

# Marina City

---

Sedimentspredning for klappads  
ved Trelde Næs

Bilag 6 til klapanøgning  
/ Bilag 13 til Miljörappört

---

**KOLDING KOMMUNE**

---


19. MARTS 2020

# Indhold

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Fremgangsmåde og metode</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Forhold ved klappads</b>	<b>4</b>
3.1	Strømforhold	4
<b>4</b>	<b>Sedimentspecifikationer</b>	<b>6</b>
4.1	Kornkurver	7
4.2	Miljøfarlige stoffer, BOD og glødetab	9
<b>5</b>	<b>Spredning i vandsøjle under klapping</b>	<b>10</b>
5.1	Hydrodynamiske model	11
5.1.1	Opsætning af strømningssmodel (MIKE 21 HD)	11
5.1.2	Opsætning af sedimentspredningsmodel (MIKE 21 MUD)	11
5.2	Resultater	11
5.2.1	Sommer	11
5.2.2	Vinter	18
<b>6</b>	<b>Spredning af det klappede materiale langs bunden</b>	<b>26</b>
6.1	Præsentation af klapmodel	26
6.2	Beregningsparametre	27
6.3	Resultater	29
6.3.1	Udbredelse af sedimentpøl	29
6.3.1.1	Spredning af sediment og miljøfarlige stoffer ved én enkelt klapping	29
6.3.2	Sedimentering af klapmateriale	33
6.3.2.1	Sedimentering af én klapping	33
<b>7</b>	<b>Samlet spredning og sedimentation</b>	<b>33</b>
7.1	Forventet udbredelse af klappet materiale	33
7.1.1	Sedimentpølsens udbredelse	36
7.2	Samlet sedimentation	41
7.2.1	Sedimentation af miljøfarlige stoffer	43
<b>8</b>	<b>Iltforbrug</b>	<b>44</b>

8.1	Iltforbrug for strømning over den kritiske	46
8.2	Iltforbrug for strømning under den kritiske	47
<b>9</b>	<b>Kumulative effekter</b>	<b>49</b>
<b>10</b>	<b>Referencer</b>	<b>49</b>

---



Projekt nr.: 227608  
Dokument nr.: 1232825051  
Version 1  
Revision 1

Udarbejdet af SSC  
Kontrolleret af JAD  
Godkendt af DGP

## 1 Indledning

I forbindelse med etableringen af en ny lystbådehavn og bydel ved Marina Syd i Kolding skal der klappes omkring 360.000 m<sup>3</sup>.

Denne rapport redegør for spredningen af det uddybede materiale under klapping, for koncentrationsforholdene af sediment og miljøfarlige stoffer i vandfasen samt for sedimentationsforholdene langs havbunden efter klappingen. Desuden redegøres for det klappede materiales potentielle iltforbrug under og efter klappingen. Koncentrationerne af miljøfarlige stoffer sammenholdes med baggrundsværdier for området og sammenholdes med gældende miljøkvalitetskrav.

## 2 Fremgangsmåde og metode

Under afgravningen spredtes der typisk 5 % af det afgravede sediment i vandsøjlen, dels i forbindelse med selve graveprocessen, og dels når det afgravede materiale bringes op gennem vandsøjlen til klapprammen. Ved klappingen tabes igen ca. 5 % af sedimentet til vandsøjlen, når klapprammen åbnes, og sedimentet falder ned gennem vandsøjlen. De resterende ca. 90 % af sedimentet når havbunden på klapppladsen og spreder sig derfra langs bunden.

Ved spredning i vandsøjlen (5 % af det afgravede materiale) vil de ikke-kohæsive sedimentfraktioner som sand og grus falde ned på havbunden kort efter, at de er klappet, mens de ikke kohæsive fraktioner som ler og fint silt vil blive ført med strømmen. Spredning af det klappede materiale, der når bunden, afhænger af strømhastigheden. Ved små strømhastigheder vil sedimentet aflejres på klapppladsen. Ved store strømhastigheder vil det klappede materiale blive transporteret væk fra klapppladsen langs bunden i en sedimentpøl. Det er i forbindelse med denne spredning, at der potentielt kan ske spredning af miljøfarlige stoffer. Desuden kan der potentielt opstå et øget iltforbrug, hvis det klappede materiale indeholder større mængder af organisk materiale.

Vurderingen af spredningen i vandsøjlen (5 % af det afgravede materiale) baseres på beregninger foretaget med DHI's software MIKE HD og MIKE MUD, som beskrevet i [1]. Der udvælges to modelperioder, der repræsenterer de normale forhold henholdsvis om vinteren og sommeren.

Vurderingen af spredningen af det klappede materiale, der når klapppladsens bund, sker ved hjælp af den af NIRAS og Flemming Bo Pedersen udviklede "Klapmodel" [2].

## 3 Forhold ved klappplads

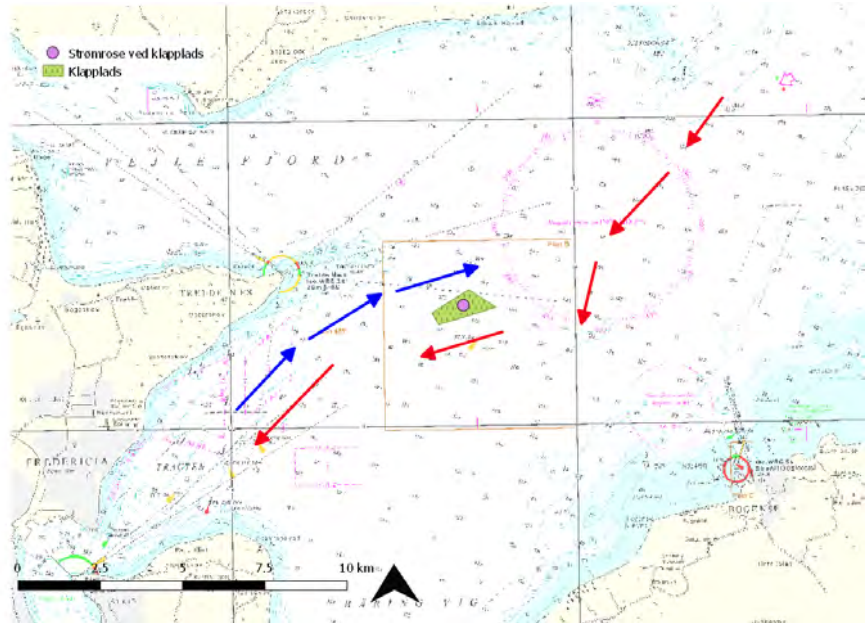
Klapppladsen er beliggende cirka 5,5 km øst for Trelde Næs, syd for udmundingen til Vejle Fjord som vist i Figur 3.1. Klapppladsens samlede areal udgør ca. 1 km<sup>2</sup>. Vanddybden er ifølge søkort omkring 15 m. Med et krav om ikke at reducere vanddybden til mindre end 14 m giver det en kapacitet på klapppladsen på omkring 0,001 km<sup>3</sup>, under antagelse af at intet af sedimentet transporteres væk fra klapppladsen.

### 3.1 Strømforhold

Hovedstrømmen, som løber frem og tilbage gennem Lillebælt, er generelt styret af de regionale vejrforhold og de lokale bundforhold. Ved indstrømning (røde pile på Figur 3.1) presser havbunden strømmen øst og vest om klapppladsen og ved udstrømning (blå pile på Figur 3.1) løber strømmen nord om klapppladsen. Denne

generelle strømning frem og tilbage gennem Lillebælt bliver overlejret af den lokalt vindgenererede strøm.

Figur 3.1: Klappads Trelde Næs markeret med grøn firkant. I figuren er position for strømroser og generelle strømforhold ved klappadsen også angivet, se næste afsnit.



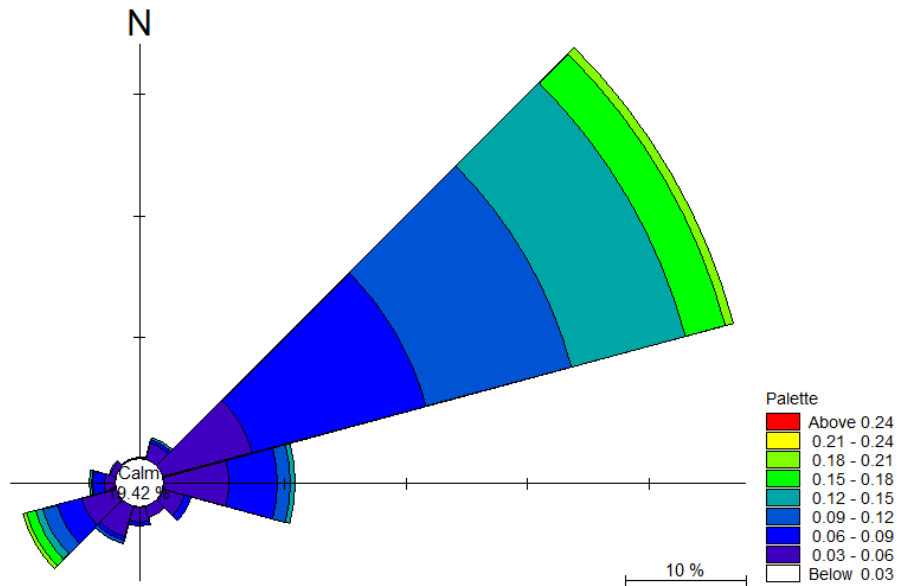
Strømhastigheden varierer fra sæson til sæson. Figur 3.2 og Figur 3.3 viser strømhastigheden på klappadsen. Positionen for de viste strømhastigheder er angivet i Figur 3.1, for de to valgte simuleringstidspunkter:

- Sommer, 15/6-2011 - 9/9-2011,
- Vinter, 7/11-2011 - 31/1-2012.

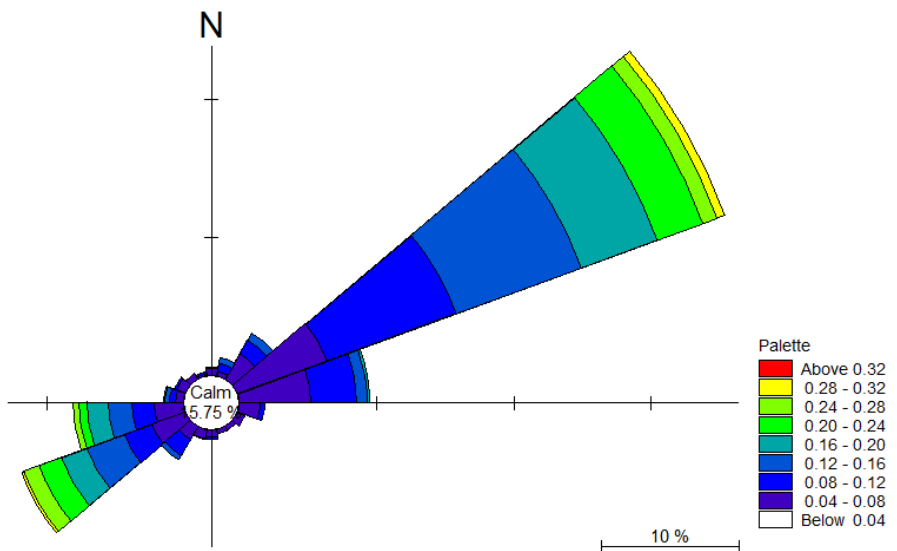
For detaljeret forklaring på valg af periode henvises til [1].

I sommerperioden er strømmen aldrig større end 0,2 m/s på klappadsen, mens strømmen om vinteren når op på cirka 0,3 m/s i nordøstlig retning. Strømretningen varierer primært mellem sydvest og nordøst. Af strømroserne på Figur 3.2 og Figur 3.3 ses det yderligere, at strømmen oftere er i nordøstlig retning end i sydvestlig retning. Både sommer og vinter er strømmen i nordøstlig retning cirka 3 gange så ofte som i sydvestlig retning.

Figur 3.2: Strømrose for sommerperioden (15/6-2011 - 9/9-2011).



Figur 3.3: Strømrose for vinterperioden (7/11-2011 - 31/1-2012).



## 4 Sedimentspecifikationer

Ved uddybning af sediment spildes der omkring 5 % af det opgravede materiale, og der er et behov for at klippe ca. 360.000 m<sup>3</sup>. Der planlægges at klippe op til 4.000 m<sup>3</sup> pr kløpning pr døgn.

Under selve kløpningen forventes det, at 5 % tabes i vandsøjlen. Spredning af disse 5 % behandles i sektion 5, mens spredningen af de resterende 95 %, der falder til bunds på kløppladsen, behandles i sektion 6.

Der er gennemført en sedimentundersøgelse af området øst for Marina Syd for Kolding Kommune [3]. Prøveområderne er angivet i Figur 4.1.

Figur 4.1: Inddeling af felter for sedimentprøver.



Der er udtaget en sedimentprøve i hvert felt af de øverste 0-0,3 m af sedimentet. Hver prøve til analyse bestod af en sammenblanding af 4-5 delprøver per nedstik, som var jævnt fordelt i hvert område. Derudover blev der taget vertikale blandede sedimentprøver fra 0,5 m under havbund til intakte lag (formentlig omkring 0,7 m under havbund) samt prøver i 1,5 m dybde.

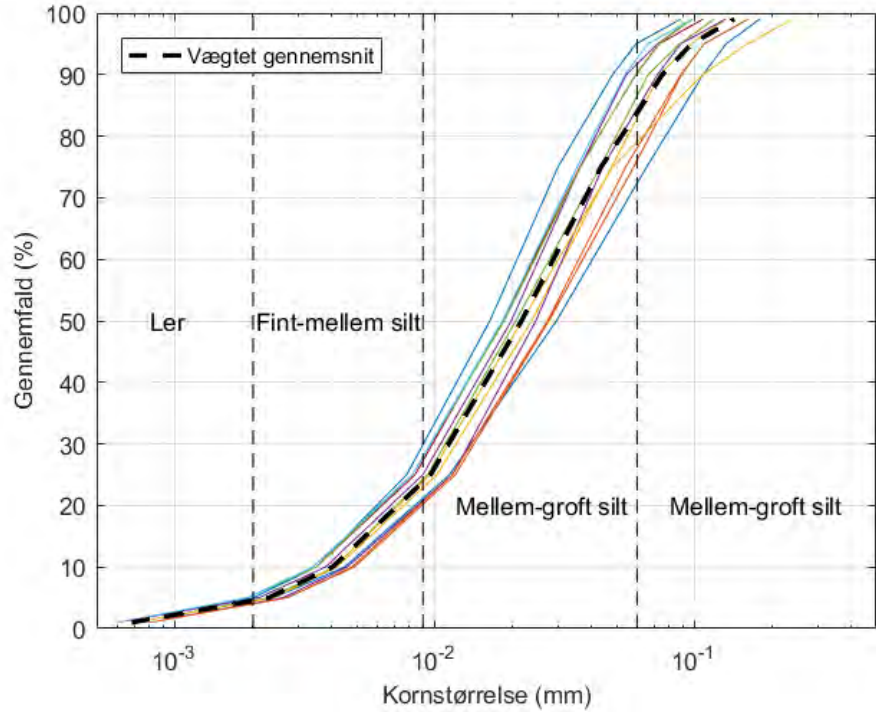
I sejlrenden (felt 11-13) blev der påvist aflejret materiale til 0,3 meter under havbunden og herunder intakte lag bestående af gytje. I området øst for Marina Syd blev der i felt 1 og felt 3 konstateret aflejret materiale til ca. 0,9 m under havbunden. I de resterende felter (felt 2 og felt 4-10) blev der konstateret aflejret materiale til omkring 0,6-0,7 meter under havbunden. Herunder blev der konstateret intakte lag i form af gytje.

#### 4.1 Kornkurver

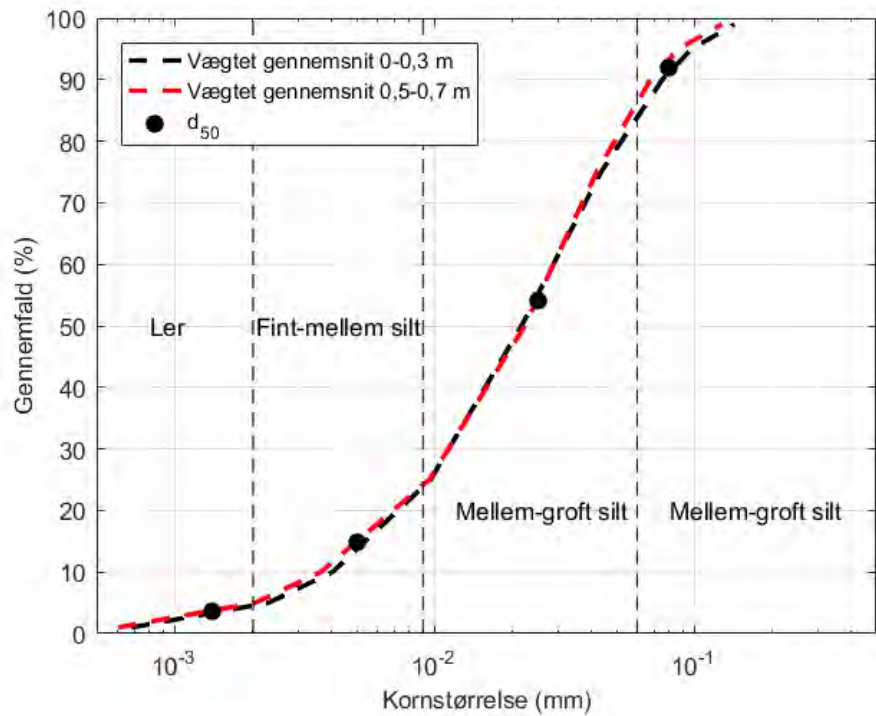
Der er afrapporteret kornkurver i alle 13 felter for det øverste lag 0-0,3 m under havbunden samt i dybden 0,5 m under havbunden for alle felter på nær felt 3. Kornkurverne for det øverste lag (0-0,3 m) er vist i Figur 4.2 sammen med det vægtede gennemsnit baseret på sedimentvolumen fra hvert felt. Inddelingen i fire forskellige sedimentfraktioner, fra Jakobsen et al. [4], ses også i figuren.

I Figur 4.3 sammenlignes det vægtede gennemsnit af kornkurverne i dybden 0-0,3 m under havbunden med det vægtede gennemsnit af kornkurverne i dybden 0,5 m. Det ses, at de to kurver er meget ens. I felt 11-13 findes de intakte lag i form af gytje som nævnt i dybden 0,5 m, mens det for de andre felter er aflejret materialer kornkurven af baseret på. I forbindelse med den nye Vejle Fjord Bro blev der lavet en VVM redegørelse. NIRAS skrev i den forbindelse et notat [5], som beskrev sedimentet i Vejle Fjord. I midten af fjorden var overfladesedimentet gytje, og kornkurverne var meget lig kornkurverne i Figur 4.3. Kornkurverne i Figur 4.3 antages derfor at være repræsentative også for de intakte lag i alle felter.

Figur 4.2: Kornkurver af de 13 felter (0-0,3 m) samt for det vægtede gennemsnit (stiplet linje). Data er fra [3].



Figur 4.3: Vægtede gennemsnit af kornkurver i dybderne 0-0,3 m og 0,5 m. Mediankornstørrelse af de fire sediment-fraktioner er vist med sort prik.



I Tabel 4.1 er andelen af de fire sedimentfraktioner angivet for det vægtede gennemsnit sammen med median-kornstørrelsen af hver fraktion. Denne er også



vist med sorte prikker i Figur 4.3. De to groveste sedimentfraktioner udgør 77 % af den totale mængde. I Tabel 4.1 er sedimentfraktionernes faldhastighed også angivet og er beregnet som

$$w_s = \frac{(s - 1)gd_{50}^2}{18\nu}$$

hvor  $s=2,65$  er tørstoffets relative densitet i forhold til vandets,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$  er tyngdeaccelerationen,  $d_{50}$  er mediankornstørrelsen og  $\nu=1,307 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  er vandets kinematiske viskositet ved  $10^\circ\text{C}$ .

