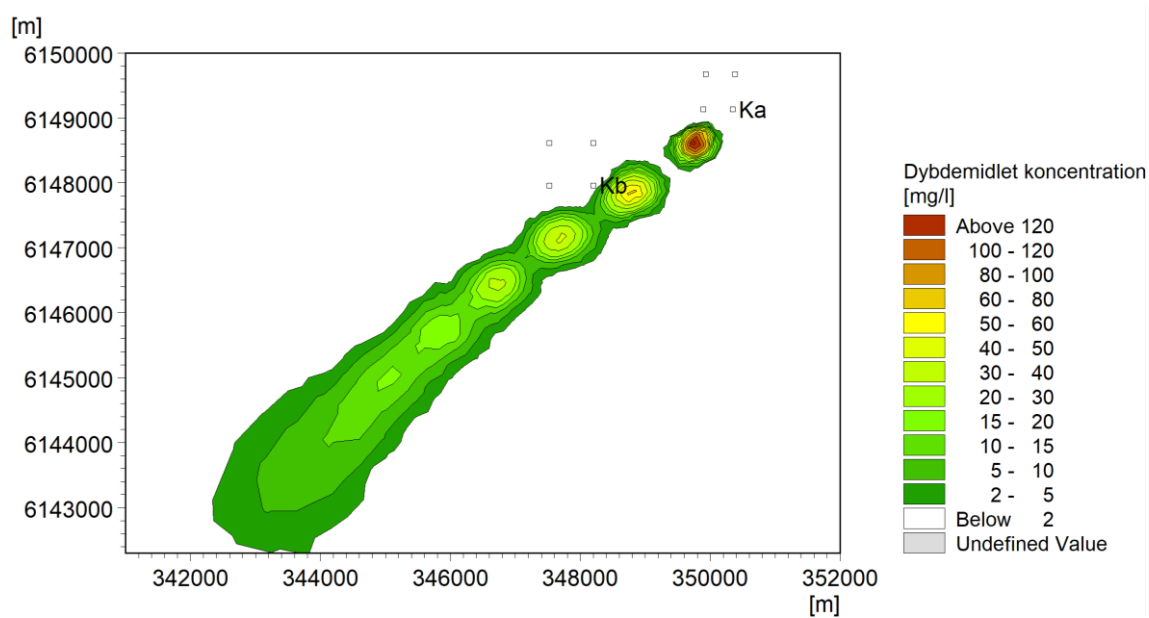


+

## ATR11-Klapning Køge bugt

### Spredningsberegninger



Udviklingselskabet By & Havn I/S

Rapport

Denne rapport er udarbejdet under DHI's ledelsessystem, som er certificeret af Bureau Veritas for overensstemmelse med ISO 9001 for kvalitetsledelse

ISO 9001  
Management System Certification

BUREAU VERITAS  
Certification Denmark A/S

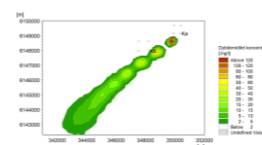


# ATR11-Klapning Køge bugt

## Spredningsberegninger

Udarbejdet for  
Repræsenteret ved

Udviklingselskabet By & Havn I/S  
Hans Vasehus, Havnebygmester og  
Anlægschef



*Sedimentfane fra klapning*

Projektleder	Bo Brahtz Christensen
Kvalitetsansvarlig	Jacob H Jensen
Projektnummer	11823523-13
Godkendelsesdato	16. december 2020
Revision	Foreløbig rapport 1.0
Klassifikation	<b>Begrænset:</b> Dette dokument er tilgængeligt for personer ansat i DHI-koncernen men må ikke deles med andre udenfor DHI-koncernen uden kundens forhåndsgodkendelse.

## INDHOLDSFORTEGNELSE

<b>1</b>	<b>Introduktion .....</b>	<b>7</b>
<b>2</b>	<b>Klappningsmængder og antagelser om klapning .....</b>	<b>8</b>
<b>3</b>	<b>Modelopsætning .....</b>	<b>12</b>
<b>4</b>	<b>Strømførhold og saltholdighed i klappadsområderne.....</b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b>Sedimentspredning.....</b>	<b>18</b>
5.1	Sedimentspredning ved brug af klappads Ka .....	18
5.2	Sedimentspredning ved brug af klappads Kb .....	26
5.3	Sedimentspredning ved brug af klappads Ka og Kb .....	34
<b>6</b>	<b>Spredning af forurenede stoffer.....</b>	<b>43</b>
6.1	Spredning af forurenede stoffer ved brug af klappads Ka .....	44
6.2	Spredning af forurenede stoffer ved brug af klappads Kb .....	51
6.3	Spredning af forurenede stoffer ved brug af klappads Ka og Kb.....	65
<b>7</b>	<b>Iltforbrug og risiko for iltsvind .....</b>	<b>73</b>
7.1	Model og iltforbrug af klappet sediment.....	73
7.2	Øresund og Køge Bugt et lejlighedsvist lagdelt system .....	74
7.3	Bundilt i referencesituation uden klapning af sediment .....	74
7.4	Bundilt ved klapning af sediment .....	77
<b>8</b>	<b>Kvælstof- og fosfordeposition som følge af klapning .....</b>	<b>88</b>
<b>9</b>	<b>Referencer .....</b>	<b>93</b>

## FIGURER

Figur 1-1	Klappadsernes placering og udstrækning af danske og svenske Natura 2000 områder (skraveret). .....	7
Figur 2-1	Eksempel på klappmaterialets kornstørrelsessammensætning. Fra prøve P85 3meter under havbund.....	9
Figur 2-2	Nærfeltsbeskrivelse og overførsel til fjernfeltet .....	10
Figur 2-3	Tidsserie visende vandtemperaturen og saltholdigheden i de enkelte klapninger foretaget i 4. kvartal. ....	11
Figur 2-4	Tidsserie visende vandtemperaturen og saltholdigheden i de enkelte klapninger foretaget i 1. kvartal. ....	11
Figur 3-1	Model batymetri og beregningsnet.....	12
Figur 3-2	Udsnit af model batymetri og beregningsnet i klappadsernes nærområde. ....	12
Figur 4-1	Dybdemidlet strømrose i vinterhalvår ved klappads Ka.....	13
Figur 4-2	Dybdemidlet strømrose I vinterhalvår ved klappads Kb.....	13
Figur 4-3	Strømroser i vinterhalvår ved klappads Ka og Kb. Øverst: lag ved overflade, midt: lag midt i vandsøjlen og nederst: lag ved bund. ....	14
Figur 4-4	Saltholdighed ved klappads Ka og Kb i 4. kvartal.....	15
Figur 4-5	Saltholdighed ved klappads Ka og Kb i 1. kvartal.....	16

Figur 4-6	Vandtemperaturer ved klappads Ka og Kb i 4. kvartal.....	16
Figur 4-7	Vandtemperaturer ved klappads Ka og Kb i 1. kvartal.....	17
Figur 5-1	Dybdemidlet middelkoncentration i perioden 1. oktober – 3.april efter klapning på Ka.....	19
Figur 5-2	Dybdemidlet maksimalkoncentration i perioden 1. oktober – 3. april efter klapning på Ka.....	19
Figur 5-3	Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning på Ka.....	20
Figur 5-4	Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning... 20	
Figur 5-5	Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning. 21	
Figur 5-6	Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning. 21	
Figur 5-7	Tidsserie af sedimentkoncentrationer ved bund, midt i vandsøjlen og ved overfladen i punktet E 350.000 m og N 6.146.000 m beliggende i det svenske Natura 2000 område. ....	22
Figur 5-8	Anvendte positioner for klapning på Ka. ....	23
Figur 5-9	Aflejringstykkelser på klappads Ka efter klapning i perioden oktober 2021 – marts 2022. ....	23
Figur 5-10	Aflejringstykkelser efter klapning på Ka i perioden oktober 2021 – marts 2022.....	24
Figur 5-11	Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser i klappadsens nærområde.....	24
Figur 5-12	Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser udenfor klappadsens nærområde. ....	25
Figur 5-13	Bundtopografi før (øverst) og efter klapning (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klapninger hen over området. ....	26
Figur 5-14	Dybdemidlet middelkoncentration i perioden 1. oktober – 3.april efter klapning på Kb.....	27
Figur 5-15	Dybdemidlet maksimalkoncentration i perioden 1. oktober – 3. april efter klapning på Kb.....	27
Figur 5-16	Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning på Kb.....	28
Figur 5-17	Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning på Kb.....	28
Figur 5-18	Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning på Kb.....	29
Figur 5-19	Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning på Kb.....	29
Figur 5-20	Anvendte positioner for klapning på Kb. ....	30
Figur 5-21	Aflejringstykkelser på klappads Kb efter klapning i perioden oktober 2021 – marts 2022. ....	31
Figur 5-22	Aflejringstykkelser efter klapning på Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022.....	31
Figur 5-23	Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser i klappadsens nærområde.....	32
Figur 5-24	Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser udenfor klappadsens nærområde. ....	32
Figur 5-25	Bundtopografi før (øverst) og efter klapning (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klapninger hen over området. ....	33
Figur 5-26	Bundtopografi efter klapning april 2023 ved anvendelse af en ligelig fordeling af klapninger hen over området. ....	34
Figur 5-27	Dybdemidlet middelkoncentration i perioden 1. oktober – 3.april efter klapning på Ka og Kb. ....	35
Figur 5-28	Dybdemidlet maksimalkoncentration i perioden 1. oktober – 3. april efter klapning på Ka og Kb.....	35
Figur 5-29	Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning på Ka og Kb. ....	36
Figur 5-30	Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapning på Ka og Kb. ....	36

Figur 5-31	Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Ka og Kb. ....	36
Figur 5-32	Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Ka og Kb. ....	37
Figur 5-33	Aflejringstykkelse på klapplads Ka og Kb efter klapping i perioden oktober 2021 – marts 2022. ....	38
Figur 5-34	Aflejringstykkelser efter klapping på Ka og Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022. ....	39
Figur 5-35	Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser i klappladsens nærområde. ....	39
Figur 5-36	Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser udenfor klappladsens nærområde. ....	40
Figur 5-37	Bundtopografi på klapplads Ka før (øverst), efter første års klapping (midt) og efter andet års klapping (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klappinger hen over området. ....	41
Figur 5-38	Bundtopografi på klapplads Kb før (øverst), efter første års klapping (midt) og efter andet års klapping (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klappinger hen over området. ....	42
Figur 6-1	Aflejring af kobber efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret kobber. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kobber. ....	45
Figur 6-2	Aflejring af kviksølv efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret kviksølv. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kviksølv. ....	46
Figur 6-3	Aflejring af bly efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret bly. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for bly. ....	47
Figur 6-4	Aflejring af zink efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret zink. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for zink. ....	48
Figur 6-5	Aflejring af cadmium efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret cadmium. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for cadmium. ....	49
Figur 6-6	Aflejring af TBT efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret TBT. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. ....	50
Figur 6-7	Aflejring af PAH efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret PAH. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. ....	51
Figur 6-8	Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kobber efter klappinger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023. ....	53
Figur 6-9	Aflejring af kobber efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret kobber efter år 1. Midt: total mængde aflejret kobber efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	54
Figur 6-10	Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kviksølv efter klappinger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023. ....	55
Figur 6-11	Aflejring af kviksølv efter første års klapping og ved brug af klapplads Ka. Øverst: total mængde aflejret kviksølv. Midt: total mængde aflejret kviksølv efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	56
Figur 6-12	Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for bly efter klappinger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023. ....	57

Figur 6-13	Aflejring af bly efter første års klappning og ved brug af klappads Ka. Øverst: total mængde aflejret bly. Midt: total mængde aflejret bly efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	58
Figur 6-14	Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for zink efter klappninger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023. ....	59
Figur 6-15	Aflejring af zink efter første års klappning og ved brug af klappads Ka. Øverst: total mængde aflejret zink. Midt: total mængde aflejret zink efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	60
Figur 6-16	Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for cadmium efter klappninger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023. ....	61
Figur 6-17	Aflejring af cadmium efter første års klappning og ved brug af klappads Ka. Øverst: total mængde aflejret cadmium. Midt: total mængde aflejret cadmium er efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	62
Figur 6-18	Aflejring af TBT efter første års klappning og ved brug af klappads Kb. Øverst: total mængde aflejret TBT. Midt: total mængde aflejret TBT efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	63
Figur 6-19	Aflejring af PAH efter første års klappning og ved brug af klappads Kb. Øverst: total mængde aflejret PAH. Midt: total mængde aflejret PAH efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	64
Figur 6-20	Aflejring af kobber efter klappning og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret kobber. Midt: total mængde aflejret kobber efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	66
Figur 6-21	Aflejring af kviksølv efter klappning og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret kviksølv. Midt: total mængde aflejret kviksølv efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	67
Figur 6-22	Aflejring af bly efter klappning og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret bly. Midt: total mængde aflejret bly efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	68
Figur 6-23	Aflejring af zink efter klappning og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret zink. Midt: total mængde aflejret zink efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	69
Figur 6-24	Aflejring af cadmium efter klappning og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret cadmium. Midt: total mængde aflejret cadmium efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	70
Figur 6-25	Aflejring af TBT efter klappning og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret TBT. Midt: total mængde aflejret TBT efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	71
Figur 6-26	Aflejring af PAH efter klappning og ved skiftevis brug af klappads Kb. Øverst: total mængde aflejret PAH. Midt: total mængde aflejret PAH efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment. ....	72
Figur 7-1	Antal dage med beregnede iltkoncentrationer under 1 mg/l i bundlaget fra 1.10 til 1.4. Reference kørsel uden dumpning. ....	75
Figur 7-2	Antal dage med beregnede iltkoncentrationer under 2 mg/l i bundlaget fra 1.10 til 1.4. Reference kørsel uden dumpning. ....	75
Figur 7-3	Antal dage med beregnede iltkoncentrationer under 4 mg/l i bundlaget fra 1.10 til 1.4. Reference kørsel uden dumpning af sediment. ....	76
Figur 7-4	Udviklingen af simuleret ilt i bundlaget (DO <sub>b</sub> ) på en station Køge Bugt SW, som funktion af simuleret salinitetsforskel mellem bund og overfladen (PSU <sub>b</sub> -PSU <sub>s</sub> ). .	76
Figur 7-5	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 1 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A og B, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	79
Figur 7-6	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 2 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A og B, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	80

Figur 7-7	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 4 mg/l i bundlaget. Klapping på plads A og B, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	81
Figur 7-8	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 1 mg/l i bundlaget. Klapping på plads A alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	82
Figur 7-9	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 2 mg/l i bundlaget. Klapping på plads A alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	83
Figur 7-10	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 4 mg/l i bundlaget. Klapping på plads A alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	84
Figur 7-11	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 1 mg/l i bundlaget. Klapping på plads B alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	85
Figur 7-12	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 2 mg/l i bundlaget. Klapping på plads B alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	86
Figur 7-13	Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 4 mg/l i bundlaget. Klapping på plads B alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).....	87
Figur 8-1	Kvælstof- og fosfordeposition efter første års klapping og ved brug af klappads Ka. ....	88
Figur 8-2	Kvælstof- og fosfordeposition efter første års klapping og ved brug af klappads Kb. ....	89
Figur 8-3	Kvælstof- og fosfordeposition efter andet års klapping og ved brug af klappads Kb. ....	90
Figur 8-4	Kvælstof- og fosfordeposition efter første års klapping og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. ....	91
Figur 8-5	Kvælstof- og fosfordeposition efter andet års klapping og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb. ....	92

## TABELLER

Tabel 2-1	Estimerede klappmængder (COWI, 11. november 2020). ....	8
Tabel 2-2	Relativ sammensætning af klappmaterialet. ....	9
Tabel 2-3	Fraktioner og faldhastigheder. ....	9
Tabel 2-4	Splitpram antagelser. ....	10
Tabel 5-1	Påvirkede arealer for givne overskridelsesvarigheder og koncentrationer. ....	21
Tabel 5-2	Påvirket areal med aflejring efter klapping på Ka i perioden oktober 2021 – marts 2022. ....	25
Tabel 5-3	Påvirkede arealer for givne overskridelsesvarigheder og koncentrationer. ....	29
Tabel 5-4	Påvirket areal med aflejring efter klapping på Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022. ....	32
Tabel 5-5	Påvirkede arealer for givne overskridelsesvarigheder og koncentrationer. ....	37
Tabel 5-6	Påvirket areal med aflejring efter klapping på Ka og Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022. ....	40
Tabel 6-1	Koncentrationer i sedimentet som repræsenterer lag og områder som skal klappes, ref. /4/ og /5/. ....	43
Tabel 6-2	De forurenede stoffers relative fordeling i klappmaterialet. ....	44
Tabel 7-1	1. Ordens henfalds konstanter for H <sub>2</sub> S i vandet af 3 puljer af BOD. ....	73
Tabel 7-2	Gennemsnitligt Iltforbrug i klappet sediment. ....	73
Tabel 7-3	Antal dage i perioden 1.10 – 1.4 med iltkoncentration i bundlaget mindre end eller lig med 4, 2 og 1 mg/l på de to klappadser og lokalitet SW i Køge Bugt. ....	77



Tabel 7-4	Forskel i arealer med bundilt med under hhv. 4, 2 og 1 mg/l mellem klapsценarie A, B og A & B og referencescenariet uden klapping. ....	78
Tabel 8-1	Koncentrationer af Total N og P i sedimentet som repræsenterer lag og områder som skal klappes, ref. /4/. ....	88

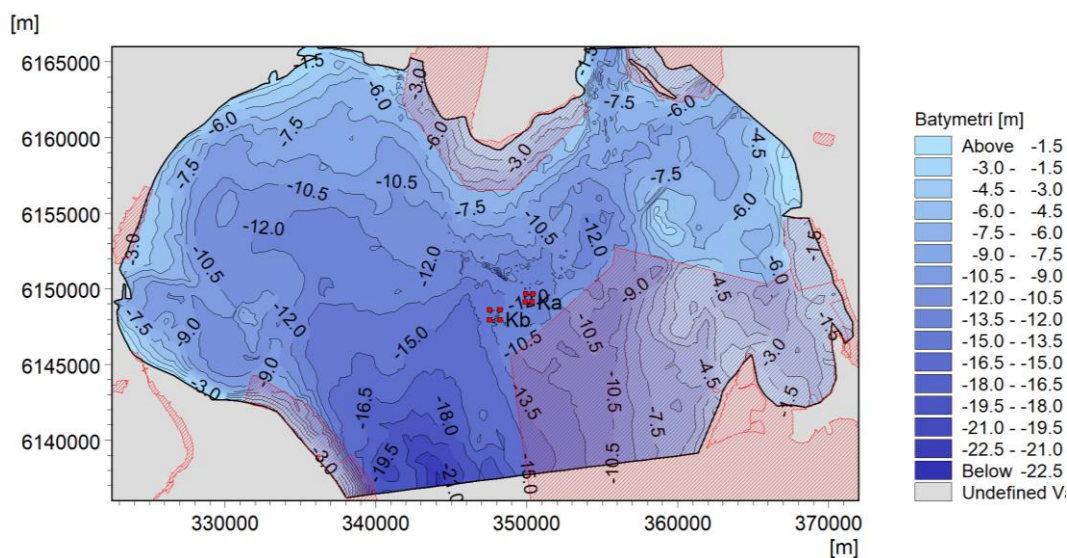
## BILAG

### **BILAG A – Iltforbrug**

Risiko for iltsvind

## 1 Introduktion

I forbindelse med etableringen af Lynetteholm er det nødvendigt at foretage en mindre uddybning i Svælget syd for Middelgrunden og i Kronløbet mod Levantkaj. De geotekniske forhold langs opfyldningens kommende perimeter er ikke optimale, som følge af større forekomster af gytje. Det er derfor nødvendigt at foretage en bundudskiftning langs med perimeteren for at sikre en tilstrækkelig geoteknisk stabilitet. De øverste jordlag er forurenede og placeres derfor i Lynettens deponi for havnesediment, mens de øvrige ikke-forurenede materialer klappes i Køge Bugt/Sydlig del af Øresund. Den samlede mængde klappemateriale forventes at kunne udgøre op til **2.541.390 m<sup>3</sup>**. Klappingen ønskes foretaget på klappladserne Ka og Kb, som ligger placeret som markeret på Figur 1-1. Vanddybden på klapplad Kb varierer typisk mellem 12-13 meter, mens der på klapplad Ka er en lidt større variation (11-16 m). Som forberedelse til klappingsansøgningen er der foretaget pejlinger af de to klappladsområder og disse data er anvendt til at beskrive modelbatymetri detaljeret i områderne for de to klappladser.



Figur 1-1 Klappladsernes placering og udstrækning af danske og svenske Natura 2000 områder (skraveret).

På kortet over modelområdet batymetri er der udover klappladserne også vist udstrækningen af de omkringliggende danske og svenske Natura 2000 områder (indikeret med rød skraveret). Det ses, at klappladserne ligger i umiddelbar nærhed af det svenske Natura 2000 område ved Falsterbonæsset.

Denne rapport beskriver de forventede konsekvenser af klappingerne, hvad angår sedimentspredning, spredning af forurenede stoffer, samt iltforbrug og risiko for iltvind.

## 2 Klappingsmængder og antagelser om klapping

I forbindelse med etableringen af Lynetteholm er der behov for at uddybe i Svælget lige syd for Middelgrunden og i Kronløbet mod Levantkaj. Langs med Lynetteholms fremtidige perimeter er det nødvendigt at fortage en bundudskiftning for at sikre en tilstrækkelig geoteknisk stabilitet. De øverste forurenede lag anbringes i Lynettens deponi for havnesediment, mens de dybere ikke-forurenede lag klappes. De af COWI estimerede mængder er angivet i Tabel 2-1. I mængdeberegningen er der inkluderet et usikkerhedstillæg på 15% og en reduktion som følge af gravespild på 2%. Yderligere er der antaget en bulkingsfaktor på 1,25 forårsaget af mekanisk opgravning og lastning på Pram. Bulkingsfaktoren er et udtryk for at sedimentet fylder mere efter opgravning og har derfor kun betydning for selve klappingsvolumenet, ikke selve massen af sediment som opgraves og klappes.

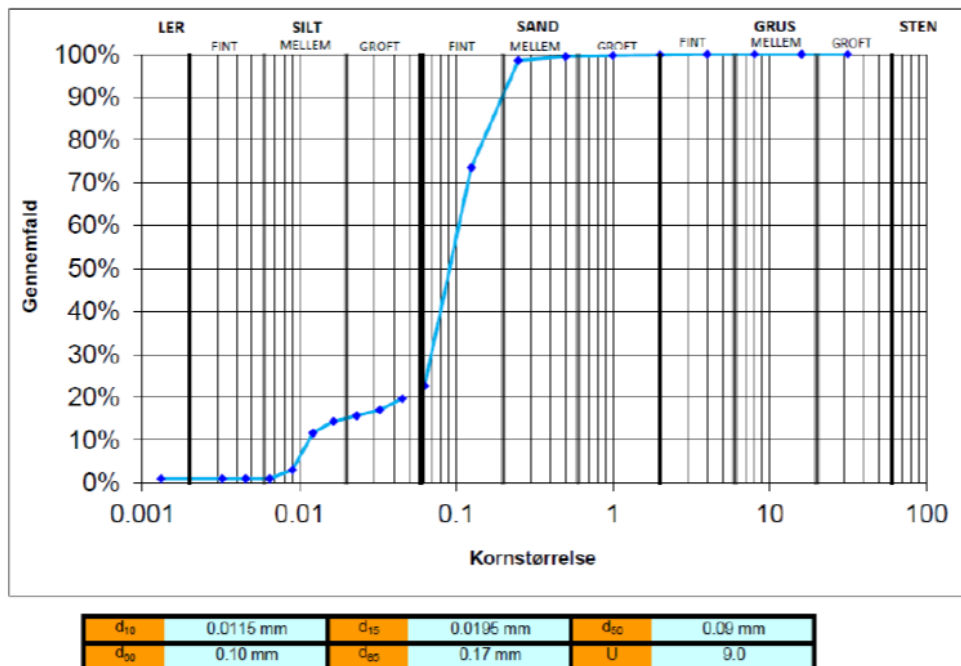
Tabel 2-1 Estimerede klappmængder (COWI, 11. november 2020).

Område	Teoretisk mængde [m <sup>3</sup> ]	Bidrag fra overdybde [m <sup>3</sup> ]	Tillæg for usikkerhed [m <sup>3</sup> ]	Spild [m <sup>3</sup> ]	Bulking [m <sup>3</sup> ]	Samlet [m <sup>3</sup> ]
Kronløbet	17.000	3.000	3.000	-460	5.640	28.180
Ydre perimeter	1.628.000	-	244.200	-37.440	458.690	2.293.450
Intern adskillelse	56.000	-	8.400	-1.290	15.780	78.890
Svælget	35.000	65.000	15.000	-2.300	28.180	140.880
Total	1.736.000	68.000	270.600	-41.490	508.280	2.541.390

Hovedparten af klappmaterialet er fra bundudskiftningen langs den ydre perimeter. Klappmaterialets sammensætning er derfor estimeret med udgangspunkt i prøverne herfra. På baggrund af analyserne af sedimentdata i Ref. /1/, kan den gennemsnitlige tørdensitet for bundudskiftningsmaterialet langs med perimeteren estimeres til 760 kg/m<sup>3</sup>. Med en antagelse om en bulkingsfaktor på 1,25 falder tørdensiteten af materialet i splitprammen til 608 kg/m<sup>3</sup>. Lidt populært siger man, at gytje med lav tørdensitet er som havregød, når det graves op, men bliver af samme konsistens som en varm sovs, når det dumpes på en Pram. Det antages derfor, at der ikke vil være større klumper i gravematerialet.

Klappmaterialet inddeles i fire (4) fraktioner med en fordeling svarende til den gennemsnitlige sammensætning af bundudskiftningsmaterialet (ren jord delen) langs Lynetteholms ydre perimeter. Sammensætningen er fundet på baggrund af faldhastighedsforsøg og sigteanalyser, Ref. /2/.

Et eksempel på sedimentets kornstørrelsessammensætning er vist i Figur 2-1. Prøven (P85) er taget ved den vestlige perimeter i en dybde 3 meter under havbund. Den estimerede gennemsnitlige sammensætning af gravematerialet, som skal klappes, er angivet i Tabel 2-2. Hver fraktion tillægges en karakteristisk faldhastighed estimeret med udgangspunkt i Stokes faldhastighedslov. Fraktioner og faldhastigheder er angivet i Tabel 2-2.



Figur 2-1 Eksempel på klappmaterialets kornstørrelsessammensætning. Fra prøve P85 3meter under havbund.

Tabel 2-2 Relativ sammensætning af klappmaterialet.

Fraktion	Andel [%]
< 6 $\mu\text{m}$	3
6-20 $\mu\text{m}$	25
20-40 $\mu\text{m}$	19
Groft silt/fint sand	53

Tabel 2-3 Fraktioner og faldhastigheder.

Fraktion	Faldhastighed [mm/s]
< 6 $\mu\text{m}$	0,0021
6-20 $\mu\text{m}$	0,10
20-40 $\mu\text{m}$	0,52
Groft silt/fint sand	8

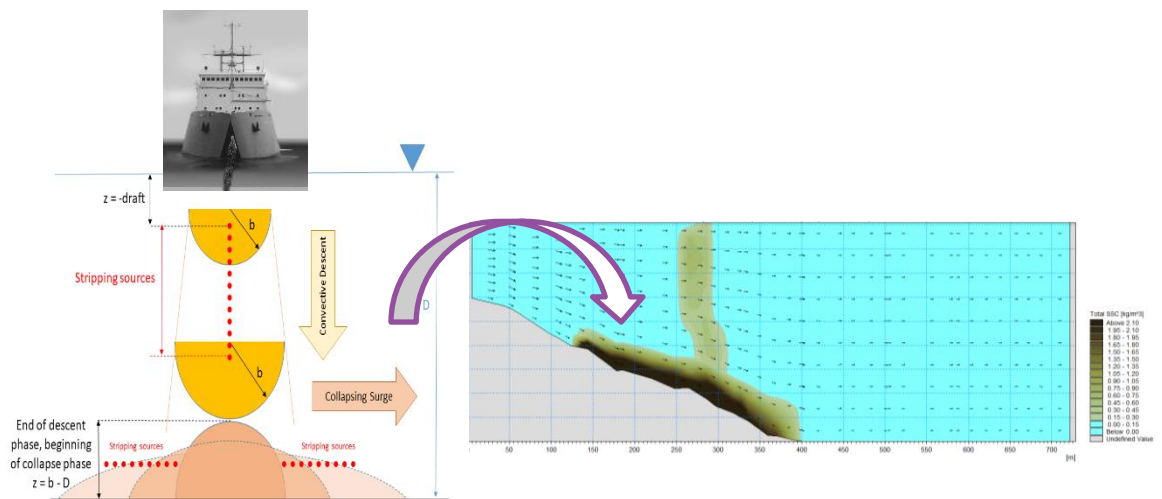
For at undgå påvirkninger i flora og faunas vækstsæson graves og klappes der kun i 1. og 4. kvartal. Gravearbejdet forventes foretaget over to år i perioderne oktober 2021 til marts 2022 og oktober 2022 til marts 2023. Det antages, at der afgraves og klappes med samme rate og således i lige store mængder i de to perioder.

Klapningerne antages foretaget med en splitpram med en kapacitet på 815 m<sup>3</sup>. Selve klapningen modelleres med en nærfeltsmodel indbygget i MIKE 3 spildmodulet. Denne beregner den synkende sedimentsky i detaljer samt, hvordan nærfeltet overføres til fjernfeltet, og således sedimenternes samlede opholdstider i vandet. Til beregning af nærfeltet skal der angives specifikationer for dimensionerne på splitprammen, positionen hvorpå der klappes, klapningsvolumenet, det procentvise indhold af sediment, saltholdigheden og vandtemperaturen i splitprammen. De to sidstnævnte parametre varierer begge over tid. For at sikre en realistisk sammenhæng mellem forholdene ved Lynetteholm og på klappladserne er der anvendt en udtrukket tidsserie af saltholdighed og vandtemperatur i udgravningsområdet ved Lynetteholm, som grundlag for saltholdighed og vandtemperatur i prammen, når der klappes. For de anvendte splitpramme er der gjort de i Tabel 2-4 viste antagelser.

Tabel 2-4 Splitpram antagelser.

<b>Areal ved vandlinje</b>	570 m <sup>2</sup>
<b>Areal af "hopper"</b>	288 m <sup>2</sup>
<b>Åbningsareal</b>	250 m <sup>2</sup>
<b>Dybgang uden last</b>	1 m

Nærfeltsberegningen inkluderer de densitetsdrevne effekter i udbredelsen ved bunden samt afrivningen af sedimenter ved faldet mod bunden. Modellen er også i stand til at indlejre sedimentfanen lige over en skilleflade, såfremt at forholdene dikterer dette. Nærfeltsbeskrivelsen og de tilhørende processer, samt nærfeltsbeskrivelsens overførsel til fjernfeltet er illustreret i Figur 2-2.

