



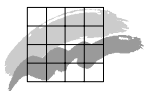
Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

Modeller til beskrivelse af iltsvind

Analyse af data fra 2002

Faglig rapport fra DMU, nr. 445

[Tom side]



Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

Modeller til beskrivelse af iltsvind

*Faglig rapport fra DMU, nr. 445
2003*

Jacob Carstensen
DMU

Anders Christian Erichsen
DHI – Institut for Vand og Miljø

Datablad

| | |
|------------------------|--|
| Titel: | Modeller til beskrivelse af iltsvind |
| Undertitel: | Analyse af data fra 2002 |
| Forfattere: | Jacob Carstensen ¹ , Anders Christian Erichsen ² |
| Afdelinger: | ¹ Afdelingen for Marin Økologi ² DHI – Institut for Vand & Miljø |
| Serietitel og nummer: | Faglig rapport fra DMU nr. 445 |
| Udgiver: | Miljøministeriet Danmarks Miljøundersøgelser© |
| URL: | http://www.dmu.dk |
| Udgivelsestidspunkt: | Juni 2003 |
| Redaktionen afsluttet: | Maj 2003 |
| Faglig kommentering: | Bo Riemann & Tonny Niilonen |
| Finansiell støtte: | Miljøstyrelsen |
| Bedes citeret: | Carstensen, J. & Erichsen, A.C. 2003: Modeller til beskrivelse af iltsvind. Analyse af data fra 2002. Danmarks Miljøundersøgelser. 62 s. – Faglig rapport fra DMU nr. 445. http://faglige-rapporter.dmu.dk |

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse.

Sammenfatning: Denne rapport beskriver og sammenligner to forskellige model tilgangsvinkler til beskrivelse af iltsvindsudbredelse i de indre danske farvande. Sammenligningen er udført på basis af data fra 2002, som er det hidtil værste iltsvind observeret. Den mekanistisk baserede model har styrke i den matematiske procesbeskrivelse, hvorimod den empiriske model har styrke i den tætte kobling til måledata. Samlet komplementerer de to modeller hinanden godt, og en forbedret model til beskrivelse og prognose for udvikling af iltsvind vil kunne opnås ved at kombinere de to modeller. Det er dog vigtigt, at iltsvindssituationen løbende overvåges og disse observationer assimileres ind i modellerne.

Emneord: Databehov, empirisk modellering, iltsvind, mekanistisk modellering, prognoser

Layout: Anne van Acker

ISBN: 87-7772-737-1

ISSN (elektronisk): 1600-0048

Sideantal: 62

Internet-version: Rapporten findes kun som PDF-fil på DMU's hjemmeside:
http://www.dmu.dk/1_viden/2_Publikationer/3_fagrapporter/rapporter/FR445.pdf

Købes hos: Miljøministeriet
Frontlinien
Strandgade 29
DK-1401 København K
Tlf.: 3266 0200
Frontlinien@Frontlinien.dk
www.frontlinien.dk

Indhold

Sammenfatning 5

Summary 6

1 Indledning 7

2 Årsager til iltsvind 8

- 2.1 Overordnede strømforhold 8
- 2.2 Springlag 10
- 2.3 Biologi 10
- 2.4 Forskelligheder i iltsvindsproblematikken 13

3 Anvendelse af modeller 15

- 3.1 Model usikkerhed 16
- 3.2 Operationelle modeller og data assimilering 17

4 Beskrivelse af Vandudsigten 18

- 4.1 DHI's eutrofieringsmodel 18
 - 4.1.1 Modelusikkerheder 21
 - 4.1.2 Tvangsfunktioner 22
 - 4.1.3 Iltsvindsmodellering år 2002 23
 - 4.1.4 Prognose for udvikling i iltsvind 26
 - 4.1.5 Databehov 26

5 Beskrivelse af DMU's empiriske model 27

- 5.1 Bearbejdning af iltprofiler 28
- 5.2 Metode iltsvindsudbredelseskort 32
 - 5.2.1 Aktuelle iltsvindskort 34
 - 5.2.2 Retrospektive iltsvindskort 34
- 5.3 Beskrivelse af iltsvindet 2002 35
 - 5.3.1 Iltsvindskort på Internettet 35
 - 5.3.2 Iltsvindet uge for uge 2002 35
 - 5.3.3 Prognoser for udviklingen i iltsvind 36
- 5.4 Metodens nøjagtighed og robusthed 38
- 5.5 Sammenfatning af DMU's empiriske model 40

6 Sammenligning af de to modeller 42

7 Konklusion 44

8 Referencer 46

- Appendiks A: Tidsmæssig udvikling i iltsvindet 2002 ved Vandudsigten 49
- Appendiks B: Tidsmæssig udvikling i iltsvindet 2002 ved DMU's empiriske model 55
- Danmarks Miljøundersøgelser 61
- Faglige rapporter fra DMU 62

[Tom side]

Sammenfatning

Iltsvindet i 2002 i de indre danske farvande er formodentlig det hidtil værste, og der blev derfor sat focus på anvendelsen af modeller til at beskrive iltsvindssituationen. To forskellige modeltyper blev anvendt, DHI's mekanistisk baserede model og DMU's empiriske model. I denne rapport er disse to modeltyper beskrevet og sammenlignet. Begge modeller viser overordnede sammenfaldende tendenser, som understreger at situationen i 2002 var særdeles udbredt med store områder dækket af iltsvind.

DHI's mekanistisk baserede model indeholder en matematisk beskrivelse af de vigtigste fysiske og biologiske processer, og den kan derfor beregne proceshastigheder, som kan være vigtige i fortolkningen af de underliggende mekanismer for iltsvind. Den forholdsvis komplekse model struktur kræver megen beregningstid, og den manglende kobling til måledata resulterer til tider i forholdsvis store afvigelser fra de målte iltkoncentrationer. DMU's empiriske model giver en god og detaljeret beskrivelse af iltsvindsudbredelsen i kraft af den stærke kobling til måledata, men denne metode er afhængig af iltprofiler på en række repræsentative stationer. De to model tilgangsvinkler komplementerer hinanden, idet DHI's model indeholder de vigtige procesbeskrivelser, og DMU's model har den stærke kobling til målte iltkoncentrationer.

Databehovet til at beskrive iltsvindssituationen afhænger i høj grad af hvilken rumlig opløsning og præcision der ønskes. Fra et overordnet nationalt synspunkt kan iltsvindet beskrives ud fra en række repræsentative stationer, hvorimod der fra et regionalt synspunkt vil være behov for flere stationer til at beskrive situationer i lokalområderne. DMU's model kan kun beskrive situationen ud fra målinger og forudsætter derfor en tilpas dækning med prøvetagninger, men DHI's model er ligeledes afhængig af måledata til en løbende tilpasning af modellen. En bedre og mere robust metode til beskrivelse af iltsvind kan opnås ved at udnytte styrkerne og derfor sammenkoble de to modeller.

Summary

The 2002 oxygen deficiency in the western part of the Baltic Sea is believed to be the worst ever recorded, and this resulted in increased focus on the use of models for describing the extent of hypoxic conditions. Two modelling approaches were employed, DHI's mechanistic based model and NERI's empirical based model, and these two models are presented and compared in the present report. The overall results from the two models show similar trends, showing that 2002 was indeed exceptional with extensive bottom areas exposed to hypoxic conditions.

The mechanistic based model contains a mathematical representation of the main physical and biological processes, and can therefore produce estimates of rates that are important to the understanding of the underlying mechanisms for hypoxia. The rather complex model structure requires extensive computing power, and the lack of coupling to observations occasionally result in larger deviations to measured oxygen concentrations. The empirical model provides a good and detailed description of the extent of hypoxia due to the strong coupling to observations. However, it crucially depends on data from a number of representative stations. The two approaches complement each other well, with DHI's model including a mathematical formulation of the important processes and NERI's model having a strong link to the observations.

Data requirements for both models reflect the spatial resolution and precision of the estimates to be obtained. On a national level the extent of hypoxia can be modelled by means of a limited number of representative stations, whereas regional assessments will require more stations for the specific area in question. In general, NERI's model needs oxygen observations as input and DHI's model also needs observations, although to a lesser extent, for calibration. A model combining the virtues of the two approaches will provide a more robust and precise tool for assessing the extent of oxygen deficiency.

1 Indledning

Iltsvindet i sensommeren og efteråret 2002 var det hidtil værste der er registreret i de indre danske farvande siden registreringerne startede i midten af 1970'erne. Derfor blev der fra DMU's og DHI's side hver især iværksat en række initiativer for at forbedre informationsgrundlaget til vurdering af iltsvindets omfang samt give prognoser for den forventede udvikling indenfor en tidshorisont på 5 dage. Disse informationer blev i stor udstrækning tilvejebragt ved brug af modeller.

Modeller er et vigtigt værktøj til fortolkning af iltsvindshændelser, men der findes mange forskellige måder at modellere iltsvind. Alle modeller er tilpasninger til virkeligheden og har fordele og ulemper.

I år 2002 var der to alternative modeller til beskrivelse af iltsvindet, og formålet med denne rapport er: 1) at beskrive hver af de to modeltyper, og 2) at sammenligne de to modeltyper for at vurdere de stærke og svage sider. Indledningsvis gives en konceptuel beskrivelse af de mekanismer, som fører til iltsvind i de indre danske farvande (afsnit 2). Den overordnede årsag-effekt sammenhæng har været kendt i årtier, hvorimod der stadig hersker stor usikkerhed omkring de kvantitative aspekter af iltsvind. Efterfølgende giver afsnit 3 en kort og generel beskrivelse af modelleringsprincipper, som kan være til hjælp til at forstå konceptuelle forskelle mellem de forskellige tilgangsvinkler.

DHI har igennem en årrække udviklet et eutrofieringsmodul der sammen med det hydrauliske modul for beskrivelse af den fysiske transport er en del af MIKE-modelsystemet. Dette modul indeholder en matematisk beskrivelse af de vigtigste processer for iltsvind. Den matematiske beskrivelse af DHI's model for iltsvind samt modellens beskrivelse af iltsvindet i 2002 findes i afsnit 4.

DMU modtager løbende iltsvindsrapporteringer fra amterne, Gunnar Thorson samt svenske og tyske samarbejdspartnere. Dette datamateriale har tidligere kun været anvendt til at viderebringe information fra målestationerne. I efteråret 2002 blev der udviklet en metode med baggrund i geostatistikken, som ekstrapolerede punktobservationerne til arealudbredelse i de indre danske farvande. Denne metode og dens beskrivelse af iltsvindet i 2002 findes i afsnit 5.

De to modeltyper og deres beskrivelse af iltsvindet i 2002 sammenlignes i afsnit 6. De stærke og svage sider ved de to modeltyper vurderes, og herunder konkretiseres, hvor der er muligheder for forbedringer.

2 Årsager til iltsvind

Hvert år observeres der iltsvind i de danske farvande, men udbredelsen (horisontalt såvel som vertikalt) og varigheden af iltsvindet udviser meget store år til år variationer. År til år variationerne i udbredelsen og varigheden i de indre danske farvande kan hovedsageligt forklares ud fra to overordnede forhold. Tilførelsen af kvælstof og fosfor fra land, som i stor grad er styret af efterårs- og vinterafstrømningerne, samt de meteorologiske forhold henover sensommeren og efteråret, det vil især sige vindstyrker og -retninger (Richardson 1996). Lidt forenklet kan man sige at den styrende faktor for at iltsvindet kan opstå er indholdet af næringssalte, mens udbredelsen og varigheden mere eller mindre er styret af de meteorologiske forhold.

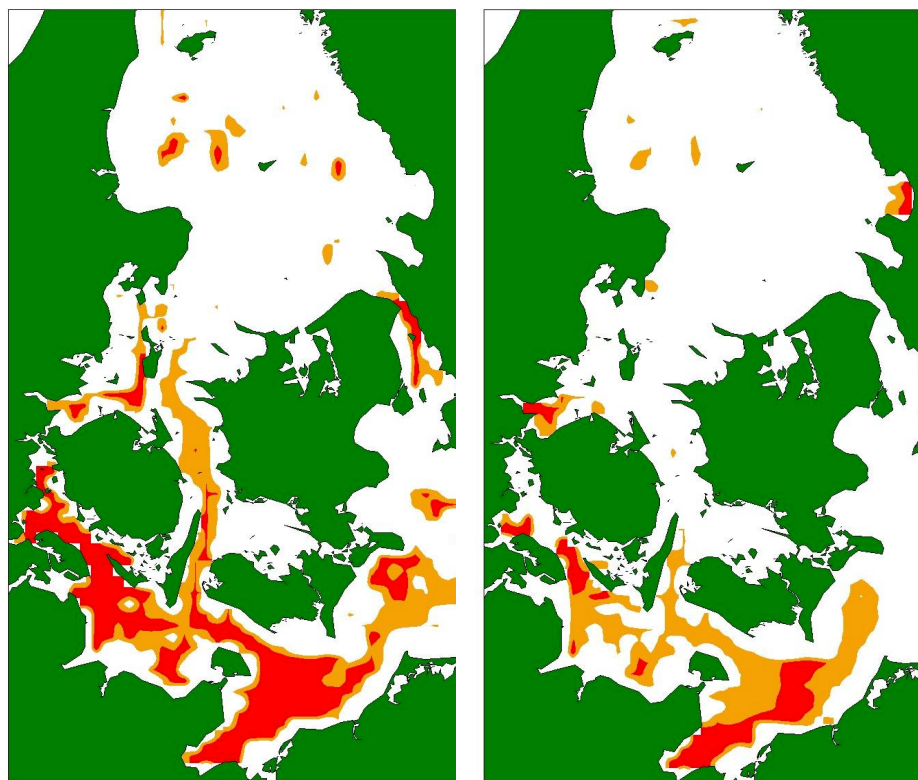
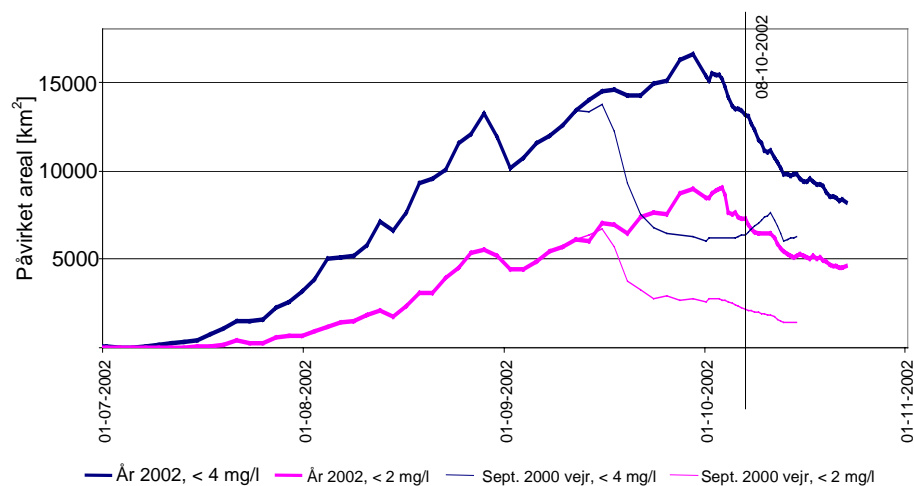
Disse to faktorer, udtrykt som vinterkoncentrationerne af biotilgængeligt kvælstof og fosfor, samt de aktuelle meteorologiske forhold henover sensommeren og efteråret kan virke sammen eller de kan være modsat rettede. I år 2002 var der et sammenfald mellem relative høje vinterkoncentrationer, og derfor et stort iltsvindspotentiale, samtidigt med at vi oplevede en lang og mild sensommer. Dette resulterede i et rekordstort iltsvind. For at illustrerer indvirkningen fra meteorologien henvises til *Figur 1*. Havde vi eksempelvis oplevet et efterår som i år 2000 ville situationen have været meget anderledes.

I det følgende vil vi koncentrere os om iltsvindets udbredelse og varighed i de indre danske farvande, inkl. Kattegat, samt Fehmern Bælt og den vestlige del af Østersøen. I Skagerrak er der ikke observeret problemer med iltsvind, hvorimod der i begyndelsen af 1980'erne ud for den jyske vestkyst flere gange har været observeret iltsvind af varierende længde og udbredelse (Westernhagen & Dethlefsen 1983).

2.1 Overordnede strømforhold

Østersøen er forbundet med Nordatlanten gennem en række komplicerede passager som leder vandet gennem Kattegat, Skagerrak og til sidst Nordsøen. De kontrollerende passager fra den sydlige del af Østersøen til Kattegat kan opdeles i de tre stræder, Øresund (~25 % af det udstrømmende overfladevand), Storebælt (~65 %) og Lillebælt (~10 %) (Jakobsen & Ottavi 1997), samt to tærskler, Darss tærsklen (~18 m) og Drogden tærsklen (~7-8 m). Nettotilførslen af ferskvand til Østersøen resulterer i en middel nettoudstrømning gennem bælteerne på omtrent 15.000 m³/s (Pedersen & Møller 1981). Denne nettoudstrømning indeholder dog store årlige variationer og endnu større korttidsvariationer, hovedsageligt styret af vindforholdene. Vandstrømmen ind og ud gennem bælteerne kan være mere end en faktor 10 større end netto strømmen.

Tidevandskræfterne i Nordsøen og de danske farvande er små og tidevandsvariationer, der observeres i Nordsøen kommer hovedsageligt som bølger ind gennem den Engelske Kanal og nord for Storbritannien fra Nordatlanten. Tidevandsbølgerne mindskes ind gennem Skagerrak/Kattegat og eksempelvis er tidevandsamplituden kun



Figur 1 (Top figur) 2002 iltsvindsudbredelse i km² beregnet med aktuelle meteorologiske felter for efteråret år 2002 (fede linier) og for efteråret år 2000 (tynde linier). Året op til sammenligningen er et år 2002 år og skiftet i de meteorologiske felter er foretaget den 12/9. Aktuell beregnet iltsvindssituation i år 2002 d. 8/10 (nederst til venstre). Iltsvindssituation d. 8/10 (nederst til højre) hvis efteråret meteorologisk set havde været som efteråret år 2000. Felterne er beregnet med DHI's MIKE 3 EU model, og er ikke baseret på målinger.

omkring 10 cm i Øresund. Derfor er de tidevandsgenererede vandstrømme små. De overordnede vandstrømme i de danske farvande styres dermed af de meteorologiske forhold over Skandinavien, hvor høj- og lavtryk skaber vandstandsforskelle mellem Østersøen og Nordsøen.

Derfor vil der med et skift i vindretningen kunne skabes bundstrømme som transporterer et eventuelt iltsvind fra et område til et

andet. Dette er mest udtalt i eksempelvis den åbne del af Kattegat (*Figur 2*), og væsentligt mindre udtalt i eksempelvis Lillebælt.

2.2 Springlag

Med hensyn til saltholdigheder er Østersøen generelt set et 2-lagssystem med et velblandet overfladelag på 30-50 m i den sydlige del og 60-70 m i den centrale del af Østersøen. Sommertemperaturen i de øverste 15-20 m stiger til mere end 15 °C og skaber en termoklin som dermed ligger væsentlige højere end haloklinen (Pickard & Emery 1990).

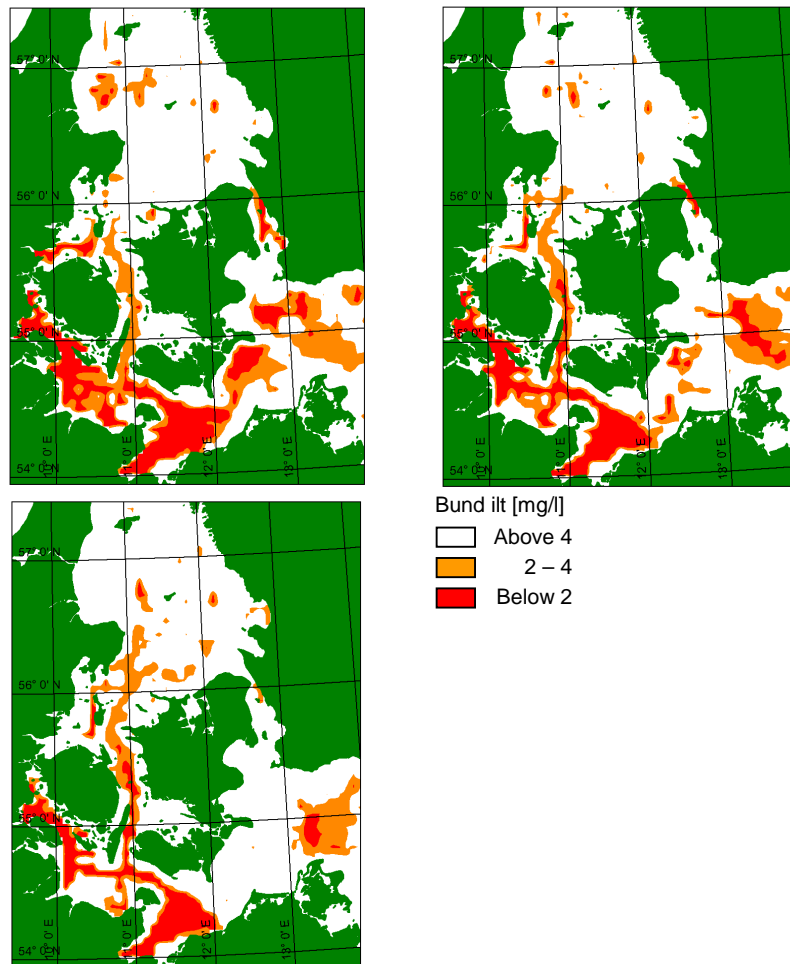
Gennem bælteerne skabes en estuarin cirkulation, med et udstrømmende overflade lag til Kattegat på 10-20 PSU og et indstrømmende bundlag med saliniteter i den sydlige del af Kattegat på op mod 30-34 PSU (Pickard & Emery 1990). Denne cirkulation resulterer i en haloklin, der er tilstede det meste af året (Andersson & Rydberg 1988), og som kun nedbrydes i forbindelse med meteorologiske forhold, hvor der tilføres tilstrækkeligt med energi til midlertidigt at opløse denne estuarine cirkulation.

Derudover udvikler der sig over sommeren gerne en termoklin i de danske farvande, som er sammenfaldende med haloklinen. Tilsammen skaber de en relativ stærk pycnoklin (densitetsspringlag) i sensommeren. Denne pycnoklin har stor indflydelse på iltforholdene ved bunden i de indre danske farvande og afhængigt af det aktuelle år kan store områder påvirkes af dårlige iltforhold i en kortere eller længere periode. Midt på sommeren år 2002 så situationen igennem de danske farvande ud som vist på *Figur 3*.

2.3 Biologi

Den styrende faktor for iltforbruget ved bunden og dermed grunden til eventuelle problematiske iltforhold i bundvandet er produktionen af fytoplankton og dermed produktionen af organisk materiale. Produktionen af fytoplankton i de danske farvande følger et typisk mønster med en forårsblomstring (evt. flere opblomstringer) af kiselalger i februar-april, som efterfølges af en blanding af kiselalger, dinoflagellater og nanoflagellater med relative lave biomasser. Med ny tilførsel af næringssalte i efteråret forøges algebiomassen igen, og efterårsblomster af kiselalger og/eller store Dinoflagellater kan forekomme (Edelvang et al. in prep.).