Tabel 4.1: Andelen af de fire sedimentfraktioner baseret på det vægtede gennemsnit af kornkurverne samt de tilhørende mediankornstørrelser og faldhastighed.

	Ler	Fint-mellem silt	Mellem-grov silt	Fint sand
Andel (%)	5	18	60	17
Mediankornstørrelse (mm)	0,0014	0,005	0,025	0,08
Faldhastighed (mm/s)	0,002	0,02	0,5	5,0

Rumvægtene anvendt i sedimentspredningsanalyserne for Vejle Fjord Bro anvendes derfor også i disse beregninger. Den våde rumvægt er  $1.200 \text{ kg/m}^3$ , og den tørre rumvægt er  $1.870 \text{ kg/m}^3$ .

## 4.2 Miljøfarlige stoffer, BOD og glødetab

Sedimentprøverne er blevet analyseret for følgende miljøfarlige stoffer: kviksølv, nikkel, cadmium, kobber, bly, chrom, arsen, zink, PCB, TBT og PAH. Yderligere blev tørstofindholdet og glødetabet analyseret.

Analyseresultaterne ses i Tabel 4.2. Data er yderligere beskrevet i klappansøgningen. Miljøstyrelsens nedre og øvre aktionsniveauer for klappning er angivet i tabellen. Alle målte koncentrationer af miljøfarlige stoffer er under de øvre aktionsniveauer.

Koncentrationen af både nikkel og arsen er i alle felter under nedre aktionsværdi, mens alle felter har koncentrationer af cadmium og kobber mellem nedre og øvre aktionsværdi. For de øvrige miljøfarlige stoffer varierer det fra felt til felt om koncentrationen er under nedre eller mellem nedre og øvre aktionsværdi.

Tabel 4.2: Analyseresultater af sedimentprøver (se klappansøgningen for detaljer).

Felt nr	Dybde cm	Kviksølv	Nikkel	Cadmium	Kobber	Bly	Chrom	Arsen	Zink	Sum af 9 PAH	mg/kg TS	
											Sum af 7 PCB	TBT
Felt 1	50-70	0,58	24	1,65	53	50	40	10	264	3,4	29,5	39
Felt 2	50-70	0,45	22	1,40	43	44	59	9,3	203	9,3	34,5	15
Felt 3	30-60	0,61	26	2,06	79	50	80	11	258	12,2	-	69
Felt 4	50-70	0,26	16	1,03	22	23	21	8,9	102	11	0,3	3,4
Felt 5	50-70	0,89	23	1,33	42	46	64	9,9	198	19	131	32
Felt 6	50-70	0,29	19	1,07	25	27	27	10	108	3,4	0,3	9,7
Felt 7	50-70	0,32	23	1,24	38	58	46	12	136	0,5	23,1	71
Felt 8	50-70	0,14	18	0,99	21	19	27	10	84	0,3	0,3	1
Felt 9	50-70	0,04	13	0,48	24	10	15	7,9	57	1,4	0,3	9,7
Felt 10	50-70	0,04	9,4	0,41	24	8,9	15	5	53	1,2	0,3	3,9
Felt 11	50-70	0,23	21	1,26	25	26	29	11	110	4,6	0,3	8,3
Felt 12	50-70	0,17	19	1,06	39	24	30	12	100	6,6	0,3	30
Felt 13	50-70	0,10	18	0,86	21	18	30	8,6	79	1,1	0,3	89
Gennemsnit		0,32	19	1,14	35	31	37	9,7	135	5,7	18,4	29,3
Vægtet gennemsnit		0,29	18	1,04	35	28	36	9,1	133	5,9	18,1	19,9
Nedre aktionsniveau		0,25	30	0,4	20	40	50	20	130	3	20	7
Øvre aktionsniveau		1	60	2,5	90	200	270	60	500	30	200	200

I de følgende beregninger betragtes specifikt cadmium, kobber, zink, kviksølv og TBT, idet koncentrationerne af disse stoffer ligger mellem nedre og øvre aktionsniveauer for størstedelen af felterne. Vægtede gennemsnitskoncentrationer af disse stoffer er baseret på alle prøver angivet i Tabel 4.3. Det er disse værdier, der anvendes i nedenstående beregninger.

Tabel 4.3: Vægtede gennemsnitskoncentrationer af cadmium, kobber, zink og TBT baseret på alle sedimentprøver.

Stof	Cadmium	Kobber	Zink	TBT
mg/kg TS	1,04	35	133	0,02

Sedimentprøverne er også testet for BOD (Biochemical Oxygen Demand), som er fundet til 1.142 mg O<sub>2</sub>/kg prøve. BOD er bestemt som sedimentets biokemiske iltforbrug efter 5 dage i mørke ved 20 °C.

Det gennemsnitlige tørstofindhold er fundet til at være 33 %. Udfra dette kan vandindholdet udregnes til:

$$\text{Vandindhold} = \frac{100\% - TS}{TS} 100\% = 203\%.$$

Dette betyder, at vandindholdet er cirka dobbelt så stort som tørstofindholdet. Glødetabet er cirka 13 % af tørstoffet.

## 5 Spredning i vandsøjle under klappning

Cirka 5 % af det klappede materiale tabes i vandsøjlen. Dette svarer til cirka 18.000 m<sup>3</sup>. I dette afsnit betragtes spredning af disse 5 % af det klappede materiale.

## 5.1 Hydrodynamiske model

### 5.1.1 Opsætning af strømningssmodel (MIKE 21 HD)

De hydrodynamiske forhold i området omkring den planlagte klappning er evalueret ved brug af en MIKE 21 HD model, som er en todimensionel model til beskrivelse af de hydrodynamiske processer. Modellen er kørt for en sommer- og vinterperiode som beskrevet i afsnit 3.1. En detaljeret beskrivelse af modelopsætningen er givet i [1].

### 5.1.2 Opsætning af sedimentspredningsmodel (MIKE 21 MUD)

Til beregning af spild fra klappning af uddybningsmaterialet er anvendt det til MIKE 21 hørende modul MUD. MUD beskriver transport, erosion og aflejring af sediment som en funktion af strømmingen. Modulen kan anvendes til bl.a. modellering og overvågning af sedimentspild opstået i forbindelse med oprensings- og uddybningsaktiviteter. En detaljeret beskrivelse af modelopsætningen er givet i [1].

Spredning af alle fire sedimentfraktioner, angivet i Tabel 4.1, betragtes i beregningerne. Spildet frigives i modellen på én position lokaliseret i midten af klapplassen. Det antages, at der klappes 4.000 m<sup>3</sup> sediment pr døgn fordelt på én klappning. De 5 %, der tabes i vandsøjlen, udgør 200 m<sup>3</sup> pr døgn. I beregningen antages det, at disse tabes jævnt over hele døgnnet svarende til 23 cm<sup>3</sup>/s. I virkeligheden vil al spildet blive tabt over en meget kortere periode, svarende til den tid, det tager at tømme en Pram. Ifølge [6] vil dette lokalt give højere koncentrationer af suspenderet sediment i vandsøjlen end beregningsresultaterne giver udtryk for, men erfaringer viser, at sedimentet vil bevæge sig som samlede sedimentskyer væk fra klapplassen, hvilket påvirker flora og fauna mindre end længerevarende permanent nedsættelse af lysnedtrængningen i vandsøjlen [7]. Således er anvendelsen af en gennemsnitlig spildrate en konservativ tilgang.

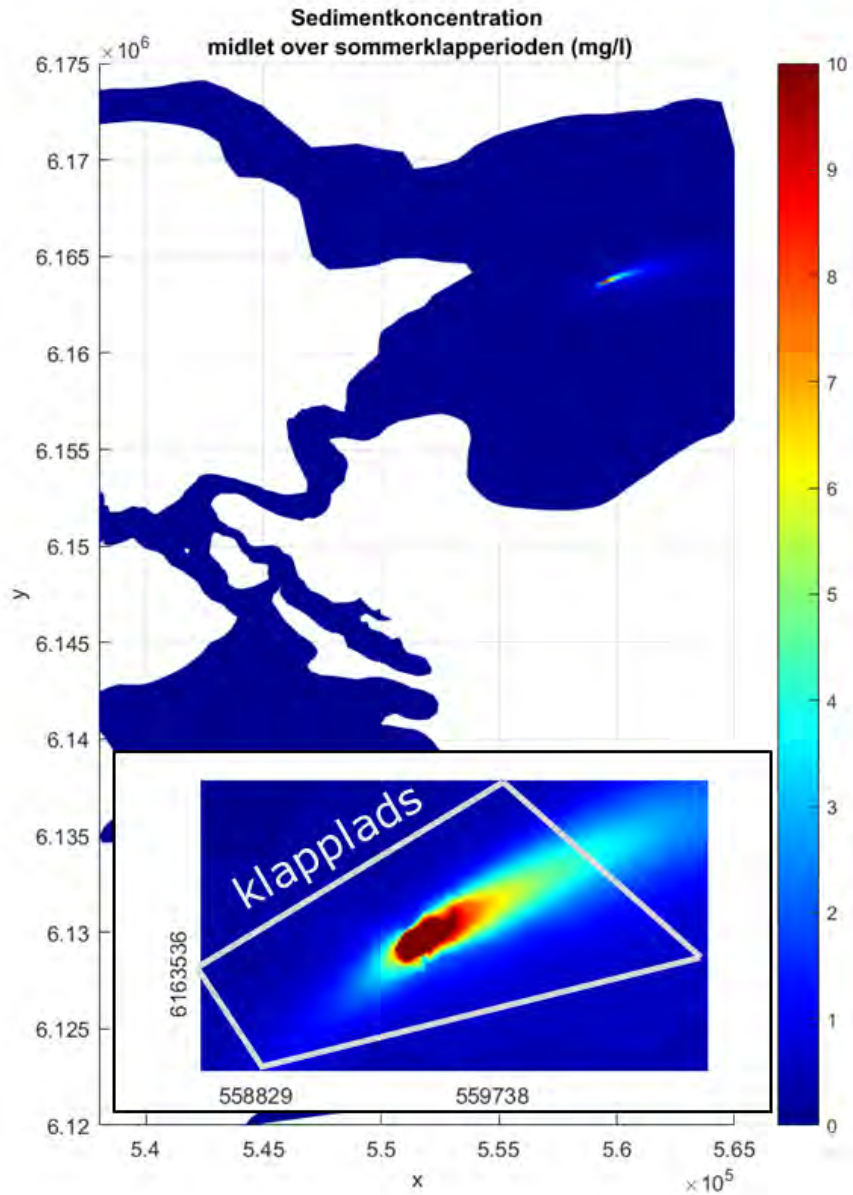
## 5.2 Resultater

Der er foretaget en sommer- og vinterberegning. I det følgende præsenteres resultaterne af beregningerne omhandlende de 5 % sediment, som tabes i vandsøjlen.

### 5.2.1 Sommer

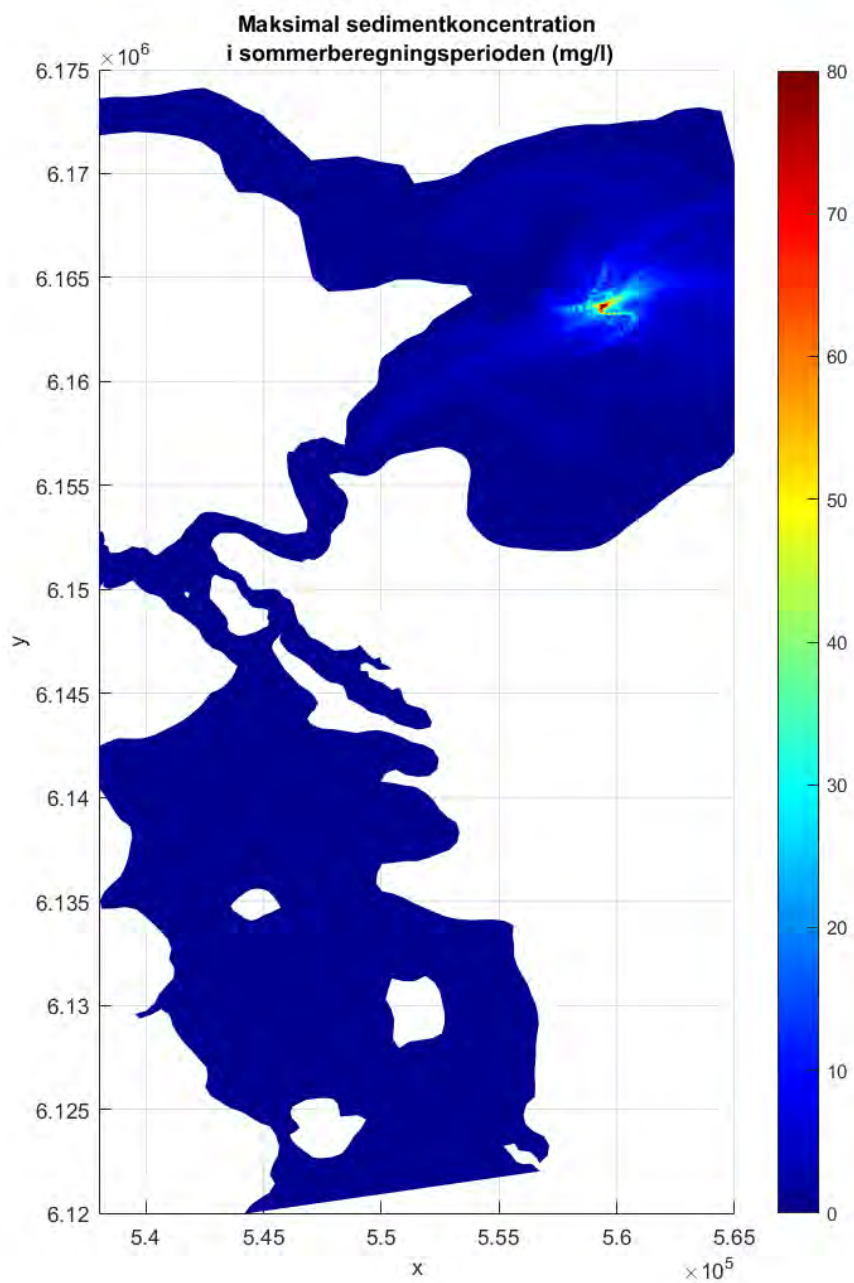
Sedimentkoncentration i vandsøjlen midlet over klapperperioden ses i Figur 5.1. Det suspenderede sediment (SS) ligger som en fane og følger strømretning i nordøstlig og sydvestlig retning. Middelkoncentrationer over 4 mg SS/l forekommer kun inden for klapplassen. I området omkring Lillebælt og i området nordøst for klapplassen er koncentrationen langt under 0,5 mg SS/l, hvilket er lavere end baggrundskoncentrationen i området.

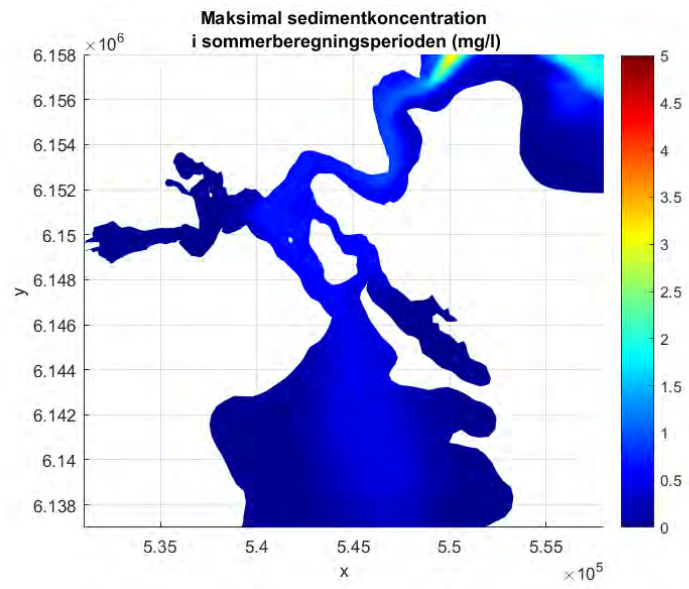
Figur 5.1:  
Sedimentkoncentration midlet over sommerklapperperioden.



De størst forekommende koncentrationer under klapperperioden er vist i Figur 5.2. På klappladsen er koncentrationen omkring 80 mg SS/l, men falder til under 20 mg SS/l 2 km væk fra klappladsen. I området omkring Lillebælt I (Figur 5.2 nederst) og nordøst for klappladsen er den maksimale koncentration ikke større end 3 mg SS/l. Det fremgår ikke af figuren hvad varigheden af disse koncentrationer er. Men koncentrationer over 30 mg/l forekommer samlet højst én dag, dvs. der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er lavere. Varigheden af koncentrationer på 80 mg/l inde på klappladsen forventes ikke at have en varighed på mere end et par timer. Så er sedimentet enten transporteret videre eller faldet til bunds.

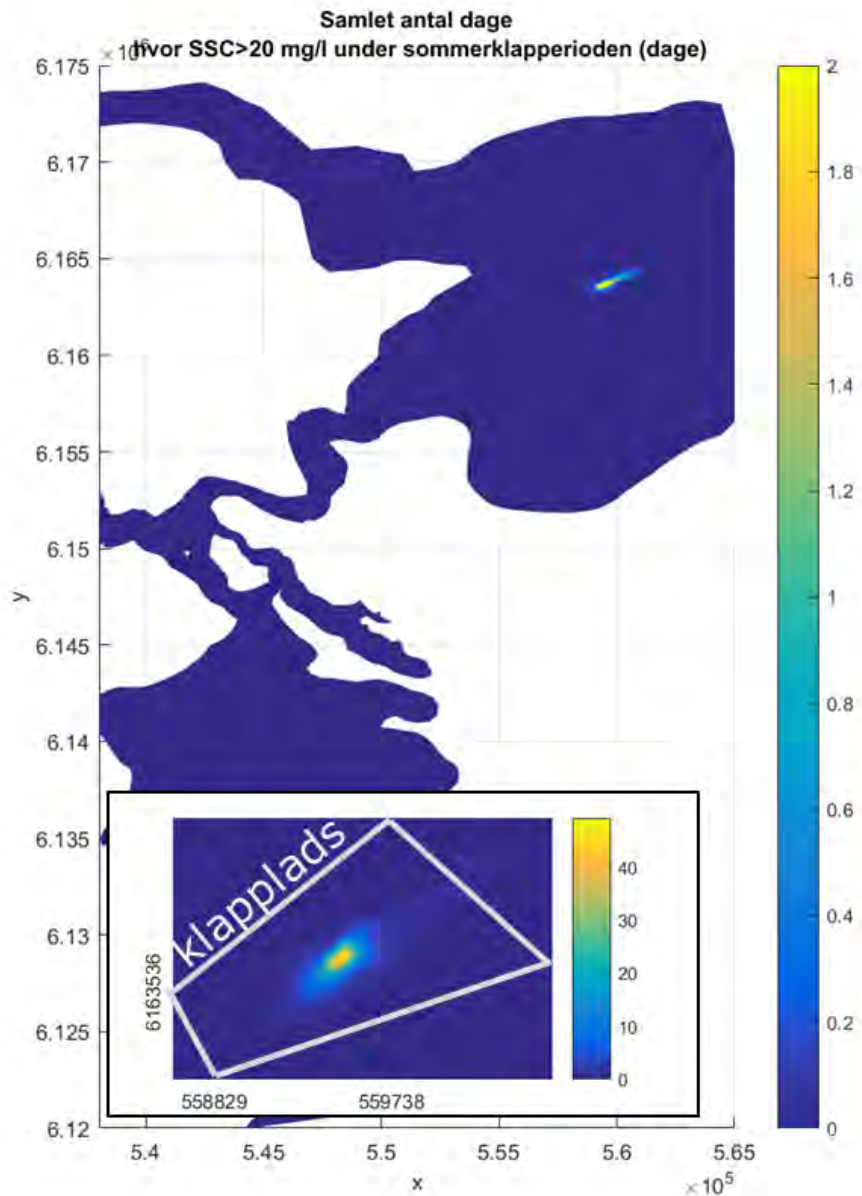
Figur 5.2: Maksimal sedimentkoncentration i vandfasen under sommerklapperperioden (mg SS/l).





