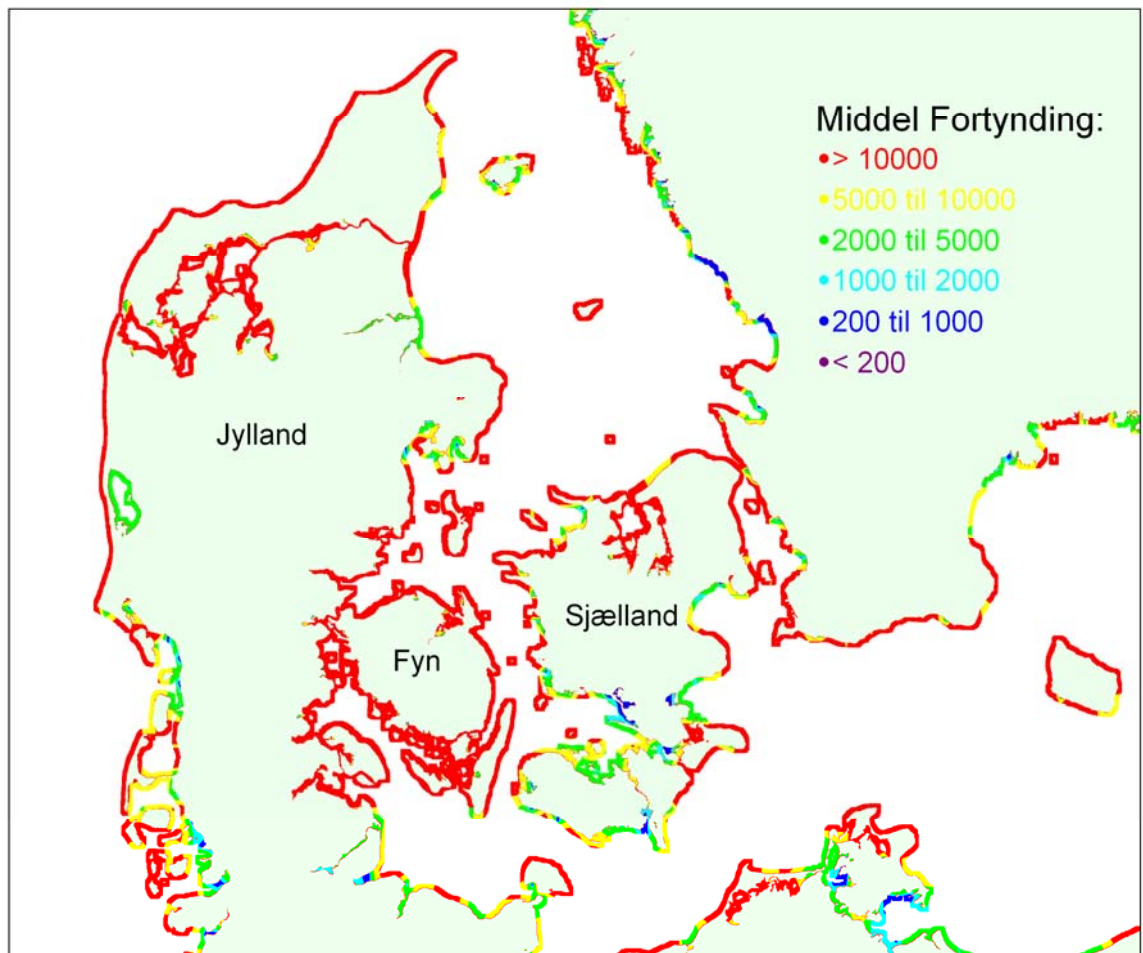


## Fortynding langs danske kyster



## Fortynding langs danske kyster

Agern Allé 5  
2970 Hørsholm

**Juni 2006**

Tlf: 4516 9200  
Fax: 4516 9292  
Afd. fax:  
E-mail: dhi@dhigroup.com  
Web: www.dhigroup.com

Klient  Miljøstyrelsen	Klientens repræsentant  Jørgen G. Hansen
------------------------------	--

Projekt  Fortynding langs danske kyster	Projekt nr.  53504
---	--------------------------

Forfattere  Flemming Jacobsen Ole Petersen	Dato Juni 2006
	Godkendt af  Ole Hjelmar

Revision	Beskrivelse	Udført	Kontrolleret	Godkendt	Dato
1.1	Revision	OSP	OSP	OSP	23/11-07
1.0	Endelig Rapport	FLJ	OSP	OH	30/6-06

Nøgleord  Dillution	Klassifikation  <input type="checkbox"/> Åben <input type="checkbox"/> Intern <input checked="" type="checkbox"/> Tilhører klienten
---------------------------	---

Distribution Miljøstyrelsen DHI:	Jørgen G. Hansen OSP, FLJ	Antal kopier
--	------------------------------	--------------

## **INDHOLDSFORTEGNELSE**

RESUME OG KONKLUSIONER .....	2
1 BAGGRUND OG FORMÅL .....	4
2 TEORETISK BAGGRUND.....	5
2.1 Brændingszonen.....	5
2.2 Brændingszone diffusionskoefficienten .....	6
2.3 Beregning af stof fortyndingen .....	6
3 DATA OG METODE .....	8
3.1 Metode.....	8
3.1.1 Fortynding ved åbne kyster .....	8
3.1.2 Fortynding i beskyttede farvande.....	9
3.2 Data .....	9
3.2.1 Danmarksmodellen.....	9
3.2.2 Kyst bathymetri .....	10
3.3 Udvalgte fjorde.....	12
4 RESULTATER .....	15
4.1 Diffusionskoefficienter.....	15
4.2 Middelfortynding .....	16
4.3 Minimumsfraktilen (5 %) af Fortynding .....	17
4.4 Fortyndingen i fjordene .....	18
5 SAMMENLIGNING MED TIDLIGERE UNDERSØGELSER.....	25
6 DISKUSSION.....	26
7 LITTERATUR.....	28

## **BILAG**

Detail kort

## **RESUME OG KONKLUSIONER**

Til brug i en vurdering af egnede placeringer af deponier på land er der foretaget en beregning der anslår fortyndingen af udsivende perkolat langs danske kyster.

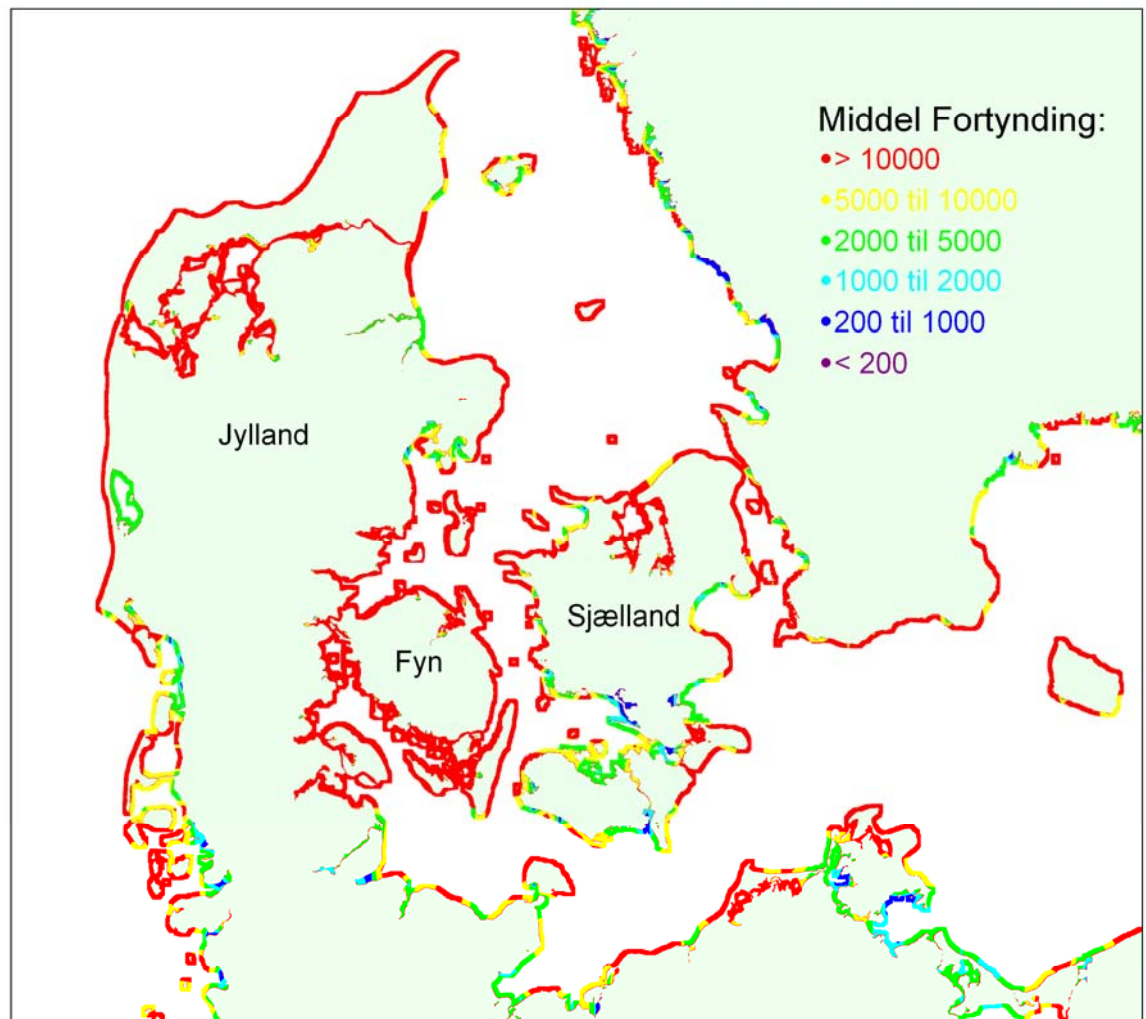
På åbne kyster er fortyndingen indenfor brændingszonen estimeret ud fra en erfaringsmæssig sammenhæng mellem dybde, strøm og bølgeforskel. Beregningerne er baseret på en standardudsivning på 0,1 l/s og fortyndingen vurderet 50 m nedstrøms herfor. Strøm og bølgeforskel er baseret på værdier fra DHI's Danmarksmodel gennem en periode. Modellen er baseret på et 6 x 6 km net. De kystnære dybdeforskel er baseret på en 205 x 205 m bathymetri.

I nogle udvalgte fjorde er der gennemført egentlige spredningsberegninger for et antal repræsentative lokaliteter og middel fortyndingen i den beregnede periode estimeret ud fra disse resultater. De anvendte kilder repræsenterer både faktiske deponier og fiktive placeringer, valgt for at opnå en rimelig dækning af områderne. Fjordmodellerne er baseret på en dybdemidlet model med relativt fin rumlig opløsning; modellerne beskriver således lokale variationer i strøm og fortynding. Fjordmodellerne drives af randbetingelser fra Danmarksmodellen og repræsenterer en historisk periode.

Det samlede resultat af undersøgelsen er vist på nedenstående figur, der viser middelfortyndingen afbildet som en farvekodet linie langs kysten. Det skal bemærkes at den estimerede fortynding er lokal og ikke tager hensyn den yderligere fortynding af stoffet, som finder sted under den videre transport langs kysten til andre lokaliteter eller såfremt der evt. findes flere kilder således at effekten af fortyndingen overvurderes.

Det skal også bemærkes at fortyndingen er afhængig af størrelsen af den udsivende vandstrøm og at der med større vandmængder end den her benyttede standardudsivning må forventes mindre fortynding. De fundne fortyndinger kan således ikke anvendes i relation til f.eks. spildevandsudledninger, hvor udledningen generelt er mange gange større. I afsnit 6.1 er angivet en metode til vurdering af andre udledninger i havstokken end den her benyttede.

Beregningerne viser at fortyndingen i brændingszonen varierer fra under 2000 gange i beskyttede områder som Smålandshavet eller Århus Bugt til over 10000 gange langs eksponerede kyster eller kyster langs strømfyldte bæltter så som Vestfyn eller Vestkysten.



*Middel fortynding langs danske kyster*

## **1 BAGGRUND OG FORMÅL**

I forbindelse med den danske implementering af Rådsbeslutningen (2003/33/EF) af 19. december 2002 om opstilling af kriterier og procedurer for modtagelse af affald på deponeringsanlæg i henhold til artikel 16 og bilag II i EU's deponeringsdirektiv (1999/31/EF) har DHI – Institut for Vand og Miljø bistået Miljøstyrelsen med udarbejdelse af baggrundsmateriale og gennemførelse af modelberegninger med henblik på opstilling af forslag til danske kriterier for modtagelse af affald på deponeringsanlæg. Den anvendte metodik og forudsætningerne for de gennemførte beregninger er beskrevet i Notat vedr. acceptkriterier for deponering: Metoder og forudsætninger (Udkast af 11. marts 2005).

Med forudsætningerne tilpasset til danske forhold og dansk miljøpolitik er der gennemført beregningerne af udvaskningskriterier. De gennemførte beregninger tager – ligesom de beregninger, som ligger til grund for Rådsbeslutningen – alene udgangspunkt i beskyttelse af grundvandskvaliteten nedstrøms for deponeringsanlægget. Dansk deponeringspolitik foreskriver imidlertid, at nye deponeringsanlæg skal placeres kystnært, hvorfor det vil være naturligt at relatere risikovurderingen til den potentielle påvirkning af det marine miljø. Dette kan gøres ved at antage, at fortyndingen mv. i den umættede zone og grundvandszonen fra deponeringsanlægget til målepunktet (POC, point of compliance) suppleres med en yderligere fortynding i den kystnære marine zone, hvor der defineres yderligere et POC med kvalitetskriterier rettet mod marine forhold.

Med henblik på en eventuel inddragelse af den kystnære marine zone i fastsættelsen af udvaskningskriterierne for affaldsdeponering har DHI på foranledning af Miljøstyrelsen udarbejdet en oversigt over fortyndingsforholdene ved de danske kyster. Denne rapport beskriver den anvendte metodik og giver en overslagsmæssig beskrivelse af fortyndingen langs de danske kyster.

Fortyndingen af udsivninger og udledninger langs de danske kyster bestemmes af de lokale hydrografiske forhold og varierer fra lokalitet til lokalitet. Graden af påvirkning af udsivninger og udledninger i et vandområde er derfor en funktion af på den ene side størrelsen af udsivning og udledning og disses indehold af forureningskomponenter og på den anden side fortyndingen af disse i vandområdet.