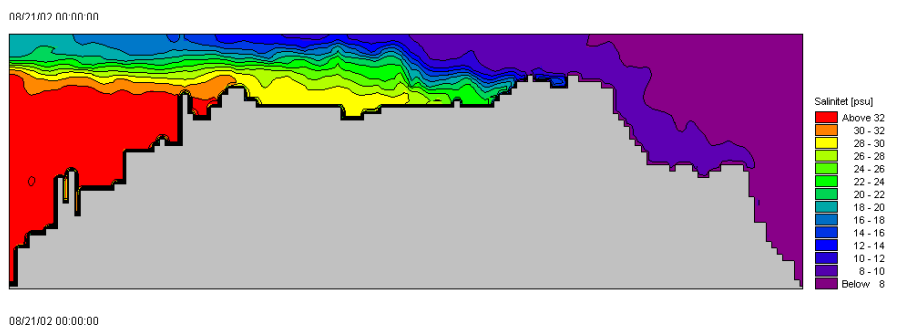
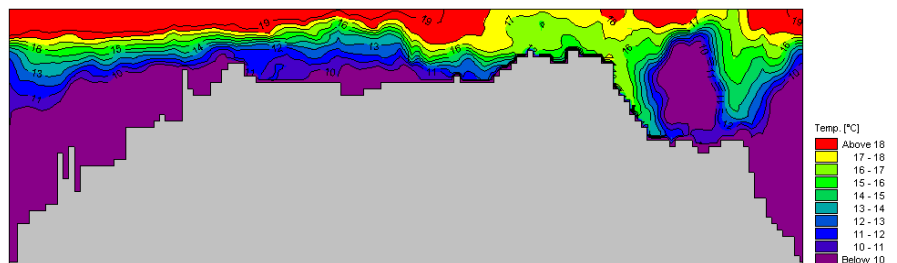
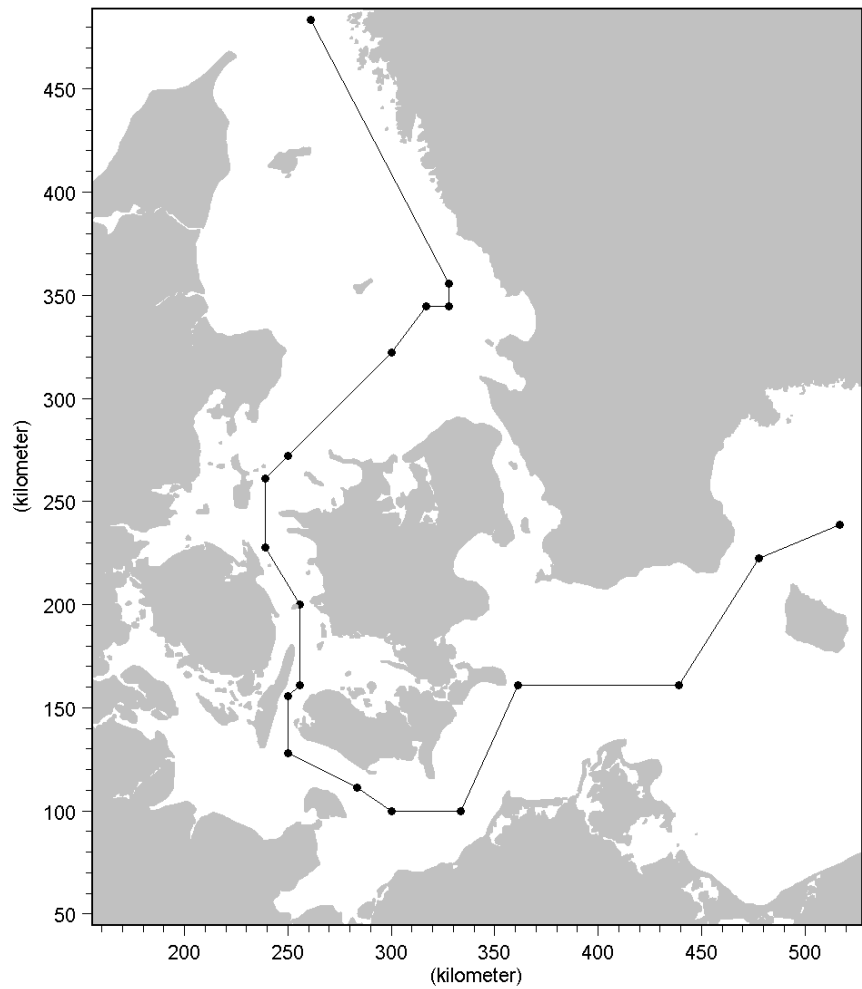
De overordnede styrende faktorer for produktionen af fytoplankton i de indre danske farvande er afstrømningen af kvælstof og fosfor fra land, danske såvel som udenlandske bidrag, samt de hydrografiske forhold, hvoraf begge er tæt knyttet til meteorologien. Det er kvælstofbelastningen, som er hovedårsagen til problemer med iltsvind (Richardson 1996) i de åbne dele af de danske farvande, idet kvælstof er begrænsende for fytoplankton produktionen i store dele af året. Fosfor er også i nogle fjorde begrænsende for produktionen i forårsperioden, hvorimod kvælstof er den vigtigste begrænsende faktor for produktionen i de åbne farvande (Granéli et al. 1990).



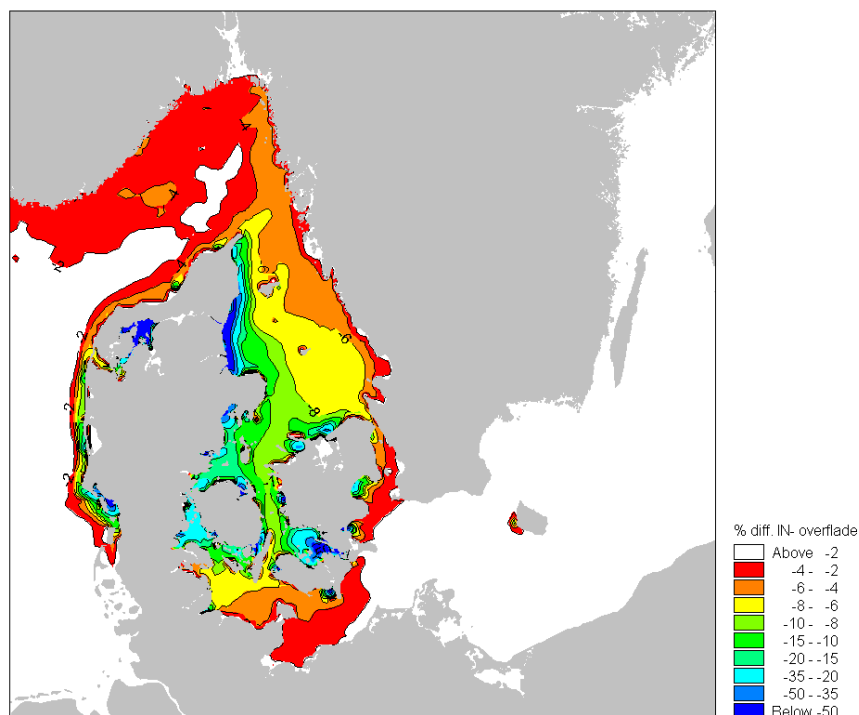
Figur 2 Eksempel på transport af iltvind fra Storebælt og nord for Fyn til et godt stykke ud i Kattegat. Transporten foregår langs bunden og billederne dækker fra venstre mod højre en 10 dages periode i efteråret år 2002 (d. 6/10, d. 11/10 og d. 16/10).

Derfor resulterer nyt kvælstof, dvs. kvælstof som tilledes systemet, i en nyproduktion af organisk materiale. Nyproduktion resulterer i en netto forøgelse af den organiske pulje (Richardson 1996) og dermed øges risikoen for iltvind. I nogle områder er der og har der sikkert altid været iltvind, men frekvenserne og udbredelserne er vokset, hvilket især tilskrives en øget grad af eutrofiering (Richardson 1996). *Figur 4* illustrerer hvor og hvor meget de danske kilder alene betyder for de uorganiske kvælstofkoncentrationerne i de danske farvande.

Beregningerne er foretaget med meteorologiske forhold som for år 2000 og belastningerne af N og P fra de danske afstrømningsområder er sat til nul henholdsvis belastninger svarende til år 2000. År 2000 resultaterne findes afrapporteret i Hansen & Erichsen (2002). Figuren viser tydeligt at de danske kilder har størst betydning i de kystnære områder mens betydningen aftager ud gennem Kattegat.



Figur 3 (Øverst) Transekt ned gennem de danske farvande og stræder. (Melleste) Saliniteter og (Nederst) temperaturer i samme transekt den 21/8-02. Felterne er beregnet med DHI's MIKE 3 model, og er ikke baseret på målinger.



Figur 4 De danske kilders betydning for årsmiddelværdien af den uorganiske kvælstofkoncentrationen i de danske farvande. Figuren viser de procentvise forskelle i overfladekoncentrationer uden de danske bidrag af uorganisk kvælstof. Figuren er baseret på år 2000 forhold. Felterne er beregnet med DHI's MIKE 3 model, og er ikke baseret på målinger.

Iltforbruget ved bunden skyldes sedimentationen fra den fotosyntetiske aktive zone af partikulært organisk materiale, dødt som levende, til de lavere liggende vandlag (Jørgensen 1996). I vandfasen, og hovedsageligt i og på bunden, resulterer det organiske materiale i et biologisk iltforbrug.

Mens styrken af springlaget øges henover sommeren, mindskes den vertikale opblanding og da sedimentationen af partikulært organisk materiale fra den fotosyntetiske aktive zone foregår mere eller mindre kontinuert gennem alle sommermånederne og ikke kun er knyttet til forårsopblomstringen (Richardson 1996), resulterer det i, at de lavere liggende vandlag under nedbrydning af det organiske materiale langsomt opbruger den ilt, der er til rådighed. Iltsvind opstår herefter når der over en tilstrækkelig lang periode har været et større iltforbrug end en eventuel iltproduktion og horisontal/vertikal transport kan berige vandet med nyt ilt.

2.4 Forskelligheder i iltsvindproblematikken

I det foregående er der nævnt forskellige forhold – dvs. næringssalte og de meteorologiske forhold – der spiller ind på udbredelse og varigheden af iltsvind. Hvordan og hvor kraftigt de hver især påvirker iltsvindet afhænger i stor udstrækning af farvandet.

I Arkona Bassinet med dybt vand vil der være et tilbagevendende, længerevarende iltsvind. Der er stadigvæk år til år variationer i den maksimale udbredelse og varighed som skyldes nærings saltsbelastninger og aktuelle meteorologiske forhold, men de store forskelle opnås først og fremmest med saltvandsindbrud over Drogden og Darss tærsklerne, der bringer tungt og iltholdigt vand ned til bunden.

Op gennem Fehmern Bælt og Bælthavet observeres der næsten uden undtagelser iltsvind hvert år. Disse påvirkede områder er kendetegnet ved relative store dyber, som eksempelvis de dybere dele af Lillebælt samt dele af Det Sydfynske Øhav og dele af de tyske bugter. Selv i årene 1996 og 1997, hvor Danmark oplevede et historisk lille iltsvind, blev der observeret iltsvind, omend i mindre udstrækning i disse områder. Iltsvindet i de indre danske farvande er dog ikke permanent og med de kraftige efterårsstorme nedbrydes springlaget og der blandes iltholdigt vand ned til bunden.

I år hvor iltsvindet breder sig op i de mere åbne dele af de danske farvande, eksempelvis det sydlige Kattegat, kan der forekomme betydelige horisontale transporter der kan bringe iltfattigt vand fra en del af Kattegat til en anden del af Kattegat på kort tid (jævnfør *Figur 2*).

3 Anvendelse af modeller

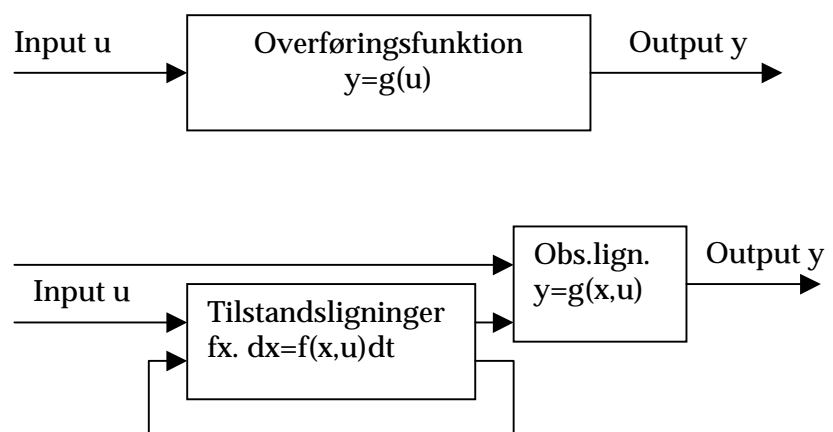
En model er en abstraktion fra virkeligheden, men dette kan indbefatte alt fra en overordnet formulering af sammenhænge (konceptuel model), en demonstrationsmodel (miniskala eller pilotskala) til en matematisk model. Vi vil i det følgende benytte ordet model som en matematisk formuleret sammenhæng mellem et antal variable.

Da alle modeller er tilnærmelser til virkeligheden, er der ikke nogen modeller, som er mere eller mindre rigtige end andre. *En models egnethed afhænger af, hvor godt den opfylder formålet.* Ofte vil der være flere mulige modelløsninger til en given problemstilling, og flere modelmæssige tilgangsvinkler vil give en bedre forståelse og indsigt.

En model angiver en metode til at transformere et input (u) til et output (y) ved hjælp matematiske formler (Casti 1977; Chui & Chen 1988). En direkte kobling mellem input og output variable kaldes en overføringsfunktion, hvorimod en kobling mellem input og output via en række tilstandsligninger, oftest differentially ligninger, kaldes en tilstandsmodel (Figur 5). Tilstandsmodellens output findes ved at formulere observationsligninger, som beregner outputtet på basis af tilstand og input variable.

Ligningerne, som udgør skelettet i modellen, kaldes for modelstrukturen, og disse benytter sig af følgende 3 elementer:

- variable
- parametre
- konstanter



Figur 5 Illustration af overføringsfunktion (øverst) og tilstandsmodel (nederst) formuleret som almindelig differential ligning. Tilstandsmodellen kan udvides til partielle differential ligninger, som beskriver ændringer i tilstanden i både tid og rum. I praksis løses både almindelige og partielle differential ligninger ved at diskretisere tilstandsligningerne til en opløsning, som forsøger at optimere beregningstiden og samtidig minimere den numeriske fejl ved diskretiseringen.

hvor variable består af input, tilstand eller output variable. Parametre er elementer i modellen, som tilpasses løsningen af et givent problem (f.eks. kulstof-klorofyl forhold), hvorimod konstanter er fastsatte størrelser, som ikke ændrer værdi (f.ex. støkiometriske forhold).

Modeller formuleres ved en kombination af induktive eller deduktive processer. Den induktive modellering tager udgangspunkt i observerede data og formulerer herefter sammenhængen, hvorimod den deduktive modellering først formulerer sammenhængen, som derefter søges eftervist ved data. I praksis er al modellering en iterativ proces mellem induktion og deduktion.

I de fleste problemstillinger findes der observationer af modellens output variable, som benyttes til tilpasningen af parametrene i modellen. Parametrene i en model kan enten kalibreres, hvor modelløren vælger passende værdier for parametrene ud fra erfaring og samtidig forsøger at beskrive de observerede output variable bedst muligt, eller de kan estimeres, hvor parameter værdierne bestemmes ud fra statistiske principper (typisk ved at optimere en funktion, som angiver hvor godt observerede output data beskrives af modellen).

3.1 Model usikkerhed

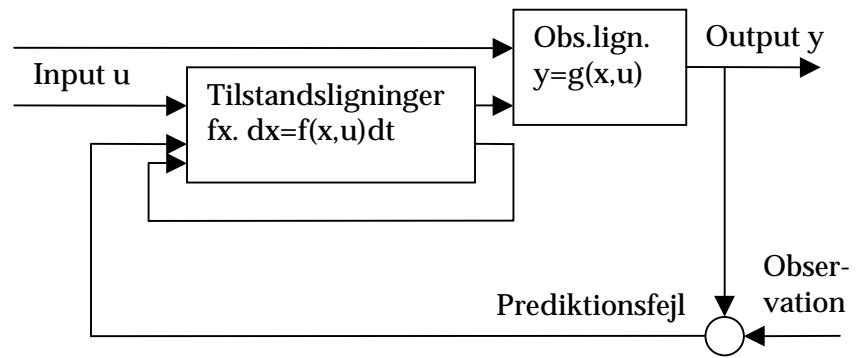
Ethvert modelresultat er behæftet med usikkerhed, men det kan ofte være svært nøjagtigt at kvantificere denne størrelse. Der findes 3 principielle kilder til usikkerhed i enhver model (Beck 1987):

1. usikkerhed i input variable
2. usikkerhed i modelformuleringerne
3. usikkerhed i modelparametrene

Derudover vil der for tilstandsmodeller skulle opstilles grænsebetingelser, som er behæftet med usikkerhed, og der kan endvidere opstå numerisk usikkerhed ved simulering af en model i forbindelse med diskretiseringen.

Usikkerhed i input variable er forbundet med manglende nøjagtighed ved bestemmelsen, manglende repræsentativitet af målingen og deciderede fejlobservationer. Usikkerhed i modelformuleringerne stammer fra, at de matematiske formuleringer er tilnærmelser til virkeligheden (med undtagelse af masse- og inertibevarelsesligninger). Usikkerhed i modelparametre skyldes, at der ikke findes tilstrækkelig nøjagtig viden omkring værdien af en given parameter for den givne problemstilling.

Det er vigtigt at bestemme usikkerheden på outputtet fra en model, da dette angiver hvor stor vægt der skal lægges på resultaterne. Samtidig vil en sådan analyse kunne bidrage til at forbedre modellen ved at fokusere på de dele, som bidrager med stor usikkerhed. Problemet med usikkerhedsanalyser er, at de ofte er forholdsvis komplekse, tager lang beregningstid og sjældent inddrager alle 3 usikkerhedskomponenter, som beskrevet ovenfor.



Figur 6 Princippet for data assimilering består i at modellens output sammenholdes med aktuelle observationer, og forskellen mellem beregninger og observationer benyttes til at opdatere tilstanden i modellen.

3.2 Operationelle modeller og data assimilering

Modeller, som benyttes til løbende at beskrive den aktuelle situation og fremtidige udvikling, betegnes som operationelle. Såfremt modellen løbende opdateres med nye input observationer kaldes modellen adaptiv, og metoden hvormed dette foregår kaldes data assimilering.

Operationelle modeller benyttes typisk indenfor meteorologien, hvor modeller giver vejrprognoser for en begrænset tidshorisont, og hvor måledata løbende assimileres ind i modellen.

Data assimilering foregår ved at opdatere tilstandsvariable i modellen (*Figur 6*) med en "tilbagekobling" af forskellen mellem model beregning og observeret værdi. Data assimilering kan foregå ved fuld tilbagekobling, hvor tilstandene korrigeres fuldstændigt med prediktionsfejlen. Alternativt kan anvendes en tilbagekobling, hvor tilstandene kun opdateres delvist ud fra et signal-støj forhold, dvs. et forhold mellem hvor stor usikkerhed der er i modellens output i forhold til usikkerheden på observationerne. Denne opdatering af tilstandsvariable foregår typisk ved hjælp af et Kalman filter, hvor graden af tilpasning til nye observationer kaldes Kalman-forstærkningen.

4 Beskrivelse af Vandudsigten

I forbindelse med NOVA 2003 udviklede og opererede DHI en hydraulisk model, *Farvandsmodellen*, der beskriver strøm, vandstand, salt samt temperaturer i Østersøen, Nordsøen samt de mellem liggende farvande, og med fokus på de indre danske farvande.

Med afsæt i *Farvandsmodellen* er udviklingen fortsat og i dag opererer DHI et modelkompleks, der løbende benyttes til at beskrive den aktuelle situation og fremtidige udvikling (op mod 5 døgn) af bølger, dønninger, strøm, vandstand, salt, temperatur, klorofyl-a samt iltkoncentrationer – *vandudsigten*. *Vandudsigten* præsenteres dagligt på www.vandudsigten.dk.

Der er altså flere forskellige modeller inkluderet i det samlede modelkompleks og modellen, der benyttes til at beskrive de biologiske og vandkemiske forhold, og dermed iltsvind, er DHI's 3-dimensionale eutrofieringsmodel, som med de tidligere beskrevne modeltermer er en deduktiv, tilstandsmodel.

Modellen er operationel og der afvikles dagligt på baggrund af vejrudsigter prognoser af op til 5 dages varighed af salt, temperaturer, fytoplankton, næringssalte og iltkoncentrationer, hvoraf iltkoncentrationerne ved bunden dagligt præsenteres på www.vandudsigten.dk/ilt.

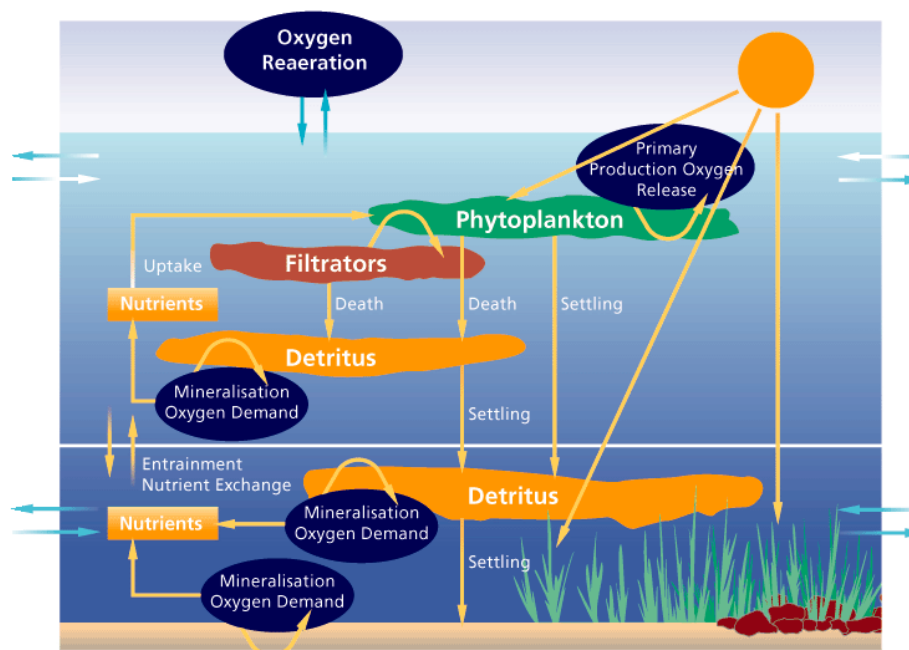
Modellen har en fysisk og biologisk beskrivelse af årsagssammenhæng, men der vil være områder og tidspunkter, hvor modellen ikke beskriver de aktuelle målinger fuldstændigt. Derfor foregår der som en del af modelafviklingen nogle tilpasninger af modelresultater, det vil sige adaptiv modellering. Tilpasningen af resultater er på nuværende tidspunkt ikke automatiseret og foretages udelukkende når større længerevarende afvigelser opstår mellem modellerede resultater og målte koncentrationer.

Modellen har en styrke i årsagssammenhængen, og kan derfor netop benyttes til at komme med korttidsprognoser af eksempelvis iltsvinds udbredelse på baggrund af vejrudsigter, men der er på nuværende tidspunkt ingen tæt kobling til målinger. I forbindelse med prognoser vil modelberegningerne styrkes ved at koble den viden der haves i form af punktobservationer med modellens horisontale variation.

4.1 DHI's eutrofieringsmodel

Den overordnede biologiske model, som har været anvendt operationelt siden sommeren 2001, er DHI's 3-dimensionelle eutrofieringsmodel, MIKE 3 EU (DHI Water and Environment 2000). DHI's eutrofieringsmodel beskriver eutrofieringsaspekter med fokus på vandfasen. Det er en algevækst model, som beskriver årsagssammenhængen i koncentrationer og processer, der relaterer sig til forholdene mellem fytoplankton, zooplankton, opløste og organiske næringssalte samt iltforholdene.

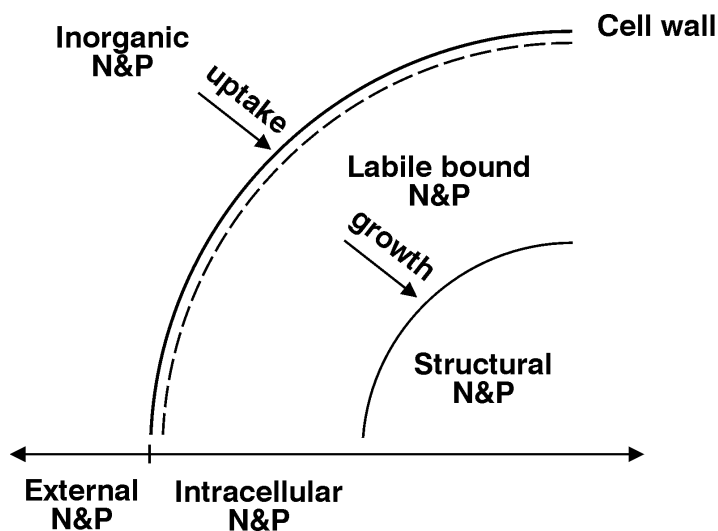
På *Figur 7* er de processer og tilstandsvariable, der er inkluderet i MIKE 3 EU modellen skitseret. De tilstandsvariable, som er inkluderet i modelsystemet er fytoplankton (kulstof, kvælstof og fosfor), zooplankton kulstof, detritus (kulstof, kvælstof og fosfor), uorganisk kvælstof (nitrit+nitrat+ammonium), uorganisk fosfor, opløst ilt samt klorofyl-a. Som indikeret på figuren er der en lang række af processer, der virker på de enkelte variable, og transformerer dem indbyrdes, eksempelvis organisk kvælstof til uorganisk kvælstof. Der er fuld massebevarelse i modelsystemet, og det antages at der altid er den nødvendige mængde uorganisk kulstof til rådighed i form af CO₂ til produktion af organisk materiale. Uorganisk kulstof modelleres derfor ikke.