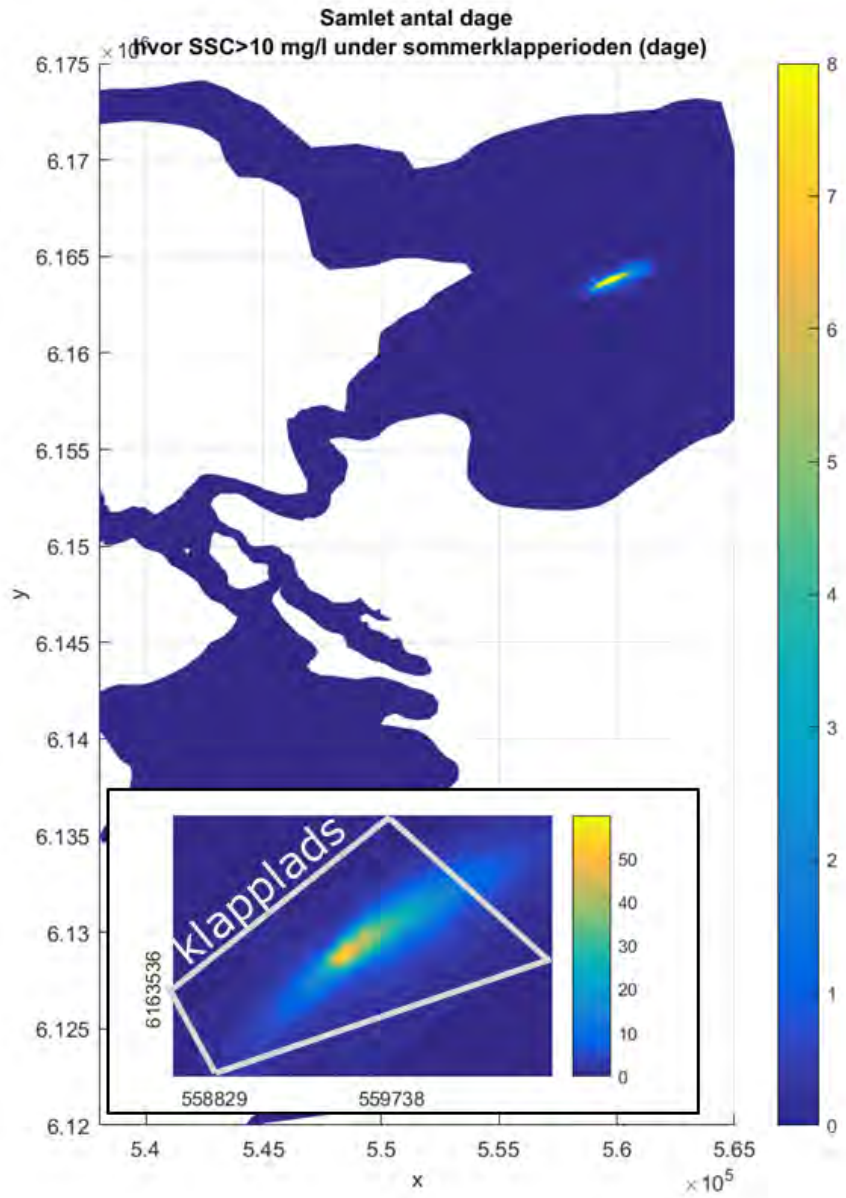
I Figur 5.3 og Figur 5.4 ses det, at koncentrationer større end 20 og 10 mg SS/l forekommer samlet over henholdsvis 40 og 50 dage i midten af klapplassen. Dette skyldes, at al det klappede materiale i beregningen klappes i samme position. I virkeligheden vil klappingen blive fordelt på hele klapplassen. Det forventes derfor, at det samlede antal dage med koncentrationer over 20 og 10 mg SS/l vil være mindre. Det er vigtigt at pointere, at dette er det samlede antal dage. Dvs., der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er lavere.

Figur 5.3: Antal dage hvor mængde af suspenderet sediment overstiger 20 mg SS/l under sommerklapperperioden ved klapplassen. Der kan være perioder ind i mellem hvor koncentrationen er under 20 mg/l.





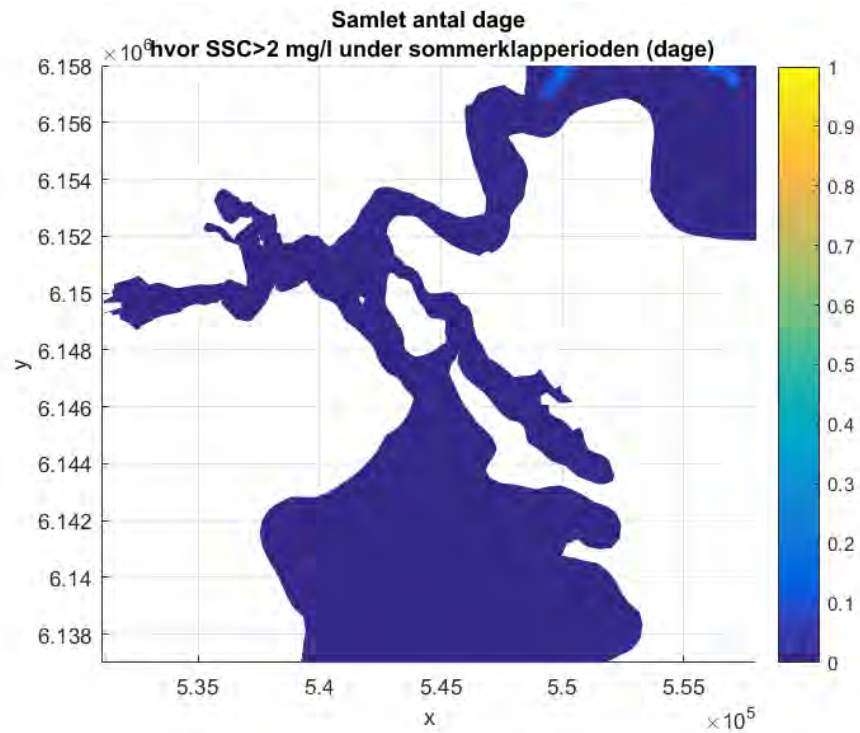
Figur 5.4: Antal dage hvor mængde af suspenderet sediment overstiger 10 mg SS/l under sommerklapperperioden ved klapplassen. Der kan være perioder ind i mellem hvor koncentrationen er under 10 mg/l.





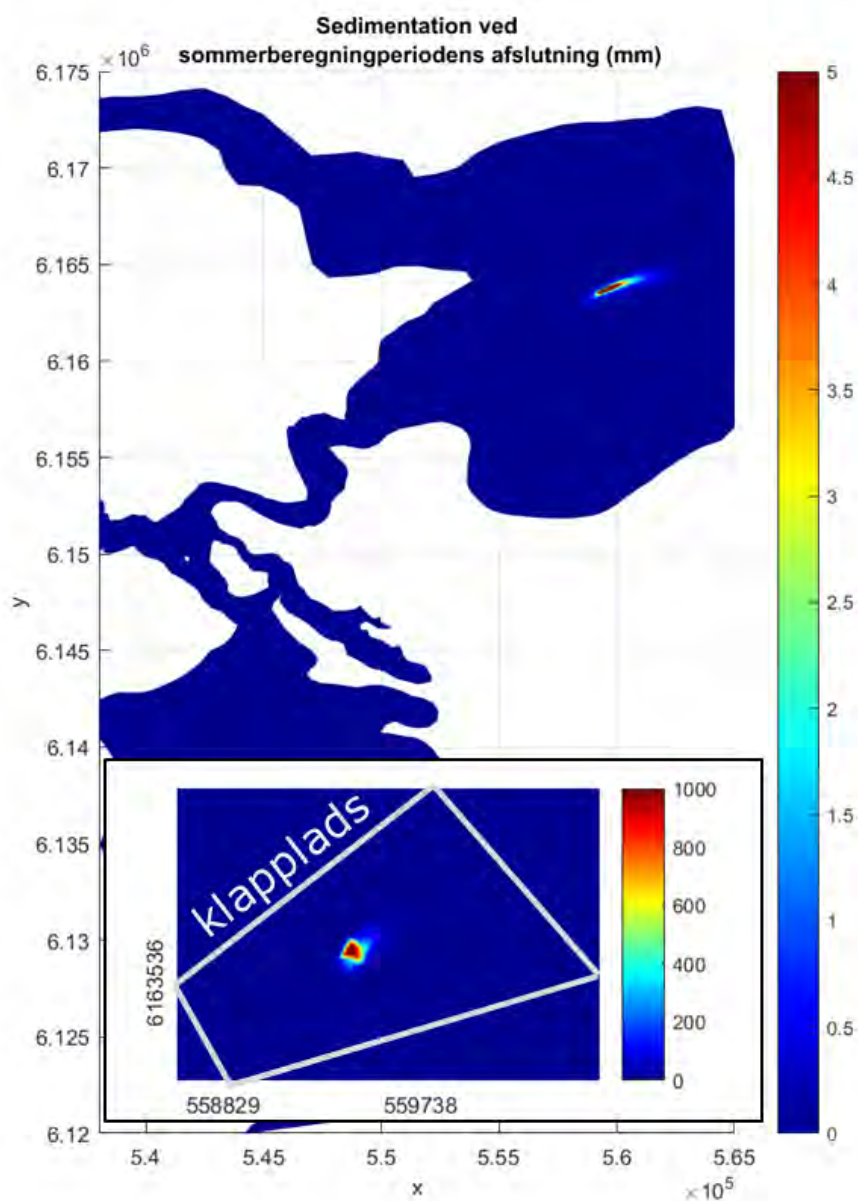
I Figur 5.5 ses det, at koncentrationer større end 2 mg/l i Lillebælt samlet forekommer under en dag i klapperperioden. Det er vigtigt at pointere, at dette er det samlede antal dage. Det vil sige, at der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er lavere.

Figur 5.5: Antal dage hvor mængden af suspenderet sediment overstiger 2 mg SS/l under sommerklapperperioden ved klapplassen. Der kan være perioder ind i mellem hvor koncentrationen er under 2 mg/l.



Sedimentationen ved endt klapping ses i Figur 5.6. Den største sedimentation foregår indenfor klapplassen og er omkring 1 m. I beregningen klappes al materialet i samme punkt. I virkeligheden vil materialet blive klappet på hele klapplassen, og sedimenttykkelsen forventes derfor at være meget mindre. Dette diskuteres yderligere i afsnit 7.2. Omkring Lillebælt og nordøst for klapplassen er sedimentationen ikke større end 0,1 mm.

Figur 5.6: Sedimentation ved endt klappning om sommeren.

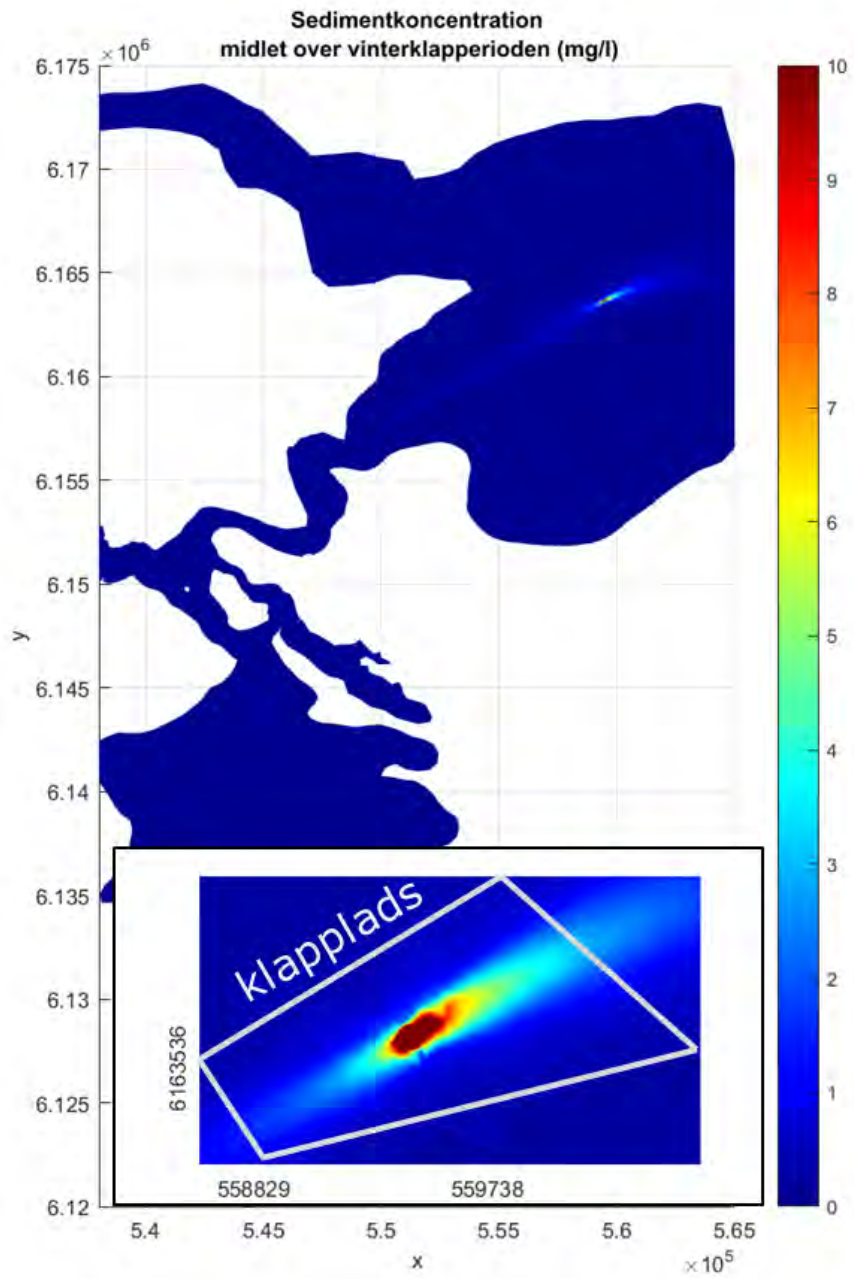


### 5.2.2 Vinter

Spredningen af sediment er større ved klappning om vinteren i forhold til klappning om sommeren, da strømhastigheden er større om vinteren.

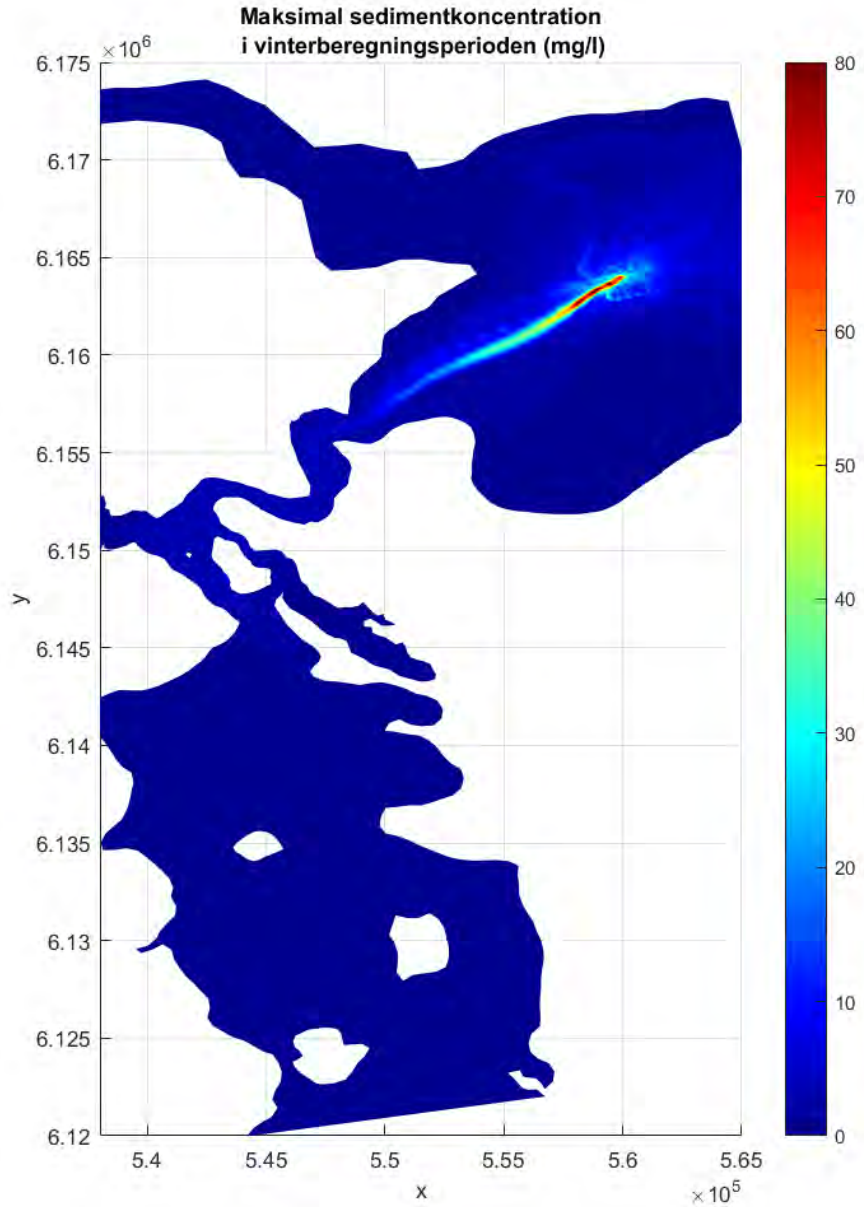
Sedimentkoncentrationen i vandsøjlen midlet over klapperperioden ses i Figur 5.7. Sedimentspredningen ligger som en fane og følger strømretningen i nordøstlig og sydvestlig retning. Middelkoncentrationer over 10 mg SS/l forekommer kun inden for klappladsen. I området omkring Lillebælt og nordøst for klappladsen er middelkoncentrationerne under 0,5 mg SS/l, hvilket er lavere end baggrundskoncentrationen i området.

