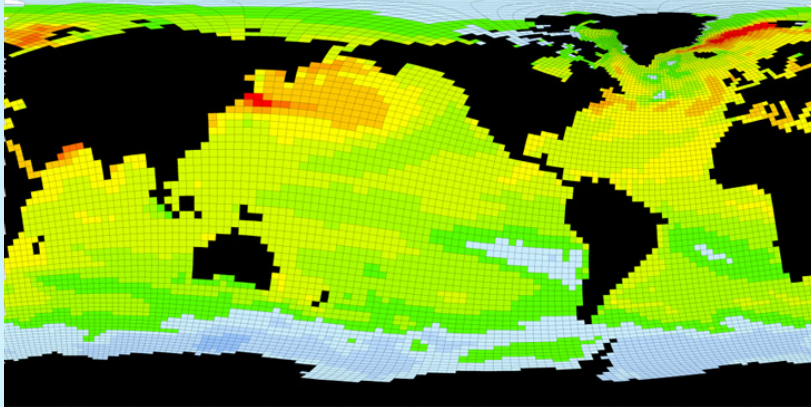




Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

Klimabetingede effekter på marine økosystemer

Faglig rapport fra DMU, nr. 598



[Tom side]



Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

Klimabetingede effekter på marine økosystemer

Faglig rapport fra DMU, nr. 598
2006

Jørgen L. S. Hansen
Jørgen Bendtsen

Datablad

| | |
|--|---|
| Serietitel og nummer: | Faglig rapport fra DMU nr. 598 |
| Titel: | Klimabetingede effekter på marine økosystemer |
| Forfattere: Afdeling: | Jørgen L. S. Hansen & Jørgen Bendtsen Afdeling for Marin Økologi |
| Udgiver: | Danmarks Miljøundersøgelser © Miljøministeriet |
| URL: | http://www.dmu.dk |
| Redaktionen afsluttet: Udgivelsesår: | Januar 2006 Oktober 2006 |
| Faglig kommentering: | Jens Kjerulf Petersen |
| Finansiell støtte: | Der er modtaget finansiell støtte fra Miljøstyrelsen |
| Bedes citeret: | Hansen, J.L.S. & Bendtsen, J. 2006: Klimabetingede effekter på marine økosystemer. Danmarks Miljøundersøgelser. 50 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 598. http://www.dmu.dk/Pub/FR598.pdf Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse. |
| Sammenfatning: | Ved en forventet temperaturstigning i Danmark på omkring 3 grader i løbet af de næste hundrede år forventes der en tilsvarende temperaturstigning året rundt i de indre danske farvande. Temperaturstigningen betyder, at der vil blive tilført mindre ilt med bundvandet til de indre danske farvande, og samtidig vil det biologiske iltforbrug i bundvand og bunden blive øget. Begge forhold bidrager til en forøget risiko for iltsvind i fremtiden. Modelberegninger, der forudsætter et marint økosystem som i nutiden, viser, at iltindholdet i sommer-/ efterårssæsonen, alene som følge af temperaturstigningen, vil blive reduceret med 1 - 2 mg/l eller et 30% lavere niveau end det nutidige. Beregninger viser, at arealerne med kraftigt iltsvind og skader på bundens dyreliv vil være ca. 3 gange større end i et nutidigt gennemsnitsår. I tilfælde af ekstreme klimatiske forhold i fremtiden vil den relative forskel blive meget større, og der kan forventes skader i størstedelen af Bælthavet og det sydlige Kattegat på dybder over 12-15 m. Modelberegninger viser, at næringsstofkoncentrationerne skal reduceres i størrelsesordenen 30% i forhold til nutiden for at bibeholde de nutidige iltforhold. |
| Emneord: | Iltsvind, temperaturstigning, modelberegninger, klima |
| Forside: Layout: | Modellerede temperaturændringer i de næste 100 år (fra Marsland et al. 2003) Ole Schou Hansen |
| ISBN: ISSN (elektronisk): Sideantal: | 978-87-7772-953-9 1600-0048 50 |
| Internetversion: | Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (PDF) på DMU's hjemmeside http://www.dmu.dk/Pub/FR598.pdf |
| Kan købes hos: | Miljøministeriet Frontlinien Rentemestervej 8 2400 København NV Tlf: 7012 0211 frontlinien@frontlinien.dk www.frontlinien.dk |

Indhold

- Forord 5**
- Resumé 6**
- Summary 7**
- 1 Introduktion 9**
- 2 Mulige miljøændringer i de indre danske farvande 11**
 - 2.1 Det fysiske miljø 11
 - 2.1.1 Temperaturforhold 11
 - 2.1.2 Strømforhold 11
 - 2.1.3 Lagdeling og blanding 11
 - 2.2 Det biogeokemiske miljø 12
 - 2.2.1 Omsætning af organisk materiale 12
 - 2.2.2 Betydning af lagdeling og blanding for tilførslen af ilt 12
 - 2.2.3 Iltmætning 13
 - 2.2.4 Iltforbrugende processer 13
 - 2.2.5 Økosystemets struktur 17
 - 2.2.6 Øvrige klimatisk betingede effekter 17
 - 2.2.7 Principper for modellering af ilt 17
- 3 Klimascenarier 19**
 - 3.1 Forbehold omkring klimaet i år 2100 19
 - 3.2 Anvendelse af klimascenarier 19
- 4 Metodebeskrivelse 25**
 - 4.1 Modelbeskrivelse af iltforbrugende processer 25
 - 4.2 Modelbeskrivelse af den hydrodynamiske model 26
 - 4.3 Scenarier og følsomhedsanalyse af de indre danske farvande 28
- 5 Resultater 31**
 - 5.1 Temperaturændringer 31
 - 5.2 Vindændringer 31
 - 5.3 Iltændringer 31
 - 5.3.1 Nutidens iltodynamik i Bælthavet og det sydlige Kattegat 37
 - 5.3.2 Resultater af den simple iltmodel 37
 - 5.3.3 Klimascenarium hvor effekten af temperaturstigning modvirkes af faldende næringsstofkoncentrationer 41
 - 5.4 Opsummering af resultater 41
- 6 Diskussion og perspektivering 43**
 - 6.1 Begrænsninger af 3D-modelresultater 43
- 7 Konklusion 47**
- 8 Referencer 49**

Danmarks Miljøundersøgelser

Faglige rapporter fra DMU

[Tom side]

Forord

Denne rapport er udarbejdet i efteråret 2005 ved Danmarks Miljøunderøgelser i forbindelse med et projekt omkring "Klimabetingede effekter på marine økosystemer og udvalgte naturtyper". Projektet er finansieret af Miljøstyrelsen. Formålet og den bagvedliggende hypotese omkring mulige klimaændringers indflydelse på klimaet er beskrevet nedenfor.

Formål

Det er projektets formål at udarbejde prognoser for iltforhold i de indre danske farvande under forskellige klimaforhold og vurdere effekten på havbundens dyreliv, idet der tages udgangspunkt i dyrelivet i de dybere dele af de indre danske farvande.

Hypotese

Det er projektets overordnede arbejdshypotese, at klimaforandringer potentielt vil kunne påvirke forekomst og udbredelse af iltsvind, at udvikling af iltsvind i tid og rum bestemmer vækst og overlevelse af bundfaunaen og at en reduktion i bundvandets iltindhold vil medføre reduktioner i bundfaunaens diversitet og biomasse.

Resumé

De indre danske farvande er følsomme overfor udvikling af iltsvind på grund af en permanent lagdeling, der virker som en barriere for nedblanding af ilt til bundvandet og bunden. Bundvandet stammer fra Skagerrak og den oprindelige mængde ilt der er i vandet, før det lagrer sig under det brakke vand fra Østersøen, er en vigtig styrende faktor for den samlede tilførsel af ilt til bunden i de indre danske farvande. Udgangspunkt for analysen i denne rapport er en forventet temperaturstigning i Danmark på 3 grader i løbet af de næste hundrede år. På baggrund af denne stigning i lufttemperaturen viser resultaterne fra en hydrodynamisk 3-D modellering en tilsvarende temperaturstigning på omkring 3 grader året rundt i de indre danske farvande. En temperaturstigning i denne størrelsesorden vil betyde, at der bliver tilført mindre ilt med bundvandet til de indre danske farvande og samtidigt vil det biologiske iltforbrug i bundvandet og bunden stige. Begge forhold bidrager til en forøget risiko for iltsvind i fremtiden. Hvor stor effekten bliver, afhænger af tilførslen af organisk materiale til bundvandet og bunden i fremtiden. Størrelsen af dette input afhænger både af næringsstofniveauet og strukturen af det marine økosystem. Det er sandsynligt, at temperaturændringer af denne størrelsesorden vil medføre strukturelle ændringer af det marine økosystem, men disse kan ikke umiddelbart forudsiges. I denne analyse er det forudsat, at økosystemet ikke ændres kvalitativt. Modelberegningerne viser, at iltindholdet i sommer/efterårssæsonen, alene som følge af temperaturstigningen, vil blive reduceret med 1-2 mg/l svarende til en 30% reduktion af det nutidige niveau. Forudsigelserne af effekten på den marine flora og fauna er forbundet med usikkerhed. Foreløbige beregninger viser, at arealerne med kraftigt iltsvind og skader på bundens dyreliv vil være ca. 3 gange større end i et nutidigt gennemsnitsår. I tilfælde af ekstreme klimatiske forhold i fremtiden, som i år 2002, vil den relative forskel blive meget større og der kan forventes skader i størstedelen af Bælthavet og det sydlige Kattegat på dybder under 12-15 m. Det er forventeligt, at effekterne på bunddyrene vil have negative konsekvenser højere oppe i fødekæden. Modelberegninger viser, at næringsstofkoncentrationerne skal reduceres med ca. 30% i forhold til nutiden, hvis der skal kompenseres for den forventede temperaturstigning.

Summary

The inner Danish marine waters are sensitive to the development of oxygen deficiency due to a permanent stratification which acts as a barrier for the mixing of atmospheric oxygen to the bottom water and the bottom. The bottom water originates from Skagerrak and its content of oxygen is an important factor controlling the total oxygen supply to the bottom water below the mixed layer in the inner Danish marine waters. The analysis in this report assumes an increase in temperature in Denmark of about 3 degrees Celsius within the coming 100 years. Based on this increase in temperature, results from a hydrodynamical 3-D model of the inner Danish Marine waters show a corresponding year round increase in sea temperature of about 3 degrees Celsius. This increase in temperature has the effect that the bottom water is supplied with less oxygen and will furthermore lead to an increase in biological oxygen demand in the bottom water and in the bottom. Both processes will enhance the risk of oxygen deficiency events in the future. The size of the resulting effect is related to the future supply of organic material to the bottom water and the bottom. The size of this future supply is both related to the amounts of nutrients and the structure of the marine ecosystem. Though these changes are not readily predictable it is likely that temperature changes in this order will lead to structural changes of the marine ecosystem. In this analysis it is assumed that there are no qualitative changes of the ecosystem. Results from the model show that oxygen concentrations in the summer/fall will be reduced by 1-2 mg/l, i.e. 30% less than the present level. Predictions of the effect on the marine flora and fauna are associated with an uncertainty. Calculations show that areas with severe oxygen deficiency and "damages" on the benthic fauna will increase by approximately a factor of 3 compared to typical present day year. In case of future extreme climatic events, as in 2002, the relative difference will increase and damages can be expected to be found in the major parts of the Belt Sea and southern Kattegat at depths below 12-15 m. It is expected that the damages on the benthic fauna will have negative consequences on the higher trophic levels in the food chain. Model calculations show that the present nutrient concentrations have to be reduced by 30% to compensate for the effects of the expected increase in temperature.

[Tom side]

1 Introduktion

Ændringer af klimaet over Nordsø/Østersøregionen kan betyde at de fysiske forhold i de indre danske farvande ændres betydeligt. Dette skyldes dels, at området er relativt lavvandet, med typiske vanddybder fra 10 - 100 m, og dels at gennemstrømningen af området i stor udstrækning er påvirket af fluktuerende ud- og indstrømningshændelser. Disse er primært styret af vindfelterne over området. Udover ændringer i de fysiske tilstandsvariable som strøm, turbulent blanding, temperatur og salinitet vil ændringer i klimaet også medføre ændringer af den biogeokemiske påvirkning af området. Disse er relateret til ændringer i ilt, næringssalte, samt biologiske og kemiske omsætningsprocesser i vandsøjlen og i sedimentet.

En sammenstilling af de mulige effekter på miljøet er beskrevet i kapitel 2. Dernæst følger en generel beskrivelse af et klimascenarium som blev anvendt i analysen af miljøforholdene. Scenariet blev baseret på en klimamodel som beskriver udviklingen i det fysiske miljø i perioden 1860 - 2100, og følgerne for det fysiske havmiljø omkring Danmark bliver diskuteret. I den efterfølgende analyse af mulige miljøpåvirkninger er der blevet taget udgangspunkt i nogle enkelte af de processer som vurderedes som kritiske for havmiljøet, det vil sige især processer der blev relateret til effekter fra den højere temperatur. Ligeledes bliver effekter på grund af ændrede vindforhold samt ændrede udledninger af næringssalte fra land analyseret.

Som basis for analysen blev der opstillet en simpel model over iltforholdene i bundvandet i de indre danske farvande. Iltmodellens følsomhed for temperaturændringer blev bestemt ud fra en enkel opsætning hvor iltfordelingen i bundvandet blev relateret til bundvandets residentid og dels ud fra en opsætning, hvor iltmodellen direkte blev implementeret i en tre-dimensional cirkulationsmodel for området. Derudover analyseredes iltmodellen i forhold til ændringer i produktionen af organisk materiale som følge af ændrede tilførsler af næringssalte til området. Der blev udført en række scenarier som kombinerer effekten fra flere forskellige processer, for eksempel den kombinerede effekt af en øget temperatur og en reduceret nærings-saltbelastning. Ud fra ovenstående scenarier blev effekten på iltforholdene i bundvandet i Sundet og Bælthavet vurderet og påvirkningen på bundfaunaen blev bestemt i forhold til effekten og ud fra en empirisk relation mellem iltindholdet i bundvandet og udbredelsen af iltvind.

Afslutningsvis er der blevet foretaget en perspektivering og diskussion af resultaterne samt en konklusion.

[Tom side]

2 Mulige miljøændringer i de indre danske farvande

2.1 Det fysiske miljø

2.1.1 Temperaturforhold

Temperaturen i atmosfæren og i havet ved havoverfladen er tæt koblet på grund af de latente og sensible energifluxe igennem overfladen. En generel temperaturændring i Nordsø/Østersø-området medfører derfor både ændringer i luft- og havtemperaturen. I de indre danske farvande vil en temperaturstigning både medføre højere overfladetemperaturer og højere temperaturer i bundvandet under blandingslaget. Ændringerne vil altså påvirke temperaturfordelingen i hele vandsøjlen. Opvarmningen af bundvandet vil bero på to faktorer: dels en opvarmning på grund af nedblanding af varmere overfladevand, og dels en opvarmning på grund af den oprindelige varmere vandmasse, der strømmer fra Skagerrak under overfladevandet i det nordlige Kattegat. Denne vandmasse udgør en stor del af bundvandet, der strømmer ned igennem Kattegat og Bælterne.

2.1.2 Strømforhold

Gennemstrømningen i de indre danske farvande er i høj grad styret af vindforholdene over Skagerrak og den vestlige Østersø, og variationen af denne har stor betydning for fornyelsen af bundvandet i de indre danske farvande. Derved påvirkes temperatur, salinitet og iltforholdene i bundvandet hvis strømforholdene ændres.

2.1.3 Lagdeling og blanding

En ændret afstrømning til Østersøområdet vil påvirke den generelle lagdeling i de indre danske farvande. Eksempelvis vil en øget nedbør til Østersøens afstrømningsområde betyde, at en øget mængde ferskvand skal transporteres igennem de indre danske farvande, og dette vil igen medføre et mindre salint overfladelag. Givet den samme salinitet under blandingslaget vil dette øge lagdelingen i vandsøjlen, og derved vil blanding mellem overfladelag og dybere lag generelt blive mindre.

Ændringer i vindforholdene kan også påvirke den lokale opblanding, dels som følge af den direkte påvirkning og opblanding af de øverste 10 - 20 meter af vandsøjlen, og dels indirekte ved at ændre opblandingsprocesser der følger af opstrømningsområder langs kysterne.

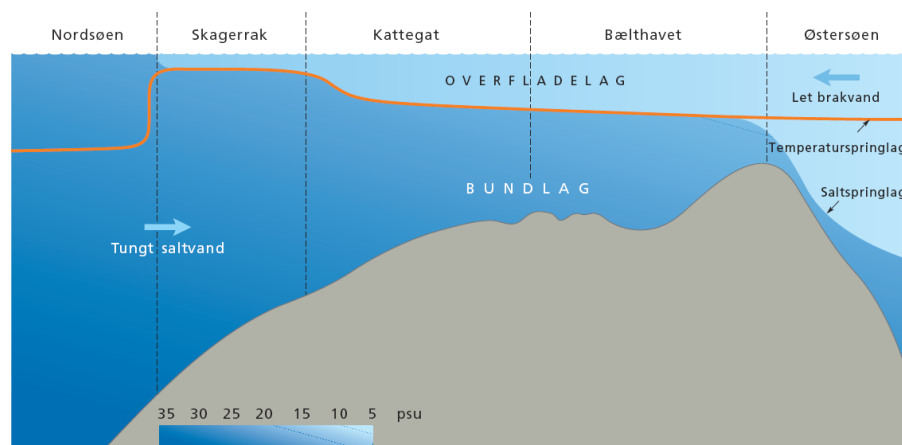
2.2 Det biogeokemiske miljø

2.2.1 Omsætning af organisk materiale

Generelt vil den biologiske produktion og omsætning af organisk materiale foregå med en større hastighed når temperaturen øges. Det betyder at dynamikken af både ilt og næringssalte ændres hvis temperaturen stiger. Denne rapport vil primært fokusere på temperaturens indflydelse på ilt dynamikken.

2.2.2 Betydning af lagdeling og blanding for tilførslen af ilt

De indre danske farvande er stort set permanent lagdelte af et saltspringlag (haloklin) i ca. 15 m's dybde, som strækker sig fra Kattegat-Skagerrak fronten nord for Læsø og hele vejen til den vestlige Østersø (se figur 2.1). Iltsvind i de indre danske farvande opstår som regel i det salte bundvand. Iltsvind kan også opstå over haloklinen, men det kræver vindstille perioder, hvor blandingen er lav, og her vil iltvindene som regel være mere kortvarige. I det følgende fokuseres der på processerne i bundvandet. Bundvandet har sin oprindelse i Skagerrak og Nordatlanten og strømmer mod Østersøen. Når vandet passerer Kattegat-Skagerrak fronten dykker det ned under det udstrømmende og mere brakke vand fra Østersøen og bliver adskilt fra overfladevand af dette saltspringlag.