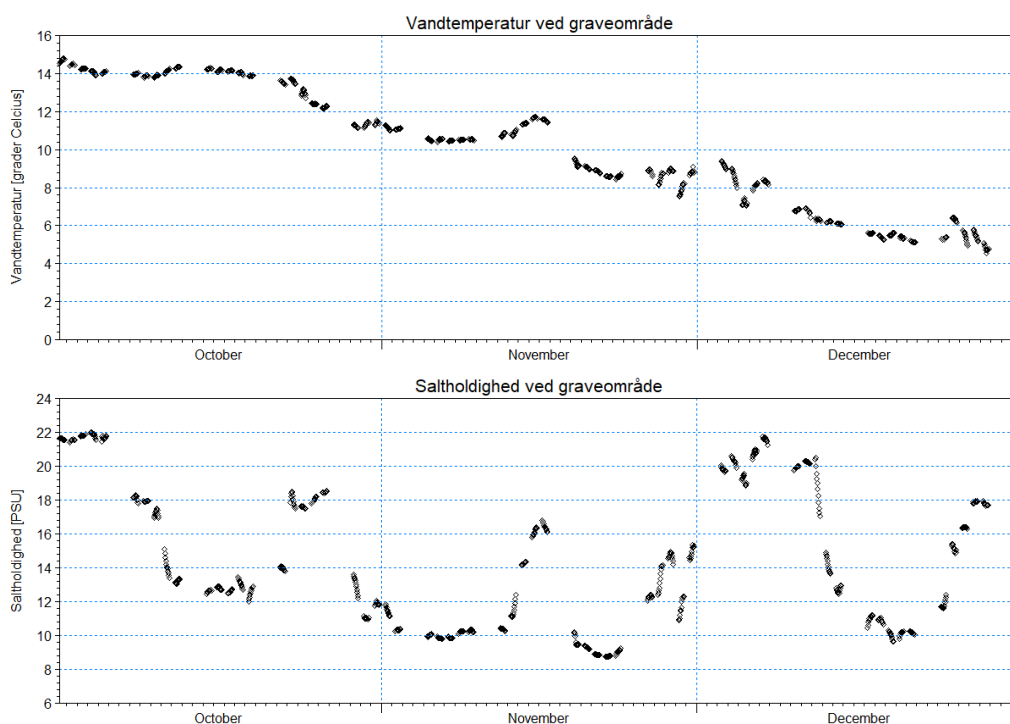


Figur 2-2 Nærfeltsbeskrivelse og overførsel til fjernfeltet.

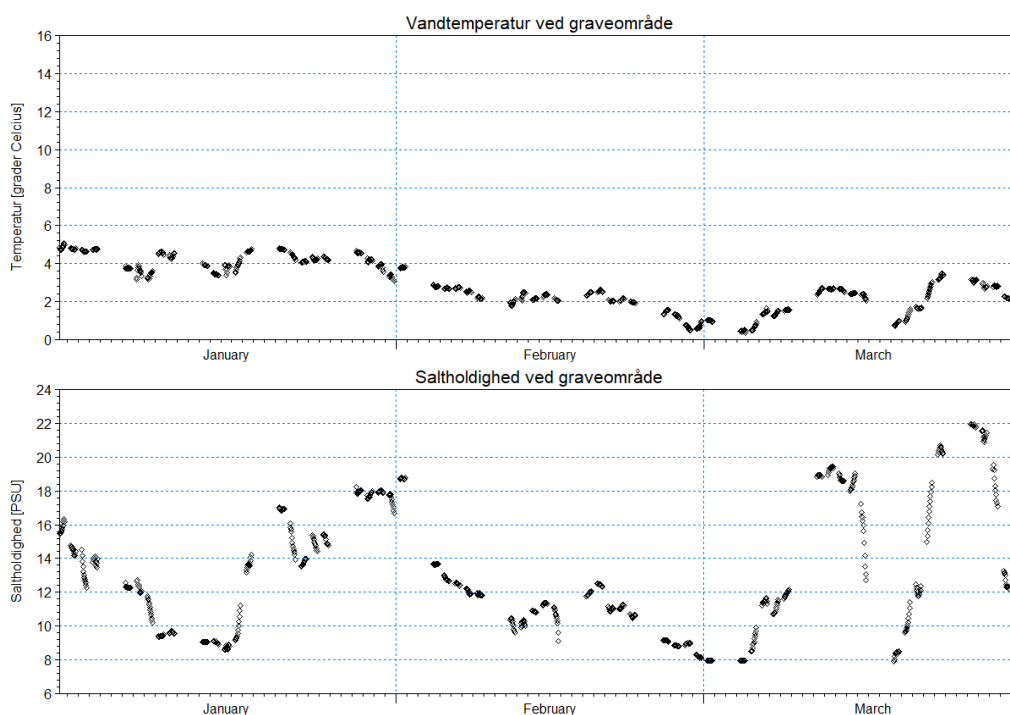
Til nærfeltsbeskrivelsen er det nødvendigt at kende densitetsforholdene relateret til klapmateriale (vand + sediment), samt forholdene på det sted hvor gravematerialet klappes. De lokale forhold (batymetri, havstrømmene, saltholdighed og vandtemperatur) er beskrevet i modellen, mens klapmaterialets saltholdighed og vandtemperatur er beskrevet på baggrund af tidsserier udtrukket i graveområdet ved Lynetteholm. De anvendte værdier er fundet som middel over dybden og vist i Figur 2-3 og Figur 2-4.

Det er antaget, at der ikke er større klumper i gravematerialet, hvorfor der ved klapning vil være et relativt stort spild. Er der klumper i klapmaterialet vil de gå direkte til havbunden

og sedimentere helt lokalt på klapppladsen. De i denne analyse gjorde antagelser om sedimentspredning kan derfor opfattes som værende konservative.



Figur 2-3 Tidsserie visende vandtemperaturen og saltholdigheden i de enkelte klappinger foretaget i 4. kvartal.

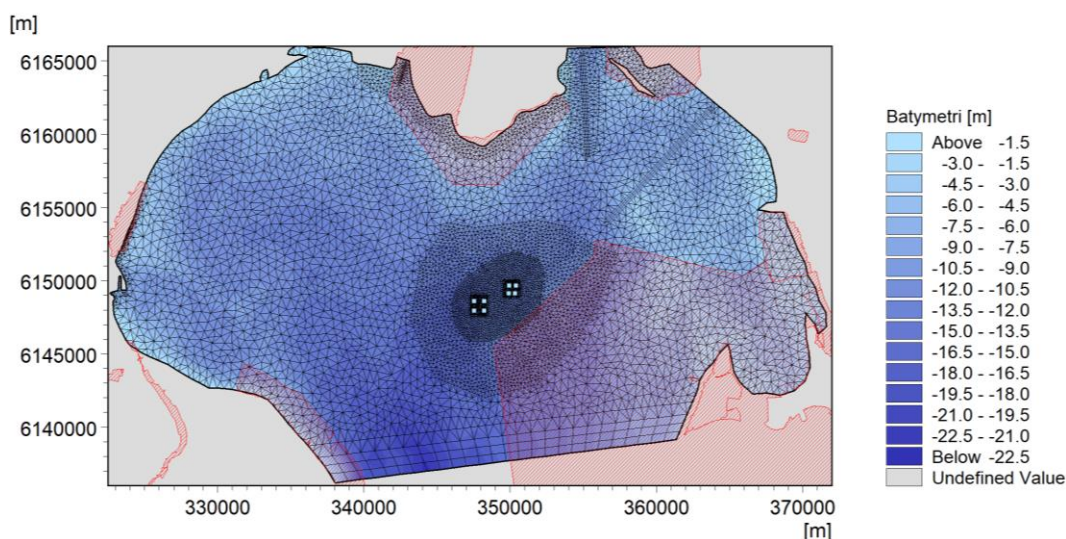


Figur 2-4 Tidsserie visende vandtemperaturen og saltholdigheden i de enkelte klappinger foretaget i 1. kvartal.

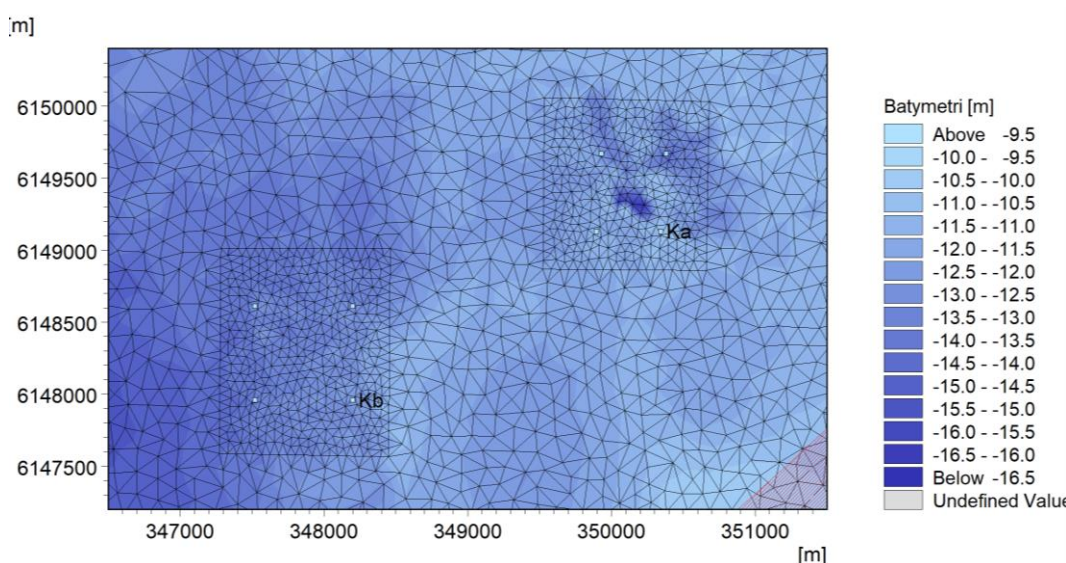
### 3 Modelopsætning

Den til klappningsstudiet anvendte strømningssmodel er udsåret af den større og meget beregningstunge strømningssmodel, som blev etableret i forbindelse med Lynetteholm projektet, ref. /1/. Modellens randbetingelser er derfor udtrukket fra denne model, mens den drivende forcering (felter for vind, lufttryk, nedbør, lufttemperatur og skydække) er identisk.

Modellens opløsning er forbedret i området omkring klappladserne for at sikre en god opløsning af de ved klappning genererede sedimentfaner. Modellens batymetri og beregningsnet er vist i Figur 3-1. Batymetrien er med rød skravering overlejret af de omkringliggende Natura 2000 områder. Figur 3-2 viser et udsnit af modelbatymetri og beregningsnet i klappladsernes nærområde. Modellens opløsning er cirka 50 meter på klappladserne. Klappladsområdernes udstrækning er markeret med de hvide kvadrater.



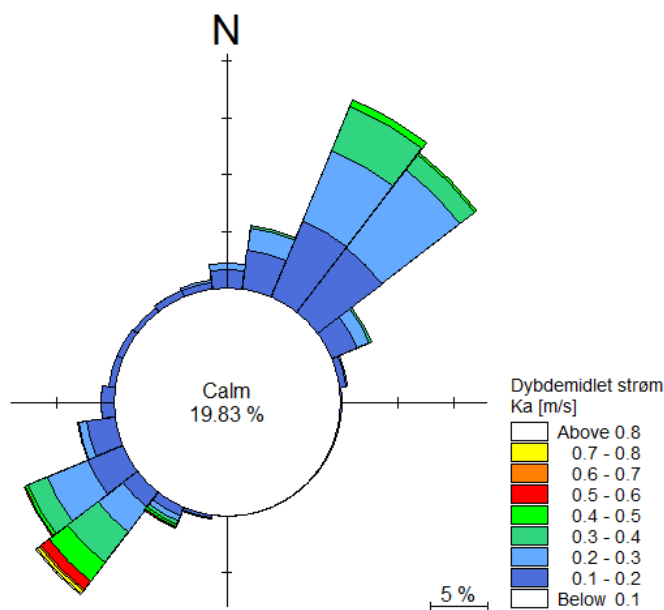
Figur 3-1 Model batymetri og beregningsnet.



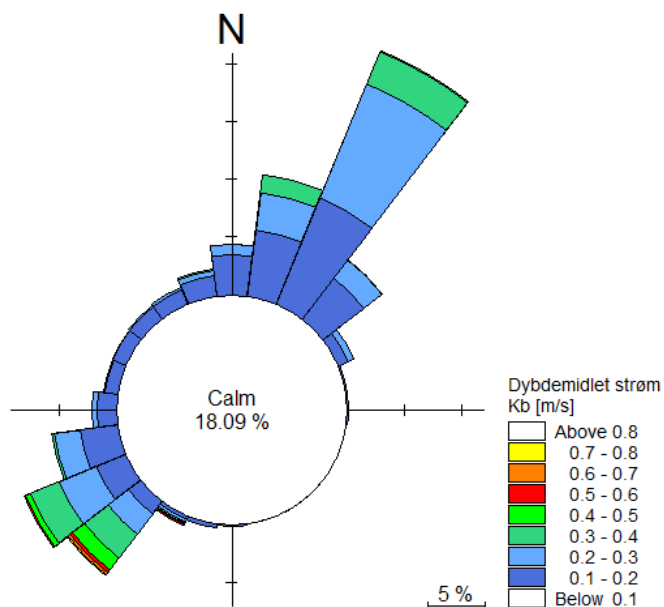
Figur 3-2 Udsnit af model batymetri og beregningsnet i klappladsernes nærområde.

## 4 Strømforhold og saltholdighed i klappladsområderne

Strøm og lagdelingsforhold i klappladsernes nærområde har betydning for hvordan klappmaterialet spredes i forbindelse med klapning. Klappladsene er beliggende i det sydlige Øresund i et område, hvor der med jævne mellemrum optræder en lagdeling forårsaget af saltvandsindbrud fra Kattegat. I den nedre del af vandsøjlen er strømforholdene primært styret af bundtopografien og røndernes orientering, mens den ved vandoverfladen også er påvirket af vindens retning og styrke.



Figur 4-1 Dybdemidlet strømrose i vinterhalvår ved klapplads Ka

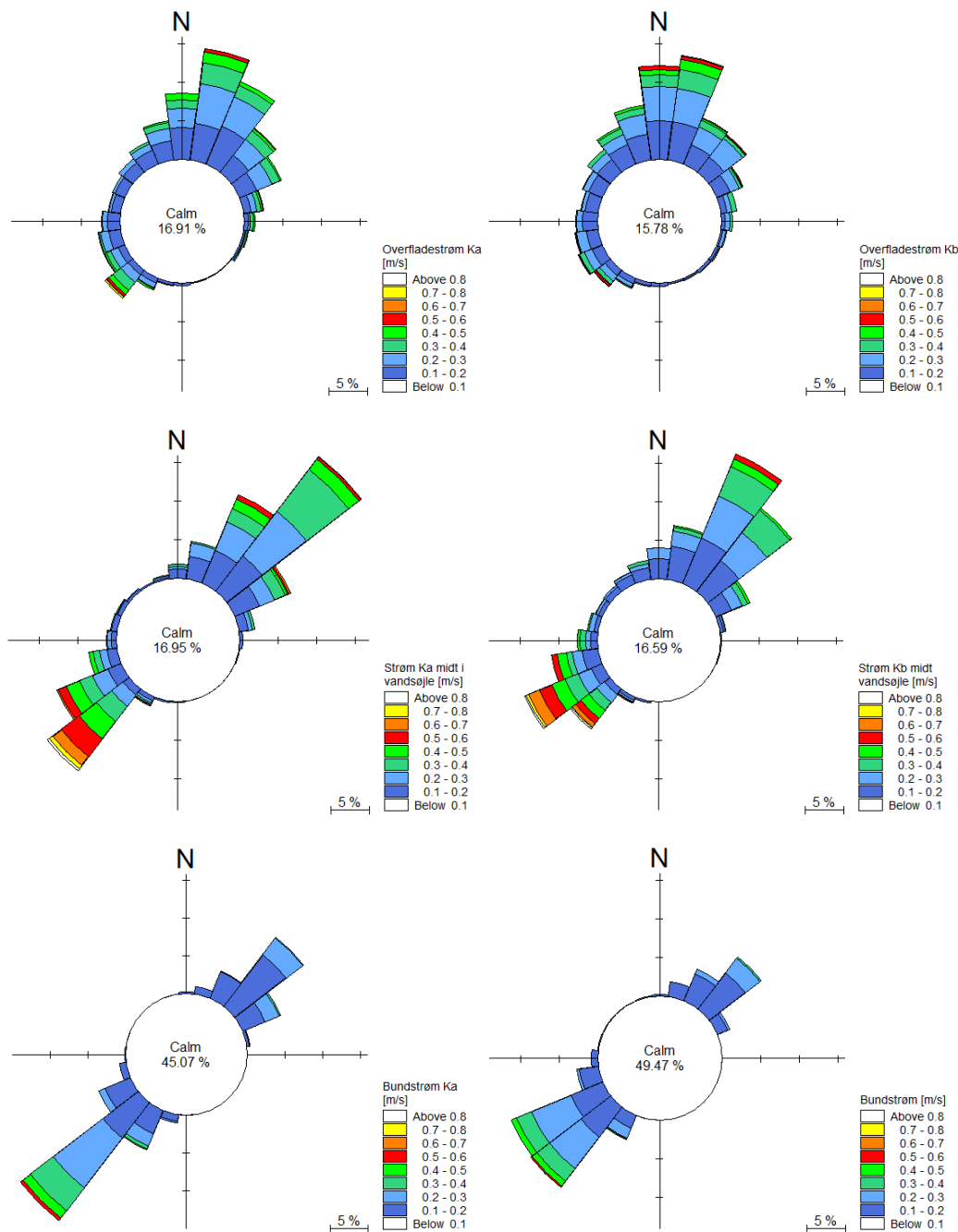


Figur 4-2 Dybdemidlet strømrose I vinterhalvår ved klapplads Kb

I Figur 4-1 er der vist en strømrose af den dybdemidlede strøm på klapplads Ka for perioden 1. og 4. kvartal 2018. Perioden antages repræsentativ for de to perioder (oktober 2021 – marts 2022, oktober 2022 – marts 2023), hvor klappingerne forventes udført. Strømrosen viser, at der oftere optræder nordøstgående strøm, som følge af en



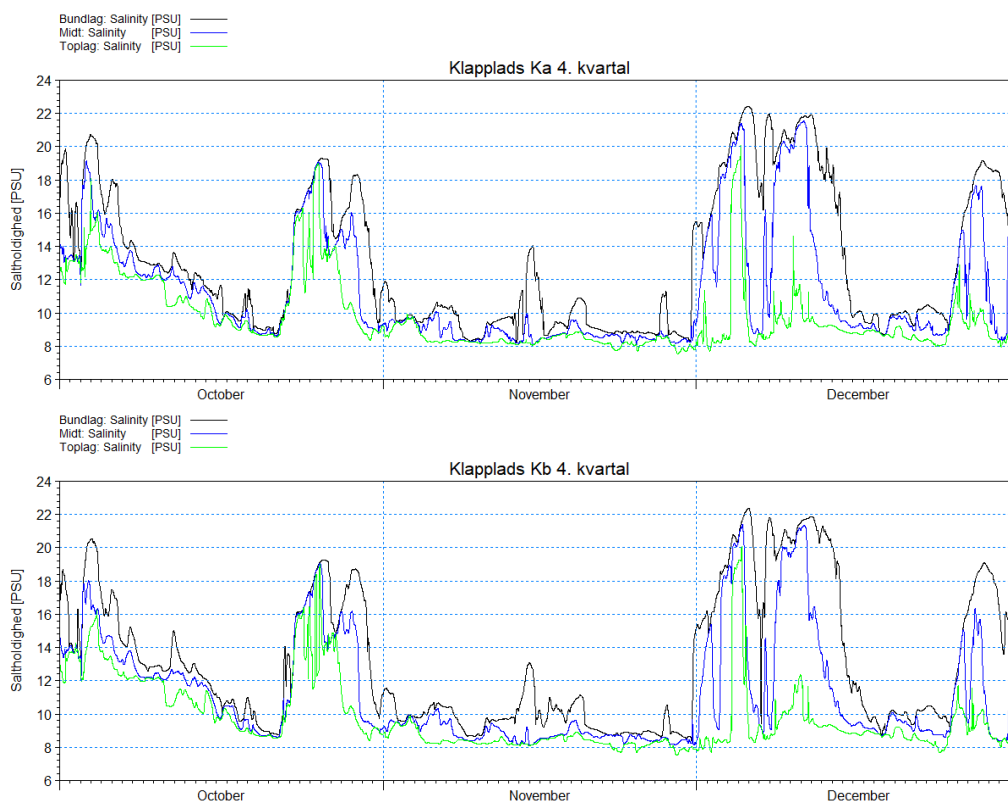
nettotilførsel af vand fra floder med udmunding i Østersøen. Det ses også, at de kraftigste strømme er sydvestgående, altså i forbindelse med indstrømning af vand fra Nordsøen og Kattegat. I størstedelen af tiden er de dybdemidlede strømhastigheder af beskeden størrelse (< 0,3 m/s). Ved sådanne forhold vil en sedimentfane maksimalt kunne flytte sig en kilometer i løbet af en time. Den relativt store vanddybde på klappladserne i kombination med de moderate strømhastigheder gør at genopslæmning af aflejret sediment er af meget begrænset betydning for turbiditetsforholdene. Figur 4-2 viser en tilsvarende strømrose repræsenterende forholdene på klapplad Kb. Det ses, at den dybdemidlede strøm er lidt svagere på klapplad Kb end på klapplad Ka.



Figur 4-3 Strømroser i vinterhalvår ved klapplads Ka og Kb. Øverst: lag ved overflade, midt: lag midt i vandsøjlen og nederst: lag ved bund.

Strømforholdene kan variere over dybden, som følge af lagdeling og effekter fra vind. Figur 4-3 viser strømroser fra de to klappladser ved henholdsvis overflade, midt i vandsøjlen og ved bund. Det ses, at de største strømhastigheder optræder midt i vandsøjlen i forbindelse med saltvandsindbrud.

Densitetsforholdene varierer med saltholdighed og vandtemperatur. Førstnævnte er styret af om vandet på klappladserne har sin forhistorie fra Østersøen eller Kattegat. I Figur 4-4 er saltholdigheden på de to klappladser i 4. kvartal vist som tidsserier ved henholdsvis overflade, midt i vandsøjle og ved bund. Det ses, at saltholdigheden igennem perioden varierer mellem 8 til 22 PSU og at der i flere situationer optræder en lagdeling.

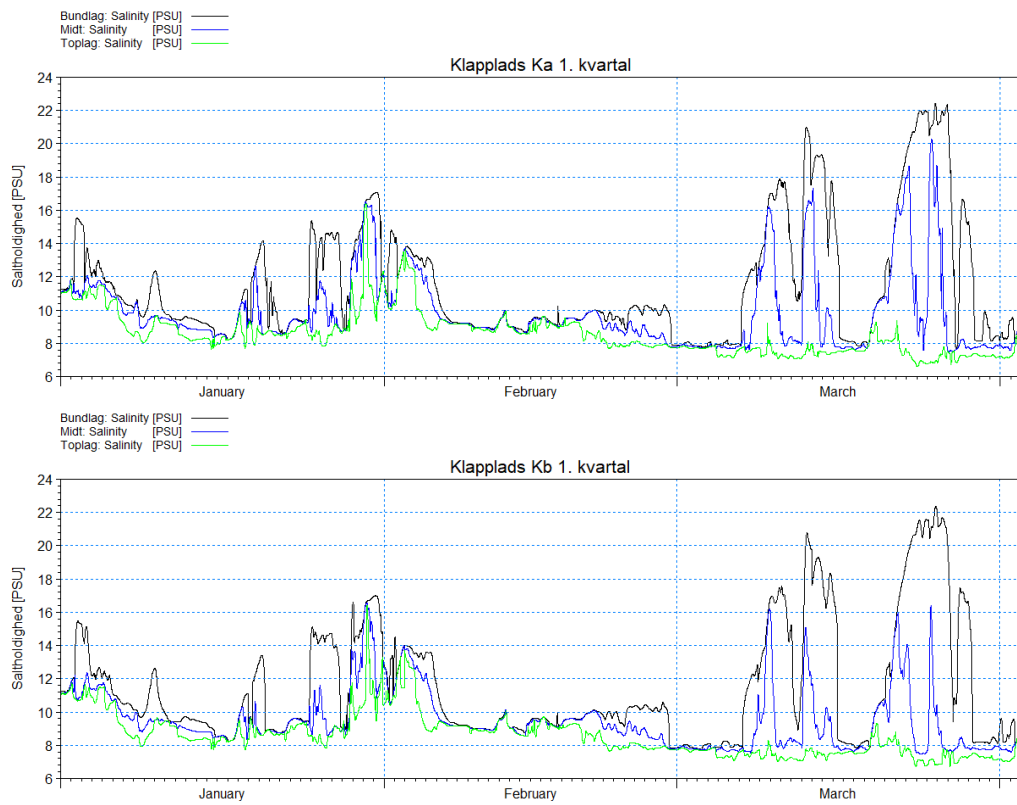


Figur 4-4 Saltholdighed ved klappads Ka og Kb i 4. kvartal.

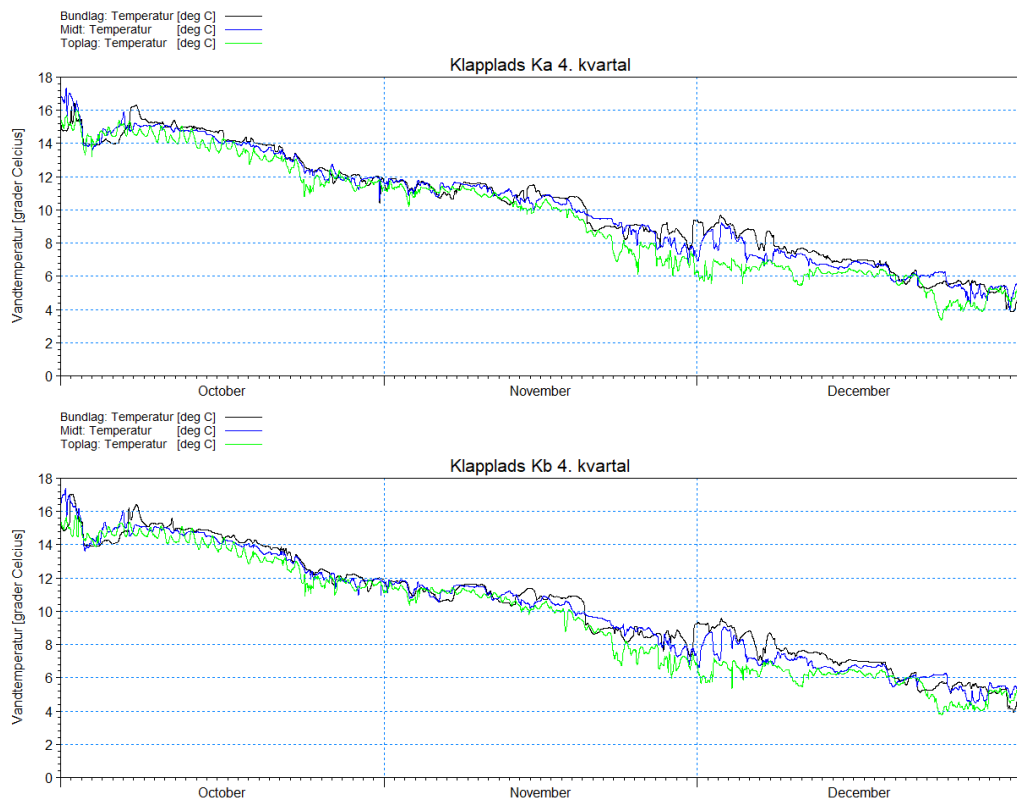
Tilsvarende tidsserieplots er vist i Figur 4-5 for 1. kvartal. I disse plots er det særligt i marts, at der optræder lange perioder med lagdeling. Ved overfladen falder saltholdigheden til under 8 PSU, hvilket formentlig relaterer til en smeltevandsafstrømningseffekt.

Vandtemperaturen har også betydning for densiteten, men i noget svagere grad end saltholdigheden. Figur 4-6 og Figur 4-7 viser tidsserier af vandtemperaturen dækkende de to kvartaler på de to klappladser. Det ses, at temperaturforskellene ved overflade og havbund er beskedne i forhold til sæsonvariationen.

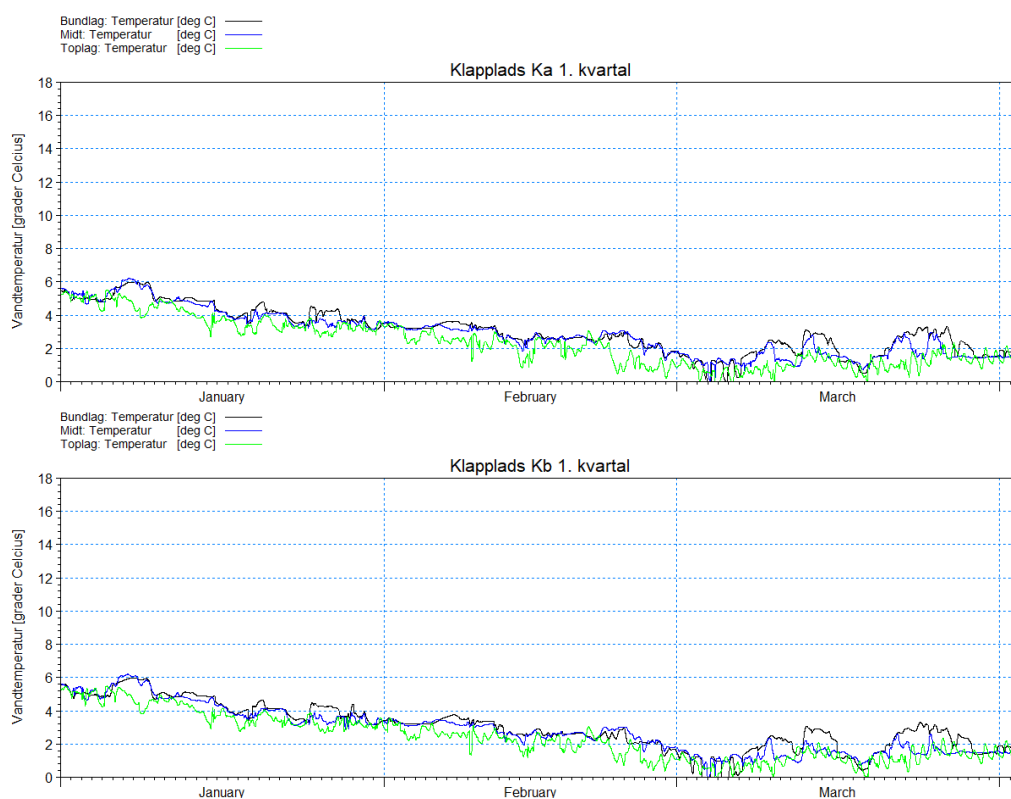
Densitetsforskelle på den vandholdige del af klapmaterialet og det, som det møder på klappladserne har betydning for, hvor let klapmaterialet vil falde mod bunden. I situationer hvor vandet lokalt har en højere densitet end klapmaterialets vandholdige del, vil det møde modstand som indebærer en større sedimentspredning til området udenfor klappladsen. I perioder med en lagdeling vil den ved afrivning skabte del af sedimentfanen kunne bremses og indlejres lige over skillefladen.