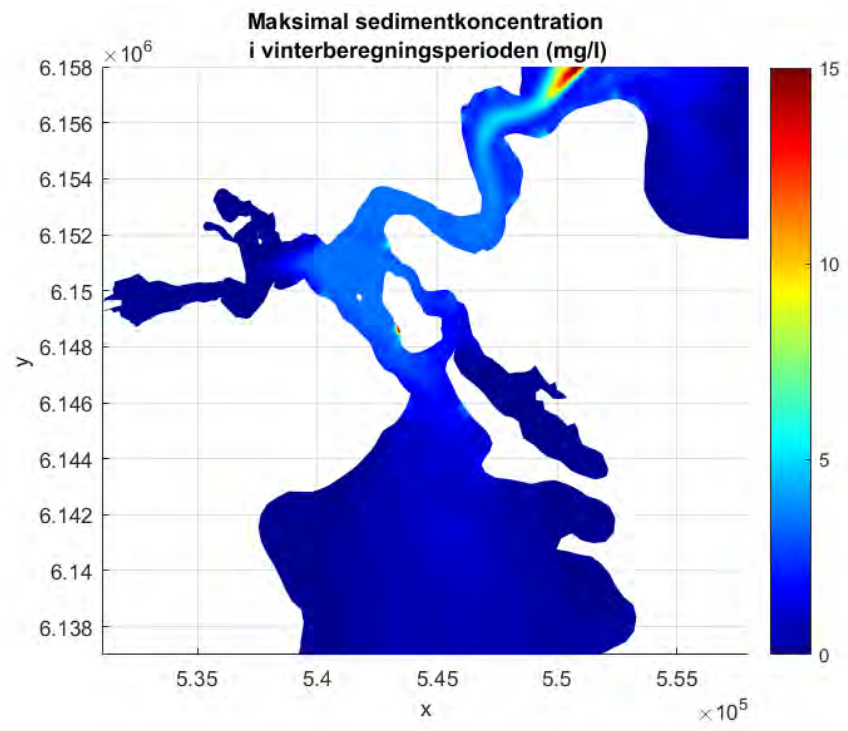
Figur 5.7: Koncentration af suspenderet sediment (SS) midlet over vinterklapperperioden.



De størst forekommende koncentrationer under klapperperioden er vist i Figur 5.8. Omkring klapplassen er koncentrationerne omkring 80 mg SS/l, men falder til under 30 mg SS/l tættere på Lillebælt. Nordøst for klapplassen er den maksimale koncentration ikke større end 5 mg SS/l. I det nordlige udløb af Lillebælt er den maksimale koncentration 15 mg SS/l og i Lillebælt ikke større end cirka 5 mg SS/l (Figur 5.8 nederst). Det fremgår ikke af figuren hvad varigheden af disse koncentrationer er. Men koncentrationer over 30 mg/l forekommer samlet højst én dag, dvs der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er lavere. Varigheden af koncentrationer på 80 mg/l inde på klapplassen forventes ikke at have en varighed på mere end et par timer. Så er sedimentet enten transporteret videre eller faldet til bunds.

Figur 5.8: Maksimal suspenderet sedimentkoncentration (SS) under vinterklapperperioden.

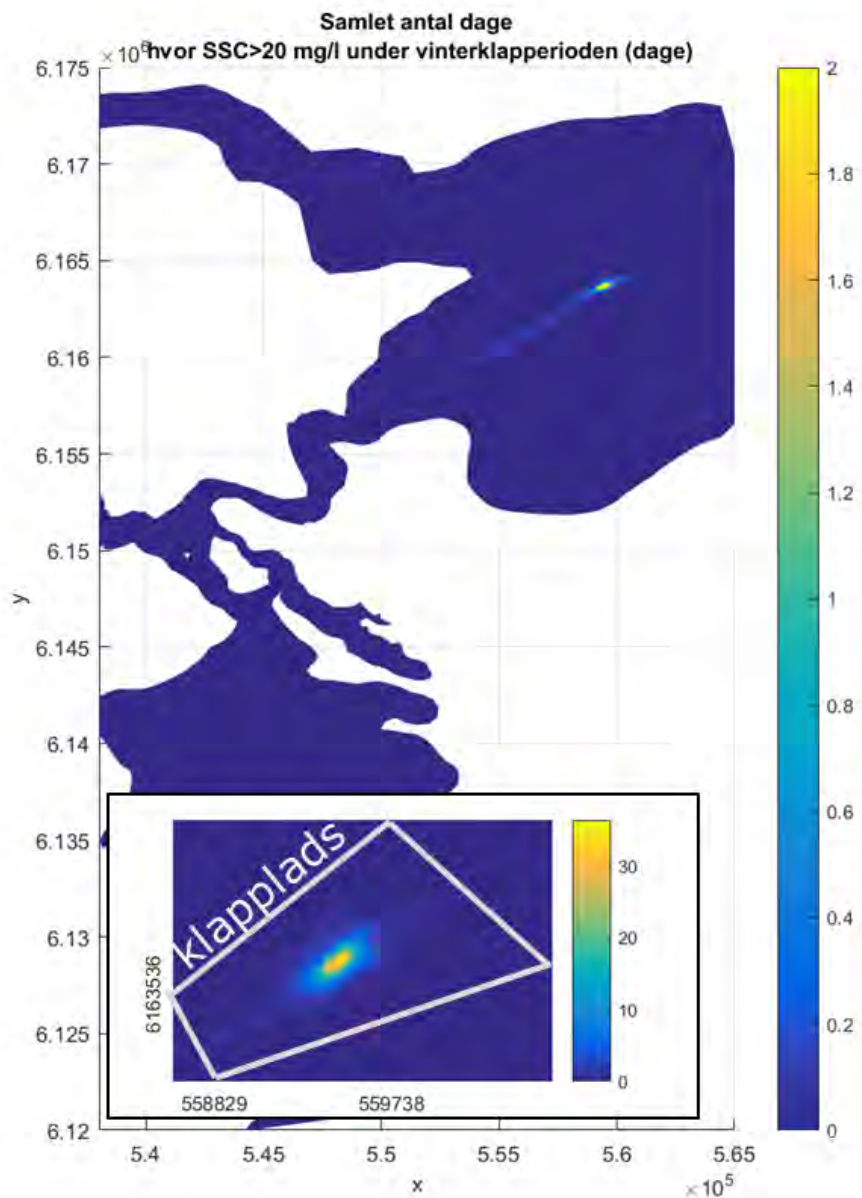




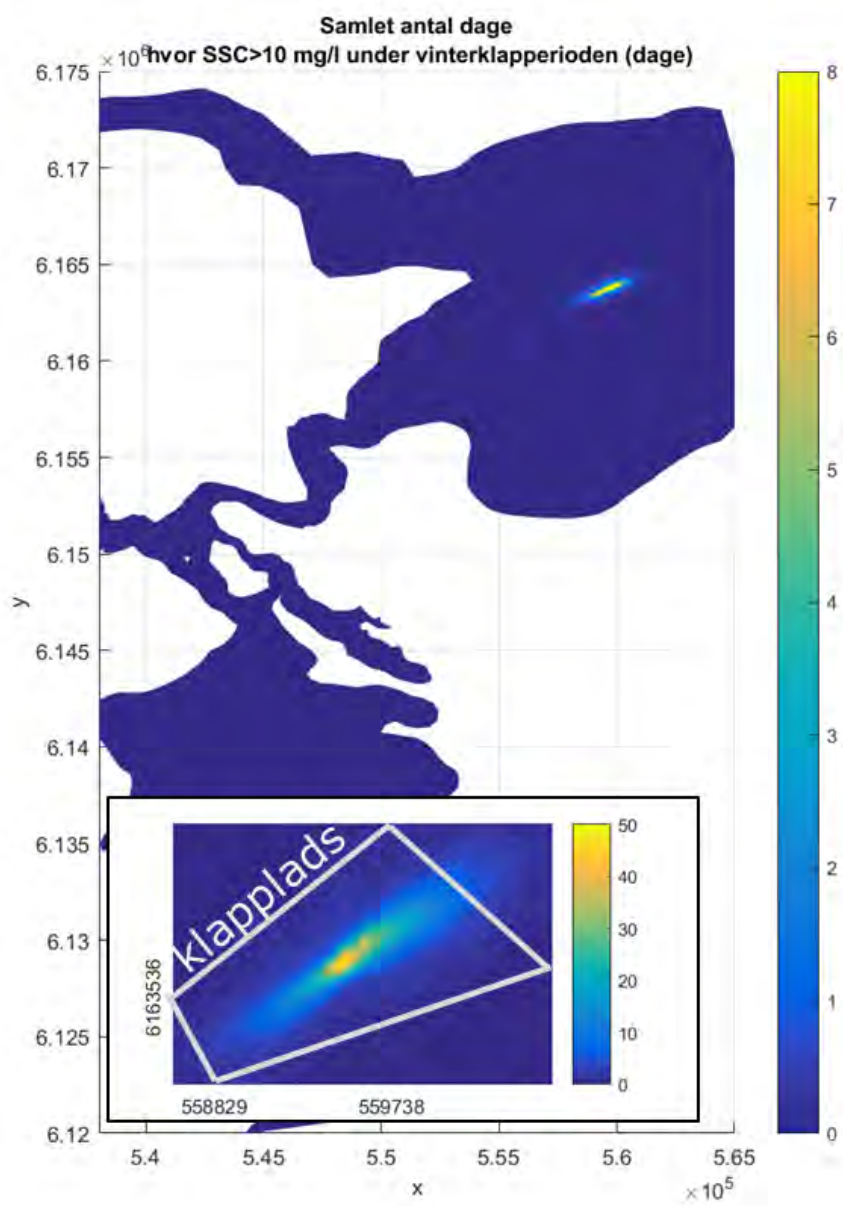


I Figur 5.9 og Figur 5.10 ses det, at koncentrationer større end 20 og 10 mg SS/l forekommer samlet over henholdsvis 30 og 50 dage i midten af klapplassen. Dette skyldes, at al det klappede materiale i beregningen klappes i samme position. I virkeligheden vil klappingen blive fordelt på hele klapplassen. Det forventes derfor, at det samlede antal dage med koncentrationer over både 20 og 10 mg SS/l vil være mindre. Det er vigtigt at pointere, at dette er det samlede antal dage. Det vil sige, at der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er lavere.

Figur 5.9: Antal dage hvor mængden af suspenderet sediment overstiger 20 mg SS/l under vinterklapperperioden ved klapplassen. Der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er under 20 mg/l.

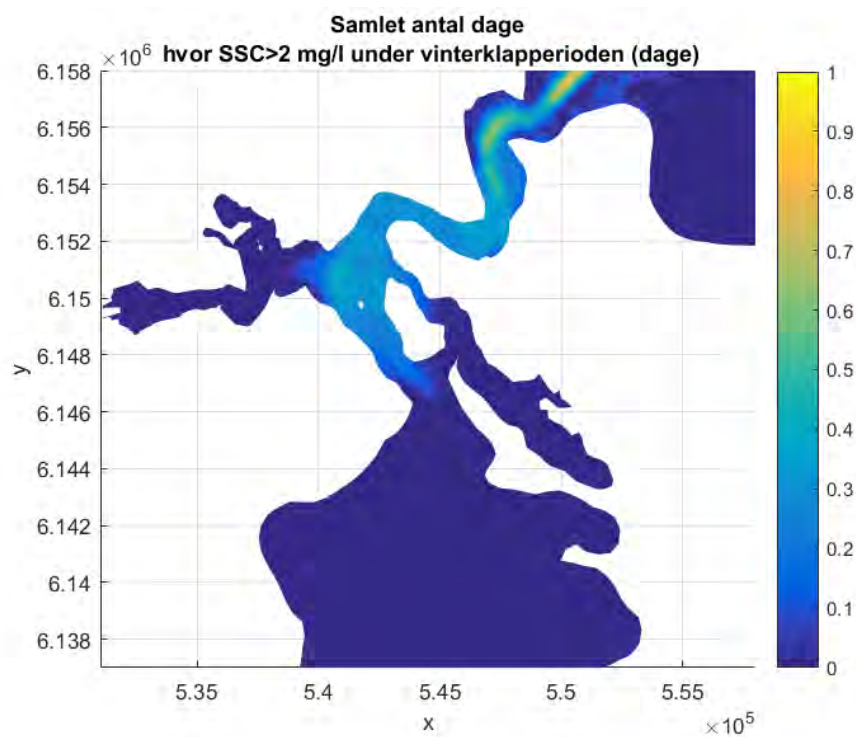


Figur 5.10: Antal dage hvor mængden af suspenderet sediment overstiger 10 mg SS/l under vinterklapperperioden ved klapplassen. Der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er under 10 mg/l.



I Figur 5.11 ses det, at koncentrationer større end 2 mg SS/l i Lillebælt samlet forekommer under én dag i klapperperioden. Det er vigtigt at pointere, at dette er det samlede antal dage. Det vil sige, at der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er lavere.

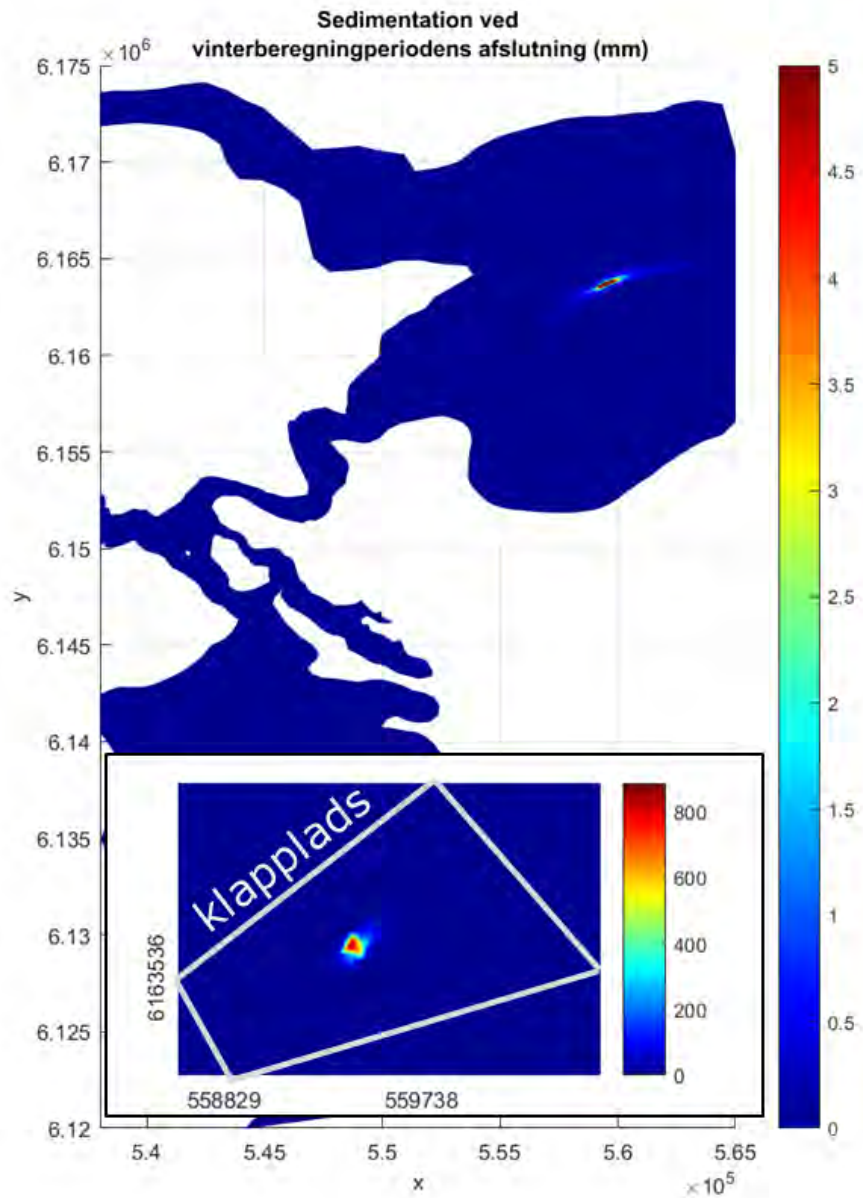
Figur 5.11: Antal dage hvor mængden af suspenderet sediment overstiger 2 mg SS/l under vinterklapperperioden ved klapplassen. Der kan være perioder ind i mellem, hvor koncentrationen er under 2 mg/l.





Sedimentationen ved endt klappning om vinteren ses i Figur 5.12. Den største sedimentation foregår indenfor klapppladsen og er omkring 0,8 m. I beregningen klappes al materialet i samme punkt. I virkeligheden vil materialet blive klappet på hele klapppladsen, og sedimenttykkelsen forventes derfor at være meget mindre. Dette diskuteres yderligere i afsnit 7.2. Omkring Lillebælt og nordøst for klapppladsen er sedimentationen ikke større end 0,01 mm.

Figur 5.12: Sedimentation ved endt klappning om vinteren.



## 6 Spredning af det klappede materiale langs bunden

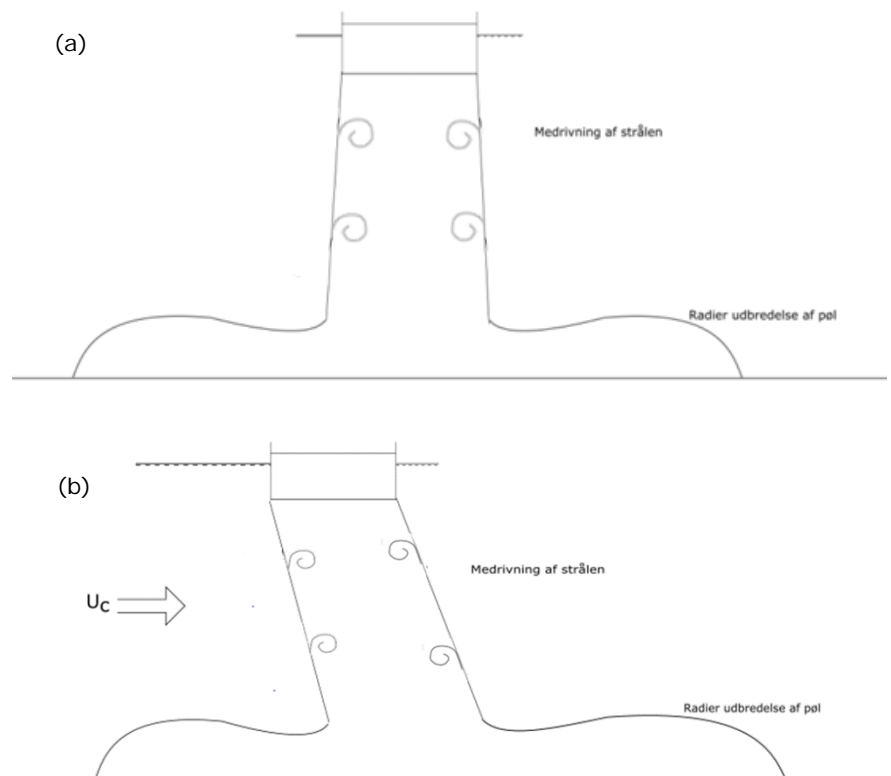
I alt skal 360.000 m<sup>3</sup> materiale klappes, hvoraf 5 % tabes i vandsøjlen. De resterende 95 %, som svarer til cirka 342.000 m<sup>3</sup>, falder 20 m ned gennem vandsøjlen ned på bunden, hvorfra det spredes med strømmen. Denne spredning vurderes i dette kapitel.

### 6.1 Præsentation af klapmodel

Når sediment klappes fra en pram, dannes en nedadrettet sedimentstrøm fra klappram til havbund. Ved lav strømhastighed lægger sedimentet sig som en plamage på bunden.

Når sedimentet rammer bunden, spredes det i alle retninger, alt imens det transporteres i strømmens retning som en sedimentpøl. Skematisk er processen illustreret i Figur 6.1. Når strålen, på grund af overskuddet i massetæthed af det klappede materiale, søger ned mod bunden, øges vandføringen og densiteten aftager. Det vil sige, det klappede materiale fortyndes. Den proces, som bestemmer denne initiale fortynding, er medrivning ind i strålen (Figur 6.2 (a)). Når strålen når ned til bunden, bliver den afbøjet til alle sider. Den afbøjede stråle bibeholder sin hastighed,  $U_c$ , hvorfor dybden af bundstrålen bliver en halv strålebredde (Figur 6.2 (b)).

Figur 6.1: Illustration af sedimentstrålen fra når sedimentet forlader prammen til sedimentpølen tages med af strømmen.



NIRAS har i samarbejde med Flemming Bo Pedersen udviklet et regneværktøj til beregning af spredning af sediment i forbindelse med klappning [2]. Dette værktøj er i stand til at beregne sedimentation ved klappning baseret på

sedimentparametre, strøm og dybdeforhold. Yderligere er modellen i stand til at beregne sedimentkoncentrationen i sedimentpølen som funktion af afstanden til klappositionen. Modellen har to forskellige beregningsformer; en "normal" beregning og en "specialberegning".