Figur 2.1 Dette nord til syd tværsnit gennem de danske farvande viser, hvordan variationer i saltindhold skaber et stort set permanent springlag. Fra Nielsen 2005.

Saltspringlaget udgør en barriere for blanding mellem det iltede overfladelag og bundlaget. Ændringer i vandsøjlen lagdeling vil derfor påvirke nedblandingen af ilt fra overfladevand til bundvand. En kraftigere lagdeling og/eller en generelt svagere vind vil dæmpe den turbulente blanding i vandsøjlen, og dette vil generelt reducere iltkoncentrationen i bundvandet. Samtidig vil blandingsprocesserne også påvirke tilførslen af næringssalte til overfladelaget og dette kan forventes af have en modsatrettet effekt i og med, at algerne ny produktion af organisk materiale vil aftage. Da der kun er meget lidt lys under springlaget har fotosyntesen lille indflydelse på iltforholdene i bundvandet. Om sommeren er der ofte en forøget aktivitet i planktonet i springlaget, både når det gælder produktion og respiration

(Bjørnsen & Nielsen 1991). Samlet set er det dog de respiratoriske processer, der dominerer, og dette kan medføre et lokalt iltminimum (Kruse & Rasmussen 1995, Karlson et al. 1996). Et lokalt iltminimum i springlaget vil yderligere bremse nedblandingen af ilt til bundvandet.

På grund af den begrænsede blanding, vil den mængde ilt, som findes i vandet fra Skagerrak på det tidspunkt, hvor det dykker ned og bliver til bundvand være den vigtigste kilde for de respiratoriske processer ved bunden og i bundvandet (Rasmussen et al. 2003). Dermed udgør denne pulje en vigtig randbetingelse for udviklingen af iltvind senere på året under vandets passage gennem de indre danske farvande.

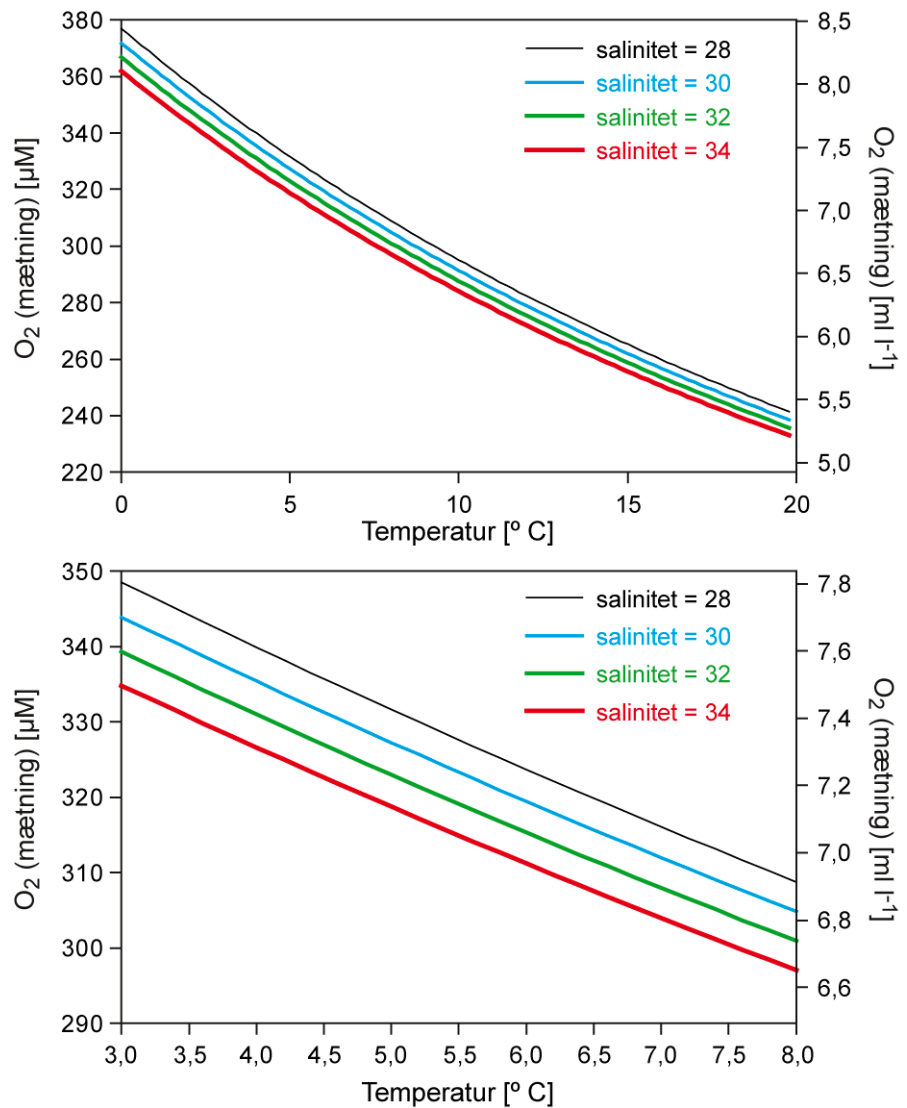
2.2.3 Iltmætning

Den mængde ilt, der kan opløses i vand ved 100% mætning, er temperaturafhængig og aftager med stigende temperatur. En varmere vandsøjle vil betyde, at iltmætningskoncentrationen bliver mindre i blandingslaget (figur 2.2). Dette har betydning for iltkoncentrationen i det vand, der strømmer fra Skagerrak og videre ned i Kattegat og Bælthavet. Hvorvidt denne iltpulje er stor nok til at dække iltforbruget fra bundvandet og sedimentet i den periode, hvor vandet opholder sig i de indre danske farvande eller om der opstår iltvind, afhænger dermed af bundvandets opholdstid og hvor hurtigt iltten forbruges. Opholdstiden er bestemt af de fysiske processer, mens reguleringen af forbrugsraterne er bestemt af de biologiske processer.

2.2.4 Iltforbrugende processer

De respirationsrater, der er målt forskellige steder i de indre danske farvande, har en stor variation både i tid og rum, men generelt er raterne højest om sommeren og i de kystnære områder. Det er således ikke muligt at give en samlet beskrivelse af iltforhold for alle lokale områder. Specielt når der er ved at opstå iltvind, er de iltforbrugende processer, svære at beskrive, idet der kan opstå en kaskade af processer som påvirker iltodynamikken. Eksempler er udslip af reducerede forbindelser fra bunden eller massedød af bundfaunaen, som kortvarigt forøger iltforbruget kraftigt. Det antages i det efterfølgende, at risikoen for iltvind lokalt kan beskrives som en sandsynlighed, der er styret af iltkoncentrationerne regionalt i bundvandet.

Som udgangspunkt antages det, at der ikke sker kvalitative ændringer i økosystemernes struktur. Dvs. at iltforbrugende processer i vand og havbund styres af de samme processer, som kendes fra fx det sydlige Bælthav i nutiden. I det omfang, der findes anvendelige empiriske sammenhænge for respiration og temperatur i vandsøjlen og i bunden, vil iltindholdet blive modelleret med konstante forbrugsrater, hvor der foretages en justering af iltforbruget i forhold til en given temperaturændring.



Figur 2.2 (Øverst) Iltmætningen som funktion af temperaturen for en salinitet på henholdsvis 28, 30, 32 og 34. (Nederst) Iltmætningen som funktion af temperaturen er her vist i et lille temperaturinterval omkring 5° Celsius, svarende til bundvandstemperaturen i det nordlige Kattegat i forårs månederne omkring år 2000.

Ved udviklingen af lokale og regionale iltsvind er fordelingen af iltforbrug i bundvandet og sediment kritisk, men denne fordeling er imidlertid dårligt kendt, især når iltindholdet er meget lavt i bundvandet. Til sammenligning med de empirisk bestemte rater vil der derfor blive opstillet en simpel økologisk model til at forudsige fordelingen mellem respirationen i bundvand og sediment.

Der sker løbende et forbrug af ilten i bundvandet som følge af respiration i bundvandet og respirationen i selve bunden. Kilden til respirationen i begge medier er i hovedsagen den samme, nemlig den primærproduktion, der foregår i den fotiske zone af vandsøjlen, og som resulterer i en flux af organisk materiale gennem vandsøjlen. Dette organiske materiale omsættes, mens det synker ned gennem vandsøjlen og resulterer i et iltforbrug under passagen gennem bundvandet. Den videre omsætning, efter at materialet er blevet deponeret på bunden, er kilden til bundens iltforbrug.

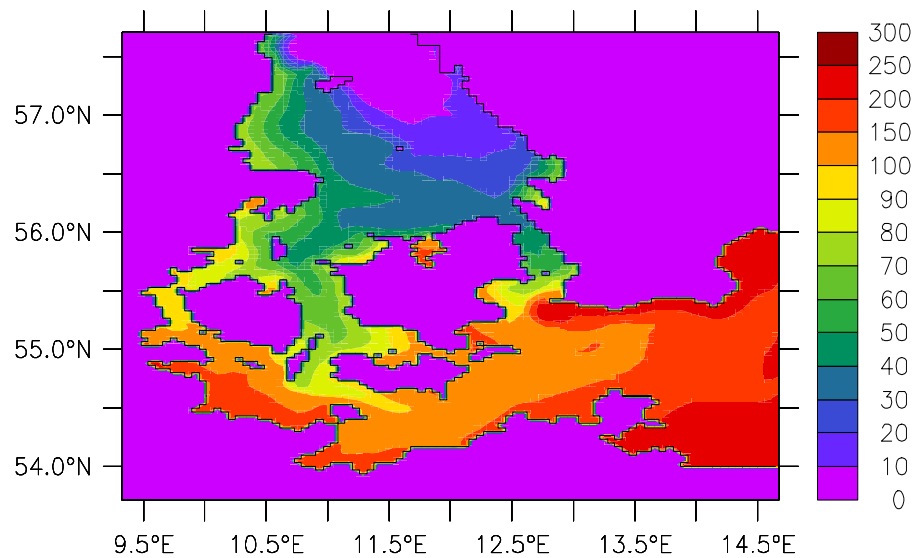
Den samlede mængde af organisk stof som produceres og eksporteres til bundvandet og bunden bestemmer, hvor stort det samlede potentielle iltforbrug kan være, også kaldet iltgælden. Jo mere næring der er i vandet, jo højere er produktionen og jo højere er det potentielle iltforbrug og risikoen for, at der udvikles iltsvind.

Det antages, at den overordnede fordeling af labilt partikulært organisk kulstof (POC) og dermed iltforbrug i bundvand og sediment for hele vækstsæsonen, afhænger af dynamikken i planktonet under forårsopblomstringen i det tidlige forår. De særligt interessante processer er dels sedimentationsraten af uomsat POC og dels den del af POC-produktionen, der omsættes i vandsøjlen og giver anledning til regenereret produktion i løbet af vækstsæsonen.

Afgørende er imidlertid ikke kun den samlede mængde organisk stof, som eksporteres til bunden og bundvandet, men også om hvornår nedbrydningen sker, hvor den foregår og i særdeleshed om det sker i sedimentet eller i vandfasen. I vandfasen viser målinger af respirationsrater at fjernelsen af ilt er uafhængig af iltkoncentrationen i vandet ned til meget lave iltkoncentrationer på omkring 0,8 mg/l O₂ (Sampou & Kemp 1994). Dette skyldes sandsynligvis, at det partikulære materiale er porøst og har en partikelstørrelse på under 1-2 mm og derfor i hovedregelen ikke er diffusionsbegrænset. Det der er afgørende for proceshastigheden, er mængden af let omsætteligt organisk stof i vandsøjlen og der findes i de fleste tilfælde en nogenlunde lineær sammenhæng mellem respirationsraten og koncentrationen af organisk stof i vandet (Olesen et al. 1999; Jensen et al. 1990). Sedimentationshastigheden af det partikulære materiale bestemmer opholdstiden i bundvandet, som antages at være 1-2 uger. Denne tidsskala er mindre end bundvandets opholdstid i Kattegat og Bælthavet (se figur 2.3). Dvs. at bundvandets respiration kan betragtes som et "aftryk" af produktionsforholdene i overfladelaget. Når bundvandet bevæger sig i forhold til overfladelaget, vil de respiratoriske processer afspejle de gennemsnitlige forhold i det produktive overfladelag. Derfor er det rimeligt at beskrive respirationsraten ud fra den gennemsnitlige primærproduktion for Kattegat-området.

I bunden findes der en meget større pulje af organisk stof end i vandsøjlen og iltoptaget i overfladesediment er meget højere pr. volumenendehed end i vandsøjlen. Målte rater viser, at en kvadratmeter bund optager hvad der svarer til iltforbruget i 2-8 m³ af vandsøjlen (Graneli 1992, Rydberg et al. 1990). Bundens iltoptagelse er resultatet af både mikrobiel respiration og bundfaunaens respiration. Nogle organismer er i stand til at pumpe vand ned i sedimentet og på den måde forårsage en transport af ilt ned i sedimentet. For de mikrobielle processer gælder derimod, at ilten skal diffundere ned i sedimentet gennem det diffusive grænselag lige over bunden. Oftest er iltforbruget i sedimentet diffusionsbegrænset, hvilket vil sige, at bundens potentielle iltforbrug er væsentligt højere end den diffusive tilførsel. Dette ses fx, når iltforbruget stiger i de tilfælde, hvor sedimentet bliver resuspenderet i vandsøjlen, og hvor der derfor ikke er nogen diffusionsbegrænsning. Den diffusive tilførsel af ilt er styret af koncentrationsgradienten fra vandet og ned i sedimentet. Jo højere iltkoncentrationen er i vandet, jo hurtigere optager bunden ilt. Omvendt vil

optaget falde, hvis koncentrationen i bundvandet falder. Dvs. at bundens iltforbrug kan betragtes som en førsteordens proces.



Figur 2.3 Gennemsnitsalderen i bundvandet af det anvendte alderssporstof i modellen siden det sidst var i kontakt med Skagerrakranden (se i øvrigt Bendtsen et al. 2005). Det ses, at bundvandet gradvist bliver ældre efterhånden som det bevæger sig ned i Kattegat og Bælthavet. Alderen er vist i antal dage for august måned i 2003.

Den relative betydning af sedimentets og vandets respiration for udviklingen af iltsvind i bundvandet afhænger i første omgang af vanddybden under springlaget. Er dybden stor, vil den relative betydning af sedimentet være lille, mens iltindholdet meget hurtigt kan falde, hvis dybden er lille og der kun er et tyndt lag vand under springlaget. På store vanddybder er de respiratoriske processer i vandfasen de vigtigste. Det forhold, at vandets iltoptag er uafhængigt af iltkoncentrationen betyder, at iltsvind kan opstå meget hurtigt, hvis mængden af suspenderet eller opløst organisk stof er stor, som fx i tilfælde af udsynkende algeopblomstringer eller ved resuspension af sediment. Sker optaget hovedsageligt i sedimentet, vil udviklingen af iltsvindet gå langsommere efterhånden som iltkoncentrationen falder. For det samlede iltforbrug i bundvandet gælder, at processerne i vandsøjlen og bunden kan betragtes som konkurrerende i de områder hvor der ikke foregår nogen primærproduktion på bunden. Dette skyldes, at processerne er baseret på samme kilde af organisk materiale. Hvis klimaændringer medfører en stigning i respirationsraten i vandfasen kan det betyde en mindre tilførsel af partikulært organisk stof, til bunden og dermed et fald i bundens respirationsrate. Hidtil har der dog været et overskud af organisk materiale i forhold til respirationen i bundvand og sediment, idet der sker en begravelse på omkring 1-10% af det sedimenterede organiske materiale (Jørgensen & Revsbech 1989).

I både sedimentet og i vandfasen stiger respirationsprocesserne med stigende temperatur således, at en stigning i temperaturen på ca. 10 grader fører til en 2-3 gange større respirationsrate. Dette kommer direkte til udtryk i vandsøjlen, mens effekten af en temperaturforøgelse i nogen udstrækning bliver modvirket af en øget diffusionsbegrænsning for sedimentets iltoptagelse.

2.2.5 Økosystemets struktur

Det er sandsynligt, at klimaændringer også vil medføre ændringer i økosystemets sammensætning og funktion som følge af en biologisk tilpasning til de ændrede klimaforhold. Dette kan ændre det biogeo-kemiske kredsløb ved fx at påvirke den samlede mængde organisk materiale, der eksporteres fra overfladelaget til bundlaget. Et andet meget vigtigt forhold er bundfaunaens afhængighed af ilt. Hvis der optræder langvarige iltsvind med koncentrationer under 2 mg/l, vil størstedelen af bundfaunaen forsvinde og ikke været genetableret det næste år. Dvs. at hvis iltsvind bliver hyppigere, må det antages, at en større del af bundens respiration vil gå via det mikrobielle led. Der tages ikke højde for sådanne ændringer i denne analyse af iltforholdene.

2.2.6 Øvrige klimatisk betingede effekter

Ændringer i indstrålingen som følge af ændringer i skydækket vil påvirke temperaturforholdene samt fotosyntesen i vandsøjlen.

Ændringer i nedbørsforholdene kan ændre belastningen fra land, idet en øget afstrømning kan medføre en større næringsstofftilførsel til de åbne havområder

2.2.7 Principper for modellering af ilt

Bundvandets samlede iltforbrug antages at hidrøre fra 3 forskellige dræn.

- 1) Respiration i vandfasen, som er reguleret af mængden af organisk stof og som stiger eksponentielt med temperaturen, men er uafhængig af iltkoncentrationen ned til meget lave mætningsgrader.
- 2) Respiration af bundens invertebratfauna antages at være begrænset af substrat og uafhængig af iltkoncentrationen idet det dog antages, at halvmætningskonstanten er ret høj på 1 mg/l og med en eksponentiel temperaturafhængighed.
- 3) Bundens mikrobielle respiration er diffusionsbegrænset og temperaturafhængig. Den koblede effekt antages at skalere med forholdet mellem iltkoncentrationen og mætningskoncentrationen.