Figur 7 MIKE 3 EU processer og modelvariable, som de er inkluderet i eutrofieringsmodellen, standard version.

Den styrende proces i modelsystemet er væksten af fytoplankton. Væksten af fytoplankton er kontrolleret af tilgængeligheden af uorganiske næringssalte, temperaturen samt lysindstrålingen og fordelingen af lyset ned gennem vandsøjlen. Sedimentation af fytoplankton samt græsning fra zooplankton modelleres ligeledes.

I EU modellen er optaget af næringssalte i fytoplankton beskrevet i en to-trinsproces. Først optages de uorganiske næringssalte (kvælstof og fosfor) fra vandfasen til en interne puljer af næringssalte i algecel-len. Herefter vokser algen og indbygger næringssaltene i cellevæv, afhængigt af de mængder der er til rådighed i de interne puljer. Denne to-trinsalgeækstproces har vist sig at være meget effektiv når algevækst skal modelleres. Derudover giver det algen mulighed for luksusoptag af næringssalte, herunder især fosfor, og dermed fortsætte væksten selvom der ikke er uorganiske næringssalte til rådighed i vandfasen. På *Figur 8* er to-trinsprocessen vist skematisk.



Figur 8 Skematisk beskrivelse af algernes vækstkinetik som den er beskrevet i MIKE 3 EU.

Produktionen af fytoplankton er beskrevet som

$$\text{Primærproduktion} = \mu \times F(I) \times F(T) \times F(N,P) \times FAC \times RD$$

hvor μ er den maksimale vækstrate ved 20°C, $F(I)$ er en funktion der beskriver afhængigheden af lys ned gennem vandsøjlen, $F(T)$ er en temperaturfunktion, $F(N,P)$ er en funktion, der beskriver de interne puljer af kvælstof og fosfor, FAC er en korrektion for mørkeproduktion og RD er den relative dagslængde.

Organisk materiale som produceres i form af fytoplankton i overfladen og/eller mellemliggende vandlag (eksempelvis i springlaget) sedimenterer mod bunden, og afhængigt af strømforhold og opblanding synker det organiske materiale langsomt ud. Selve udsynknin-gen af fytoplankton er gjort afhængig af algernes næringsstofftilstand og er de interne puljer af kvælstof og fosfor små, antages det at algerne har det dårligt og de sedimenterer derfor hurtigere mod bunden. Dødt organisk materiale (detritus) behandles p.t. udelukkende som partikulært materiale med en mindre sedimentationshastighed end fundet i naturen, som kompensation for opløst organisk materiale (DOC, DON, DOP).

Under sedimentationen nedbrydes det organiske materiale under et iltforbrug. Nedbrydningen er temperaturafhængig, og når det organiske materiale rammer bunden som fytoplankton eller detritus frigives næringsalte under endnu et iltforbrug.

Frigivelsen af næringsalte fra sedimentet simuleres i modellen ved en relation mellem den aktuelle sedimentation og et temperaturudtryk. Der holdes i standardmodellen ikke regnskab på sedimentpuljerne af næringsalte. Derfor beskriver modellen en situation i relativ ligevægt med hensyn til input-output til sedimentet.

Den mikrobielle løkke er ikke modeleret eksplicit, men når algerne dør frigives en procentdel af næringsaltene momentant under et

momentant iltforbrug. Afhængigt af forholdet mellem de iltforbrugende og de iltproducerende processer kan der, afhængigt af blandt andet styrken af springlaget opstå kraftige sænkninger i iltkoncentrationerne ved bunden, især sidst på sommeren, hvor temperaturen i bundvandet er højest.

Modellen inkluderer ikke dyr på niveauer over zooplankton og zooplankton beregnes som værende én homogen gruppe. Græsning på zooplankton fra eksempelvis fisk er inkluderet i en forhøjet dødsrate for zooplankton.

Samlet indeholder EU modellen 11 koblede differentiaalligninger som beskriver ændringer i tid og sted i det biologiske system.

4.1.1 Modelusikkerheder

Som beskrevet i afsnit 3 inkluderer modellering usikkerheder. Disse usikkerheder skyldes dels inputdata (belastningsdata, meteorologiske data mm.), dels usikkerheder i modelformuleringerne samt usikkerheder i model parametre. Disse usikkerheder er gældende for eutrofieringsmodellen samt det hydrauliske grundlag som eutrofieringsmodellen bygger på.

Derudover ligger der usikkerheder af praktiske hensyn. Disse praktiske hensyn henfører i dette tilfælde til de begrænsninger der ligger i den computerkraft der haves til rådighed. Det er endnu ikke muligt at have en høj detaljeringsgrad i både den rumlige opløsning og i det biologiske system.

Det hydrauliske grundlag for modellen beskrives ikke nærmere her, og der henvises til DHI (2000) og Erichsen & Rasch (2001) og hydrauliske samt vandkemiske modelresultater sammenlignet med målinger fra år 2000 og år 2001 kan genfindes i Hansen & Erichsen (2002) og Hansen & Erichsen (2003) henholdsvis. Selve modelberegningerne i de indre danske farvande er opløst i et kvadratisk 3 sømile (5.556 km) net med en vertikal opløsning på 2 m, hvor overfladeboksen dog i gennemsnit er 6 m tyk. Dette resulterer i mere end 175000 beregningspunkter som opdateres med intervaller på 300 sekunder.

Den valgte rummelige opløsning giver i sig selv en række begrænsninger, idet usikkerhederne i modelberegningerne vokser des nærmere man kommer kysten. Her vil den relativ grove opløsning betyde at lokale vanddybder, strømstyrker samt -retninger kan være meget forkerte. Desuden vil der nødvendigvis opstå problemer hvis man ønsker at beskrive biologiske forhold, der relaterer sig til et eventuelt springlag, med mindre lodret udstrækning end 2 m. Dette kunne være en springlagsproduktion, der i givet fald i modellen vil være glattet ud over flere lag. Dette er ikke numerisk muligt at beskrive med den valgte vertikale opløsning på 2 m.

Derudover er selve standard eutrofieringsmodellen bygget om ligevægtssituationer, og modellen kan ikke beskrive situationer, hvor der forekommer store ændringer i sedimentpuljer og modellen kan ligeledes ikke uden videre benyttes til at beskrive situationer, hvor der forekommer væsentlige strukturelle ændringer i økosystemet.

Usikkerhederne synliggøres især når model resultater sammenlignes med målinger. I den forbindelse skal der nævnes at modelresultaterne er en middelmåling over $5.5 \times 5.5 \text{ km}^2$ mens målingen er en punktmåling og hvor der kan være relativt store forskelle indenfor et tilsvarende område ($5.5 \times 5.5 \text{ km}^2$). Dette betyder at der naturligt vil være målinger der ikke præcist kan genskabes med modellen.

4.1.2 Tvangsfunktioner

For at afvikle modellen og opdaterer den beregnede vandudsigt er der en række data, der er nødvendige. De væsentligste data leveres af et meteorologisk institut. I år 2002 var det Vejr2 (www.vejr2.dk) der leverede meteorologiske data til afviklingen af den operationelle vandudsigt.

De nødvendige daglige data til at drive den hydrauliske model og eutrofieringsmodellen er;

- 10 m vindstyrke og -retning samt lufttryk
- Lufttemperatur 2 m over vandoverfladen
- Nedbør
- Solindstråling omregnet til $\text{einstein/m}^2/\text{dag}$

Senere vil andre meteorologiske tvangsfunktioner eventuelt blive inddraget som eksempelvis skydække.

Det skal i denne forbindelse nævnes, at de meteorologiske data også er baseret på modelresultater og fejl i disse overordnede tvangsfunktioner naturligvis vil give anledning til fejl i vandprognoserne. Mindre afvigelser i de meteorologiske tvangsfunktioner giver ikke umiddelbart anledning til problemer på grund af inertien i vandmasserne. Tilgængæld kan længerevarende (dvs. dage) systematiske afvigelser have en væsentlig betydning da der er en vis hukommelse i vandmasserne.

Derudover skal der benyttes daglige værdier for samtlige modellerede tilstandsvariable. I *Vandudsigten* er der to rander; én rand i den engelske kanal og én rand imellem Skotland og Norge. Som randværdier benyttes i dag astronomisk styret vandstand korrigeret for atmosfæriske trykvariationer samt 10 års månedlige gennemsnitsværdier for salt, temperatur samt de biologiske tilstandsvariable. Betydningen af eventuelle afvigelser i forhold til aktuelle (målte) koncentrationer på randen er undersøgt nærmere i Erichsen et al. (2001). Den overordnede konklusion med hensyn til de advective tilstandsvariable (salt, temperatur, vandkemiske parametre) er at på grund af placeringen af randene, relativt langt fra fokusområdet, er påvirkningen fra randen lille. Det vil tage mange år før potentielle afvigelser på de to rander vil få en synlig effekt i model resultaterne for eksempelvis Kattegat. I Nordsøen er effekterne naturligvis væsentligt større.

I forbindelse med iltsvindsmodellering er en vigtig parameter tilførslen af næringssalte. På nuværende tidspunkt benyttes ikke de aktuelle belastninger, men derimod gennemsnitlige belastninger over

de sidste par år. Dette forhold giver naturligvis også anledning til usikkerheder i model resultaterne og DHI arbejder på at forbedre input til også at inkludere et estimater fra de enkelte delomlande.

4.1.3 Iltsvindsmodellering år 2002

Som nævnt tidligere modellerede DHI løbende iltkoncentrationer i en 5-døgnsprognose i år 2002. Resultaterne blev løbende præsenteret på www.vandudsigten.dk/ilt, som er tilgængelig for offentligheden. Modellen blev ikke opdateret løbende med målte profiler, men i enkelte situationer blev større områder korrigeret for at minimere eventuelle fejl. I løbet af år 2002 blev enkelte delområder re-initialiseret med korrigerede iltkoncentrationsfelter 3 gange.

Med den måde som DHI opererer *vandudsigten* er der, som nævnt tidligere, inkluderet hukommelse. Det vil sige, at modelusikkerheder og fejl opstået på grund af fejl i tvangsfunktioner kan have en betydning over en længere periode.

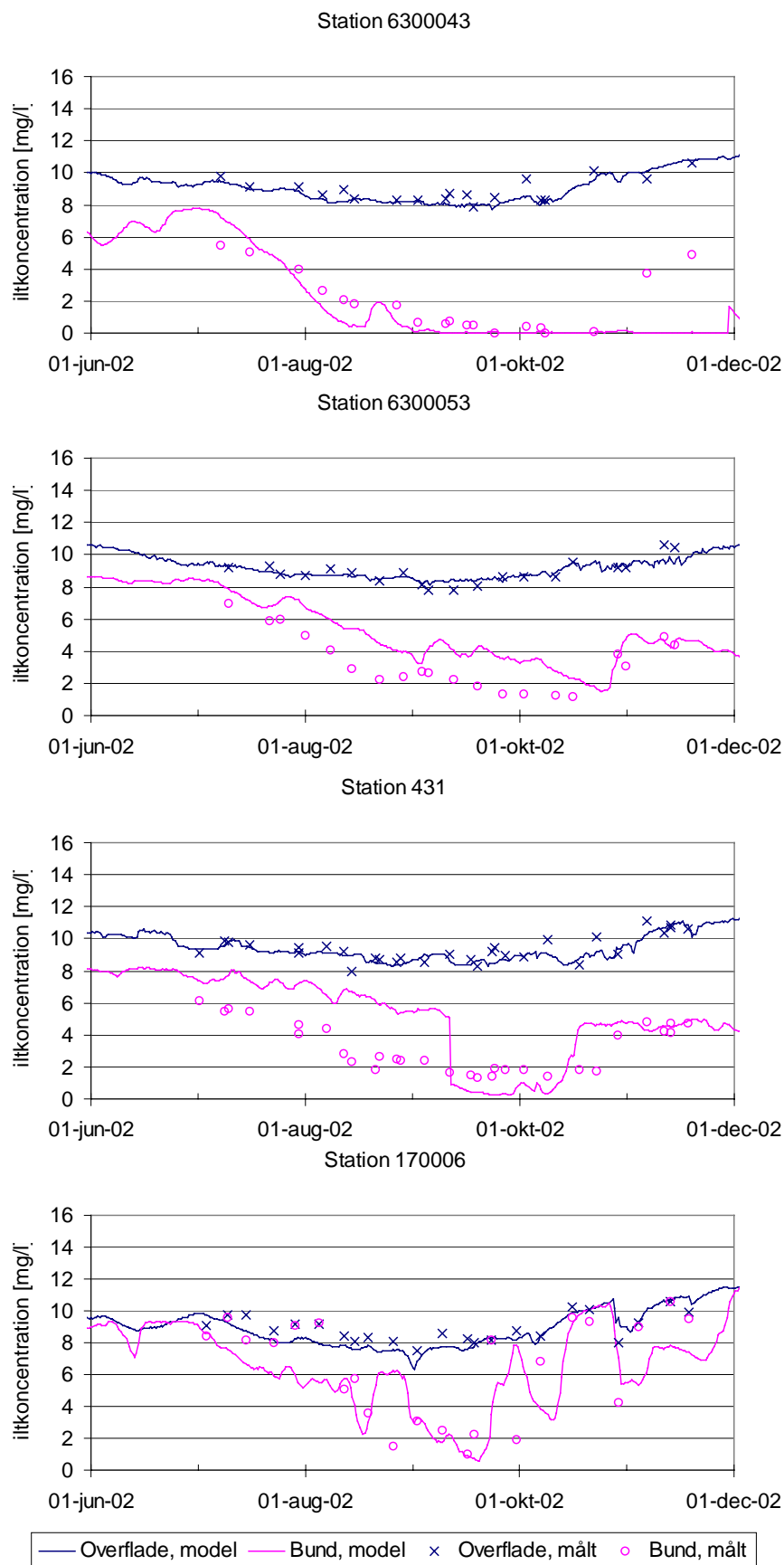
Resultaterne af iltsvindsmodelleringen for år 2002 er vist uge for uge i *Appendiks A*. DHI's model beregner øjebliksbilleder, og i *Appendiks A* er minimumskoncentrationerne vist pr. uge. Derfor er resultaterne ikke direkte sammenlignelige med resultaterne i *Appendiks B*, men der bør dog være en vis lighed.

Som en yderligere verifikation er der på *Figur 9* og *Figur 10* vist model beregnede iltkoncentrationer og målte iltprofildata for perioden 1. juni til 1. december år 2002.

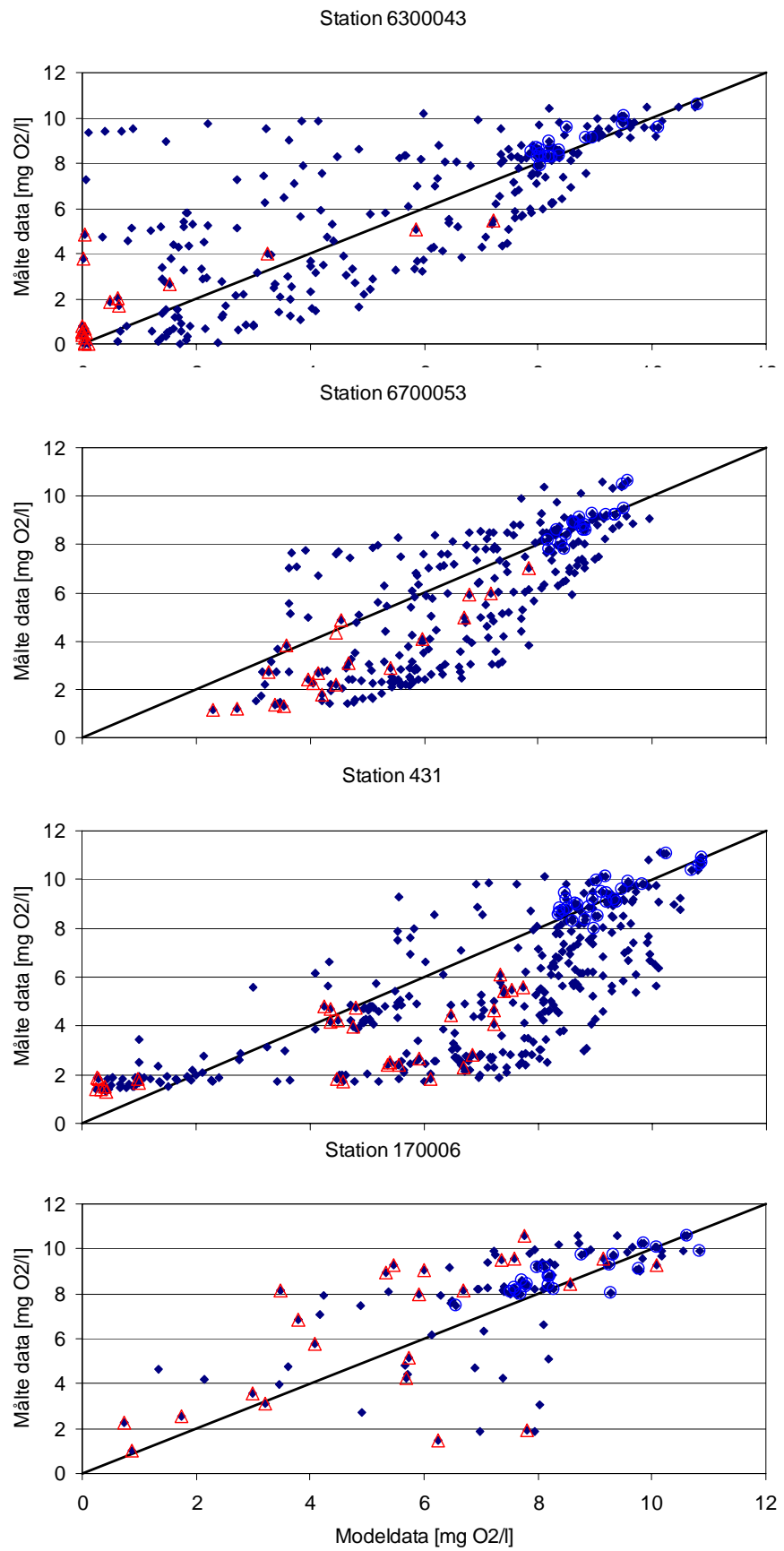
Som det fremgår af *Figur 10* er den overordnede sæsonvariation fangt med modellen. Der er nogle forskelle i niveauer og der er fluktuationer der ikke er inkluderet, men der er også store fluktuationer og opblandingssituationer, der fanges selv på station 170006 der egentligt er en kystnær station og derfor burde have problemer på grund af opløsningen i modellen.

Station 431 udviser et pludseligt fald i midten af september, hvilket blandt andet skyldes en re-initialisering, men fanger niveauet efterfølgende. Dette illustrerer behovet for løbende tilpasning af modellen til måledata.

Målte koncentrationer mod modellerede viser en overordnet sammenhæng (*Figur 10*). I forhold til identitetslinien er der en systematiske afvigelse ved de lave koncentrationer på station 6700053 hvilket genfindes på *Figur 10*. På station 431 er der ligeledes en periode, hvor modellen overestimerer koncentrationerne ved bunden, men efter re-initialiseringen genfinder modellen det rette niveau. På de to andre stationer er der en god sammenhæng mellem de høje og de lave koncentrationer, og de største afvigelser forekommer i de mellemliggende lag, hvor iltkoncentrationen kan skifte hurtigt.



Figur 9 Iltkoncentrationer på fire målestationer i år 2002 for overflade (blå) og bund (pink). Fuldt optrukne linjer er modelresultater, mens (x) og (o) er målinger.



Figur 10 Målte iltkoncentrationer (2002 data) fra hele profilen vist mod tilsvarende modelresultater. Bundværdier er markeret med trekanter og overfladeværdier med cirkler. Måledata er midlet så de passer til Vandudsigstens vertikale opløsning.

4.1.4 Prognose for udvikling i iltsvind

Modellen indeholder en kobling til de meteorologiske tvangsfunktioner og kan derfor benyttes til kvalitativt at give prognoser for udviklingen i iltforholdene med en tidshorisont svarende til prognoserne for vejr og vind. I 2002 blev der løbende beregnet prognoser 5 døgn frem i tiden. Som beskrevet tidligere indeholder modellen hukommelse, og afvigelser i beskrivelsen af den aktuelle situation vil derfor gå igen i de beregnede prognoser. Modellen var i stand til at forudsige hændelsen med fiskedød i Århus Bugt i midten af september.

4.1.5 Databehov

For at kunne afvikle DHI's model er det strengt taget ikke noget krav til at der er måledata til rådighed. Modelkalibreringen kan udbygges og nye tilstandsvariable kan inkluderes, hvilket er en proces som DHI løbende arbejder på for at forbedre Vandudsigen.

Til den proces er det naturligvis et ufravigeligt krav at der er måledata til rådighed til at kontrollere at ændringer og udvidelser fungerer optimalt. Denne proces er typisk bagudrettet og on-line eller tæt på on-line data er ikke nødvendige.

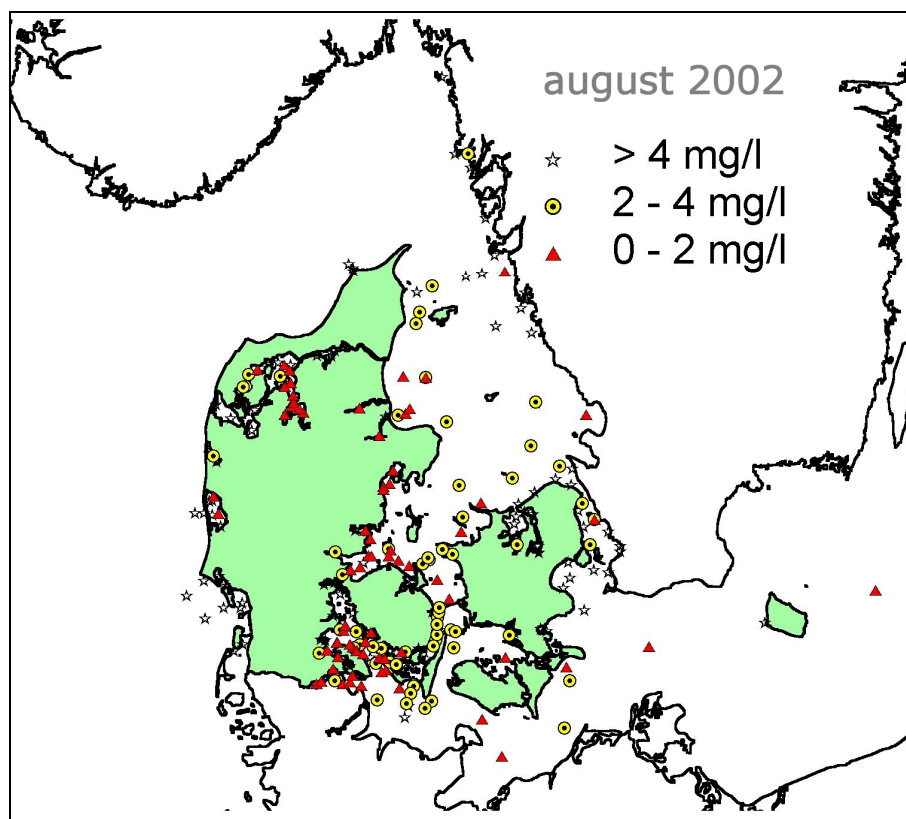
Hvis det derimod er ønsket om at forbedre prognosen af et iltsvinds udbredelse og størrelse kvantitativt og kvalitativt vil mængden af til rådighed værende data fra on-line stationer og hurtigt opdaterede togtmålinger kunne bidrage positivt til en kontinuerligt afvikling af *Vandudsigten*. Da systematiske afvigelser kan forekomme i specifikke områder, vil der være behov for løbende at kontrollere modellens output mod iltmålinger. Desuden vil det være muligt sideløbende at inkludere tilsvarende målinger af eksempelvis salt og temperatur og dermed øge præcisionen af det hydrauliske grundlag og eventuelt negligere tidligere fejl i eksempelvis tvangsfunktioner.