Fortyndingen af udsivninger og udledninger i den kystnære zone langs de danske kyster bestemmes i denne undersøgelse på stor skala (omkring 6 kilometers opløsning). For udvalgte fjorde er beregningen gennemført med større opløsning, da 6 kilometers opløsning ikke vurderes at være tilstrækkeligt. De udvalgte fjorde er Horsens Fjord, Kolding Fjord, Limfjorden, Odense Fjord, Roskilde Fjord og Isefjord, Vejle Fjord og Åbenrå Fjord. Fortyndingen er beregnet ud fra information omkring de hydrografiske forhold, så som vanddybden, strømmen, herunder også tidevands- og densitetsgenereret strøm, samt bølgeforhold. Formuleringen af fortyndingen som funktion af dybde og strøm er baseret på flere fysiske antagelser, som beskrives i et særskilt afsnit. Benyttede bølge- og strømforhold er bestemt med DHI's 3-dimensionelle numeriske hydrodynamiske model af Nordsø-Østersø systemet. Til beregningerne med større opløsning er

simulerings resultater fra DHI's 3-dimensionale model af Nordsø-Østersø systemet benyttet som randdata.

Resultatet af undersøgelsen præsenteres som kort, hvor fortyndingen er angivet med farve langs kysten. I den benyttede farveskala angiver rød en stor fortynding og blå en lille fortynding .

Da der er tale om en overslagsmæssig bestemmelse af fortyndingen foretaget på en opløsning på 6 km, undtaget er dog de udvalgte fjorde, betyder det, at hvis der ønskes mere præcise vurderinger af fortyndingen og spredningen må der gennemføres lokalitets-specifikke beregninger og vurderinger.

Opmærksomheden henledes mod, at de i rapporten beregnede fortyndinger langs de danske kyster er relateret til et forudsat scenarie med en standard-/punktkildeudledning på 0,1 l/s.

For andre udledninger kan der tages udgangspunkt i nærværende beregningsresultater - forudsat at resultaterne korrigeres for såvel størrelse af den aktuelle udledning, udløbsstedets placering i forhold til kysten som andre relevante stedspecifikke forhold.

## **2      *TEORETISK BAGGRUND***

Forskellige metoder er udviklet til at beregne fortynding eller fortyndingspotentiale langs en kystzone, og kan benyttes til at beregne fortyndingen langs de danske kyster. En klassisk metode er f.eks. baseret på måling af spredning af et konservativt sporstof. En nyere metode benytter f.eks. numeriske modeller til at bestemme spredningen. I denne sammenhæng anvendes teoretiske resultater, hvor spredning er relateret til hydrografiske forhold ved forholdsvis simple matematiske udtryk. Dispersionen er en funktion af bl.a. vanddybde og strømhastighed. Den matematiske formel er verificeret i adskillige videnskabelige undersøgelser ud fra målinger både i laboratorier og floder og langs kyster. De nødvendige informationer til at bestemme dispersionen ud fra de simple matematiske udtryk kan generelt måles direkte eller beregnes relativt enkelt. I denne undersøgelse benyttes følgende data: dybde, strømhastighed og bølgehøjde fra en 3-dimensionel numerisk hydrodynamisk model dækkende de danske farvande til at bestemme dispersionen. I det følgende forklares baggrunden for beregningen af fortyndingspotentialet i detaljer.

### **2.1    *Brændingszonen***

Generelt er brændingszonen det smalle område langs kysten, hvor bølgerne bryder på grund af de aftagende vanddybder. Brændingszonen er ikke en konstant størrelse, men vil typisk afhænge af den lokale vanddybde og de indkommende bølgers højde. Som tommelfingerregel vil bølgerne bryde når vanddybden reduceres til 1.5 bølgehøjder. I dette studie er som definition på brændingszonens bredde anvendt afstanden hvor vanddybden udgør 1.5 x den signifikante bølgehøjde.



## 2.2 Brændingszone diffusionskoefficienten

Størrelsen af diffusionskoefficienten i brændingszonen er anslået ved hjælp af sammenhænge oprindelig angivet af Taylor (1921), Okubo (1967) og Fischer *et al.* (1979), hvor man i en stationær strøm finder at:

$$K_y = \frac{U^2 h^2}{300K_z} = \frac{Uh}{3} \quad (2.1)$$

hvor  $K_y$  er diffusionskoefficienten,  $U$  er strømhastigheden,  $h$  er vanddybden og  $K_z=0.01 \cdot U \cdot h$  er den lodrette diffusionskoefficient, idet det er antaget, at den lodrette blanding sker hurtigt set i forhold til variationer i strømhastigheden. I dette studie tilnærmes vanddybden med middeldybden i det tværsnit, der gennemstrømmes i brændingszonen.

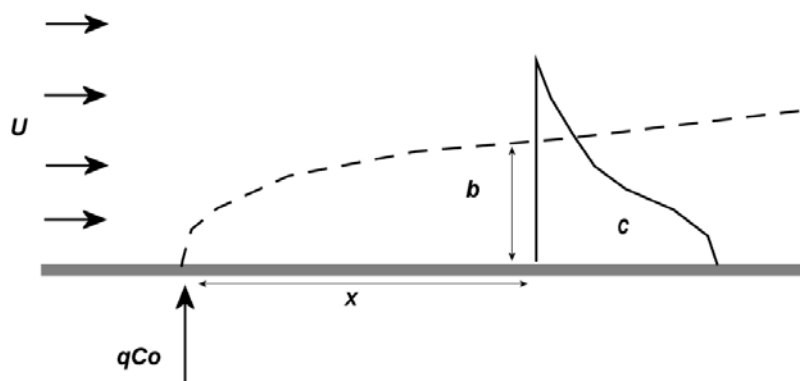
## 2.3 Beregning af stof fortyndingen

Spredningen af stoffet i udsivningen langs kysten, eller rettere bredden af fanen, kan bestemmes under antagelse af stationære forhold omkring udledningen. Fanen vil spredes ud fra kysten som:

$$b = 2\sqrt{2K_y \frac{x}{U}} = 2\sqrt{\frac{2}{3}hx} \quad (2.2)$$

hvor  $b$  er bredden af stoffanen (f.eks. 2 gange standardafvigelsen i det normalfordelte profil) og  $x$  er afstanden fra kilden til det undersøgte tværsnit.

Det bemærkes, at i de tilfælde, hvor brændingszonens bredde er mindre end fanens bredde bestemt ved formel (2.2), benyttes brændingszonens bredde. Brændingszonens bredde er bestemt som vist ovenfor.



Figur 2.1. Skitse af spredning af udsivning langs kysten.

Koncentrationen af stoffet i fanen findes da ved hjælp af kontinuitetsligningen, idet det antages at den udledte stofmængde er ensartet fordelt i fanen:



$$qC_0 = QC = bhUC \quad \Rightarrow \quad C = \frac{qC_0}{bhU} \quad (2.3)$$

hvor  $q$  er udledningen i punktkilden,  $C_0$  og  $C$  er henholdsvis koncentrationen ved kilden og i fanen, og  $qC_0$  er kildestyrken.

Fortyningen  $S$  findes således endelig at være:

$$S = \frac{C_0}{C} = \frac{bhU}{q} = 2\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{hU\sqrt{hx}}{q} \quad (2.4)$$

I studiet beregnes fortyningen 50 m nedstrøms langs kysten af en punktudledning placeret i vandkanten med en kildestyrke på 0,1 l/s, hvilket er i overensstemmelse med beskrivelsen i *Forudsætningsnotatet*. Ved at benytte disse værdier kan fortyningen også skrives som følger:

$$S = 2\sqrt{\frac{2}{3}} \frac{\sqrt{h \cdot 50m}}{0.1l/s} \cdot hU \quad (2.5)$$

De eneste ubekendte er vanddybde og strømhastighed. Information om vanddybde og strømhastighed er uddraget fra en 3-dimensional numerisk hydrodynamisk model, der dækker Nordsøen, Kattegat og Østersøen (flere informationer gives i næste afsnit). Data for vanddybderne er udtrukket fra en 205 m x 205 m bathymetri.

### **3 DATA OG METODE**

I det følgende beskrives benyttede data (vanddybde, strøm og bølger) fra den 3-dimensionale numeriske hydrodynamiske model og metoden anvendt til at beregne fortynding. Resultater fra den 3-dimensionale model benyttes også til at drive strømmingen i udvalgte fjorde, hvor beregningerne er gennemført med større opløsning. Opsætningen af modeller for de udvalgte fjorde er også beskrevet i det følgende. Da teorien omkring formuleringen af fortyndingen er beskrevet i det forudgående kapitel, berøres den ikke i dette kapitel.

#### **3.1 Metode**

I dette studie er der benyttet to forskellige metoder til at beregne fortyndingen:

- Langs de mere åbne kyster er fortyndingen beregnet indenfor brændingszonen. Beregningerne er foretaget på baggrund af 6km modellen; og
- I udvalgte indre farvande er fortyndingen beregnet også udenfor brændingszonen, idet man i beskyttede farvande næppe kan definere en brændingszone. Beregningerne er foretaget ved hjælp af 3-4 repræsentative punktkilder. Se Figur 4.4.

##### **3.1.1 Fortynding ved åbne kyster**

Fortyndingspotentialet vurderes ud fra en idealiseret kilde, som specificeret i *Forudsætningsnotatet*: udsivning i brændingszonen fra et deponi på 100m x 100m, hvor udsivningen er sat til 0,1 l/s. Regningsmæssigt antages udsivningen at ske i et punkt og vurderingen foretages 50m nedstrøms kilden.

Fortyndingen beregnes ved at sammenstille udsivningen med det vandvolumen i brændingszonen, som stoffet opblandes i. Dette volumen findes ved at beregne vandføringen gennem et tværsnit normalt til kysten således at:

- Dybden i brændingszonen findes ud fra så detaljerede bathymetrier som muligt, og der regnes med en lineært voksende vanddybde fra tidevandslinien ud til det nærmeste dybdepunkt;
- Udstrækningen af udsivningen beregnes ud fra information omkring dybde og bølgeforskel (se eventuelt detaljer i Kapitel 2); og
- Den langsgående strøm bestemt ud fra beregninger med den numeriske model.

På baggrund af disse værdier beregnes følgende størrelser:

- Middelfortyndingen; og
- 5 % minimumsfraktilen af fortyndingen

### 3.1.2 Fortynding i beskyttede farvande

I mere beskyttede fjorde og bugter anvendes derfor en anden metode end for de åbne kyster. Dels er danske fjorde og bugter små, så med en opløsning på 6 km vil beskrivelsen af strøm og bølgeforhold blive rudimentær, dels er bølgepåvirkningen lille, så brændingszonen vanskelig at definere.

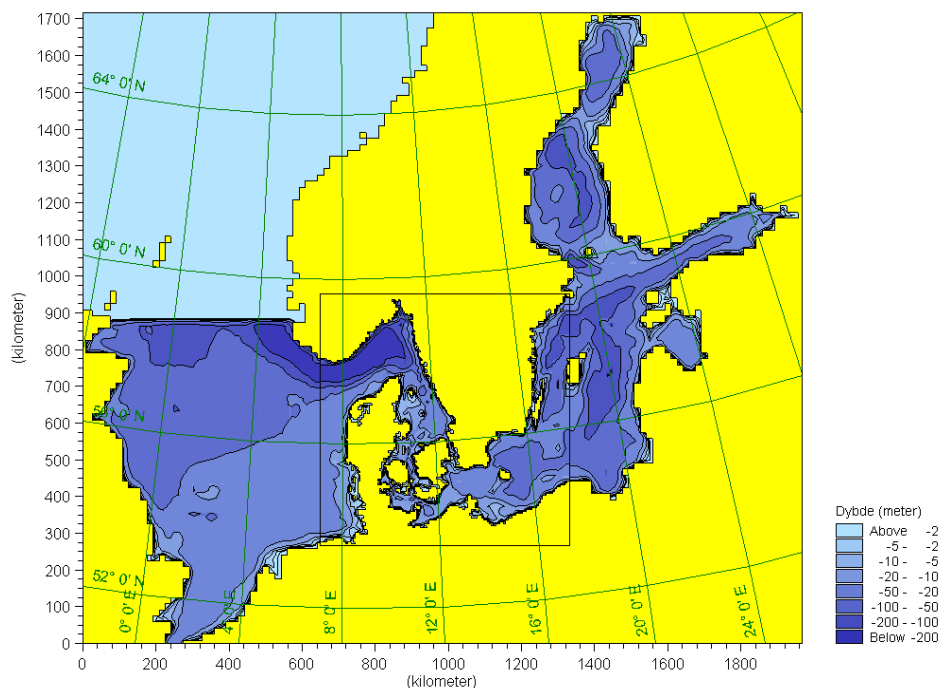
Derfor anvendes en mere direkte metode for disse områder, hvor strømforholdene beskrives med en detaljeret model, og fortyndingen beskrives ved hjælp af den aktuelle spredning af stof fra et antal repræsentative punktkilder, af samme styrke som ovenfor. Disse beregninger afviger derfor kun fra de beregninger man eventuelt ville lave i forbindelse med en undersøgelse af et aktuelt deponi ved at den anvendte strømningsmodel er forenklet (dybdemidlet og lidt grovere horisontal opløsning) og ved antallet og varigheden af de valgte scenarier.

Resultatet af beregningerne er stofkoncentrationer og fordelinger i det beregnede område gennem hele perioden. Ud fra disse er beregnet middelkoncentrationen og middelfortynding for perioden.

## 3.2 Data

### 3.2.1 Danmarksmodellen

Hydrografiske data til at beregne fortyndingen langs de danske kyster er trukket ud fra resultater fra en 3-dimensionale numerisk model, der dækker Nordsøen, Kattegat og Østersøen. Model-bathymetrien vist på har 9 sømils horisontal opløsning i Nordsøen og Østersøen og 3 sømils opløsning omkring Danmark.



Figur 3.1. Model bathymetrien vist med 9 og 3 sømils opløsning

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

Den aktuelle modelopsætning er en videreudvikling af en modelopsætning, først anvendt i NOVA (Farvandsmodellen) og senere udvidet i NO COMMENTS, et projekt under Nordisk Ministerråd. Farvandsmodellen blev etableret i 1998 og har været i drift siden.