Det antages endvidere at disse processer er ens over hele det område, der er dækket af bundvandlaget i de indre danske farvande:

$$F = (W * Q1 * M1) + (F * Q2 * M2) + (M_{icr} * D)$$

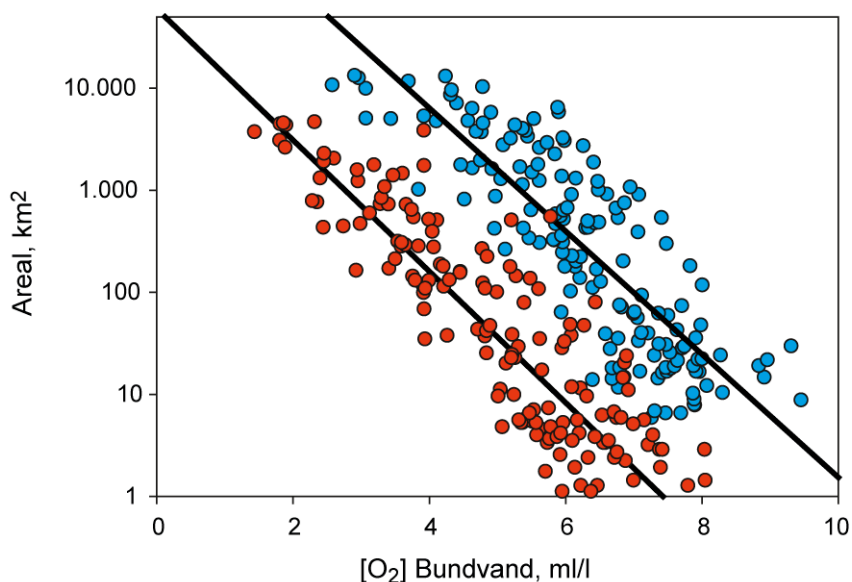
Hvor F er den samlede forbrugsrate i bundvandet, W, F og M_{icr} er respirationsrater for henholdsvis vandfasen, bundfaunaen og bundens mikrobielle samfund. Q er temperaturafhængigheder for de enkelte processer, M er mætningsrelationer og D er den diffusive adgang til ilt for bundens mikrobielle samfund.

Tilførslen af ilt er givet ved den temperaturafhængige koncentration ved Kattegat-Skagerrak fronten samt ved nedblanding fra atmosfæren.

Det antages, at disse processer beskriver de generelle regionale iltforhold under et givet klimascenario mens chancen for at der opstår iltvind eller kraftige iltvind lokalt er givet ved en empirisk bestemt sandsynlighed i relation til de regionale iltforhold i bundvandet (figur 2.4).

Iltforholdene ved de forskellige klimascenarier bestemmes dels ved en dynamisk 3-D model drevet af aktuelle klimadata og dels ved en simpel model, der beregner iltkoncentrationen over året for vandmasser med forskellig alder, som er defineret som den gennemsnitlige tid, der er gået siden en vandpartikel har været i kontakt med atmosfæren.

Ved modelleringen i klimascenarier blev der i de fleste tilfælde foretaget en korrektion af respirationsraterne således, at det samlede iltforbrug svarede til den nutidige primærproduktion i de indre danske farvande. Ved denne korrektion antoges det, at bundens samlede årlige iltforbrug reduceredes svarende til vandsøjleens øgede forbrug fordelt ligeligt mellem den mikrobielle og faunaens respiration.



Figur 2.4 Maksimal udbredelse af kraftigt iltvind (under 2 mg/l, røde punkter) og iltvind (under 4 mg/l, blå punkter) lige over bunden uge for uge 2001-2004 mod den gennemsnitlige iltkoncentration i hele vandmassen under 15 m i Bælthavet.

3 Klimascenarier

3.1 Forbehold omkring klimaet i år 2100

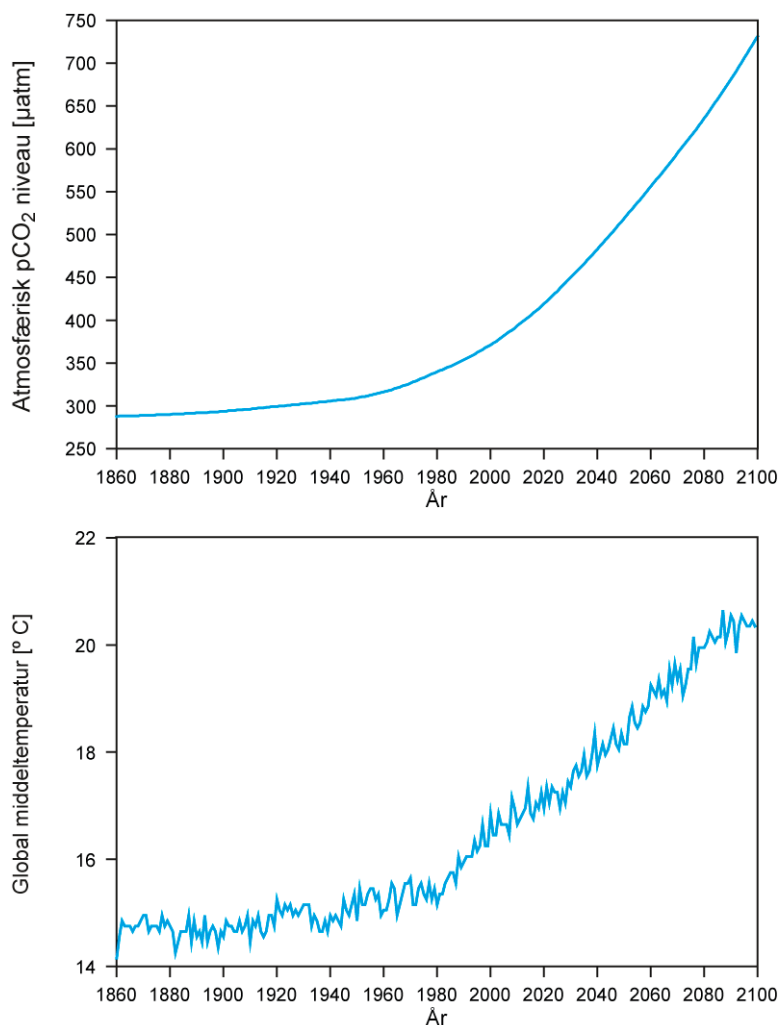
I nærværende rapport er der taget udgangspunkt i et klimascenarium, der er bestemt ud fra en koblet atmosfære-, hav-, havismodel, som er integreret i tid fra en førindustriel periode og frem mod år 2100, således som nærmere beskrevet nedenfor. Ved anvendelsen af et sådant scenarium er der en række overordnede forbehold, som skal tages i betragtning når konsekvenserne af en mulig klimaændring skal bestemmes for de indre danske farvande. Disse forbehold er primært relateret til klimamodellernes evne til at forudsige forhold omkring år 2100 ikke er kendt. Forudsætningen for at anvende sådanne studier er derfor naturligvis begrænset af denne grundliggende usikkerhed.

Generelt er de kritiske elementer i en klimamodelberegning relateret til processer, som i dag ikke er kendt tilstrækkeligt til, at de med sikkerhed kan beskrives under ændrede klimatiske forhold. Eksempelvis vil ændringer i den nordatlantiske strøm på grund af ændrede vindforhold i Nordatlanten eller ændringer i de hydrografiske forhold i de nordiske have (nord for Island) kunne påvirke temperaturforholdene i den nordlige Nordsø, og dermed indirekte påvirke forholdene i de indre danske farvande. Ændringer i skydækket er et andet eksempel på en kritisk proces, som har stor betydning for udfaldet af et klimascenarium. Udover rent fysiske processer vil stigningen af atmosfærens kuldioxidkoncentration også påvirke udfaldet af et klimascenarium. I det valgte scenarium følger kuldioxidkoncentrationen det, som er observeret, og fremskriver derefter atmosfærens CO₂ indhold frem mod år 2100, men der er stadig usikkerhed omkring, hvor meget af den antropogene CO₂ der vil blive optaget i havet og på land og derfor er den grundliggende klimapåvirkning fra atmosfærens CO₂-tilvækst også behæftet med en vis usikkerhed. Disse tre eksempler illustrerer den kompleksitet, et klimascenarium er baseret på. Disse overordnede forbehold betyder, at de efterfølgende scenarier og analyser skal ses i forhold til den grundliggende usikkerhed, der er knyttet til beregningen af et klimascenarium.

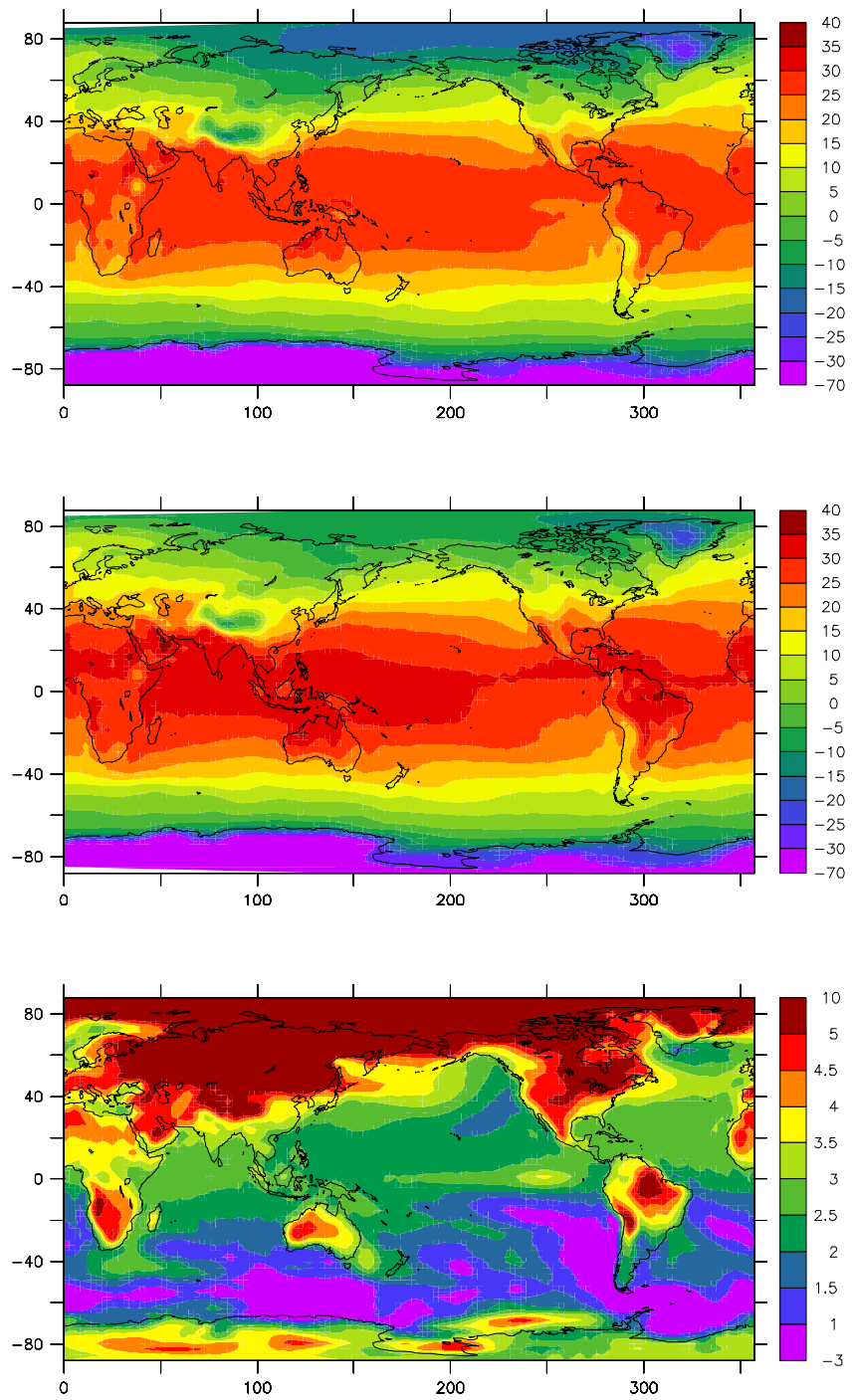
3.2 Anvendelse af klimascenarier

Til beskrivelsen af fremtidens klima benyttes resultater fra en tidligere modelkørsel af en koblet atmosfære-, hav-, havismodel, benævnt ECHAM4/OPYC3, som er integreret for perioden 1860-2100 (Roeckner et al. 1999). Modelkørslen drives af den strålingsmæssige påvirkning fra de vigtigste drivhusgasser: I perioden 1860 – 1990 er koncentrationen af drivhusgasser foreskrevet i forhold til de observerede koncentrationer af CO₂, CH₄, N₂O og flere industrigasser, som fx CFC-gasser. Fra 1990 og frem, følger koncentrationen et såkaldt København-scenarium, svarende til det såkaldte IS92a-scenarium, som vist i figur 3.1 (øverst) (Houghton et al. 1996). Som følge af den strå-

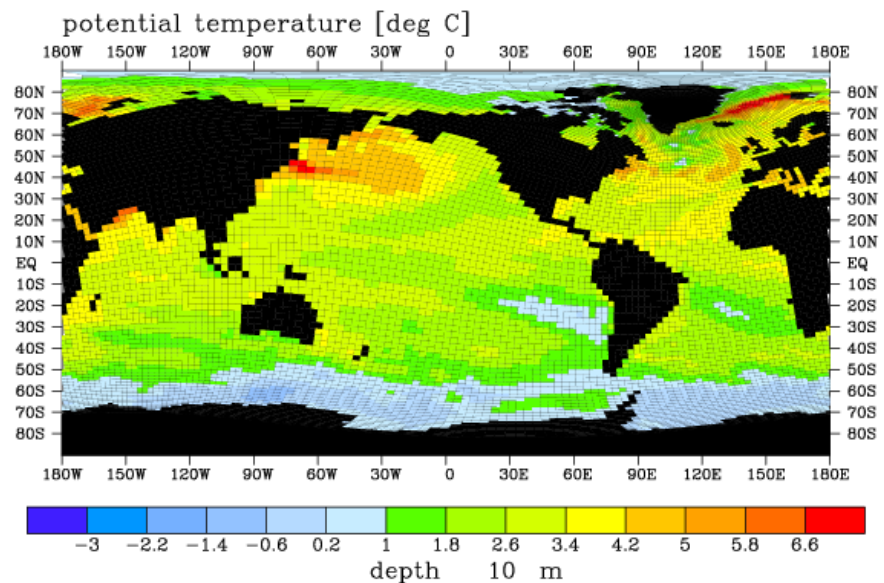
lingsmæssige påvirkning øges Jordens middeltemperatur med omkring 4.5°C i år 2100 i forhold til år 2000 (figur 3.1). Opvarmningen ved overfladen medfører en generel temperaturstigning på omkring 3°C fra troperne til mellembreddegrader, hvorimod der ses en kraftigere opvarmning i de polare og subpolare områder på den nordlige halvkugle (figur 3.2). Over havene er ændringer i overfladetemperaturen reguleret af dynamikken i vandsøjlen og derfor ses der en generel sammenhæng mellem lufttemperaturen og havtemperaturen (figur 3.3).



Figur 3.1 (Øverst) Den atmosfæriske koncentration af kuldioxid (CO_2) i IS92a scenariet (Houghton et al. 2001). Koncentrationen er her vist som partialtrykket (pCO_2) i perioden 1860 - 1900. (Nederst) Den globale middeltemperatur fra den koblede atmosfære-havis-ocean model ECHAM4/OPYC3 i GHG-scenariet (Roeckner et al. 1999) i perioden 1860 - 2100. Scenariet er baseret på en udvikling i drivhusgasser svarende til IS92a, som vist øverst.



Figur 3.2 Temperaturudvikling ifølge ECHAM4/OPYC3 GHG-scenariet (Roeckner et al. 1999). Middeltemperaturen 1970-1999 (øverst), 2070-2099 (i midten) og forskellen mellem perioden 2070-2099 og perioden 1970-1999 (nederst). Temperaturskalaen er vist i grader Celsius og projektionen er kartesisk.



Figur 3.3 Udviklingen af overfladetemperaturen i havet ifølge det valgte IS92a-scenarium (Roeckner et al. 1999). I figuren er vist ændringen af den årlige middelhavoverfladetemperatur mellem perioden 2090-2100 og 1860-1890 modelleret med en global havmodel (Bendtsen 2004, Marsland et al. 2003). Opvarmningen af havet ses generelt at være på omkring 1 - 4 grader Celsius. Opvarmningen i Sydhavet er mindre pga. den større opblanding i vintermånederne. Samtidig er temperaturændringer små i Arktis i områder der fortsat er dækket af is. I Nordsø-/Østersøområdet er opvarmningen omkring 3 - 5 grader Celsius.

En analyse af klimascenariets overfladetemperatur for perioderne 1870 - 1899, 1970 - 1999 og 2070 - 2099 for positionen 57.2° N, 11.2° E, svarende til en position i Kattegat viser, at temperaturstigningen igennem de sidste 100 år er relativt lille. Til gengæld er der en betydelig temperaturstigning i perioden 2000 - 2100 på omkring 3,5° C. Ændringen af middeltemperaturen i forhold til det nuværende klima for den udvalgte position er vist i tabel 3.1, og de månedlige ændringer er angivet i tabel 3.2.