Antallet af målestationer vil derfor afspejles i præcisionen af det endelige resultat, hvilket bør analyseres nærmere før endelige konklusioner kan gives.

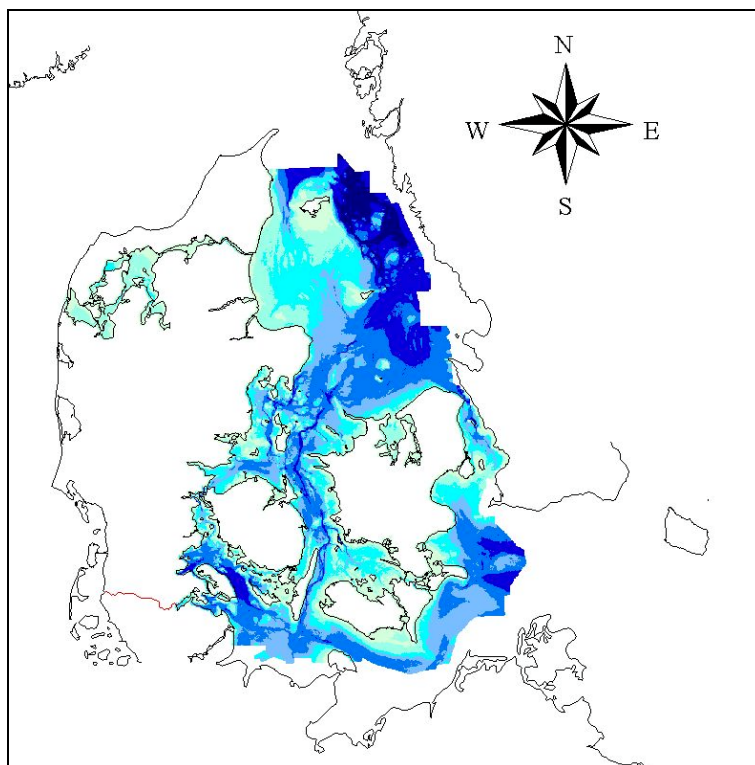
5 Beskrivelse af DMU's empiriske model

DMU er ansvarlig for det marine fagdatacenter under NOVA-programmet og har i den forbindelse foretaget månedlige iltsvindsrapporteringer (august-november) siden 2000 (tidligere rapporter blev udfærdiget af Miljøstyrelsen). Disse iltsvindsrapporter er baseret på indberetninger fra amter, svenske og tyske myndigheder samt DMU's egne togter. Der blev kun indberettet iltkoncentrationen ved bunden, dvs. den aktuelle iltsvindssituation blev visualiseret ved angivelse af, hvorvidt der var målt iltsvind ved bunden på en given station eller ej (Figur 11). Ulempen ved denne traditionelle fremstilling er, at omfanget af iltsvindet ikke kan vurderes, idet der er tale om punktobservationer.

DMU har arbejdet med at forbedre denne fremstilling, således at iltsvindet bliver præsenteret ved kort som viser arealudbredelsen for henholdsvis iltsvind (ilt koncentration < 4 mg/l) og kraftigt iltsvind (ilt koncentration < 2 mg/l). I oktober 2002 blev data indberetningen til DMU øget til at indbefatte iltprofiler gennem vandsøjlen, således at dybderne for iltsvind og kraftigt iltsvind kunne bestemmes. I første omgang blev der indrapporteret profil data fra amterne, svenske myndigheder og DMU, hvorimod de tyske myndigheder stadig kun indrapporterede iltkoncentrationen ved bunden.



Figur 11 Oversigtskort for DMU's traditionelle iltsvindsrapportering.



Figur 12 Dybdemodellen anvendt til beregning af iltvindsudbredelsen i efteråret 2002. Dybdemodellen er kombineret af AIS-dybdemodell og Limfjordsmodell fra Nordjyllands Amt.

Iltprofilmålingerne blev interpoleret ved metoden beskrevet nedenfor og kombineret med en dybdemodell for de indre danske farvande udviklet under Areal Information Systemet (<http://ais.dmu.dk>) med en opløsning på 100x100 m samt en dybdemodell for Limfjorden udlånt af Nordjyllands amt med en opløsning på 25x25m. Disse to modeller blev koblet sammen, og af hensyn til beregningstiden for beregning af iltvindsudbredelsen skaleret ned til en opløsning på 400 x 400 m (*Figur 12*).

Der blev i efteråret 2002 produceret 6 iltvindsudbredelseskort, som blev offentliggjort via DMU's hjemmeside (<http://iltrapport.dmu.dk>). Disse iltvindsudbredelseskort blev præsenteret vha. GIS-produktet ArcIMS, således at brugere fik stillet en række almindelige GIS-faciliteter til rådighed (zoom, informationer om prøvetagninger og dybder for 4 mg/l, 2 mg/l og til bunden).

5.1 Bearbejdning af iltprofiler

Iltprofiler, målt ved iltensor på CTD, fra amternes prøvetagninger samt iltkoncentrationer, målt i diskrete dybder ved winkler-titrering, fra DMU og SMHI på åben vand stationer udgjorde datamaterialet for beregning af de 6 iltvindskort i efteråret 2002. Iltprofiler fra Vadehavet, Ringkøbing Fjord, Nissum Fjord, Nordsøen og Skagerrak blev ikke brugt, da dybdemodellen ikke dækker disse områder (*Figur 12*). De diskrete profiler fra DMU og SMHI blev interpoleret lineært med dybden således at der opnåedes en interpoleret profil med en opløsning på 0.20 m. Udbredelseskortene blev beregnet på basis af

disse iltprofiler målt indenfor 11 dage (mandag ugen til og med torsdag) op til offentliggørelsen af kortet. Antallet af profiler benyttet til hvert af de 6 kort varierede fra 106 til 257 med flest i august og september og færre i oktober og november.

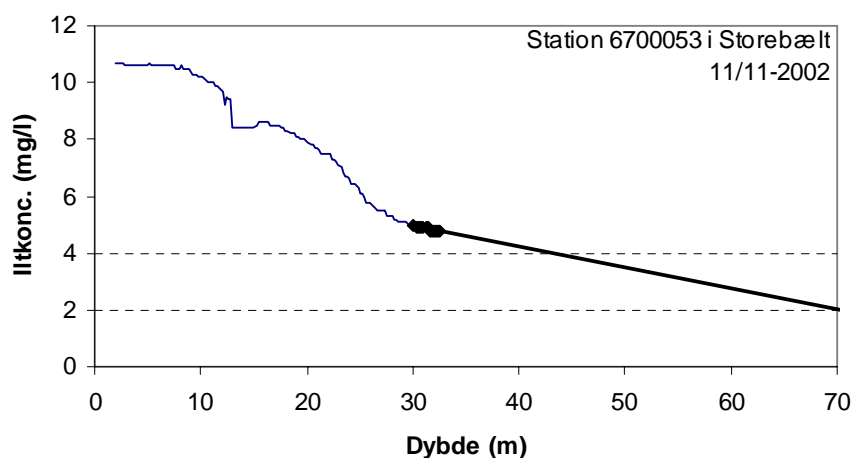
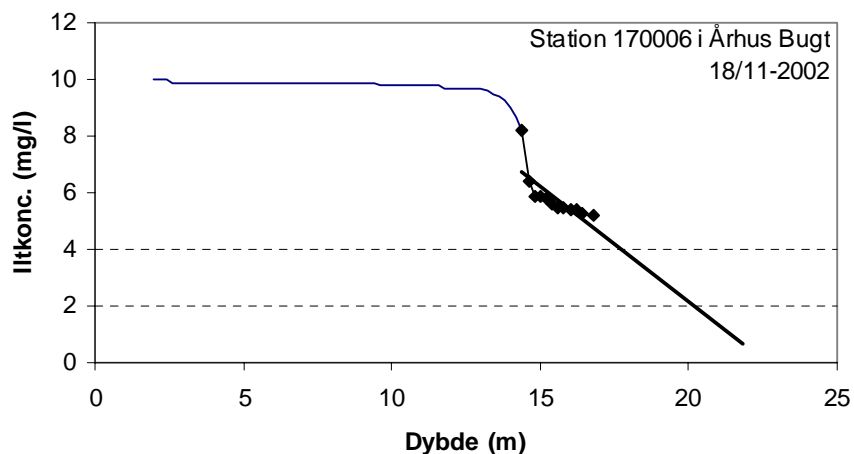
For hver profil er bestemt dybder (oxyklin) for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l ved følgende algoritme:

1. de først observerede iltkoncentrationer i profilen under henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l, dvs. dybdegrænserne er målt.
2. hvis dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l ikke er fundet i den målte profil (pkt. 1), foretages en regression af ilt mod dybden på de nederste 2.5 m af profilen. Såfremt der er en signifikant negativ gradient, benyttes denne til at beregne dybdegrænserne som i dette tilfælde er under bunden.
3. pkt. 2 gentages for de nedeste 10 m, hvis der ikke er bestemt dybdegrænser under pkt. 1 eller 2.
4. pkt. 2 gentages for hele iltprofilen, hvis der ikke er bestemt dybdegrænser under pkt. 1, 2 eller 3.
5. de maksimale dybdegrænser for 4 mg/l og 2 mg/l sættes til henholdsvis $1,5 \cdot \text{vanddybden} + 10 \text{ m}$ og $2 \cdot \text{vanddybde} + 10 \text{ m}$. Såfremt de bestemte dybdegrænser under pkt. 2-4 overstiger de maksimale dybdegrænser, benyttes de maksimale.

Ovenstående algoritme resulterer i, at der for hver profil bestemmes 2 dybdegrænser, for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l, der er enten målt i vandsøjlen eller estimeret som en værdi mellem bunden og de maksimale dybdegrænser. Pkt. 2-5 i algoritmen er vigtige idet informationen fra profiler, hvor der ikke er målt iltsvind eller kraftigt iltsvind, også skal benyttes. Samtidig må disse estimerede værdier ikke blive for store i forhold til de aktuelle vanddybder, da dette vil påvirke den spatielle interpolering (se senere).

De beregnede dybdegrænser forudsætter, at hvis der i umiddelbar nærhed af stationen findes større dybder end på selve stationen, så ville der potentielt optræde iltsvind på dybder under de beregnede dybdegrænser. Samtidig forudsætter pkt. 5 at der ikke i umiddelbar nærhed af stationen findes dybder større end de fastsatte maksimale dybder. Den umiddelbare nærhed af stationen dækker det område, som stationen repræsenterer, hvilket varierer fra farvand til farvand og specielt fra kystnære områder til åbent vand områder. En åben vand station er således repræsentativ for et større område end en kystnær station. Dybdegrænser bestemt ved pkt. 1 beskriver derfor, at der er iltsvind i området, pkt. 2-4 beskriver at der potentielt er iltsvind på større dybder end prøvetagningen i området, hvorimod pkt. 5 beskriver, at der ikke er iltsvind indenfor det af stationen repræsentative område.

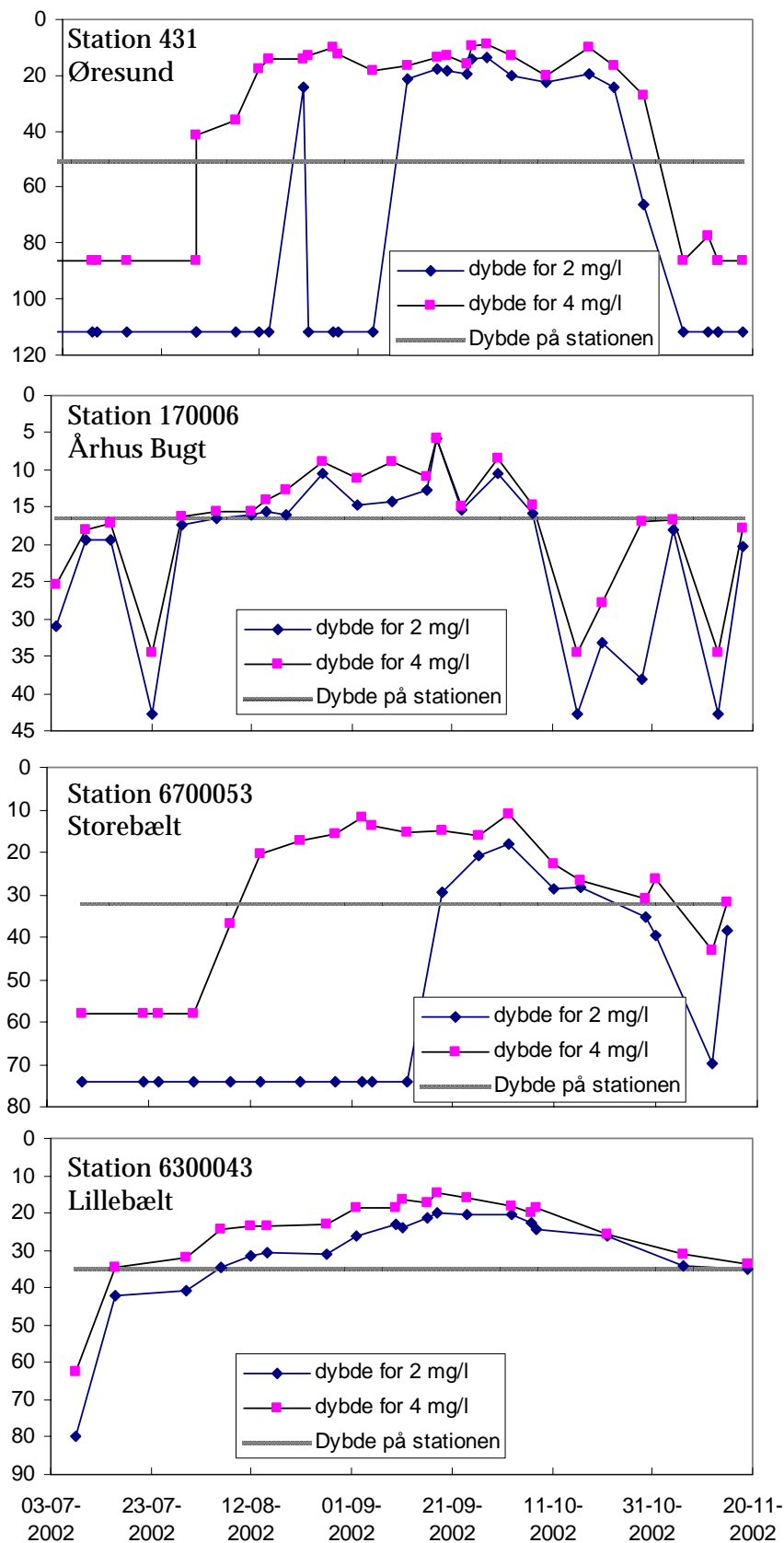
Dybdegrænserne blev bestemt ved regression for en mindre del af profilerne, idet størstedelen af dybdegrænserne blev målt i vandsøjlen eller sat lig den maksimale dybdegrænser (pkt. 5). Princippet for regressionerne i algoritmen er eksemplificeret i *Figur 13*, hvor det for



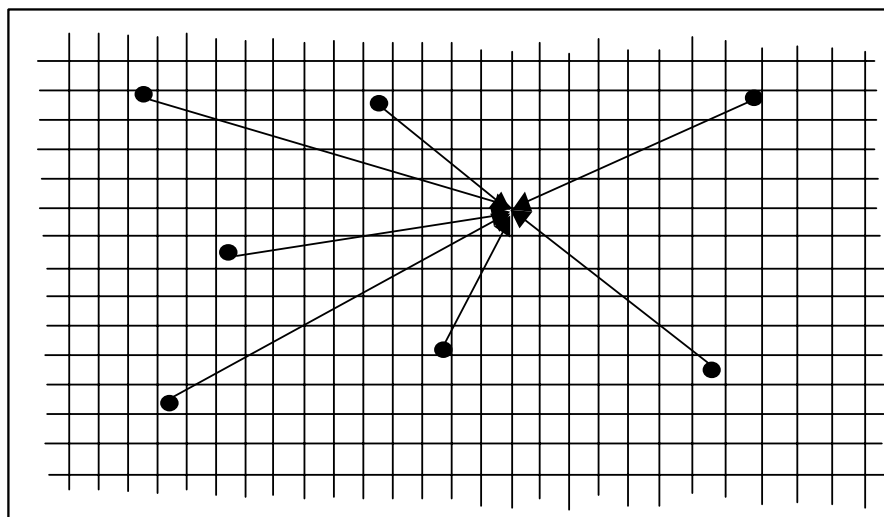
Figur 13 To eksempler, hvor dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l er bestemt ved regression af de nederste 2.5 m i iltprofilen (vist med data punkter).

station 170006 predikteres, at iltsvind potentielt forekommer på dybder lige under stationsdybden (17,7 m og 20,2 m for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l), hvorimod iltsvind potentielt forekommer på dybder større end 10 m under bunden på station 6700053. De beregnede dybdegrænser er måske kvalificerede, men usikre estimater for de dybder, hvor der potentielt ville optræde iltsvind.

Som beskrevet ovenfor, har dybdegrænser bestemt ved pkt. 2-5 i algoritmen betydning for områder med større dybder tæt ved prøvetagningen. De fleste stationer er imidlertid placeret ved de dybeste lokaliteter, således at et eventuelt iltsvind indenfor det repræsentative område for stationen også vil være reflekteret i den målte iltprofil. Dette sammenholdt med at størstedelen af dybdegrænserne er bestemt enten i vandsøjlen eller ved de maksimale dybdegrænser, betyder at usikkerheden forbundet med de beregnede dybdegrænser for iltsvind (pkt. 2-4), vil have en marginal påvirkning af de beregnede udbredelser for iltsvind.



Figur 14 Tidlig udvikling i dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l på 4 intensive stationer med ugentlig prøvetagningsfrekvens. Dybdegrænser over bunden er bestemt ved pkt. 1, største dybdegrænser ved pkt. 5 og dybdegrænser imellem bund og maksimale dybdegrænser ved pkt. 2-4.



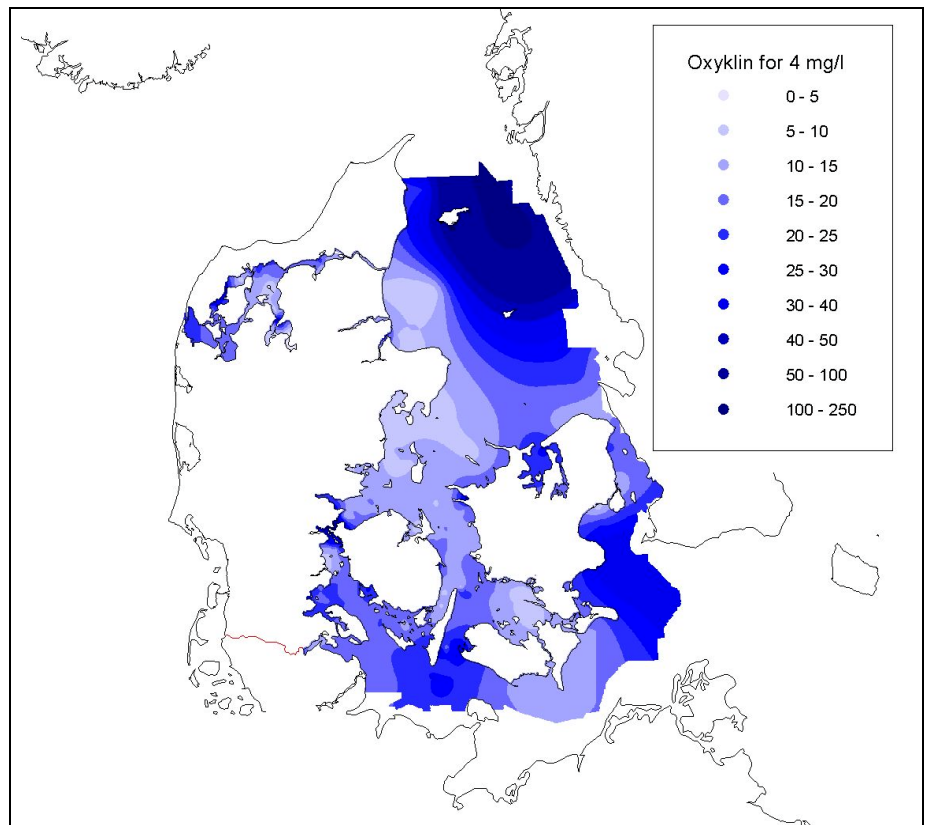
Figur 15 Prediktion af dybdegrænser i grid-net defineret af dybdemodellen. De interpolerede værdier i grid-nettet bereregnes ud fra dybdegrænserne fra prøvetagningerne (angivet ved punkter) med en vægtning af dybdegrænserne fra de enkelte prøvetagninger, som afhænger af afstanden til grid-punkter, hvor der interpoleres.

Den tidslige udvikling i dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l viser en kraftig stigning i begyndelse af perioden, en stabilisering frem til midten af oktober, efterfulgt af et gradvist fald (*Figur 14*). Stationen i Øresund og Storebælt har kraftige ændringer i dybdegrænserne nær bunden, hvilket skyldes at disse dybder repræsenterer et relativt lille volumen. Bundvandet i Århus Bugt er koblet til variationer i det sydlige Kattegat, hvor skiftende vindretninger i slutningen af september/begyndelse af oktober fik dybdegrænserne til at bevæge sig op og ned. Stationen i det sydlige Lillebælt repræsenterer et relativt stort dybt bassin, hvor tilførslen af iltrigt bundvand foregår mindre dynamisk end for de andre stationer. Dette afspejler sig ligeledes i den trøge dynamik for dybdegrænserne.

Dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l følges pænt for alle 4 stationer med undtagelse af en enkelt profil på station 431 i Øresund, som viste kraftigt iltsvind på stationen allerede i midten af august (ca. 1.8 mg/l i den nederste del af vandsøjlen). Dagen derpå blev der fra en anden institution målt 2.3 mg/l i den nederste del af vandsøjlen. Det kan ikke afvises, at der kan være tale om en iltpofil, som ikke er tilpas kalibreret, selvom forskellen i volumen er relativt lille. Det er dog afgørende, at bestemmelse af iltsvindsudbredelse ved denne metode er afhængig af god datakvalitet.

5.2 Metode iltsvindsudbredelseskort

Analysen af iltkoncentrationsprofilerne resulterer i 2 dybder for hver prøvetagning, dvs. dybdegrænser for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l. Disse dybdegrænser repræsenterer stationer til et givent tidspunkt, som interpoleres i rummet ved en geostatistisk metode, kaldet Ordinary Kriging, således at der bestemmes en flade (oxyklin) for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l dækkende de indre danske farvande.



Figur 16 Eksempel på predikteret oxyklin for 4 mg/l for iltsvindsudbredelsen i de første to uger af september 2002.

Teorien for Ordinary Kriging vil ikke blive gennemgået her, men der refereres til f.eks. Cressie (1993). Princippet i Ordinary Kriging er, at dybdegrænserne antages at være realisationer af en tilfældig (stokastisk) variabel med en stedafhængig middelværdi og konstant varians. Dybdegrænsen i et vilkårligt punkt kan predikteres ud fra en vægtning af de observerede dybdegrænser, hvor vægtningen er bestemt ud fra en model af den rumlige kovariansstruktur (semivariogrammodel). Til beregning af iltsvindsudbredelse er valgt en simpel og robust lineær model, hvilket reelt betyder, at variansen mellem dybdegrænser vokser lineært med afstanden imellem dem, dvs. at der er meget lille variation i dybdegrænserne indenfor kort afstand og stor variation i dybdegrænserne ved store afstande.

Dybdegrænserne predikteres ved Ordinary Kriging i de samme gridpunkter, som udgør dybdemodellen (Figur 12) og princippet er illustreret i Figur 15, hvor afstanden (vist med pile) angiver vægtningen af de enkelte prøvetagninger. Ordinary Kriging resulterer ofte i glatte flader, hvor dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l ændrer sig glidende mellem prøvetagningerne (Figur 16). Eksemplet viser, at dybdegrænsen for 4 mg/l lå omkring 5-10 m i Limfjorden, Hevring Bugt, Århus Bugt og Smålandsfarvandet, med stigende gradienter ud mod de mere åbne dele, med største dybdegrænser (over 100 m) i det nordøstlige Kattegat.