Den "normale" beregning benyttes, hvis strømhastigheden er så lav, at den ikke kan holde det spildte ikke-kohæsive materiale (sand, grus) i suspension, og det derfor bundfældes. Denne beregning giver data for det bundfældede materiale, og for det kohæsive, finkornede materiale, som spredes, og som binder de miljøfarlige stoffer. "Specialberegningen" bruges til at bestemme spredningen af sedimentpølen, bestående af alt klapmaterialet, hvis strømhastigheden er så høj, at sedimentet ikke bundfældes. Ved klappning med splitpram forventes 95 % af klapmaterialet at falde ned til bunden. NIRAS' model redegør for spredningen af de 95 %, som når bunden. De resterende 5 % opblandes i vandsøjlen på vej ned til havbunden. Spredningen af disse 5 % er behandlet separat i afsnit 5.

Situationen med høje strømhastigheder anses for at være den mest kritiske situation for spredning af sediment og miljøfarlige stoffer. I denne situation holdes sedimentet i suspension, mens sedimentskyen (pølen) bevæger sig bort fra klapplassen, alt imens skyen fortyndes med indtrængende vand. Når strømhastigheden falder under den kritiske hastighed, sedimenterer skyen ud.

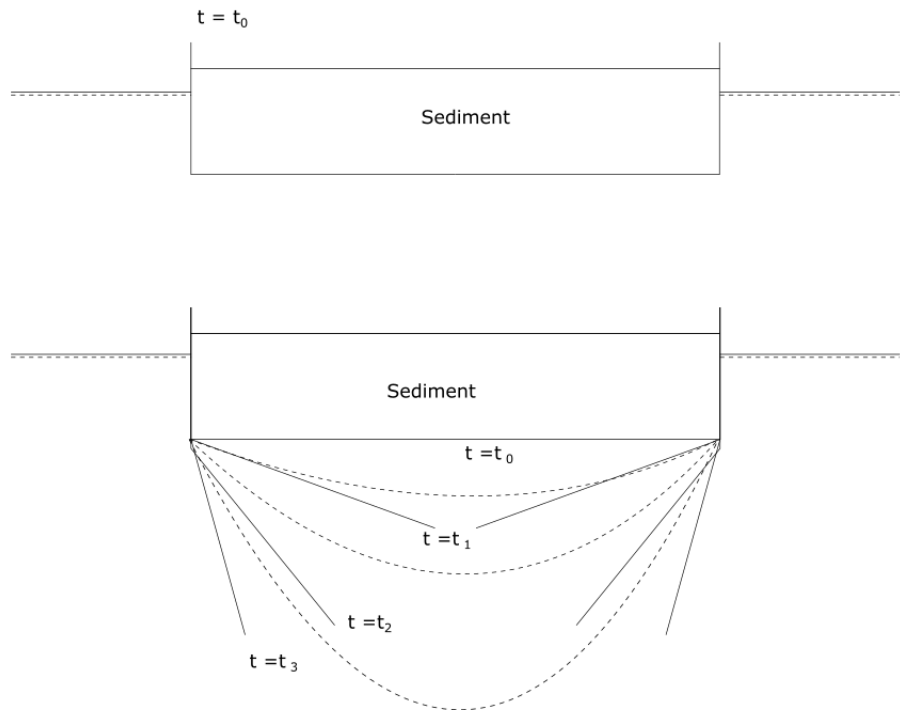
Den kritiske strømhastighed varierer alt efter kornstørrelse, korndensitet og mængden af sediment, der klappes. Jo mere sediment der klappes, jo større er den kritiske hastighed.

## 6.2 Beregningsparametre

I det følgende antages det, at der klappes 4.000 m<sup>3</sup> pr døgn fordelt på én klappning. Dette betyder, at klappning af alt materialet vil foregå over en periode på 90 dage.

Klapmetoden, som anvendes i de følgende beregninger, er gradvis klappning fra pram, hvor tømningen af prammen strækker sig over 300 s, som illustreret i Figur 6.2. Da 5 % sediment tabes i vandsøjlen, baseres hver klappberegning på 3.800 m<sup>3</sup> sediment.

Figur 6.2: Illustration af hvordan pram tømmes under gradvis tømnings.



I klapmodellen er det muligt at angive to sedimentfraktioner, en kohæsiv fraktion og en ikke-kohæsiv fraktion. Det kohæsive materiale dækker ler og fint-mellem silt fraktionerne i Tabel 4.1, og det ikke-kohæsive materiale dækker mellem-grov silt og fint sand fraktionerne i Tabel 4.1. Mediankornstørrelserne for de kohæsive og ikke-kohæsive fraktioner er angivet i Tabel 6.1 baseret på vægtede gennemsnit.

Tabel 6.1:  
Mediankornstørrelser og fordeling af kohæsive og ikke-kohæsive fraktioner i klapberegning.

	Kohæsiv	Ikke-kohæsiv
Andel	23 %	77 %
Mediankornstørrelse	0,004 mm	0,04 mm

Sedimentspredningen beregnes på baggrund af de sedimentparametre, som er præsenteret i afsnit 4. Der undersøges to forskellige situationer:

- Spredning af sediment ved store strømhastigheder, der overskrider den kritiske hastighed, og som kan bringe sedimentet langt væk fra klapplassen,
- Sedimentering ved klapplasser med strømhastigheder under den kritiske.

For sedimentet angivet i Tabel 6.1 er den kritiske hastighed 0,14 m/s. Da strømhastigheden sjældent når over den kritiske i sommerperioden, jf. strømrosen Figur 3.2, betragtes sommerperioden som situationen med sedimentering ved klapplassen. For vinterperioden forekommer der hastigheder over den kritiske, jf. Figur 3.3. Denne periode betragtes derfor som situationen, hvor sedimentet spredes væk fra klapplassen.

## 6.3 Resultater

I det næste undersøges det, hvordan sedimentet fra en klappning vil spredes langs bunden.

### 6.3.1 Udbredelse af sedimentpøl

Når sedimentet rammer bunden, spredes det i alle retninger, alt imens det transporteres i strømmens retning som en sedimentpøl. Hvis strømhastigheden er over den kritiske, vil pørens radius og dybde derefter stige, og hvis pølen flyttes længe nok, vil pølen til sidst spredes til hele vandsøjlen. Da sedimentpølen bliver større i volumen, falder koncentrationen af sedimentet i sedimentpølen derfor samtidig.

Først undersøges udbredelsen af en enkelt klappning, samt koncentrationen af miljøfarlige stoffer som funktion af afstand fra klapplassen.

#### 6.3.1.1 Spredning af sediment og miljøfarlige stoffer ved én enkelt klappning

For at få et indtryk af hvordan sedimentet og de miljøfarlige stoffer spredes, beregnes sedimentkoncentrationen for en enkelt klappning under høj hastighed over den kritiske.

Da 5 % af sedimentet tabes i vandsøjlen betragtes kun 3.800 m<sup>3</sup> sediment i beregningen. Ændringerne i pørens volumen og koncentrationer varierer ikke meget med strømhastigheden (den skal blot være over den kritiske). En strømhastighed på 0,2 m/s betragtes derfor i de følgende analyser. Det antages, at strømhastigheden forbliver over den kritiske under hele spredningen med en konstant værdi på 0,2 m/s.

Sedimentpørens udbredelse som funktion af afstand til klapplassen er vist i Figur 6.3. Koncentrationen af tørstof i sedimentpølen er også angivet, samt tykkelsen af sedimentlaget, hvis sedimentpølen falder til bunds på grund af ændrede strømforhold.

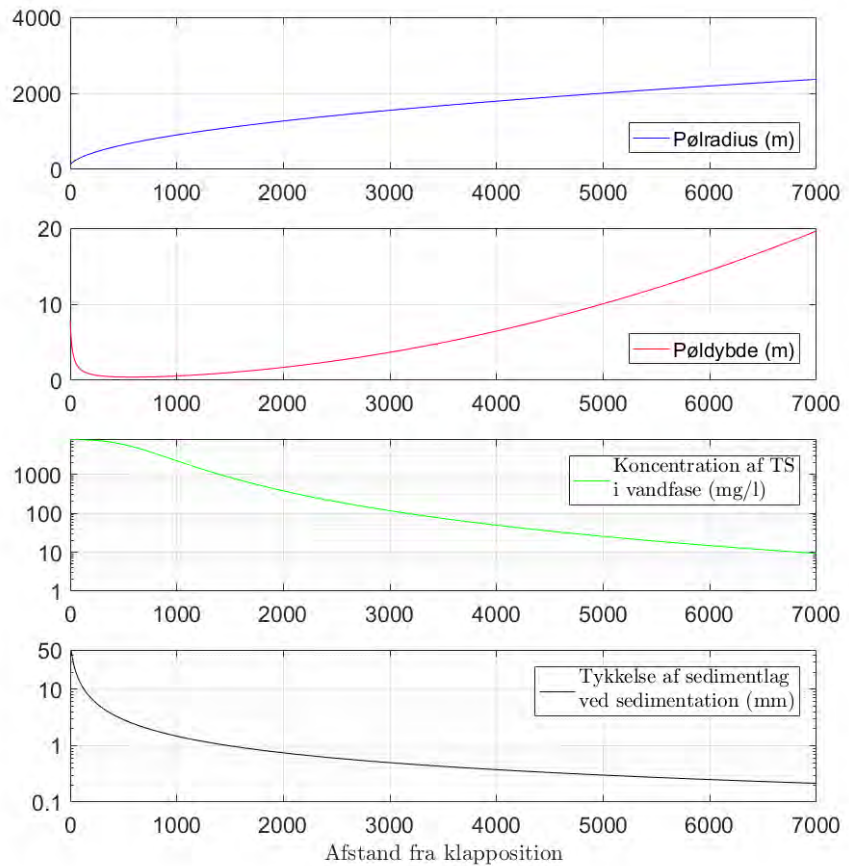
Efter klappning bevæger sedimentpølen sig nær bunden. Fra klappositionen og frem til 600 m fra klappositionen falder sedimentpørens dybde fra 8 m til 0,5 m, hvorefter den stiger igen. I en afstand af 5.000 m fra klapplassen har sedimentpølen spredt sig til halvdelen af vandsøjlen, mens sedimentpølen fylder hele vandsøjlen på 20 m cirka 7.000 m fra klappositionen. Pørens radius udvides fra materialet klappes. Udvidelsen sker hurtigt lige efter klappning men falder i tempo, som pølen bevæger sig væk fra klappositionen. I en afstand af 1000 m fra klapplassen er pørens radius 900 m, mens den 2000 m fra klappositionen er 1280 m.

Da pølen udvides i omkreds vil tykkelsen af sedimentlaget ved en evt. sedimentation, når strømhastigheden kommer under den kritiske, falde tilsvarende og er 1.000 m og 2.000 m fra klappositionen henholdsvis 1 og 0,5 mm.

Koncentrationen af tørstof i vandfasen falder på samme måde, som sedimentpølen bevæger sig væk fra klapplassen. I en afstand af 1.000 m fra klappositionen er koncentrationen  $C_p = 2100$  mg/l. Sedimentpølen bevæger sig her nær bunden med en højde på 0,5 m og en radius på 900 m. I en afstand af 2.000 m fra klappositionen er koncentrationen  $C_p = 360$  mg/l. Sedimentpølen bevæger sig i denne afstand stadig over bunden, med en dybde på 1,7 m og en radius på 1280 m. I en afstand af 5.000 m fra klapplassen, hvor sedimentpølen har spredt sig til halvdelen af vandsøjlen, er koncentrationen faldet til 27 mg/l.

Klapmodellen er kun gyldig, til sedimentpølen er spredt til hele vandsøjlen omkring 7.000 m fra klappositionen. Herefter antages det, at sedimentet bevæger sig som frie partikler og falder mod bunden som funktion af deres faldhastighed samtidig med, at partiklerne transporteres med af strømmen. Koncentrationen af sediment i vandsøjlen falder derfor stadig. I en afstand af 7.000 m fra klappositionen, hvor sedimentpølen er spredt til hele vandsøjlen, har pølen en radius på 2380 m og en koncentration på 9 mg/l. I tilfælde af sedimentation, vil sedimentlaget have en tykkelse på 0,2 mm.

Figur 6.3: Udbredelse af sedimentpøl for strømhastighed på 0,2 m/s.



Koncentrationen af miljøfarlige stoffer (cadmium, kobber, zink, kviksølv og TBT) i sedimentpølen fra en enkelt klappning er i Figur 6.4 til Figur 6.8 sammenholdt med det generelle kvalitetskrav og maksimumkoncentrationen. For cadmium, kobber og zink er både den totale koncentration samt den del, der er opløst i vandfasen angivet, da det generelle kvalitetskrav og maksimumkoncentrationen for disse stoffer gælder for den vandopløselige del. Til beregning af den vandopløselige koncentration er brugt Miljøstyrelsens vejledende  $K_d$ -værdier på 100, 1000, 800 og 5 l/mg for henholdsvis cadmium, kobber zink, og kviksølv [8].

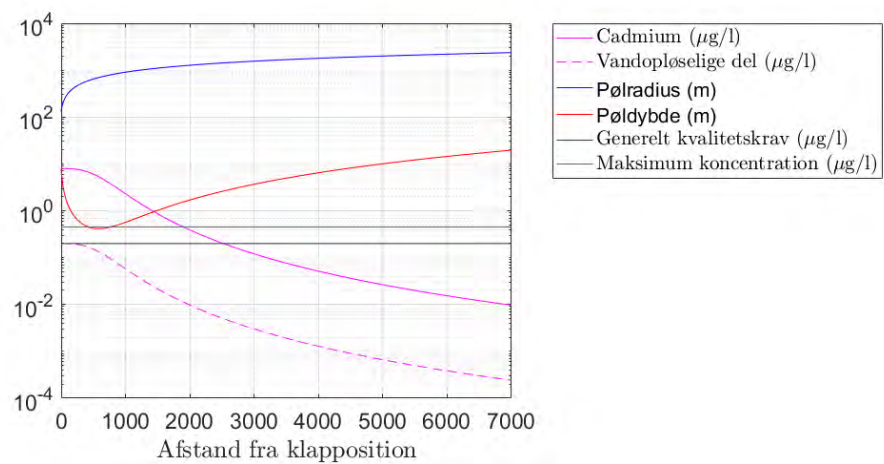
For både cadmium, kobber og zink er koncentrationen af den vandopløste del under maksimumkoncentrationen allerede ved klappning.

For den totale koncentration er det generelle kvalitetskrav overholdt for cadmium, kobber og zink henholdsvis 2.500, 2.800 og 3.800 m fra klappositionen.

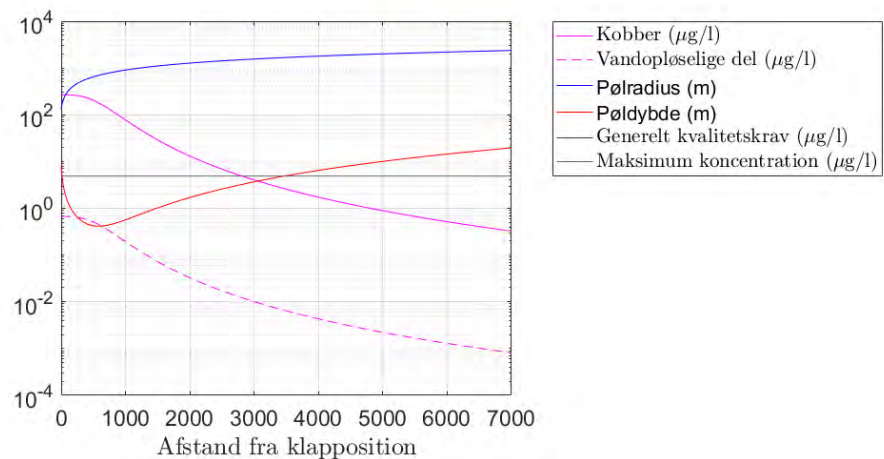
For kviksølv findes kun en maksimum koncentration. Den vandopløselige del af kviksølvet er under denne koncentrationen 600 m fra klappositionen, mens den totale koncentration er under maksimum koncentrationen 2.400 m fra klappositionen.

Koncentrationen af TBT er under den tilladte maksimumkoncentration 3.500 m fra klappositionen og under det generelle kvalitetskrav omkring 7.000 m fra klappositionen.

Figur 6.4: Koncentration af cadmium som funktion af afstand til klapposition.

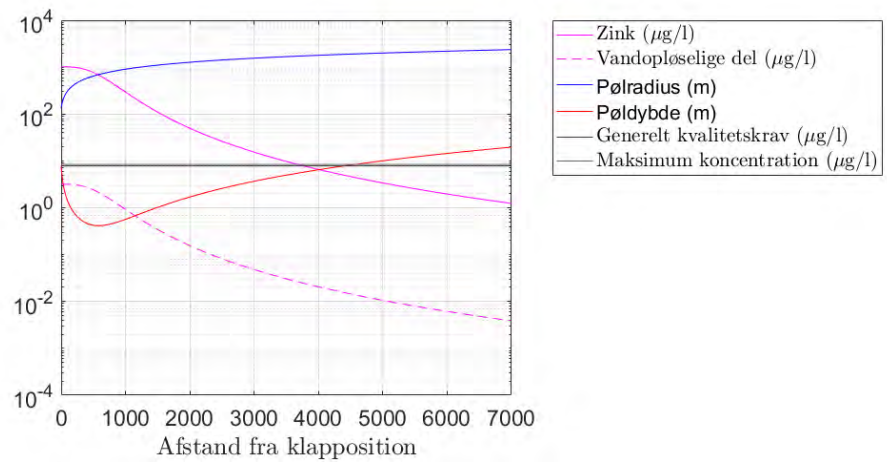


Figur 6.5: Koncentration af kobber som funktion af afstand til klapposition.

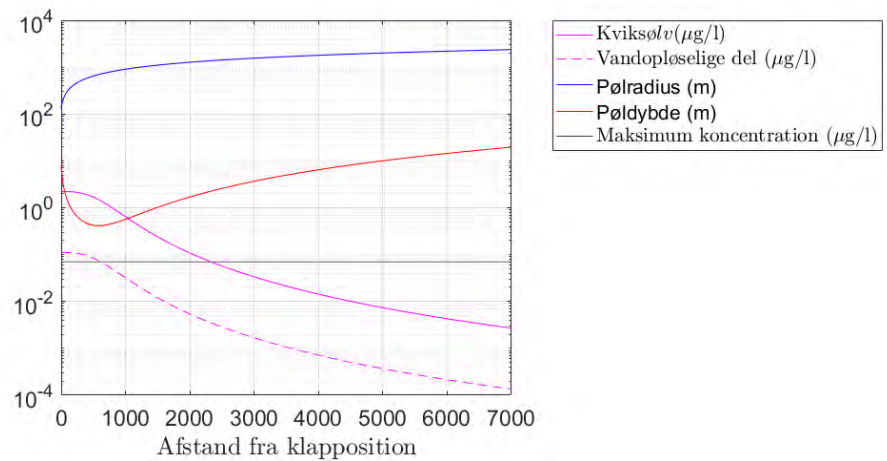




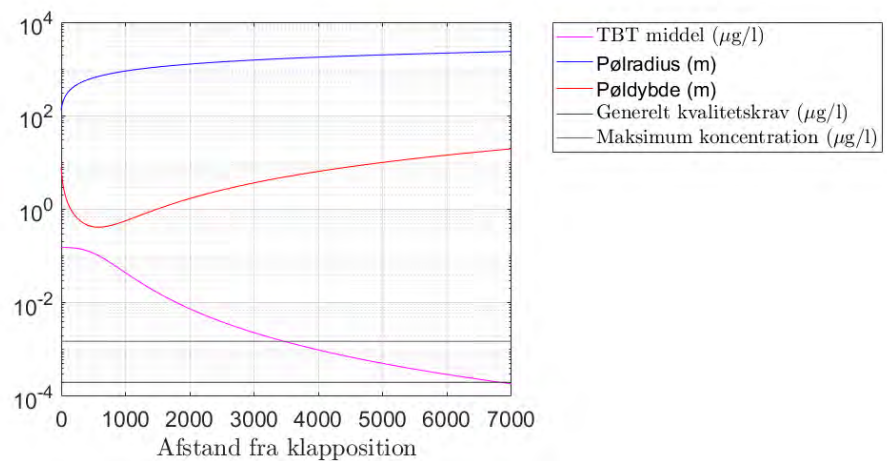
Figur 6.6: Koncentration af zink som funktion af afstand til klapposition.