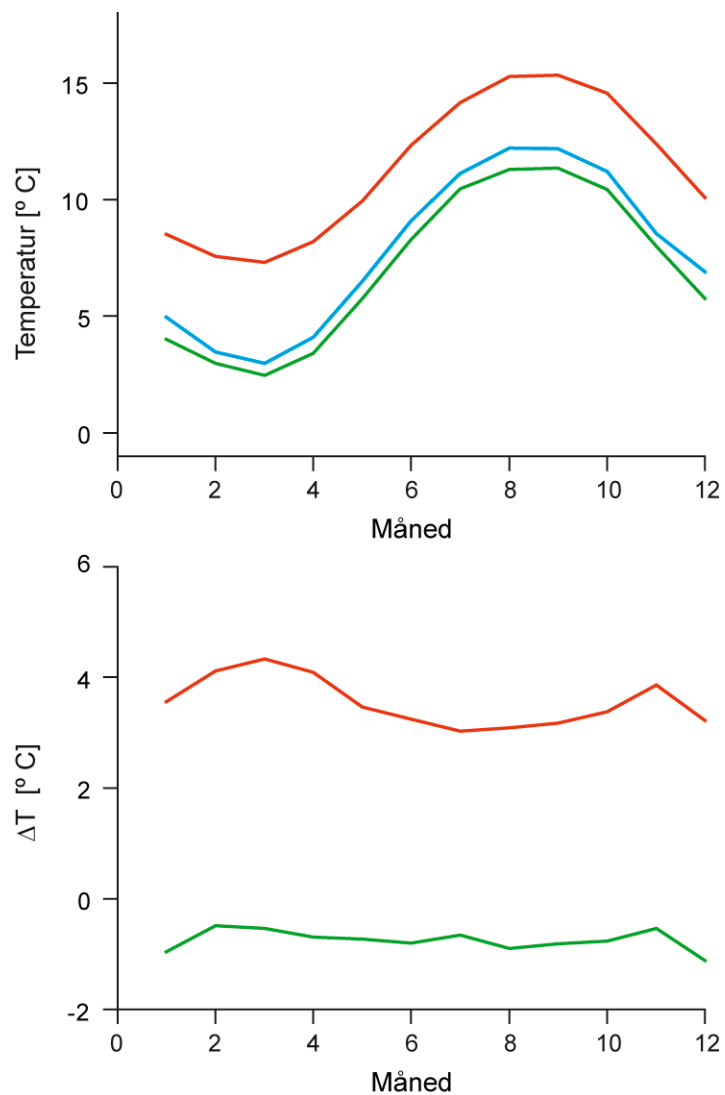
Tabel 3.1 Oversigt over temperaturændringer mellem det fortidige og fremtidige klima ifølge ECHAM4/OPYC3 scenariet for en position i Kattegat.

| Periode | Scenarium | Temperaturændring i forhold til perioden 1960-1999 |
|-------------|---------------------|--|
| 1860 - 1899 | ECHAM4/OPYC3: IS92a | -0,7° C |
| 2070 - 2099 | ECHAM4/OPYC3: IS92a | 3,5° C |

Af figur 3.4 ses det at temperaturstigningen omkring år 2100 er relativt konstant igennem året. Dette skyldes at klimaet omkring Danmark er kraftigt styret af temperaturen i det omgivende hav og der er derfor ikke de store klimatiske udsving imellem sommer og vinter. Dvs. at for ECHAM4/OPYC3 IS92a-scenariet er der en temperaturstigning på omkring 3,5° C og der er kun svingninger med omkring en halv grad igennem året. Den relativt konstante temperaturstigning implicerer at havtemperaturen forventes at stige tilsvarende, idet der indtræder en ligevægt imellem lufttemperaturpåvirkning og havtemperaturen efter nogle få år i de indre danske farvande pga. de relativt lave vanddybder.

Table 3.2 Overview of temperature changes between the past and future climate according to ECHAM4/OPYC3 scenario distributed by the individual months for a position in Kattegat.

| Måned/Periode | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|----------------------|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1970 - 1999 | 5,0 | 3,5 | 3,0 | 4,1 | 6,5 | 9,1 | 11,1 | 12,2 | 12,2 | 11,2 | 8,5 | 6,9 |
| 2070 - 2099 | 8,5 | 7,6 | 7,3 | 8,2 | 10,0 | 12,3 | 14,2 | 15,3 | 15,4 | 14,6 | 12,4 | 10,1 |
| Forskel: 2100 - 2000 | 3,6 | 4,1 | 4,3 | 4,1 | 3,5 | 3,2 | 3,0 | 3,1 | 3,2 | 3,4 | 3,9 | 3,2 |



Figur 3.4 (Øverst) Temperaturudviklingen for perioden 1870-1899 (grøn), 1970-1999 (blå) og 2070-1999 (rød) for GHG-scenariet på positionen 57.2° N, 11.2° E, svarende til en position i Kattegat. (Nederst) Forskellen mellem perioden 2070-2099 og perioden 1970-1999 (rød) og tilsvarende perioden 1870-1899 og perioden 1970-1999 (grøn) for de enkelte måneder, jvf. tabel 3.2. Der ses en relativ lille variation igennem året.

[*Tom side*]

4 Metodebeskrivelse

Af de mulige klimarelaterede effekter præsenteret i kapitel 3 blev miljøændringer som følge af ændringer i (1) temperaturen, (2) vindforholdene og (3) tilførslerne fra land, analyseret. Alle tre forhold kan potentielt påvirke havmiljøet markant. Påvirkningen fra de øvrige forhold kan også få stor betydning for det fremtidige havmiljø, men disse blev ikke eksplicit medtaget i denne analyse. En vurdering af deres betydning indgik dog i den afsluttende diskussion af resultaterne.

Temperatureffekten blev bestemt ved at modellere et klimascenarium, hvor temperaturstigningen fulgte forudsigelserne fra det globale klimascenarie. Effekten af ændringer i vind og øget tilførsel af næringssalte blev undersøgt ved at lave et følsomhedsstudie til disse parametre. I forhold til forudsigelser af iltsvind kan det forventes, at en kommende implementering af Vandrammedirektivet vil medføre reduktioner i tilførsel af næringssalte og dermed en mindsning af iltforbrugende materiale i vandsøjlen. Effekten heraf indgik som en reduktion af næringssalttilførslen i en følsomhedsanalyse.

Ændringerne blev bestemt ved at sammenstille resultater fra fysiske og biogeokemiske modeller samt ved at implementere en robust iltmodel direkte i en hydrodynamisk model for området.

4.1 Modelbeskrivelse af iltforbrugende processer

Iltforholdene i bundvandet i det valgte klimascenarium antoges i udgangspunktet at være styret af det ændrede mætningsiltindhold ved den forventede temperaturstigning i de områder, hvor bundvandet produceres.

Som udgangspunkt blev det forudsat, at der ikke skete kvalitative ændringer i økosystemernes struktur. Dvs. at iltforbrugende processer i vand og havbund bliver styret af de samme processer, som kendes fra fx det sydlige Bælthav i nutiden. Der findes anvendelige empiriske sammenhænge for respiration og temperatur i vandsøjlen og i bunden og i det omfang det var muligt, blev iltindholdet modelleret med konstante forbrugsrater, hvor der blev foretaget en justering af iltforbruget i forhold til den foreskrevne temperaturanomali.

Ved udviklingen af lokale og regionale iltsvind er fordelingen af iltforbrug i bundvandet og sedimentet kritisk. Denne fordeling er i midlertidigt dårligt kendt især når iltindholdet er meget lavt i bundvandet. Til sammenligning med de empirisk bestemte rater blev der derfor opstillet en simpel økologisk model til at forudsige fordelingen mellem respirationen i bundvand og sediment. Det blev antaget at den overordnede fordeling af labilt POC, og dermed iltforbrug i bundvand og sediment for hele vækstsæsonen, afhang af dynamikken i planktonet under forårsopblomstringen i det tidlige forår. De særligt interessante processer er dels sedimentationsraten af uomsat

POC og den del af POC-produktionen der omsættes i vandsøjlen, og som giver anledning til regenereret produktion i løbet af vækstsæsonen. Scenarier med forskelligt næringsstofniveau blev analyseret med denne model.

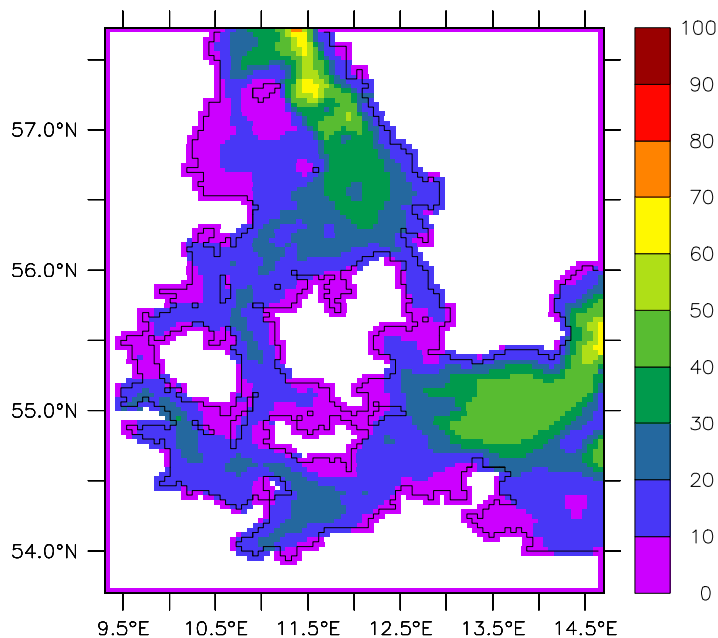
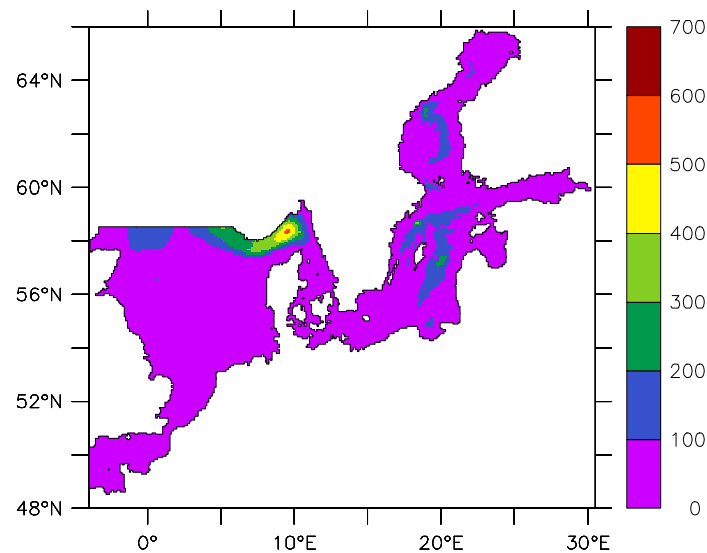
4.2 Modelbeskrivelse af den hydrodynamiske model

Ændringer i de fysiske tilstandsvariable, som strøm, turbulent blanding, temperatur og salinitet, blev bestemt ved at sammenligne modelløsninger for fremtidens klima i forhold til modelløsninger der repræsenterer det nuværende klima. Den tredimensionale cirkulationsmodel der blev anvendt, løser de såkaldte "primitive ligninger" samt stoftransportligningerne. Modellen er baseret på COHERENS-modellen, som er en avanceret 3D-model udviklet igennem en række EU-projekter (Luyten et al. 1999). Modellen indeholder et k-epsilon turbulensskema og er formuleret på et såkaldt sigmakoordinat gitter, hvilket gør den velegnet til at bestemme strømforholdene i områder, hvor fx bundfriktion er af betydning. Dette er tilfældet i de relativt lavvandede danske farvande.

Da hele området fra Skagerrak til Arkona kan opfattes som en stor frontzone mellem det salte Nordsøvand og det brakke Østersøvand, blev modellen sat op i to forskellige opsætninger for at modellere de specielle forhold der gør sig gældende i de indre danske farvande. En opsætning i 7,5x7,5 km med 20 vertikale lag beskriver de overordnede transporter i hele området og denne opsætning bestemte bl.a. vindstuvningseffekter i Skagerrak og i den vestlige Østersø. En finere opsætning med en gitterstørrelse på 3,7x3,7 km og 10 vertikale lag blev anvendt til den mere detaljerede beskrivelse af forholdene fra Skagerrak til Arkonahavet. Denne model blev drevet med randbetingelser bestemt af den grovere 7,5x7,5 model. En oversigt over modeldomænerne er vist i figur 4.1.

Modellen drives af vejrfelter af vind, overfladetemperatur, relativ luftfugtighed, skydække og nedbør i 1-times intervaller fra en operationel vejrmødel der drives ved DMU (Brandt et al. 2001). For perioden 2002-2003 blev der benyttet vejrfelter til at drive de udvalgte scenarier. Modellens tidevand blev bestemt fra en barotrop tidevandsmodel på de åbne rande i Nordsøen og i den Engelske kanal. Der blev medtaget de fire mest betydende tidevandskonstituentter.

De enkelte scenarier blev udført for perioden 2002 - 2003. Integrationen af modellen foregik ved at Nordsø/Østersø-modellen blev startet ud fra et sæt begyndelsesbetingelser året før og modellen integrerede herefter i et helt år og i det efterfølgende år blev randbetingelserne bestemt på de åbne rande. For eksempel startedes modellen i januar 2001 og blev integreret frem til januar 2002. Dette sikrede at den overordnede vandstandsfor-skel imellem Skagerrak og Østersøen blev etableret. Igennem året 2002 blev vandstand, temperatur og salinitet bestemt på randene til de indre danske farvande, og disse felter benyttedes efterfølgende til at drive den lokale model for de indre danske farvande. Tilsvarende procedure blev anvendt for året 2003.



Figur 4.1 Modelområdet og den tilhørende batymetri er vist for opsætningen med en horisontal gitteropløsning på 7,5 x 7,5 km i (øverst) samt den "indkapslede" model i 3,7 x 3,7 km (nederst). Den indkapslede (eng: "nested") model drives på de åbne rander mod Skagerrak og Arkonahavet af modelløsninger af vandstand, temperatur og salinitet fra opsætningen vist øverst.

I 3-D modelleringen af iltforholdene blev forbrugsraten i bundvandet, som beskrevet i afsnit 2.2.7, sat som en funktion af temperaturen samt koncentrationen af labilt organisk materiale (POC). Bundens iltforbrug blev beskrevet simpelt ud fra puljen af labilt POC i sedimentet. Det blev antaget, at overfladevandet og bundvandet ved Skagerrak-randen var 100% mættet med ilt.

4.3 Scenarier og følsomhedsanalyse af de indre danske farvande

Den rumlige opløsning i ECHAM4/OPYC3 modellen beskriver kun de regionale effekter, dvs. på rumlige skalaer på omkring 200 - 300 km. Dette vurderes at være repræsentativt når effekten på temperaturfelterne skal beskrives alene. Derfor blev der tilføjet en anomali til modellens drivfelter af temperatur for det nuværende klima i overensstemmelse med modelresultaterne fra den globale klimamodel. Der blev taget udgangspunkt i de meteorologiske felter for året 2003, og følsomheden til en temperaturstigning på 3,1° C blev undersøgt. Denne temperaturstigning var lidt mindre end middeltemperaturstigningen på 3,5° C for hele året, men den repræsenterede derimod temperaturen i sensommeren (jvf. tabel 3.2).

Mht. følsomheden for vindfelterne blev dette undersøgt ved at reducere vindfelterne fra året 2003 over området med 10%. Tilsvarende blev følsomheden undersøgt for en ændring af næringsstofforførslen som følge af øget afstrømning ved at øge produktionen af partikulært organisk kulstof (POC) med 10%, svarende til tilvækst i iltforbrugsraten på 10%. Implementering af Vandrammedirektivet kan forventeligt medføre en reduktion i tilførsel af næringsalte. Det er ikke på nuværende tidspunkt muligt at forudsige en eksakt størrelse af denne reduktion, men ud fra eksisterende viden om antropogene tilførsler til Kattegat er en 40% reduktion i forhold til det nuværende niveau blevet valgt. Det vil i en fremskrivning med øget naturlig afstrømning give en reduktion på omkring 30%. Dette blev derfor analyseret ved at sænke iltforbrugsraten med 30%.

En række scenarier blev opstillet for at danne grundlag for en analyse af temperaturpåvirkning, vindpåvirkning og belastningspåvirkning af havmiljøet. Disse scenarier er beskrevet nedenfor og opsummeret i tabel 4.1.

Scenarium 1: Kontrolscenarium med år 2003 vejrfelter.

Scenarium 2: IS92a scenarium i både år 2050 og år 2100 hvor temperaturændringer er henholdsvis 2,7 og 3,1° C varmere.

Scenarium 3: Som scenarium 1, samt en 10% reduktion i vindstyrken.

Scenarium 4: En stigning af temperaturen på 3,1° C samt en 10% reduktion i vindstyrken (jvf. scenarium 3).

Scenarium 5: Som scenarium 1, samt en 10% tilvækst af POC-eksporten.

Scenarium 6: En stigning af temperaturen på 3,1° C, samt en 10% tilvækst af POC-eksporten.

Scenarium 7: En stigning af temperaturen på 3,1° C, samt en 10% reduktion af vind og en 10% tilvækst af POC (sammenfald af iltreducerende faktorer).

Scenarium 8: En stigning af temperaturen på 3,1° C, samt en 10% reduktion af vind og en 30% reduktion af POC.

Tabel 4.1 Oversigt over scenarier.

| Scenarium # | Temperaturpåvirkning T | Vindpåvirkning W | Næringssalt-påvirkning | Klima |
|-------------|------------------------|---------------------|------------------------|--------------------------|
| 1 | - | - | - | Nuværende |
| 2 | +2,7 / +3,1° C | - | - | år 2050/2100, jvf. IS92a |
| 3 | - | Vindhastighed: -10% | - | Nuværende |
| 4 | +3,1° C | Vindhastighed: -10% | - | år 2100, jvf. IS92a |
| 5 | - | - | Stigning: +10% | Nuværende |
| 6 | +3,1° C | - | Stigning: +10% | år 2100, jvf. IS92a |
| 7 | +3,1° C | Vindhastighed: -10% | Stigning: +10% | år 2100, jvf. IS92a |
| 8 | +3,1° C | Vindhastighed: -10% | Reduktion:-30% | år 2100, jvf. IS92a |

[Tom side]

5 Resultater

5.1 Temperaturændringer

Temperaturændringer afspejlede den generelle temperaturstigning i de anvendte drivfelter. Dette gjaldt både overflade og bundtemperaturer. Dette skyldtes, at temperaturstigningen ifølge de anvendte klimascenarier var relativt konstant igennem året og det medførte dermed en generel temperaturstigning i havet (figur 5.1). Ved sammenligningen mellem overfladetemperaturer og bundtemperaturer i Sundet og Bælthavet var der derfor en generel temperaturstigning imellem år 2000 og år 2100 svarende til den anvendte temperaturstigning på $3,1^{\circ}\text{C}$ (figur 5.2).