Figur 4-5 Saltholdighed ved klappads Ka og Kb i 1. kvartal.



Figur 4-6 Vandtemperaturer ved klappads Ka og Kb i 4. kvartal



Figur 4-7 Vandtemperaturer ved klappblads Ka og Kb i 1. kvartal

## 5 Sedimentspredning

I perioden oktober 2021 til marts 2022 forventes der foretaget 1.559 klapninger indeholdende et volumen på 815 m<sup>3</sup> hver og med et tørstofindhold på 23%. Det samlede klappvolumen i perioden udgør dermed 1.270.585 m<sup>3</sup> og 774.422 tons tørstof svarende til halvdelen af den konservativt estimerede samlede klappmængde for perioden oktober 2021 – marts 2023. Om klapningerne er antagelsen at de foregår 5 dage om ugen (mandag-fredag) i tidsrummet kl. 8-19. Det antages ligeledes, at der på dage med klapninger foretages 12 klapninger med en times mellemrum.

Der er udpeget to klappingsområder Ka og Kb. I det følgende afsnit er der undersøgt konsekvenserne af:

- 1) kun at anvende klappads Ka,
- 2) kun at anvende klappads Kb og endelig
- 3) at anvende de to klappadser i kombination med skiftevis klapping mellem pladserne.

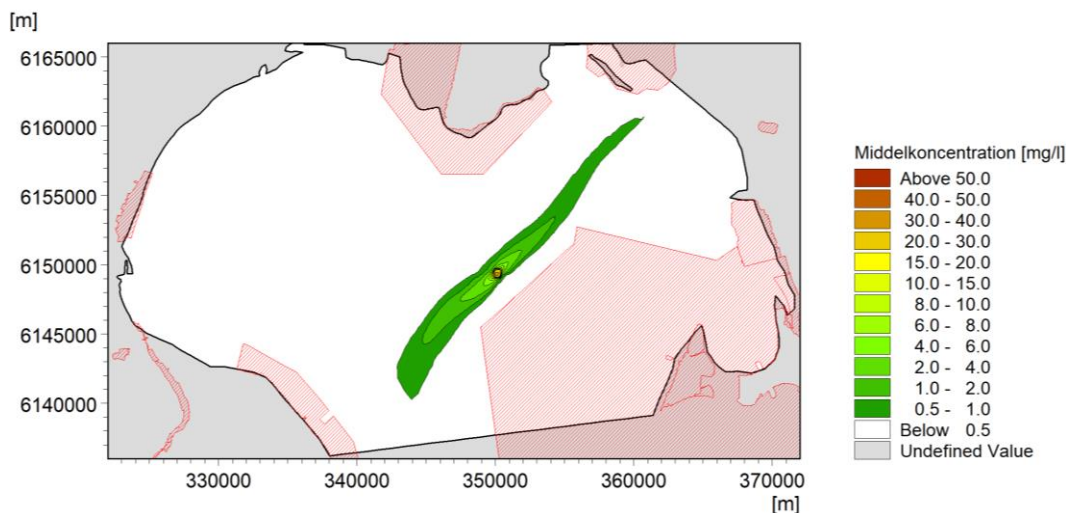
Der er kun foretaget beregninger for et enkelt halvår, idet klappingerne i de to perioder er adskilt af en vækstsæson og dermed kan opfattes som uafhængige. Konsekvenserne af klapping i perioden oktober 2022 – marts 2023 er dermed identiske med, det som er fundet for perioden oktober 2021 – marts 2022. For aflejringerne er modelresultaterne skaleret, således at de også omfatter den fulde graveperiode fra oktober 2021 – marts 2023.

### 5.1 Sedimentspredning ved brug af klappads Ka

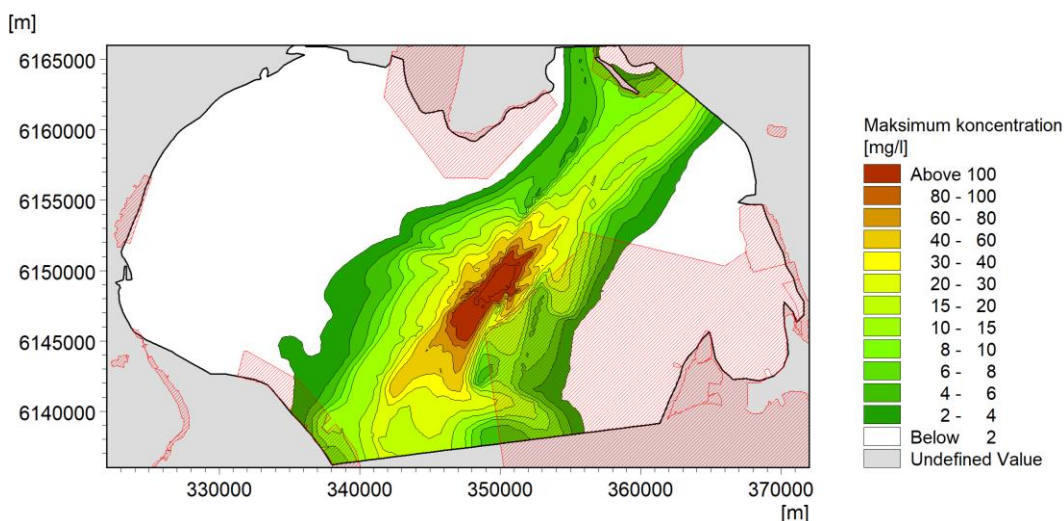
I dette afsnit ses der på en situation, hvor klappingerne i et vinterhalvår udelukkende foretages på klappads Ka.

De i forbindelse med klappingerne udløste sedimentfaner vil løbende diluere i takt med at fanen føres med strømmen væk fra klappområdet. Er strømforholdene rolige nok, vil sedimentet i fanen udfældes. De groveste sedimentpartikler vil udfældes hurtigst som følge af en højere faldhastighed, mens de mest finkornede fraktioner med en lav faldhastighed vil forblive længere tid i opslæmning. Er turbulensniveauet højt nok, vil sedimentet forblive i suspension. Klappingsfanerne vil typisk bevæge sig afsted som perler på en snor. I perioder med lagdeling kan strømmen være modsat rettet ved overflade og bund. I disse situationer spredes sedimentet, når det opholder sig i den øverste del af vandsøjlen mod nordøst, mens sedimentet i den nedre del af vandsøjlen vil spredes mod sydvest, idet det tungere vand bevæger sig ind i Østersøen. De følgende analyser er baseret på den dybdemidlede koncentration over vanddybden. I modelperioden som strækker sig over 184 dage, er den dybdemidlede middel- og maksimumkoncentration beregnet. Klappingerne foretages i vinterhalvåret (uden for vækstsæsonen) for at sikre at eventuel skyggepåvirkning fra klappsedimentet er af begrænset betydning.

Når der alene vurderes på middeldkoncentrationen, er der ingen skyggepåvirkning i Natura 2000 områderne, som det fremgår af Figur 5-1. Ser man derimod på maksimumkoncentrationen, som vist i Figur 5-2, ses der en skyggepåvirkning i den yderste del af det svenske Natura 2000 område ved Falsterbonæsset, i Natura 2000 området ved Saltholm, samt i området ved Stevns Klint. Maksimumkoncentrationen er der dog ikke egnet til at vurdere skyggepåvirkning, da kortet er baseret på en statistisk analyse, kun optræder kortvarigt og ikke udtryk for et samlet øjebliksbillede.

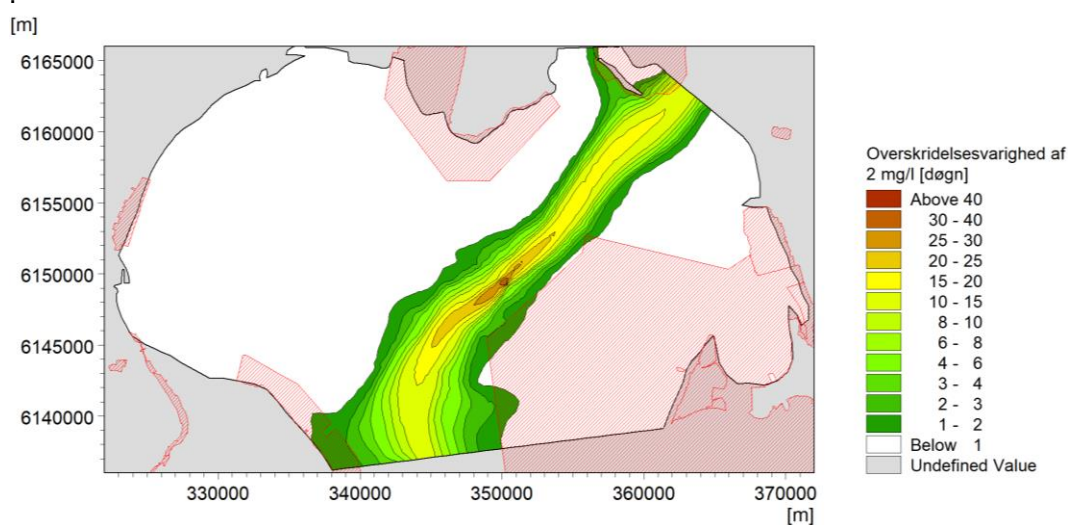


Figur 5-1 Dybdemidlet middelkoncentration i perioden 1. oktober – 3.april efter klapping på Ka.

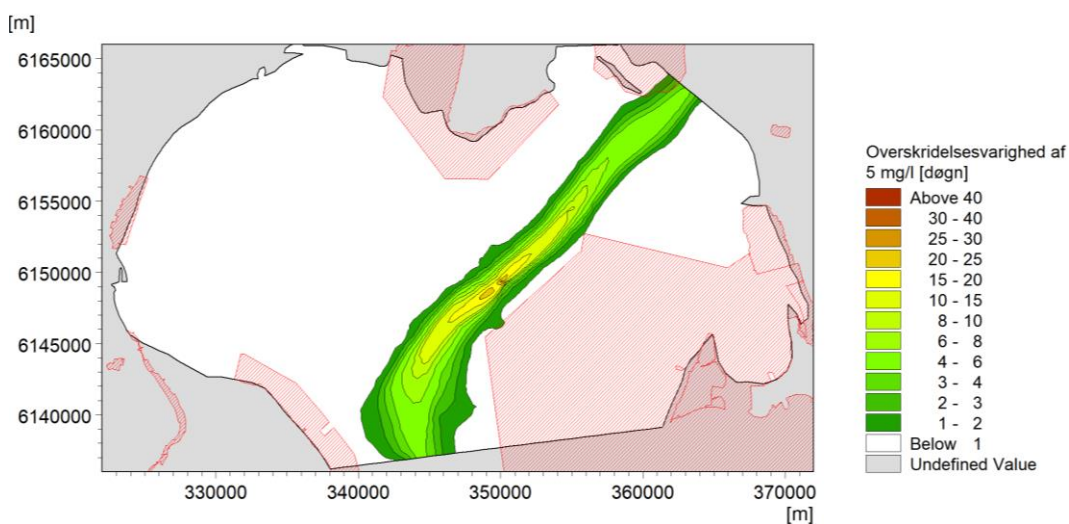


Figur 5-2 Dybdemidlet maksimumkoncentration i perioden 1. oktober – 3. april efter klapping på Ka.

Et bedre mål til estimering af skyggevirkning fås ved at se på overskridelsesvarigheder, hvormed en given dybdemidlet sedimentkoncentration er overskredet. I Figur 5-3 til Figur 5-6 er overskridelsesvarigheder af henholdsvis 2 mg/l, 5 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l beregnet. Koncentrationer på 2-5 mg/l er hvad man typisk betegner som en synlig sedimentfane, 10 mg/l svarer cirka til en sigt dybde på 2,5 meter og kan betegnes som kritisk for fiskemigration, mens 15 mg/l udgør mindstekravet til badevand og har betydning for fugles fourageringsevne grundet en nedsat sigt dybde, ref./3/. Af figurene ses, at der vil være en tydelig sedimentfane i området omkring klappladsen i en samlet periode af størrelsesorden 15-30 dage. Dette skal ses i forhold til klapperioden på cirka 180 dage. Yderligere skal man tænke på, at sedimentfanerne fra klappingerne bevæger sig som perler på en snor og ikke som en stor sammenhængende fane, jf. billedet på forsiden.

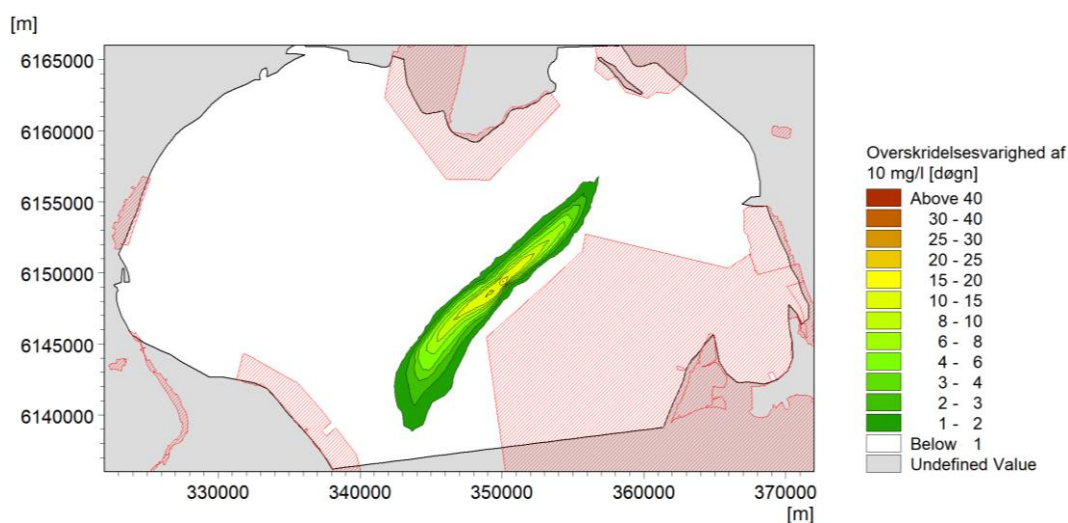


Figur 5-3 Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Ka.

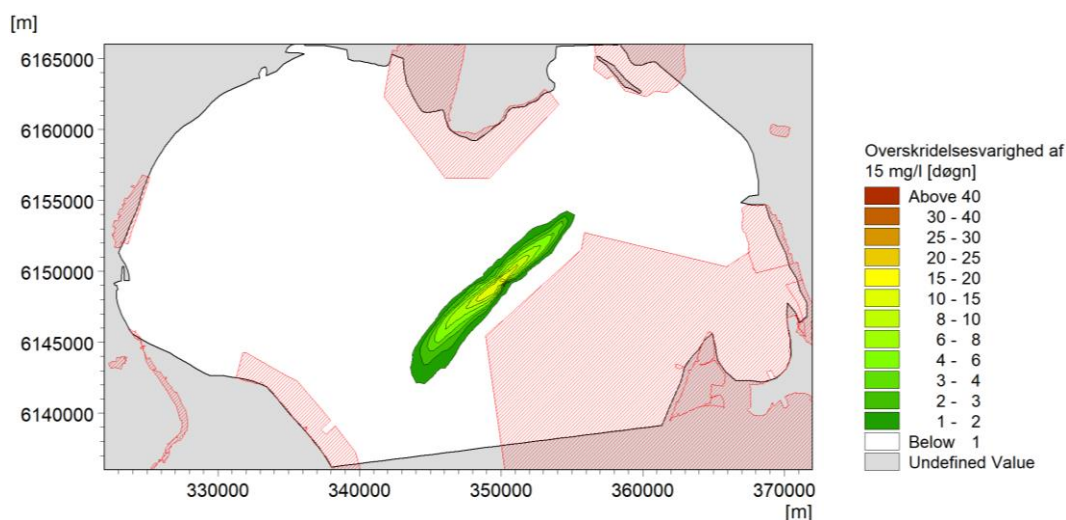


Figur 5-4 Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping.

Overskridelser af 10 mg/l og 15 mg/l finder ikke sted indenfor Natura 2000 områderne. Fiskemigration og fuglenes fourageringsevne vil derfor ikke være nedsat i disse områder.



Figur 5-5 Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping.



Figur 5-6 Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping.

I Tabel 5-1 er der angivet en oversigt visende hvor store arealer der er påvirket med en given varighed og overskridelseskoncentration.

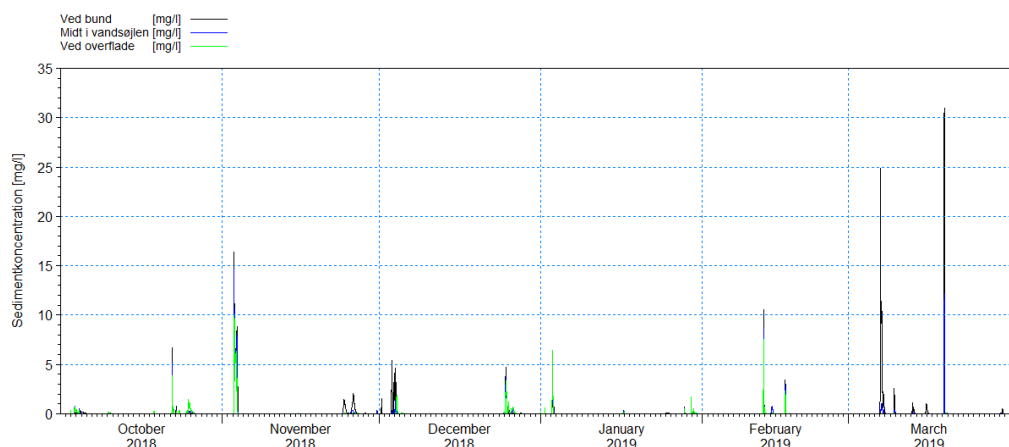
Tabel 5-1 Påvirkede arealer for givne overskridelsesvarigheder og koncentrationer.

Overskridelsesvarighed [døgn]	Påvirket areal [ha]						
	> 1	> 2	> 5	> 10	> 15	> 20	> 30
2 mg/l	22.777	17.319	11.033	6.508	2.996	838	18
5 mg/l	13.722	10.166	4.902	1.506	424	70	0
10 mg/l	5.683	3.664	1.607	392	39	1	0
15 mg/l	3.360	2.149	843	147	6	0	0

Som minimum vil der være 1 time eller mere mellem hver enkelt klapping. Sedimentspredningen er derfor sammensat af en række tilnærmelsesvis uafhængige



sedimentfaner. Perioder med skyggevirkning i Natura 2000 områderne er derfor sammensat af en række relativt kortvarige hændelser. I Figur 5-7 er der vist tidsserier af sedimentkoncentrationen i punktet E 350.000 m og N 6.146.000 m med reference til UTM-33. Punktet er beliggende i det svenske Natura 2000 område, hvor både 2 mg/l og 5 mg/l overskrides i mere end 12 timer i det modellerede vinterhalvår. Koncentrationerne er udtrukket ved bund, midt i vandsøjlen og ved overfladen. Det ses, at klappingerne kun fører til korte sporadiske hændelser inde i Natura 2000 områder, hvorfor effekterne må betegnes som værende yderst beskedne. Bundfaunaen oplever også skyggevirkning om natten og da dagens længde er kortere i vinterhalvåret, vil over halvdelen af de sporadiske hændelser optræde på tidspunkter, hvor der alligevel ikke er lystilførsel.



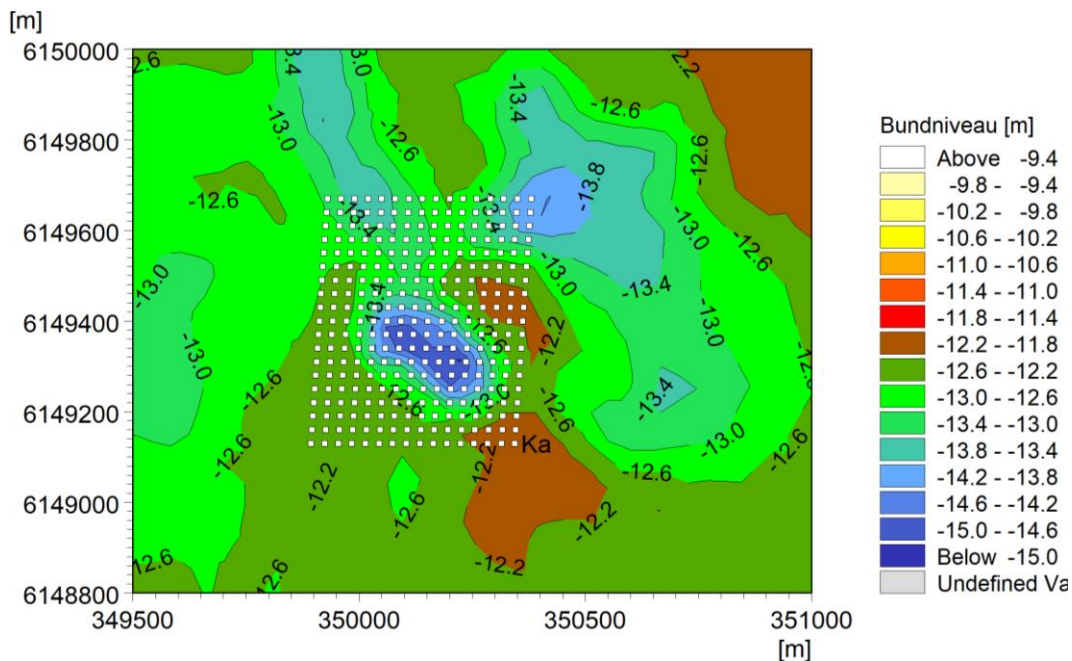
Figur 5-7 Tidsserie af sedimentkoncentrationer ved bund, midt i vandsøjlen og ved overfladen i punktet E 350.000 m og N 6.146.000 m beliggende i det svenske Natura 2000 område.

I Figur 5-9 er aflejringstykkelserne på klappads Ka vist efter klappingerne i perioden oktober 2021 – marts 2022. De densitetsdrevne effekter får materialet til at samle sig i områderne med størst initialdybde. Samme effekter får en del af klappmaterialet til at løbe lidt udenfor selve klappadsområdet, som er markeret med de fire små hvide firkanter.

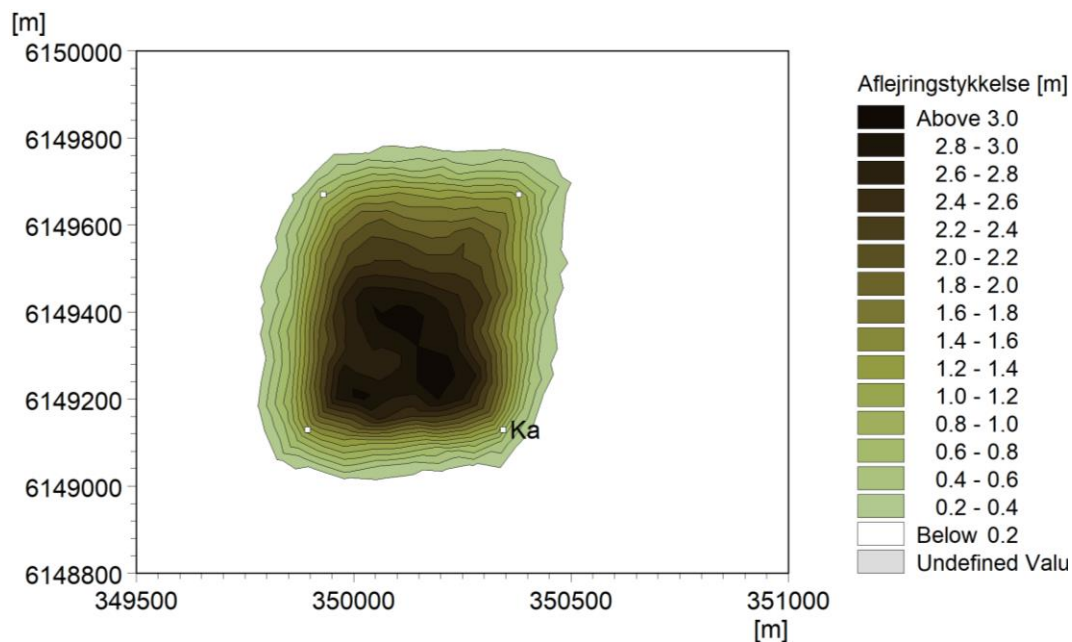
Figur 5-10 viser aflejringsskort dækkende hele det sydlige Øresund. Det ses, at der ikke aflejres materiale i noget betydende omfang (< 1 mm) i de med rød skravering angivne Natura 2000 områder. Aflejring finder primært sted sydvest for klappområdet, hvor vanddybderne er størst. En aflejringstykkelse på 1 mm, kan opfattes som sedimentaflejring af 6 kg/m<sup>2</sup>. Klappadsen er svagt trapezformet og har en udstrækning på cirka 450 m x 540 m. Efter endt klappning udgør den deponerede del indenfor selve klappadsen 45 % af den samlede klappmængde, som følge af den høje vandprocent og relativt lave tørdensitet.

Det er kun en mindre del af klappmaterialet som aflejres direkte på bunden i forbindelse med en klappning. Størstedelen af materialet vil hænge som en sedimentsky over bunden, som langsomt falder ud i takt med sedimentets faldhastighed. Da sedimentskyen flyttes med strømmen, vil store dele af materialet føres væk fra klappadsen og aflejres andet sted, særligt de mest finkornede dele, som har en meget lav faldhastighed. Det er derfor, at man finder et længere aflejringssbånd i området sydvest for klappadsen og at kun 45% af materialet ender på selve klappadsen. Re-suspension optræder stort set ikke, hvorfor tabet finder sted i forbindelse med selve klappningen. Man vil kunne øge andelen lidt ved at klippe i den side af klappadsen, hvor strømmen ved bunden fører sedimentskyen hen over klappadsen. I den udførte modellering er det tilfældigt, hvor der klappes, men tabet er ekstra stort i modelleringen, idet klappingssekvensen startes i den sydlige del. Efter gennemløb af klappadspositionerne gentages sekvensen. De i modelleringen anvendte klappadspositioner er vist i Figur 5-8. I praksis vil en større del af klappingerne foretages på den centrale del, hvor dybden er størst og det reelle tab vil derved blive mindre. Hvis der ydermere er klumper i klappmaterialet, vil de gå direkte til bunden og sedimentere og

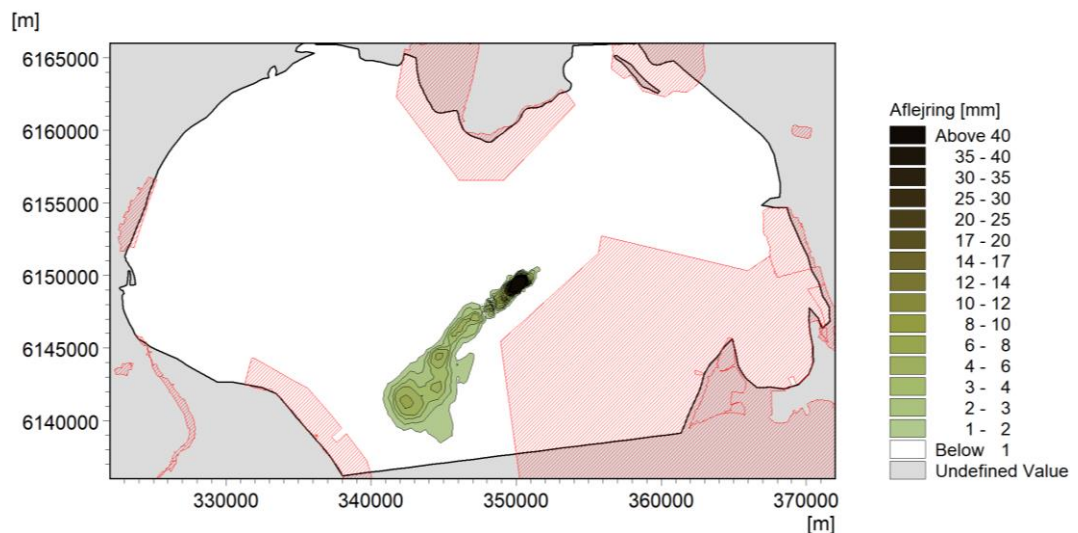
mængden af tilbageholdt materiale på klapplassen vil dermed vokse. I de udførte beregninger er det antaget, at der ikke er klumper i klappmaterialet. I praksis må det derfor forventes at mere end de estimerede 45% vil forblive på klapplassen.



Figur 5-8 Anvendte positioner for klappning på Ka.

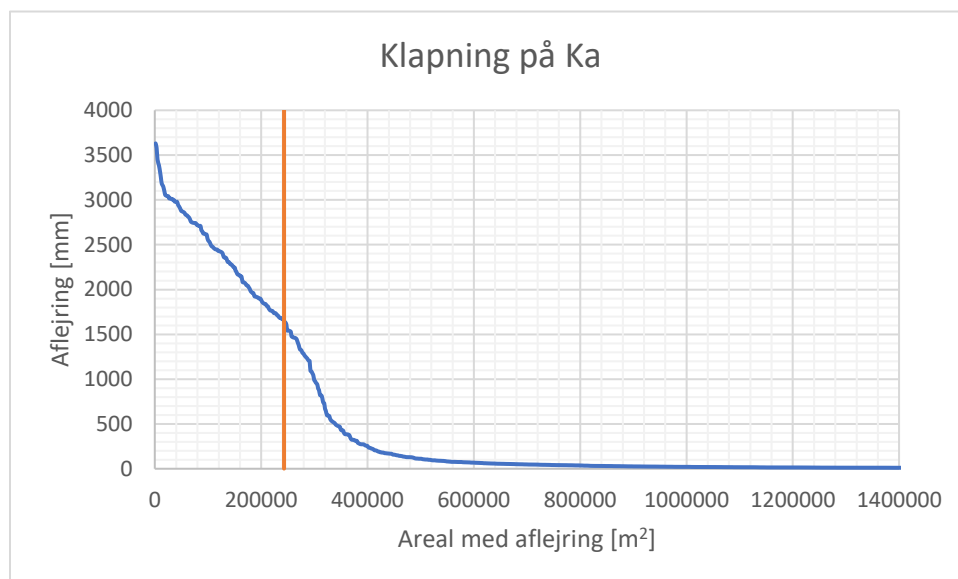


Figur 5-9 Aflejringsstykkelse på klapplass Ka efter klappning i perioden oktober 2021 – marts 2022.