Modellen drives af:

- Vandstandsvariationer ved de åbne rande. Den væsentligste er åbningen fra Nordsøen mod Atlanterhavet. En mindre findes i den Engelske Kanal;
- Vindfelter og lufttryk. 3 timers værdier fra DMI (analysefelter);
- Varmeudveksling med atmosfæren; samt
- Ferskvandsindstrømning fra de mest betydende vandløb.

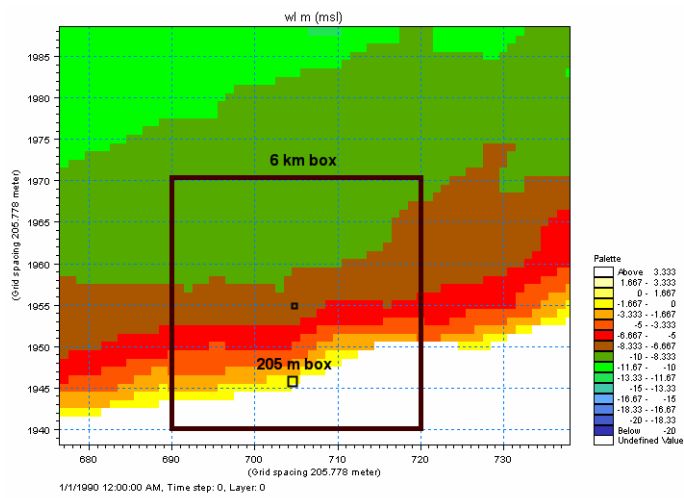
Beregningerne dækker en vinter: januar-februar 2004; og en sommer periode: juni-juli 2004.

Data trukket ud fra modellen er:

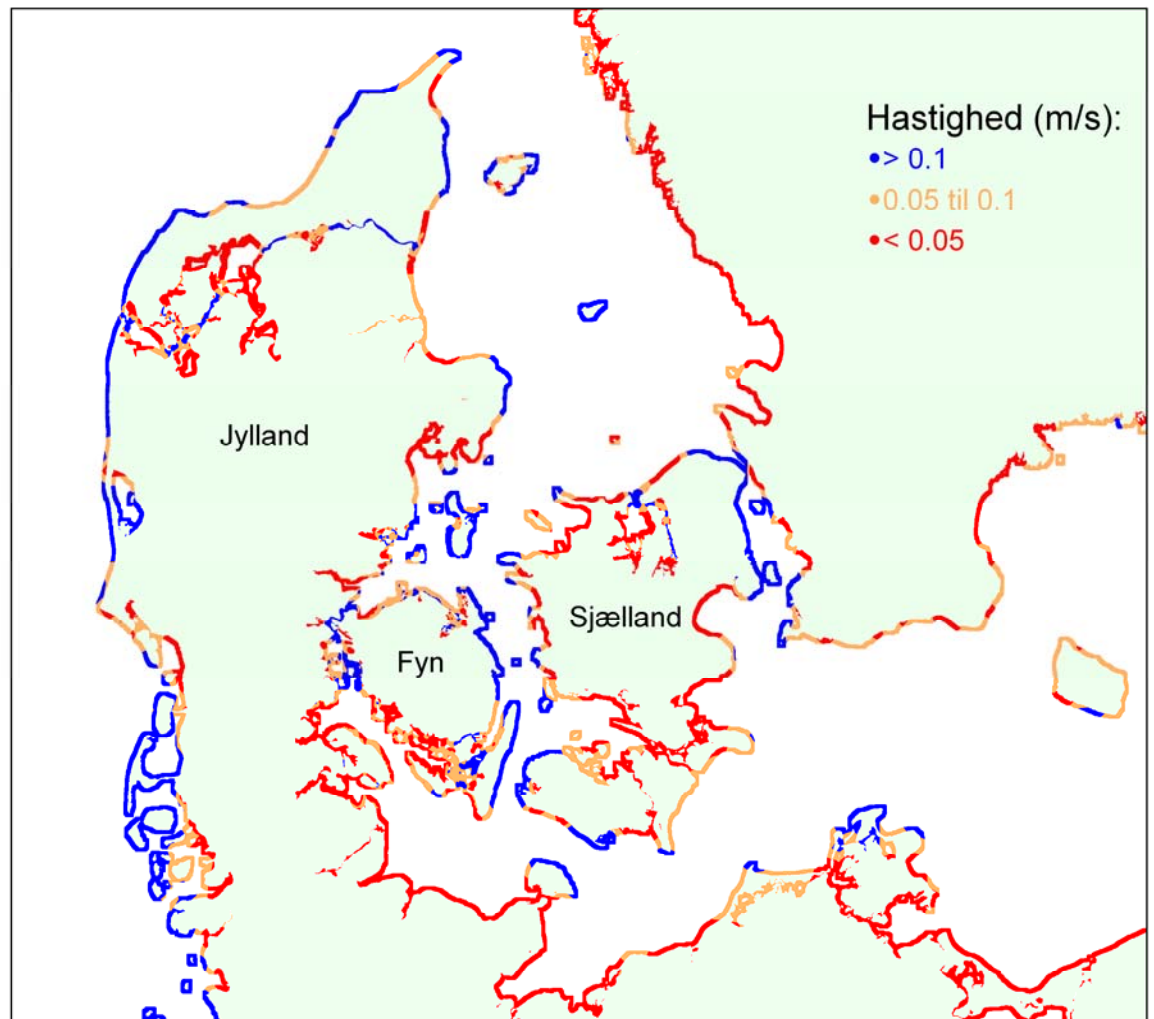
- Strøm (se Figur 3.3); og
- Bølger.

### **3.2.2 Kyst bathymetri**

For at få et mere realistisk billede af vanddybderne tæt inde under kysten, er disse trukket ud fra en 205x205 m bathymetri. Strøm- og bølgeinformation er således givet på 6 x 6 km nettet, mens dybde informationer er givet i det punkt i 205m bathymetrien der ligger nærmest kysten og nærmest en af midtlinierne i 6 km boksene. I Figur 3.2 er vist et eksempel på placering af punkter.



Figur 3.2. Principskitse af 6 km boks, hvor strøm og bølger er givet i centerpunktet og 205 m boks, hvori vanddybden bestemmes



Figur 3.3. Middelstrømhastigheden (m/s) i kystzonen som beregnet med 6 km modellen samt i fjordene. Hastigheden er i Limfjorden, Roskilde Fjord og Isefjorden og Lillebæltområdet er fra de detaljerede beregninger.

### 3.3 Udvalgte fjorde

For udvalgte fjorde er der gennemført model beregninger med større opløsning. De udvalgte fjorde er:

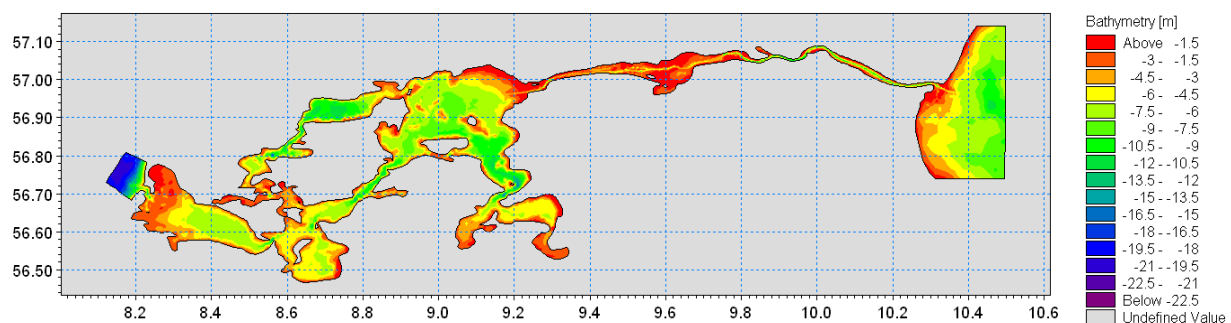
- Horsens Fjord;
- Kolding Fjord;
- Limfjorden;
- Odense Fjord;
- Roskilde Fjord og Isefjord;

- Vejle Fjord; og
- Åbenrå Fjord.

De tre model bathymetrier med større opløsning er vist i Figur 3.4 til Figur 3.6 Model bathymetrien for Lillebælt området indeholder flere af fjordene. Den horisontale projektion benyttet er længde- og breddegrad. Modellerne for de udvalgte fjorde er baseret på model systemet MIKE 21 FM. Modellen beregner den dybdemidlede strøm og stof koncentration. Modellen tager således ikke højde for eventuelle lagdelinger i fjordene, ligesom vindrevne cirkulationer kan være underestimerede, da disse typisk er 3-dimensionale fænomener.

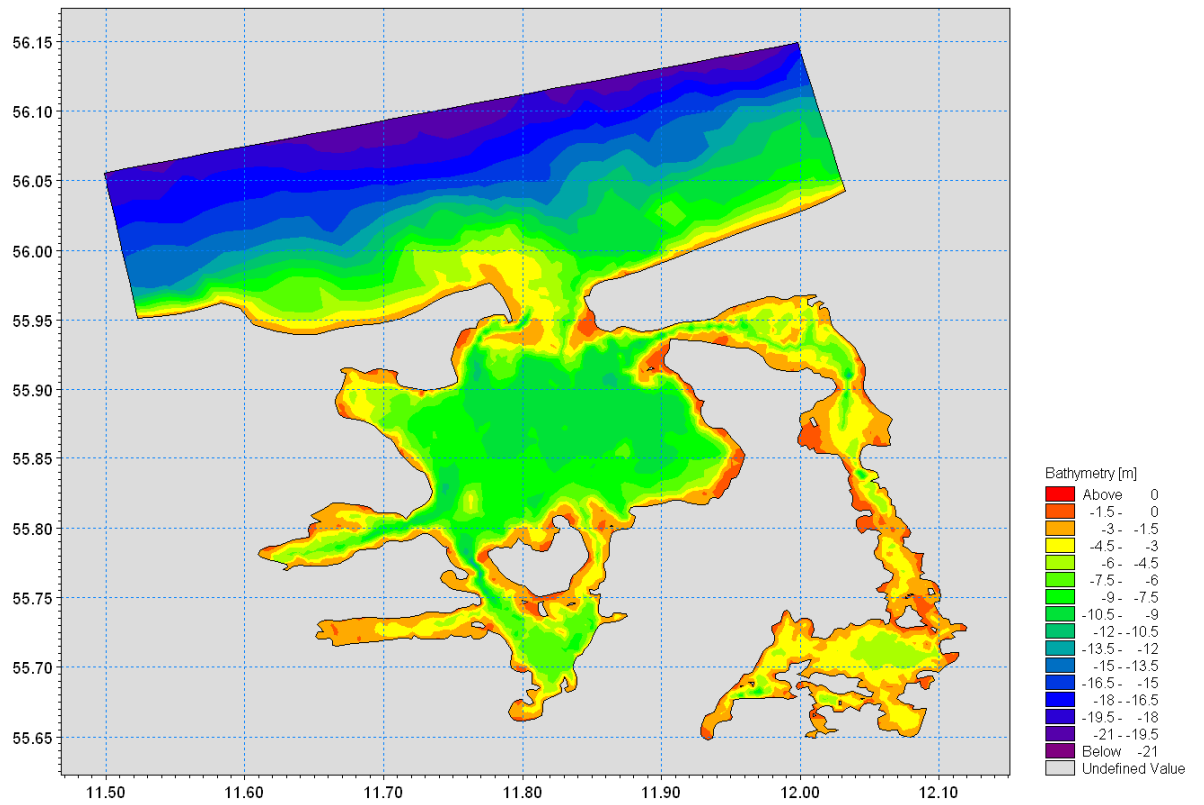
Beregningsperioden er juni til august 2005 (3 fulde måneder).

Randbetingelser til modellerne er udtrykt fra den 3-dimensionale model beskrevet i det ovenstående. I alle tilfælde er der påtrykt vandstandsrande på åbne rande.

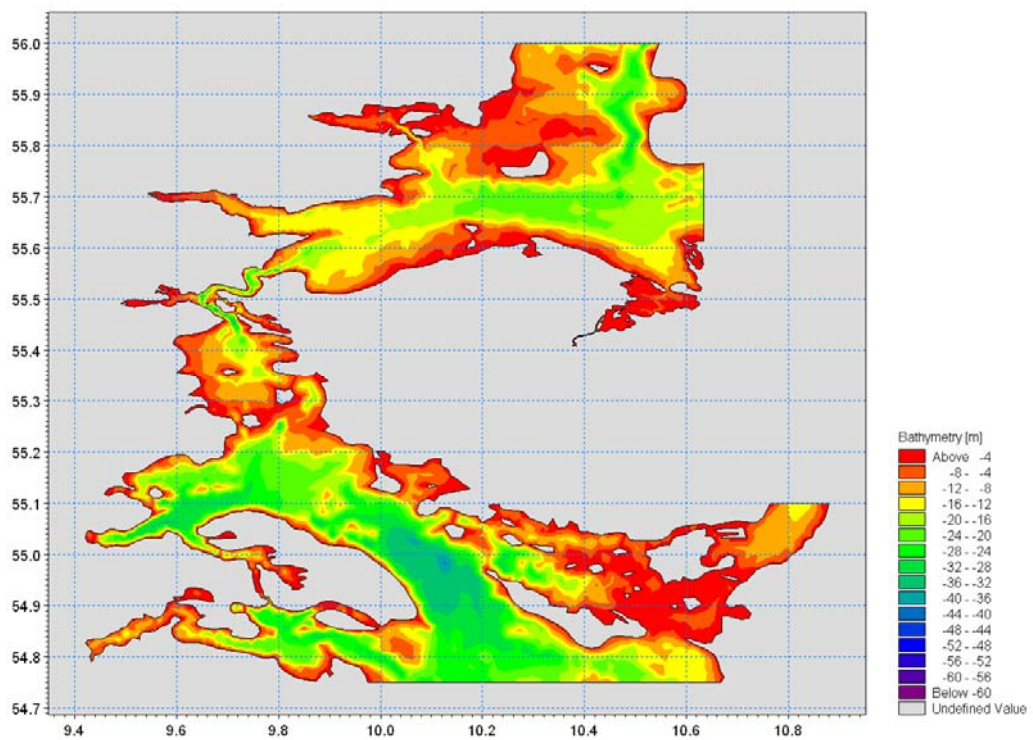


Figur 3.4 Model bathymetri for Limfjorden.





Figur 3.5 Model bathymetri for Roskilde Fjord og Isefjord.



Figur 3.6 Model bathymetri for Lillebælt, som inkluderer Horsens, Kolding, Odense, Vejle og Åbenrå Fjord.