Figur 6.7: Koncentration af kviksølv som funktion af afstand til klapposition.



Figur 6.8: Koncentration af TBT som funktion af afstand til klapposition.





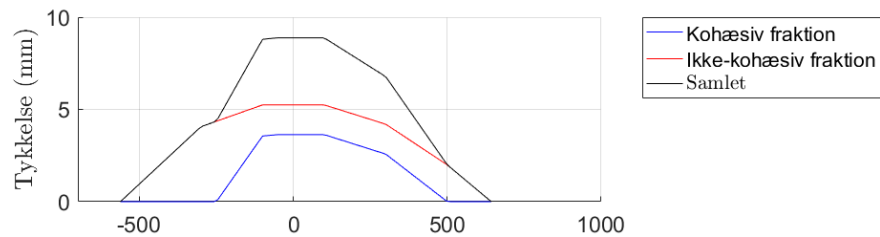
## 6.3.2 Sedimentering af klapmateriale

### 6.3.2.1 Sedimentering af én klapning

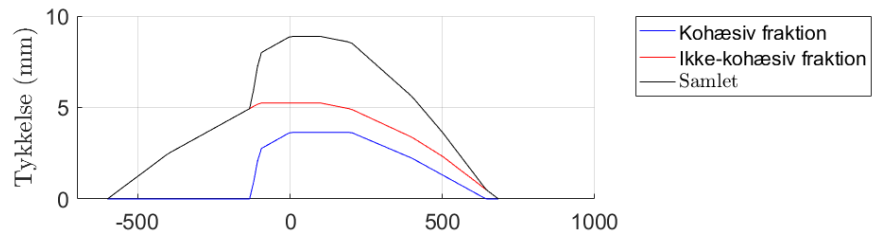
Ved lavere strømhastigheder sedimenteres det ikke-kohæsive materiale og efterlader en plamage af sediment på bunden. Det kohæsive materiale vil samle sig i en sedimentpøl, der langsomt falder ned gennem vandsøjlen og stiger i radius til det rammer bunden.

Figur 6.9 til Figur 6.10 viser den samlede sedimentation af en enkelt klapning for henholdsvis en strømhastighed,  $u$ , på 0,05 m/s og 0,14 m/s. Tykkelsen af det sedimenterede materiale er for begge strømhastigheder under 10 mm. Det ikke-kohæsive materiale ligger i en plamage symmetrisk omkring klappositionen. Spredningen af det kohæsive materiale varierer derimod. Jo større strømhastighed, jo mere flyttes sedimentet med strømmen, før det sedimenterer. Det kohæsive materiale flyttes dog ikke længere væk fra klappositionen end det ikke-kohæsive materiale.

Figur 6.9: Samlet sedimentation af en enkelt klapning for strømhastighed på  $u=0,05$  m/s.



Figur 6.10: Samlet sedimentation af en enkelt klapning for strømhastighed på  $u=0,14$  m/s.



## 7 Samlet spredning og sedimentation

I det næste sammenkobles de 5 % sediment tabt i vandsøjlen, beskrevet i afsnit 5, med de resterende 95 %, der spredes langs med bunden, beskrevet i afsnit 6.

### 7.1 Forventet udbredelse af klappet materiale

Til beregning af hvordan det klappede materiale vil blive spredt, benyttes de beregnede strømhastigheder fra MIKE-beregningerne præsenteret i afsnit 5.

Som allerede nævnt antages én klapning pr døgn. Dernæst antages det, at klappingen foregår til samme tidspunkt hver dag. Ved hjælp af de beregnede strømhastigheder og retninger fra MIKE-beregningerne kan det beregnes, hvordan sedimentpølen vil bevæge sig ved at opstillet en model til løsning af differentielligningen

$$u = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{x_{i+1} - x_i}{t_{i+1} - t_i}$$

Her er  $u$  hastigheden,  $\Delta x$  er afstanden og  $\Delta t$  et tidsskridt. Til et tidspunkt ( $t_i$ ) aflæses strømhastighed og retning på sedimentpølsens nuværende position ( $x_i$ ). En ny position af sedimentpølen til næste tidsskridt kan dermed beregnes ved

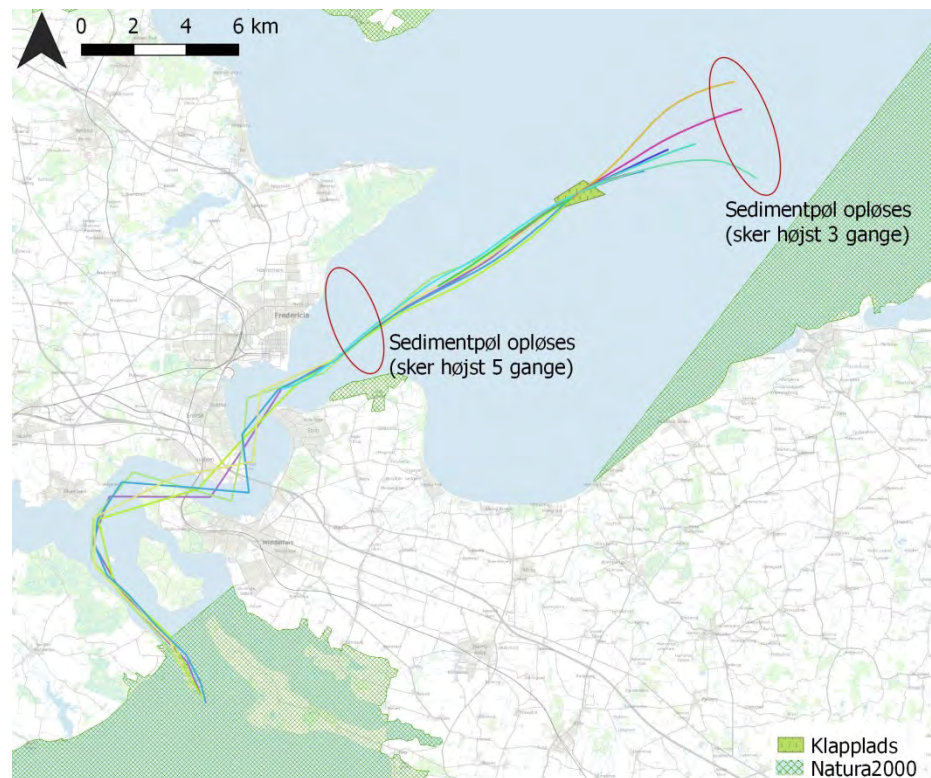
$$x_{i+1} = u_i(t_{i+1} - t_i) + x_i = u_i\Delta t + x_i$$

Så længe strømhastigheden er over den kritiske, vil sedimentpølen flytte sig. Hvis strømhastigheden falder til under den kritiske hastighed vil sedimentpølen sedimentere. Hvis sedimentpølen har bevæget sig mere end 7.000 m, stopper modellen, da klapberegningen derefter ikke er gyldig.

Til hver position af sedimentpølen kan koncentrationen af de 5 % sediment tabt i vandsøjlen til samme tid aflæses fra MIKE-beregningen, og koncentrationen af tørstof i sedimentpølen kan dermed sammenholdes med koncentrationen suspenderet sediment i vandsøjlen. Som i MIKE-beregningerne antages det, at alle klappinger foregår i samme position i midten af klapplassen. I virkeligheden vil klappingerne blive fordelt på hele klapplassen. Vanddybden er i beregningerne antaget at være konstant 20 m.

I Figur 7.1 ses spredning af de 90 klappinger i vinterperioden. Hver linje angiver én sedimentpøls flytning væk fra klapplassen, hver gang strømhastigheden er større end den kritiske, når der klappes. Dette sker 24 gange i løbet af klapperperioden (ud af i alt 90 klappinger). Hvis sedimentpølen flyttes 7.000 m sydvest for klapplassen, vil sedimentet blive ført gennem Lillebælt og blive spredt syd for Lillebælt. Dette vil højst kunne ske 5 gange i vinterperioden. I modsat retning vil sedimentpølen for 4 klappinger blive flyttet 7.000 m i nordøstlig retning. Herefter er klapmodellen ikke gyldig, og det antages i stedet, at sedimentet bevæger sig som frie partikler og falder mod bunden som funktion af deres faldhastighed samtidig med, at partiklerne transporteres med af strømmen. Derudover vil sedimentet for 15 klappinger blive transporteret væk fra klapplassen i en sedimentpøl, men vil sedimentere, før sedimentpølen er transporteret 7.000 m væk. For de resterende 66 klappinger vil det klappede sediment sedimentere på klapplassen, da strømhastigheden er under den kritiske, når der klappes.

Figur 7.1: Spredning af sedimentpøl under en vinterklapning. Hver linje viser, hvordan sedimentpølen spredes, hvis strømhastigheden er større end den kritiske, når der klappes. Når strømhastigheden falder under den kritiske, sedimenterer pølen. Hvis sedimentpølen flyttes 7000 m væk fra klappositionen opløses pølen.



Ved klapning om sommeren, vil én sedimentpøl i forbindelse med klapning blive transporteret syd for Lillebælt, som vist i Figur 7.2. For to klapninger vil der blive dannet en sedimentpøl, som transporteres omkring 1000 m væk fra klappositionen før de sedimenterer (rød og grøn linje ved klappladsen i Figur 7.2). For de resterende klapninger er strømhastigheden under den kritiske, når der klappes, og sedimentet vil derfor sedimentere på klappladsen.

Figur 7.2: Spredning af sedimentpøl under en sommerklapning. Hver linje viser, hvordan sedimentpølen spredes, hvis strømhastigheden er større end den kritiske, når der klappes. Når strømhastigheden falder under den kritiske, sedimenterer pølen. Hvis sedimentpølen flyttes 7000 m væk fra klappositionen opløses pølen.



I Figur 3.2 og Figur 3.3, som viser strømrøserne ved klapplassen, blev det set, at strømmen oftere er i nordøstlig retning end i sydvestlig retning. Årsagen til at sedimentpølen alligevel oftere transporteres mod syd skyldes, at strømhastighederne mod nord aftager, da tværsnittet udvides, mens de øges mod syd, hvor bæltet mellem Jylland og Fyn snævres ind.

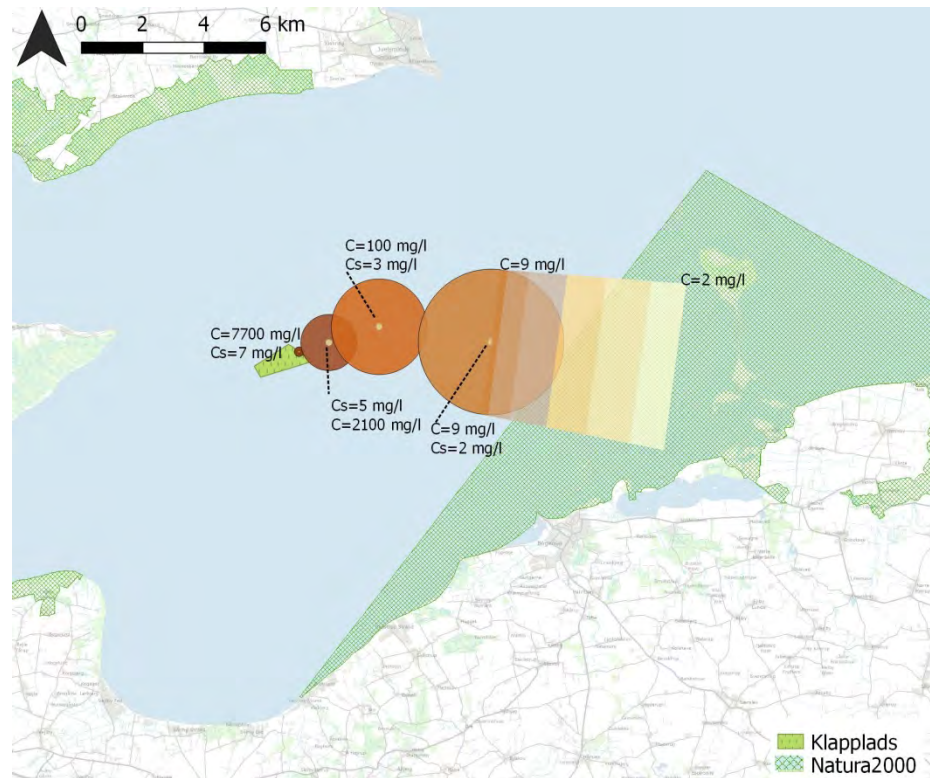
### 7.1.1 Sedimentpølsens udbredelse

Sedimentpølsens udbredelse i nordlig retning er vist i Figur 7.3. I figuren er både koncentrationen af sediment i sedimentpølen samt koncentrationen af de 5 % sediment tabt i vandsøjlen angivet. De 5 % sediment tabt i vandsøjlen er aflæst i MIKE-beregningerne i midten af sedimentpølen til samme tidspunkt, som sedimentpølen passerer punktet. De 5 % sediment bevæger sig af sted som frie partikler, der langsomt falder til bunds som funktion af sedimentpartiklernes faldhastighed. Det antages, at de 5% sediment tabt i vandsøjlen spreder sig til en diameter af omkring 200 m. Volumenet af denne koncentration er derfor mindre end sedimentpølen.

I nordlig retning er spredningen af sedimentpølen vist for det tilfælde, hvor sedimentpølen bevæger sig ind i Natura 2000 området ud for kysten ved Nærå og Æbelø. Dette vil ske for to af de i alt fire klapninger, hvor sedimentpølen spredes 7.000 væk fra klappositionen. For de to andre klapninger, vil sedimentpølen bevæge sig mere i nordlig retning og derfor udenfor Natura 2000-området.



Figur 7.3: Spredning af sedimentpøl i nordlig retning. Figuren viser sedimentpølsens placering, størrelse og koncentration,  $C$ , henholdsvis 10, 1000, 3000 og 7000 m fra klappositionen, samt hvordan sedimentet vil spredes, når sedimentpølen opløses 7.000 m fra klappositionen. Sedimentkoncentrationen af de 5 % sediment tabt i vandsøjlen i midten af sedimentpølen,  $C_s$ , til samme tid er også angivet i figuren. Værdierne af disse er aflæst i MIKE-beregningerne.

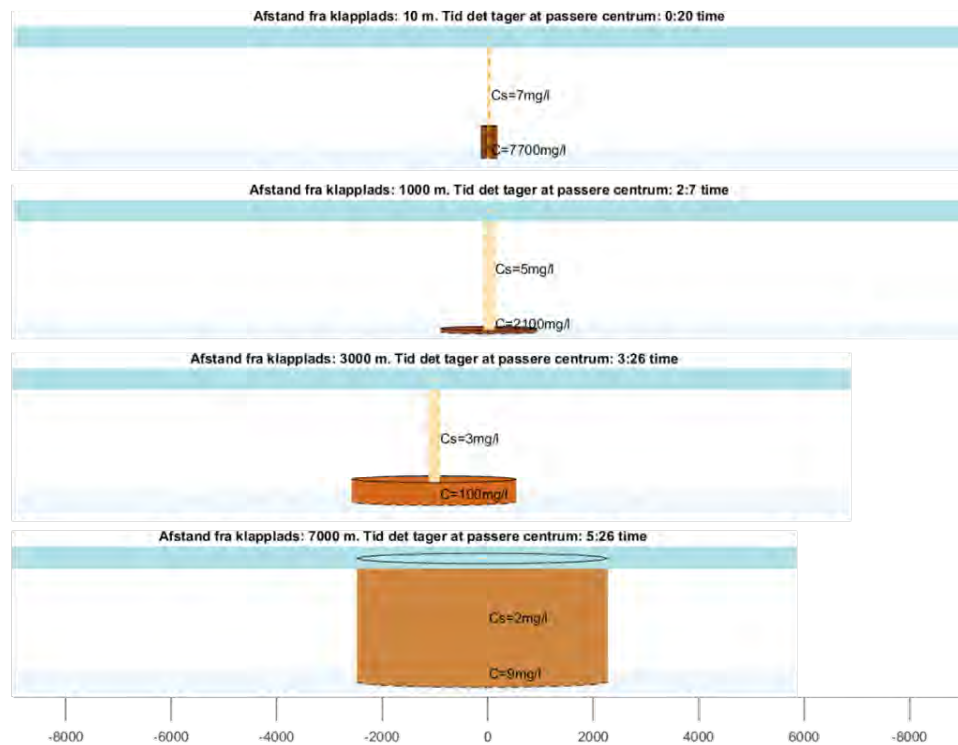


I Figur 7.4 ses sedimentpølsens udbredelse i vandsøjlen samt på tværs af bæltet fra Jylland til Fyn. De 5 % sediment tabt i vandsøjlen fordeles i hele vandsøjlen, mens sedimentpølen først er udbredt til hele vandsøjlen 7.000 m fra klappositionen, hvor koncentrationen af sediment er på 9 mg/l.

I en afstand af 100 m fra klappositionen er sedimentkoncentrationen 7.700 mg/l. Sedimentpølen udgør dog en lille del af hele vandvolumenet på denne strækning, og som det også er angivet i Figur 7.4, tager det højst 19 minutter for sedimentpølen at passere et punkt. Som sedimentpølen udvides, vil det tage længere og længere tid for sedimentpølen at passere et punkt, men til gengæld falder koncentrationen.

I en afstand af 7.000 m fra klappositionen tager det sedimentpølen omkring 5½ time at passere et punkt, og sedimentpølen har en bredde, der er omkring ¼ af hele strækningen mellem Jylland og Fyn (ud for Vejle Fjords udmundning), mens koncentrationen er på 9 mg/l i sedimentpølen og koncentrationen af de 5 % sediment tabt i vandsøjlen er nede på 2 mg/l.