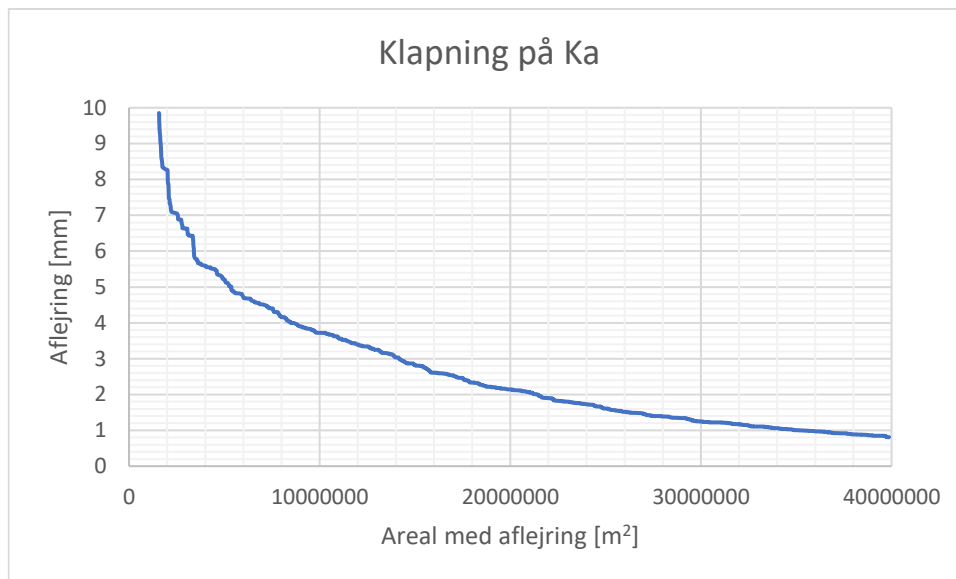


Figur 5-10 Aflejringsstykkelser efter klapping på Ka i perioden oktober 2021 – marts 2022.

Cirka halvdelen af det klappede materiale forbliver på selve klapplassen og der er en spredning og aflejring til det omkringliggende område. På klapplass Ka er der et gammelt sugespids hul, hvor en større del af det klappede materiale vil samle sig. I dette område er der estimeret en lagtykkelse på cirka 3,5 m. Klapplassområdet areal udgør cirka 24,3 ha. I Figur 5-11 er der angivet en sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringsstykkelser for klapplassens nærområde. Den orangebrune vertikale linje angiver klapplassområdet areal. Et tilsvarende diagram er vist i Figur 5-12 for påvirkningen udenfor klapplassens nærområde. Klapplassområdets udstrækning angiver zonen, hvor indenfor en splitram må frigive sin last. I sit møde med bunden spredes klapplassmaterialet radiært væk fra centeret, men primært i de retninger, hvor bundhældningen virker forstærkende på udbredelsen. Det faktiske aflejringsområde er derfor større end selve klapplassområdet. På klapplass Ka er bundtopografien mere ujævn, hvorfor bundhældningseffekter bliver af lidt større betydning end på klapplass Kb.



Figur 5-11 Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringsstykkelser i klapplassens nærområde.



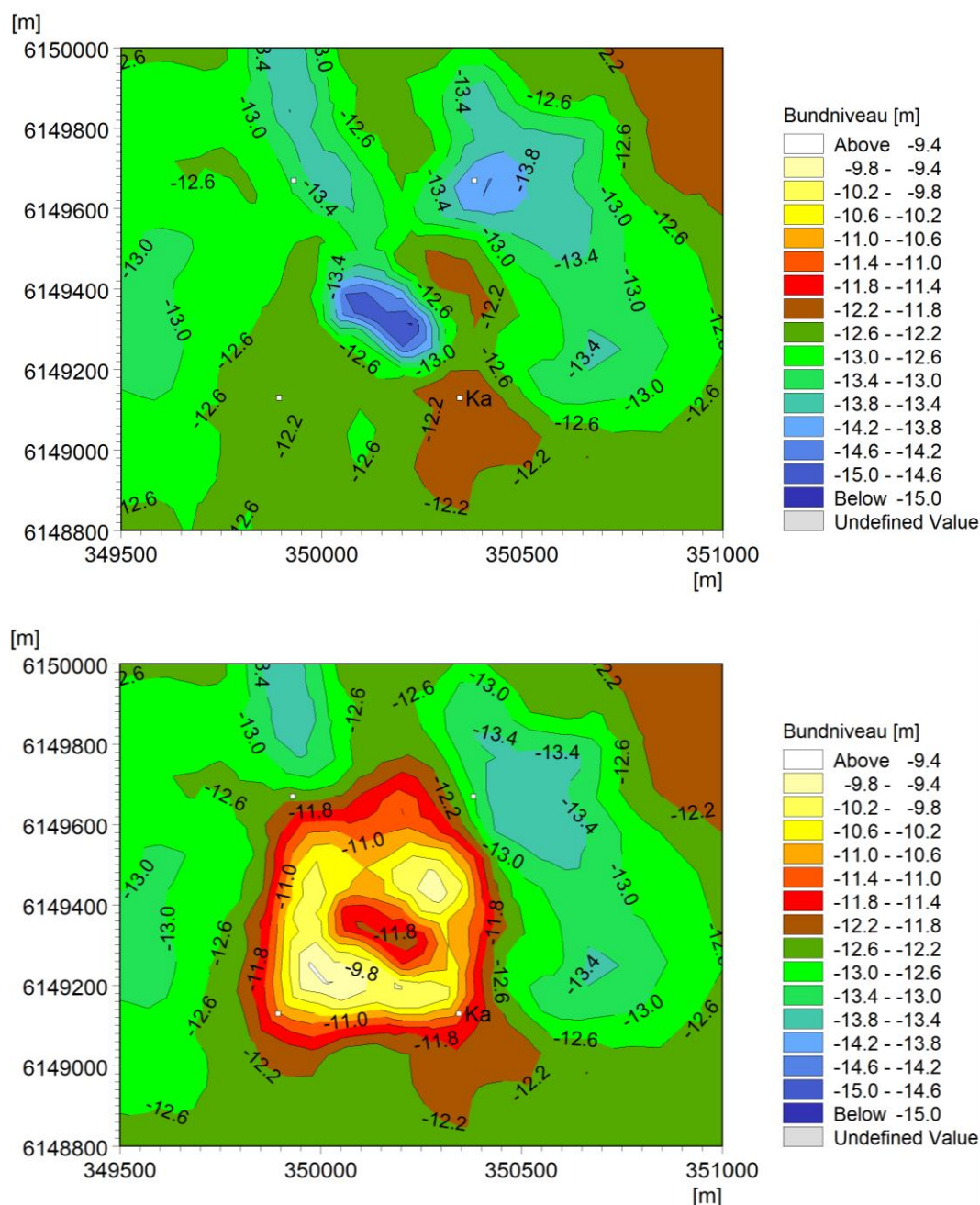
Figur 5-12 Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser udenfor klappladsens nærområde.

I Tabel 5-2 er det påvirkede areal angivet for en række minimumaflejringstykkelser. Arealerne er her omregnet til hektar.

Tabel 5-2 Påvirket areal med aflejring efter klapning på Ka i perioden oktober 2021 – marts 2022.

Klapplads	Aflejringstykkelse [mm]							
	> 1	> 2	> 5	> 10	> 20	> 50	> 100	> 300
Ka								
[ha]	3.514	2.140	535	156	105	69	52	38

Klapmaterialets fordeling på bunden er styret af hvor der klappes samt de batymetriske forhold. Er der lavninger eller sugespids huller, vil der være en tendens til at klapmaterialet samles i disse områder. I Figur 5-13 er klappladsens bundtopografi vist før klapningernes påbegyndelse i oktober måned 2021 og efter klapning i april 2022. I modelberegningen er det antaget, at der gennem perioden klappes jævnt hen over hele klappladsområdet. I praksis vil man kun klappe i de områder, hvor dybdeforholdene tillader det. Efter klapning kræves der en minimumsdybde på 10 meter. Dette er ikke opfyldt i simuleringen, men vil kunne sikres ved at flytte nogle af klapningerne til den centrale del og den nordligste del af området. Der er ikke kapacitet på klappladsen til, at den kan aftage det følgende års klavningsmængder. Klapplads Ka kan derfor ikke benyttes som den eneste klapplads til projektet.



Figur 5-13 Bundtopografi før (øverst) og efter klappning (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klappinger hen over området.

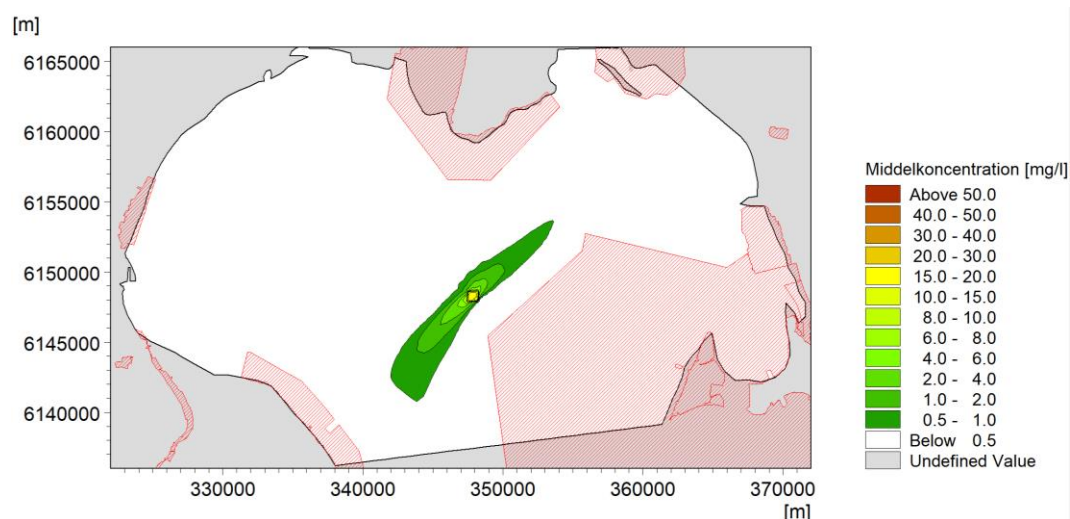
## 5.2 Sedimentspredning ved brug af klappblads Kb

I dette afsnit ses der på en situation, hvor klappningerne i et vinterhalvår udelukkende foretages på klappblads Kb.

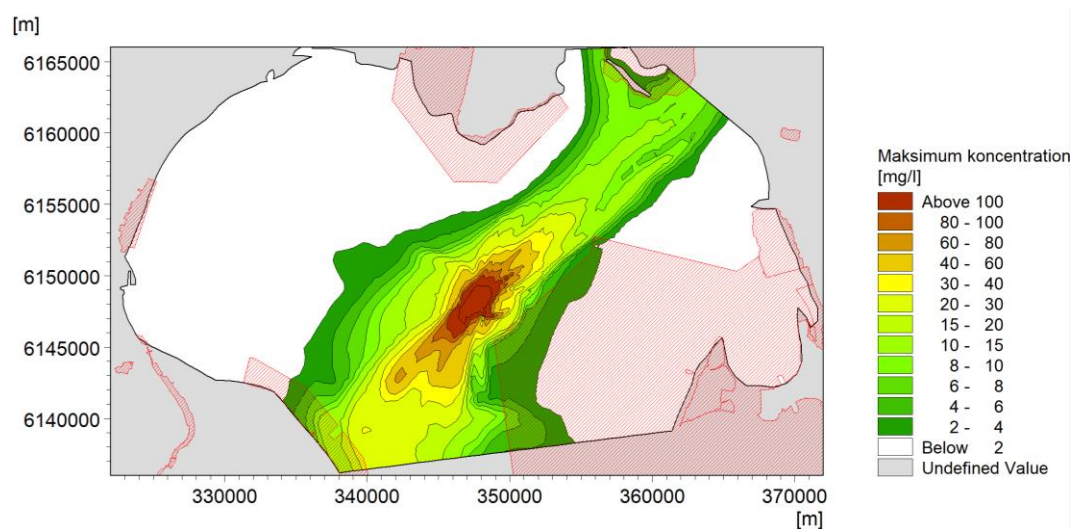
De i forbindelse med klappningerne udløste sedimentfaner vil løbende diluere i takt med at fanen føres med strømmen væk fra klappområdet. Er strømforholdene rolige nok, vil sedimentet i fanen udfældes. De groveste sedimentpartikler vil udfældes hurtigst som følge af en højere faldhastighed, mens de mest finkornede fraktioner med en lav faldhastighed vil forblive længere tid i opslæmning. Klappningsfanerne vil typisk bevæge sig afsted som perler på en snor. I perioder med lagdeling kan strømmen være modsat rettet ved overflade

og bund. I disse situationer spredes sedimentet i den øverste del af vandsøjlen mod nordøst, mens den nedre del af vandsøjlen spredes mod sydvest, idet det tungere vand bevæger sig ind i Østersøen. De følgende analyser er baseret på den dybdemidlede koncentration over vanddybden. I modelperioden som strækker sig over 184 dage, er den dybdemidlede middel- og maksimalkoncentration beregnet. Klapningerne foretages i vinterhalvåret (uden for vækstsæsonen) for at sikre at eventuel skyggepåvirkning fra klapsedimentet er af begrænset betydning.

Når der alene vurderes på middelkoncentrationen, er der ingen skyggevirksomhed i Natura 2000 områderne, som det fremgår af Figur 5-14. Ser man derimod på maksimalkoncentrationen, som vist i Figur 5-15, ses der en skyggepåvirkning i den yderste del af det svenske Natura 2000 område ved Falsterbonæsset, i Natura 2000 området ved Saltholm, samt i området ved Stevns Klint. Maksimumkoncentrationen er der dog ikke egnet til at vurdere skyggepåvirkning, da kortet er baseret på en statistisk analyse, kun optræder kortvarigt og ikke er udtryk for et øjeblikbillede.



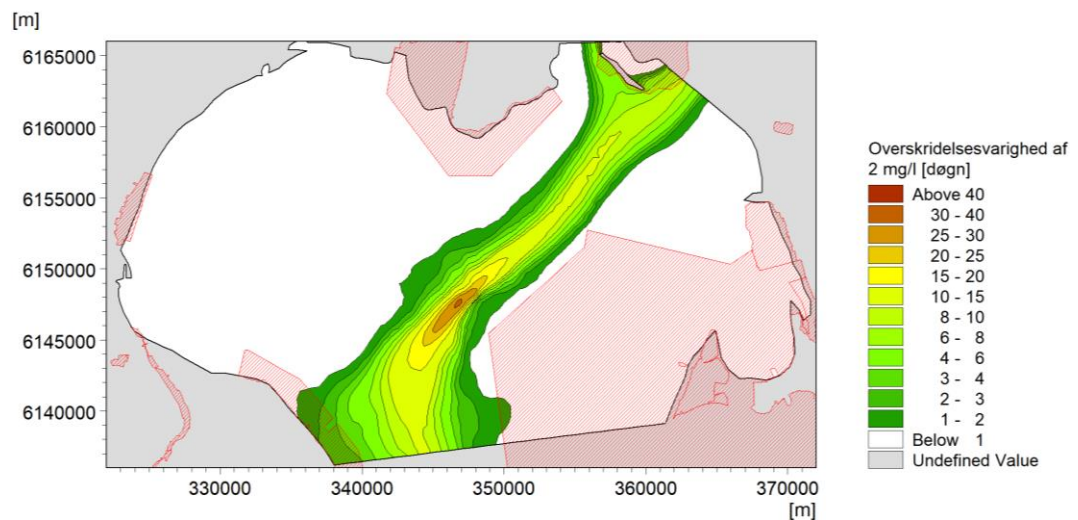
Figur 5-14 Dybdemidlet middelkoncentration i perioden 1. oktober – 3. april efter klaping på Kb.



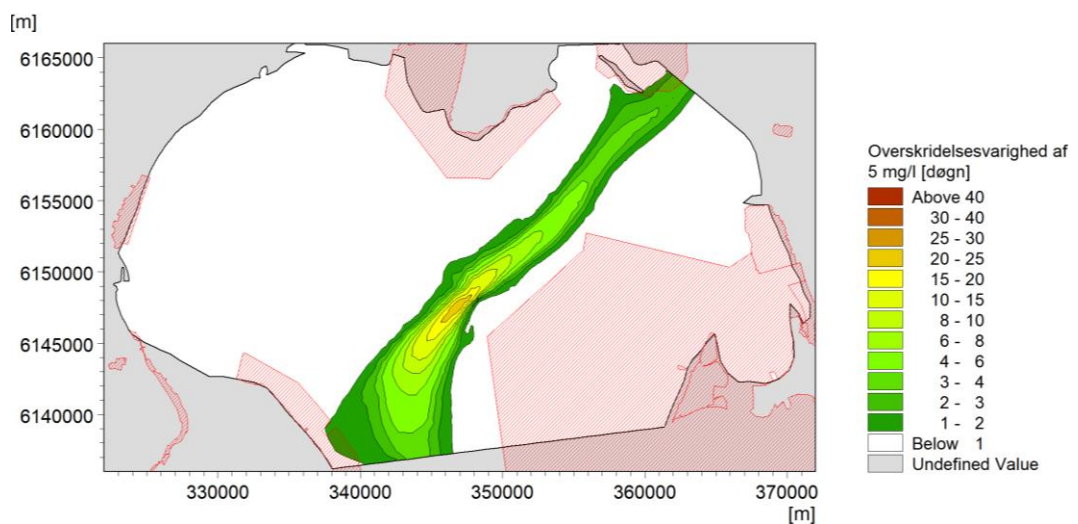
Figur 5-15 Dybdemidlet maksimalkoncentration i perioden 1. oktober – 3. april efter klaping på Kb.

Et bedre mål til estimering af skyggevirksomhed fås ved at se på overskridelsesvarigheder, hvormed en given dybdemidlet sedimentkoncentration er overskredet. I Figur 5-16 til Figur

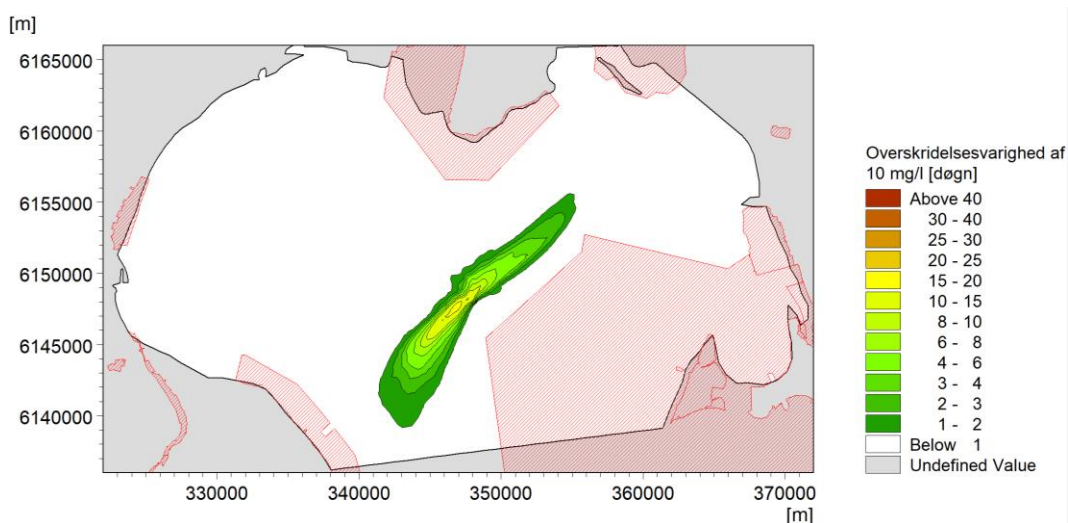
5-6 er overskridelsesvarigheder af henholdsvis 2 mg/l, 5 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l beregnet. Koncentrationer på 2-5 mg/l er hvad man typisk betegner som en synlig sedimentfane, 10 mg/l svarer cirka til en sigt dybde på 2,5 meter og kan betegnes som kritisk for fiskemigration, mens 15 mg/l udgør mindstekravet til badevand og har betydning for fugles fourageringsevne grundet en nedsat sigt dybde, ref./3/. Af figurerne ses, at der vil være en tydelig sedimentfane i området omkring klappladsen i en samlet periode af størrelsesorden 15-30 dage. Dette skal ses i forhold til klapperioden på cirka 180 dage. Yderligere skal man tænke på, at sedimentfanerne fra klappingerne bevæger sig som perler på en snor og ikke som en stor sammenhængende fane.



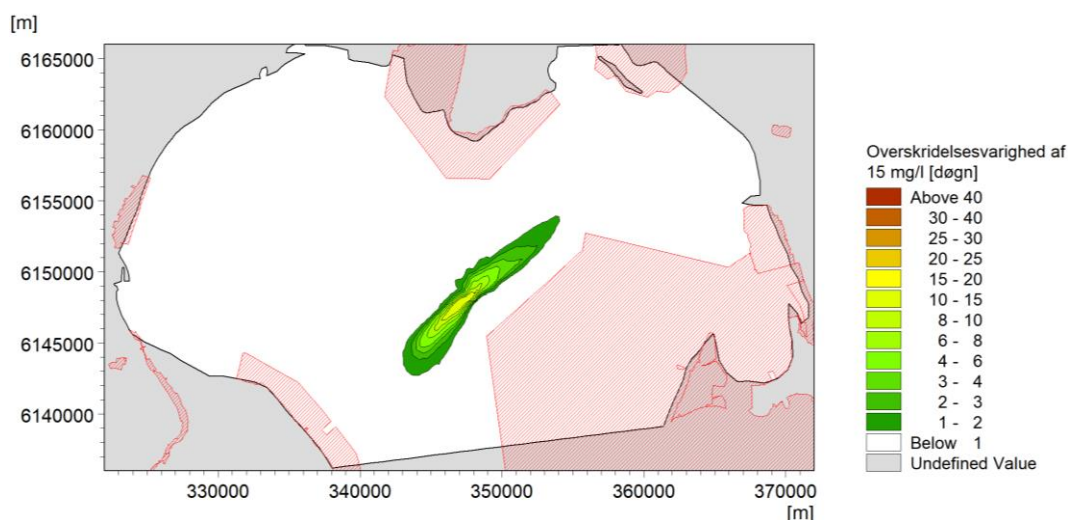
Figur 5-16 Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Kb.



Figur 5-17 Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Kb.



Figur 5-18 Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Kb.



Figur 5-19 Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Kb.

I Tabel 5-3 er der angivet en oversigt visende hvor store arealer der er påvirket med den givne varighed og overskridelseskoncentration.

Tabel 5-3 Påvirkede arealer for givne overskridelsesvarigheder og koncentrationer.

Overskridelsesvarighed [døgn]	Påvirket areal [ha]						
	> 1	> 2	> 5	> 10	> 15	> 20	> 30
2 mg/l	23.684	18.683	11.569	4.816	1.342	571	23
5 mg/l	14.028	9.966	3.653	962	367	135	0
10 mg/l	5.237	3.235	1.141	342	68	0	0
15 mg/l	2.886	1.715	602	139	0	0	0

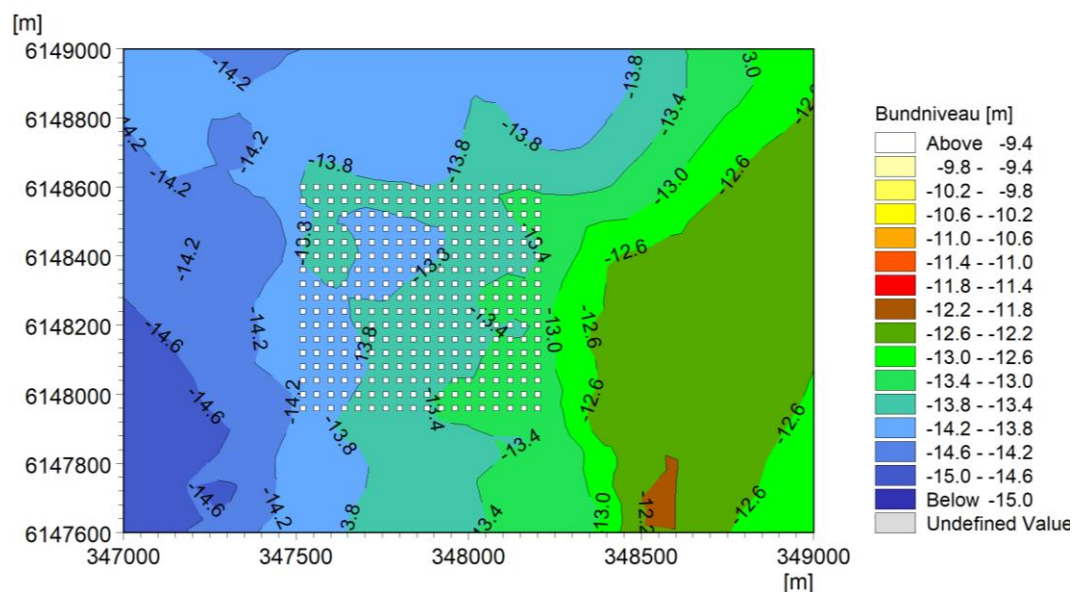
Som minimum vil der være 1 time eller mere mellem hver enkelt klapping. Sedimentspredningen er derfor sammensat af en række tilnærmelsesvis uafhængige



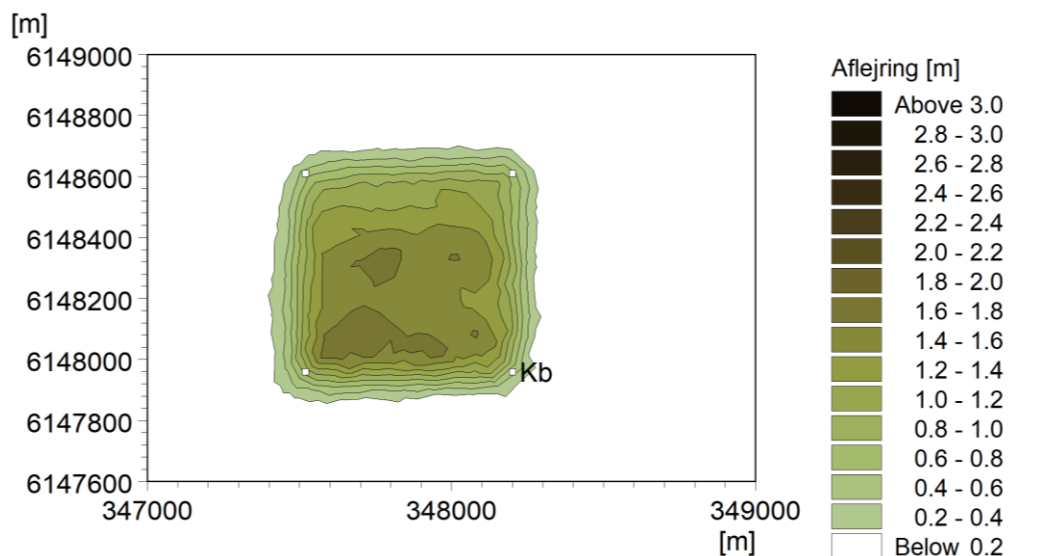
sedimentfaner. Perioder med skyggevirkning i Natura 2000 områderne er sammensat af en række relativt kortvarige sporadiske hændelser. Bundfaunaen oplever også skyggevirkning om natten og da dagens længde er kortere i vinterhalvåret, vil over halvdelen af de sporadiske hændelser optræde på tidspunkter, hvor der alligevel ikke er lystilførsel.

I Figur 5-21 er aflejringsstykkelserne på klappads Kb vist efter klappingerne i perioden oktober 2021 – marts 2022. De densitetsdrevne effekter får materialet til at samle sig i områderne med størst initialdybde. Samme effekter får en del af klappadsmaterialet til at løbe lidt udenfor selve klappadsområdet, som er markeret med de fire små hvide firkanter. Største lagtykkelse efter klapping er lige knap 2 meter. Klappadsen har en udstrækning på cirka 680 m x 650 m. Efter endt klapping udgør den deponerede del indenfor selve klappadsen 49 % af den samlede klappadmængde, som følge af den høje vandprocent og relativt lave tørdensitet. Hvis der er klumper i klappadmaterialet, vil de gå direkte til bunden og sedimentere på stedet og mængden af tilbageholdt materiale på klappadsen vil dermed vokse. I de udførte beregninger er det antaget, at der ikke er klumper i klappadmaterialet. De 49% som der er estimeret som klappadsen tilbageholdelsesprocent, kan derfor i praksis vise sig at blive noget højere.

Det er kun en mindre del af klappadmaterialet som aflejres direkte på bunden i forbindelse med en klapping. Størstedelen af materialet vil hænge som en sedimentsky over bunden, som langsomt falder ud i takt med sedimentets faldhastighed. Da sedimentskyen flyttes med strømmen, vil store dele af materialet føres væk fra klappadsen og aflejres andet sted, særligt de mest finkornede dele, som har en meget lav faldhastighed. Det er derfor, at man finder et længere aflejringsbånd i området sydvest for klappadsen, og at kun 49% af materialet ender på selve klappadsen. Re-suspension optræder stort set ikke, hvorfor tabet finder sted i forbindelse med selve klappingen. Man vil kunne øge andelen lidt ved at klippe i den side af klappadsen, hvor strømmen ved bunden fører sedimentskyen hen over klappadsen. I den udførte modellering er det tilfældigt, hvor der klappes, men tabet er ekstra stort i modelleringen, idet klappingssekvensen startes i den sydlige del. Efter gennemløb af klappadspositionerne gentages sekvensen. De i modelleringen anvendte klappadspositioner er vist i Figur 5-20.

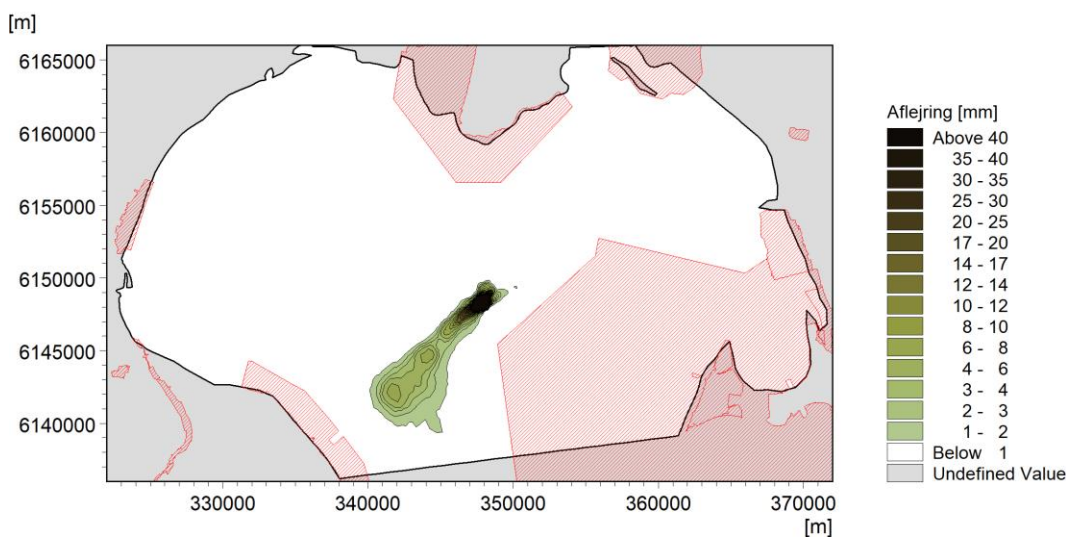


Figur 5-20 Anvendte positioner for klapping på Kb.