5.2 Vindændringer

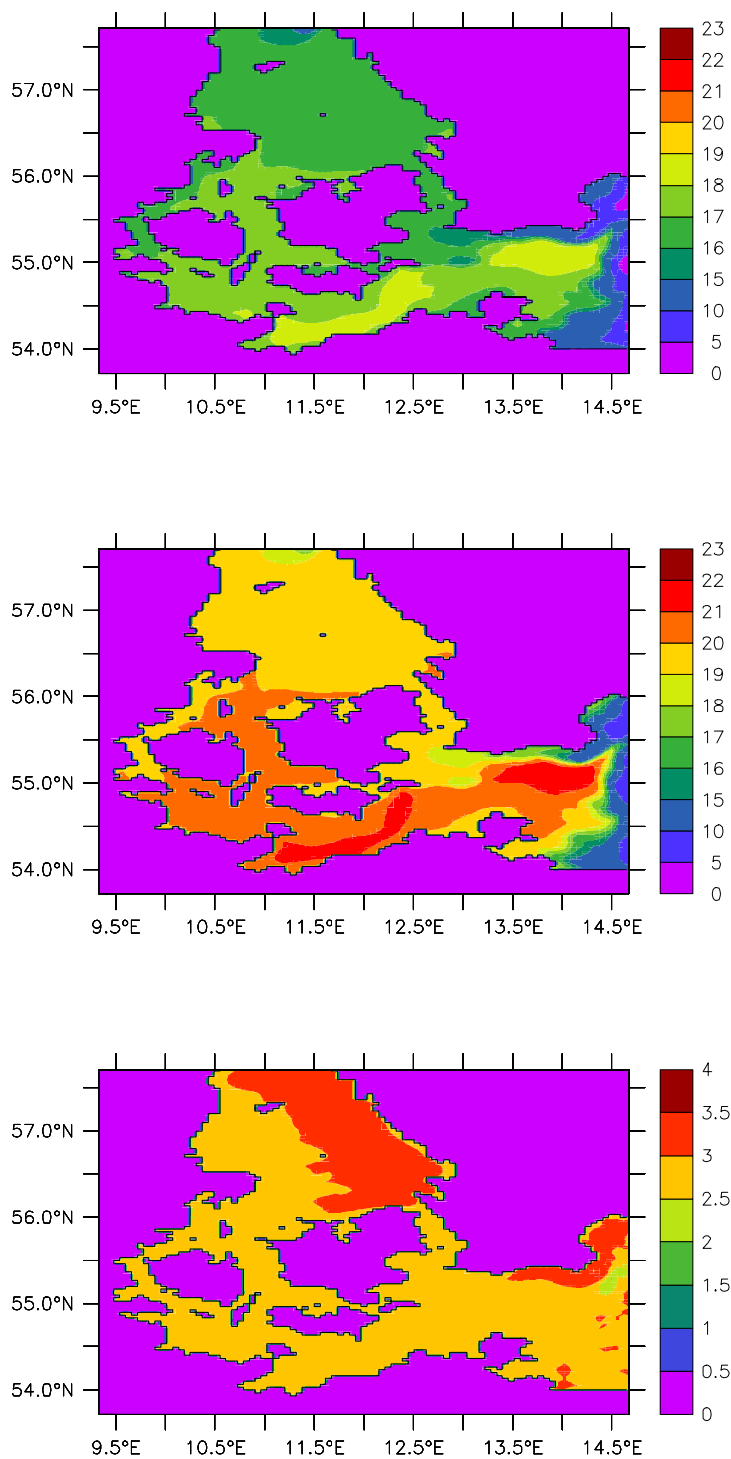
Den regionale opsætning blev integreret i perioden 2002 - 2003, og effekter fra ændringer i vindhastigheden blev undersøgt ved at sammenholde vandstandsforskelle i de nordlige Kattegat og i Arkonahavet fra to kørsler med henholdsvis vinde fra 2003 og samme vindhastigheder reduceret med 10% (scenarierne 3, 4, 7 og 8). For august måned 2003 betyder en reduktion af vinden med 10%, at vandstandsforskellen mellem det nordlige Kattegat og Arkonahavet ændres med 1 - 2 cm. Denne vandstands forskel vurderedes at være af sekundær betydning for denne analyse, idet de ændrede vindfelter ikke gav anledning til en betydelig ændring af advektionen og dermed iltforholdene i bundvandet i området.

5.3 Iltændringer

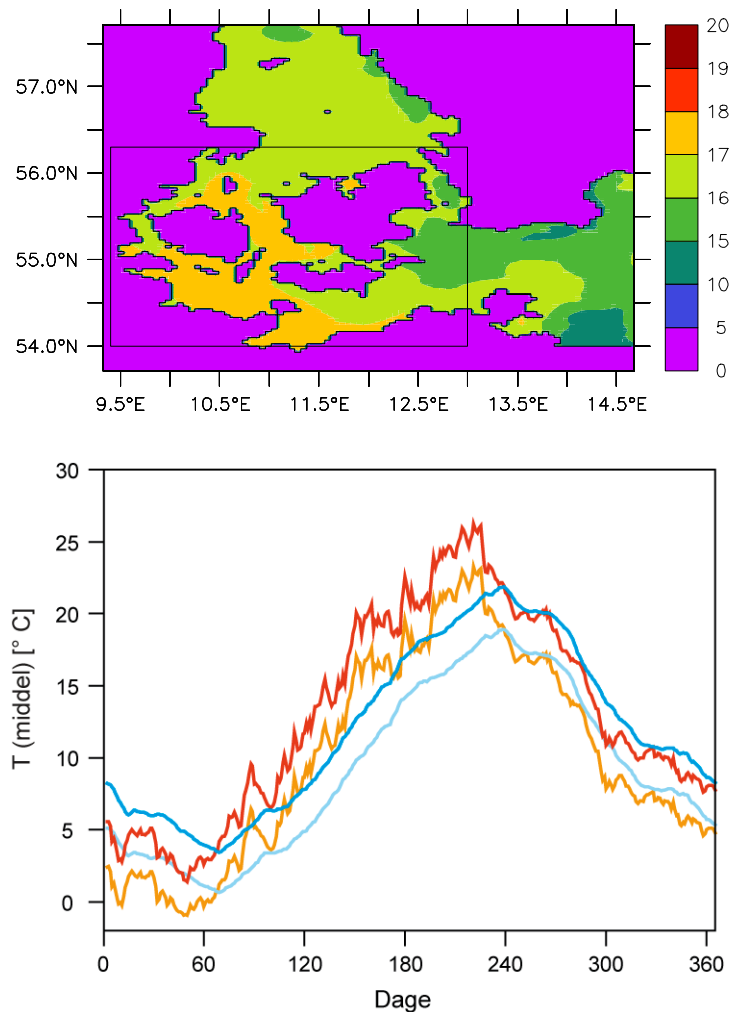
Iltfordelingen blev analyseret for året 2003 og for et tilsvarende scenarium hvor temperaturen blev øget med $3,1^{\circ}\text{C}$ på henholdsvis de åbne rande og lufttemperaturen i 2 m's højde. En sammenligning mellem middelfelterne af ilt i august og september måned i 2003 viste den store variation, der kan være mellem de enkelte måneder i sensommeren, på grund af den store dynamiske variation der er i området. I slutningen af august måned 2003 strømmede bundvand ned igennem Kattegat samtidig med, at der blev blandet iltrigt overfladevand ned i bundvandet. Dette ventilerede store dele af Bælthavet så der i september var et betydeligt højere iltniveau end i august måned (figur 5.3). Forholdene i år 2100, dvs. ved en $3,1^{\circ}\text{C}$ varmere vandsøjle viste, at iltniveauet i bundvandet generelt var lavere, men at variationen mellem de to måneder, august og september, svarede til variationen i år 2003. Differencen mellem år 2100 og 2000 var omkring 0,5 - 1 ml/l i Bælthavet nord og syd for Fyn og i det sydøstlige Kattegat.

En beregning af middeliltindholdet i Sundet og Bælthavet igennem året blev foretaget for tre scenarier svarende til (1) forholdene i 2003, (2) forholdene i 2100, dvs. for en $3,1^{\circ}\text{C}$ varmere vandsøjle og (3) for-

holdene i år 2100 med en 30% reduktion af iltforbruget i bundvandet (figur 5.4).



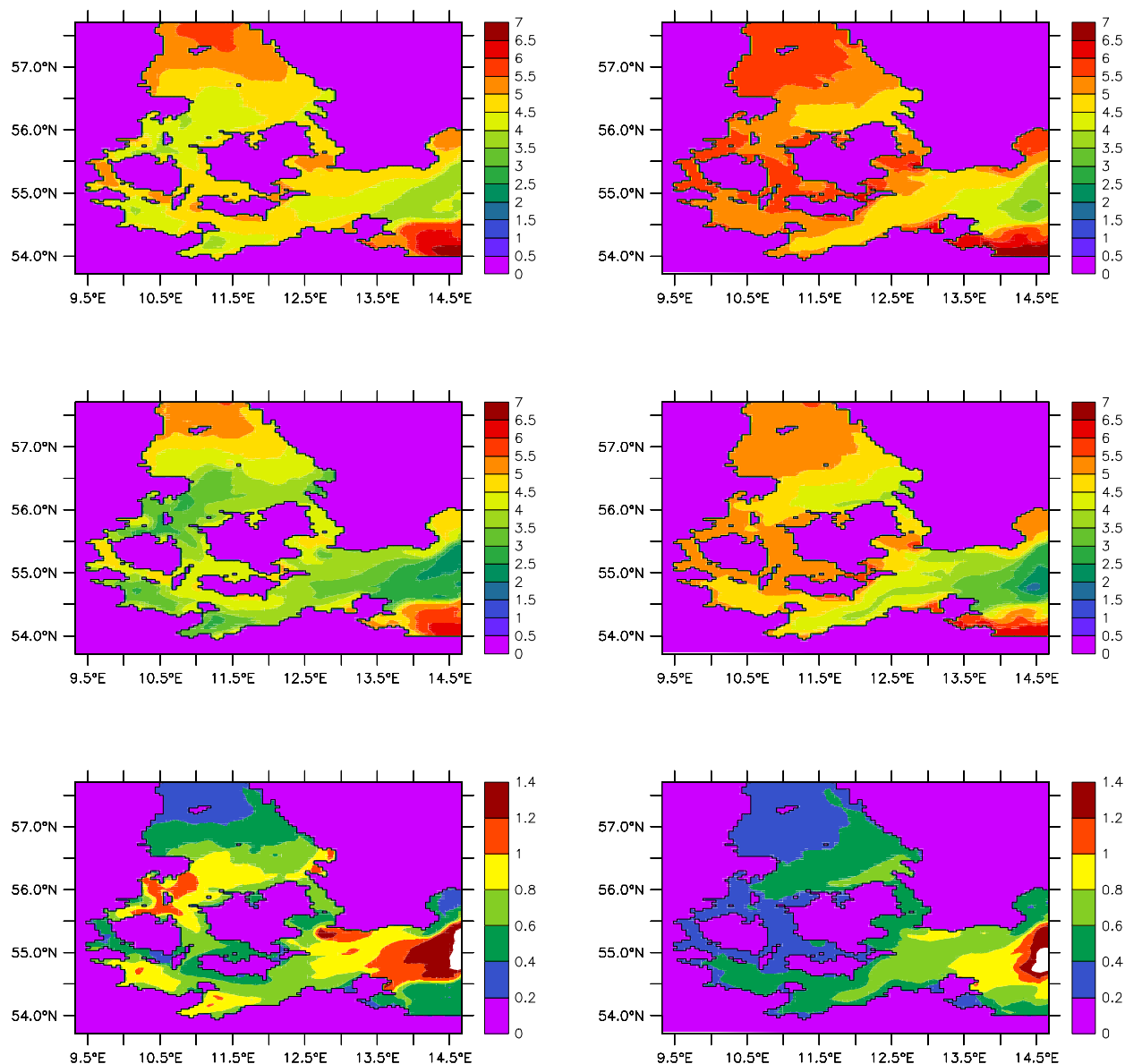
Figur 5.1 Middeltemperaturen ved bunden i september måned 2003 (øverst) og i år 2100 (midt). Differensen mellem år 2100 og år 2003 (nederst) ses at være relativt konstant, svarende til en generel opvarmning af havet med omkring 3,1° C i hele området.



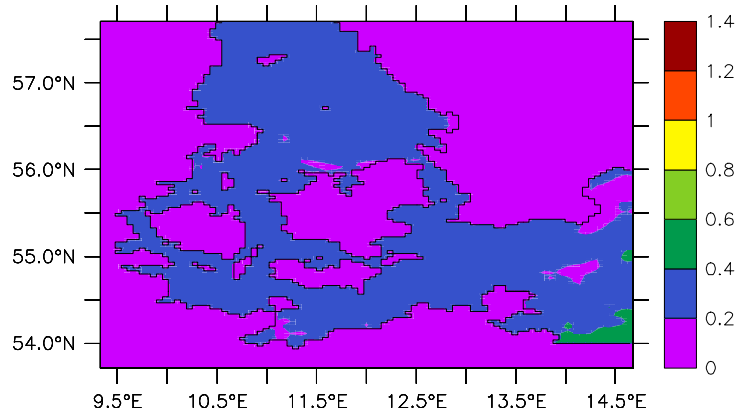
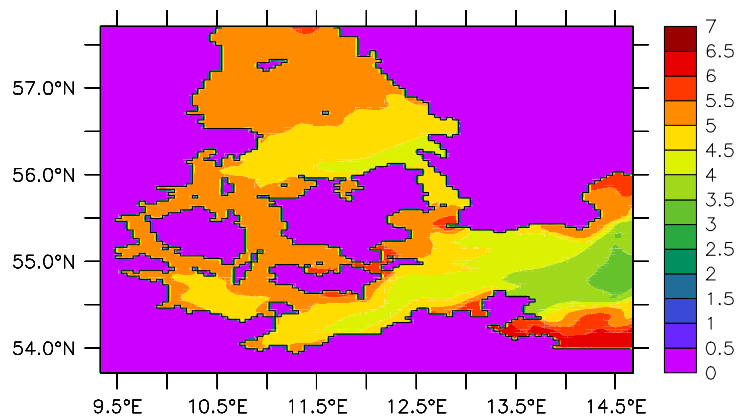
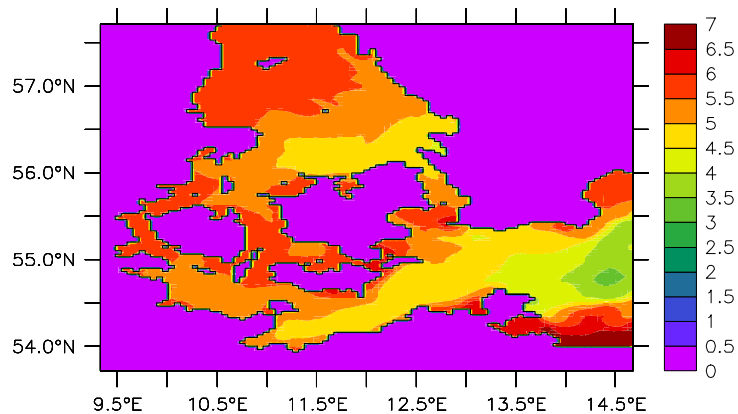
Figur 5.2 (Øverst) Middeltemperaturen af bundvandet i august 2003. Middeltemperaturen i bundvandet er bestemt i det indrammede område af Sundet og Bælthavet og er vist igennem år 2003 (nederst) for henholdsvis overflade (orange) og bundtemperatur (lyseblå), og tilsvarende for år 2100, hvor overfladetemperaturen (rød) og bundtemperaturen (blå) ses at være parallelforskydt i forhold til år 2003 med omkring 3 grader Celsius.

For simuleringen af år 2003 viste modellen de sædvanlige høje vinteriltkoncentrationer på omkring 8 ml/l grundet den høje iltmætning ved lave temperaturer samt en generel større vertikal blanding i vintermånederne. I løbet af foråret og sommeren faldt iltkoncentrationen, da iltforbruget i vandsøjlen og sedimentet oversteg ventileringen med iltigt overfladevand og iltigt bundvand fra Skagerrak. Som det fremgår af figur 5.4 nåede iltkoncentrationen et minimum i august måned. I løbet af efteråret steg koncentrationen gradvist efterhånden som temperaturen faldt og ventileringen øgedes på grund af blanding og advektion af iltigt Skagerrakvand. I et 2100-scenarium var udgangskoncentrationen lidt lavere end i 2003-scenariet på grund af det varmere vands lavere iltmætning. Den høje temperatur i bundvandet forstærkede denne forskel yderligere i sensommeren, på grund af den eksponentielle temperaturafhængighed i iltforbruget. Ved at sammenligne forskellen mellem de to scenarier ses, at selve temperaturforskellens indflydelse på iltmætningen gav en forskel på omkring 0,5 ml/l igennem året, og at forskellen i iltforbruget medførte et yderligere merforbrug på omkring 0,5 ml/l i spidsbelast-

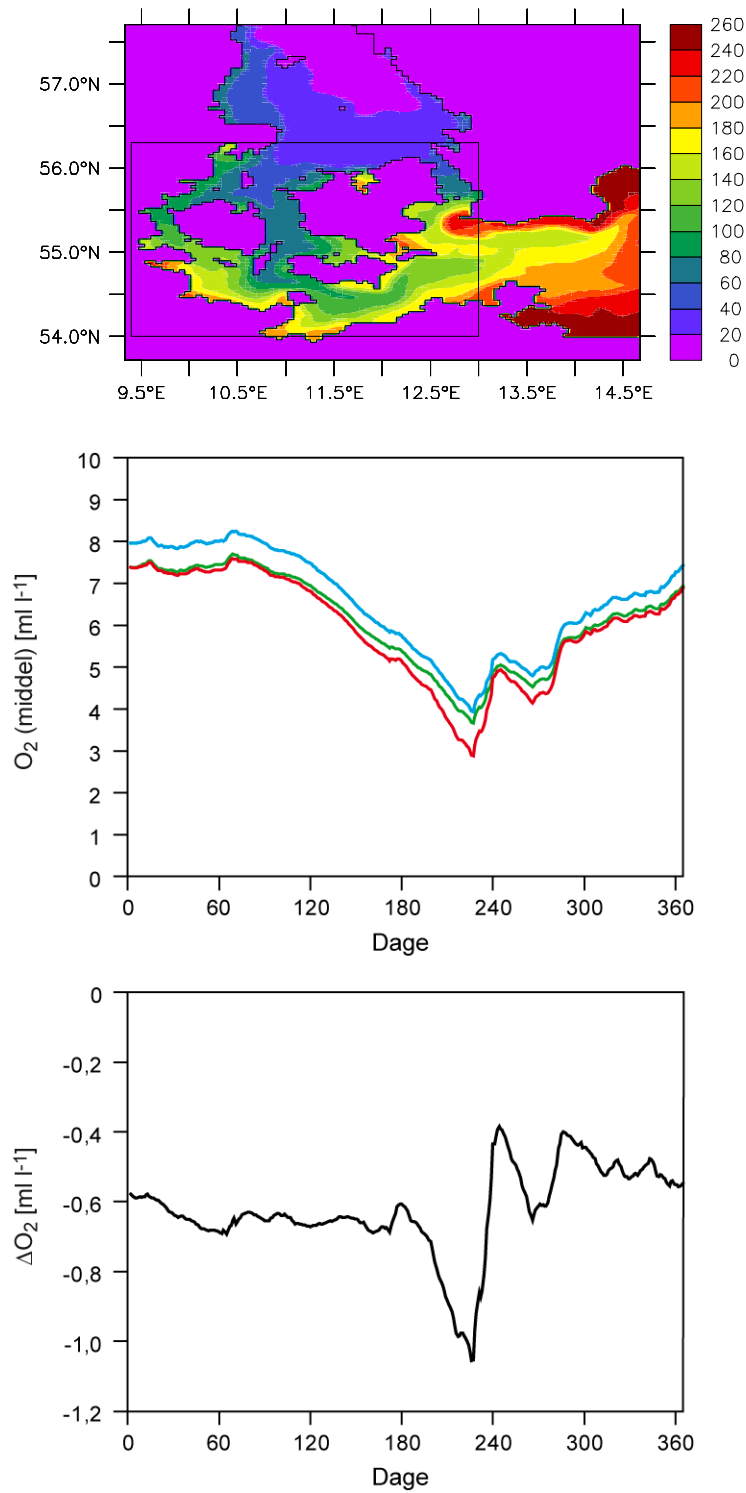
ningen i august måned (figur 5.5). Et tilsvarende 2100-scenarie med en reduktion af iltforbruget med 30% viste en tilsvarende lav udgangskoncentration i starten af året. Derimod betød det reducerede iltforbrug, at iltkoncentrationen ikke blev så lav i sensommeren som i 2100-scenariet uden reduktion. Det nærmer sig derimod 2003-scenariet på trods af den højere temperatur.