De predikterede flader for 4 mg/l og 2 mg/l dybdegrænser kombineres efterfølgende med dybdemodellen (Figur 12), således at der potentielt forekommer iltsvind, hvis dybdegrænsen for 4 mg/l ligger over bunden, og kraftigt iltsvind, hvis dybdegrænsen for 2 mg/l ligger over bunden.

5.2.1 Aktuelle iltsvindskort

De 6 iltsvindskort offentliggjort på DMU's hjemmeside (<http://iltrapport.dmu.dk>) blev beregnet ud fra prøvetagninger indenfor 11 dage. Forudsætningen for disse kort er, at bundvandet (oxyklinen) ikke ændrer sig væsentligt over denne periode. Det er vigtigt at pointere, at kortene beskriver situationen i et område for det tidspunkt, hvor prøvetagningerne blev foretaget.

De tidsmæssige variationer i dybdegrænserne for forskellige stationer (*Figur 14*) viser, at denne tidsmæssige tilnærmelse for det meste er rimelig med undtagelse af det sydlige Kattegat og Århus Bugt, hvor ændringer i vindretning og -styrke kan give anledning til store variationer i dybdegrænser indenfor relativt kort tid.

Perioden på 11 dage var nødvendig af hensyn til metoden, idet dybdegrænserne kun kan predikteres, hvis der er iltp profiler i området. Ved at reducere perioden til f.eks. 1 uge ville der være områder uden prøvetagninger, hvor de predikterede dybdegrænser ikke ville være godt bestemt. Det er derfor påkrævet, at der er en tilpas dækning (specielt i yderområderne) med iltp profiler i de indre danske farvande for at kunne beregne iltsvindsudbredelsen.

For 2 ud af de 6 iltsvindskort var der ikke iltp profiler indenfor de sidste 11 dage på flere af åben vand stationerne i Arkona havet, sydlige bælthav og nordlige Kattegat. Dybdegrænser for 10 stationer i yderområderne blev til disse kort estimeret ud fra variationer i de mere kystnære stationer, og for stationerne i det nordlige Kattegat sat til de maksimale værdier (pkt. 5) svarende til intet iltsvind.

Metoden til beregning af de aktuelle iltsvindskort vil kunne forbedres, såfremt der inddrages forhåndsviden om oxyklinens placering (apriori viden). De aktuelle dybdegrænser bestemt ud fra iltp profilerne vil således blive brugt til at tilpasse den forventede placering af oxyklinen til målte data.

5.2.2 Retrospektive iltsvindskort

Der blev efter de 6 iltsvindskort lavet en retrospektiv analyse af iltsvindsudbredelsen i hele perioden fra slutningen af juni til december. Til disse kort blev der fremskaffet yderligere data fra tyske og svenske kilder, og dybdemodellen (*Figur 12*) blev udvidet med data fra DHI til at omfatte hele Kattegat, de indre farvande og en større del af Arkona bassinet.

Iltp profiler fra hele 2002 (4923 profiler) blev bearbejdet efter ovenstående algoritme, og efterfølgende blev dybdegrænserne for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l interpoleret i tid til ugentlige data for alle faste overvågningsstationer (danske NOVA stationer, og hyppige svenske og tyske stationer). Andre stationer, som i perioder blev samlet regelmæssigt (typisk iltsvindsstationer), blev også interpoleret i tid, hvis der kun var 2 uger mellem prøvetagninger. Ved hjælp af tidslig interpolation kunne der opnås mellem 100 og 200 ugentlige dybdegrænser, som derpå blev spatielt interpoleret ved Ordinary Kriging. Med denne metode blev der produceret kort til beskrivelse af

iltsvindsudbredelsen startende fra uge 26 frem til uge 52 (før uge 26 er der intet væsentligt iltsvind).

Den tidlige interpolation tager delvist højde for de mere dynamiske ændringer i dybdegrænserne i det sydlige Kattegat og Århus Bugt, men denne metode kan ikke benyttes til at beskrive den aktuelle situation.

5.3 Beskrivelse af iltsvindet 2002

Iltsvindet i 2002 var exceptionelt med formentligt den største hidtil registrerede udbredelse. Hændelsen blev beskrevet løbende ved 6 aktuelle kort på DMU's hjemmeside og efterfølgende ved en retrospektiv analyse af data.

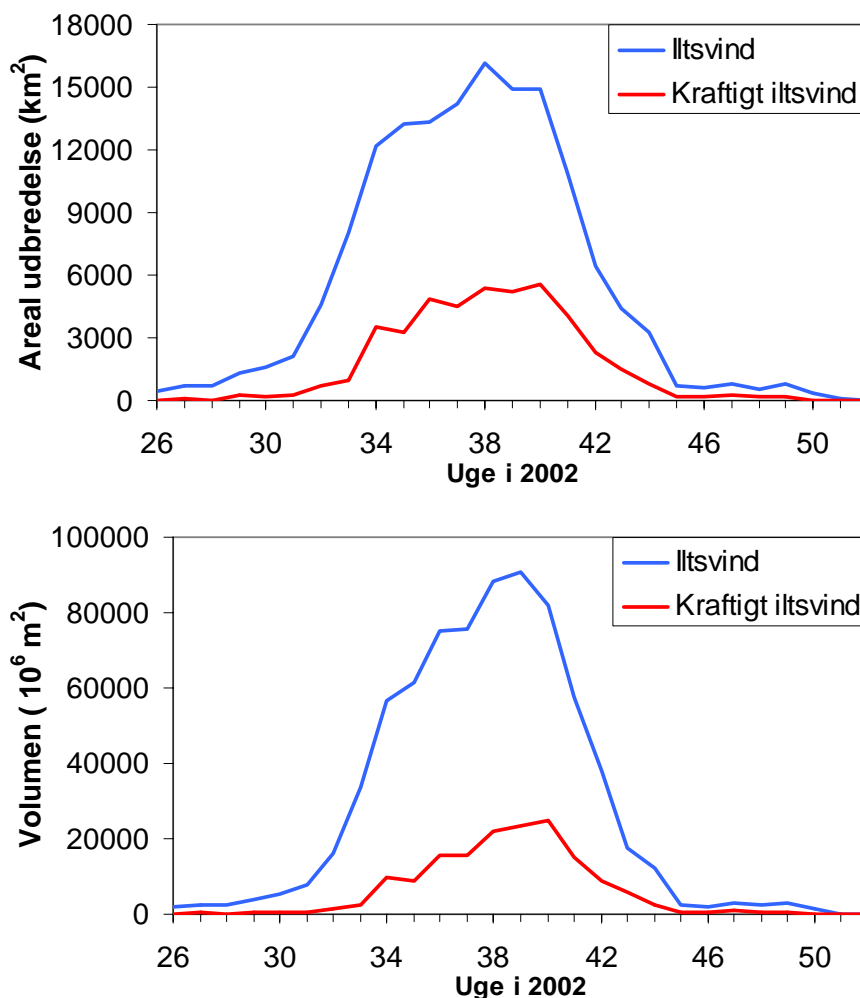
5.3.1 Iltsvindskort på Internettet

De 6 aktuelle iltsvindskort, som blev publiceret på DMU's hjemmeside i efteråret 2002, er ikke vist i denne rapport, men kan ses på <http://iltrapport.dmu.dk>. Det første kort dækkede slutningen af august (uge 34+35), hvor iltsvindet allerede var udbredt i store områder af bælthavet og det sydlige Kattegat. Det næste kort dækkede de to første uger af september (uge 36+37), hvor specielt området med kraftigt iltsvind blev større. Det efterfølgende kort for slutningen af september (uge 38+39) viste en uændret situation i forhold til begyndelsen af september. I begyndelsen af oktober (uge 41+42) var iltsvindet på retur og arealudbredelsen reduceret til det halve. Kortet for slutningen af oktober viste yderligere reduktioner i arealudbredelse, foruden at kortet afspejlede et interessant dynamisk fænomen, idet en kraftig vind fra vestlig retning resulterede i at iltsvindet i det sydøstlige Kattegat blev transporteret vestpå til de nordlige bælthav og Sejerø-bugten. Det sidste kort for midten af november (uge 46+47) viste iltsvind begrænset til det sydlige Lillebælt. Samtidig med de aktuelle iltsvindskort blev der lavet en kvalitativ prognose for udviklingen, som baserede sig på vind-forholdene fra DMU's og DMI's vejrudsigt i de følgende 5-7 dage.

5.3.2 Iltsvindet uge for uge 2002

Udbredelsekort uge for uge (uge 26 til 52) er vist i *Appendiks B*. Inddragelsen af yderligere data gjorde det muligt at analysere iltsvindet i 2002 fra start til slut, hvor datagrundlaget til de aktuelle kort (efteråret 2002) ikke tillod vurderinger af situationen før midt i august.

Iltsvindet startede i juli i de områder, Limfjorden, sydlige Lillebælt og Fehmern Bælt, hvor der sædvanligvis observeres iltsvind. Situationen udviklede sig kraftigt i august, hvor store områder var dækket af iltsvind (*Figur 17*). Iltsvindet var værst i september, hvor ca. 15000 km² var dækket af iltsvind og ca. 5500 km² var dækket af kraftigt iltsvind. I oktober aftog iltsvindet således at der ved udgangen af oktober var under 20% tilbage af septembers iltsvind. I november og december forsvandt de sidste rester af iltsvindet gradvist.



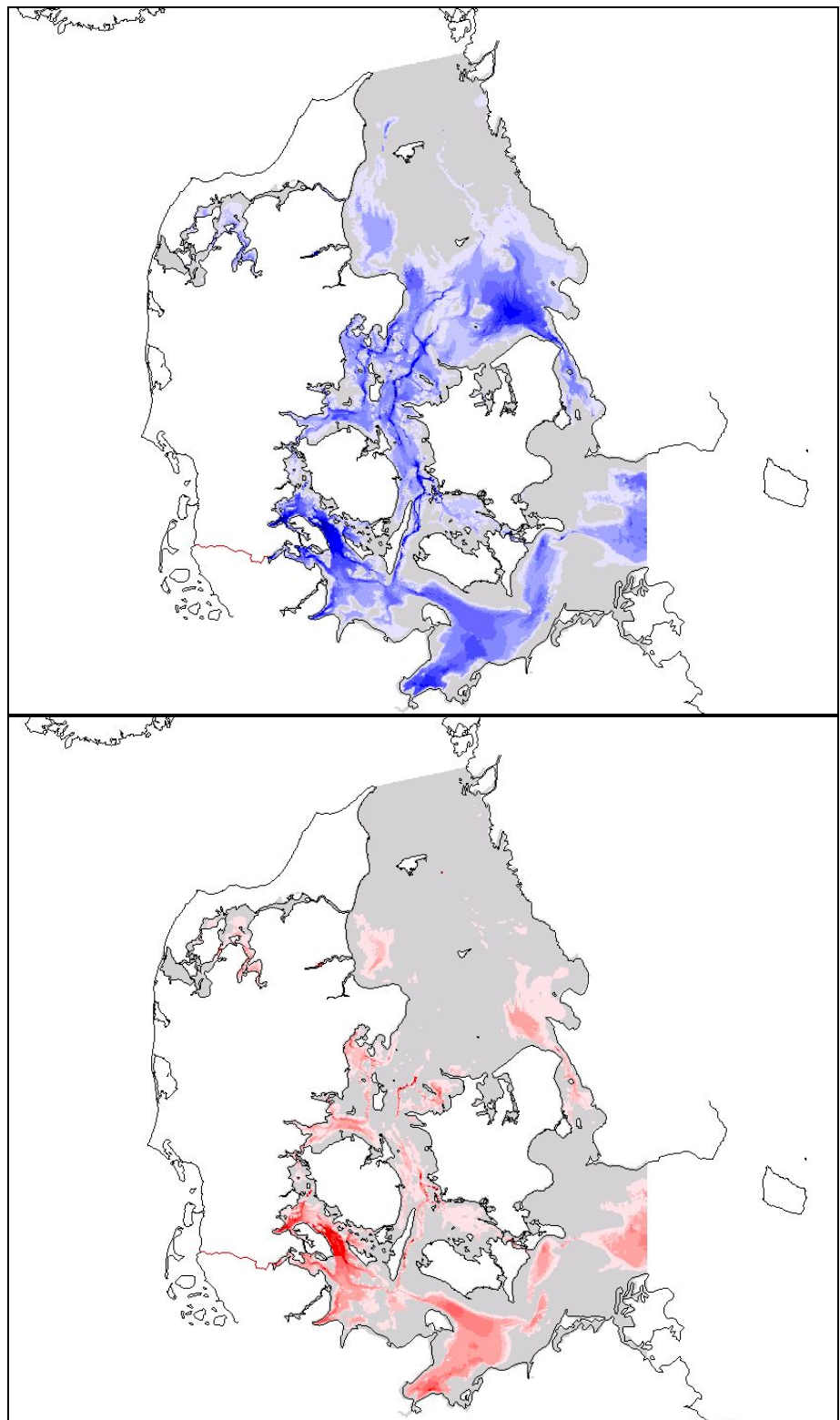
Figur 17 Areal dækket og volumen af iltsvind og kraftigt iltsvind i anden halvdel af 2002. Beregnet for de indre danske farvand fra Kattegat til tærsklerne ved Drogden og Darss, dvs. indeholder ikke Arkona havet.

De tilsvarende vandvolumener med koncentrationer under henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l viste samme tidslige udvikling, således at vandvolumenet med iltsvind udgjorde mellem 75 og 90 km³ og vandvolumenet med kraftigt iltsvind udgjorde mellem 15 og 25 km³ i september.

Iltsvindet i 2002 var langstrakt og store områder blev udsat for lave iltkoncentrationer i længere perioder. Den akkumulerede effekt viste, at specielt store områder i det sydlige Kattegat, nordlige bælt hav, Lillebælt og Fehmarn Bælt var udsat (Figur 18). I alt var ca. 20.500 km² og 9.000 km² udsat for iltsvind og kraftigt iltsvind, hvilket svarer til henholdsvis 47% og 21% af det totale areal.

5.3.3 Prognoser for udviklingen i iltsvind

DMU lavede til de 3 sidste interaktive iltsvindskort en kvalitativ prognose for udviklingen baseret på vindforholdene i de følgende 5-7 dage. Den første prognose for perioden efter d. 18. oktober forudsatte langsomt aftagende udbredelse. Iltsvindet viste sig at aftage noget hurtigere end forventet i Femer Bælt, hvor det stort set forsvandt i de efterfølgende uger. Den anden prognose (1. november) forudsatte også langsomt aftagende udbredelse, som viste sig at aftage hurtigere



Figur 18 Eksponering til iltsvind (øverst) og kraftigt iltsvind (nederst) afbildet som antal uger med koncentrationer under henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l. Farvekodning angiver kraftigere eksponering (flere uger).

end forventet. Den tredje prognose (22. november) forudsatte en ganske svag forbedring af iltforsværelsen i det sydlige Lillebælt, hvilket var det eneste større område med iltsvind tilbage. Dette viste sig at være rigtigt for den efterfølgende periode. De kvalitative prognoser var lidt forsigtige med hensyn til iltsvindets aftagen. Der blev ikke lavet nogen prognoser for perioden, hvor iltsvindet tog til.

5.4 Metodens nøjagtighed og robusthed

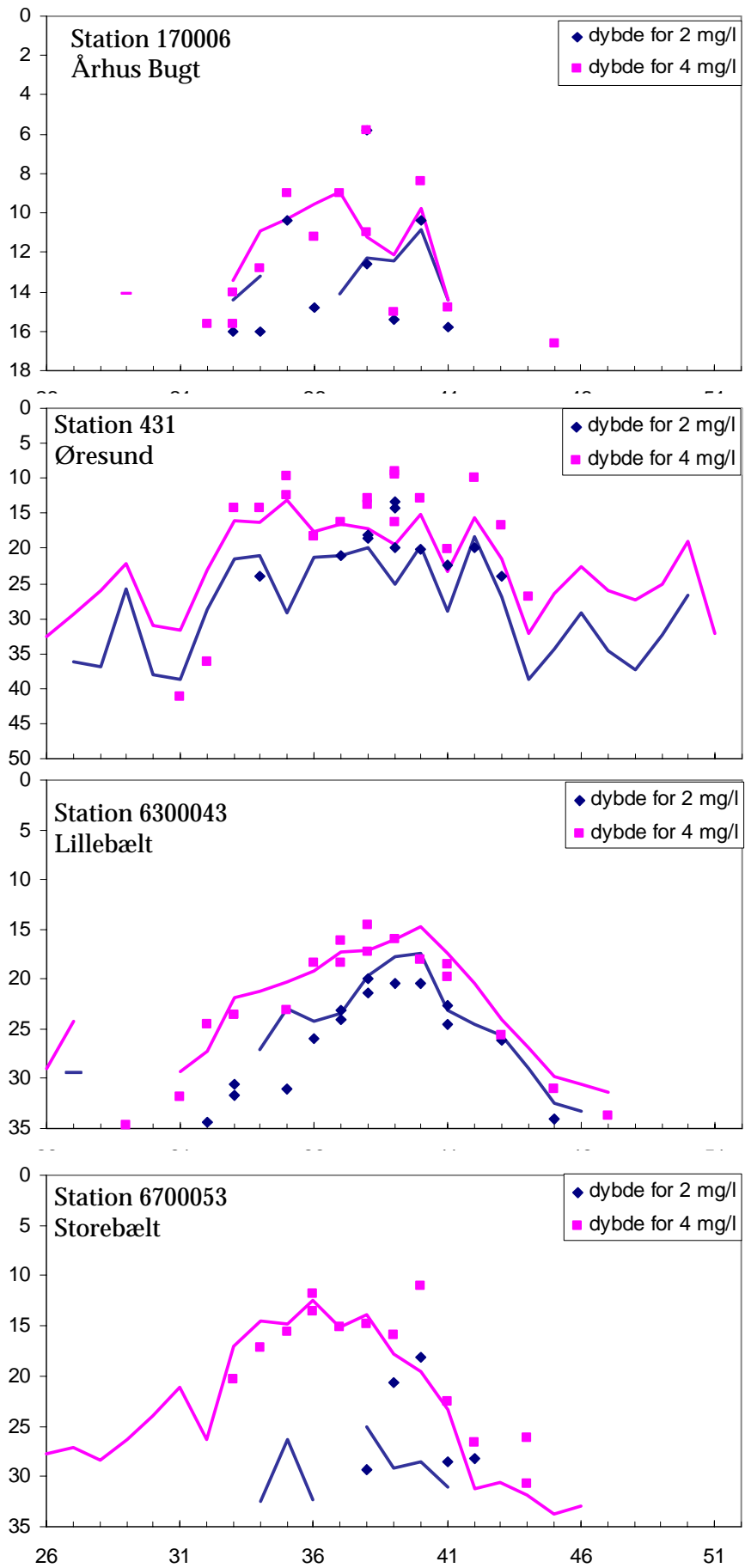
Metoden forudsætter en udbredt og repræsentativ dækning med prøvetagningsstationer for at interpolationen kan vise udbredelsen af iltsvind. Da metoden er drevet udelukkende af måledata, vil en reduktion i datamængden påvirke resultatet.

Den angivne metode vil per definition beskrive dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l nøjagtigt på stationer, hvor der er iltsvind i vandfasen, såfremt data ikke er fejlbehæftede. Metodens nøjagtighed og robusthed kan derfor ikke vurderes ved at lade valideringsdata indgå i beregninger. Der er derfor udvalgt 4 stationer (*Figur 14*) med mange prøvetagninger fordelt over forskellige områder i de indre farvande. Data fra disse stationer er efterfølgende udeladt, og dybdegrænserne for henholdsvis 4 mg/l og 2 mg/l er derefter bestemt for det nærmeste grid-punkt. Dette kaldes krydsvalidering.

I Århus Bugt er ændringerne i oxyklinen, som tidligere beskrevet, relativt dynamiske, men metoden beskriver dybdegrænserne med få meters nøjagtighed, når der forekommer iltsvind (*Figur 19*). De observerede dybdegrænser på omkring 6 og 12 m i uge 38 stammer fra to prøvetagninger med to dages mellemrum og illustrerer, hvordan skiftende vindretninger kan få oxyklinen til at bevæge sig kraftigt indenfor kort tid. Metoden beskriver kun iltsvind ned til den definerede dybde på 15,6 m for det nærmeste grid-punkt. For dybdegrænser nær bunden kan der være forskel på om metoden og målinger viser iltsvind, men disse forskelle har ikke den store betydning for bestemmelse af arealudbredelsen.

For stationerne i Øresund, Storebælt og tildels Lillebælt er de predikterede dybdegrænser knap så gode i begyndelsen og slutningen af perioden, hvorimod præcisionen er god (for det meste indenfor 2 m afvigelse) i perioden august, september og oktober, hvor dybdegrænserne lå højt i vandsøjlen. Der er to grunde til, at metoden ikke beskriver dybdegrænserne så godt i starten og slutningen. For det første er antallet af stationer til at bestemme dybdegrænserne med lavt i forhold til perioden med udbredt iltsvind. For det andet repræsenterer disse 3 stationer bathymetriske huller, idet de nærmeste stationer alle har mindre vanddybder. Dette er specielt udtalt for stationen i Øresund, hvor alle de omgivende stationer har dybder under 20 m og station 431 er 51 m dyb. Disse meget specielle dybdeforhold vil altid resultere i, at metoden predikterer iltsvind i hullet, hvis der ikke findes en repræsentativ station for hullet. Dette illustrerer vigtigheden i forudsætningen om, at der foretages prøvetagninger på de dybeste lokaliteter i de indre farvande. På stationen i Storebælt gør det samme fænomen sig gældende for perioden frem til august, hvorefter nye data fra DMU's nærliggende station 939 resulterer i rimelige prediktioner af dybdegrænserne.

Metodens robusthed overfor reduktioner i data-grundlaget er undersøgt ved at fjerne et antal tilfældige stationer inden den rumlige interpolation beregnes. Til at illustrere dette er valgt uge 40, hvor der var udbredt iltsvind og mange stationer, som derefter er blevet reduceret med ca. 5%, 10%, 25% og 50% (*Figur 20*). En tilfældig reduktion



Figur 19 Dybdegrænser i vandsøjlen bestemt fra data (punkter) og model (linier) for uge 26-52 i 2002. Huller i linier markerer perioder uden predikteret iltvind.

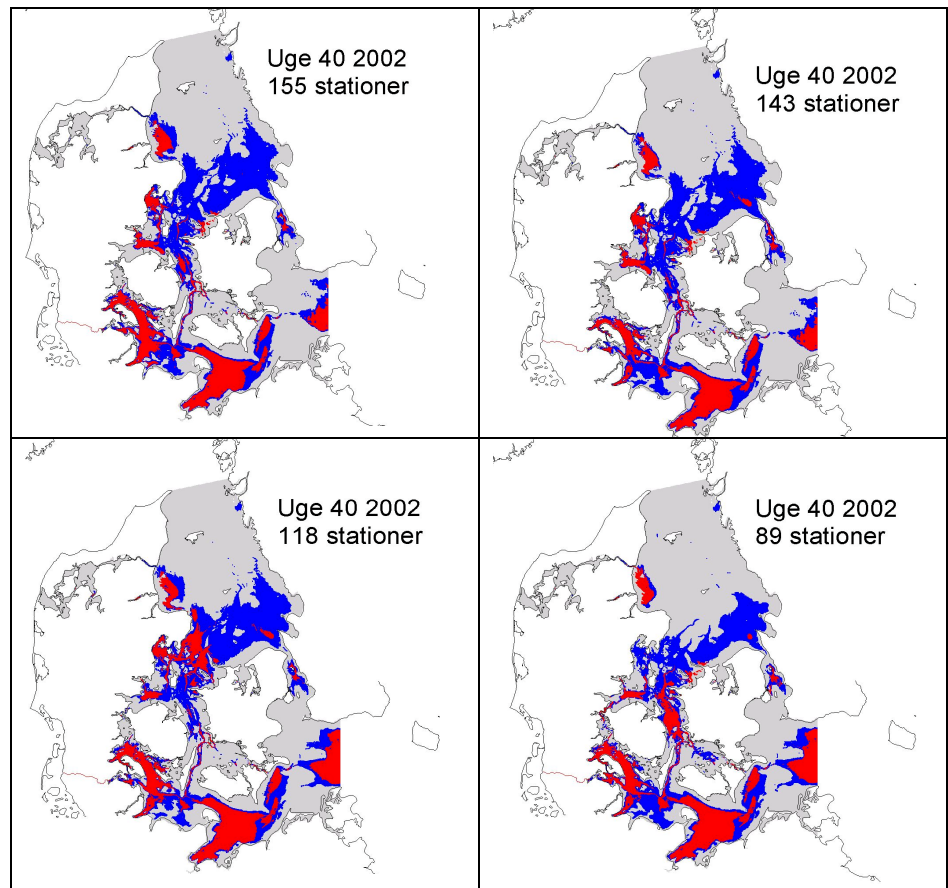
på 5-10% af stationer har umiddelbart kun en marginal effekt på de overordnede iltsvindskort, hvorimod der sker en ændring i det sydvestlige Kattegat ved en tilfældig reduktion på ca. 25%. Dette skyldes i høj grad, at for dette kort mangler informationen fra station 925 ved Sjællands Odde, som er repræsentativ for hele dette område. Denne station er imidlertid med på kortet med ca. 50% reduktion i antallet af stationer. Derimod mangler station 444 i Arkona havet, som er repræsentativ for dette område, på kortene for både 25% og 50% reduktion i antallet af stationer.