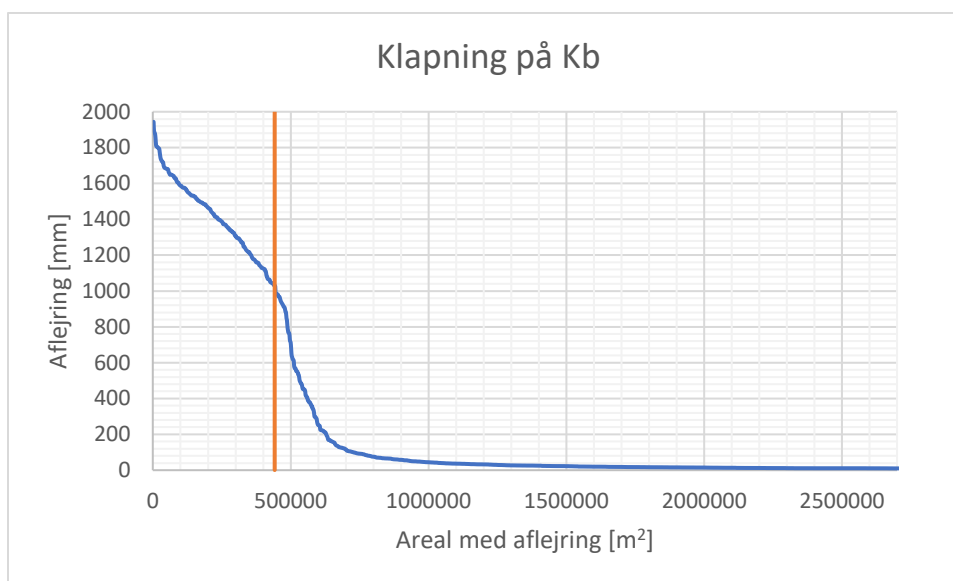
Figur 5-21 Aflejringsstykkelse på klappads Kb efter klapping i perioden oktober 2021 – marts 2022.

Figur 5-22 viser aflejringskort dækkende hele det sydlige Øresund. Det ses, at der ikke aflejres materiale i noget betydende omfang (< 1 mm) i de med rød skravering angivne Natura 2000 områder. Aflejring finder primært sted sydvest for klappområdet, hvor vanddybderne er størst. En aflejringsstykkelse på 1 mm, kan opfattes som sedimentaflejring af 6 kg/m<sup>2</sup>.

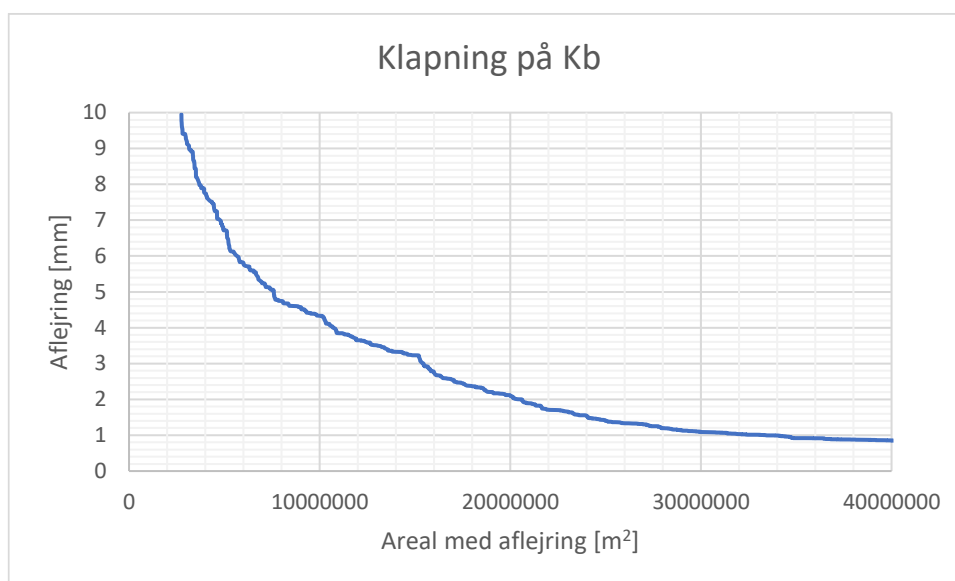


Figur 5-22 Aflejringsstykkelser efter klapping på Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022.

Størstedelen af det klappede materiale forbliver på selve klappadsen, men der er en spredning og aflejring i det omkringliggende område. Klappadsområdets areal udgør cirka 44,2 ha. I Figur 5-21 er der angivet en sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringsstykkelse for klappadsens nærområde. Den orangebrune vertikale linje angiver klappadsområdets areal. Et tilsvarende diagram er vist i Figur 5-22 for påvirkningen udenfor klappadsens nærområde. Klappadsområdets udstrækning angiver zonen, hvor indenfor en splitpram må frigive sin last. I sit møde med bunden spredes klappmaterialet radiært væk fra centeret, men primært i de retninger, hvor bundhældningen virker forstærkende på udbredelsen. Det faktiske aflejringsområde er derfor større end selve klappadsområdet.



Figur 5-23 Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser i klappladsens nærområde.



Figur 5-24 Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser udenfor klappladsens nærområde.

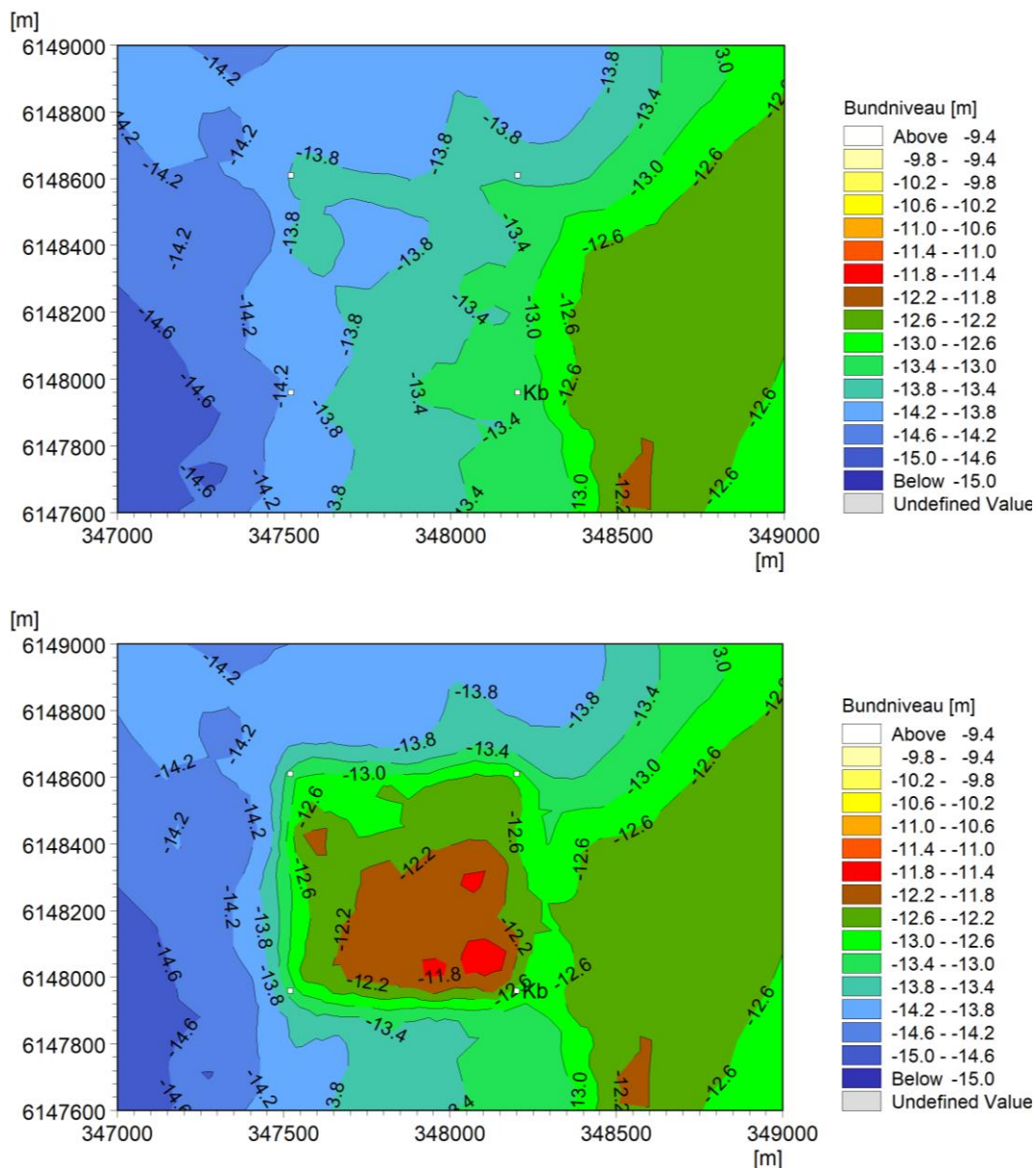
I Tabel 5-4 er det påvirkede areal angivet for en række minimumaflejringstykkelser. Arealerne er her omregnet til hektar.

Tabel 5-4 Påvirket areal med aflejring efter klapning på Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022.

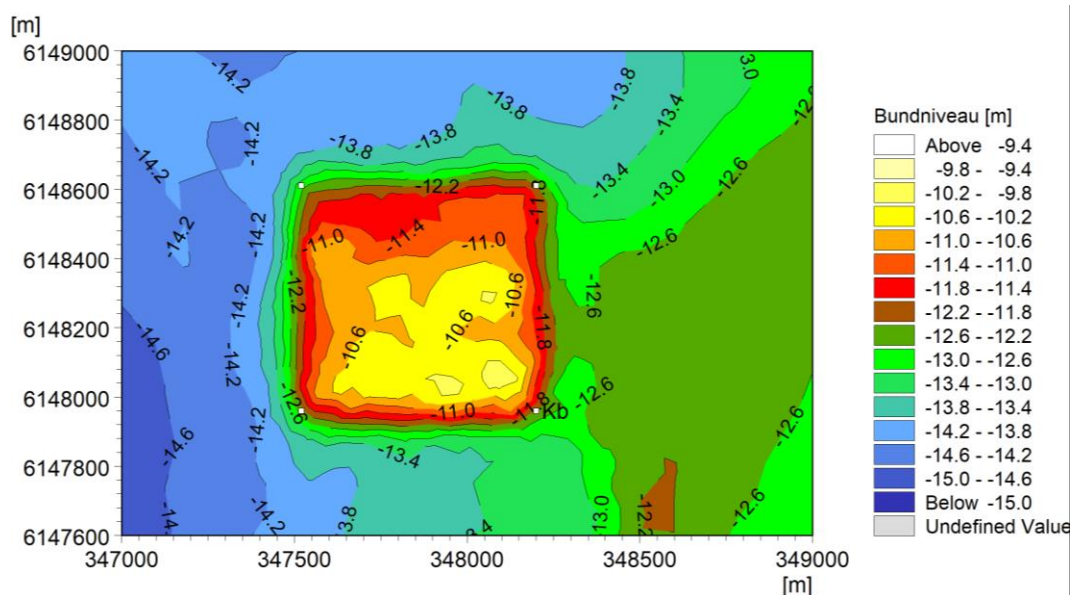
Klapplads	Aflejringstykkelse [mm]							
	> 1	> 2	> 5	> 10	> 20	> 50	> 100	> 300
[ha]	3.327	2.038	757	273	159	94	73	58

I Figur 5-25 er klappladsens bundtopografi vist før klapningernes påbegyndelse i oktober måned 2021 og efter klapning i april 2022. I modelberegningen er det antaget, at der

gennem perioden klappes jævnt hen over hele klappadsområdet. I praksis vil man kun klippe i de områder, hvor dybdeforholdene tillader det. Efter klipping kræves der en minimumsdybde på 10 meter. Dette er opfyldt uden problemer og klappadsen vil derfor, som det fremgår af Figur 5-26, være i stand til at optage det følgende års klavningsmængder. I det viste plot er det antaget, at der er samme klavningsfordeling i de to halvårs perioder.



Figur 5-25 Bundtopografi før (øverst) og efter klipping (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klavnings hen over området.



Figur 5-26 Bundtopografi efter klappning april 2023 ved anvendelse af en ligelig fordeling af klappinger hen over området.

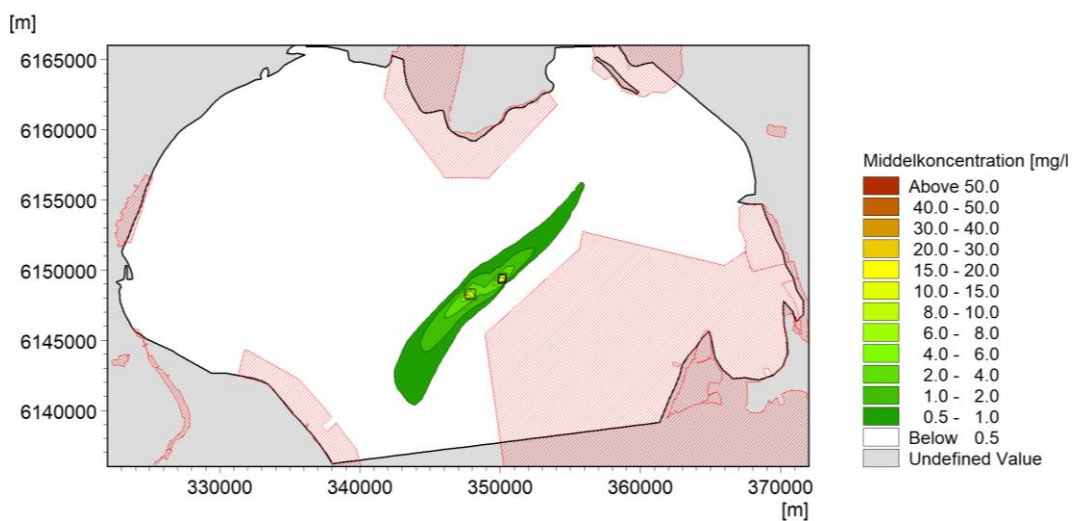
Kapaciteten på klappads Kb er derfor, såfremt der ikke er klumper i klappmaterialet af betydende omfang, stor nok til at kunne håndtere den samlede klappmængde uden brug af klappads Ka. Sejltilen til klappads Kb er dog lidt længere end til klappads Ka.

### 5.3 Sedimentspredning ved brug af klappads Ka og Kb

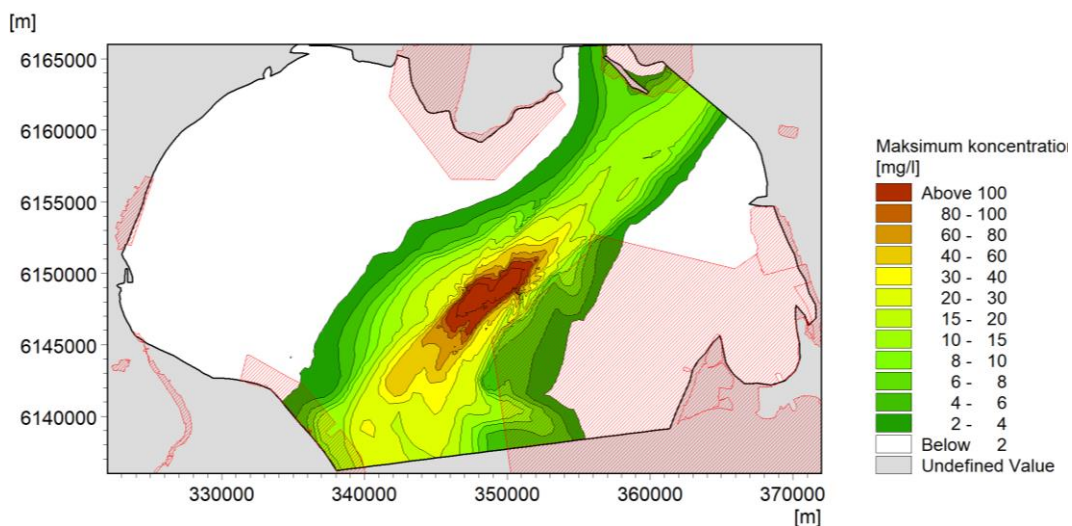
I dette afsnit ses der på en situation, hvor klappingerne i et vinterhalvår skiftevis foretages på klappads Ka og klappads Kb.

De i forbindelse med klappingerne udløste sedimentfaner vil løbende diluere i takt med at fanen føres med strømmen væk fra klappområdet. Er strømforholdene rolige nok, vil sedimentet i fanen udfældes. De groveste sedimentpartikler vil udfældes hurtigst som følge af en højere faldhastighed, mens de mest finkornede fraktioner med en lav faldhastighed vil forblive længere tid i opløsning. Klappingsfanerne vil typisk bevæge sig afsted som perler på en snor. I perioder med lagdeling kan strømmen være modsat rettet ved overflade og bund. I disse situationer spredes sedimentet i den øverste del af vandsøjlen mod nordøst, mens den nedre del af vandsøjlen spredes mod sydvest, idet det tungere vand bevæger sig ind i Østersøen. De følgende analyser er baseret på den dybdemidlede koncentration over vanddybden. I modelperioden som strækker sig over 184 dage, er den dybdemidlede middel- og maksimumkoncentration beregnet. Klappingerne foretages i vinterhalvåret (uden for vækstsæsonen) for at sikre at eventuel skyggepåvirkning fra klapsedimentet er af begrænset betydning.

Når der alene vurderes på middelkoncentrationen, er der ingen skyggevirksomhed i Natura 2000 områderne, som det fremgår af Figur 5-27. Ser man derimod på maksimumkoncentrationen, som vist i Figur 5-28, ses der en skyggepåvirkning i den yderste del af det svenske Natura 2000 område ved Falsterbonæsset, i Natura 2000 området ved Saltholm, samt i området ved Stevns Klint. Maksimumkoncentrationen er der dog ikke egnet til at vurdere skyggepåvirkning, da kortet er baseret på en statistisk analyse, kun optræder kortvarigt og ikke er udtryk for et øjeblikbillede.

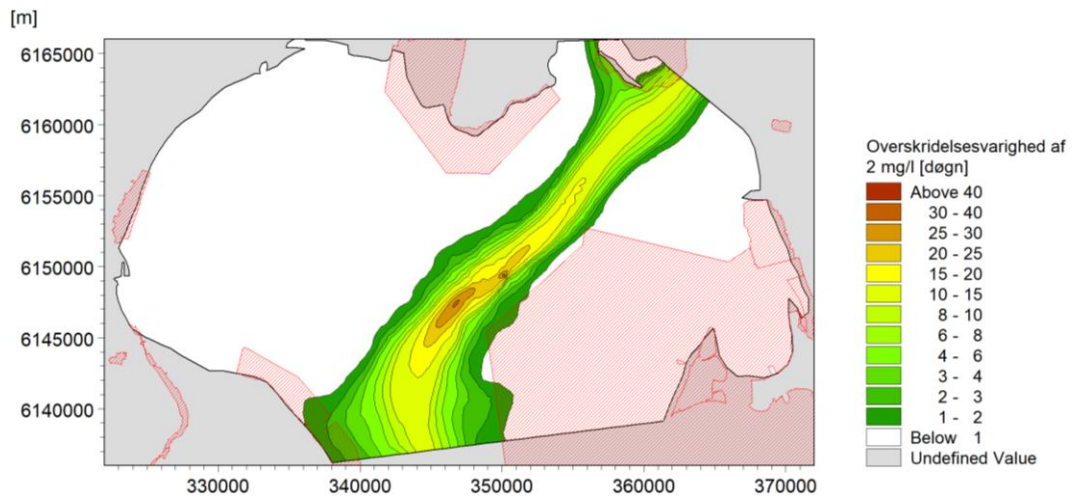


Figur 5-27 Dybdemidlet middelkoncentration i perioden 1. oktober – 3.april efter klapping på Ka og Kb.

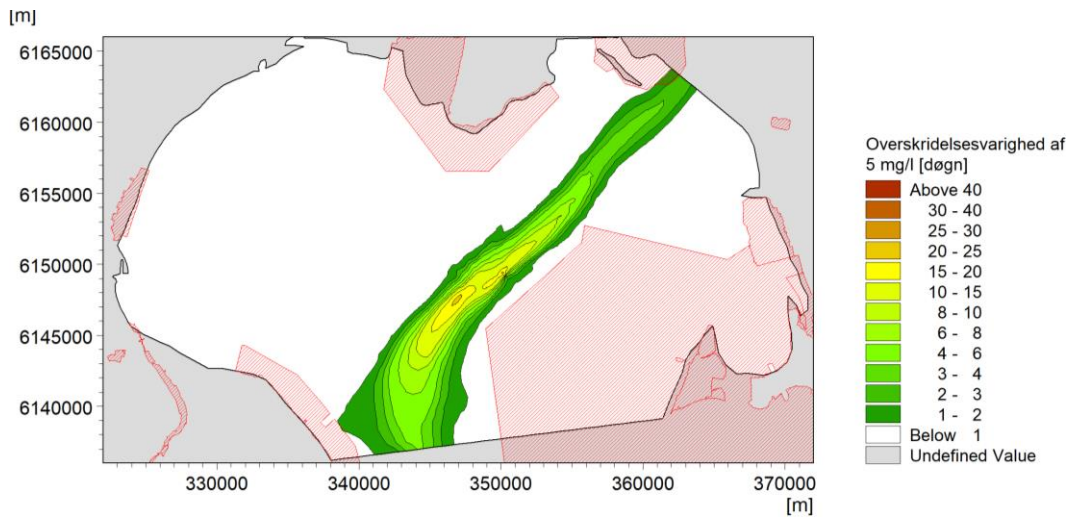


Figur 5-28 Dybdemidlet maksimumkoncentration i perioden 1. oktober – 3. april efter klapping på Ka og Kb

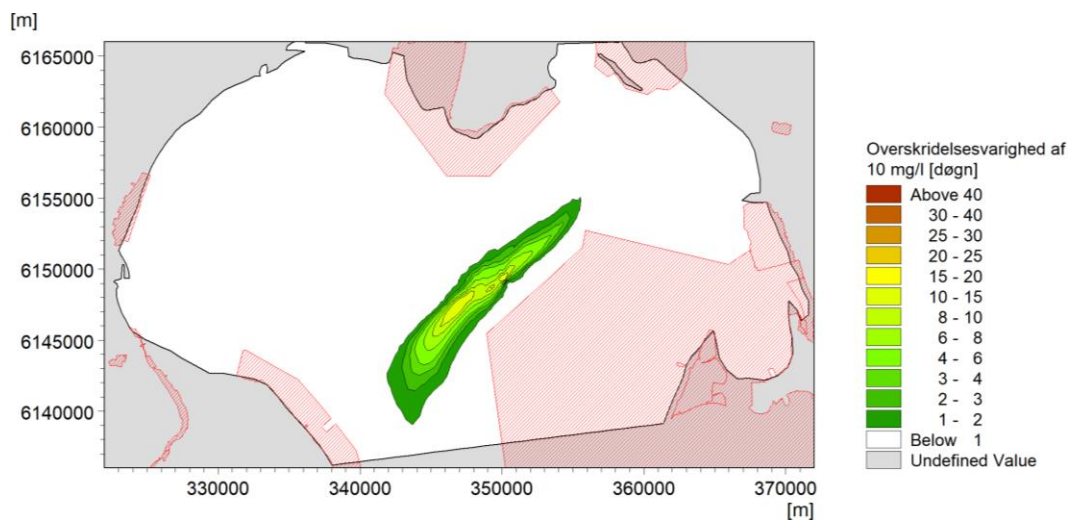
Et bedre mål til estimering af skyggevirkning fås ved at se på overskridelsesvarigheder, hvormed en given dybdemidlet sedimentkoncentration er overskredet. I Figur 5-29 til Figur 5-32 er overskridelsesvarigheder af henholdsvis 2 mg/l, 5 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l beregnet. Koncentrationer på 2-5 mg/l er hvad man typisk betegner som en synlig sedimentfane, 10 mg/l svarer cirka til en sigtdybde på 2,5 meter og kan betegnes som kritisk for fiskemigration, mens 15 mg/l udgør mindstekravet til badevand og har betydning for fugles fourageringsevne grundet en nedsat sigtdybde, ref./3/. Af figurene ses, at der vil være en tydelig sedimentfane i området omkring klapppladsen i en samlet periode af størrelsesorden 15-30 dage. Dette skal ses i forhold til klapperperioden på cirka 180 dage. Yderligere skal man tænke på, at sedimentfanerne fra klappingerne bevæger sig som perler på en snor og ikke som en stor sammenhængende fane.



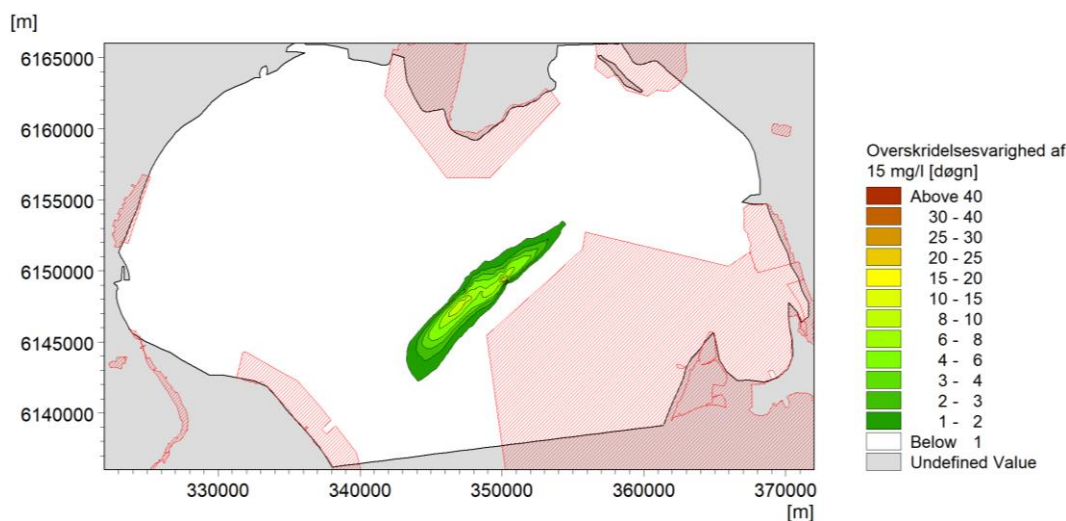
Figur 5-29 Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Ka og Kb.



Figur 5-30 Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Ka og Kb.



Figur 5-31 Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Ka og Kb.



Figur 5-32 Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i vinterhalvåret (oktober-marts) med klapping på Ka og Kb.

I Tabel 5-5 er der angivet en oversigt visende hvor store arealer der er påvirket med en given varighed og overskridelseskoncentration.

Tabel 5-5 Påvirkede arealer for givne overskridelsesvarigheder og koncentrationer.

Overskridelsesvarighed [døgn]	Påvirket areal [ha]						
	> 1	> 2	> 5	> 10	> 15	> 20	> 30
2 mg/l	23.167	18.446	11.513	6.605	2.513	912	21
5 mg/l	13.499	9.952	4.058	1.353	393	29	0
10 mg/l	5.220	3.328	1.407	236	1	0	0
15 mg/l	3.080	1.888	645	4	0	0	0

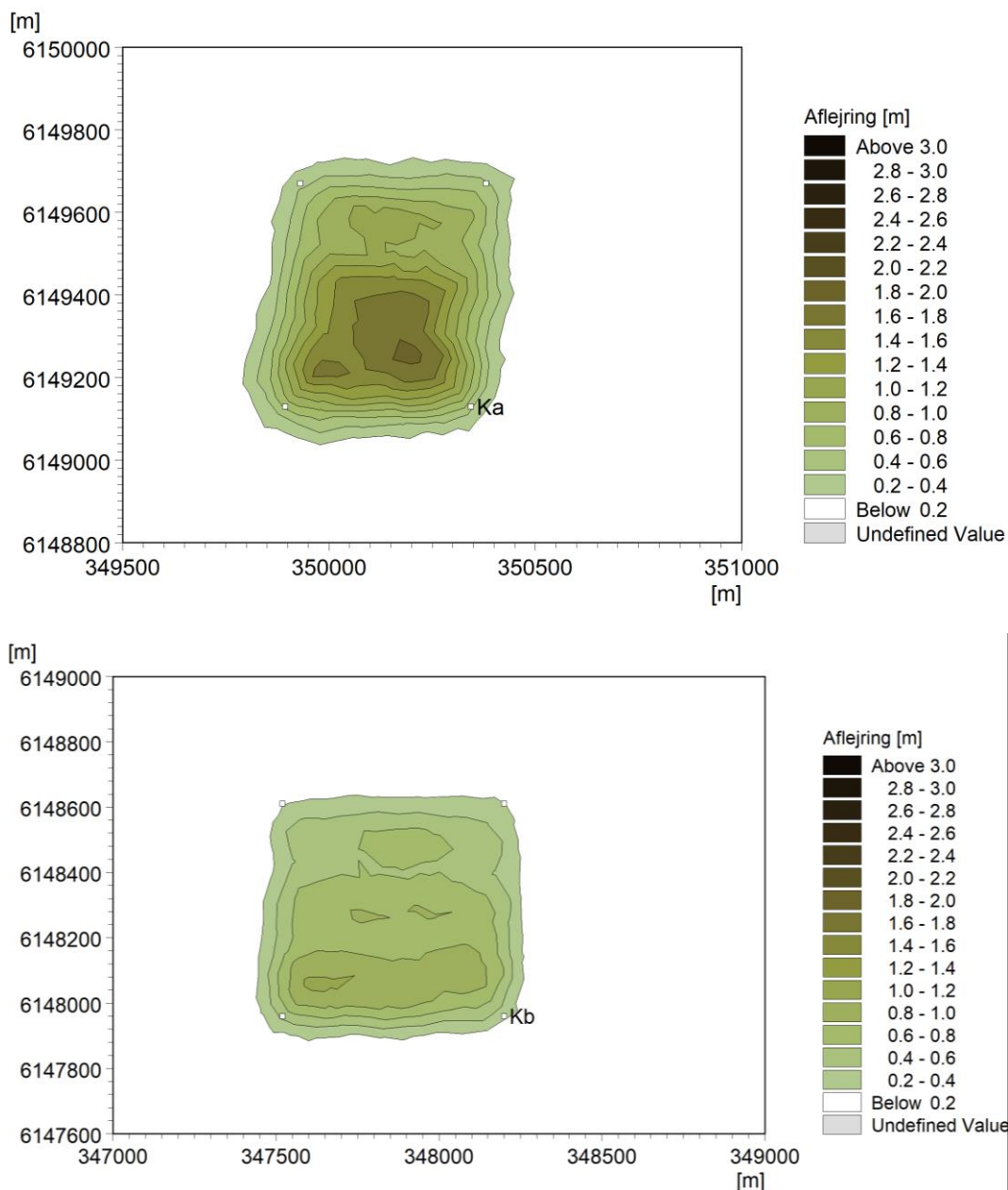
Som minimum vil der være 2 timer eller mere mellem hver enkelt klapping på pågældende klappads, idet der klappes skiftevis på de to klappads. Sedimentspredningen er derfor sammensat af en række tilnærmelsesvis uafhængige sedimentfaner. Perioder med skyggevirksomhed i Natura 2000 områderne er derfor sammensat af en række relativt kortvarige sporadiske hændelser. Bundfaunaen oplever også skyggevirksomhed om natten og da dagens længde er kortere i vinterhalvåret, vil over halvdelen af de sporadiske hændelser optræde på tidspunkter, hvor der alligevel ikke er lystilførsel.