Figur 5.3 Middel iltkoncentrationen ved bunden i august måned (venstre) og september (højre) for hhv. år 2003 (øverst) og år 2100 (midt), jvf. det anvendte klimascenarium. Forskellen mellem de to perioder (nederst) ses at være udtalt i området nord for Fyn, i det sydlige Kattegat samt i de dybe dele af Arkona bassinet.



Figur 5.4 Middelliltkoncentrationen ved bunden i september for hhv. år 2003 (øverst) og år 2100 (midt), hvor der samtidigt er antaget en 30% reduktion i eksporten af organisk materiale til bundvandet. Forskellen mellem de to perioder (nederst) ses at være betydeligt mindre end den tilsvarende situation i figur 5.3, nederst t.h., hvor primærproduktionen er den samme som i dag.



Figur 5.5 (Øverst) Middelværdien af ilt i bundvandet er bestemt i det indrammede område af Sundet og Bælthavet. Baggrunden viser gennemsnitsaldersfordelingen i august måned i bundvandet i 2003. (Midten) Middelværdien af ilt igennem år 2003 for det nuværende klima (blå) og et 3,1° C varmere klima (rød), refereret som henholdsvis år 2000 og år 2100 scenariet. Scenariet svarende til år 2100, men med en 30% reduktion i eksporten af organisk materiale når det samme niveau som år 2000 scenariet i starten af efteråret (vist med grøn). (Nederst) Forskellen i middel iltkoncentrationerne mellem år 2100 og år 2000 scenariet.

5.3.1 Nutidens iltodynamik i Bælthavet og det sydlige Kattegat

Bundvandets iltindhold varierer i et karakteristisk mønster der kan relateres til sæsonvariationen i hydrografiske og biologiske faktorer. I Storebælt viser 15 års målinger på Station 6700053 et mønster som på mange punkter afspejler de generelle forhold i Bælthavet (figur 5.6). Temperaturen i overfladelaget følger indstrålingen og lufttemperaturen, mens temperatursignalet i bundvandet har en tidsforsinkelse på ca. 2 måneder i forhold til overfladen. Der er ikke målinger af primærproduktion, men størrelsen af den potentielle produktion kan vurderes ud fra mængden af klorofyl i vandet. Den har en meget tydelig top i forbindelse med forårsopblomstringen af kiselalger i marts, mens klorofylmængden er nogenlunde konstant hen over sommeren, hvor en stor del af primærproduktionen foregår i grænsefladen mellem det salte bundvand og det brakke overfladelag (figur 5.7). I bundvandet ses et mindre signal fra forårsopblomstringen, men herudover er koncentrationen nogenlunde konstant hen over året. I bundvandet foregår der stort set ingen produktion, og her kan mængden af klorofyl give et fingerpeg om koncentrationen af organisk materiale, POC, og dermed iltforbrugsraten. Variationen i produktion og temperatur hen over året giver anledning til et karakteristisk mønster i vandets iltmætning. Om vinteren sikrer en stor blanding, at iltkoncentrationen står i ligevægt med atmosfæren og det meste af vandsøjlen er derfor 100% mættet. Senere om foråret opstår overmætning i overfladelaget i forbindelse med den kraftige nyproduktion under forårsopblomstringen. Senere på sommeren er der en svag undermætning som følge af en overvægt af respiratoriske processer og opblanding af iltfattigt vand fra bundlaget. I bundvandet når koncentrationen kun kortvarigt op på 100% i foråret. Herefter falder mætningen og når et minimum i september, hvor den gennemsnitlige koncentration under springlaget er ca. 50%. Målt i absolutte mængder er faldet i iltkoncentration endnu kraftigere, idet det lavere mætningsindhold ved højere temperaturer forstærker faldet hen over sommeren. Længere sydpå, i det sydlige Lillebælt (figur 5.8) ses stort set det samme sæsonmønster. Faldet i iltkoncentrationer hen over sommeren er dog mere markante.

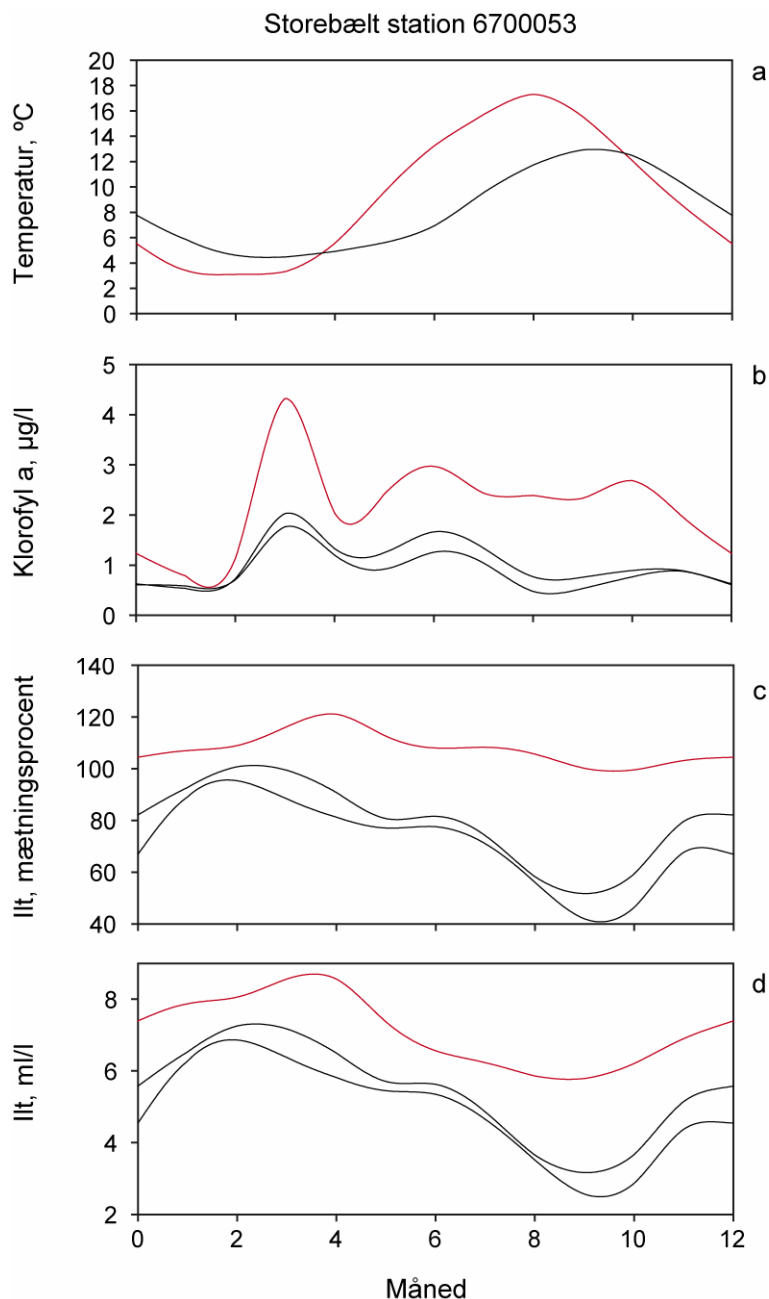
5.3.2 Resultater af den simple iltmodel

Den simple iltmodel blev kørt for Bælthavet, idet det antoges at dette område kan beskrives med en gennemsnitsalder af vandet på 60 dage for alle klimascenarier og med de temperaturer som blev målt i Bælthavet igennem året i perioden 1989-2004. Det blev endvidere forudsat at forholdene kan beskrives med en lagtykkelse af bundvandet på 10 m.

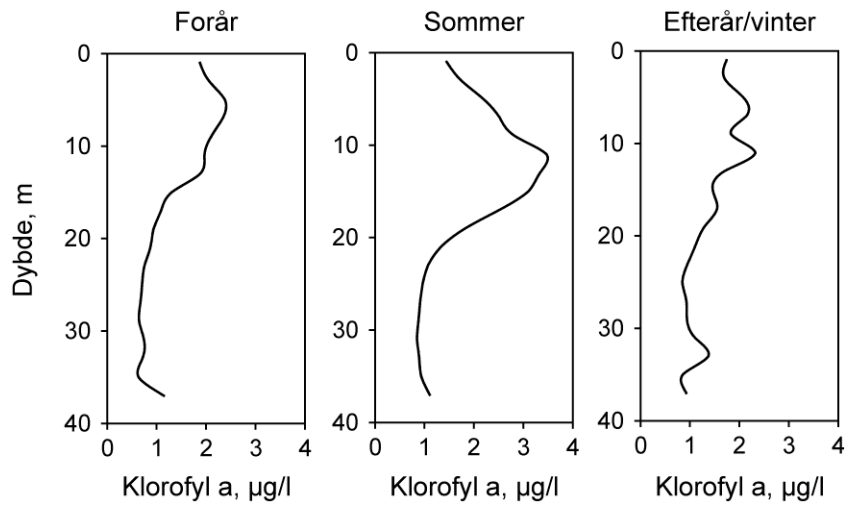
5.3.2.1 Nutidige data

Resultaterne af det nutidige scenarium viste samme sæsonvariation i iltkoncentrationen som de gennemsnitlige nutidige forhold i Bælthavet. De målte vinterkoncentrationer i bundvandet var dog lidt højere i en kortvarig periode i februar-marts, hvor det nåede 7 ml/l mens de i resten af perioden december til april lå på ca. 6 ml/l som de modelerede data. Modellerede og målte data viste stort set samme fald hen gennem året, og nåede begge en minimumskoncentration på ca. 3,5 ml/l i september (figur 5.9 sammenlign i øvrigt med de observerede værdier i figur 5.6 og 5.8, samt 3-D resultaterne i figur 5.5 midt). Den

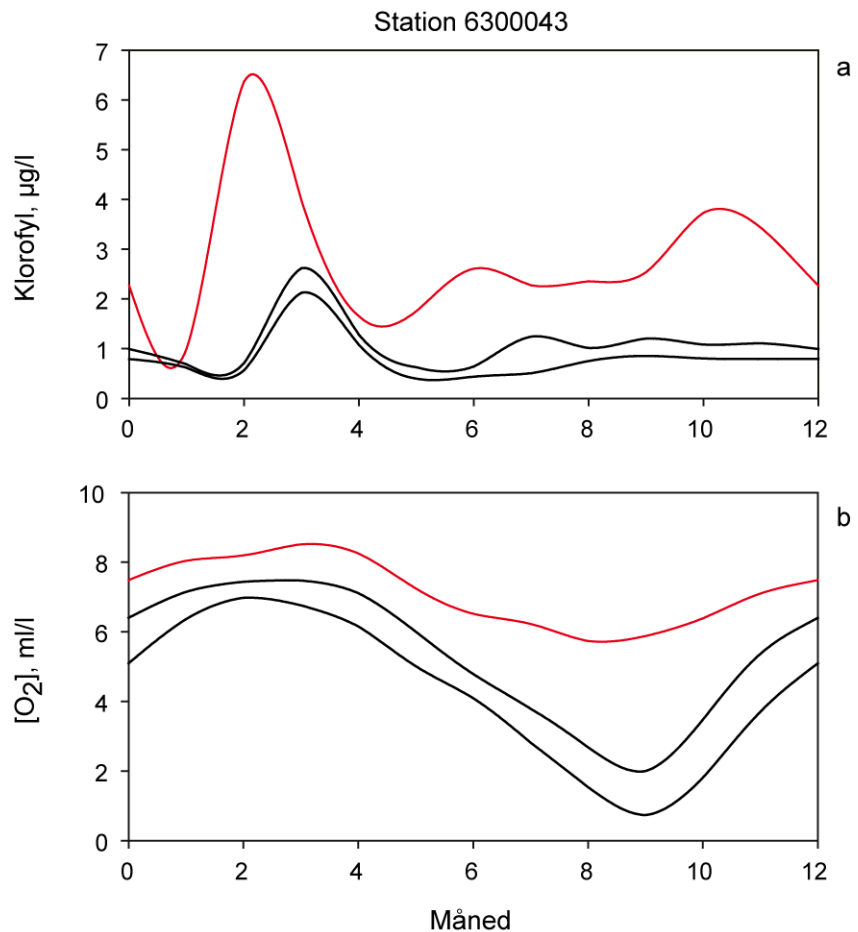
modellerede respiration svarede til et årligt kulstofforbrug i bundvandet og sedimentet på $72 \text{ g/m}^2/\text{år}$ under antagelse af en respiratorisk kvotient på 1:1. Dette svarer til en årlig produktion i området på ca. $150 \text{ g C/m}^2 \text{ år}$ (Carstensen et al. 2003), når det antages, at lidt mere end halvdelen af årsproduktionen eksporteres til bundvand og bund og yderligere 1-10% heraf begravnes permanent (Jørgensen & Revsbech 1989). Resten bliver respireret i den øvre del af vandsøjlen.



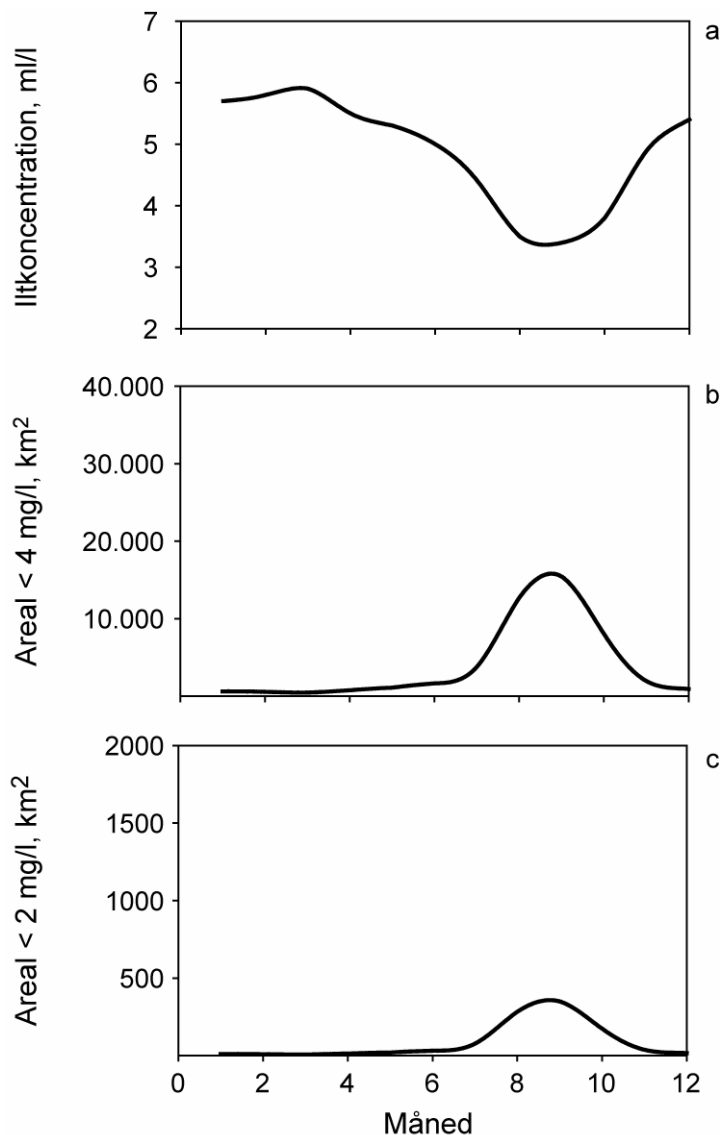
Figur 5.6 Sæsondynamik i vandsøjlen på Station 6700053 i Storebælt i perioden 1989 - 2004. a) Vandtemperatur i overfladelag (rød kurve) og bundlag (sort kurve). b) Indhold af Klorofyl a i overflade lag (rød kurve), i hele bundlaget (øverste sorte kurve) og 2 meter over bunden (nederst). c) Iltmætningsprocent (kurver som ovenfor). d) Iltkoncentration (kurver som ovenfor).



Figur 5.7 Profiler af klorofyl på Station 6700053 udtrykt som gennemsnit for perioden 1989 - 2004 for henholdsvis forår (marts-maj), sommer (juni-september) og efterår/vinter (oktober-februar).



Figur 5.8 Sæsondynamik i vand søjlen på Station 6300043 i det sydlige Lillebælt i perioden 1989 - 2004. a) Indhold af klorofyl *a* i overfladelag (rød kurve), i hele bundlaget (øverste sorte kurve) og 2 meter over bunden (nederst). b) Iltkoncentration (kurver som ovenfor).



Figur 5.9 a) Modelleret (simpel økologisk model) sæsondyamik for iltindholdet i det Bælthavet. b) Samlet areal i kvadratkilometer i Bælthavsområdet svarende til det indrammede areal på figur 5.2, hvor iltkoncentrationen kommer under 4 mg/l lige over bunden. c) Samlet areal hvor iltkoncentrationen kommer under 2 mg/l lige over bunden.