Sammenfattede viser dette, at det ikke er antallet af stationer, som er afgørende for at generere et repræsentativt iltsvindskort. Derimod er det afgørende, at der er foretaget prøvetagninger på repræsentative stationer, hvorfra der kan ekstrapoleres. For det overordnede iltsvindskort vil DMU's stationer sammen med amtsstationer i smålandsfarvandet, Lillebælt, Århus Bugt og Limfjorden kunne give en rimelig beskrivelse, idet disse stationer vil være arealmæssigt repræsentative for størstedelen af de indre farvande. Til beskrivelse af iltvindssituationen i mindre specifikke kystnære områder og fjorde er det nødvendigt med flere repræsentative stationer her for at kunne give et detaljeret billede.

5.5 Sammenfatning af DMU's empiriske model

Denne metode beskriver dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l ved rumlig interpolation mellem prøvetagninger. Metoden forudsætter en udbredt og repræsentativ dækning med målestationer. Da metoden er rent empirisk og udelukkende baserer sig på måledata, er det alt-afgørende for metodens egnethed, at dette er opfyldt. Dette gælder især for de åbne farvande, hvor afstandene mellem stationer er høj og prøvetagningsfrekvensen er lav. For 2002 giver metoden således de mest pålidelige resultater i månederne august, september og oktober, hvor der blev foretaget mange prøvetagninger og størstedelen af dybdegrænserne for 4 mg/l og 2 mg/l blev bestemt i vandsøjlen. Iltsvindsudbredelsen udenfor denne periode er mindre vel bestemt og beror i højere grad på forudsætning om stor repræsentativitet af de givne målestationer.

Den geostatistiske metode beskriver dybdeflader for 2 mg/l og 4 mg/l, som lokalt tilpasses prøvetagningerne. Såfremt der ikke er nogen prøvetagninger i et område, vil dybdefladerne tilnærme sig midten af alle prøvetagninger i hele området. Metoden kan forbedres og gøres mere robust, hvis de geostatistiske metoder udvides til at indeholde en komponent for de forventede dybdegrænser afhængig af sted (metode kaldet Universal Kriging). De forventede dybdegrænser (apriori dybdegrænser) tilpasses derefter de aktuelle dybdegrænser (aposteriori dybdegrænser). Dette vil resultere i beregnede iltsvindsudbredelser, som er mindre afhængige af data, og som samtidig vil kunne tilpasses de aktuelle data i de områder, hvor der er målt.



Figur 20 Illustration af robusthed overfor reduktioner i antallet af stationer. Iltsvindsudbredelsen baseret på alle 161 stationer er vist i *Appendiks B*. Kortene viser fra højre mod venstre, øverst til nederst en reduktion i antallet af stationer brugt til den rumlige interpolation på ca. 5%, 10%, 25% og 50%.

6 Sammenligning af de to modeller

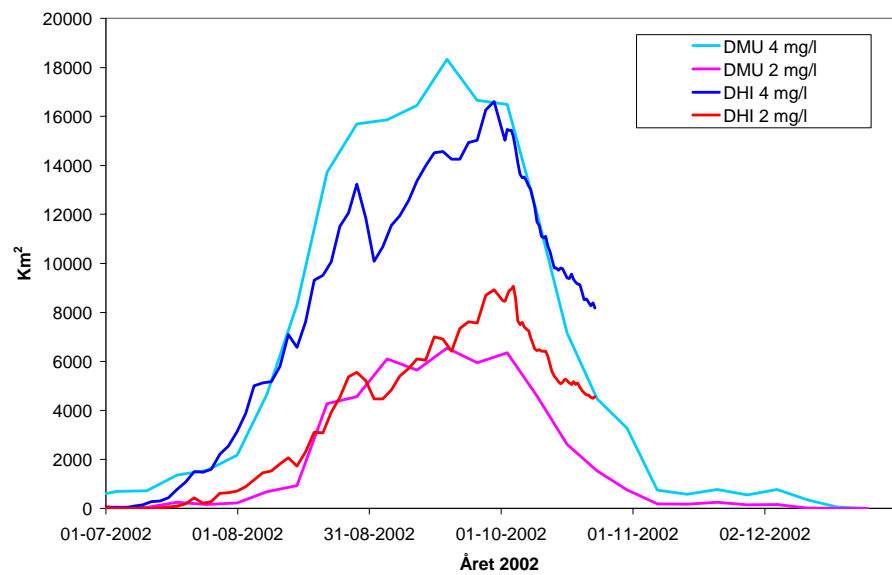
De to model tilgange til beskrivelse af iltsvindsudbredelse har hver deres fordele og ulemper. Vandudsigten er baseret på fysiske og biologiske procesbeskrivelser, som efterfølgende simuleres numerisk med en forholdsvis grov rumlig opløsning. På grund af modellens indbyggede årsagssammenhæng kan DHI's model udover at beskrive selve iltsvindsudbredelsen også benyttes til at trække en masse yderligere informationer ud af, og der kan beregnes scenarier for forskellige kombinationer af belastning og klima forhold. Modellen har ikke en løbende kobling til måledata og derfor kan der til tider være problemer med at beskrive de aktuelle iltkoncentrationer fuldstændigt. DMU's empiriske metode forudsætter et stort data materiale af iltprofiler med relativ god opløsning i både tid og rum. Metoden giver en god beskrivelse af iltsvindsudbredelsen, når der er mange og repræsentative stationer, men er meget afhængig af disse data og derfor ikke robust overfor store udfald i data. Endvidere beskriver denne metode kun iltsvindsudbredelse.

Det beregnede areal påvirket af iltsvind i anden halvdel af 2002 viser, at de to modeller giver sammenlignelige resultater (*Figur 21*). Den største forskel er, at DMU's model viser en næsten uændret situation (eller ganske svag stigning) i september, hvorimod DHI's model viser en stigende udvikling frem til begyndelsen af oktober. Resultaterne er model resultater og derfor behæftet med usikkerheder, men da begge resultater er baseret på uafhængige modeller styrkes konklusionen af et rekord stort iltsvindsareal på i størrelsesordenen 16.000-18.000 km².

De enkelte ugekort for iltsvindsudbredelsen i *Appendiks A* og *B* viser, at den overordnede forskel mellem modelresultaterne ikke er så stor. Det er ikke muligt at foretage sammenligninger på mindre områder, da den rumlige opløsning i DHI's model er for høj til en sådan analyse. Derfor er kun vurderet forskelle mellem de to model resultater for større områder.

Begge modeller viser udbredt iltsvind i det sydlige bælthav fra ca. uge 32 og frem til uge 44. Efter uge 44 er iltsvindet ifølge DMU's model meget begrænset, hvorimod der stadig er udbredt iltsvind ifølge DHI's model i de dybereliggende områder i Det Sydfynske Øhav og Mecklenburger Bugten. En del af dette iltsvind forbliver frem til midt i december, hvilket ikke understreges af DMU's model. Måledata fra uge 46, hvor DMU gennemførte sit sidste ilttogt, viste kun iltsvind på stationer i det sydlige Lillebælt inklusiv Flensborg og Åbenrå Fjord, i Sejerø-bugten, ved Sjællands Odde samt Mariager Fjord. Måledata kan derfor ikke bekræfte det iltsvindet efter uge 44 beregnet med DHI's model. Denne afvigelse mellem model og målte data tilskrives blandt andet at opblandingen i den fysiske del af DHI's model i den periode ikke beskrives tilstrækkeligt som følge af dels manglende præcision i vindfelterne fra de meteorologiske tvangsfunktioner.

Iltsvindspåvirket areal



Figur 21 Sammenligning af modelresultater for udbredelsen af iltsvind (blå farver) og kraftigt iltsvind (røde farver) med DHI's og DMU's modeller. Arealudbredelsen er beregnet for hele området skitseret i Figur 12.

En anden væsentlig forskel er, at DMU's model beregner et udbredt iltsvind i det sydøstlige Kattegat fra uge 30 og frem til uge 43, et forløb som ikke er reflekteret i DHI's model. Station 921, som ligger ud for Kullen, station 922, som ligger nord for Hesselø, og station 418, som ligger ved Lysegrund, viser iltsvind på DMU's og SMHI's togter fra uge 34 til uge 42.

Der er også forskelle i det beregnede iltsvind for det vestlige Kattegat omkring Dokkedal. DHI's model beregner iltsvind fra uge 31 frem til uge 41, hvorimod DMU's model viser iltsvind fra uge 33 frem til uge 40, hvilket stemmer overens med de hyppige målinger på Nordjyllands Amt station 4410. Der er altså en lille forskel i tidspunktet for iltsvindets begyndelse og afslutning i dette område.

DMU's model giver pr. definition en god beskrivelse af måledata, men det er altafgørende at disse er repræsentative for det pågældende område. Endvidere skal det også erkendes, at måledata kan være behæftet med usikkerhed, hvilket derved vil påvirke resultaterne fra DMU's model.

Opløsningen i de to modeller er meget forskellig, idet DHI's model har en opløsning på 3 sømil og DMU's model har en opløsning på 400 m. Dette betyder, at DHI's model i den nuværende konfiguration ikke kan beskrive iltsvindsforholdene i de kystnære områder og fjorde detaljeret. Er dette målet kan lignende model systemer tilpasses lokale områder med en højere opløsning, således som det allerede er gjort for Århus Bugt. I dette tilfælde benyttes den overordnede Vandudsiget til at beregne randværdier til den lokale model.

Begge modeller har et større eller mindre behov for måledata for at kalibrere/estimere iltsvindsudbredelsen. Databehovet er størst for DMU's model, men afhænger desuden af hvilken præcision der ønskes.

7 Konklusion

På grund af det kraftige iltsvind i efteråret 2002 blev iltsvindsrapporteringen intensiveret ved øget brug af modeller, og der blev herigennem opnået erfaring med både de deskriptive og prædiktive sider af iltsvindsmodellerne. To forskellige typer af modeller til beskrivelse af iltsvind er præsenteret og sammenlignet i denne rapport.

DHI's model har en styrke i den fysiske og biologiske beskrivelse af årsagssammenhænge og kan derfor operationelt forudsige udviklingen indenfor en begrænset tidshorisont (4-5 dage) og bestemme vigtige rater af betydning for forståelse af iltsvindets opståen og udvikling. Den komplekse modelstruktur gør imidlertid afviklingen beregningskrævende, og den manglende kobling til måledata kan til tider resultere i afvigelser fra måledata.

DMU's empiriske model giver en god beskrivelse af de aktuelle forhold i kraft af den stærke kobling til de målte iltkoncentrationer, men modellen er meget afhængig af input data og indeholder ikke kvantitative aspekter hvormed udviklingen kan prædikteres på basis af ændringer i hovedsageligt meteorologiske forhold. Der kan udarbejdes kvalitative prognoser for udviklingen af iltsvind på basis af vejrudsigten.

De to tilgangsvinkler til iltsvindsmodellering komplementerer imidlertid hinanden godt. DMU's empiriske model har den tætte kobling til data, men indeholder ikke konkret procesviden, som kan benyttes til at gøre modellen mere robust overfor manglende data. DHI's model indeholder matematiske beskrivelser af processerne, men har ikke den tætte kobling til måledata, som giver præcision i beskrivelsen.

Data behovet til begge modeller afspejler i stor grad hvilken præcision og rumlig opløsning, som man ønsker. Fra et overordnet synspunkt vil iltsvindsudbredelsen i de indre farvande kunne beskrives ved et antal repræsentative stationer, hvorimod en lokal detaljeret beskrivelse vil kræve flere stationer i det pågældende område. Generelt vil DMU's model kræve væsentlig flere målepunkter end DHI's model, men ingen af modellerne vil kunne undvære måledata.

Pålidelige og præcise kvantitative prognoser for udviklingen i iltsvind forudsætter en god beskrivelse af de aktuelle forhold samt en god beskrivelse af den meteorologiske påvirkning af iltforholdene. DMU's model giver en god beskrivelse med tæt kobling til måledata, og DHI's model indeholder koblingen af vinden til vandbevægelser. Der vil derfor kunne produceres forholdsvis præcise kvantitative kort-tids prognoser for iltsvindsudbredelsen ved at benytte DHI's model til at beregne udviklingen på basis af DMU's data-baserede aktuelle beskrivelse af udbredelsen. Dette er tilsvarende de meteorologiske modeller, der i dag assimilerer observerede data løbende. En af de overordnede forskelle mellem vejrudsigter og vandudsigter er dog datatilgængeligheden. Datatætheden er væsentlig større på land end i vandet og derfor er det oplagt at benytte en metode som DMU's mo-

del til at udvide informationerne fra punktobservationerne til større områder.

Det anbefales derfor, at der arbejdes videre med at integrere de to modeller, således at der opnås en robust model indeholdende den vigtigste procesviden som løbende tilpasses de aktuelle målinger.

8 Referencer

Andersson, L. & Rydberg, L. 1988: Trends in nutrient and oxygen conditions within the Kattegat: Effects of local nutrient supply. – *Estuarine Coastal Shelf Science* 26:559-579.

Beck, M.B. 1987: Water Quality Monitoring: A Review of the Analysis of Uncertainty. – *Water Resources Research* 23(8): 1393-1442.

Casti, J.L. 1977: Dynamical systems and their application – linear theory. – Academic Press, New York.

Chui, C.K. & Chen, G. 1988: Linear systems and optimal control. Springer-Verlag, Berlin.

Cressie, N.A.C. 1993: Statistics for spatial data. Revised Edition. Wiley.

DHI Water and Environment 2000: MIKE 3: Environmental Hydraulics. DHI Software User Guide, Documentation and Reference Manual.

Edelvang, K., Erichsen, A.C., Alvarez-Berastegui, D., Bundgaard, K., Kaas, H. & Jørgensen, P.V. (In prep.). Fytoplankton in Danish Coastal Waters – An Operational Approach involving Remote Sensing and 3D modelling.

Erichsen, A.C., Jensen, H.R., Sørensen, J.T. & Falk, A.K. 2001: Global Assimilation Applied to Modelling of European Shelf Seas (GANES). Technical Report. DHI, project no. 80010.

Erichsen, A.C. & Rasch, P.S. 2001: Two- and Three-dimensional Model System Predicting the Water Quality of Tomorrow. – In: Spaulding, M.L. (Ed.); Proceedings of the 7th Int. Conf. on Estuarine and Coastal Modeling. American Society of Civil Engineers, pp.165-184.

Granéli, E., Wallström, K., Larsson, U., Granéli, W. & Elmgren, R. 1990: Nutrient limitation of primary production in the Baltic Sea area. – *Ambio* 19: 142-151.

Hansen, I.S. & Erichsen, A.C. 2002: Baltic Sea – North Sea Transition Area. Environmental Status Year 2000. – DHI, project no. 80057.

Hansen, I.S. & Erichsen, A.C. 2003: Baltic Sea – North Sea Transition Area. Environmental Status Year 2001. – DHI, project no. 80057.

Jakobsen, F. & Ottavi, J. 1997: Transport through the contraction area in the Little Belt. – *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 45(6): 759-767.

Jørgensen, B.B. 1996: Case study – Aarhus Bay. – In: Jørgensen, B.B. & Richardson, K. (Eds.); Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems. – Vol. 52:137-154. Coastal and Estuarine Studies, American Geophysical Union.

Pedersen, F.B. & Møller, J.S. 1981: Diversion of the River Neva. How will it influence the Baltic Sea, the Belts and Kattegat. – *Nordic Hydrology* 12: 1-20.

Pickard, G.L. & Emery, W.J. 1990: Descriptive Physical Oceanography. An Introduction. Antony Rowe Ltd., Chippenham, Wiltshire.

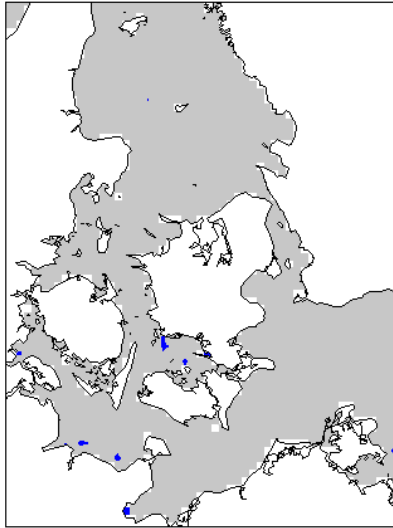
Richardson, K. 1996: Carbon flow in the water column. Case study: The Southern Kattegat. –In Jørgensen, B.B. & Richardson, K. (Eds.); Eutrophication in Coastal Marine Ecosystems Vol. 52: 95-114. Coastal and Estuarine Studies, American Geophysical Union.

Westernhagen, H.v. & Dethlefsen, V. 1983: North sea oxygen deficiency 1982 and its effects on the bottom fauna. – Ambio 12: 264-266.

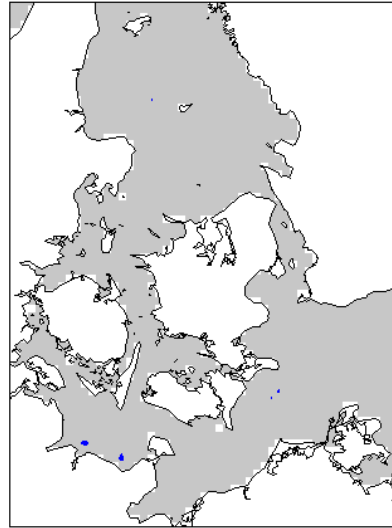
[tom side]

Appendiks A: Tidsmæssig udvikling i iltsvindet 2002 ved Vandudsigten

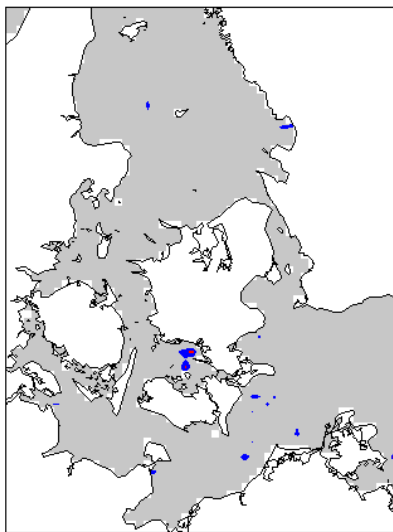
Udbredelseskortene nedenfor viser den ugentlige udbredelse af minimum iltkoncentration beregnet ved DHI's MIKE EU model. Områder med iltsvind og kraftigt iltsvind er vist med henholdsvis blå og rød farve.