I Figur 5-33 er aflejringstykkelserne på klappads Ka og klappads Kb vist efter klappingerne i perioden oktober 2021 – marts 2022. De densitetsdrevne effekter får materialet til at samle sig i områderne med størst initialdybde. Samme effekter får en del af klappadmaterialet til at løbe lidt udenfor selve klappadsområdet, som er markeret med de fire små hvide firkanter. Største lagtykkelser efter klapping forekommer på klappads Ka, idet denne har det mindste areal. Efter endt klapping udgør den deponerede del indenfor klappadsene 41 % af den samlede klappadmængde, som følge af den høje vandprocent og relativt lave tørdensitet. Ydermere er klappingscyklus defineret med start i den sydvestlige del af klappadsen, hvor klappadmaterialet har størst tendens til at forlade klappadsområdet. Hvis der er klumper i klappadmaterialet, vil de gå direkte til bunden og sedimentere på stedet og mængden af tilbageholdt materiale på klappadsen vil dermed vokse. I de udførte beregninger er det



antaget, at der ikke er klumper i klapp materialet. De 41% som der er estimeret som klapppladsen tilbageholdelsesprocent, kan derfor i praksis vise sig at blive noget højere.

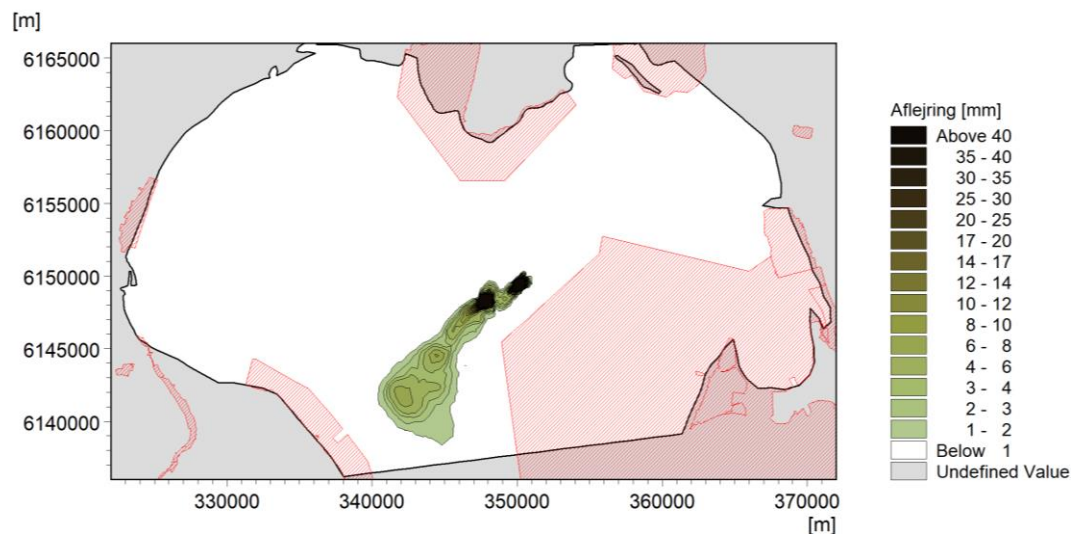
Det er kun en mindre del af klapp materialet, som aflejres direkte på bunden i forbindelse med en klapping. Størstedelen af materialet vil hænge som en sedimentsky over bunden, som langsomt falder ud i takt med sedimentets faldhastighed. Da sedimentskyen flyttes med strømmen, vil store dele af materialet føres væk fra klapppladsen og aflejres andet sted, særligt de mest finkornede dele, som har en meget lav faldhastighed. Det er derfor, at man finder et længere aflejningsbånd i området sydvest for klapppladserne.



Figur 5-33 Aflejringstykkelse på klappplads Ka og Kb efter klapping i perioden oktober 2021 – marts 2022.

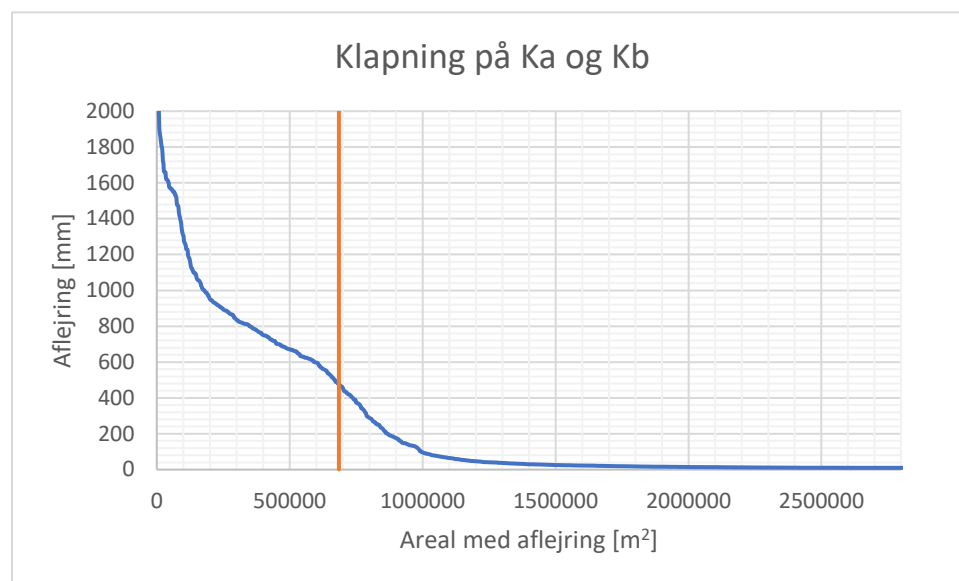
Figur 5-34 viser aflejringsskorte dækkende hele det sydlige Øresund. Det ses, at der ikke aflejres materiale i noget betydeligt omfang (< 1 mm) i de med rød skravering angivne Natura 2000 områder. Aflejring finder primært sted sydvest for klappområdet, hvor

vanddybderne er størst. En aflejringstykkelse på 1 mm, kan opfattes som sedimentaflejring af 6 kg/m<sup>2</sup>.

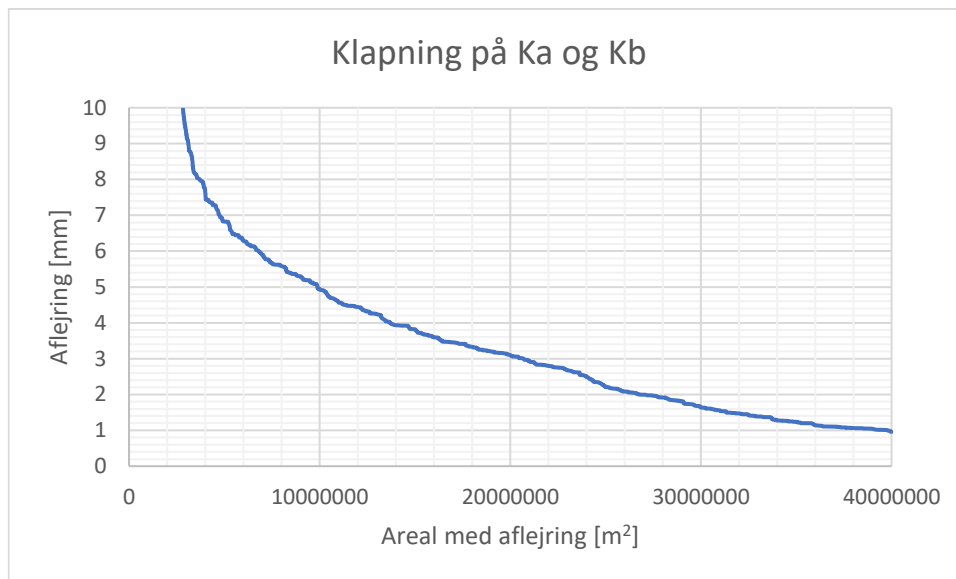


Figur 5-34 Aflejringstykkelser efter klapping på Ka og Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022.

Cirka halvdelen af det klappede materiale forbliver på de to klappadsområder og der er en spredning og aflejring til det omkringliggende område. Klappadsområdernes areal udgør cirka 24 + 44 ha = 68 ha. I Figur 5-35 er der angivet en sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelse for klappadsområdernes nærområde. Den orangebrune vertikale linje angiver de to klappadsområdernes samlede areal. Et tilsvarende diagram er vist i Figur 5-36 for påvirkningen udenfor klappadsområdernes nærområde. Klappadsområdets udstrækning angiver zonen, hvor indenfor en splitram må frigive sin last. I sit møde med bunden spredes klapmaterialet radiært væk fra centeret, men primært i de retninger, hvor bundhældningen virker forstærkende på udbredelsen. Det faktiske aflejningsområde er derfor større end selve klappadsområdet.



Figur 5-35 Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser i klappadsområdets nærområde.



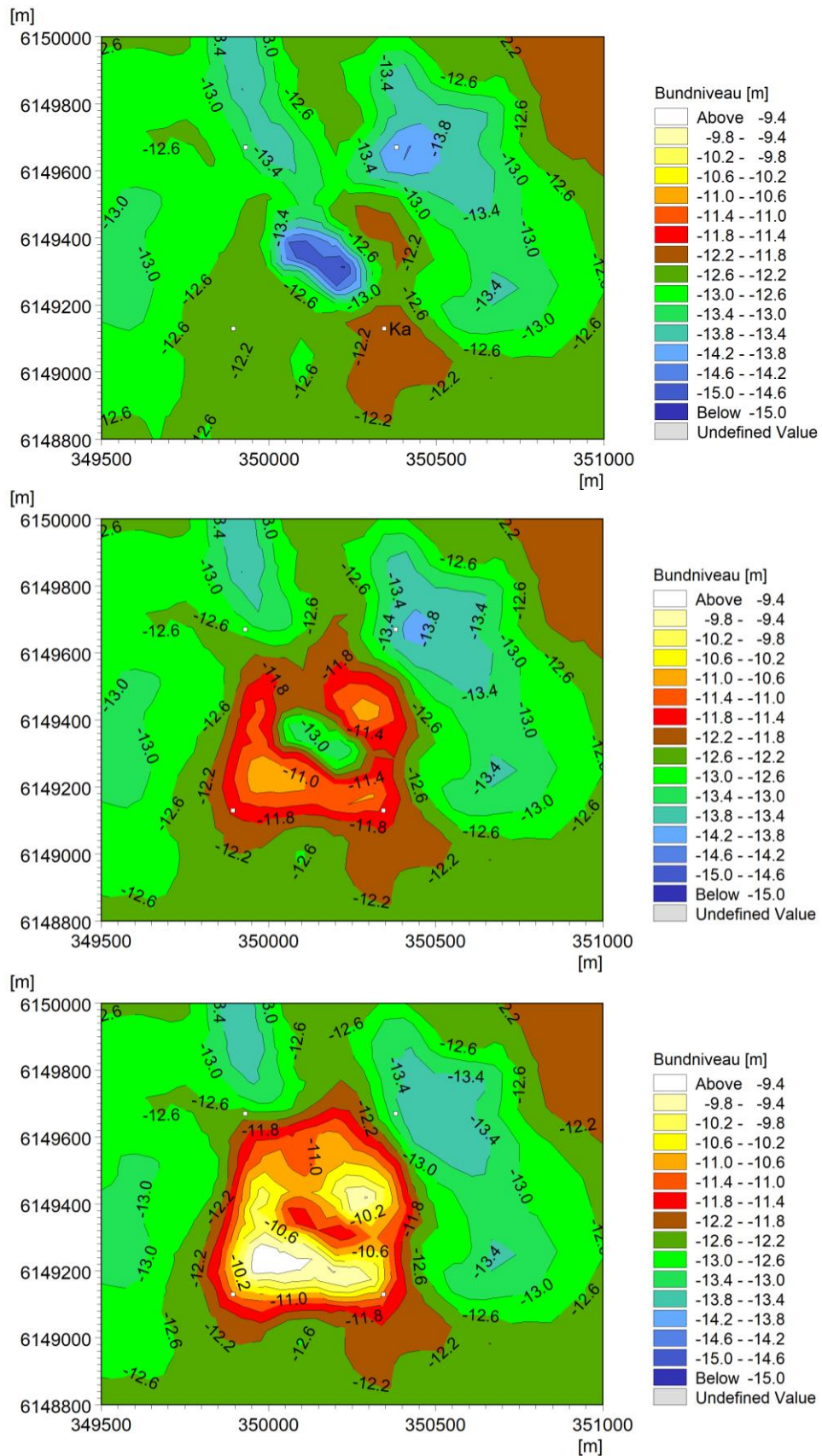
Figur 5-36 Sammenhæng mellem areal med aflejring og aflejringstykkelser udenfor klappladsens nærrområde.

I Tabel 5-6 er det påvirkede areal angivet for en række minimumaflejringstykkelser. Arealerne er her omregnet til hektar.

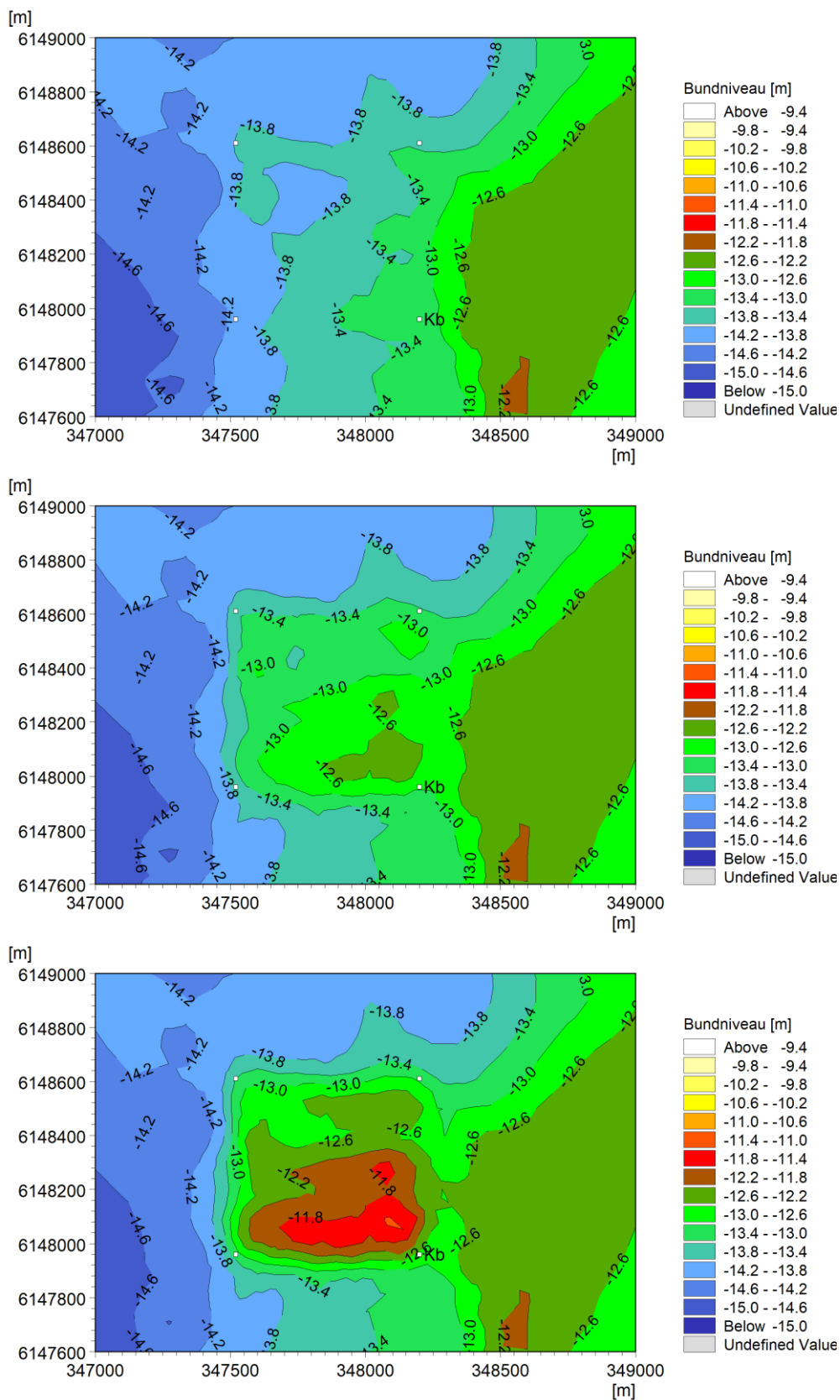
Tabel 5-6 Påvirket areal med aflejring efter klapning på Ka og Kb i perioden oktober 2021 – marts 2022.

Klapplads	Aflejringstykkelse [mm]							
	> 1	> 2	> 5	> 10	> 20	> 50	> 100	> 300
Ka								
[ha]	3.971	2.676	987	283	171	118	99	79

I Figur 5-37 og Figur 5-38 er klappladsernes bundtopografi vist før klapningernes påbegyndelse i oktober måned 2021 og efter klapning i april 2022 og igen i april 2023. I modelberegningen er det antaget at der gennem perioden klappes jævnt hen over hele klappladsområdet. I praksis vil man kun klappe i de områder, hvor dybdeforholdene tillader det. Efter klapning kræves der en minimumsdybde på 10 meter. Dette er opfyldt uden problemer efter først år, men i andet år er der ifølge simuleringen problemer på klapplads Ka. Dette vil dog kunne sikres ved at flytte nogle af klapningerne til den centrale del og den nordligste del af området. På klapplads Kb er der ingen problemer med kapaciteten og opfyldelse af dybdekrav.



Figur 5-37 Bundtopografi på klappads Ka før (øverst), efter første års klappning (midt) og efter andet års klappning (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klappinger hen over området.



Figur 5-38 Bundtopografi på klappblads Kb før (øverst), efter første års klappning (midt) og efter andet års klappning (nederst) ved anvendelse af en ligelig fordeling af klappninger hen over området.

## 6 Spredning af forurenede stoffer

For at kunne beregne en spredning af forurenede stoffer er det nødvendigt at kende stofkoncentrationerne i klapmaterialet. Sedimentet som vil blive klappet, har et indhold af forureninger under klapvejledningens øvre aktionsniveau. Når der blot ses på gennemsnitlige værdier for stofferne angivet i Tabel 6-1 er disse også under nedre aktionsniveau. De i tabellen angivne koncentrationer er baseret på resultater fra 29 boringer i området, hvor der skal afgraves. På baggrund af borekernerne, er der udført analyser på op til 5 delprøver over dybdeintervallet 0-2,2 meter. Der er i alt udført 66 analyser. Heraf kan 34 kategoriseres som klasse B, mens de resterende 32 er kategoriseret som klasse A. Tabel 6-1 angiver repræsentative stofkoncentrationer af en række miljøgifte indeholdt i klapmaterialet. Disse stofkoncentrationer bruges til at vurdere den af klappning afledte spredning.

Tabel 6-1 Koncentrationer i sedimentet som repræsenterer lag og områder som skal klappes, ref. /4/ og /5/.

Stof	Enhed	Antal prøver	Gennemsnit <sup>1</sup>	Detektionsgrænse	Aktionsniveau nedre-øvre
<b>Kobber</b>	mg/kg TS	66	16,3	0,02	20-90
<b>Kviksølv</b>	mg/kg TS	66	0,097 <sup>2</sup>	0,01	0,25-1
<b>Zink</b>	mg/kg TS	66	56	1	130-500
<b>Cadmium</b>	mg/kg TS	66	0,45	0,02	0,4-2,5
<b>Bly</b>	mg/kg TS	66	15 <sup>2</sup>	1	40-200
<b>TBT</b>	µg/kg TS	66	4,7 <sup>2</sup>	1	7-200
<b>Sum PAH<sub>9</sub><sup>3</sup></b>	mg/kg TS	66	1,21 <sup>2</sup>	0,09	3-30

1: I beregning af gennemsnittet er værdier under detektionsgrænsen medregnet som 100% af detektionsgrænsen.  
 2: Gennemsnitsværdien for disse parametre er noget højere end medianværdien pga. enkelte høje værdier i datasættet.  
 3: Sum af PAH'er inkluderer: Phenanthren, Anthracen, Flouranthen, Pyren, Benz(a)anthracene, Chrysen, Benz(a)pyren, Indeno(1,2,3-cd)pyren og Benz(ghi)perylene.

Opfatter man de enkelte sedimentpartikler som runde kugler, gælder det, at de fine partikler har et relativt større overfladeareal, set i forhold til rumfang, ved sammenligning med de grovere partikler. Det relativt større overfladeareal indebærer, at de finkornede fraktioner har større mulighed for at adsorbere mere stof per vægtenhed. De i Tabel 6-1 angivne stofkoncentrationer vil derfor være ulige fordelt i de fire kornfraktioner, som der er anvendt til klappningsberegningerne. Forholdet mellem overfladeareal og kornvolumen er omvendt proportionalt med korndiameteren. Tillægger man hver af de fire fraktioner en karakteristisk korndiameter, kan man beregne hvor stor en del af det forurenede stof, der er bundet til fraktionen. Tabel 6-2 viser resultatet af beregningen. Det ses, at mere end halvdelen af de forurenede stoffer er tilknyttet fraktion 2, mens bidraget i de 3 øvrige fraktioner er næsten ligeligt fordelt.

Tabel 6-2 De forurenede stoffers relative fordeling i klapmaterialet.

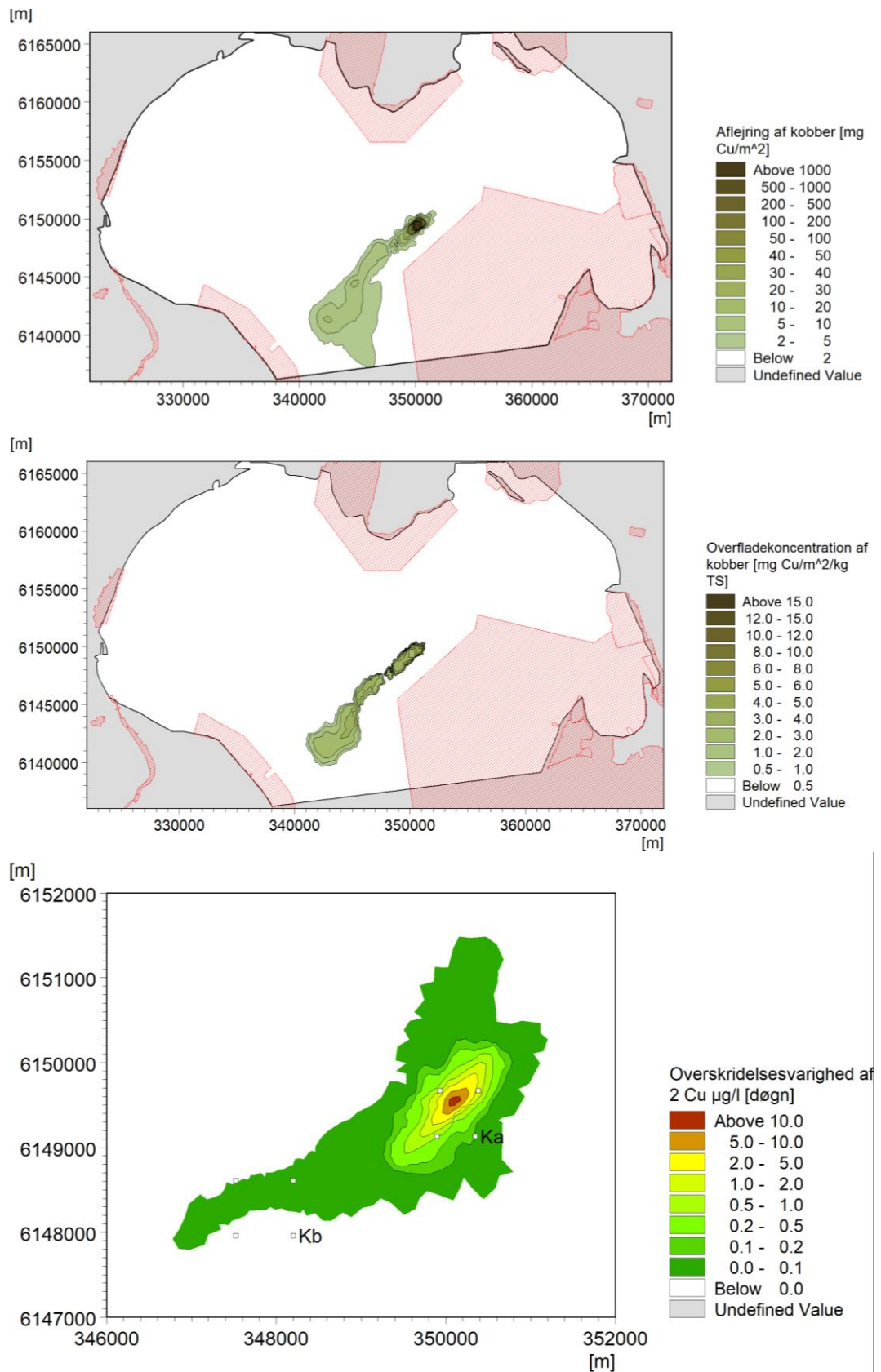
Fraktion	Repræsentativ kornstørrelse [ $\mu\text{m}$ ]	Andel [%]	O/V-forhold relativt til fraktion 1	Stofmængde bundet til fraktion [%]
1	6	3	1	14,1
2	13	25	6/13	54,1
3	30	18	0,2	16,9
4	100	53	0,06	14,9

## 6.1 Spredning af forurenede stoffer ved brug af klapplads Ka

I dette afsnit er spredningen af forurenede stoffer ved brug af klapplads Ka vurderet. Klappladsen har ikke kapacitet til at optage den samlede klapmængde og er derfor kun vurderet for halvdelen af materialet.

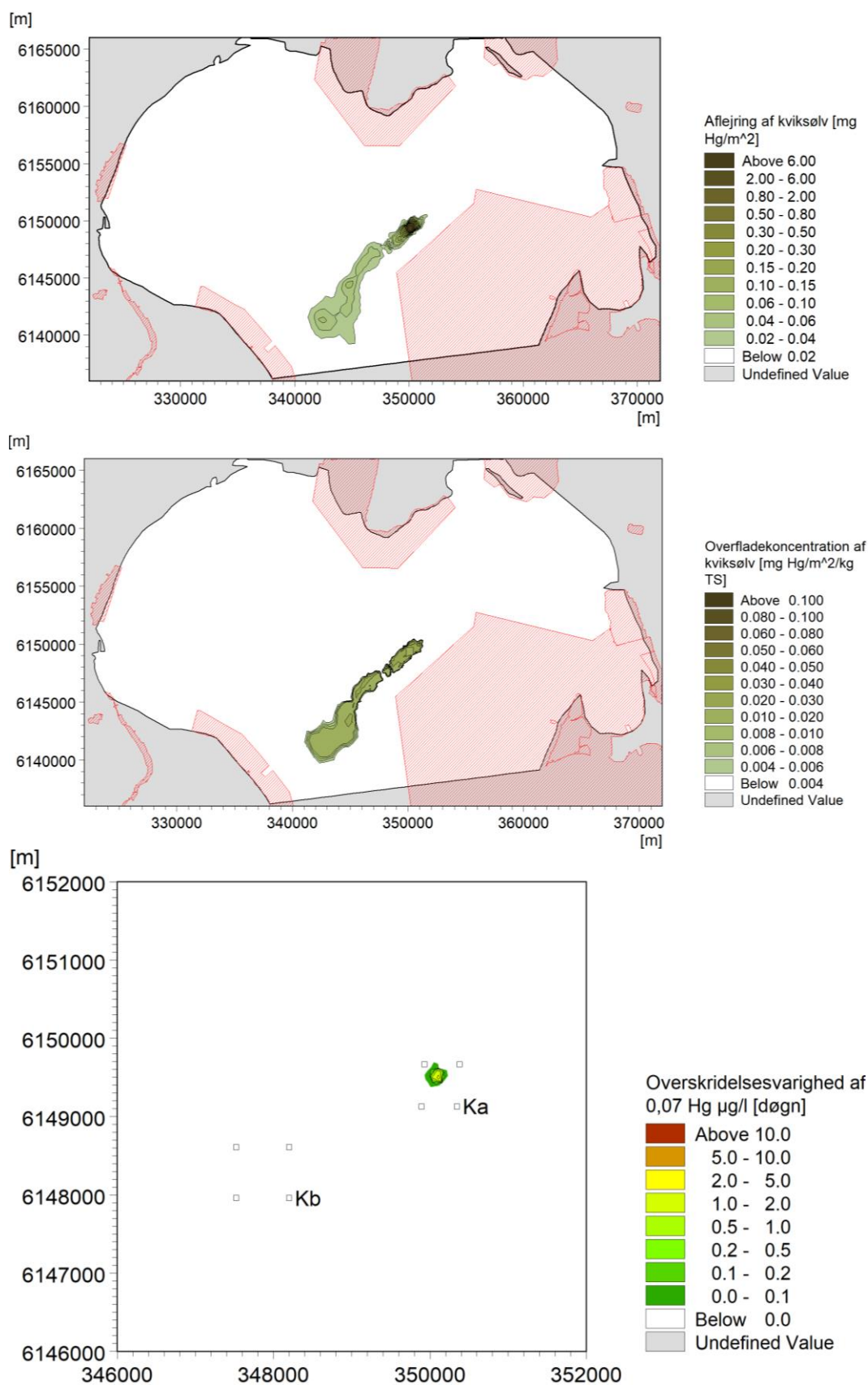
Spredningen af forurenede stoffer følger spredningen af det finkornede sediment. Hvor stor en aflejring der finder sted, er derfor udelukkende bestemt af stofkoncentrationen i klapmaterialet og sammensætningen af det aflejrede sediment. De groveste fraktioner vil spredes mindst og aflejres tættest på klappladserne, mens de fine fraktioner vil spredes over et meget stort område og aflejres i meget tynde lag langt væk fra området. Da de fine fraktioner relativt adsorberer en større del af de forurenende stoffer, vil forureningsgraden falde i de områder, hvor der aflejres sediment med målbare tykkelser. De følgende figurer viser de totale aflejringer af de forurenende stoffer: kobber, kviksølv, bly, zink, cadmium, TBT og PAH, samt en overfladekoncentration (mg stof per kvadratmeter per kg TS) i de områder, hvor der aflejres mere end 2,5 mm sediment. I områderne med mindre aflejring er der ikke vurderet på en overfladekoncentration. I beregningerne af overfladekoncentrationer er det antaget, at overfladesedimentet aflejres med en tørdensitet på 600 kg/m<sup>3</sup>. Som en konservativ antagelse er det desuden antaget, at de forurenende stoffer forbliver bundet til sedimentet. Overfladekoncentrationen er angivet som mg stof/m<sup>2</sup>/kg TS og afspejler dermed koncentrationen i de øverste 1,67 mm sediment. Det ses, at overfladekoncentrationen er mindre end koncentrationen i klapmaterialet, hvilket skyldes en kornsortering og at de mest finkornede fraktioner, som bærer en relativ større del af forureningen spredes over et meget stort område, mens de grove fraktioner (med en relativ mindre el af forureningen) aflejres mere lokalt.