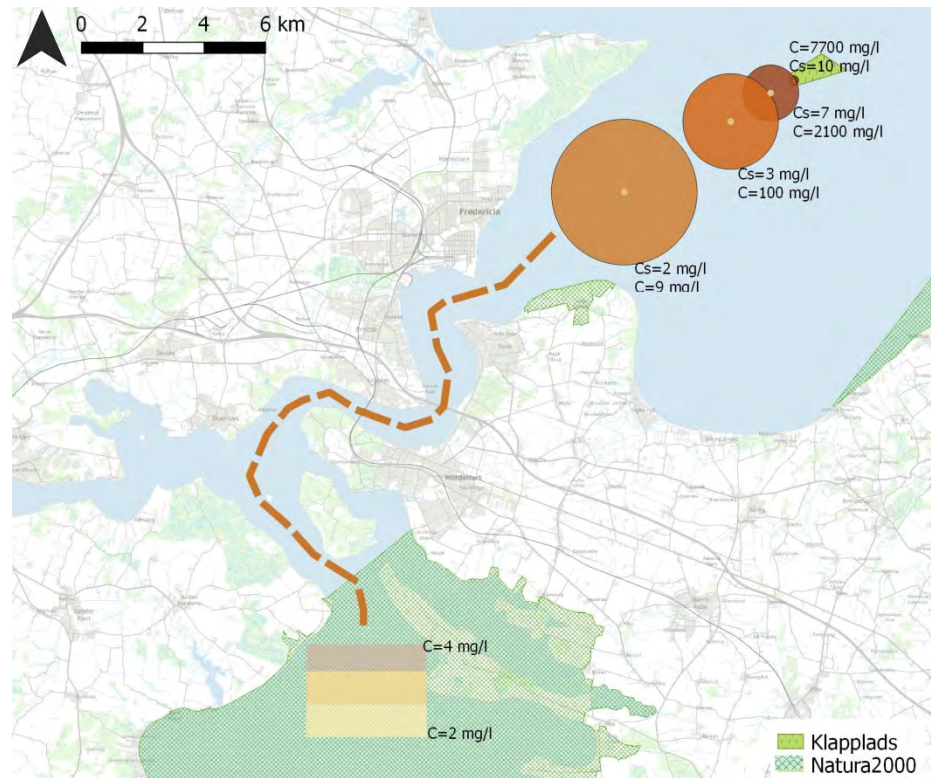
Figur 7.4: Sedimentpølens udbredelse i vandsøjlen samt på tværs af sundet ud for Vejle Fjords udmunding i de samme afstande fra klappositionen som i Figur 7.3. I figuren er det også angivet, hvor lang tid det tager for sedimentpølen at passere centrum.



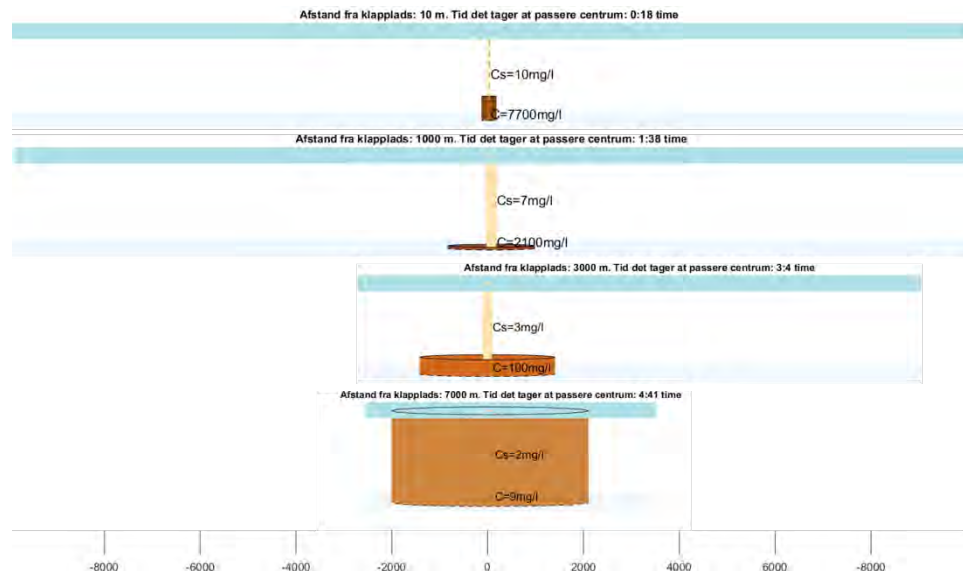
Ved sydgående strøm vil sedimentpølen bevæge sig ned mod Lillebælt (Figur 7.5). Koncentrationen i sedimentpølen svarer til koncentrationen af sedimentpølen i nordlig retning. Koncentrationen af de 5 % sediment i vandsøjlen varierer dog lidt, men er også i sydlig retning mindre 10 mg/l.

Bredden af bæltet fra Jylland til Fyn snævrer ind syd for klappladsen. I en afstand af 7.000 m fra klappositionen, hvor sedimentpølen er udbredt til hele vandsøjlen, har sedimentpølen en diameter på omkring 4.800 m, mens bredden af bæltet, hvor det er mindst, er omkring 7.000 m (Figur 7.6). Koncentrationen i sedimentpølen er her 9 mg/l, mens koncentrationen af de 5 % sediment tabt i vandsøjlen er 2 mg/l.

Figur 7.5: Spredning af sedimentpøl i sydlig retning. Figuren viser sedimentpølsens placering, størrelse og koncentration,  $C$ , henholdsvis 10, 1000, 3000 og 7000 m fra klappositionen, samt hvordan sedimentet vil spredes, når sedimentpølen opløses 7000 m fra klappositionen. Sedimentkoncentrationen af de 5 % sediment tabt i vandsøjlen i midten af sedimentpølen,  $C_s$ , til samme tid er også angivet i figuren. Værdierne af disse er aflæst i MIKE-beregningerne.



Figur 7.6: Sedimentpølsens udbredelse i vandsøjlen i sydlig retning samt på tværs af bæltet i de samme afstande fra klappositionen som i Figur 7.5. I figuren er det også angivet, hvor lang tid det tager for sedimentpølen at passere centrum.



Som allerede nævnt er klapmodellen kun gyldig til sedimentpølen er udbredt til hele vandsøjlen. Herefter vil sedimentpartiklerne bevæge sig som frie partikler med strømmens hastighed samtidig med, at de langsomt falder til bunds som funktion af sedimentpartiklernes faldhastighed angivet i Tabel 4.1.

I løbet af den første time vil al det fine sand være faldet til bunds, mens det tager 12 timer for det mellem-grove silt at falde til bunds. Det betyder at 12 timer efter sedimentpølen er opløst, er 77 % af al det klappede materiale i sedimentpølen sedimenteret. De sidste 23 % af det klappede materiale er meget fint og vil blive spredt med strømmen, mens det langsomt falder til bunds. Efter 12 døgn er det kun lerpartiklerne, som stadig er i suspension.

Hvis en strømhastighed på 0,15 m/s antages, vil sedimentpartiklerne i løbet af henholdsvis 1, 6 og 12 timer have bevæget sig med afstanden angivet i Tabel 7.1, hvor det også er angivet, hvor stor en sedimentfraktion (af de 3.800 m<sup>3</sup> der spredes med sedimentpølen), der endnu ikke er faldet til bunds og sedimenteret. I denne betragtning inkluderes de 5 % sediment tabt i vandsøjlen ikke, da koncentrationen af dette sediment i denne afstand fra klapplassen er lille og kun udgør et lille volumen.

*Tabel 7.1: Antal timer efter sedimentpøl er opløst og den tilsvarende afstand sedimentet har bevæget sig hvis en strømhastighed på 0,15 m/s antages, samt hvor meget sediment der stadig er i suspension.*

	1 time	6 time	12 time
Distance (m)	540	3240	6480
Del af sediment som stadig er i suspension	83 %	53 %	23 %

I Figur 7.3 er det yderligere vist, hvordan sedimentet spredes efter sedimentpølen er opløst, samt hvad sedimentkoncentrationen er. Sedimentet spredes i en fane, der langsomt udvides, men hvor koncentrationen også langsomt falder. Med en nordliggående strøm er der risiko for at sedimentet fra én klappning spredes ind i Natura 2000 området ud for kysten ved Næså og Æbelø, men koncentrationen er her under 8 mg/l, og vil 12 timer efter sedimentpølen er opløst være 2 mg/l. Som det ses af Figur 7.1, kan strømmen dog også være mere nordgående, hvilket betyder, at mindre sediment spredes til Natura 2000-området. Spredning af sedimentpølen 7.000 m væk fra klapplassen i nordøstlig retning vil højst forekomme 3 gange i løbet af klapperperioden, hvis der klappes om vinteren og vil ikke forekomme om sommeren.

Med en sydlig strøm vil sedimentet blive transporteret gennem Lillebælt og spredt til området syd for Lillebælt som vist i Figur 7.5. Dette vil ske i højst 5 ud af 90 klappninger om vinteren og 1 ud af 90 klappninger om sommeren. Distancen, som sedimentet bevæger sig gennem Lillebælt, er omkring 22 km. Antages en strømhastighed på omkring 1 m/s vil det tage sedimentet 6 timer at bevæge sig gennem Lillebælt. Andelen af sediment, der aflejres i Lillebælt, vil derfor være omkring 50 % af det klappede sediment, dvs. omkring 2.000 m<sup>3</sup> pr klappning. Koncentrationen i vandsøjlen, når sedimentet rammer Natura 2000 området syd for Lillebælt, vil derfor være omkring 4 mg/l som vist i Figur 7.5. 6 timer senere er koncentrationen nede på 2 mg/l. Dette vil højst ske én gang, hvis der klappes om sommeren, og op til fem gange, hvis der klappes om vinteren.

Den største påvirkning fra det klappede sediment kommer fra den primære aflejring, hvor der spildes over hele vandsøjlen. Efter aflejring vil det klappede sediment indgå i den naturligt forekommende sedimentspredning og transport i området på og nær klapplassen, og det klappede sediment vil spredes med det i forvejen forekommende sediment. Koncentrationerne af klappematerialet vil derfor være langt mindre i den efterfølgende sedimenttransport sammenlignet med koncentrationerne i sedimentpølen væk fra klapplassen og med størrelsesordenen, som er sammenlignelige med den aktuelle baggrundskoncentration. De grove



sedimentfraktioner (grov silt og fin sand), som udgør 77 % af klappmaterialet, vil blive spredt langs havbunden og vil ikke blive resuspenderet til hele vandsøjlen.

## 7.2 Samlet sedimentation

I det næste vises den samlede sedimentation af alle klapninger. Både sedimentationen af de 5 % tabt i vandsøjlen samt sedimentation af de resterende 95 %, der spredes langs bunden, betragtes. Dog vil sedimentationen af de klappinger, hvor sedimentpølen flyttes 7.000 m væk fra klapplassen og opløses ikke blive taget med.

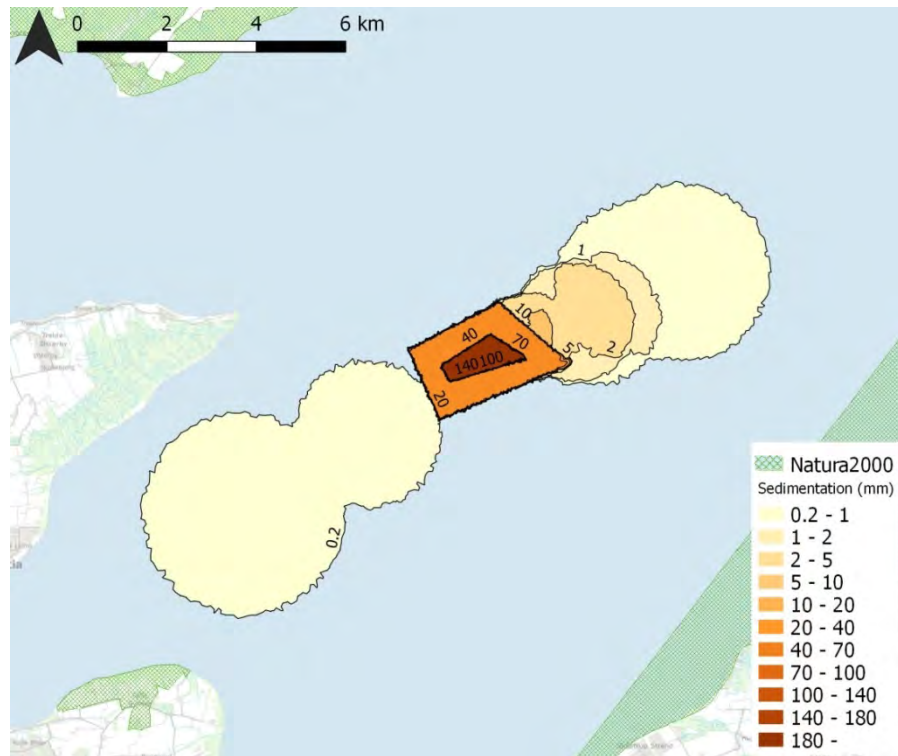
For klappning om sommeren vil sedimentet fra én klappning blive transporteret syd for Lillebælt og for klappning om vinteren vil 5 klappinger transporteres syd for Lillebælt og 3 klappinger transporteres 7.000 m nord-øst for klapplassen. Sedimentet i disse sedimentpøler vil blive spredt yderligere, da aflejringen afhænger af sedimentpartiklernes faldhastighed. Sedimentlaget af en klappning vil derfor være mindre end 0,2 mm.

Figur 7.7 viser den samlede sedimentation efter endt klappning om vinteren. Som allerede nævnt foregår alle klappinger i beregningen i samme position på midten af klapplassen. I virkeligheden vil klappingerne blive fordelt på hele klapplassen. Sedimentet, der sedimenterer inde på klapplassen, er derfor fordelt jævnt ud. Halvdelen af dette materiale er fordelt på et ydre areal cirka 5 gange større end klapplassen (orange firkant på Figur 7.7), og halvdelen er fordelt inde på klapplassen (brun firkant på Figur 7.7). Dette skyldes, at selv om strømhastigheden er under den kritiske, når der klappes, vil sedimentet stadig spredes 600 m ud fra klappositionen jf. afsnit 6.3.2.1, og derfor også uden for klapplassen.

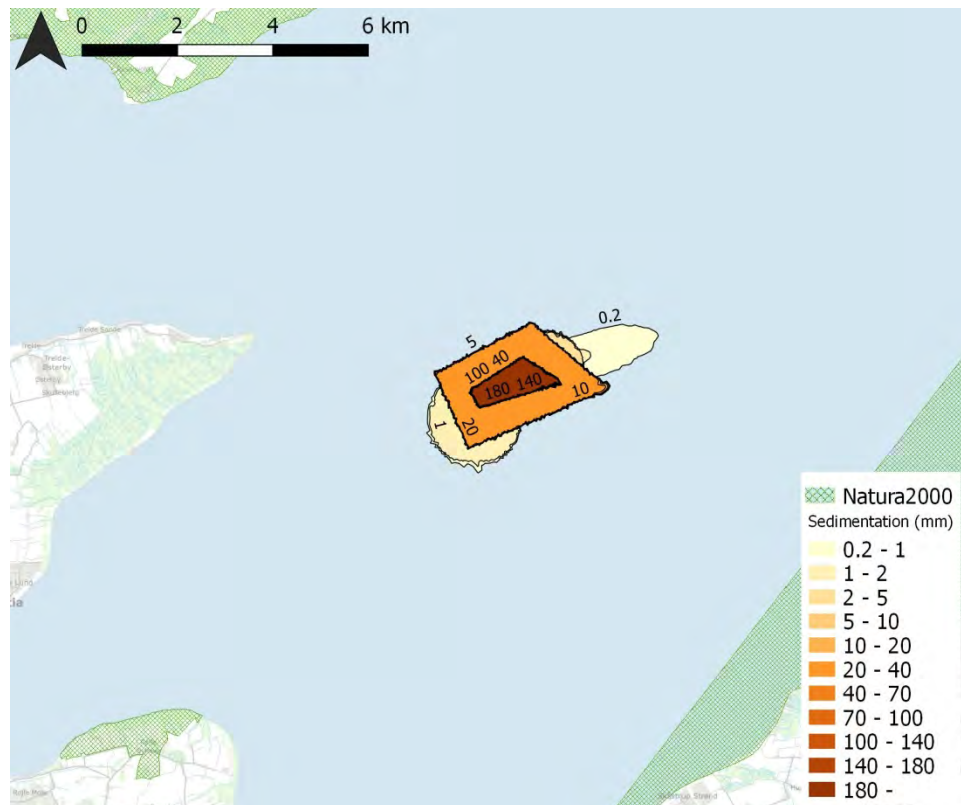
I det ydre areal vil den totale klappning kunne forårsage et sedimentlag på 20-40 mm, mens sedimentlaget inde på klapplassen er 100-140 mm. Nordøst for klapplassen vil der i en afstand af op til 3.500 m fra klapplassen kunne forekomme sedimentlag med tykkelsen 1-10 mm. Omkring 8.000 m sydvest for klapplassen og 6.000 m sydøst for klapplassen vil sedimentlaget være under 0,2 mm.

I tilfælde af klappning om sommeren vil det meste sediment aflejres på klapplassen eller lige omkring klapplassen som vist i Figur 7.8. På det ydre areal er sedimentlaget 20-40 mm og på selve klapplassen 140-180 mm. I en afstand af 2.500 m fra klapplassen er sedimentlaget forårsaget af klappingen under 0,2 mm

Figur 7.7: Den samlede sedimentation efter endt klåpning om vinteren. Både sedimentationen af de 5 % tabt i vandsøjlen samt sedimentation af de resterende 95 % er inkluderet.



Figur 7.8: Den samlede sedimentation efter endt klåpning om sommeren. Både sedimentationen af de 5 % tabt i vandsøjlen samt sedimentation af de resterende 95 % er inkluderet.



Det aflejrede sediment vil efterfølgende indgå i den naturlige sedimenttransport i området.

Sedimentlaget vil med tiden blive udjævnet af bølger og strøm primært i vinterhalvåret, hvor bølgerne og strømhastighederne er størst.

Hvis der klappes om sommeren, vil der ligge ca. 356.000 m<sup>3</sup> tilbage på klapplassen efter klappingen af al materialet, mens der vil ligge 264.000 m<sup>3</sup> tilbage på klapplassen, hvis der klappes om vinteren

Hvis det antages, at strømmen og bølgerne kan transportere samme mængde væk, som der blev transporteret væk under klappingen, dvs. ca. 4.000 m<sup>3</sup> (svarende til 1 klapping) om sommeren og 96.000 m<sup>3</sup> (svarende til 24 klappinger) om vinteren, så vil hele mængden være spredt væk i løbet af 3-4 år.

En lille del af dette materiale vil blive spredt til Natura 2000 områderne nordøst og syd for klapplassen, hvilket samlet set vil kunne føre til en sedimentation på under 1 mm, som vurderes til at være mindre end den naturlige omlejring i området.

Da sedimentet konsoliderer efter klappingen, vil det være sværere for strømmen at resuspendere det klappede materiale, og det vil derfor antageligt tage noget længere tid, før mængden er helt spredt og integreret i den omkringliggende havbund.

Under denne spredningsproces vil koncentrationerne af sedimentet, når det omfordeles være langt mindre end under klappingen og i størrelsesorden svarende til den naturlige koncentration i vandet i området.

## 7.2.1 Sedimentation af miljøfarlige stoffer

Som beskrevet i bilag 8 til klappansøgning om miljøfarlige stoffer, så findes der allerede miljøfarlige stoffer i sedimentet omkring klapplassen og Lillebælt. Indholdet af de miljøfarlige stoffer cadmium, kobber, TBT og PAH ved NOVANA stationen VEJLBNO5002 er angivet i Tabel 7.2. Stationens placering kan ses i bilag 8 til klappansøgning om miljøfarlige stoffer.

Tabel 7.2: Koncentrationen af miljøfarlige stoffer i sedimentprøver ved målestation syd for klapplassen, som vist i bilag 8 til klappansøgning om miljøfarlige stoffer. Tabellen viser yderligere, hvor meget koncentrationen øges efter det klappede materiale er aflejret i området.

	Cadmium	Kobber	TBT	PAH
<b>VEJLBNO5002</b>	0,17 (mg/kg TS)	24,9 (mg/kg TS)	4,6 (µg/kg TS)	0,192 (mg/kg TS)
<b>Procentvis forøgelse i koncentration ved 0,2 mm aflejring ved VEJLBNO5002</b>				
	1 %	0,3 %	1 %	6 %

Det er ikke oplyst i hvilken dybde miljøprøverne er taget. I det næste antages det derfor, at miljøprøver er taget i dybden 0-10 cm. Koncentrationen af de miljøfarlige stoffer i det øverste lag efter endt klapping kan derefter beregnes som

$$C_{ny} = \begin{cases} \frac{C_p h_p + C_k h_k}{h_p} & \text{hvis } h_k < h_p \\ C_k & \text{hvis } h_k \geq h_p \end{cases}$$

Her er  $C_p$  og  $C_k$  koncentrationen af miljøfarlige stoffer i miljøprøven og det aflejrede sedimentlag fra klappning, og  $h_p$  og  $h_k$  er henholdsvis højden af miljøprøven (10 cm) og det aflejrede sedimentlag.