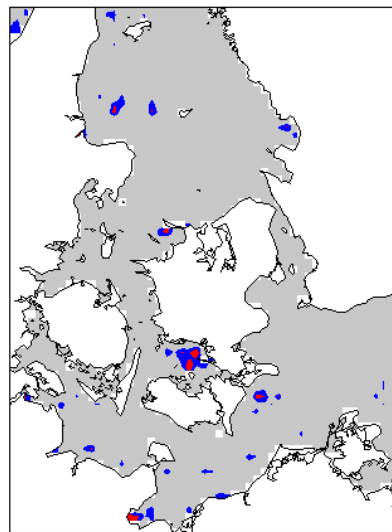
Uge 26
2002



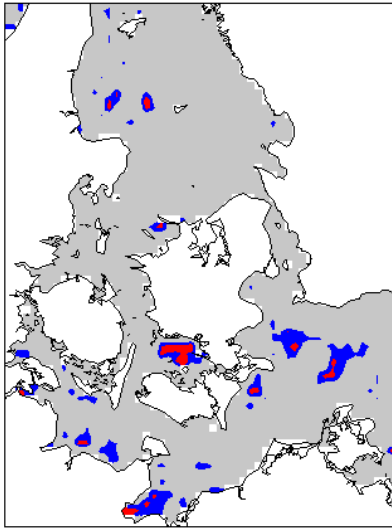
Uge 27
2002



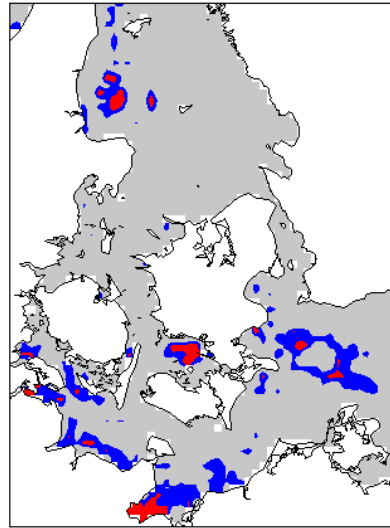
Uge 28
2002



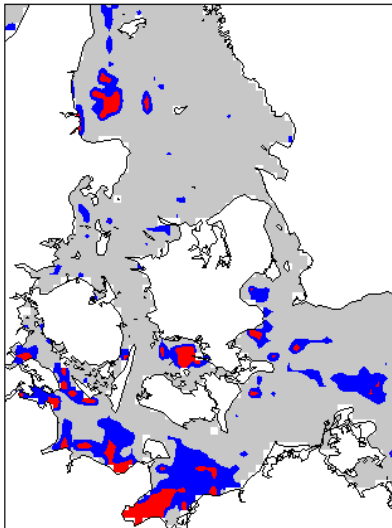
Uge 29
2002



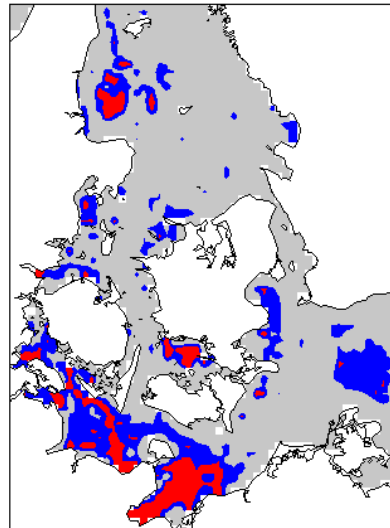
Uge 30
2002



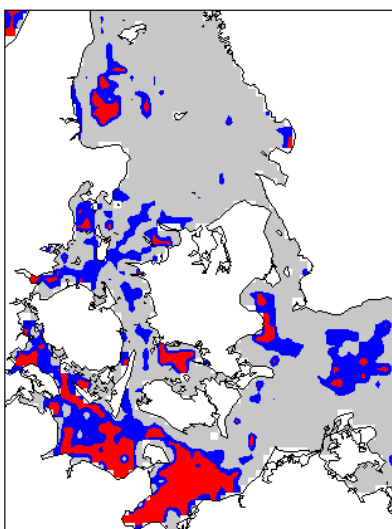
Uge 31
2002



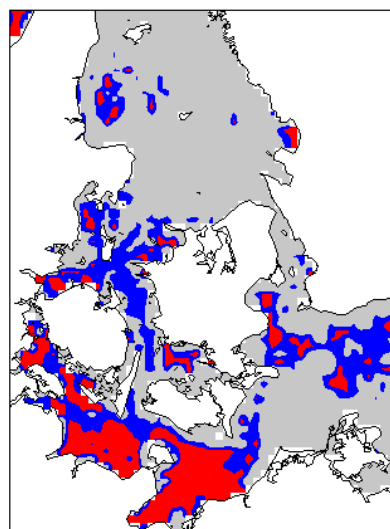
Uge 32
2002



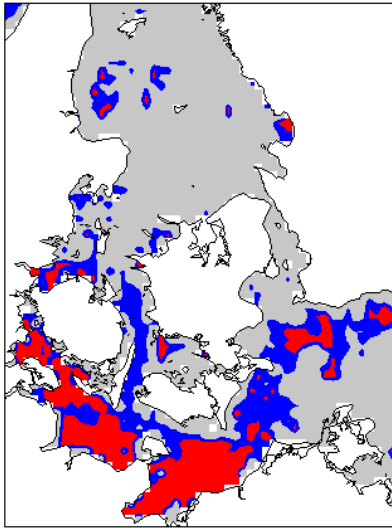
Uge 33
2002



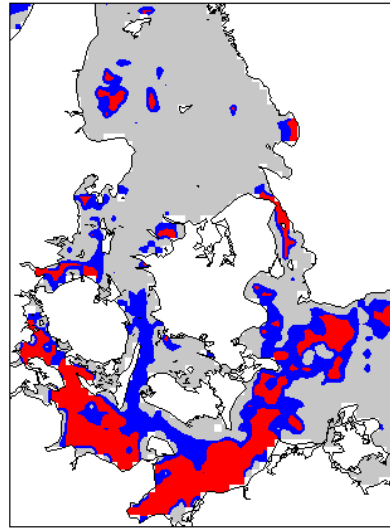
Uge 34
2002



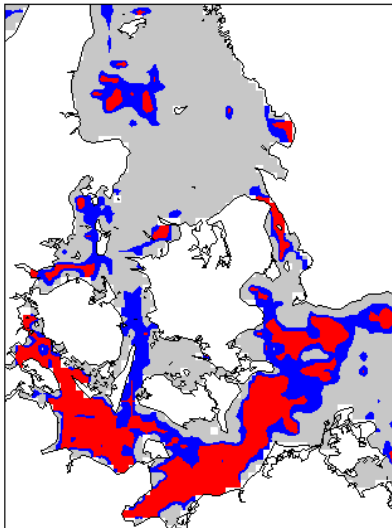
Uge 35
2002



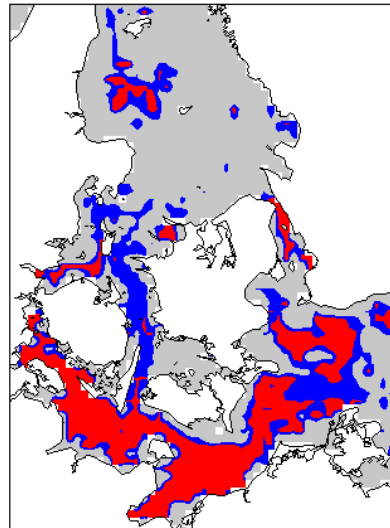
Uge 36
2002



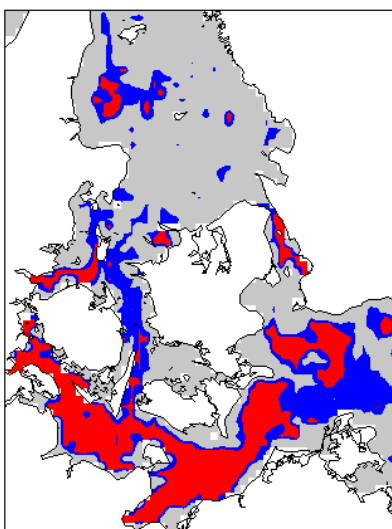
Uge 37
2002



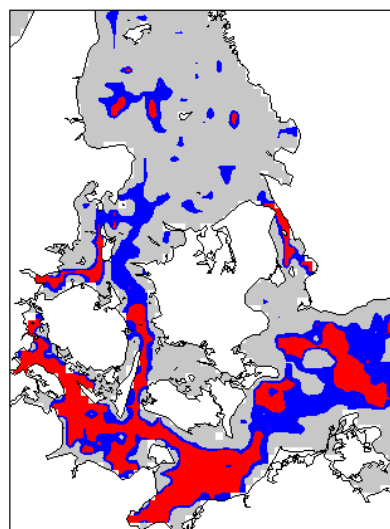
Uge 38
2002



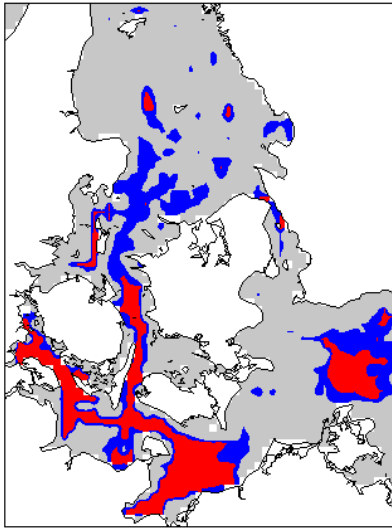
Uge 39
2002



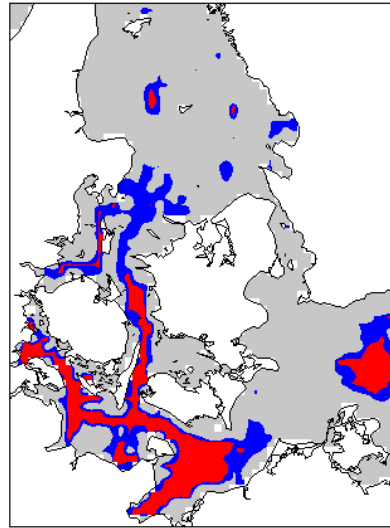
Uge 40
2002



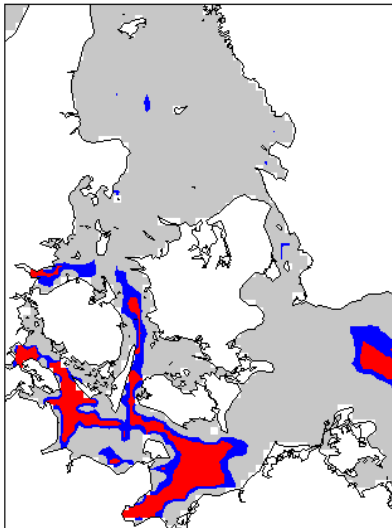
Uge 41
2002



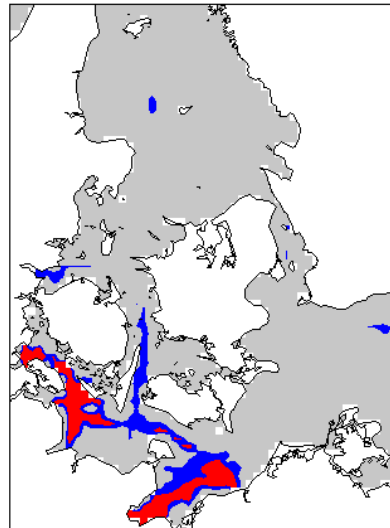
Uge 42
2002



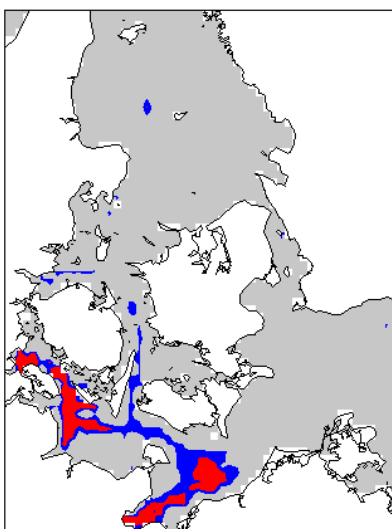
Uge 43
2002



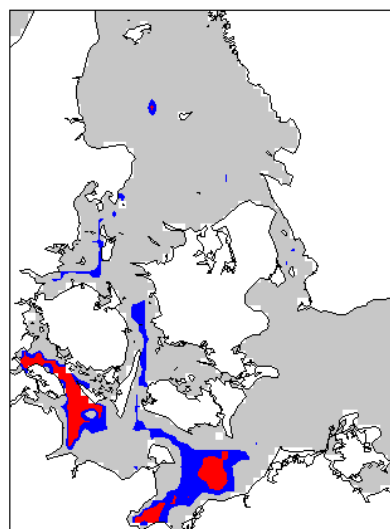
Uge 44
2002



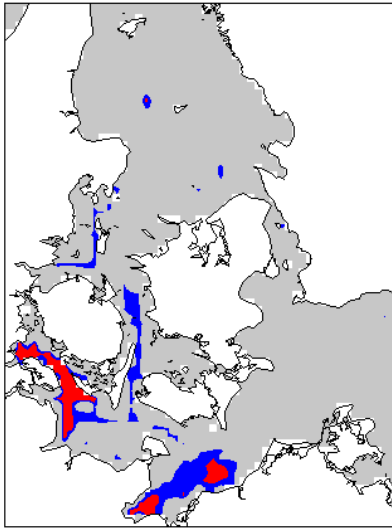
Uge 45
2002



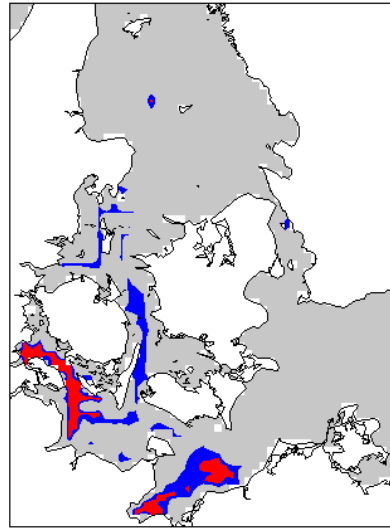
Uge 46
2002



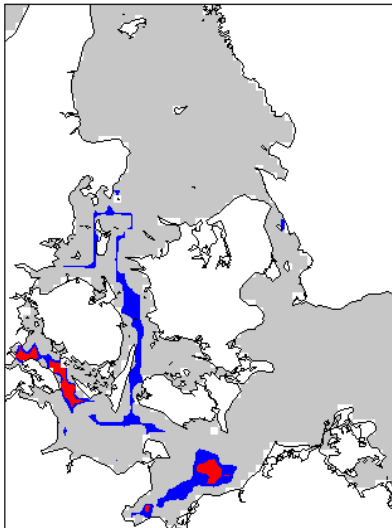
Uge 47
2002



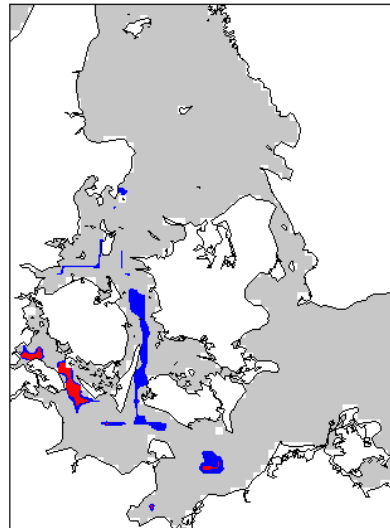
Uge 48
2002



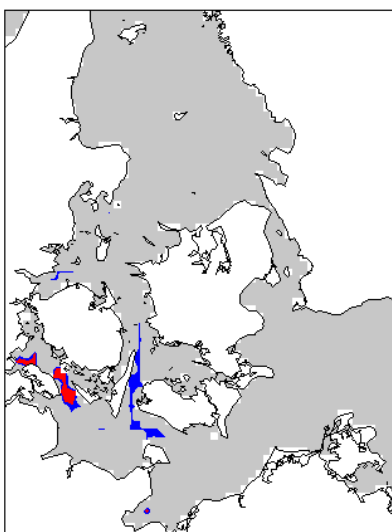
Uge 49
2002



Uge 50
2002



Uge 51
2002

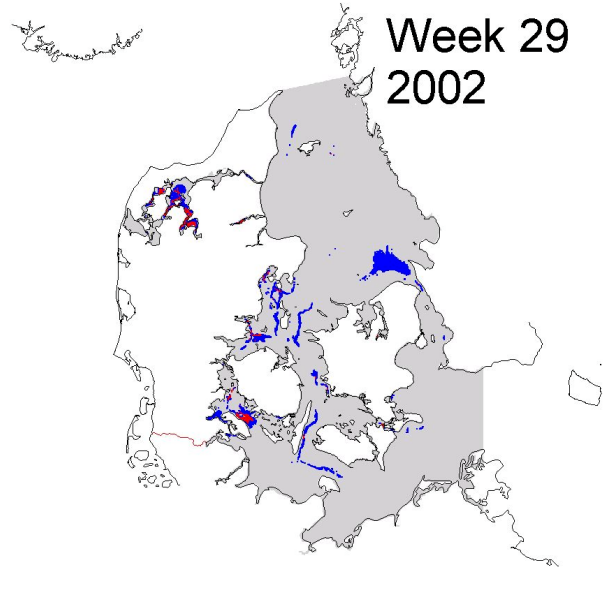
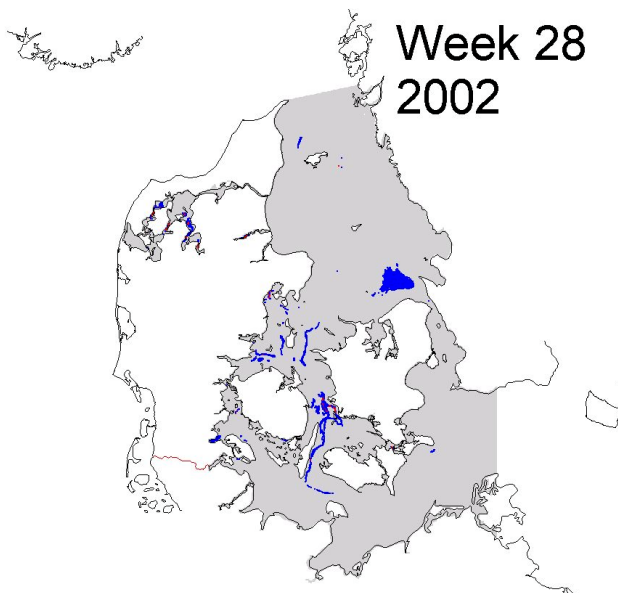
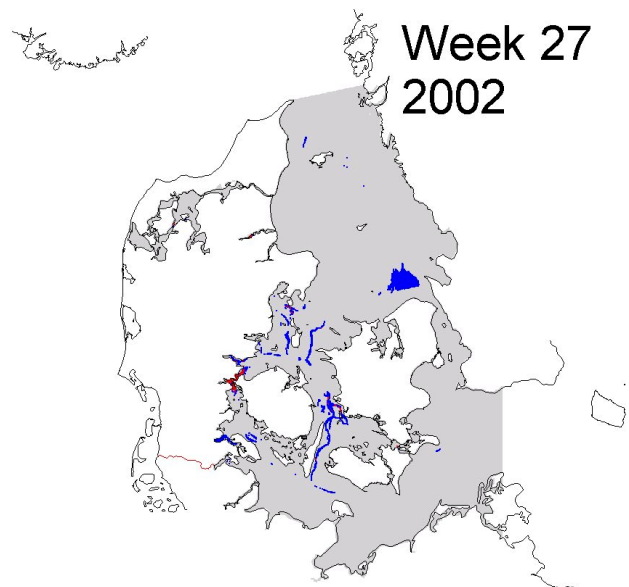
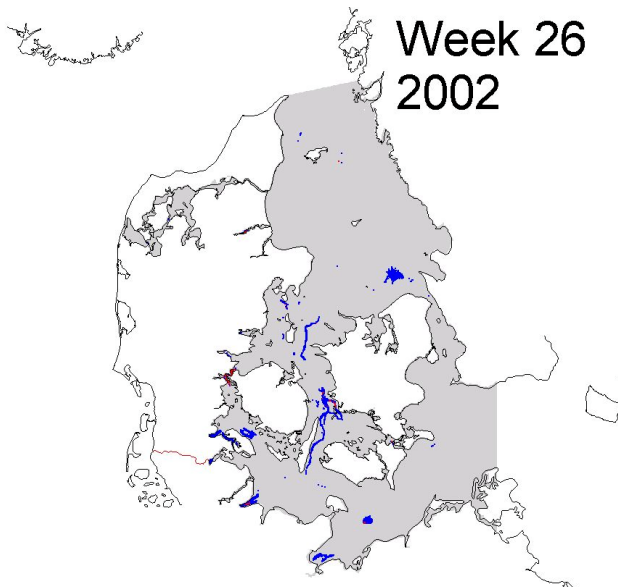


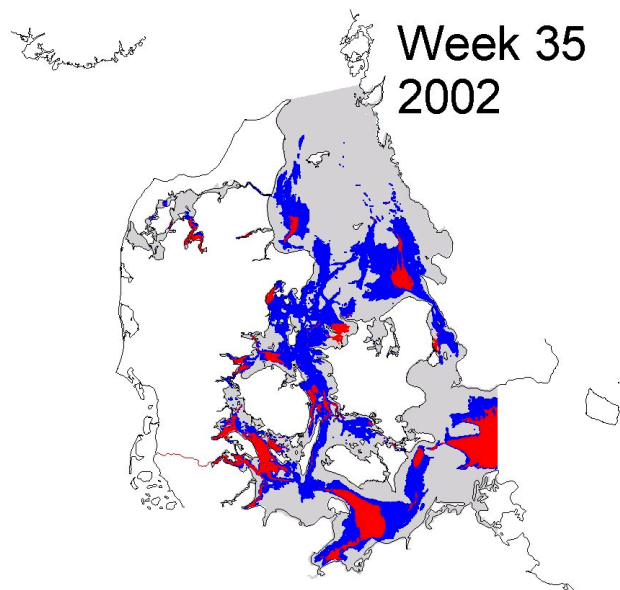
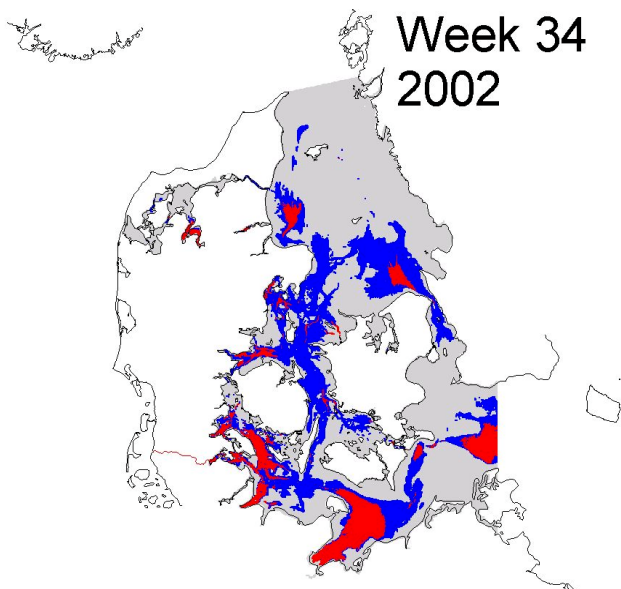
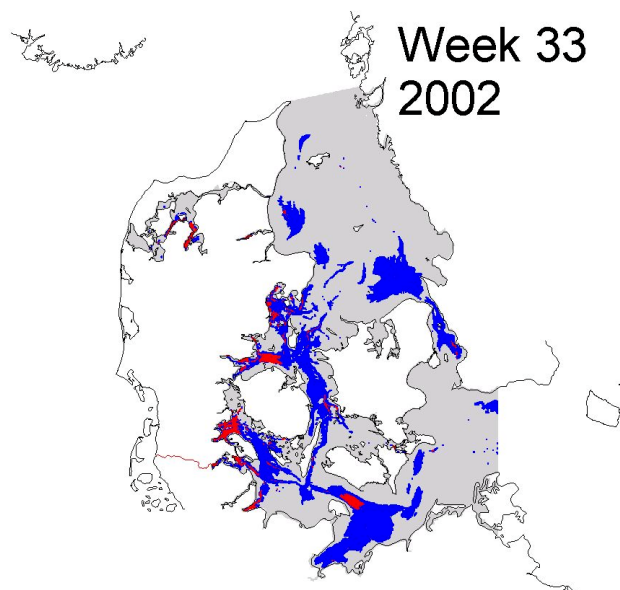
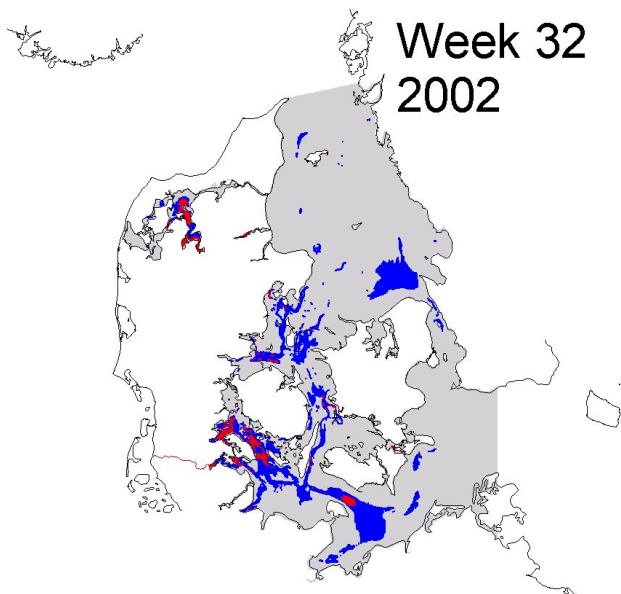
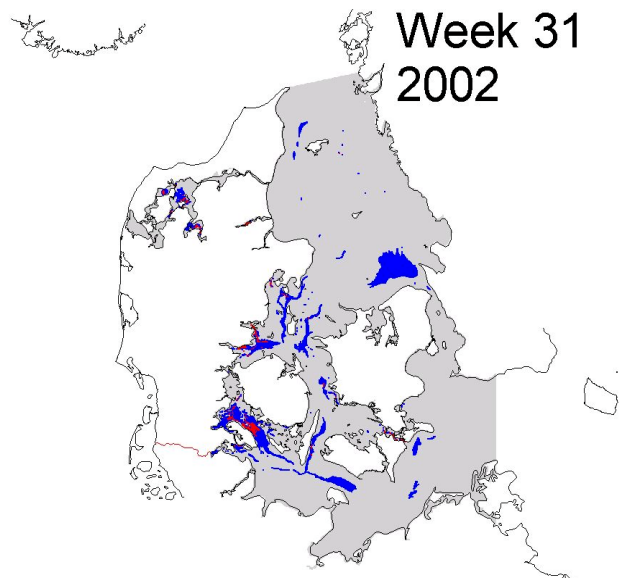
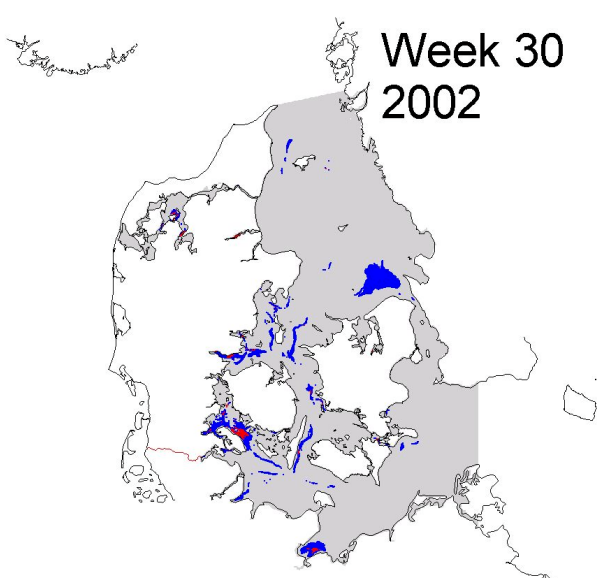
Uge 52
2002