For at kunne vurdere effekterne af spredningen af tungmetaller i vandfasen, er der foretaget sammenligninger med de krav, der gælder for udledning af tungmetaltholdigt spildevand i henhold til ref. /6/. I beregningerne er det antaget, at 25% af den bundne metalkoncentration frigives fra sedimentet til vandfasen under transporten fra graveområde til klapplads. Ved hver transport flyttes 815 m<sup>3</sup> klapmateriale, hvoraf 23% er tørstof og 77% er havvand. Med udgangspunkt i de i Tabel 6-1 angivne gennemsnitlige stofkoncentrationer, kan der derfor beregnes, hvor stor en mængde vand og stofkoncentration der frigives ved hver klapning. I beregningen er det antaget, at det metaltholdige vand opblandes jævnt over vandsøjlen, idet vandet trækkes ned mod bunden sammen med sedimentet. De i plottene viste overskridelsesvarigheder er for første års klapning (oktober 2021- marts 2022). For at dække hele perioden (oktober 2021 – marts 2023), skal varighederne blot skaleres med en faktor 2. Der er vist resultater for de 5 metaller: kobber (Cu), kviksølv (Hg), bly (Pb), zink (Zn) og cadmium (Cd).

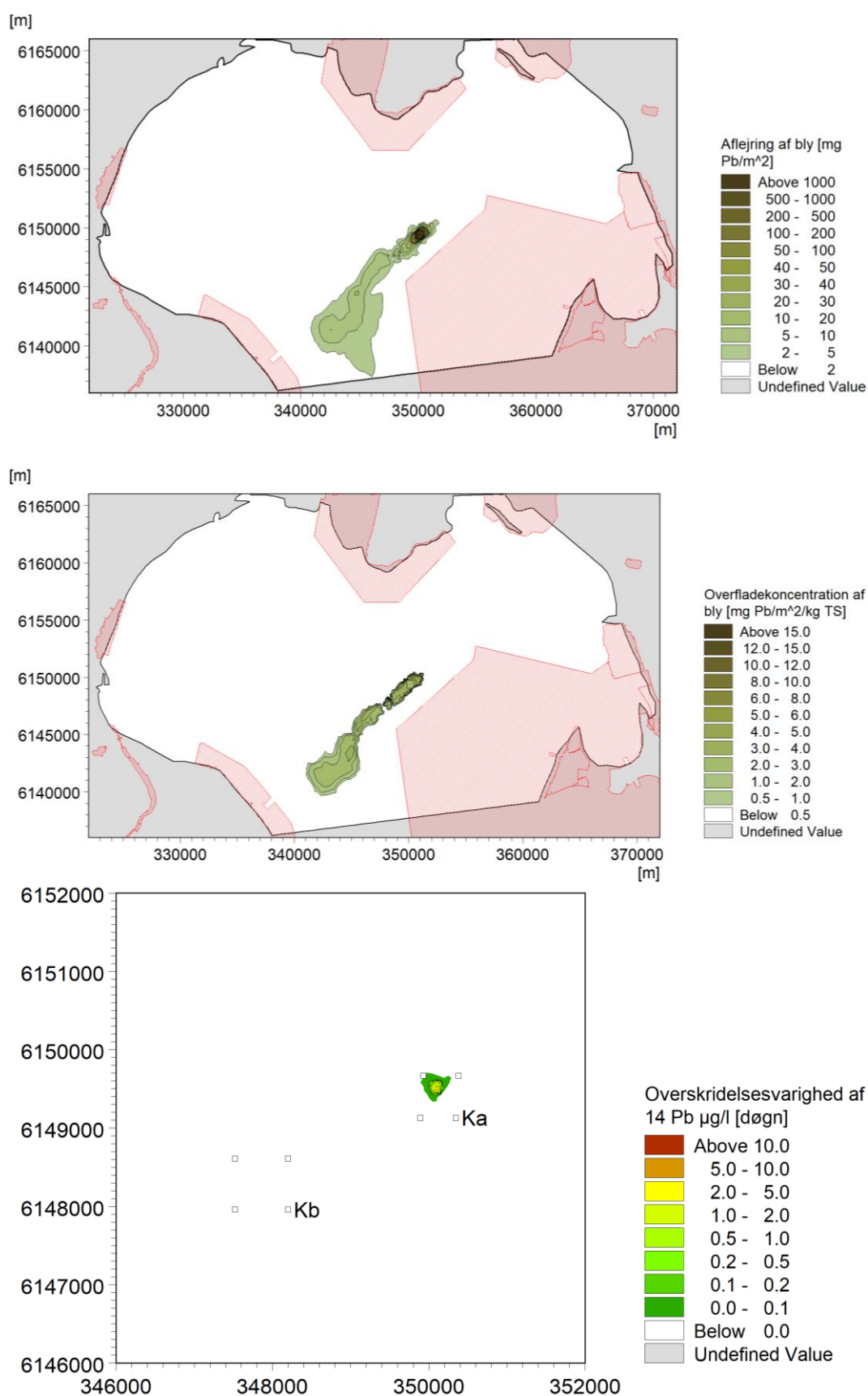


Figur 6-1 Aflejring af kobber efter første års klappning og ved brug af klappplads Ka. Øverst: total mængde aflejret kobber. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kobber.

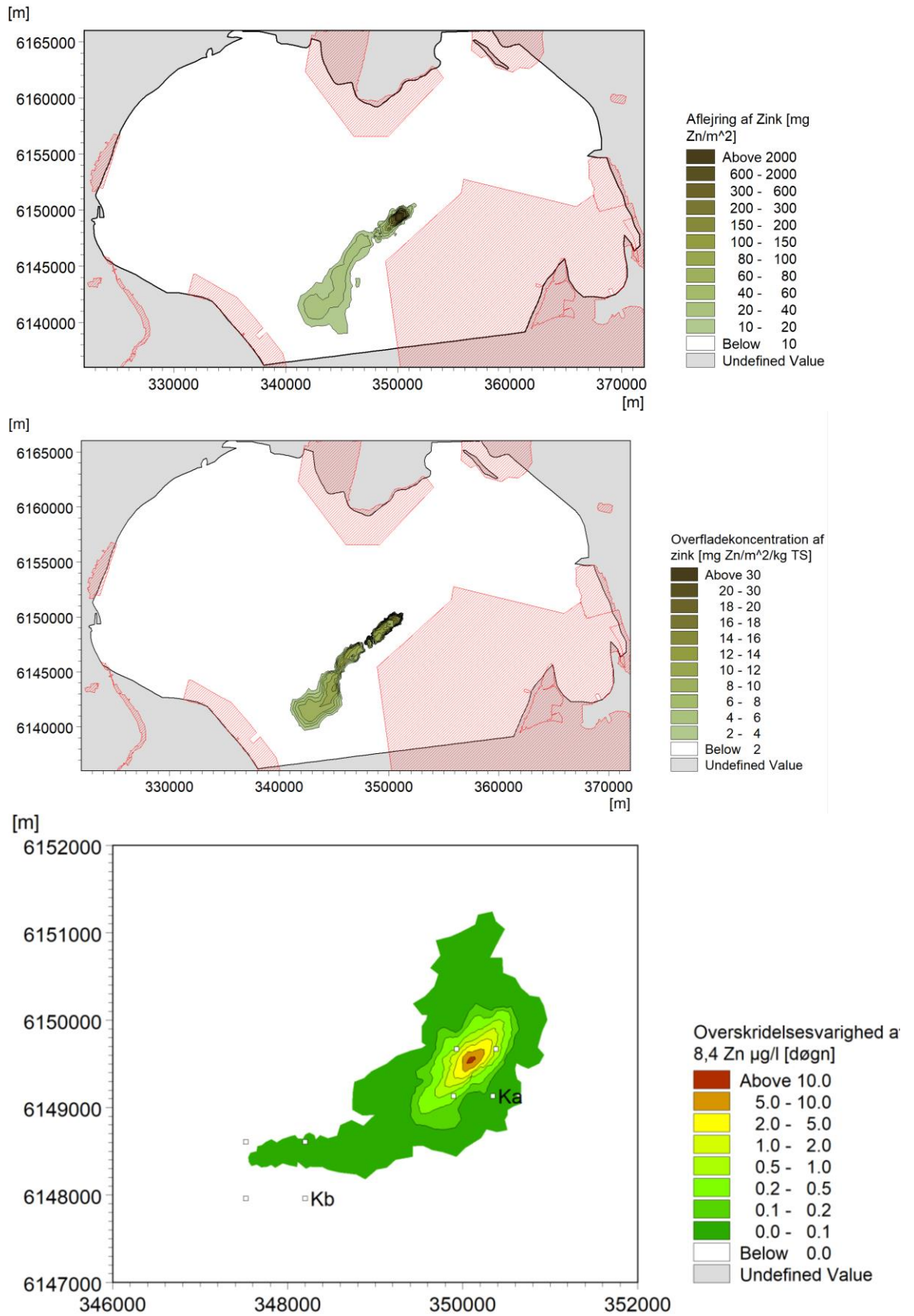




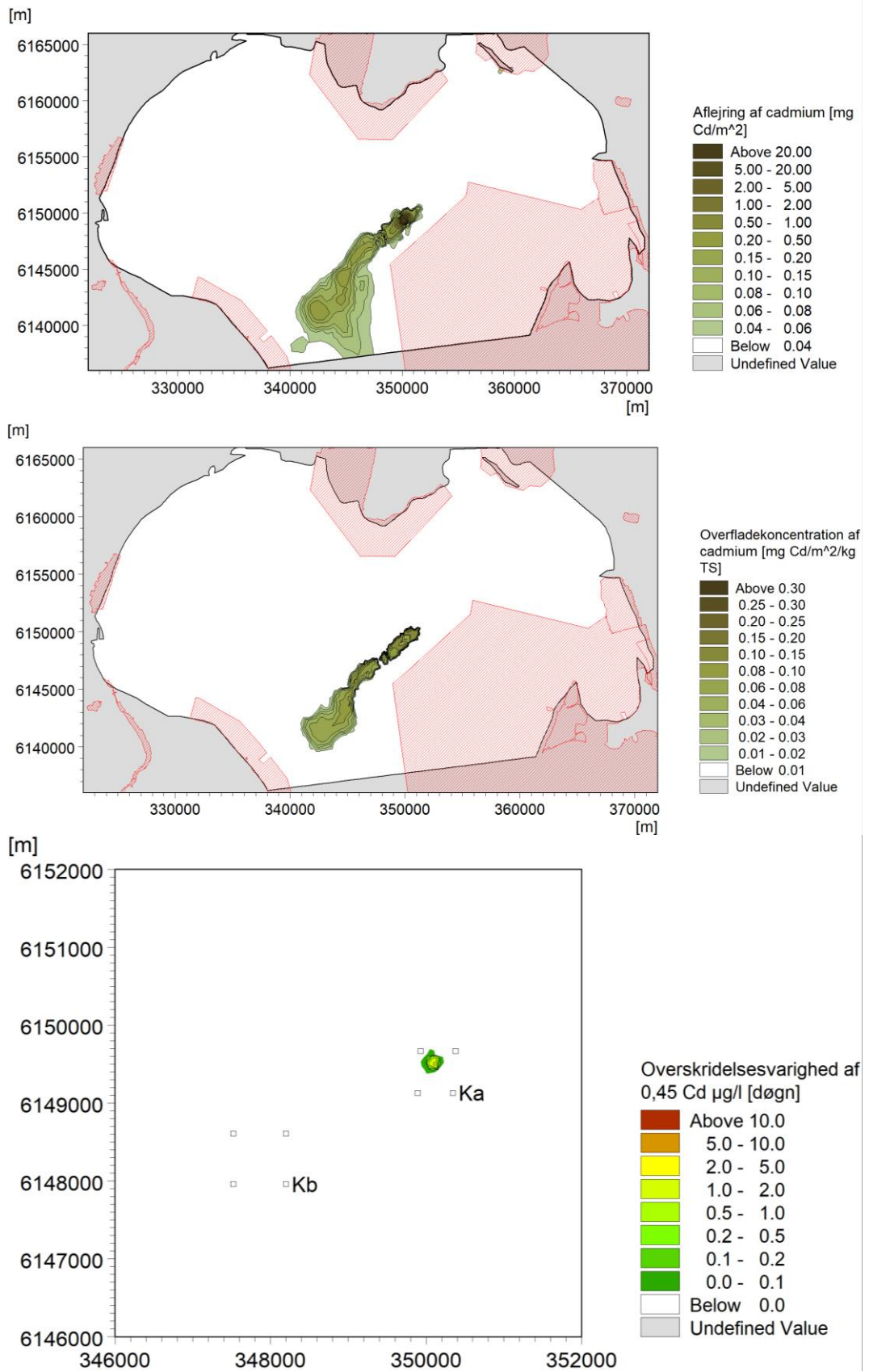
Figur 6-2 Aflejring af kviksølv efter første års klappning og ved brug af klappblads Ka. Øverst: total mængde aflejret kviksølv. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kviksølv.



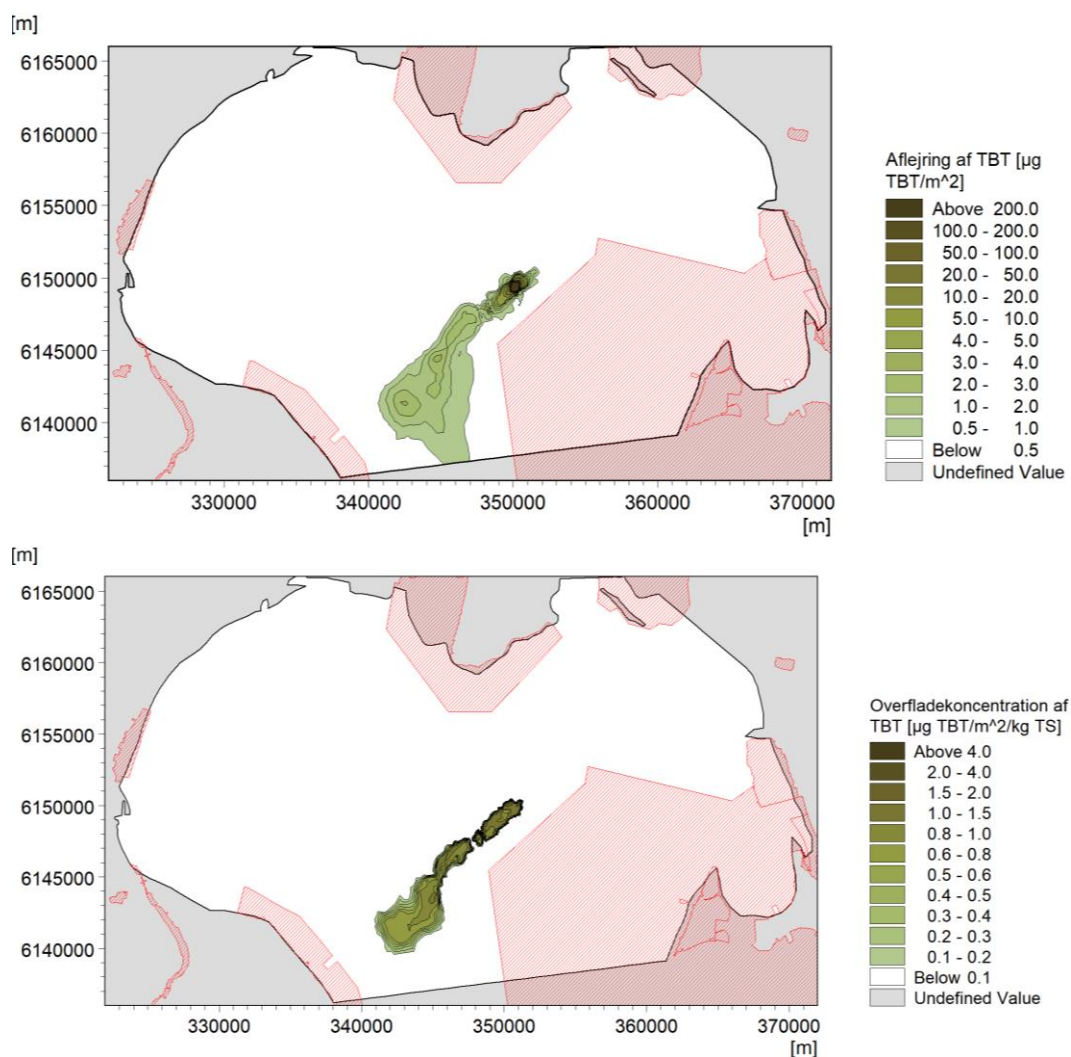
Figur 6-3 Aflejring af bly efter første års klappning og ved brug af klapplass Ka. Øverst: total mængde aflejret bly. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for bly.



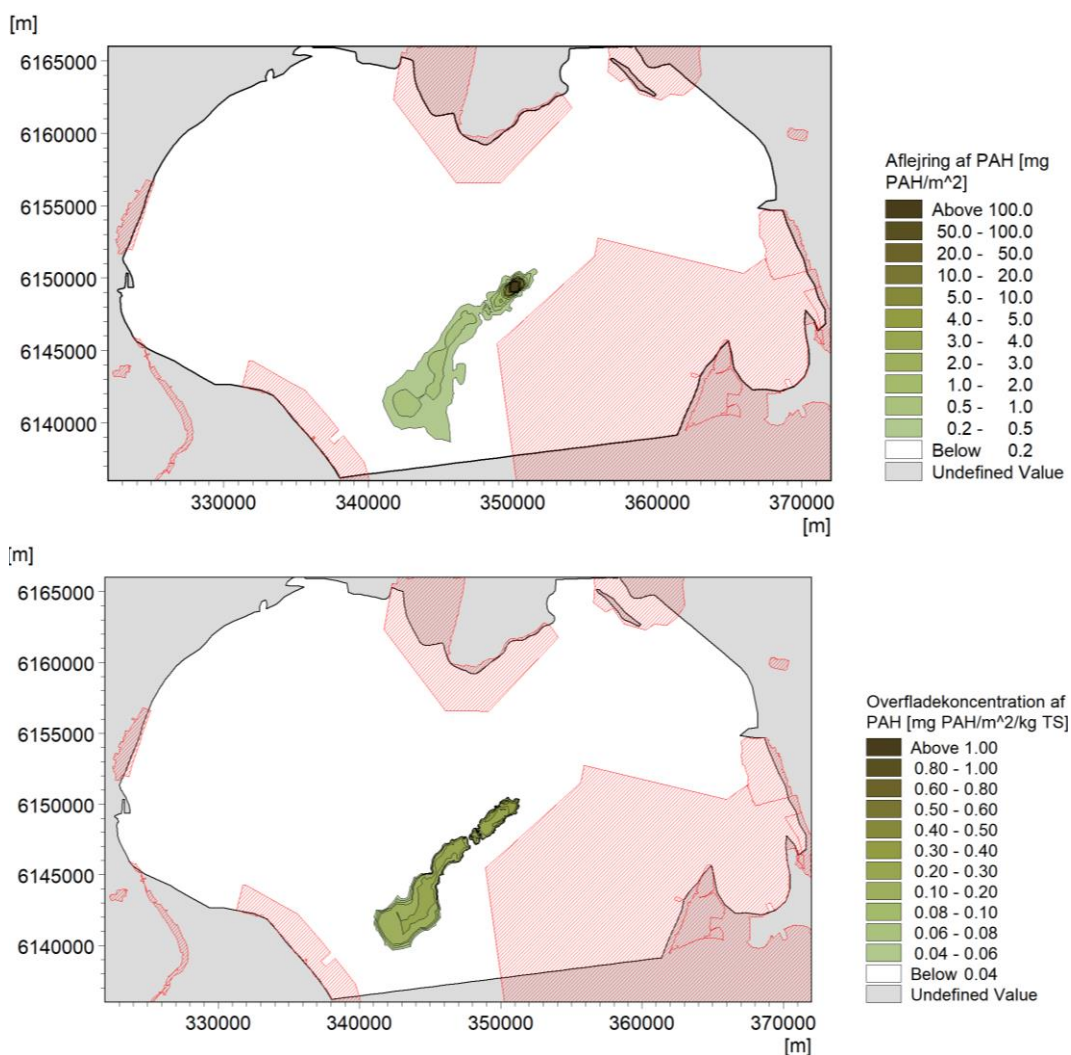
Figur 6-4 Aflejring af zink efter første års klapning og ved brug af klapplass Ka. Øverst: total mængde aflejret zink. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for zink.



Figur 6-5 Aflejring af cadmium efter første års klappning og ved brug af klappblads Ka. Øverst: total mængde aflejret cadmium. Midt: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment. Nederst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for cadmium.



Figur 6-6 Aflejring af TBT efter første års klapping og ved brug af klapplass Ka. Øverst: total mængde aflejret TBT. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment.



Figur 6-7 Aflejring af PAH efter første års klapping og ved brug af klappads Ka. Øverst: total mængde aflejret PAH. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 2,5 mm sediment.

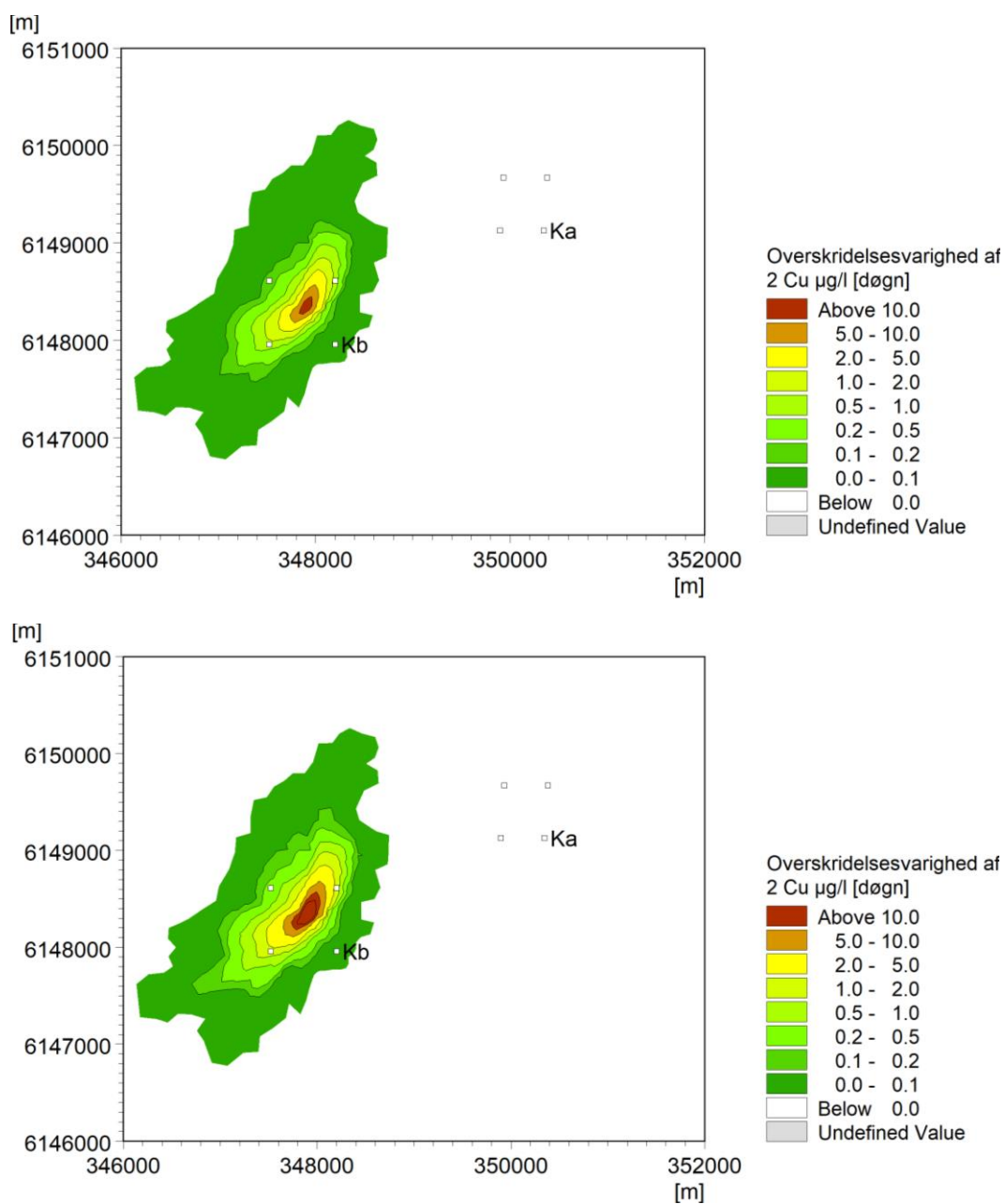
## 6.2 Spredning af forurenede stoffer ved brug af klappads Kb

I dette afsnit er spredningen af forurenede stoffer ved brug af klappads Kb vurderet. Klappadsen har kapacitet til at optage den samlede klappmængde og er derfor vurderet for halvdelen og den fulde mængde af gravematerialet.

Spredningen af forurenede stoffer følger spredningen af det finkornede sediment. Hvor stor en aflejring der finder sted, er derfor udelukkende bestemt af stofkoncentrationen i klappmaterialet og sammensætningen af det aflejrede sediment. De groveste fraktioner vil spredes mindst og aflejres tættest på klappadsene, mens de fine fraktioner vil spredes over et meget stort område og aflejres i meget tynde lag langt væk fra området. Da de fine fraktioner relativt adsorberer en større del af de forurenende stoffer, vil forureningsgraden falde i de områder hvor der aflejres sediment med målbare tykkelser. De følgende figurer viser de totale aflejringer af de forurenende stoffer: kobber, kviksølv, bly, zink, cadmium, TBT og PAH efter første og andet år med klappinger, samt en overfladekoncentration (mg stof per kvadratmeter per kg TS) i de områder, hvor der over den toårige periode aflejres mere end 5 mm sediment. I områderne med mindre aflejring er der ikke vurderet på en overfladekoncentration. I beregningerne af overfladekoncentrationer er det antaget, at overfladesedimentet aflejres med en tørdensitet på 600 kg/m<sup>3</sup>. Som en konservativ

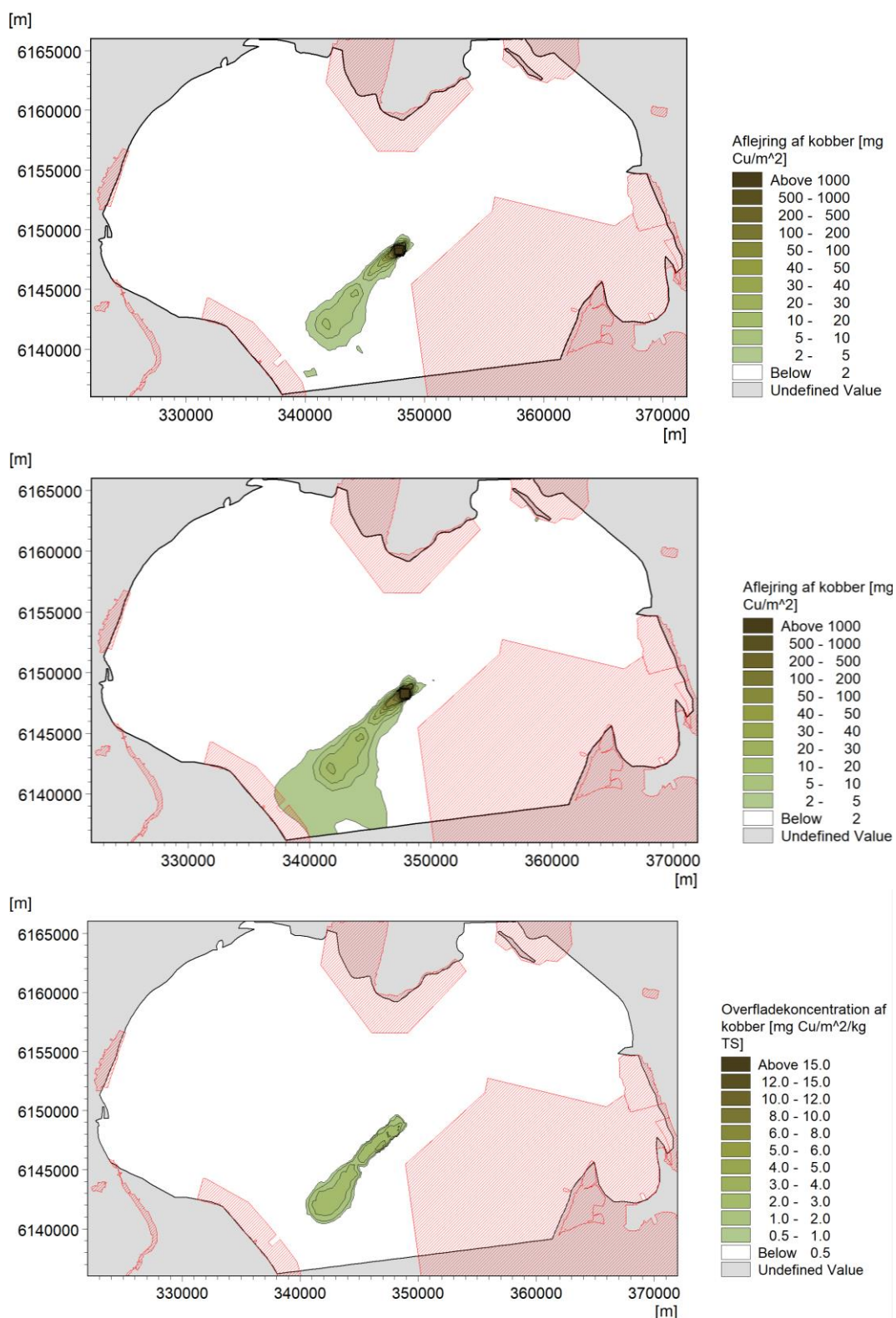
antagelse er det desuden antaget, at de forurenende stoffer forbliver bundet til sedimentet. Overfladekoncentrationen er angivet som mg stof/m<sup>2</sup>/kg TS og afspejler dermed koncentrationen i de øverste 1,67 mm sediment. Det ses, at overfladekoncentrationen er mindre end koncentrationen i klapmaterialet, hvilket skyldes en kornsortering og at de mest finkornede fraktioner, som bærer en relativ større del af forureningen spredes over et meget stort område, mens de grove fraktioner (med en relativ mindre del af forureningen) aflejres mere lokalt.

For at kunne vurdere effekterne af spredningen af tungmetaller i vandfasen, er der foretaget sammenligninger med de krav, der gælder for udledning af tungmetalholdigt spildevand i henhold til ref. /6/. I beregningerne er det antaget, at 25% af den bundne metalkoncentration frigives fra sedimentet til vandfasen under transporten fra graveområde til klapplads. Ved hver transport flyttes 815 m<sup>3</sup> klapmateriale, hvoraf 23% er tørstof og 77% er havvand. Med udgangspunkt i de i Tabel 6-1 angivne gennemsnitlige stofkoncentrationer, kan der derfor beregnes, hvor stor en mængde vand og stofkoncentration der frigives med hver klapping. I beregningen er det antaget, at det metalholdige vand opblandes jævnt over vandsøjlen, idet vandet trækkes ned mod bunden sammen med sedimentet. De i plottene viste overskridelsesvarigheder er for første års klapping (oktober 2021- marts 2022 og hele perioden (oktober 2021 – marts 2023).