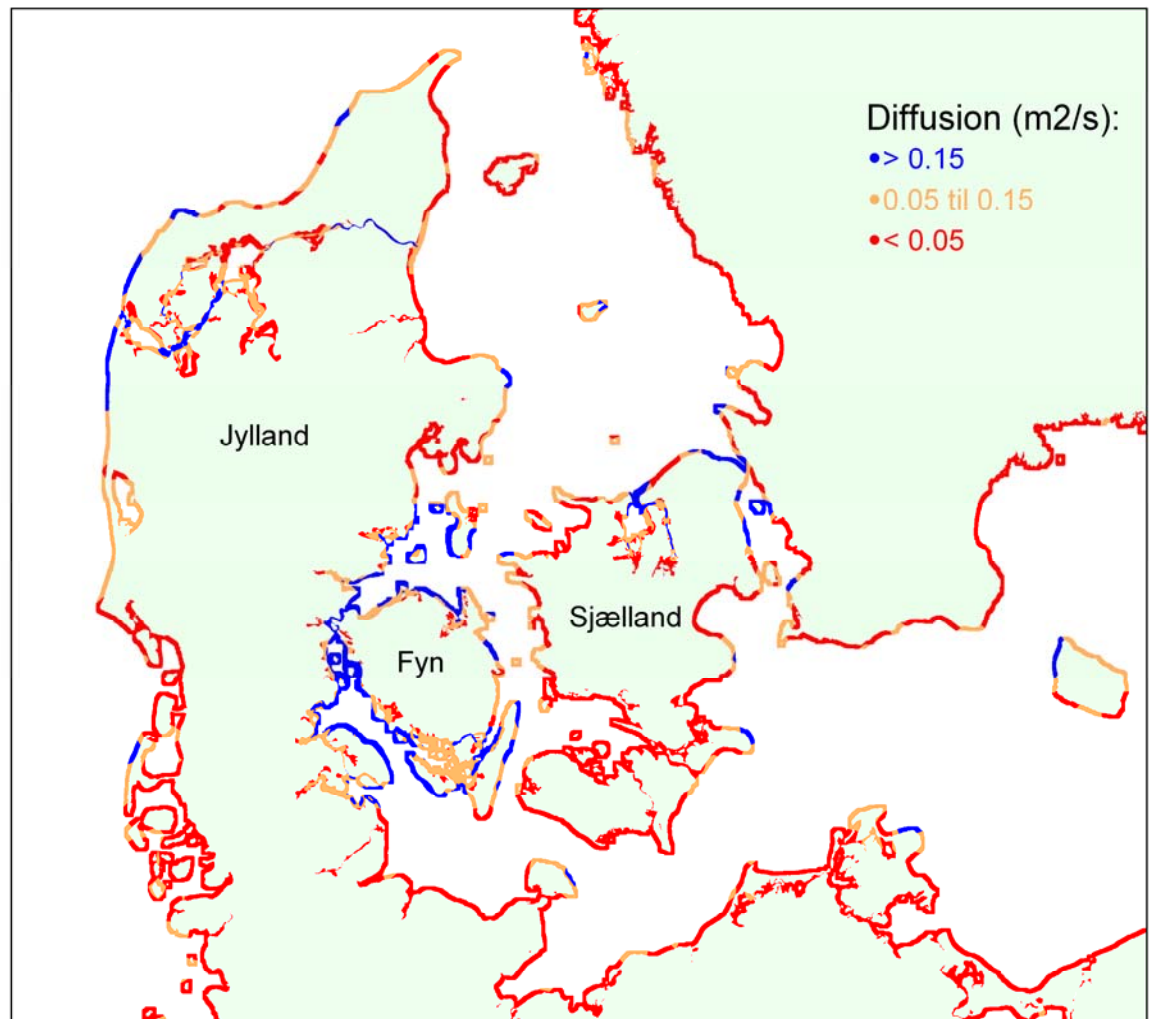
Som et eksempel på resultaterne fra modellerne er middelstrømhastigheden i kystzonen vist i Figur 3.3. I Limfjorden, Roskilde Fjord og Isefjorden og i Lillebælts området er hastighederne taget fra beregningerne med større opløsning. Fordelingen vist i Figur 4.2 kan således afvige fra fordelingen vist i de udvalgte fjorde.

## **4 RESULTATER**

I det efterfølgende er vist resultater fra beregningerne. Resultaterne er afbildet som linie med farveskala langs kysten, og viser værdien for en udledning på det pågældende sted.

### **4.1 Diffusionskoefficienter**

I Figur 4.1 er vist den beregnede diffusionskoefficient. I områder langs kysten er vist brændingszone diffusionskoefficienten, for de beregnede fjorde er vist gennemsnits værdier. Der er således tale om to forskellige beregninger, men for illustrationens skyld er disse vist på samme kort. Diffusionskoefficienten ses at variere mellem  $0 \text{ m}^2/\text{s}$  og  $0,5 \text{ m}^2/\text{s}$  (op til  $2,9 \text{ m}^2/\text{s}$  lokalt i indsnævringen i Lillebælt). De højeste værdier findes som forventet langs de åbne kyster, eksemplificeret ved Vestkysten, og de laveste værdier i mere lukkede områder, eksemplificeret ved Vadehavet.

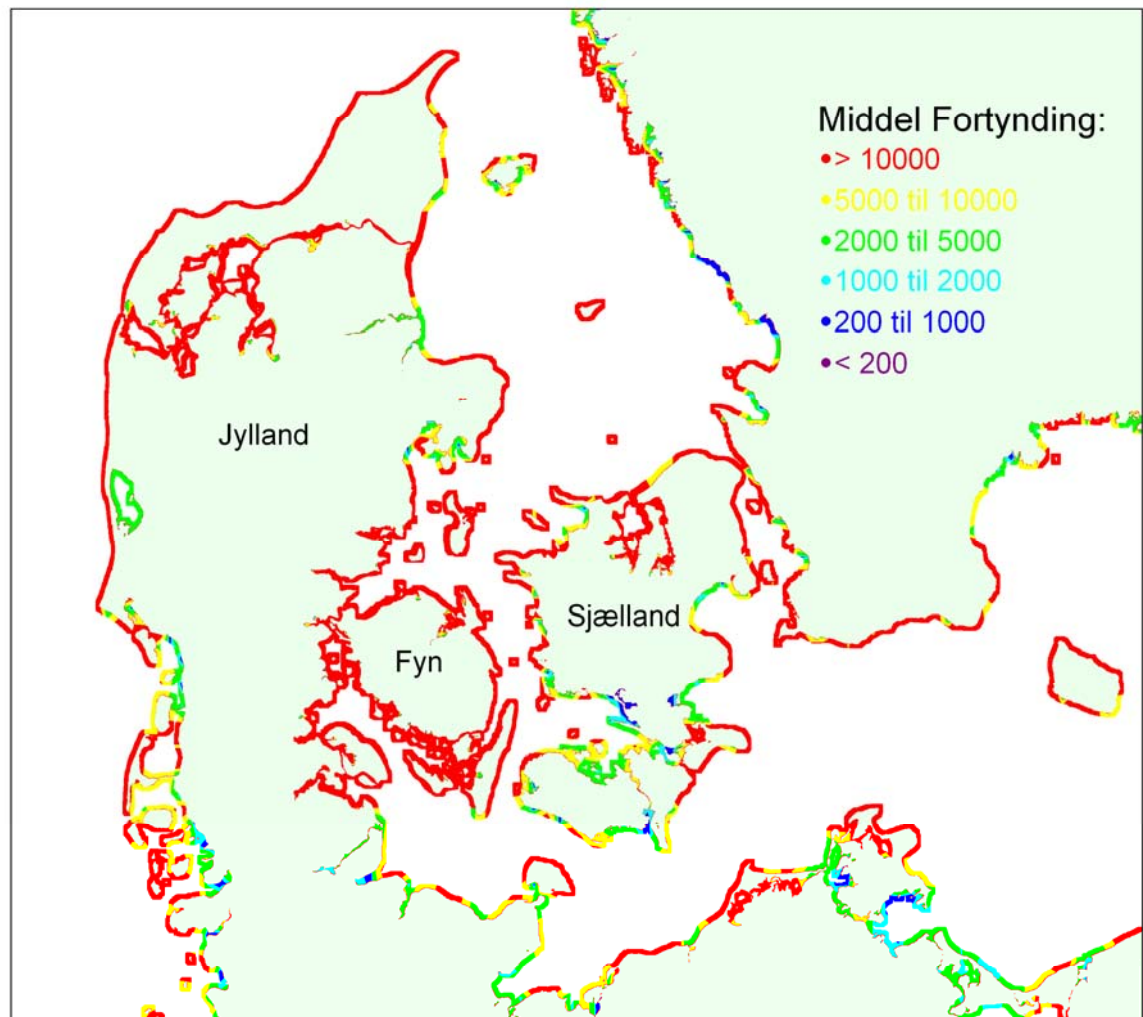


Figur 4.1. Diffusionskoefficient (m<sup>2</sup>/s) langs de danske kyster.

I et studie af fortynding ved Høfde 42 ved Thyborøn (AAU, 1977) blev diffusionen ud fra målinger estimeret til at være 0,3 m<sup>2</sup>/s, hvilket er i god overensstemmelse med de i denne undersøgelse fundne diffusioner.

## 4.2 Middelfortynding

Den beregnede middel fortynding langs kysten er vist på Figur 4.2. Som nævnt i tidligere kapitler er beregningerne foretaget for en kilde med en vandføring på 0,1 l/s og fortyndingen bestemt 50 m nedstrøms for kilden. Fortyndingen varierer mellem 0 og 291.000 (op til 4,4 10<sup>6</sup> m<sup>2</sup>/s lokalt i indsnævringen i Lillebælt). Som for diffusionen findes de højeste værdier findes som forventet langs de åbne kyster, eksemplificeret ved Vestkysten, og de laveste værdier i mere lukkede områder som Vadehavet.

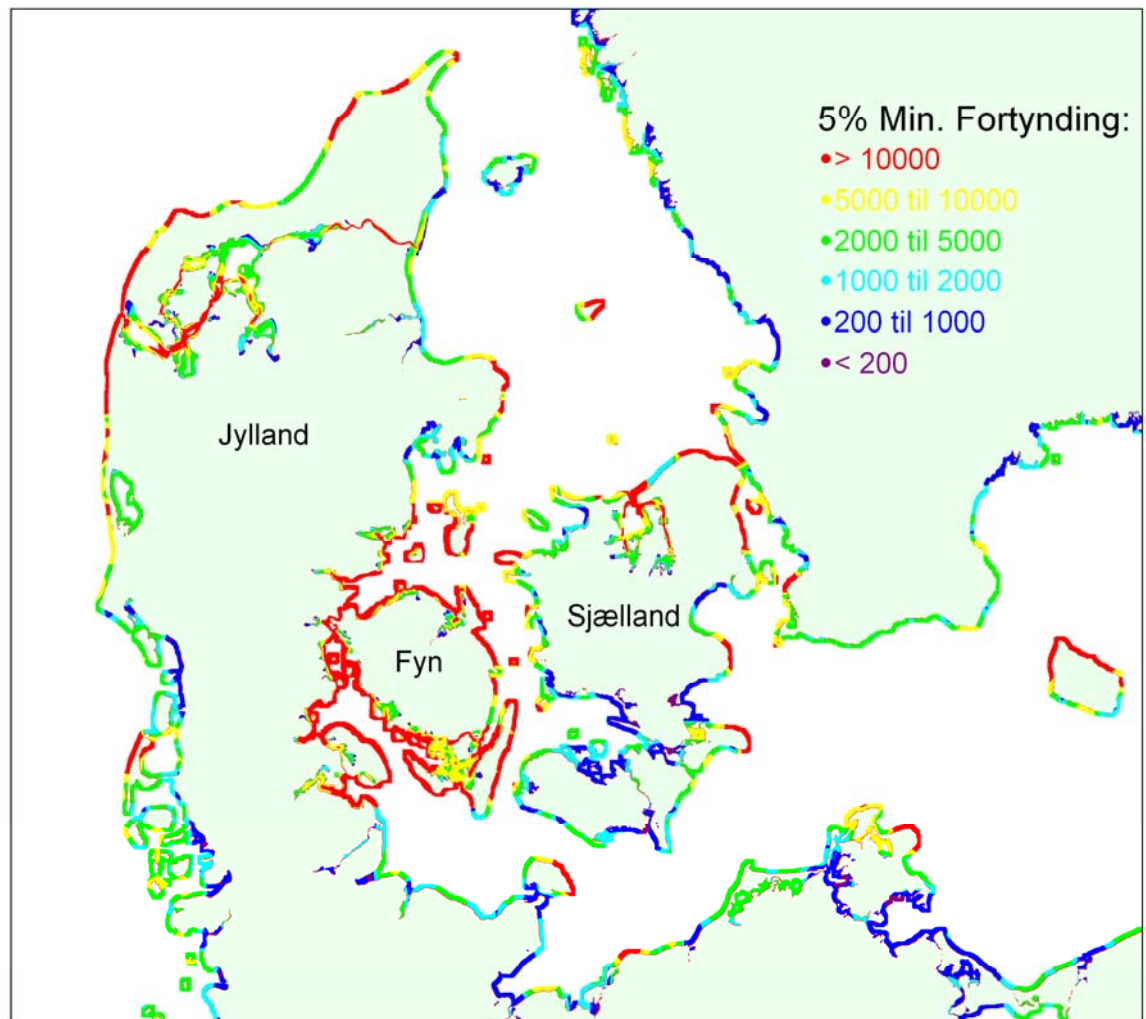


Figur 4.2. Middelfortyndingen langs de danske kyster.

I de udvalgte fjorde, hvor beregninger er gennemført med større opløsning, vil fortyndingen variere både i tid og normalt til kysten. Dette skyldes, at variationen i dybde og strømhastighed på tværs af kysten er opløst i disse områder, som antydnet f. eks. i Horsens Fjord. Middelfortyndingen for de valgte fjorde er endvidere vist i detaljer nedenfor.

### 4.3 Minimumsfraktilen (5 %) af Fortynding

For at få et indblik i fortyndingen i mere kritiske situationer er i Figur 4.3 er vist den beregnede mindste fortynding der optræder i 5 % af tiden.