5.3.2.2 Scenarium 2

I scenarium 2, hvor middeltemperaturen blev hævet med 2,7 grader svarende til perioden (2040-2050), viste modellen under de samme betingelser en generel reduktion i bundvandets middelkoncentration over hele perioden på 0,5-1 ml/l. Reduktionen er dog størst i sommerhalvåret og minimum nås i september (figur 5.10). Ved en temperaturanomali på 3,1° C (år 2100) var der en yderligere reduktion i bundvandets middeliltkoncentration således, at minimum i september når ned på 2,7 ml/l. I dette klimascenarium blev det forudsat, at det samlede årlige iltforbrug pr. kvadratmeter ikke måtte overstige det nutidige niveau, hvilket vil sige, at den årlige eksport af kulstof til bundlaget var 72 g C/m². De forskellige dræn har dermed en ændret relativ betydning og en ændret sæsondynamik i klimascenariet. Vandsøjleens iltforbrug steg kraftigere i løbet af sommeren end tilfæl-

det var i det nutidige scenarium, men til gengæld var bundfaunaens respiration og respirationen hidhørende fra de mikrobielle processer mindre.

Ved at omsætte disse regionale iltforhold til forventede arealer med iltvind vha. den empiriske model (se figur 2.4) kunne det forudsiges, at de arealer der påvirkes af iltvind (under 4 mg/l), stiger med en faktor 2,5 fra 15.000 km² til 36.000 km² i Bælthavet i september i perioden 2040 - 2100. Samtidigt viste resultaterne, at arealerne med kraftigt iltvind (under 2 mg/l) vil stige fra 350 til 810 km².

I en analyse, hvor der ikke blev taget hensyn til konkurrencen mellem vandets og bundens iltforbrug og hvor bundens respiration derfor ikke blev justeret, viste beregningerne, at iltkoncentrationen i september 2050 og 2100 var henholdsvis 3,5 og 2,0 ml/l mens arealet med kraftigt iltvind var 2500 km².

5.3.2.3 Scenarium 5 og 6

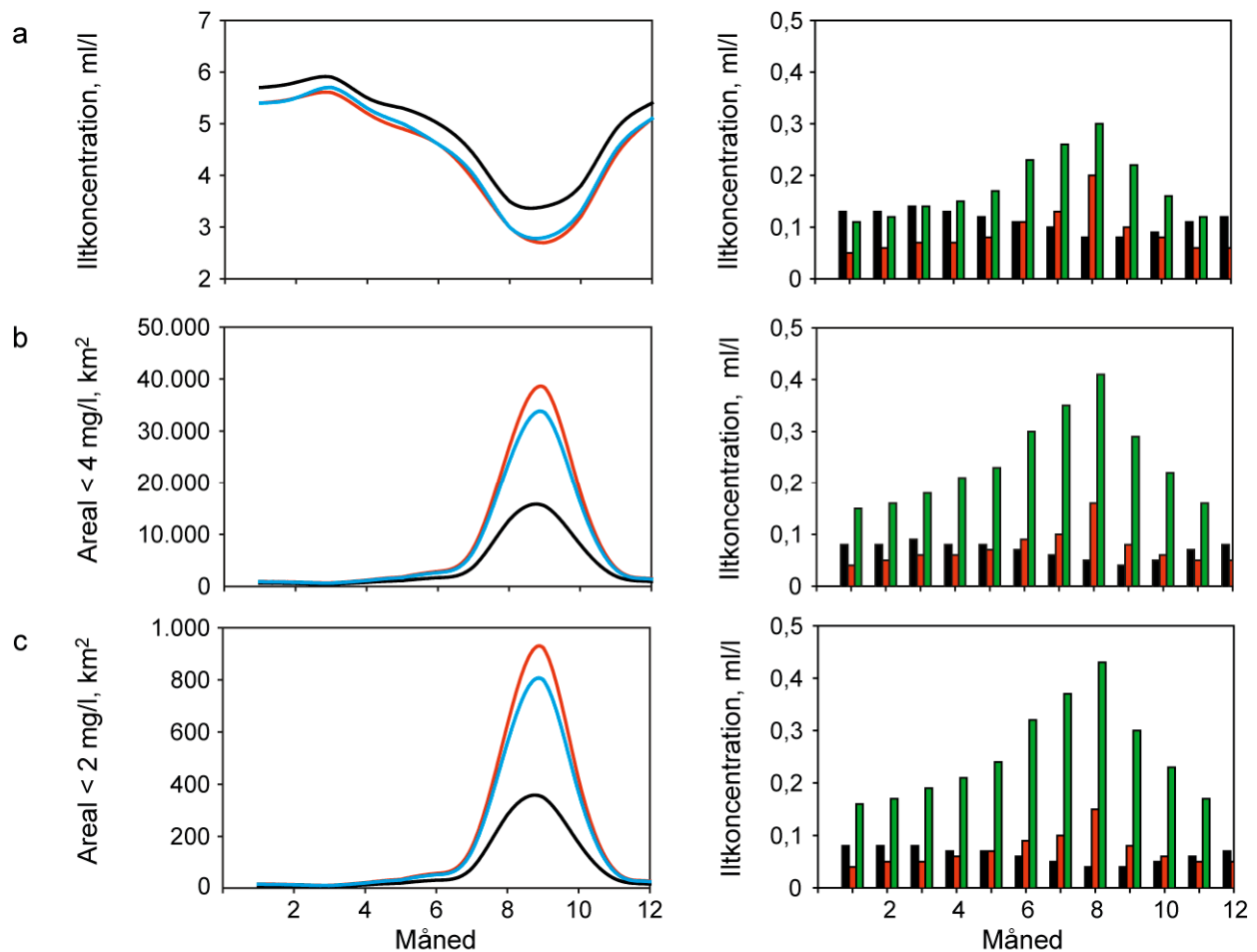
I det tilfælde hvor det blev antaget, at en generel eutrofiering resulterer i en 10% forøgelse af primærproduktionen, sker der en reduktion af iltkoncentrationen i september på henholdsvis 3,1 og 1,7 ml/l i år 2050 og 2100 i forhold til det nutidige niveau. Arealerne med kraftigt iltvind vil blive forøget markant og vil nå henholdsvis 536 km² og 4200 km².

5.3.3 Klimascenarium hvor effekten af temperaturstigning modvirkes af faldende næringsstofkoncentrationer

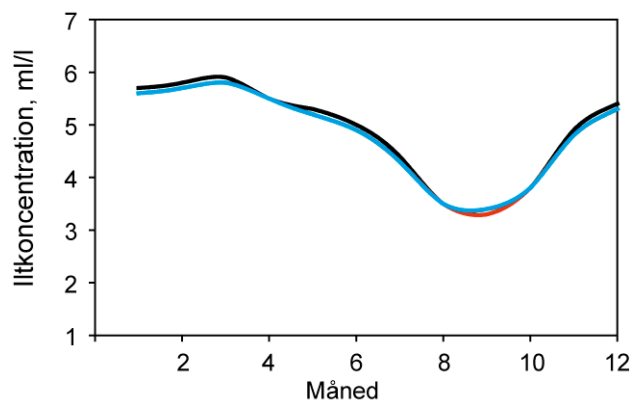
Hvis bundvandets iltindhold og sandsynligheden for iltvind i 2100 skal være uændret under de beskrevne temperatur-anomalier (figur 5.11) skal den samlede mængde POC, der eksporteres til bundlaget, i fremtiden reduceres med ca. 30%.

5.4 Opsummering af resultater

1. En analyse af det valgte klimascenarium forudsagde en temperaturstigning i havet på omkring 3° C omkring år 2100.
2. Iltkoncentrationen ved 100% iltmætning falder, når temperaturen øges. Eksempelvis falder den med 0,15 ml/l O₂ pr. grad. En temperaturstigning på 3° C og en salinitet på 30 betyder et fald i iltindholdet i vandsøjlen på omkring 0,5 ml/l.
3. En temperaturstigning medførte en større iltforbrugsrate, hvilket medførte en reduktion af iltindholdet i bundvandet på omkring 0,5 - 1 ml/l i Bælthavet, hvis temperaturen blev øget med 3° C.
4. Der blev fundet en tilnærmelsesvis eksponentiel sammenhæng mellem den regionale iltkoncentration i bundvandet og størrelsen af det areal, hvor der er blevet observeret iltvind.



Figur 5.10 (Venstre side) Modelleret sæsondybning (simpel økologisk model) for iltindholdet i Bælthavet (a) i et nutidigt scenarium (sort kurve), scenarium 2 med en temperaturstigning på 2,7 grader (blå kurve) og 3,1 grader (rød kurve), hvor den samlede årlige respiration i bundvandet er holdt konstant på 72 g C/m². (b) Samlet areal i km² hvor iltkoncentrationen er under 4 mg/l lige over bunden for de samme temperaturscenarier. (c) Samlet areal hvor iltkoncentrationen er under 2 mg/l lige over bunden for samme temperaturscenarier. (Højre side) Relativ betydning af de forskellige dræn af ilt i et nutidigt scenarium (øverst) og under scenarium 2 med temperaturstigninger på 2,7 grader (midten) og 3,1 grader (nederst). Grønne søjler angiver bundvandets respiration. Røde og sorte søjler angiver henholdsvis bundfaunaens og den mikrobielle respiration.



Figur 5.11 Modelleret sæsondynamik (simpel økologisk model) for iltindholdet i Bælthavet i et nutidigt scenarium (sort kurve), i et hvor middeltemperaturen er hævet 2,7 grader og produktiviteten i planktonet sænket 30% (blå kurve) og et hvor temperaturen er 3,1 grad højere og produktiviteten er sænket 35% (rød kurve).

6 Diskussion og perspektivering

Denne rapport har forsøgt at indkredse og kvantificere de primære effekter af en generel temperaturstigning i Nordsø/Østersø-området. De grundliggende forudsætninger bag beregningerne bygger dels på en bestemmelse af iltforbrugsraternes temperaturafhængighed i bundvandet og dels på en bestemmelse af tidsskalaerne for transporterne igennem de indre danske farvande. Begge er kritiske størrelser, som er vanskelige at bestemme nøjagtigt, og skal derfor tages i betragtning, når usikkerheden på resultaterne skal vurderes. En diskussion af disse faktorer er givet nedenfor.

6.1 Begrænsninger af 3D-modelresultater

Den hydrodynamiske model over de indre danske farvande er baseret på randbetingelser fra en regional model over hele Østersø/Nordsø-området. Den regionale model er i stand til at modellere den generelle vandstandsforhold mellem Skagerrak og Østersøen således, at den barotrope (vertikalt integrerede) transport igennem de indre danske farvande beskrives kvantitativt. Samtidig er den regionale model integreret i et helt år inden randbetingelserne bestemmes til den lokale, indkapslede model. Dette sikrer, at den relative vandstandsforhold på grund af de overordnede forskelle i massefylde mellem Nordsøen og Østersøen er etableret, og dermed er den barokline (lagdelte) udstrømning fra Østersøen også beskrevet i modellen. Under disse forhold er det antaget at den overordnede transport igennem de danske farvande kan modelleres i overensstemmelse med den faktiske dynamik i området. En egentlig validering af modellens resultater i forhold til de observerede værdier er derfor kun udført for den generelle fordeling af temperatur og salinitet samt for iltfordelingen i bundvandet. Samtidig har den korte tidsramme for projektet nødvendiggjort en begrænset vertikal og horisontal opløsning i den numeriske model. Fx betyder den relative grove opløsning med kun 10 vertikale lag i modellen, at den vertikale blanding i modellen ikke er beskrevet så godt, som hvis den vertikale opløsning var større. Den grove vertikale opløsning medfører en generelt større vertikal blanding og påvirker derfor også bundvandets temperatur, alder og bundkoncentrationerne af ilt i modellen. Iltkoncentrationer ved bunden vil derfor i højere grad være påvirket af nedblanding af iltigt overfladevand, og derved være højere end hvis modelløsningerne var lavet med en større vertikal opløsning. Omvendt vil en stor blanding medføre en generelt højere bundtemperatur i sensommeren, og dette vil medvirke til at reducere iltkoncentrationen. Det er dog vurderet, at disse forhold ikke vil påvirke resultaterne af de relative forskelle mellem de enkelte scenarier betydeligt.

Overordnet set svarer både den simple model og 3-D modelleringen af iltodynamikken i de indre danske farvande til de observerede forhold igennem de sidste 10 år dog således, at sæsonsvingningerne er dæmpet lidt i forhold til de observerede data. Dermed er der tale om en konservativ estimering af iltindholdet. Det samlede iltforbrug sva-

rer ligeledes til det forventede, når primærproduktionen i området antages at være $150 \text{ g C/m}^2/\text{år}$ og det antages, at 40-60% omsættes under grænselaget. Endelig er der en god overensstemmelse mellem den simple model og 3-D modellen, når det gælder den generelle reduktion i bundvandets iltindhold, som vil andrage omkring 1 ml/l alene som følge af temperaturstigningen.

At temperaturstigningen vil medføre lavere iltindhold i bundvandet må anses for entydigt. Det er veldokumenteret, at biologiske proceshastigheder, herunder respirationsrater, generelt stiger eksponentielt med stigende temperatur, og derfor forøger iltforbruget i bundvandet. Da tilførslen med det indstrømmende bundvand samtidigt mindskes pga. det temperaturbetingede mætningsindhold med stigende temperatur er der to forhold der virker i samme retning. De kvantitative forudsigelser afhænger naturligvis af de antagelser i den forsimplede modellering af havets iltforbrugende processer. I de scenarier, hvor produktionen er uændret, er det alene de respiratoriske processers temperaturafhængighed, der er det kritiske punkt i modelleringen. Jo kraftigere temperaturafhængighed desto større bliver det årlige udsving i bundvandets iltkoncentration. I de opstillede modeller er der dog valgt en moderat temperaturafhængighedskonstant. Der er ikke umiddelbart nogen mulighed for at teste den valgte temperaturafhængighed som til gengæld er i nøje overensstemmelse med eksperimentelt fundne. Samtidigt er der ikke indregnet en temperaturafhængighed for den mikrobielle respiration i sedimentet, hvilket dæmper de sæsonbetingede udsving. Endeligt er det antaget at der er den samme mængde labilt kulstof tilstede i bundvandet i løbet af året. Dette er ligeledes en antagelse, der dæmper sæsonsvingninger i forhold til den realistiske situation, hvor der er mere kulstof tilstede i løbet af sommerhalvåret.

Når iltsvind opstår i den virkelige verden har de lokale og temporale forhold en stor betydning. Herunder de geografiske forskelle der kan være i bundens og vandsøjleens iltforbrug. Alle disse lokale forhold kan ikke beskrives tilfredsstillende med en generel model, der dækker de indre danske farvande. Oftest er respirationsraterne stærkt forøget i de oftest mere næringsrige kystnære områder (Jensen et al. 1990). Hertil kommer, at der i forbindelse med meget lave iltkoncentrationer sker ændringer i iltodynamikken, som meget vanskeligt lader sig beskrive generelt. Det drejer sig om udslip af den reducerede forbindelse svovlbrinte, som dels øger iltforbruget når der sker en reoxidation i vandfasen og dels dræber de invertebrater og fisk der er til stede, hvilket igen ændrer iltodynamikken. Disse ændringer kan være langvarige og strække sig over flere år (Hansen et al. 2004). Da de aktuelle hydrografiske forhold på det tidspunkt hvor iltsvindet opstår samtidig har en stor betydning, er forekomsten af lokale iltsvind i den simple model udtrykt som en sandsynlighed, der er styret af de regionale iltforhold. Det skal forstås på den måde at det vand, hvor der lokalt opstår iltsvind, har sin oprindelse som bundvand i de åbne områder. Hvis der som udgangspunkt er mindre ilt i dette vand vil der hurtigere kunne opstå iltsvind, hvis de lokale og hydrografiske betingelser er til stede. Der findes som forventeligt en sådan empirisk kobling mellem de regionale forhold i de indre danske farvande. Denne viser at iltsvindsarealet stiger eksponentielt med faldende mætning af bundvandet. Det betyder, at effekten i form af lokale ilt-

svind er meget mere markant end ændringerne i den gennemsnitlige iltkoncentration antyder. Når det samlede iltindhold i bundvandet nærmer sig 2 mg/l vil hele bassinet under springlaget være ramt af iltsvind. I det scenarium hvor effekten alene skyldes opvarmningen vil de ramte arealer som beskrevet have en udbredelse der er 2-3 gange større end i et gennemsnitsår i nutiden. Hvis der derimod er tale om et klimascenarium svarende til forholdene 2002, men med en temperatur der er 3,1° C grader højere, vil de berørte områder have et areal der er ca. 5 gange større end det var i 2002 og dermed omfatte størstedelen af Bælthavet.

Analysen af den nødvendige reduktion i mængden af POC viser, at der skal en meget stor reduktion i næringsstofkoncentrationerne til - ca. en tredjedel i forhold til det nuværende niveau - for at det kompenserer for effekten af temperaturstigningen.

Analyserne vha. 3-D modellen viser at de områder der i fremtiden rammes, er de samme som i nutiden, nemlig den vestlige Østersø, Bælthavet og det sydlige Kattegat. Iltsvindene bliver hyppigere og områderne bliver generelt meget større. Det er specielt i det nordlige Bælthav at iltsvind vil blive mere hyppige, end de er i dag.

Effekten på bundfaunaen fremgår indirekte af den forventede udbredelse af iltsvind. I koblingen til de regionale forhold anses skader på bundfaunaen at følge udbredelsen af kraftige iltsvind. Efter det omfattende iltsvind i 2002 var størstedelen af faunaen forsvundet fra de områder der havde været udsat for iltsvind i 4 til 6 uger afhængigt af de lokale forhold (Hansen et al. 2004). Der findes imidlertid ikke en fast regel for, hvor lang tid faunaen kan tåle iltsvind. Året efter i 2003 opstod skaderne hurtigere, hvilket kan ses som faunaens stigende følsomhed ved gentagne iltsvindshændelser. Overordnet viser de hidtidige erfaringer, at effekten på faunaen vokser uforholdsmæssigt kraftigt med stigende hyppighed og udbredelse af iltsvind. Der er således overvejende sandsynlighed for, at de ændringer, der forventes i den gennemsnitlige størrelse på iltsvindsarealet, udgør en konservativ prognose for de ændringer, der sker i bundfaunasamfundene. De områder, der permanent er uden bundfauna pga. iltsvind, forventes at vokse med mindst en faktor 2-3. I de områder, hvor iltsvind ikke direkte fører til udslettelse af faunaen, forventes der et jævnt fald i diversiteten i bundfaunaen.