Syd for klapppladsen ved station VEJLBNO5002 vil der sedimentere omkring  $h_k = 0,2$  mm sediment fra klappningen.

I Tabel 7.2 er forøgelsen af miljøfarlige stoffer i de øverste 10 cm af sedimentet angivet, hvis der aflejres 0,2 mm omkring station VEJLBNO5002.

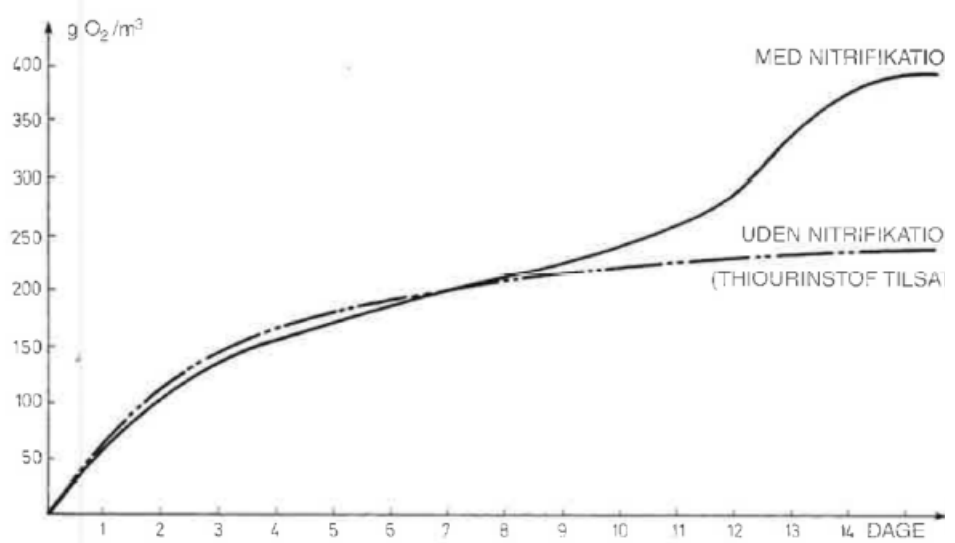
Omkring VEJLBNO5002 vil koncentrationen af cadmium, kobber og TBT højst stige med 1 % i området, hvor klapskyen vil sedimentere, mens koncentrationen af PAH øges med 6 %.

## 8 Iltforbrug

Klapmaterialet har et stort indhold af organisk materiale. Det organiske materiale vil langsomt blive nedbrudt, når det klappes. Denne proces kræver ilt, og det skal derfor undersøges, hvor meget ilt, der potentielt bruges i denne proces. Sedimentprøverne er testet for Biochemical Oxygen Demand, og en gennemsnitsværdi på  $BOD=1.142$  mg  $O_2$ /kg prøve er fundet. BOD er bestemt som sedimentets biokemiske iltforbrug efter 5 dage i mørke ved 20 °C.

I Figur 8.1 [9] ses iltforbruget for råspildevand som funktion af tid. Det ses, at der i løbet af den første dag omdannes 20 % af materialet, og at processen her er lineær. Det vil sige, at der på 1 time vil blive omdannet højst 1 % af det organiske materiale. Hvor hurtigt det organiske materiale omdannes afhænger i høj grad af materialet. Temperaturen af vandet har også betydning for omdannelse af organisk til uorganisk materiale. Nedbrydningen vil være langsommere om vinteren med lave temperaturer. I det næste antages det, at kurven i Figur 8.1 er repræsentativ for det klappede materiale.

Figur 8.1: BOD-analyse på råspildevand fra Lundtofte Renseanlæg. Figuren er fra [9].



Der er to scenarier: (1) For en strømhastighed over den kritiske vil klapmaterialet blive spredt, som beskrevet i afsnit 6.3.1, (2) For en lille strømhastighed vil al

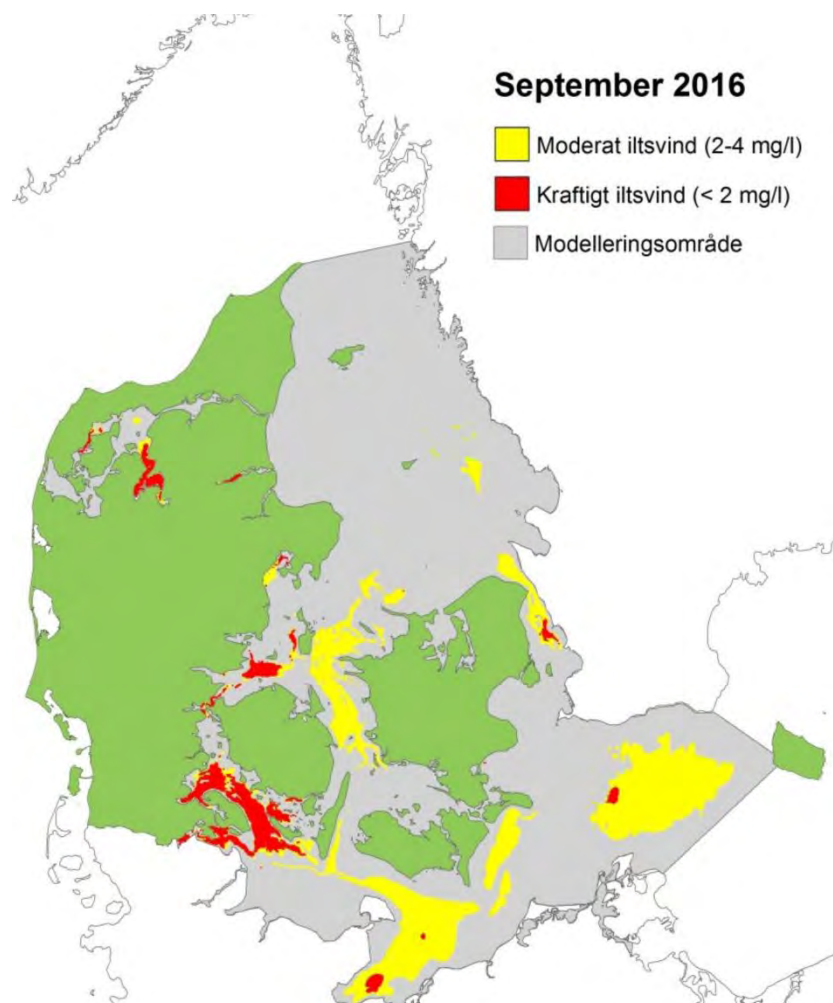
klapmaterialet sedimentere og ligge som en plamage på havbunden. I begge tilfælde skal det undersøges, om der er tilstrækkelig med ilt til at omdanne det organiske materiale.

Under normale omstændigheder er iltindholdet nord for Lillebælt omkring 8 mg/l, da vandet iltes meget pga. den konstante strøm, der er i området.

I perioden juli-september kan der ifølge Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE), som hvert år udgiver rapporter om observeret iltvind i de danske farvande, forekomme iltvind i området omkring klapplassen, hvor det naturlige iltindhold falder til under 4 mg/l [10]. Moderat iltvind forekommer, når iltindholdet er mellem 2-4 mg/l, mens kraftig iltvind forekommer, når iltindholdet er under 2 mg/l.

Figur 8.2 viser en typisk udbredelse af iltvind i området omkring klapplassen i september 2016 [10]. Omkring klapplassen, ved Lillebælt og nord for klapplassen blev der målt kraftig iltvind i dette år.

Figur 8.2: Udbredelse af iltvind i september 2016 [10].



I det næste betragtes derfor 3 scenarier med forskelligt iltindhold på henholdsvis 8, 4 og 2 mg/l.

## 8.1 Iltforbrug for strømning over den kritiske

Med en strømhastighed over den kritiske spredes det klappede materiale i en sedimentpøl. Hvis det antages, at strømhastigheden er 0,2 m/s, kan det i Figur 6.3 aflæses, hvordan sedimentpølelsens form og koncentration ændres som funktion af afstand til klapplassen.

Da processen med at omdanne det organiske materiale det første døgn er lineær (hvor der omdannes 20 %), er det muligt at udregne, hvor meget BOD, der kræves for at omdanne det organiske materiale pr. tidsskridt, f.eks. 1 time i løbet af det første døgn

$$BOD_{\Delta t=1 \text{ time}} = \frac{20\% \cdot BOD}{24 \text{ timer}} = \frac{20\% \cdot 1142 \text{ mg/kg}}{24 \text{ timer}} = 9,5 \frac{\text{mg O}_2 / \text{kg}}{\text{time}}$$

Med en strømhastighed på  $U=0,2$  m/s kan det udregnes, hvor langt sedimentpølen har flyttet sig til forskellige tider, og i Figur 6.3 kan radius,  $r$ , og dybde,  $d$ , af pølen aflæses og volumen af pølen,  $V_{pøl}$ , beregnes til samme tider. Da pølen indeholder  $V_{sediment} = 3.800 \text{ m}^3$  sediment udregnes iltbehovet som

$$\text{Iltbehov} = T \cdot C_p \cdot BOD_{\Delta t}, \quad C_p = \frac{V_{sediment} \cdot \rho}{V_{pøl}}$$

Hvor  $\rho = 1.200 \text{ kg/m}^3$  densiteten af klappmaterialet og  $T$  er antal timer.

Iltbehovet sammenholdes efterfølgende med det naturlige iltindhold i vandet. Tabel 8.1 angiver til forskellige tidsskridt pølelsens afstand til klapplassen samt iltbehovet. Iltbehovet er til alle tidsskridt langt under det naturlige iltindhold.

Hvis det antages, at alt organisk materiale skal omdannes det første døgn, vil behovet den første time være 0,35 mg O<sub>2</sub>/l og derfor stadig langt under det naturlige iltindhold på mellem 2-8 mg O<sub>2</sub>/l.

Tabel 8.1: Iltbehov som funktion af afstand til klapplassen.

T	Afstand fra klapplass	Koncentration, $C_p$	Iltbehov
[timer]	[m]	[mg/l]	[mg O <sub>2</sub> /l]
1	720	5612	0,05
2	1470	1232	0,0117
3	2162	423	0,0040
4	2920	177	0,0017
5	3675	90	0,0009
6	4327	55	0,0005
7	5092	34	0,0003
8	5798	23	0,0002
9	6601	16	0,0001

10	7275	12	0,0001
----	------	----	--------

## 8.2 Iltforbrug for strømning under den kritiske

Ved lave strømhastigheder sedimenterer klapmaterialet og efterlader en plamage af sediment på havbunden. I sådanne tilfælde vil det organiske materiale stadig blive omdannet. Det skal derfor undersøges, hvad iltbehovet i sådanne tilfælde er.

Som en konservativ betragtning antages strømhastigheden at være  $U=0,05$  m/s, da ilttilførslen foregår langsomt, jo mindre strømhastigheden er.

Der klappes  $V=4.000$  m<sup>3</sup> sediment, af disse forsvinder 5 % i vandsøjlen. Massen af de resterende 95 % af klapmaterialet er

$$M = 95\% \cdot \rho \cdot V = 4.560 \text{ ton.}$$

Sedimentplamagen ved en klappning er ikke tykkere end 10 mm. Det forventes derfor, at hele plamagen vil udveksle vand med vandsøjlen.

Antages det, at 20 % af materialet skal omdannes det første døgn, er det samlede iltbehov det første døgn med en  $BOD=1.142$  mg O<sub>2</sub>/kg:

$$\text{Iltbehov} = 20\% \cdot BOD \cdot M = 1 \cdot 10^9 \text{ mg O}_2$$

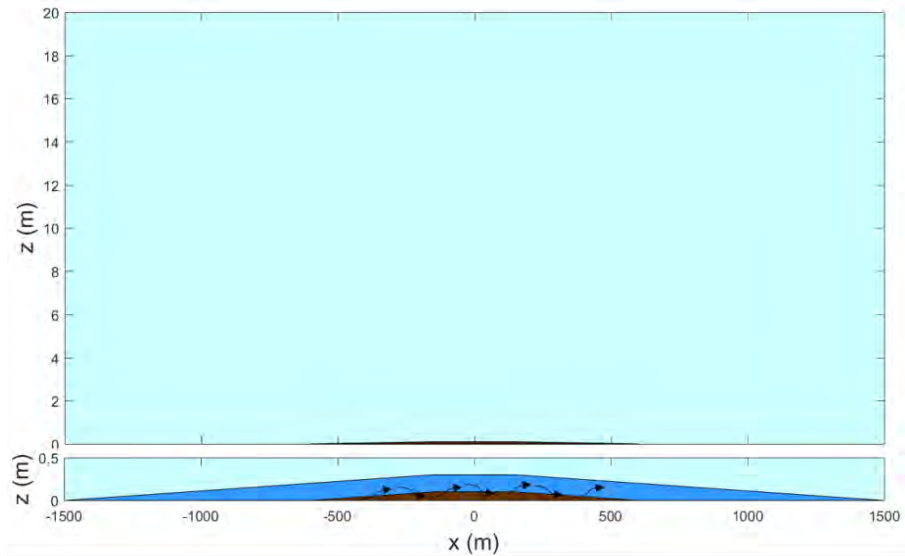
Figur 6.9 viser den samlede sedimentation af en enkelt klappning for en strømhastighed på  $U=0,05$  m/s. Plamagen er i Figur 8.3 idealiseret som en kegle med diameter 1.200 m og højde op 10 mm. Hvis det antages, at det er den første 0,2 m vand over plamagen ( $d=0,2$  m), der udveksler vand med plamagen, så kan ilttilførslen hen over plamagen det første døgn beskrives ved:

$$\text{Ilttilførsel}_{\Delta t=24\text{time}} = q \cdot \text{Iltinhold} \cdot \Delta t,$$

hvor  $q=U \cdot 2r \cdot d$  er fluxen hen over plamagen, som vist i Figur 8.3.



Figur 8.3: Plamagen tykkelse i forhold til vanddyden på 20 m, samt dens radius på  $r=600$  m. I nederste figur ses de 0,2 m vand søjle, som udveksler vand med plamagen. I beregning af ilttilførslen antages det, at fluxen over plamagen er  $q=U \cdot 2r \cdot d$ ,  $d = 0,2$  m.



Ilttilførslen afhænger af det naturlige iltindhold i vandet og er angivet i Tabel 8.2 for et iltindhold på henholdsvis 8, 4 og 2 mg/l.

Tabel 8.2: Ilttilførsel over sedimentplamagen i Figur 8.3 det første døgn.

Iltindhold	8 mg/l	4 mg/l	2 mg/l
Ilttilførsel	$8 \cdot 10^9$ mgO <sub>2</sub>	$4 \cdot 10^9$ mgO <sub>2</sub>	$2 \cdot 10^9$ mgO <sub>2</sub>

Sammenlignet med iltbehovet tilføres cirka 2, 4 og 8 gange så meget ilt, hvis det naturlige iltindhold er henholdsvis 2, 4 og 8 mg/l under antagelse af fuld opblanding. For større strømhastigheder vil ilttilførslen være større.

Efter det første døgn vil processen med at omdanne det organiske materiale gå langsommere. Om sommeren vil det meste materiale sedimentere omkring klapplassen. Mellem hver klapping vil der kunne ske lidt spredning af det sedimenterede klappmateriale og der vil ske en naturlig omlejring. Al materialet vil dog ikke være spredt og der vil derfor blive lagt nye lag sediment efter hver klapping. De "gamle" lag under det nyeste sedimentlag vil ikke få tilført nyt ilt. Omdannelsen af det organiske materiale vil derfor, når iltet i porevolumenet er opbrugt, foregå iltfrit, men dette vil ikke føre til iltsvind i vandfasen over sedimentet.

## 9 Kumulative effekter

Der findes følgende gældende klaptilladelser til klapping på Trelde Næs klappads, som vil kunne bruges i projektperioden for Marina City:

- **Middelfart Havn** har brugt cirka 10.000 m<sup>3</sup> af deres tilladelse på 11.000 m<sup>3</sup>.
- **Kolding Lystbådehavn** har en tilladelse til at klappe 5.000 m<sup>3</sup> sediment.
- **Kolding Lystbådehavn** har en tilladelse til at klappe 2.500 m<sup>3</sup> sediment.
- **Middelfart Lystbådehavn** har en tilladelse til at klappe 40.000 m<sup>3</sup> sediment.

Som det kan ses af ovenstående, er der risiko for, at der klappes yderligere cirka 49.000 m<sup>3</sup> sediment samtidig med, at det udgravede sediment fra Kolding Havn klappes. I det nedenstående er der regnet på en worst case situation, hvor der klappes 100.000 m<sup>3</sup> sediment samtidig med klapping fra Marina City. Dette svarer til, at mængden af sediment øges med omkring 28 % eller omkring 25 klappinger, hvis det antages, at der klappes 4.000 m<sup>3</sup> pr gang.

Om sommeren vil sedimentet fra klappingerne sedimentere omkring klappadsen. Hvis de cirka 100.000 m<sup>3</sup> sediment fordeles jævnt ud på det ydre areal på klappadsen som forklaret i afsnit 7.2 øges sedimentlaget med 20 mm.

Sker klappingen om vinteren betyder dette, at sedimentet fra yderligere 4 klappinger vil blive spredt 7.000 m væk fra klappadsen og potentielt spredes videre ud i Natura-2000 områderne enten ud for kysten ved Nærå og Æbelø eller syd for Lillebælt. Sedimentet fra de resterende 21 klappinger vil sedimentere omkring klappadsen og forårsage en lille forøgelse i det aflejrede sedimentlag.

## 10 Referencer

- [1] NIRAS, »Sedimentspredning. VVM for Marina City,« September, 2017.
- [2] B. F. Pedersen og N. A/S, »Model til beregning af spredning af sediment i forbindelse med klapping,« NIRAS, 2012.
- [3] COWI, »Marina City Kolding - Undersøgelse af sediment,« 2017.
- [4] Jacobsen, Harramés, Krebs Ovesen og Moust, Lærebog i geoteknik 1, årg. 5, Polyteknisk forlag, 2003.
- [5] NIRAS A/S, »Notat: VVM Vejle Fjord Bro, Bestemmelse af sedimentkarakteristik for spildeberegninger,« NIRAS A/S, 2015.
- [6] Grontmij | Carl Bro, »Oprensning og klapping. Kalundborg Havn og sejlrende. Sedimentspredningsberegninger,« Marts 2011.
- [7] DHI for Nakskov Havn, »Uddybning af Nakskov Havn og sejlrende. Sedimentspredning og hydrografiske,« 2006.

- [8] Miljøministeriet, »Vejledende udtalelse til brug for gennemførelse af en miljøkonsekvensvurdering for et bestående deponeringsanlæg for havbundssedimenter (spulefelter etc.),« Miljøministeriet, Jord & Affald, 2010.
- [9] Winther, Henze, Linde og Jensen, »Spildevandsteknik,« 4 red., Polyteknisk Forlag, 2009.
- [10] DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, »Arkiv for iltrapporter og iltvindskort,« 30 11 2017. [Online]. Available: <http://bios.au.dk/videnudveksling/vand/havmiljoe/iltsvind/arkiv/>. [Senest hentet eller vist den 04 04 2018].
- [11] Vejdirektoratet, »Ny bane på tværs af Vejle Fjord. Sammenfattende rapport. VVM-redegørelse. Rapport 569,« 2016.
- [12] COWI, *Marina City Kolding - Undersøgelse af sediment*, 2017.