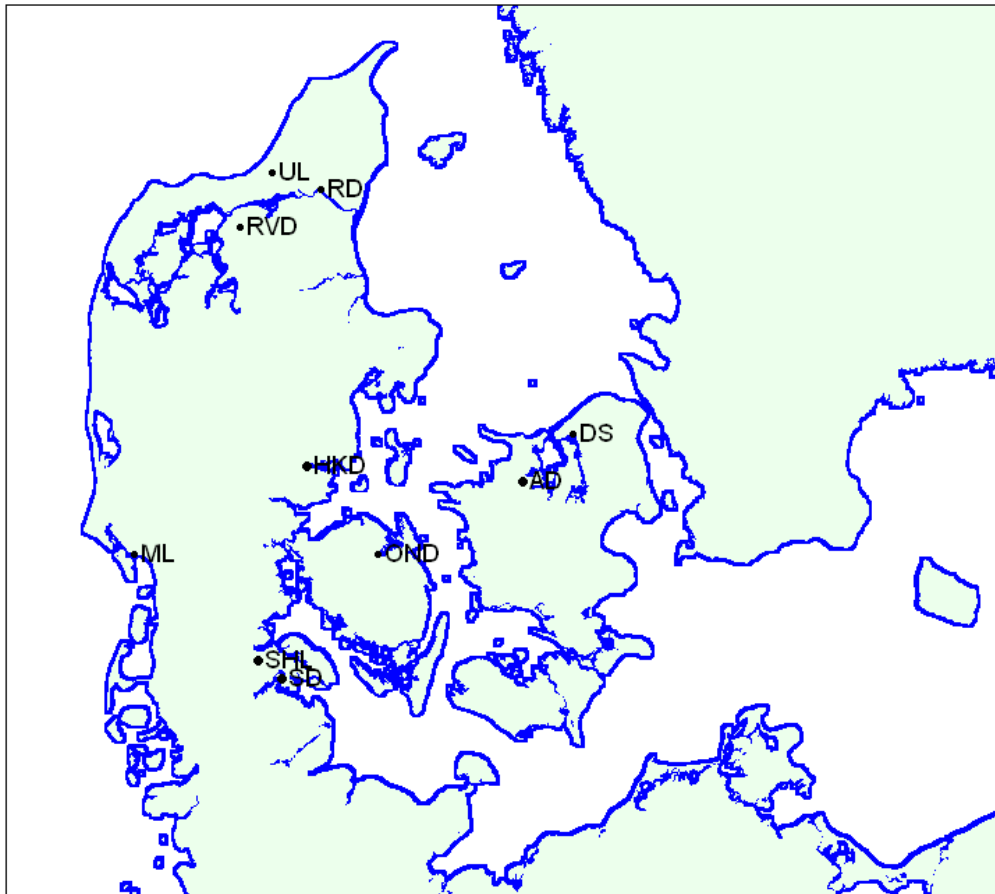


Figur 4.3. Minimumsfraktilen (5 %) af fortyndingen.

#### 4.4 **Fortyndingen i fjordene**

I de udvalgte fjordområder er placeret et antal punktkilder, svarende til mulige udsivningspunkter fra land deponier. De betragtede kilder er vist i Figur 4.4.

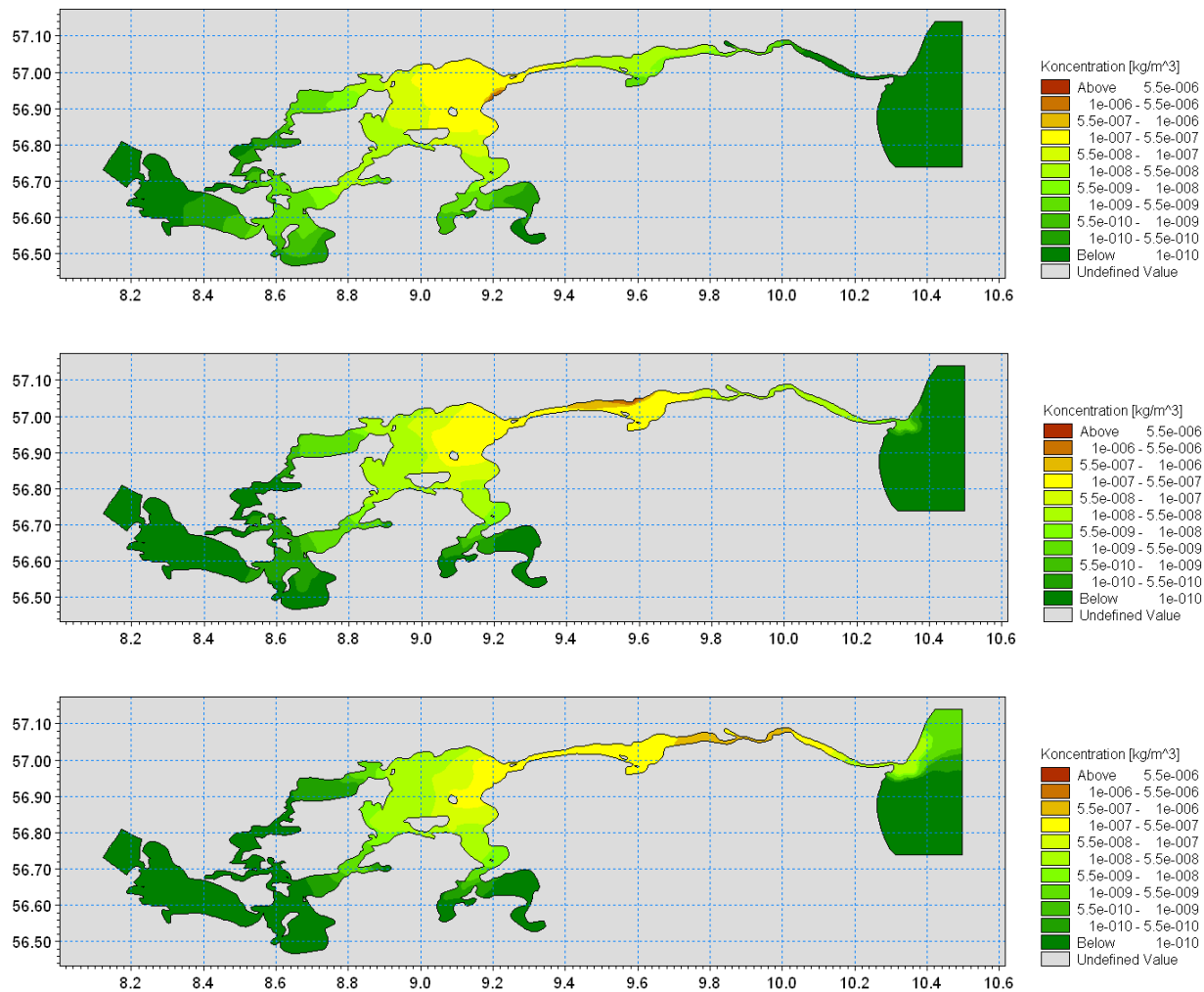




Figur 4.4. Placering af kilder. RenoVest Deponeringsanlæg (RVD); Rærup deponi (RD); Udholm Lossplads (UL); Audebo deponeringsanlæg (AD); Det Danske Stålvalseværk A/S (DS); Horsens Kommunes Deponeringsanlæg (HKD); Skodsbøl Deponeringsanlæg (SD); Sdr. Hostrup Losseplads (SHL); Odense Nord Deponeringsanlæg (OND); og Måde Losseplads (ML).

Da de specificerede kilder er placeret på land, nogle i betragtelig afstand fra kysten, er de i spredningsberegningerne skønsomt flyttet ud til den nærmeste kyst i de udvalgte fjorde. Måde Losseplads er ikke placeret nær en af de udvalgte fjorde. Af denne årsag er kilden ikke inkluderet i spredningsberegningerne. Information omkring fortynding ved Måde Losseplads kan findes i de tidligere viste figurer i rapporten.

Beregnet fordeling af middelkoncentration i beregningsperioden i Limfjorden for hver af de tre kilder er vist i Figur 4.5. Koncentrationen er størst nær kilden og aftager med afstanden fra kilden. Ved kilden er koncentrationen mindre end kildens koncentration. Dette skyldes både den fysiske initiale fortynding og en numerisk fortynding.

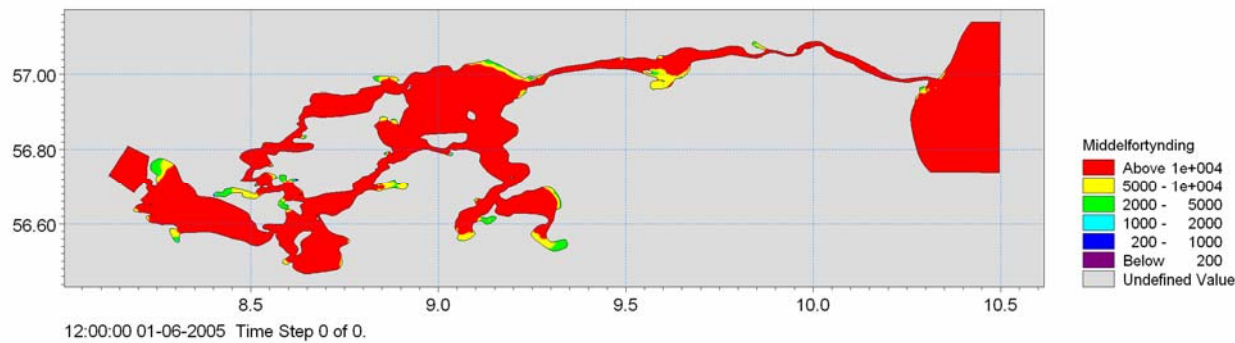


Figur 4.5. Middelkoncentration for hver af de tre kilder: RVD, UL og RD; i Limfjorden

Fortyningen af stoffet fra de tre kilder er bestemt, se Figur 4.6. Fortyning beregnes som den reciproke værdi af middelkoncentration i Limfjorden, da kildens koncentration er 1 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Denne fortyning øges med afstanden fra kilden. I alle tre tilfælde øges fortyning i en begrænset afstand fra kilden i Limfjorden. Fortyningen inkluderer både den initiale fortyning, dvs. opblanding over dybden og den videre fortyning, når stoffet transporteres væk fra kilden. Den lokale fortyning kan kun bestemmes i hele fjorden ud fra de hydrodynamiske parametre. Denne fortyning er vist i Figur 4.6. Fortyningen er også vist i Figur 4.2.

Det bør bemærkes at da koncentrationen i afstand fra kilden nærmer sig nul eller en baggrundsværdi vil den beregnede fortyning blive meget stor. I områder langt fra kilden er disse derfor nærmere udtryk for at transporten fra de anvendte kilder til de pågældende områder er små end at strømningsforholdene i området sikrer en stor fortyning generelt. De viste fortyninger er derfor repræsentative for områderne i nærheden af udledningerne. En bedre dækning kan opnås ved at anvende et langt større antal kilder, fordelt langs kysterne.