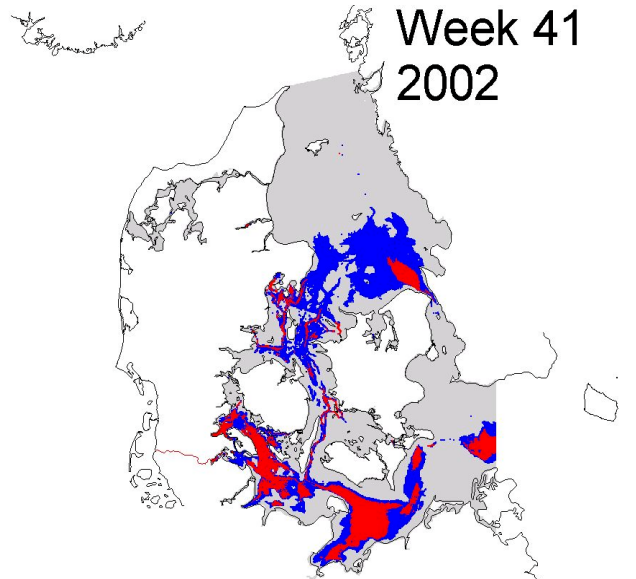
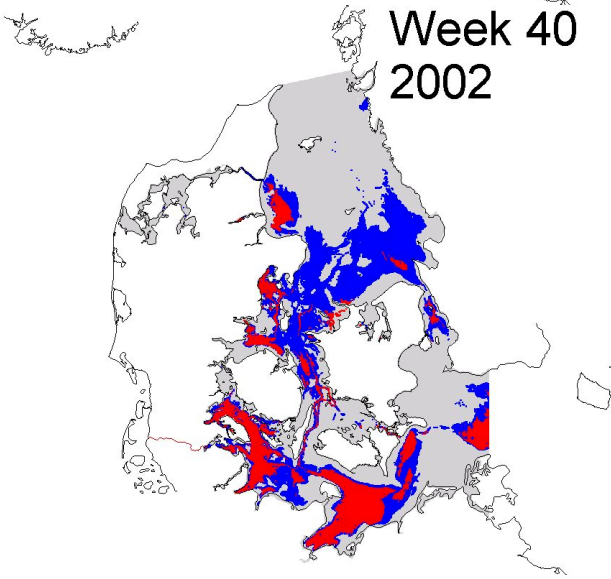
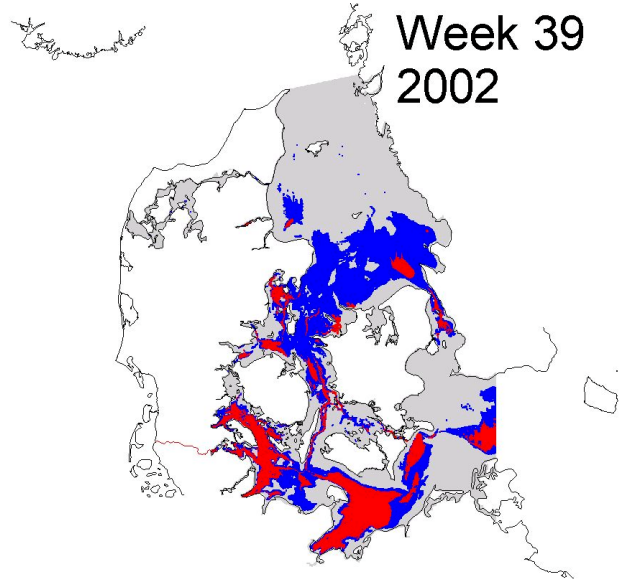
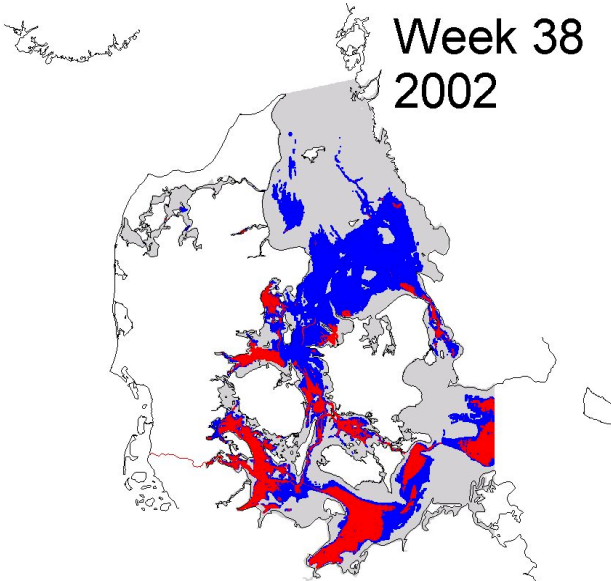
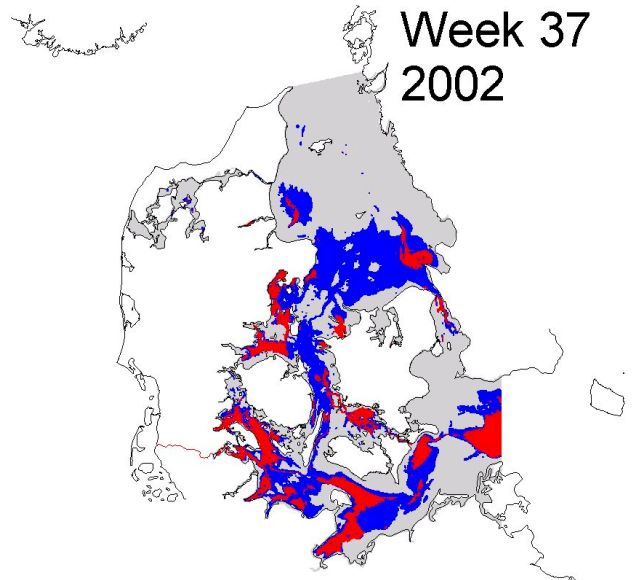
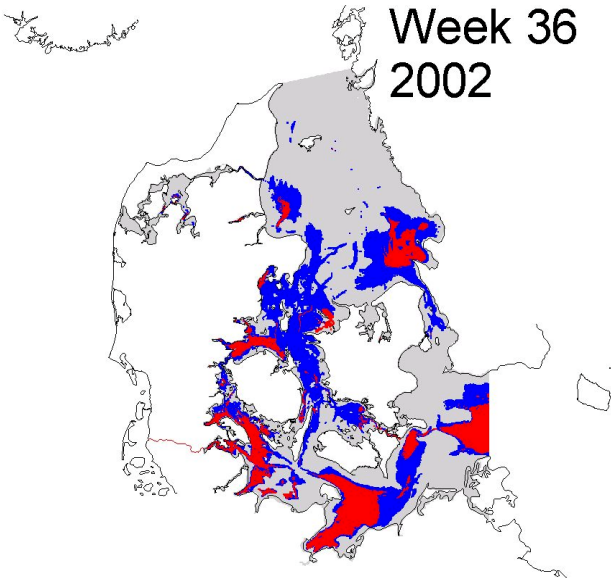
[tom side]

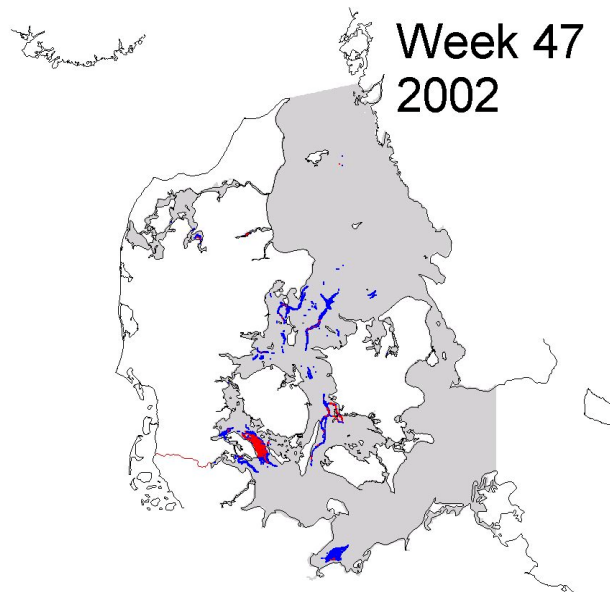
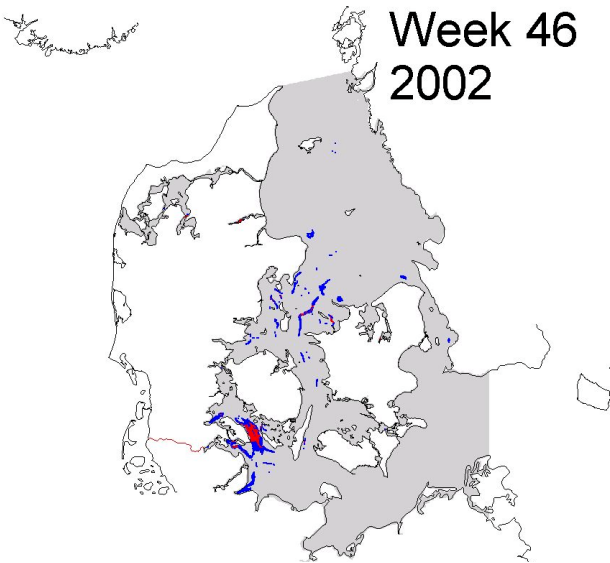
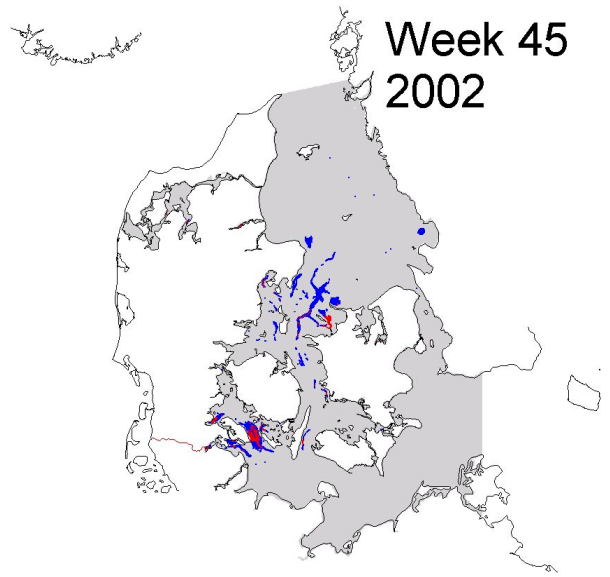
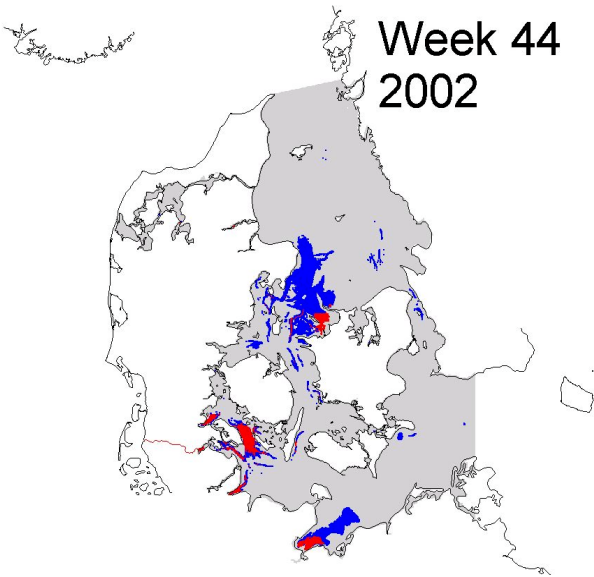
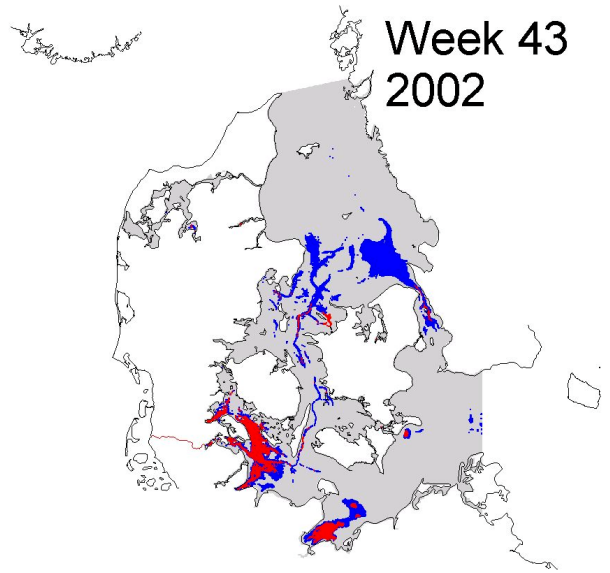
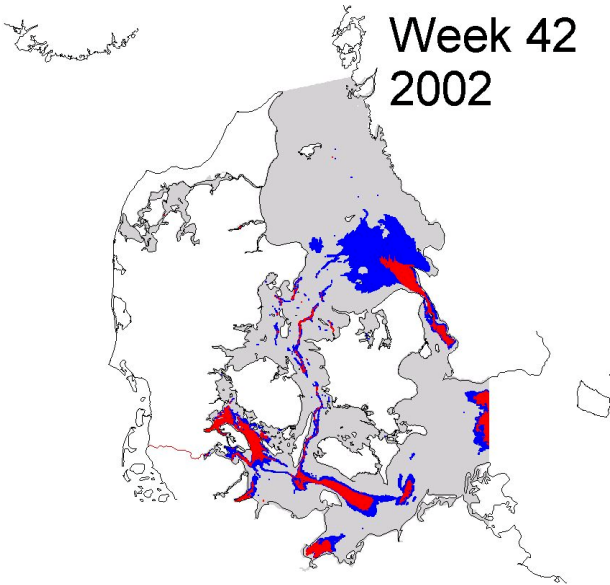
Appendiks B: Tidsmæssig udvikling i iltsvindet 2002 ved DMU's empiriske model

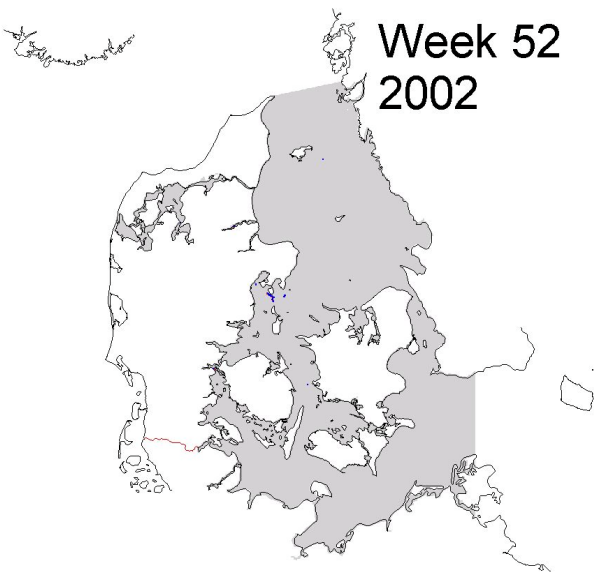
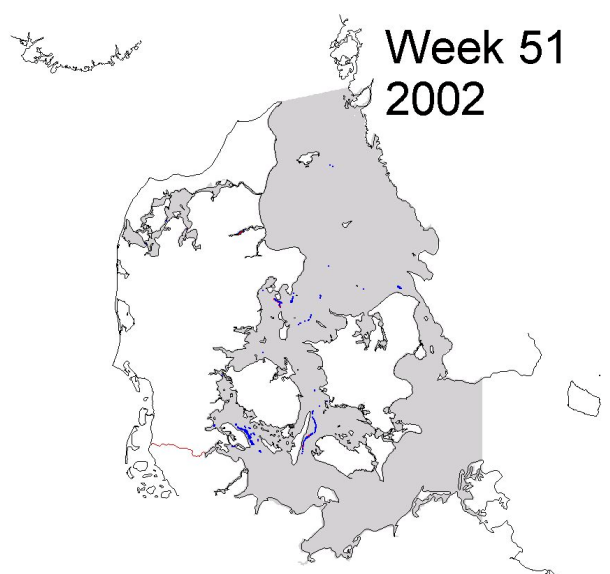
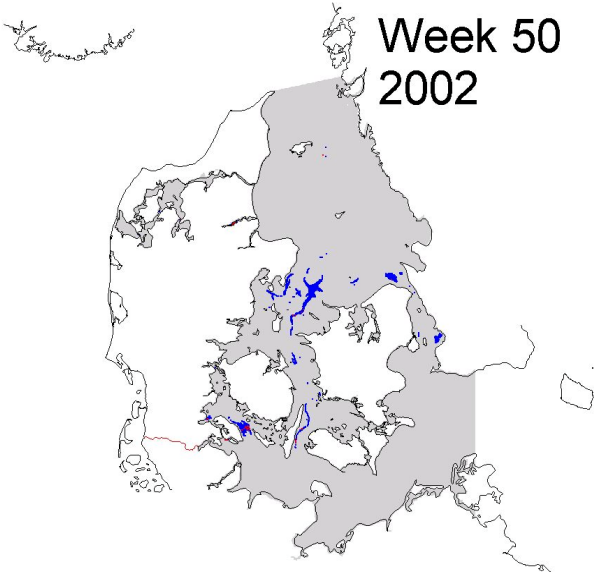
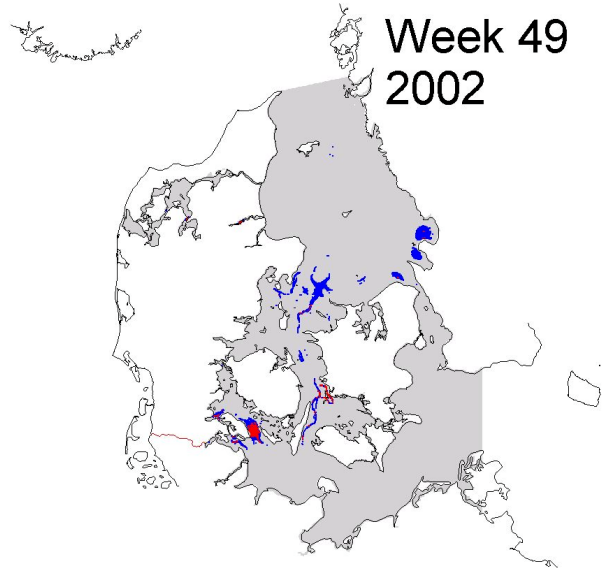
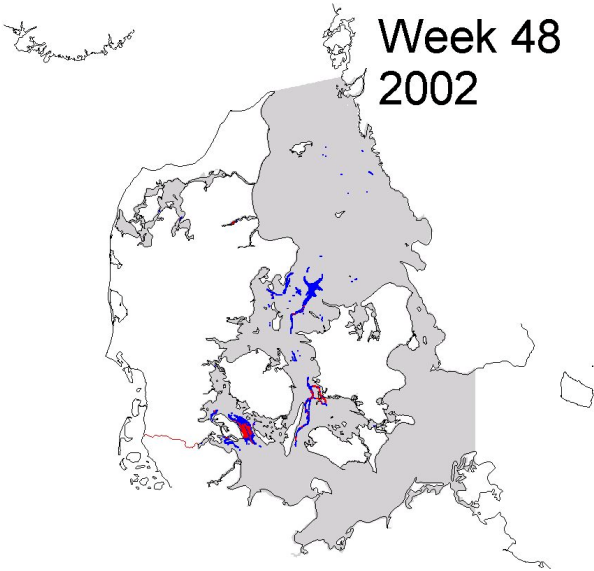
Udbredelseskortene nedenfor viser den ugentlige udbredelse af iltsvind beregnet ved tidslig interpolation af dybdegrænser bestemt ud fra målte iltkoncentrationsprofiler. Områder med iltsvind og kraftigt iltsvind er vist med henholdsvis blå og rød farve.











[tom side]

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- og Udviklingssektion
Afd. for Systemanalyse
Afd. for Atmosfærisk Miljø
Afd. for Marin Økologi
Afd. for Miljøkemi og Mikrobiologi
Afd. for Arktisk Miljø*

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

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

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

Afd. for Vildtbiologi og Biodiversitet

Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger og en årlig årsrapport. Endvidere udgiver DMU i samarbejde med Gads Forlag en populærfaglig serie af bøger, MiljøBiblioteket. En oversigt over DMU's publikationer og et katalog over aktuelle forsknings- og udviklingsprojekter kan findes på DMU's hjemmeside.

Faglige rapporter fra DMU/NERI Technical Reports

2002

- Nr. 400: Population Structure of West Greenland Narwhals. A Multidisciplinary Approach. By Riget, F. et al. 53 pp. (electronic)
- Nr. 401: Dansk tilpasning til et ændret klima. Af Fenger, J. & Frich, P. 36 s. (elektronisk)
- Nr. 402: Persistent Organic Pollutants in Soil, Sludge and Sediment. A Multianalytical Field Study of Selected Organic Chlorinated and Brominated Compounds. By Vikelsøe et al. 96 pp. (electronic)
- Nr. 403: Vingeindsamling fra jagtsæsonen 2001/02 i Danmark. Wing Survey from the 2001/02 hunting season in Denmark. Af Clausager, I. 62 s., 50,00 kr.
- Nr. 404: Analytical Chemical Control of Phtalates in Toys. Analytical Chemical Control of Chemical Substances and Products. By Rastogi, S.C., Jensen, G.H. & Worsøe, I.M. 25 pp. (electronic)
- Nr. 405: Indikatorer for Bæredygtig Transport – oplæg til indhold og strategi. Af Gudmundsen, H. 112 s., 100,00 kr.
- Nr. 406: Det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP). Årsrapport for 2001. Af Kemp, K. & Palmgren, F. 32 s. (elektronisk)
- Nr. 407: Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2000. By Kemp, K. & Palmgren, F. 32 pp. (electronic)
- Nr. 408: Blykontaminering af havfugle i Grønland fra jagt med blyhagl. Af Johansen, P., Asmund, G. & Riget, F. 31 s. (elektronisk)
- Nr. 409: The State of the Environment in Denmark 2001. By Bach, H., Christensen, N. & Kristensen, P. (eds). 368 pp., 200,00 DKK
- Nr. 410: Biodiversity in Glyphosate Tolerant Fodder Beet Fields. Timing of Herbicide Application. By Strandberg, B. & Bruus Pedersen, M. 36 pp. (electronic)
- Nr. 411: Satellite Tracking of Humpback Whales in West Greenland. By Dietz, R. et al. 38 pp. (electronic)
- Nr. 412: Control of Pesticides 2001. Chemical Substances and Chemical Preparations. By Krongaard, T. Petersen, K.K. & Christoffersen, C. 28 pp. (electronic)
- Nr. 413: Vegetation i farvandet omkring Fyn 2001. Af Rasmussen, M.B. 138 s. (elektronisk)
- Nr. 414: Projection Models 2010. Danish Emissions of SO₂, NO_x, NMVOC and NH₃. By Illerup, J.B. et al. 194 pp., 100,00 DKK.
- Nr. 415: Potential Environmental Impacts of Soil Spills in Greenland. An Assessment of Information Status and Research Needs. By Mosbech, A. (ed.) 116 pp. (electronic)
- Nr. 416: Ilt- og næringsstoffluxmodel for Århus Bugt og Mariager Fjord. Modelopsætning. Af Fossing, H. et al. 72 s., 100,00 kr.
- Nr. 417: Ilt- og næringsstoffluxmodel for Århus Bugt og Mariager Fjord. Modelopsætning og scenarier. Af Fossing, H. et al. 178 s. (elektronisk)
- Nr. 418: Atmosfærisk deposition 2001. NOVA 2003. Af Ellermann, T. (elektronisk)
- Nr. 419: Marine områder 2001 - Miljøtilstand og udvikling. NOVA 2003. Af Ærtebjerg, G. (red.) (elektronisk)
- Nr. 420: Landovervågningsoplande 2001. NOVA 2003. Af Bøgestrand, J. (elektronisk)
- Nr. 421: Søer 2001. NOVA 2003. Af Jensen, J.P. (elektronisk)
- Nr. 422: Vandløb og kilder 2001. NOVA 2003. Af Bøgestrand, J. (elektronisk)
- Nr. 423: Vandmiljø 2002. Tilstand og udvikling - faglig sammenfatning. Af Andersen, J.M. et al. 56 s., 100,00 kr.
- Nr. 424: Burden Sharing in the Context of Global Climate Change. A North-South Perspective. By Ringius, L., Frederiksen, P. & Birr-Pedersen, K. 90 pp. (electronic)
- Nr. 425: Interkalibrering af marine målemetoder 2002. Af Stæhr, P.A. et al. 88 s. (elektronisk)
- Nr. 426: Statistisk optimering af monitoringsprogrammer på miljøområdet. Eksempler fra NOVA-2003. Af Larsen, S.E., Jensen, C. & Carstensen, J. 195 s. (elektronisk)
- Nr. 427: Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2001. By Kemp, K. & Palmgren, F. 32 pp. (electronic)

2003

- Nr. 428: Vildtbestande, jagt og jagttider i Danmark 2002. En biologisk vurdering af jagtens bæredygtighed som grundlag for jagttidsrevisionen 2003. Af Bregnballe, T. et al. 227 s. (elektronisk)
- Nr. 429: Movements of Seals from Rødsand Seal Sanctuary Monitored by Satellite Telemetry. Relative Importance of the Nysted Offshore Wind Farm Area to the Seals. By Dietz, R. et al. 44 pp. (electronic)
- Nr. 430: Undersøgelse af miljøfremmede stoffer i gylle. Af Schwärter, R.C. & Grant, R. 60 s. (elektronisk)
- Nr. 432: Metoder til miljøkonsekvensvurdering af økonomisk politik. Møller, F. 65 s. (elektronisk)

[Tom side]

Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

ISBN 87-7772-737-1
ISSN 1600-0048