Det er i de anvendte modeller forudsat, at der ikke sker kvalitative ændringer i det marine økosystem udover, at fordelingen af respirationen mellem vandsøjlen og bunden ændres i takt med temperaturstigningen. Det er højest usandsynligt, at de klimaændringer, som er beskrevet ikke vil medføre ændringer i sammensætningen af de biologiske samfund. Det er oplagt, at faunaen vil blive reduceret i de områder, der i fremtiden oftere vil opleve kraftige iltsvind end i nutiden. Det påvirker de forudsætninger, der ligger til grund for modeleringen af ilt. De foreløbige erfaringer peger på, at fraværet af faunaen medfører øget risiko for iltsvind og udslip af svovlbrinte i sensommeren og dermed vil effekten af iltsvindene betyde, at en større del af respirationen sker via mikrobielle processer. Der vil også kunne forventes strukturændringer i områder, som sjældnere rammes af iltsvind alene som følge af temperaturstigningen. En temperaturstigning

ning vil i sig selv fremme nogle arter og hæmme andre arters udbredelse og dette vil naturligvis kunne påvirke fordelingen og betydningen af de processer, der bidrager til det samlede iltforbrug. Sådanne ændringer er imidlertid meget svære at forudsige, specielt på økosystemniveau.

Man kan forestille sig kvalitative ændringer i økosystemernes processer, som kan modvirke effekten af en temperaturstigning. Det er i første række processer, som mindsker den relative betydning af respirationen i bundvandet, som potentielt vil mindske risikoen for iltsvind. I de scenarier, hvor den samlede primærproduktion holdes konstant skyldes de forringede iltforhold to ting; 1) det lavere mætningsindhold i vandet på det tidspunkt hvor det bliver til bundvand ved Kattegat-Skagerrakfronten og 2) det forhold at respirationen i vandfasen om sommeren får en relativ større betydning. Hvis økosystemændringer skal kompensere for effekten fra temperaturstigningen kan det fx ske ved, at en større del af produktionen sedimenteres til bunden og nedblandes i sedimentet. Det vil medføre en dæmpning af sæsonsvingningerne i respirationen. De kiselalger, der typisk optræder i forbindelse med forårsopblomstringen, bidrager til en sådan dæmpning af sæsonudsvingene. De sedimenteres hurtigt, omsættes meget lidt under passagen gennem vandsøjlen og bliver hurtigt nedblandet i sedimentet, hvor de omsættes meget langsomt. Der er imidlertid ikke noget, der taler for denne type ændringer fremmes af temperaturstigninger.

7 Konklusion

Det undersøgte klimascenarium viser en generel temperaturstigning på omkring 3,5° C igennem året for perioden omkring år 2070 - 2100 i forhold til i dag. Med en dynamisk 3D-model over de indre danske farvande er det eftervist, at denne temperaturstigning forplanter sig jævnt i hele vandsøjlen pga. den lille opholdstid i de indre danske farvande.

En tidsskala for strømmingen af bundvandet er bestemt ud fra en beregning af alderen på vandet siden det sidst var i kontakt med det nordlige Kattegat. Med den anvendte beregningsmetode for alderen af bundvandet er denne bestemt til 30 - 40 dage for det sydlige Kattegat og 50 - 80 dage for Bælthavet og Øresund i september måned. En sensitivitetanalyse af vindens betydning viser, at en reduktion på 10% af vindhastighederne har en begrænset indflydelse på advektion af bundvandet i sensommeren. Dette indebærer at tidsskalaerne for transporter i bundvandet ikke vil ændre sig betydeligt, hvis ændringerne i vindhastighederne ligger inden for +/- 10% af det nuværende niveau.

Omsætningen af organisk materiale i bundvandet og dermed vandets iltindhold er relateret til tidsskalaen for vandet. Med de valgte modeller for iltodynamik i bundvandet i de indre danske farvande viser både 3-D modellen og den simple model samstemmende, at den gennemsnitlige koncentration i bundvandet reduceres igennem hele året. Dog mest i sensommeren, hvor reduktionen vil være ca. 1 - 2 mg/l eller ca. 30% lavere om 50 - 100 år sammenlignet med et nutidigt gennemsnitsår. Det er alene et resultat af temperaturstigningen uden, at der sker en øgning af næringsstofniveauet. Hvis næringsstofniveauet øges, vil effekten yderligere forstærkes kraftigt. Modelberegningerne viser, at virkningerne af klimaforandringerne, alt andet lige, kan kompenseres, hvis næringsstofniveauet (næringsstofkoncentrationen) reduceres med 30% i løbet af de næste 50 - 100 år. Det er de mere ekstreme og mere uforudsigelige hændelser, hvor iltindholdet i det bundnære lag lokalt kommer under et kritisk niveau, som forårsager skadevirkningen på bundens dyre- og planteliv. Sandsynligheden for at dette sker, er nøje koblet til de overordnede regionale iltforhold og koblingen er tilnærmelsesvis eksponentiel. Med de beskrevne regionale forhold, vil de arealer, der påvirkes af kraftigt iltsvind, blive 2 - 3 gange større i et normalt år, hvis produktionsforholdene er uændrede om 50 - 100 år. Hvis der i fremtiden forekommer vejrforhold svarende til år 2002 blot 3 grader varmere, vil arealerne blive væsentligt større og omfatte det meste af Bælthavet. På tilsvarende vis vil en forøgelse af eutrofieringsniveauet forstærke effekten kraftigt. Resultater fra 3-D modelleringen viste, at iltsvind vil ramme de samme områder, som er påvirket i nutiden. Arealerne vil blive større og iltsvind vil blive meget hyppigere og mere langvarige i det nordlige Bælthav og det sydlige Kattegat. Det kan forventes, at effekten på bundens dyreliv bliver endnu mere udtalt, fordi dyresamfund formes af ekstremterne i højere grad end de gennemsnitlige forhold. Således forventes en markant effekt i Bælthavet og det sydlige Kattegat på bundfaunaen, og det kan

forventes, at disse effekter vil forplante sig videre i fødekæden. Ud over de forbehold, som er knyttet til de benyttede klimascenarier og valg af modelbeskrivelse for ildynamik, er der i disse scenarier ikke taget højde for eventuelle ændringer af økosystemernes sammensætning og funktion.

8 Referencer

Bendtsen, J., Gustafsson, K. E. & Petersen, J. K. 2005: Modelling vertical mixing in the surface boundary layer using artificial age tracers. Acceptoreret for publikation i Journal of Marine Science.

Bendtsen, J. 2004: CO₂ flux and p CO₂ fields. Results from an integration with HAMOCC5. Climate scenario IS92a. EU-ORFOIS afleveringsrapport.

Bjørnsen, P.K. & Nielsen, T.G. 1991: Decimeter scale heterogeneity in the plankton during a pycnocline bloom of *Gyrodinium aureolum*. – Marine Ecology Progress Series 73,2-3: 263-267.

Brandt, J., Christensen, J. H., Frohn, L. M., Palmgren, F., Berkowicz, R. & Zlatev, Z. 2001: Operational air pollution forecasts from European to local scale. Atmospheric Environment, 35 Suppl., 1, p 91-98.

Carstensen, J., Conley, D. & Müller-Karulis, B. 2003: Spatial and temporal resolution of carbon fluxes in a shallow coastal ecosystem, the Kattegat. – Marine Ecology Progress Series 252: 35-50.

Graneli, W. 1992: Below-halocline oxygen consumption i the Kattegat. – Hydrobiologia 235: 303-310.

Hansen, J.L.S., Josefson, A.B. & Pedersen, T.M. 2004: Genindvandring af bundfauna efter iltsvindet 2002 i de indre danske farvande. Danmarks Miljøundersøgelser. - Faglig rapport fra DMU 506: 61. Findes på: http://www2.dmu.dk/1_Viden/2_Publikationer/3_Fagrappporter/rappporter/fr506.pdf

Houghton J.T., Filho, L.G.M., Callender, B.A., Harris, N., Kattenberg, A. & Maskell, K. 1996: The Climate Change 1995. The science of climate change. Cambridge University Press, 572 pp.

Houghton, J.T., Ding, Y., Griggs, D.J., Noguer, M., van der Linden, P.J. & Xiaosu, D. 2001: IPCC Third Assessment Report: Climate Change 2001: The Scientific Basis, Cambridge University Press, UK.

Jensen, L.M., Sand-Jensen, K., Marcher, S. & Hansen, M. 1990: Plankton community respiration along a nutrient gradient in a shallow Danish estuary. – Marine Ecology Progress Series 61: 75-85.

Jørgensen, B.B. & Revsbech, N.P. 1989: Oxygen uptake, bacterial distribution and carbon-nitrogen-sulfur cycling in sediments from the Baltic Sea - North Sea transition. – Ophelia 31 (1):29-49.

Karlson, B., Edler, L., Granéli, W., Sahlsten, E. & Kuylenstierna, M. 1996: Subsurface chlorophyll maxima in the Skagerrak processes and plankton community structure. Journal of Sea Research 35: 139-158.

Kruse, B. & Rasmussen, B. 1995: Occurrence and effects of a spring oxygen minimum layer in a stratified coastal water. – *Marine Ecology Progress Series* 125:193-303.

Luyten P. J., Jones, J. E., Proctor, R., Tabor, A., Tett, P. & Wild-Allen, K. 1999: COHERENS - A coupled hydrodynamical-ecological model for regional and shelf seas: user documentation. – MUMM report, Management Unit of the Mathematical Models of the North Sea, Belgium, 911 pp.

Marsland S.J., Haak, H.H., Jungclaus, J.H., Latif, M. & Röske, F. 2003: Max-Planck-Institute global ocean/sea ice model with orthogonal curvilinear coordinates. – *Ocean Modelling* 5: 91-127.

Nielsen, T.G. 2005: Struktur og funktion af fødenettet i havets frie vandmasser. Doktordisputats. Danmarks Miljøundersøgelser. 71 s.

Olesen, M., Lundsgaard, C. & Andrushaitis, A. 1999: Influence of Nutrients and Mixing on the Primary Production and Community Respiration in the Gulf of Riga. – *Journal of Marine Systems* 23 (1-3): 127-143.

Roeckner, E., Bengtsson, L. & Feichter, J. 1999: Transient climate change simulations with a coupled atmosphere-ocean GCM including the tropospheric sulfur cycle. – *Journal of Climate* 12: 3004-3032.

Rasmussen, B., Gustafsson, B.G., Ærtebjerg, G. & Lundsgaard, C. 2003: Oxygen concentration and consumption at the entrance to the Baltic Sea from 1975 to 2000. - *Journal of Marine Systems* 42: 13-30.

Rydberg, L., Edler, L., Floderus, S. & Graneli, W. 1990: Interaction between supply of nutrients, primary production, sedimentation and oxygen-consumption in SE Kattegat. – *Ambio*. 19 (3): 134-141.

Sampou, P. & Kemp, W.M. 1994: Factors regulating plankton community respiration in Chesapeake Bay. – *Marine Ecology Progress Series* 110: 249-258.

Danmarks Miljøundersøgelser

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

Henvendelser kan rettes til:

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

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

*Direktion
Personale- og Økonomisekretariat
Forsknings, Overvågnings- og Rådgivningssekretariat
Afd. for Systemanalyse
Afd. for Atmosfærisk Miljø
Afd. for Marin Økologi
Afd. for Miljøkemi og Mikrobiologi
Afd. for Arktisk Miljø*

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

*Forsknings, Overvågnings- og Rådgivningssekretariat
Afd. for Marin Økologi
Afd. for Terrestrisk Økologi
Afd. for Ferskvandsøkologi*

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

Afd. for Vildtbiologi og Biodiversitet

Publikationer:

DMU udgiver populærfaglige bøger ("MiljøBiblioteket"), faglige rapporter, tekniske anvisninger, samt års-rapporter. Et katalog over DMU's aktuelle forsknings- og udviklingsprojekter er tilgængeligt via World Wide Web. I årsrapporten findes en oversigt over det pågældende års publikationer.

Faglige rapporter fra DMU/NERI Technical Reports

2005

- Nr. 553: Søer 2004. NOVANA. Af Lauridsen, T.L. et al. 62 s. (elektronisk)
- Nr. 554: Vandløb 2004. NOVANA. Af Bøgestrand, J. (red.) 81 s. (elektronisk)
- Nr. 555: Atmosfærisk deposition 2004. NOVANA. Af Ellermann, T. et al. 74 s. (elektronisk)
- Nr. 557: Terrestriske naturtyper 2004. NOVANA. Af Strandberg, B. et al. 58 s. (elektronisk)
- Nr. 558: Vandmiljø og Natur 2004. Tilstand og udvikling – faglig sammenfatning.
Af Andersen, J.M. et al. 132 s. (elektronisk)
- Nr. 559: Control of Pesticides 2004. Chemical Substances and Chemical Preparations.
By Krongaard, T., Petersen, K.K. & Christoffersen, C. 32 pp. (electronic)
- Nr. 560: Vidensyntese indenfor afsætning af atmosfærisk ammoniak. Fokus for modeller for lokal-skala.
Af Hertel, O. et al. 32 s. (elektronisk)
- Nr. 561: Aquatic Environment 2004. State and trends – technical summary.
By Andersen, J.M. et al. 62 pp., DKK 100,00.
- Nr. 562: Nalunaq environmental baseline study 1998-2001. By Glahder, C.M. et al. 89 pp. (electronic)
- Nr. 563: Scientific and technical background for intercalibration of Danish coastal waters.
By Petersen, J.K. & Hansen, O.S. (eds.) et al. 72 pp. (electronic)

2006

- Nr. 564: Styringsmidler i naturpolitikken. Miljøøkonomisk analyse.
Af Schou, J.S., Hasler, B. & Hansen, L.G. 36 s. (elektronisk)
- Nr. 565: Dioxin in the Atmosphere of Denmark. A Field Study of Selected Locations. The Danish Dioxin Monitoring Programme II. By Vikelsøe, J. et al. 81 pp. (electronic)
- Nr. 566: Begrænsning af fosfortab fra husdyrbrug. Metoder til brug ved fremtidige miljøgodkendelser.
Af Nielsen, K. et al. 41 s. (elektronisk)
- Nr. 567: Environmental monitoring at the Nalunaq Gold Mine, south Greenland, 2005.
By Glahder, C.M. & Asmund, G. 35 pp. (electronic)
- Nr. 568: Vejledning om godkendelse af husdyr. Faglig rapport fra arbejdsgruppen om ammoniak.
Af Geels, C. et al. 87 s. (elektronisk)
- Nr. 569: Anskydning af vildt. Konklusioner på undersøgelser 1997-2005. Af Noer, H. 35 s. (elektronisk)
- Nr. 570: Conservation status of bird species in Denmark covered by the EU Wild Birds Directive.
By Pihl, S. et al. 127 pp. (electronic)
- Nr. 571: VVM på husdyrbrug – vurdering af miljøeffekter. Af Nielsen, K. et al. 52 s. (elektronisk)
- Nr. 572: Søerne i De Vestlige Vejler. Af Søndergaard, M. et al. 55 s. (elektronisk)
- Nr. 573: Monitoring and Assessment in the Wadden Sea. Proceedings from the 11. Scientific Wadden Sea Symposium, Esbjerg, Denmark, 4.-8. April 2005. By Laursen, K. (ed.) 141 pp. (electronic)
- Nr. 574: Økologisk Risikovurdering af Genmodificerede Planter i 2005. Rapport over behandlede forsøgsudsætninger og markedsføringssager. Af Kjellsson, G., Damgaard, C. & Strandberg, M. 22 s. (elektronisk)
- Nr. 575: Miljøkonsekvenser ved afbrænding af husdyrgødning med sigte på energiudnyttelse. Scenarieanalyse for et udvalgt opland. Af Schou, J.S. et al. 42 s. (elektronisk)
- Nr. 576: Overvågning af Vandmiljøplan II – Vådområder 2005. Af Hoffmann, C.C. et al. 127 s. (elektronisk)
- Nr. 577: Limfjordens miljøtilstand 1985 til 2003. Empiriske modeller for sammenhæng til næringsstofftilførsler, klima og hydrografi. Af Markager, S., Storm, L.M. & Stedmon, C.A. 219 s. (elektronisk)
- Nr. 578: Limfjorden i 100 år. Klima, hydrografi, næringsstofftilførsel, bundfauna og fisk i Limfjorden fra 1897 til 2003.
Af Christiansen, T. et al. 85 s. (elektronisk)
- Nr. 579: Aquatic and Terrestrial Environment 2004. State and trends – technical summary.
By Andersen, J.M. et al. 136 pp. (electronic)
- Nr. 580: Habitatmodellering i Ledreborg Å. Effekt af reduceret vandføring på ørred.
Af Clausen, B. et al. 58 s. (elektronisk)
- Nr. 582: Arter 2004-2005. NOVANA. Af Søgaard, B., Pihl, S. & Wind, P. 145 s. (elektronisk)
- Nr. 584: The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2005.
By Kemp, K. et al. 40 pp. (electronic)
- Nr. 585: Miljøfremmede stoffer og tungmetaller i vandmiljøet. Tilstand og udvikling, 1998-2003.
Af Boutrup, S. et al. 140 s. (elektronisk)
- Nr. 586: Vurdering af de samfundsøkonomiske konsekvenser af Kommissionens temastrategi for luftforurening.
Af Bach, H. et al. 88 s. (elektronisk)
- Nr. 588: Agerhøns i jagtsæsonen 2003/04 – en spørgebrevsundersøgelse vedrørende forekomst, udsætning, afskydning og biotoppleje. Af Asferg, T., Odderskær, P. & Berthelsen, J.P. 47 s. (elektronisk)
- Nr. 589: Denmark's National Inventory Report – Submitted under the United Nations Framework Convention on Climate Change, 1990-2004. Emission Inventories. Illerup, J.B. et al. 554 pp. (electronic)

Ved en forventet temperaturstigning i Danmark på omkring 3 grader i løbet af de næste hundrede år forventes der en tilsvarende temperaturstigning året rundt i de indre danske farvande. Temperaturstigningen betyder, at der vil blive tilført mindre ilt med bundvandet til de indre danske farvande, og samtidig vil det biologiske iltforbrug i bundvand og bunden blive øget. Begge forhold bidrager til en øget risiko for iltsvind i fremtiden. Modelberegninger, der forudsætter et marint økosystem som i nutiden, viser, at iltindholdet i sommer-/efterårssæsonen, alene som følge af temperaturstigningen, vil blive reduceret med 1-2 mg/l eller et 30% lavere niveau end det nutidige. Beregninger viser, at arealerne med kraftigt iltsvind og skader på bundens dyreliv vil være ca. 3 gange større end i et nutidigt gennemsnitssår. I tilfælde af ekstreme klimatiske forhold i fremtiden vil den relative forskel blive meget større, og der kan forventes skader i størstedelen af Bælthavet og det sydlige Kattegat på dybder over 12-15 m. Modelberegninger viser, at næringsstofferne skal reduceres i størrelsesordenen 30-35% i forhold til nutiden for at bibeholde de nutidige iltforhold.