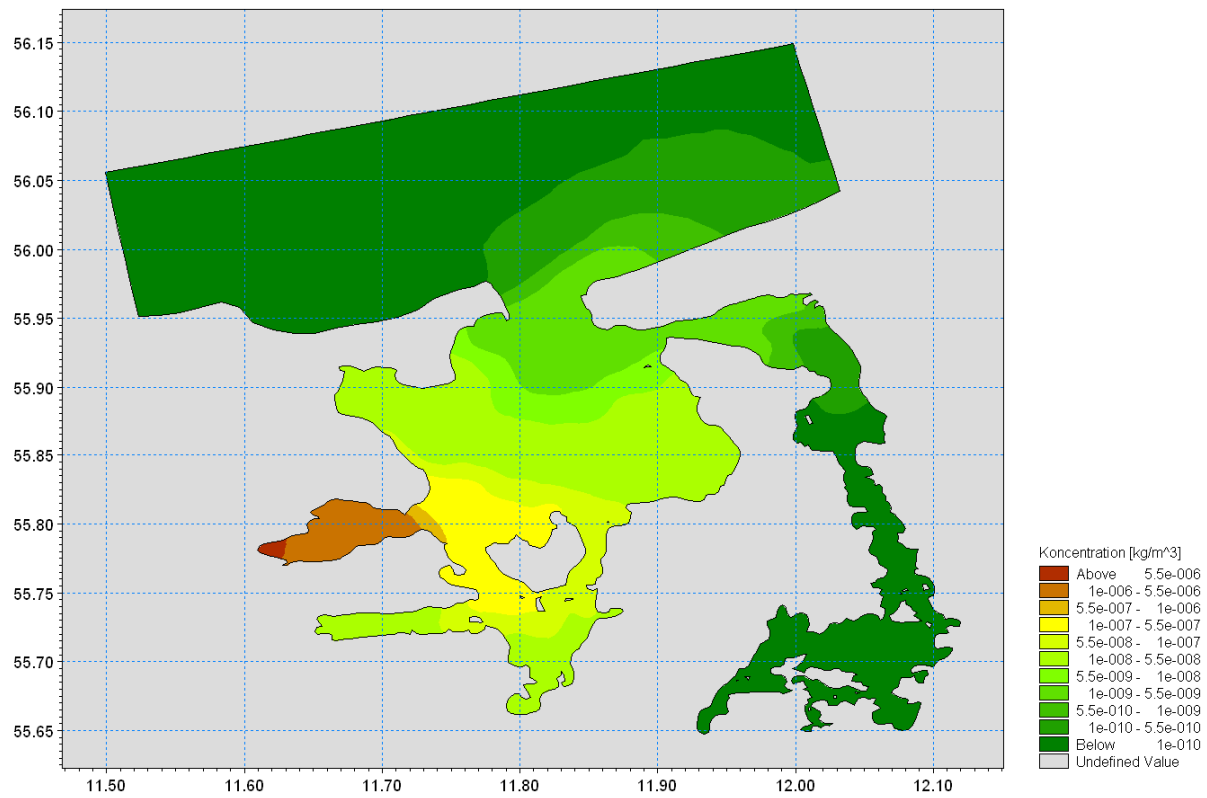


Figur 4.6 Middelfortynding af kilder i Limfjorden

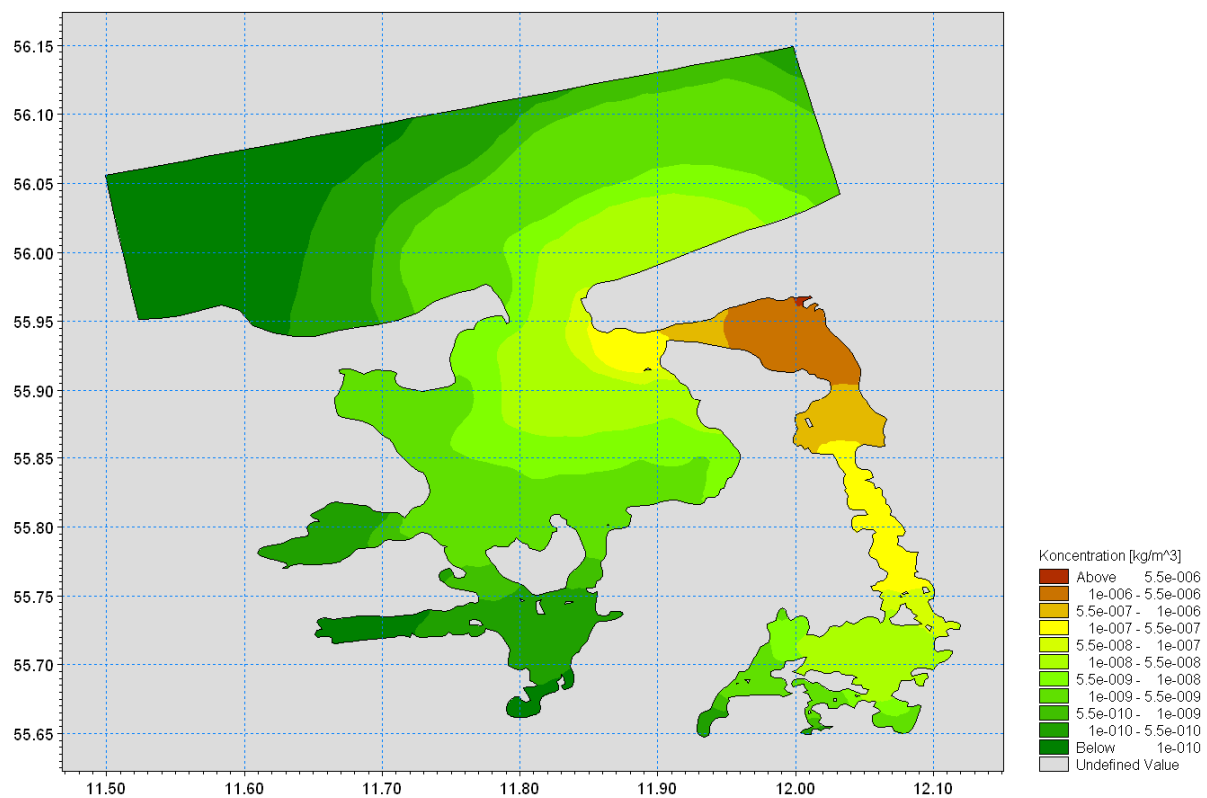
I ,Figur 4.7, Figur 4.8 og Figur 4.9 er vist beregnet fordeling af henholdsvis middelkoncentration for hver af de to kilder og fortynding i Roskilde Fjord og Isefjorden.

Middelkoncentration og fortynding i Lillebælt området er vist i Figur 4.10 og Figur 4.11. Da de fire kilder er relativt isolerede, og således ikke påvirker hinandens koncentrationsfelter betydeligt, er koncentrationsfelterne adderet inden præsentationen.

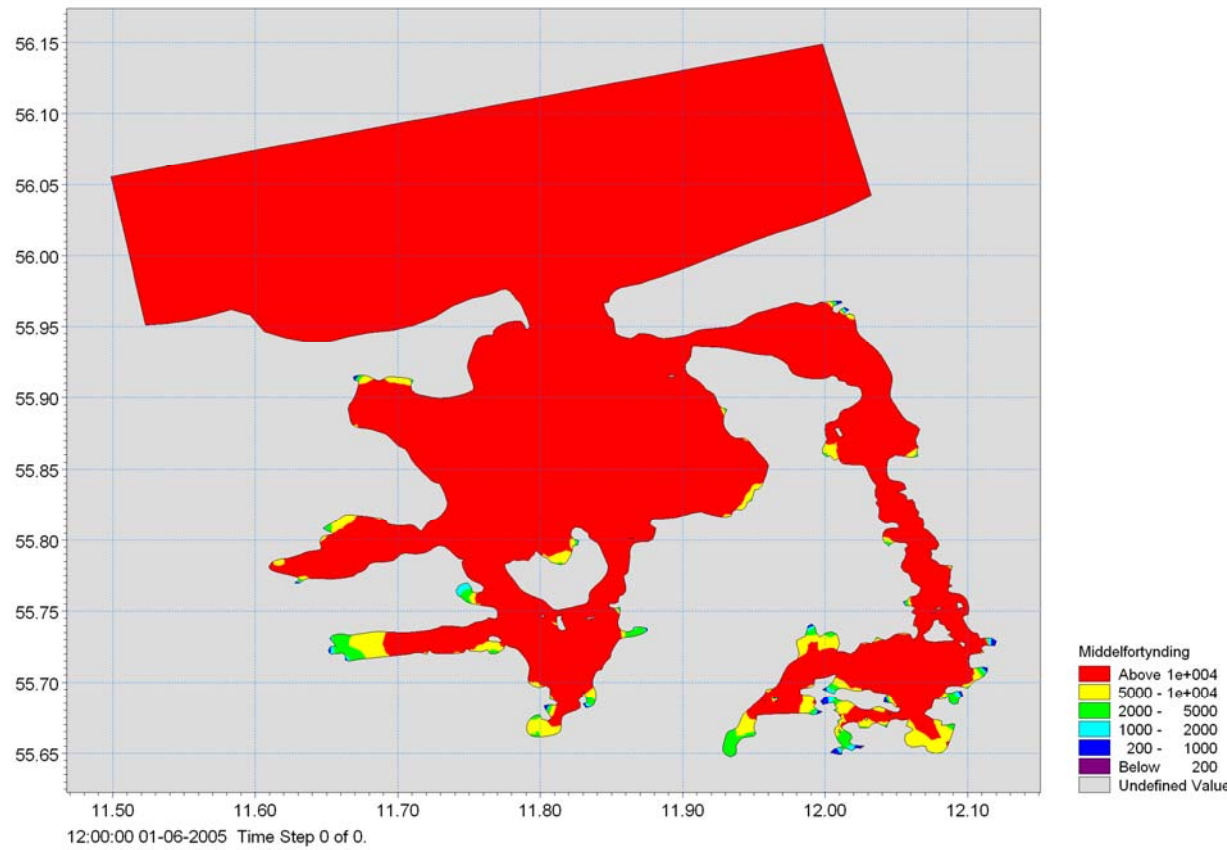
Resultater fra 5% minimums fortynding er inkluderet i Figur 4.3.



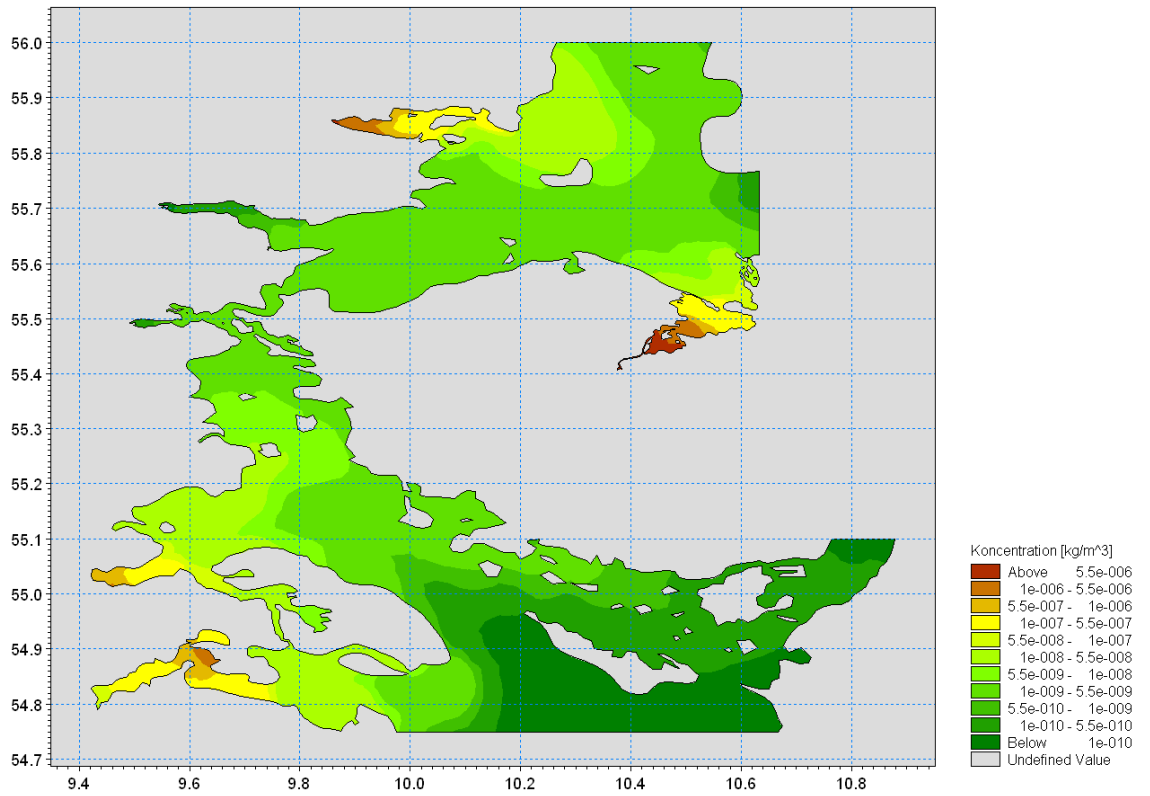
Figur 4.7. Middelkoncentration med kilden AD i Roskilde Fjord.



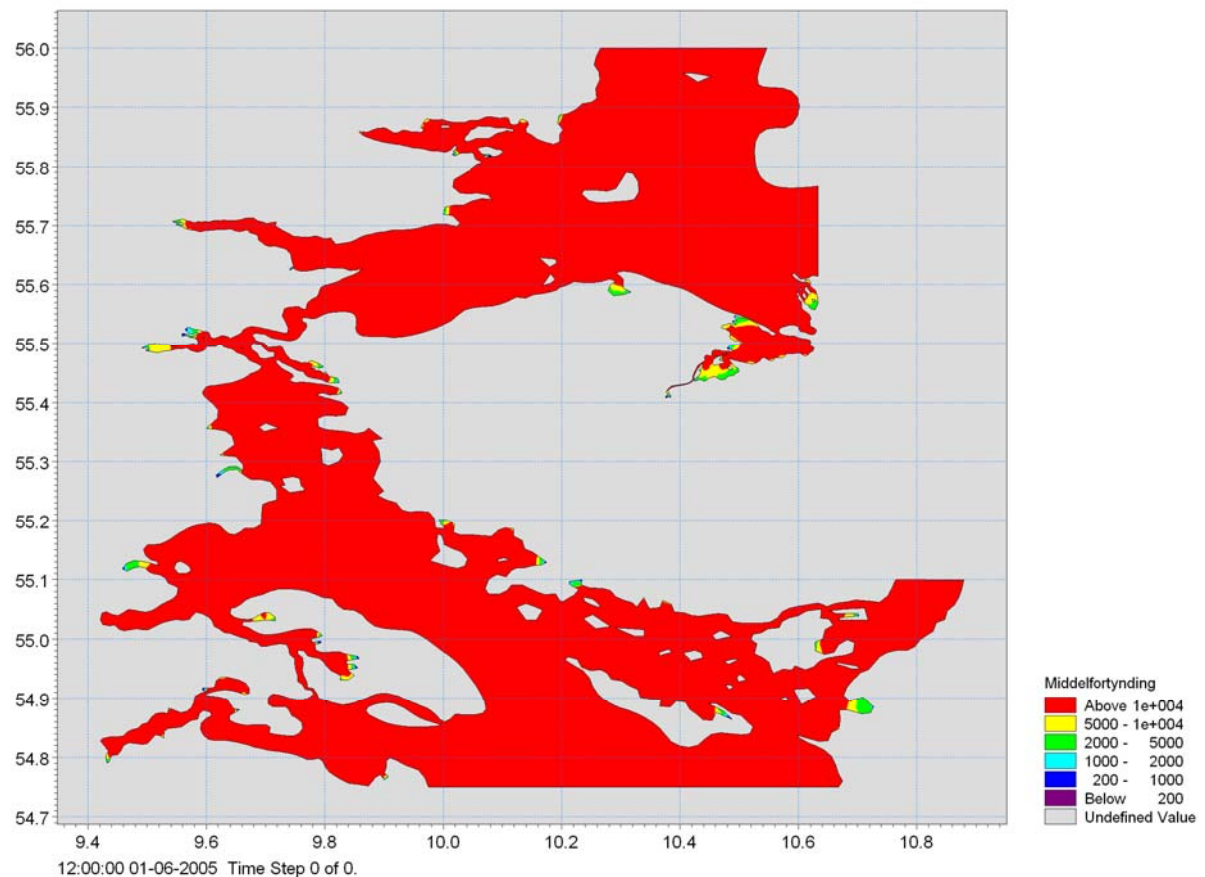
Figur 4.8. Middelkoncentration med kilden DS i Isefjord



Figur 4.9 Middelfortynding af kilder i Roskilde Fjord og Isefjord



Figur 4.10. Middelkoncentration i Odense Fjord, Fredericia, Kolding Fjord og Sønderborg Fjord



Figur 4.11 Middelfortynding i fra kilder i Odense Fjord, Fredericia, Kolding Fjord og Sønderborg Fjord

## 5 SAMMENLIGNING MED TIDLIGERE UNDERSØGELSER

DHI har tidligere udført fortyndingsberegninger bl.a. ved Kærgård Plantage og Høfde 42 ved Cheminova, begge på den jyske vestkyst.

Ved Kærgård Plantage var beregningerne rettet mod at undersøge fortyndingen fra udsivende perkolat. Beregningerne blev udført med en meget detaljeret model, for at kunne beskrive bølgeinducerede strømme langs kysten. Beregningerne viste en mindste fortynding af en udledning på 6.8 l/s på mellem 400 - 1000 gange og en mindste fortynding målt 2000m nedstrøms kilden på 4000 - 1000 gange. Da udledningen i dette tilfælde er ca. 68 gange større end standardudledningen anvendt heri, vil den mindste fortynding af standardudledningen være cirka 27200 - 68000 gange i dette tilfælde, hvilket er indenfor den her angivne størrelsesorden.

