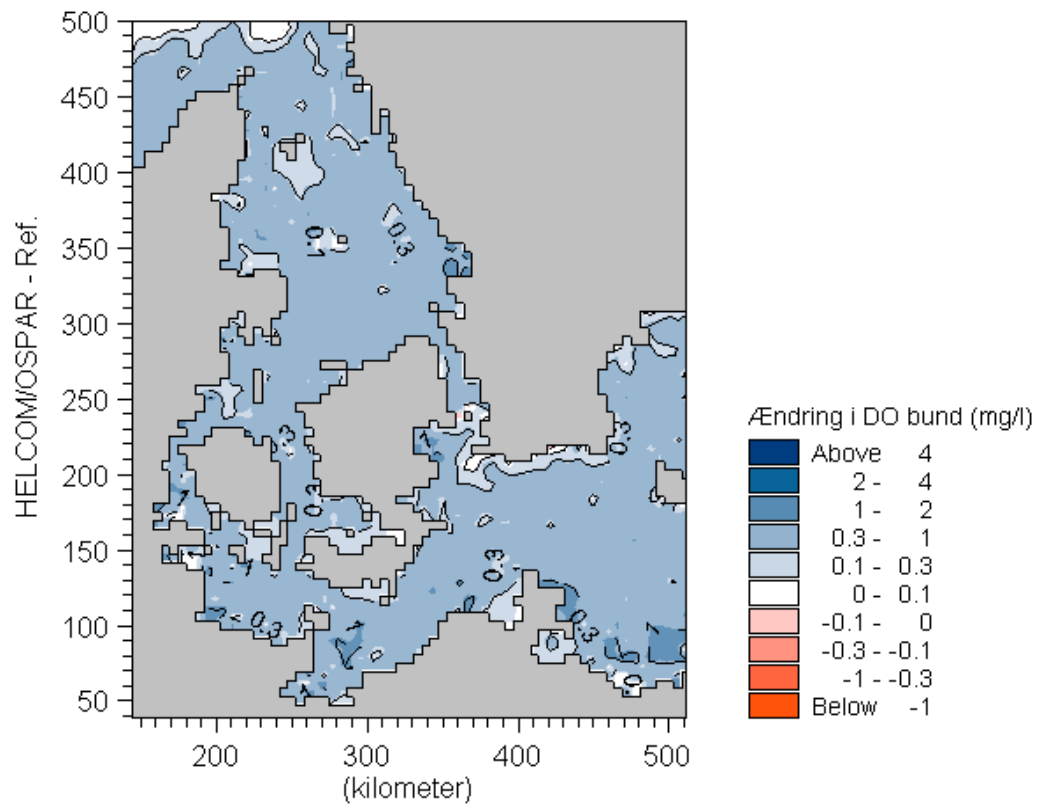


Bilag C.4 Fordelingen af minimal iltkoncentration ved bunden i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).



Bilag C.4 (fort.)

Fordelingen af minimal iltkoncentration ved bunden i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).



Bilag C.4 (fort.)

Fordelingen af minimal iltkoncentration ved bunden i år 2000 og ændringen i koncentrationen for de 5 scenarier (se scenarionavn til venstre).