Ved høfde 42 blev fortyndingen dels fra Cheminovas 2 havledninger dels udsivning fra Høfde 42 depotet gennem havstokken vurderet. I beregninger for udsivningen fra høfde 42 med en model med 100m opløsning blev årsmiddelfortyndingen af en udledning va-

rierende mellem 0.6 - 1.4 l/s fundet til cirka 6000 gange i en afstand på 500 m fra depotet. Den minimale fortynding blev fundet til cirka 3000 gange. Da fortyndingen er omvendt proportional med udledningens størrelse vil standardudledningen i dette tilfælde for tyndes cirka 36000 – 84000 gange.

Ved Høfde 42 blev der samtidig foretaget beregninger på udledning via Cheminovas havledning. Årsmiddelfortyndingen for en udledning på cirka 50 l/s målt 500 m fra udløbet, blev beregnet til cirka 1650 gange. Omregnet til standardudledningen vil denne fortyndes ca.  $7 \cdot 10^5$  gange hvis den var udledt gennem havledningen. Altså cirka 10 gange større fortynding end ved udledning i havstokken.

## 6 DISKUSSION

I dette studie er beregnet den lokale fortynding indenfor brændingszonen af udsivende perkolat fra landbaserede deponier langs de åbne kyster i de danske farvande samt beregninger af fortyndingen i nogle udvalgte fjorde for nogle repræsentative kilder.

Beregningerne for de åbne kystområder er foretaget ved hjælp af et forenklet udtryk hvori der indgår vanddybden nær kysten, den generelle strøm langs kysten samt bølgepåvirkningen. Den beregnede fortynding kan opfattes som den fortynding man opnår i strandlinien 50m nedstrøms udsivningspunktet. Beregningerne er lavet for hver 6te km langs kysten. Man skal derfor være opmærksom på at lokale forhold kan have indflydelse på den aktuelle fortynding i forhold til den beregnede, især langs stærkt varierende kyster.

For fjordene er beregningerne lavet ved hjælp af en egentlig spredningsberegning, hvor spredningen af et udledt stof følges gennem tiden. For at holde beregningsarbejdet indenfor de givne rammer er det valgt at benytte en dybdemidlet model, som kan give en relativt fin opløsning i rummet, og kan derfor beskrive effekten af lokale ændringer i kystlinie og vanddybde. Begrænsningerne i den valgte metode vurderes at ligge primært i at modellen på grund af dybdemidlingen ikke kan beskrive effekter af lagdelinger. Danske fjorde vil ofte være lagdelte på grund af ferskvandsudstrømning eller på grund af lagdeling i farvandet ud for munden. Dette kan på den ene side betyde at fortyndingen begrænses, da kun det øvre vandvolumen er til rådighed, på den anden side vil spredningen ofte øges da det øvre lag bliver mere labilt og er mere udsat for vindens påvirkning. I det tilfælde hvor densiteten af perkolatet er mindre end vandområdet vil den lodrette fortynding endvidere formindskes, således der går længere tid inden man opnår fuld opblanding. På grund af udledningens ringe størrelse vil dette dog sandsynligvis være en lokal effekt.

Ved den jyske vestkyst opstår der i perioder såkaldte bølgestrømme på grund af bølger, der bryder med en vinkel på kysten. Disse strømme kan være forholdsvis kraftige og er koncentreret indenfor revlerne inde under kysten. Undersøgelser ved Kærgård Plantage og Thyborøn viser, at disse kan være af betydning for fortyndingen. De er dog ikke medtaget i denne sammenhæng på grund af den relativt grove opløsning, som er benyttet. Den bølgedrevne strøm vil øge fortyndingen og beregnede fortyndinger i denne rap-

port er således i denne sammenhæng at betragte som konservative estimater for fortyndingen, da bølgestrømmen øger fortyndingen. I store dele af det betragtede område i denne rapport er bølgedrevne strømme ikke væsentlige.

Omvendt vil koncentrationen i vandområdet blive højere end beregnet ud fra de estimerede fortyndingsfaktorer, hvis der sker en addition som følge af, at der sker udsivning fra flere kilder, som ligger relativt tæt på hinanden. Dette kan betyde at forudsætningen om, at det udsivende perkolat opblandes i upåvirket havvand ikke holder.

## 6.1 Vurdering af andre udledninger.

De viste beregninger er udført for en såkaldt standardudledning, svarende til en repræsentativ udsivning fra et 100 m x 100 m område, hvilket udgør 0,1 l/s. Da fortyndingsberegningerne ovenfor, groft set udføres ved at beregne forholdet mellem denne udledning og det volumen vand der er til rådighed i recipienten, vil fortyndingen afhænge af den aktuelle størrelse af udledningen.

Fortyndingen for en anden størrelse af udledningen kan, så længe udledningen er lille set i forhold til vandvoluminet i recipienten, beregnes som vist nedenfor.

Standardudledningens vandføring sættes til  $q$ , den aktuelle udledning til  $q_1$ . Som vist i afsnit 2, sættes vandføringen i recipienten til  $Q$ . For nemheds skyld antages koncentrationerne i de to udledninger ens til  $C_0$ . Den aktuelle fortynding kan nu beregnes af massebalancen

$$qC_0 = Qc \quad (6.1)$$

Hvoraf fortyndingen  $S$  ses at være

$$S = \frac{C_0}{C} = \frac{Q}{q} \quad (6.2)$$

For en ændret udledning  $q_1$  fås tilsvarende at fortyndingen  $S_1$  gives som

$$S_1 = \frac{Q}{q_1} \quad (6.3)$$

Dvs. fortyndingen for den ændrede udledning bliver

$$S_1 = S \frac{q}{q_1} \quad (6.4)$$

Den ændrede fortynding ses at være proportional med forholdet mellem udledningerne. Dette gælder som nævnt så længe  $q$  er lille i forhold til  $Q$ . Ved større udledninger vil strømningerne i recipienten påvirkes af udledningen og fortyndingen kan ikke længere beregnes på simpel vis.



## **7 LITTERATUR**

Okubo, A (1967) The effect of shear in an oscillatory current on horizontal diffusion from an instantaneous source. *Oceanology and limnology* **1**, 194-204.

Taylor, G. I. (1953) Dispersion of matter in turbulent flow through a pipe. *Proceedings of the Royal Society London*, **A223**, 446-468.

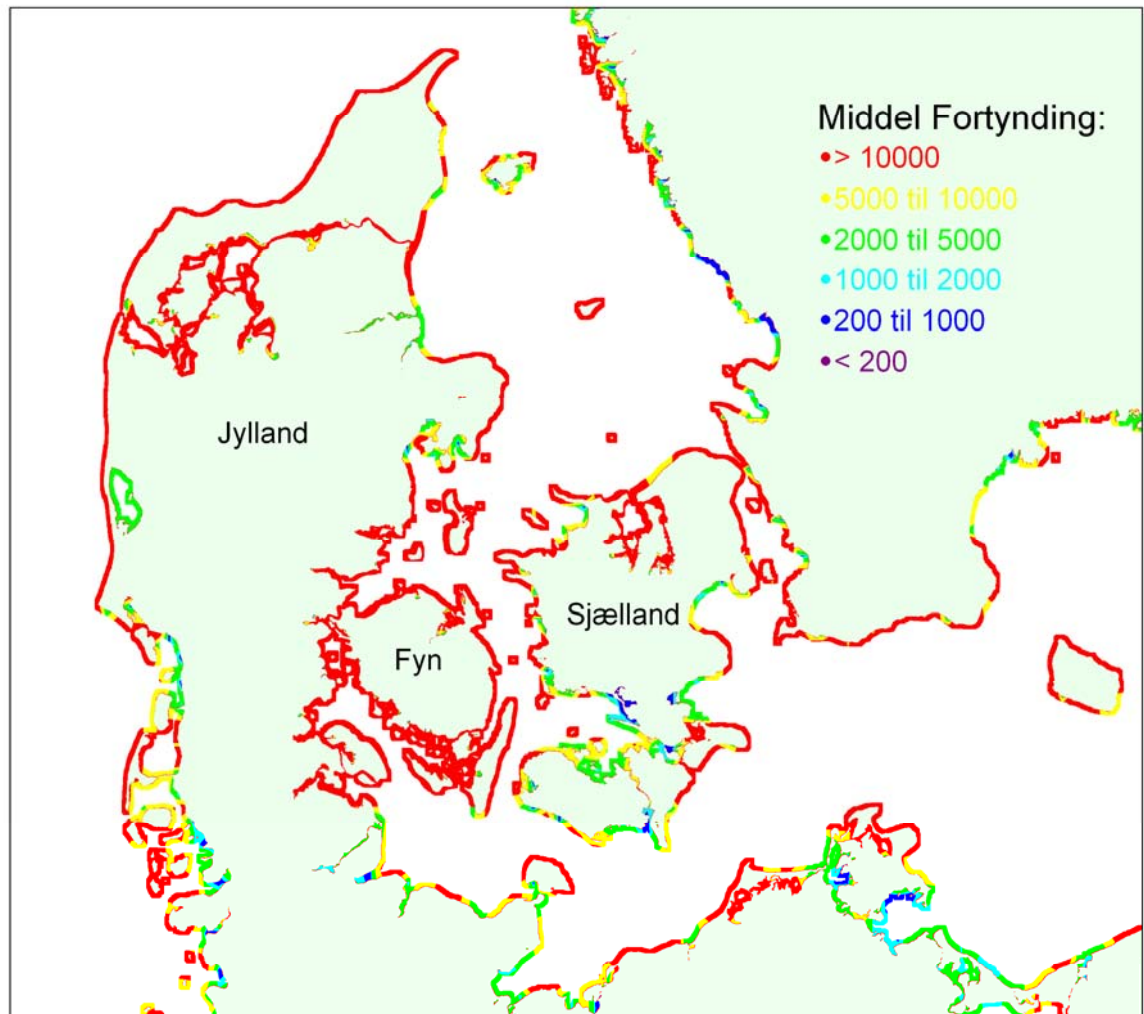
Fischer, H. B., List, E. J., Koh, R. C. Y., Imberger, J. and Brooks, N. H. (1979) *Mixing in Inland and Coastal Waters*. Academic Pres, N. Y.

AAU (1977). *Rapport om sporstofundersøgelser for Agger udløbsledning*. Lab. f. Hydraulik og Havnebygning, Aalborg Universitet.

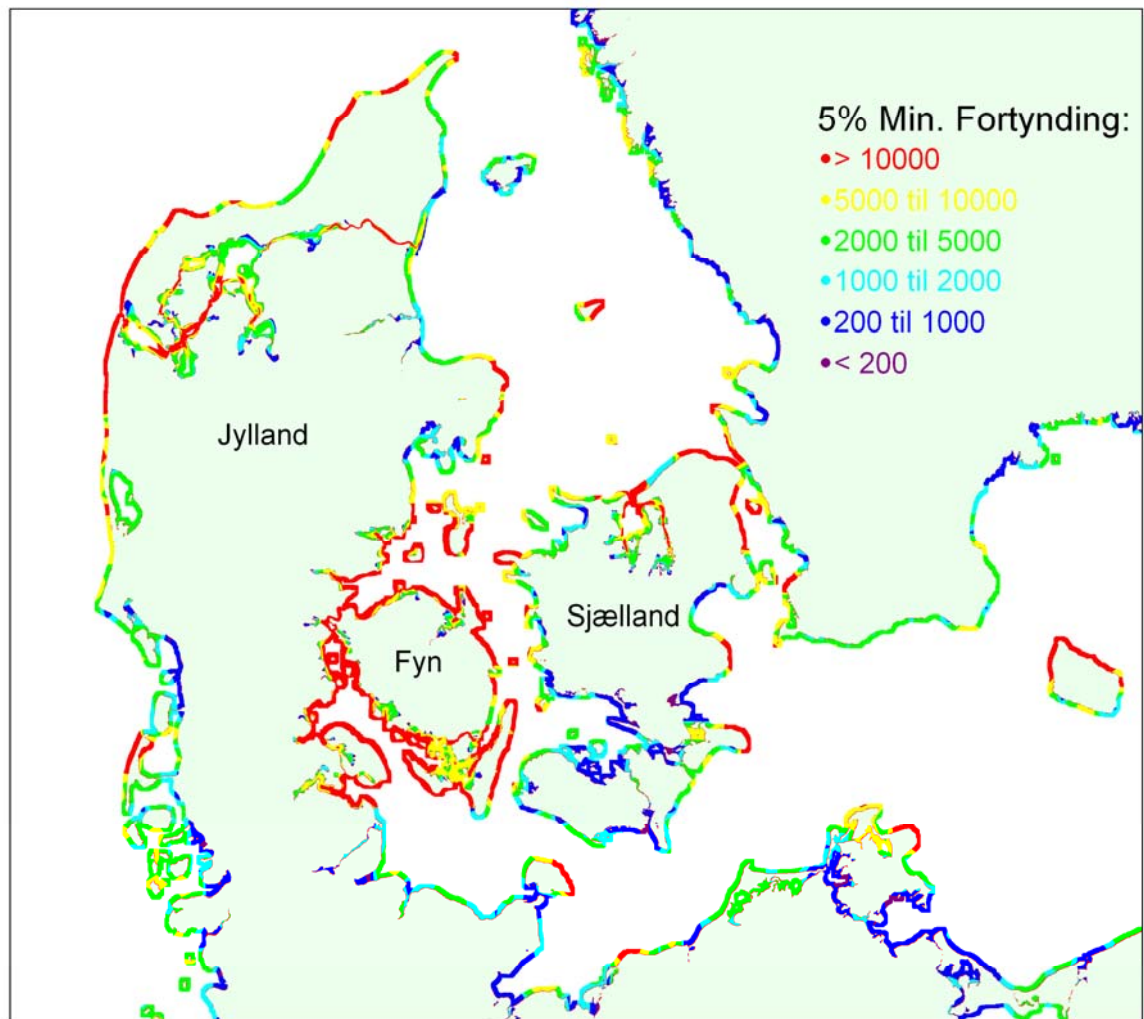
Isotopcentralen (1982). *Spredning af spildevand udledt fra A/S Cheminova i Vesterhavet*. Rapport fra Isotopcentralen.

DHI (2004). *Spredningsberegninger ved Cheminova*. Rapport udarbejdet for Ringkøbing Amt.

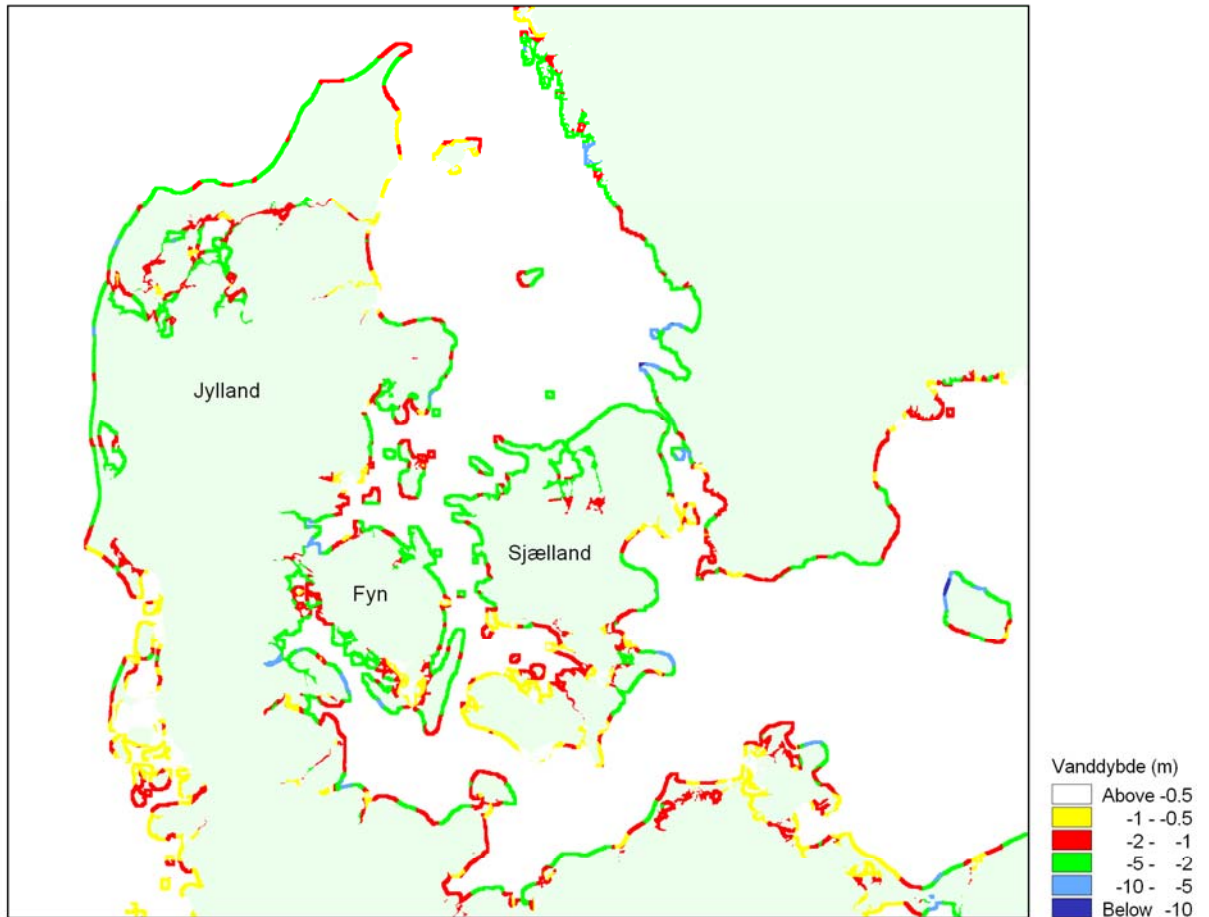
**B I L A G**



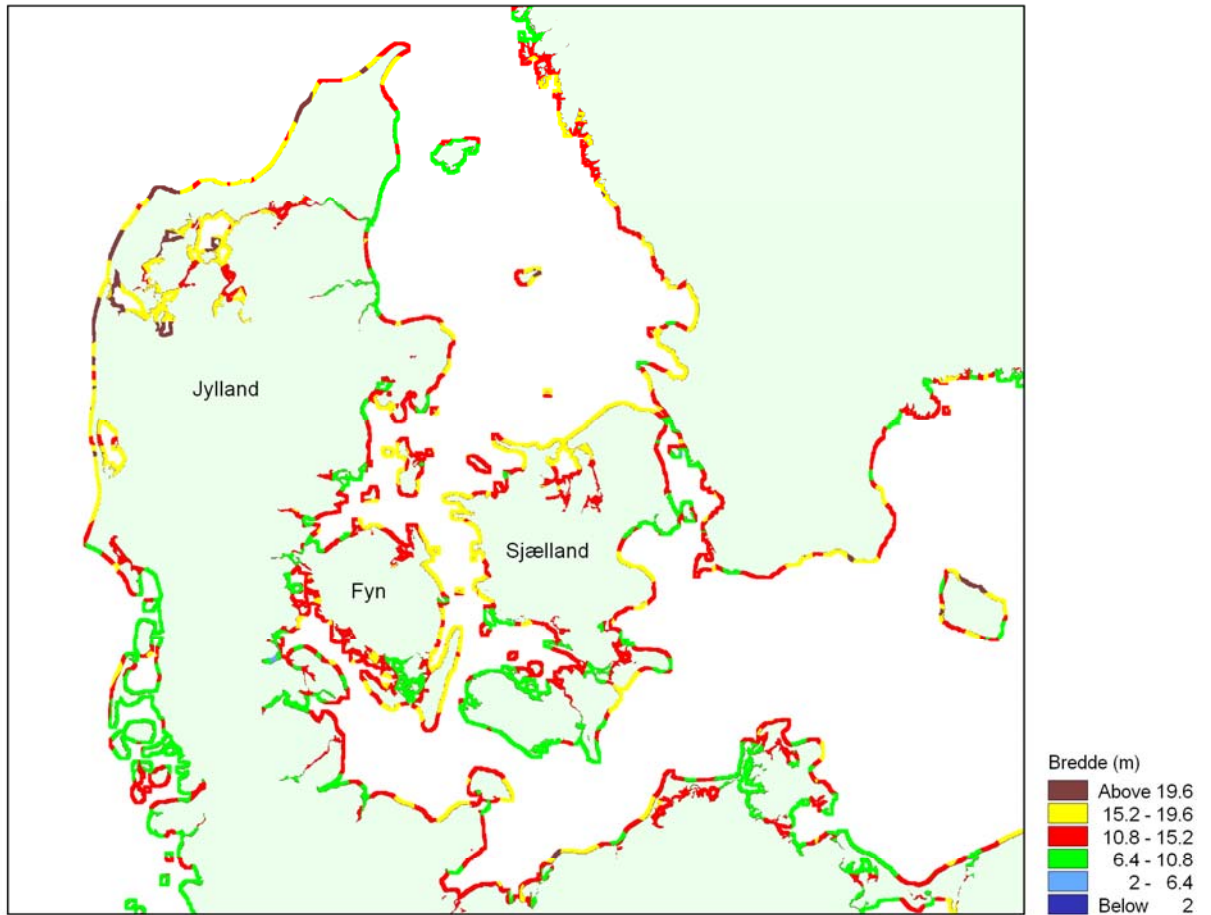
### A.1. Middelfortynding



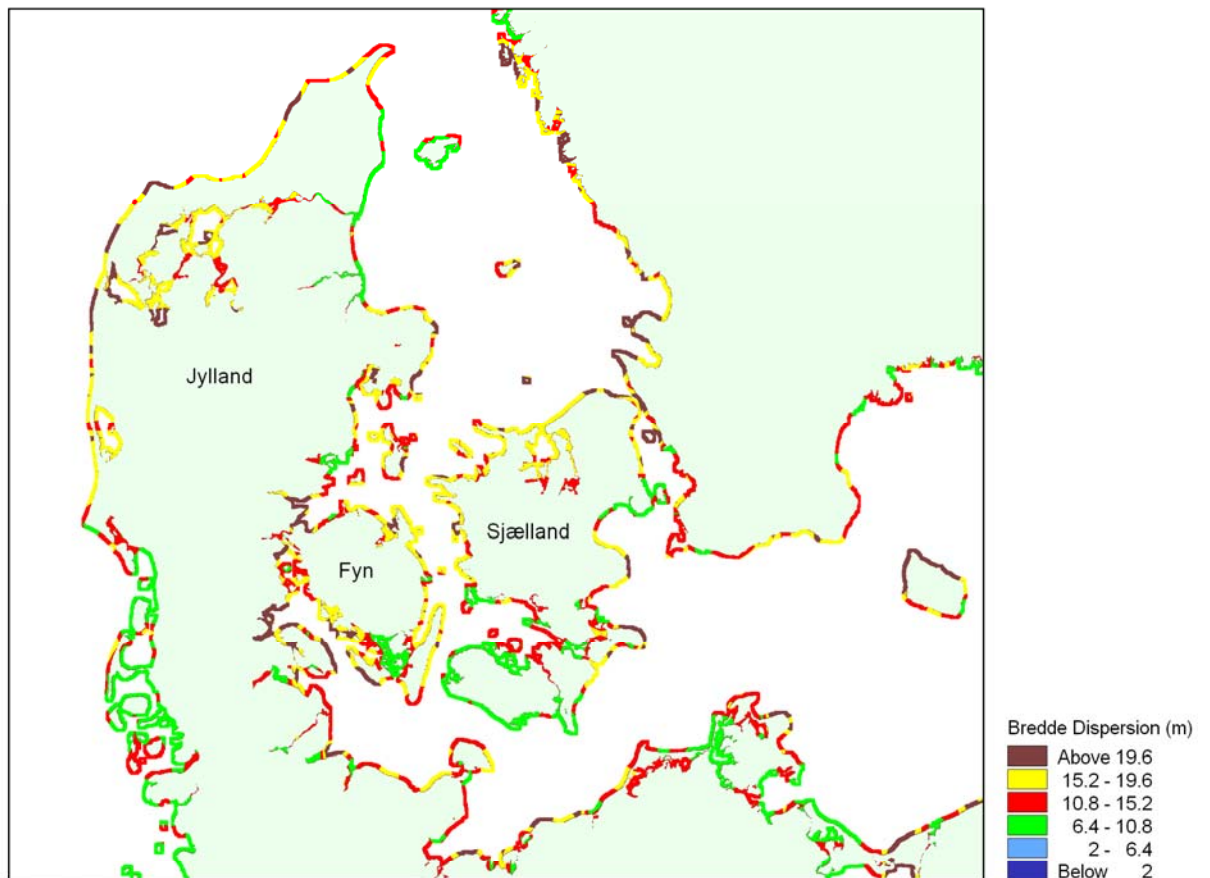
## A.2. 5 % minimumsforthynding



### A.3. Den kystnære vanddybde

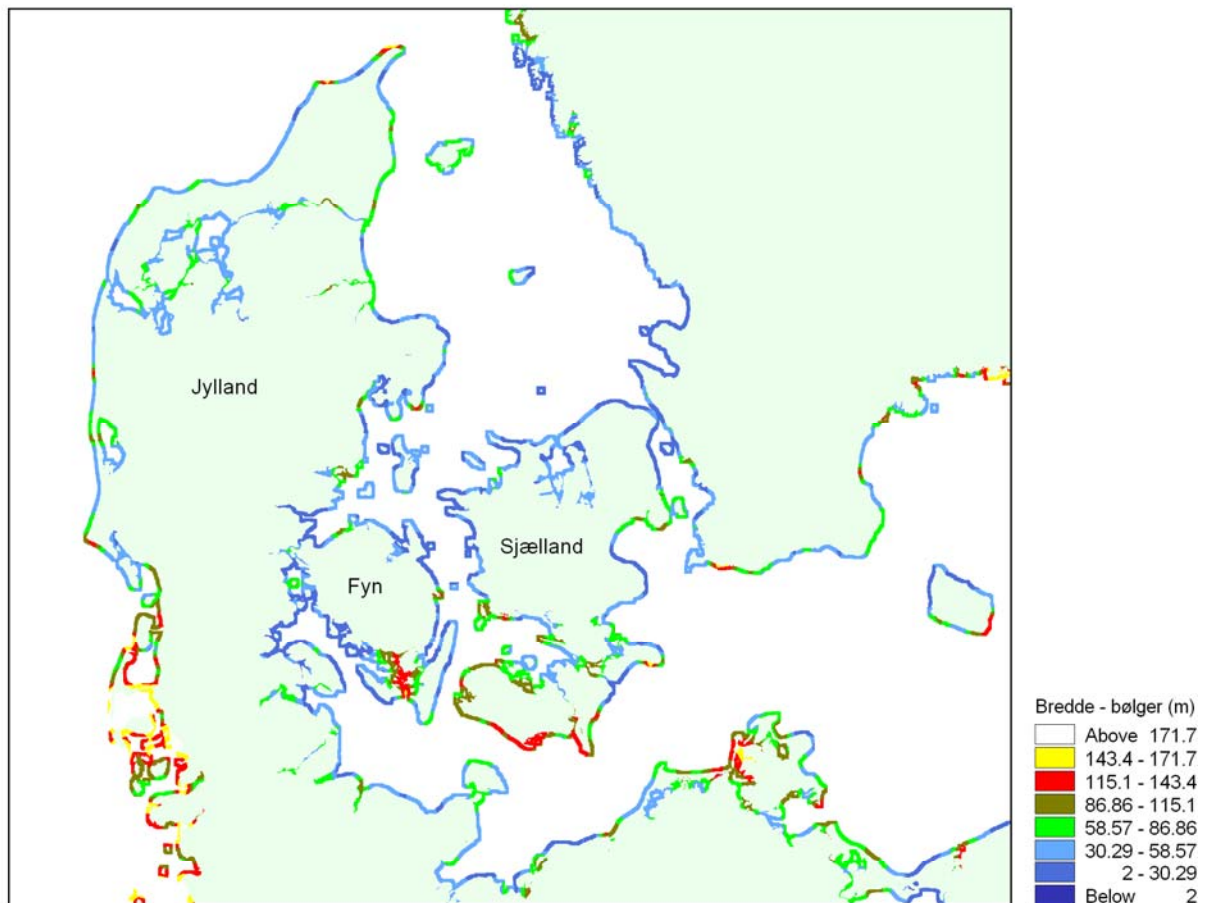


#### A.4. Beregnet bredde af fortyndingszonen



#### A.5. Bredde af dispersionsfanen





#### A.6. Bredde af brændingszonen (se afsnit 2 for definition)