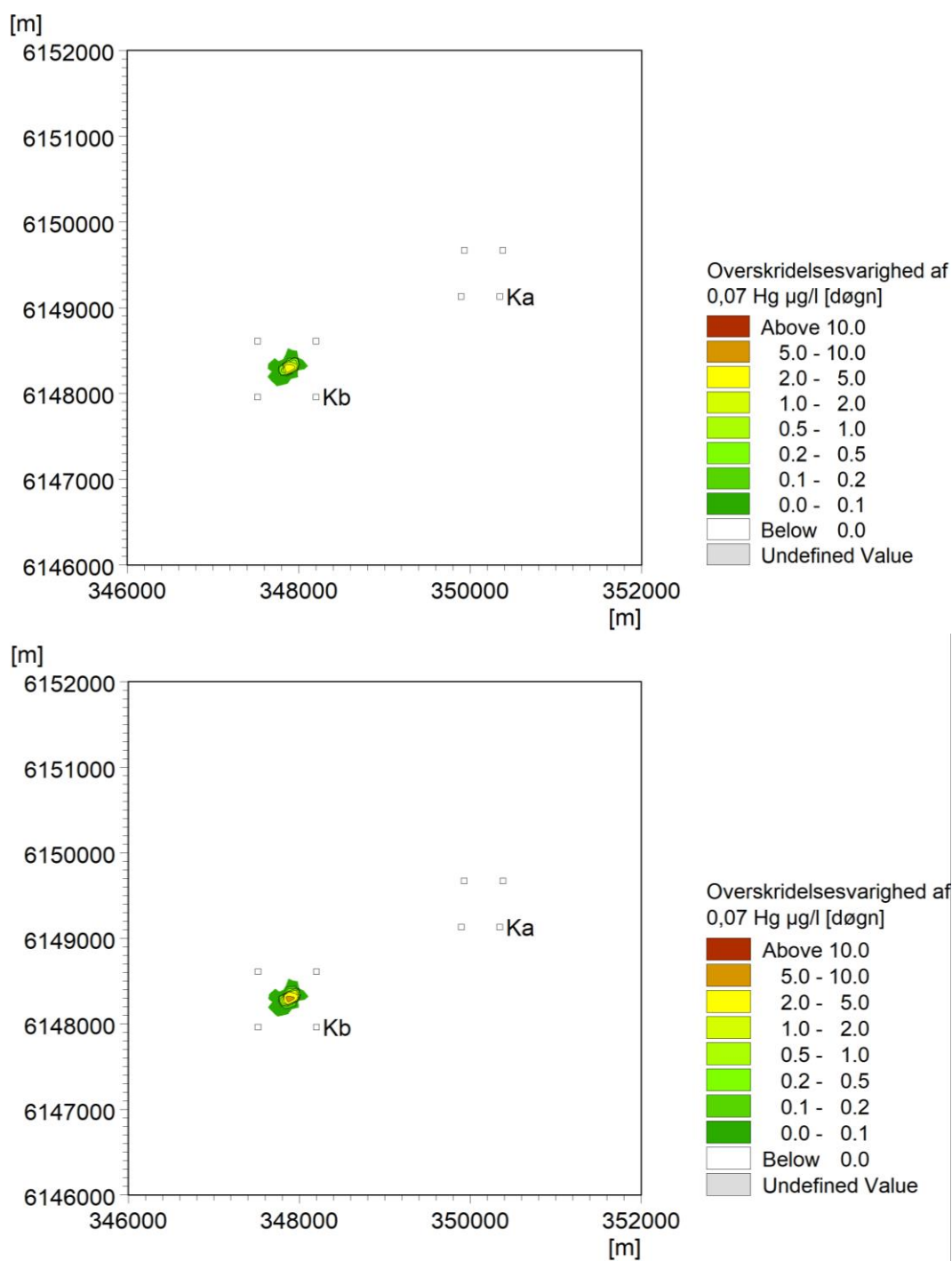


Figur 6-8 Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kobber efter klåpninger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023.

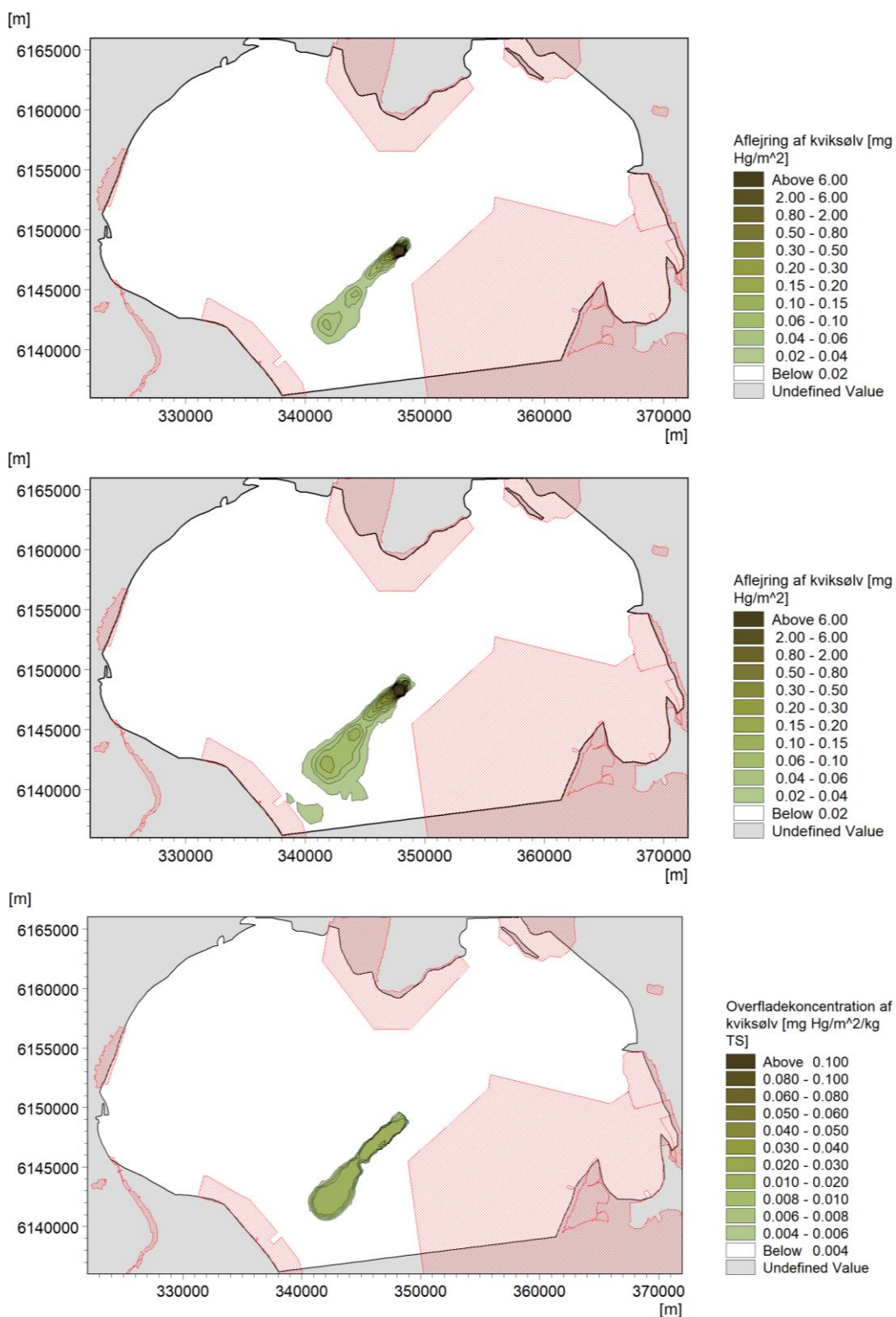




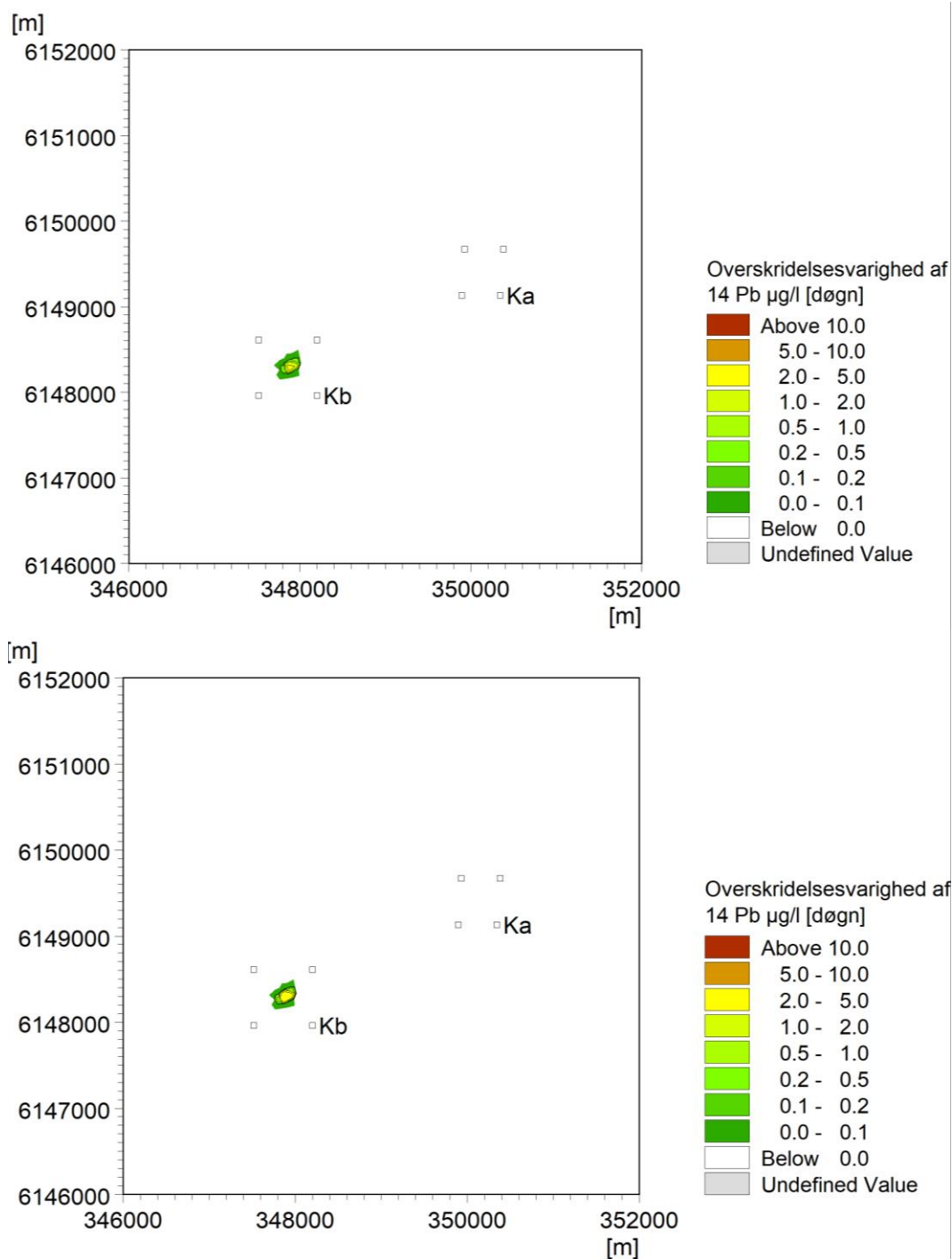
Figur 6-9 Aflejring af kobber efter første års klappning og ved brug af klappads Ka. Øverst: total mængde aflejret kobber efter år 1. Midt: total mængde aflejret kobber efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



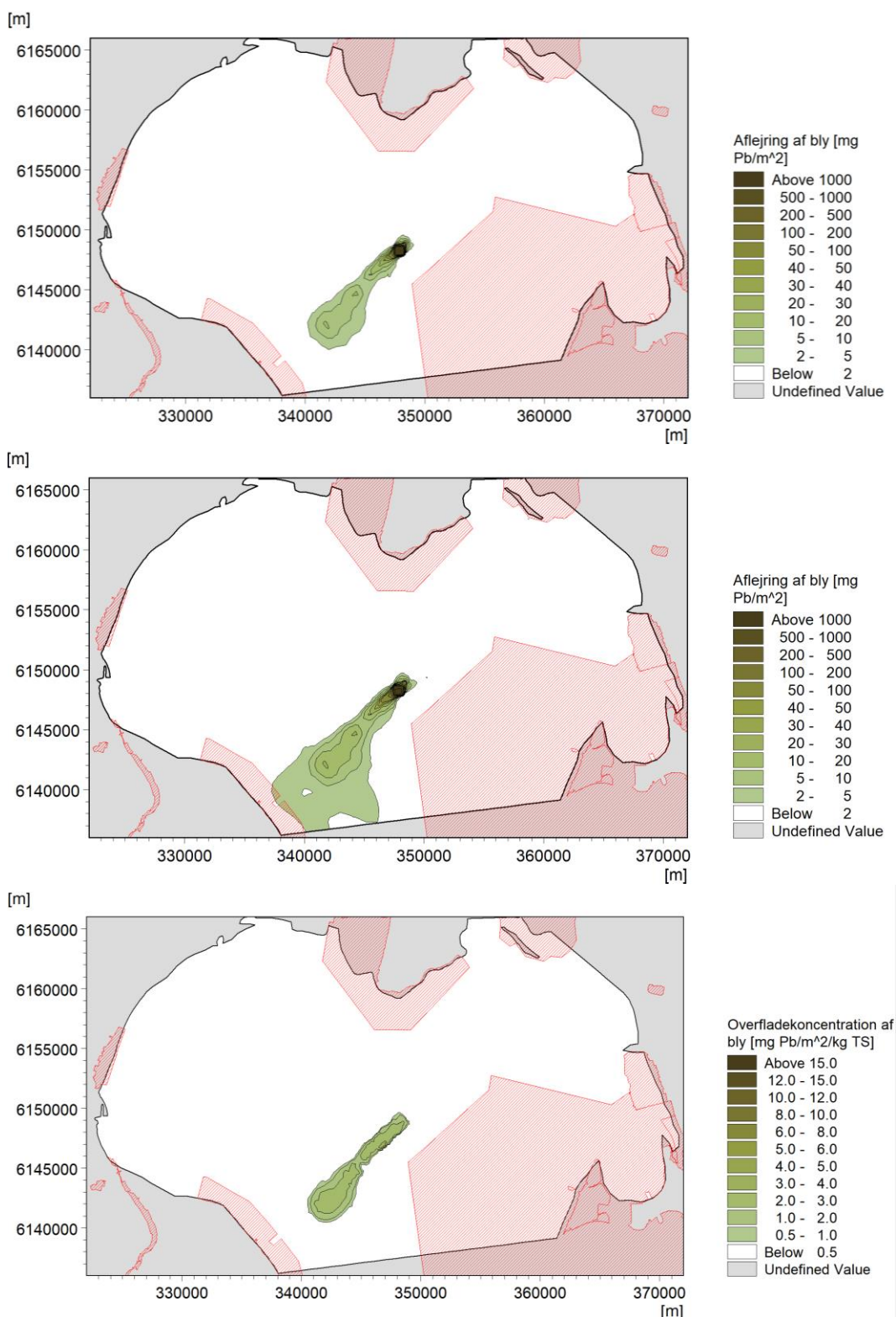
Figur 6-10 Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for kviksølv efter klappinger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023.



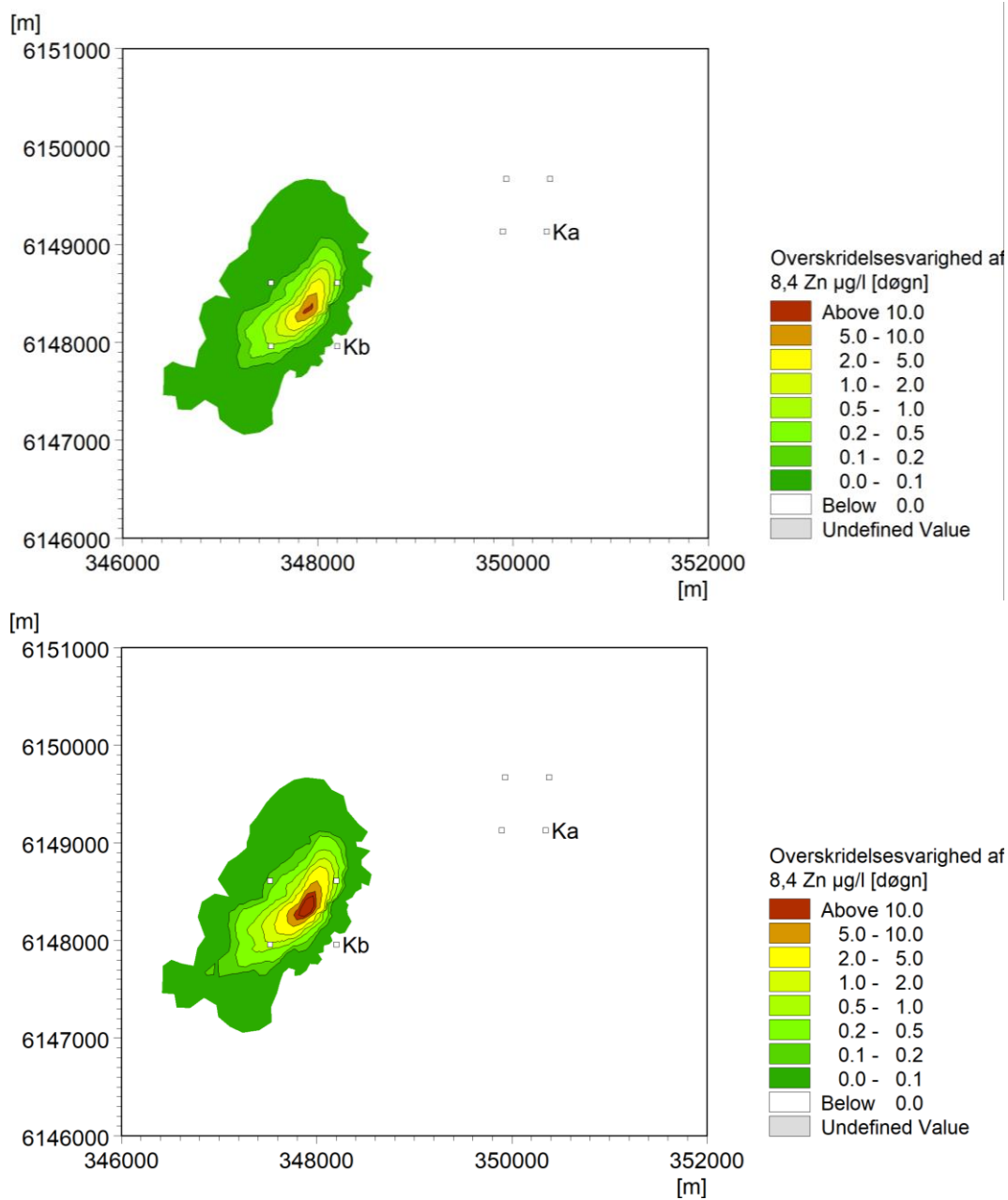
Figur 6-11 Aflejrning af kviksølv efter første års klappning og ved brug af klappblads Ka. Øverst: total mængde aflejet kviksølv. Midt: total mængde aflejet kviksølv efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



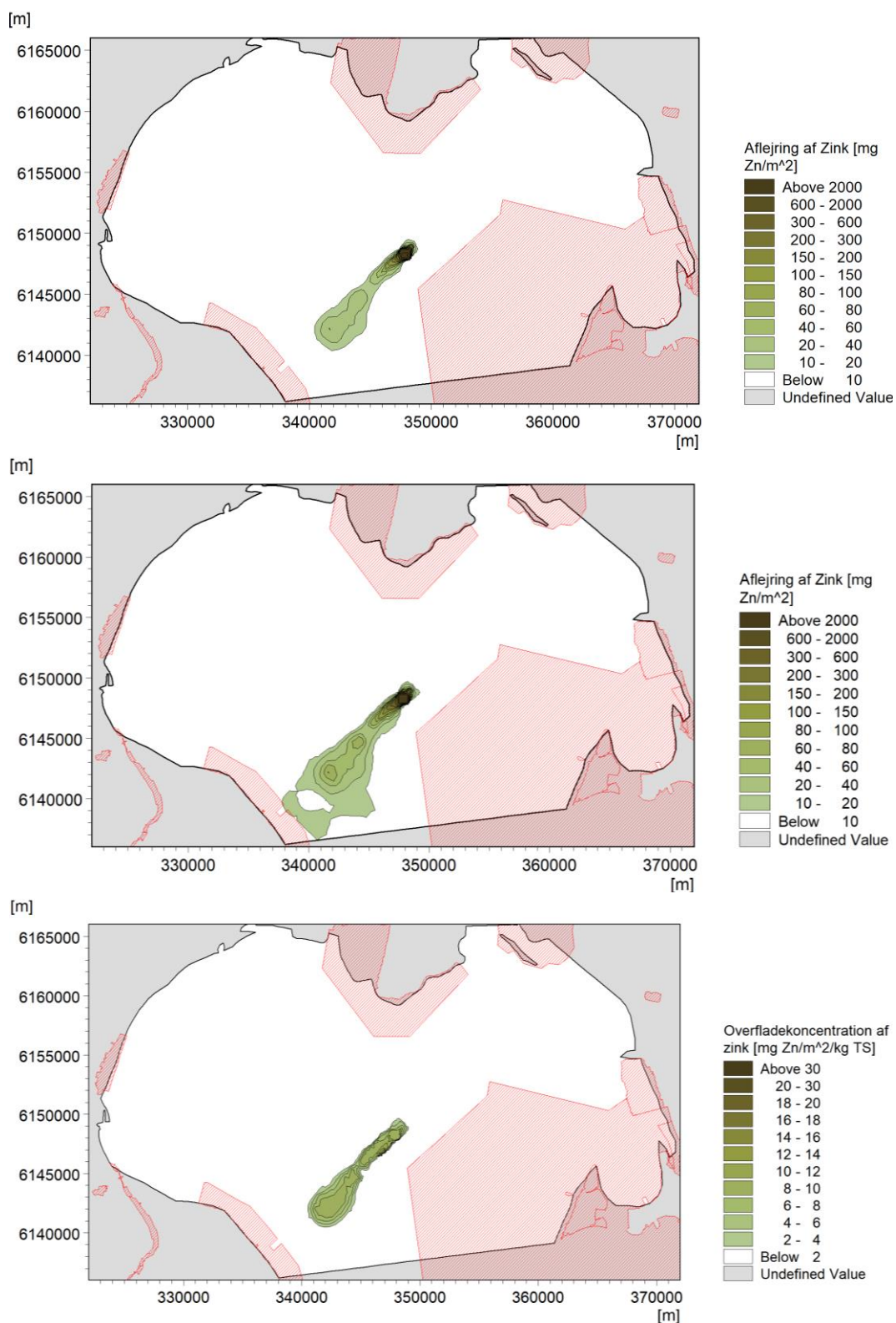
Figur 6-12 Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for bly efter klapninger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023.



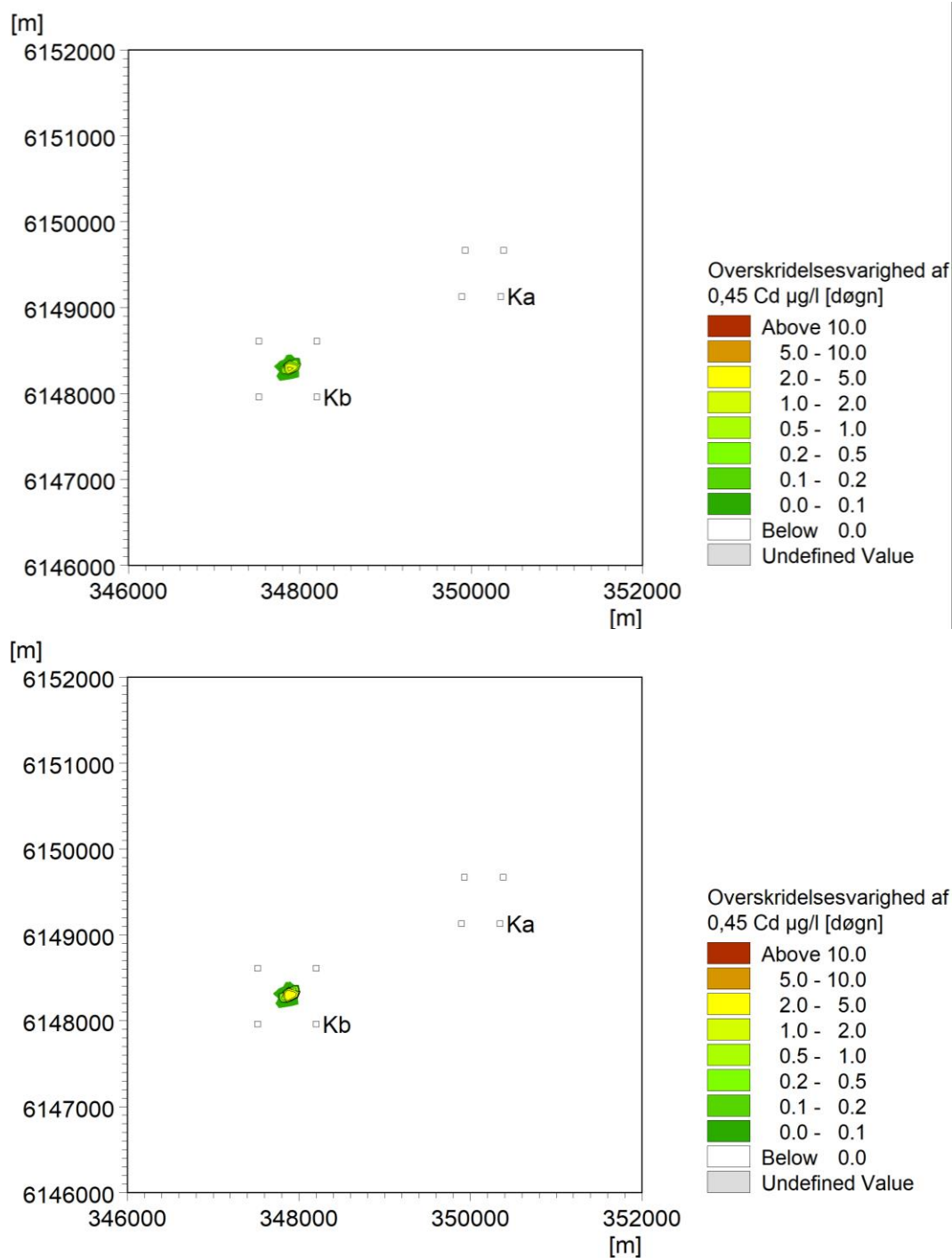
Figur 6-13 Aflejring af bly efter første års klappning og ved brug af klappblads Ka. Øverst: total mængde aflejret bly. Midt: total mængde aflejret bly efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



Figur 6-14 Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for zink efter klåpninger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023.

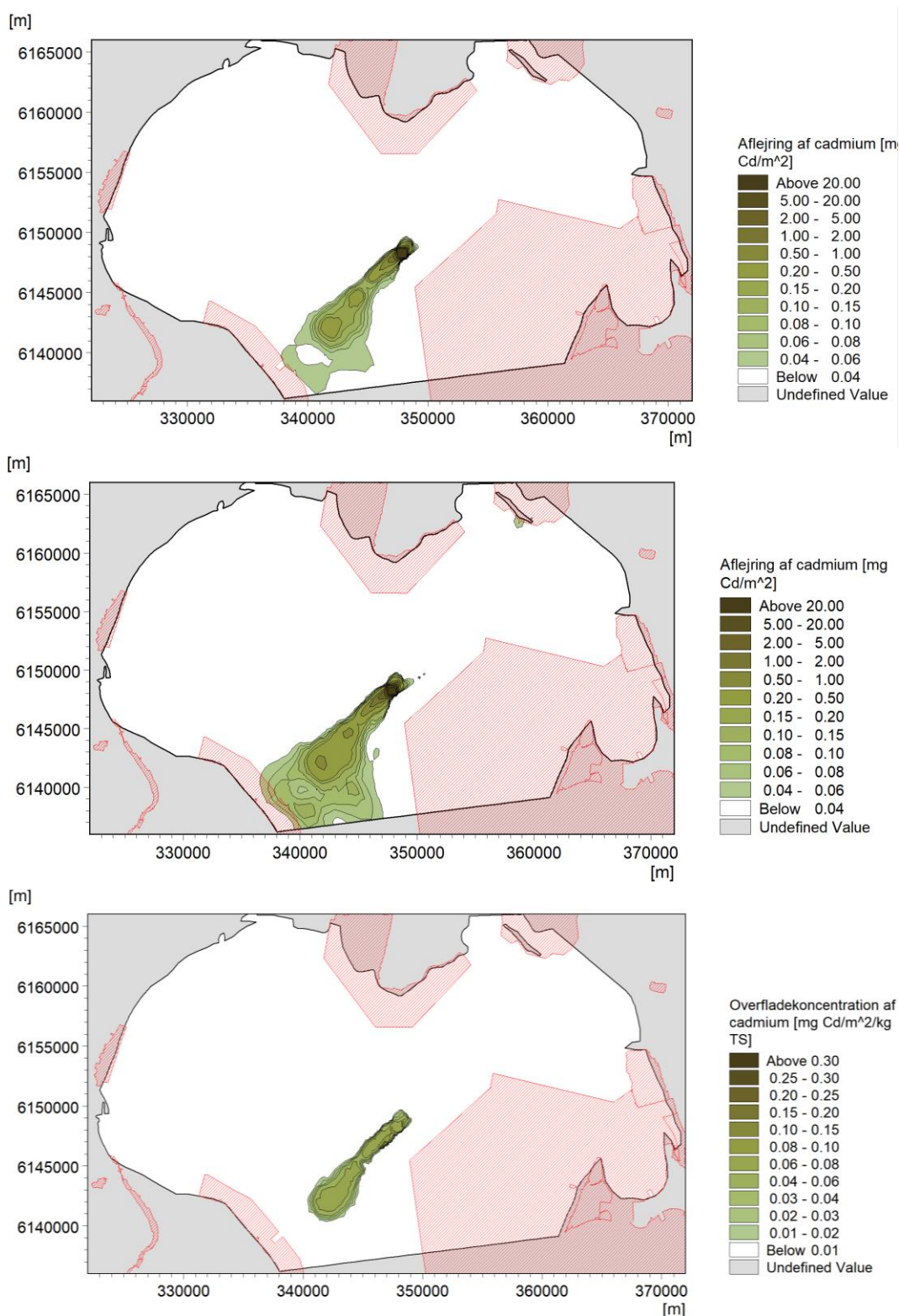


Figur 6-15 Aflejring af zink efter første års klappning og ved brug af klappads Ka. Øverst: total mængde aflejret zink. Midt: total mængde aflejret zink efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.

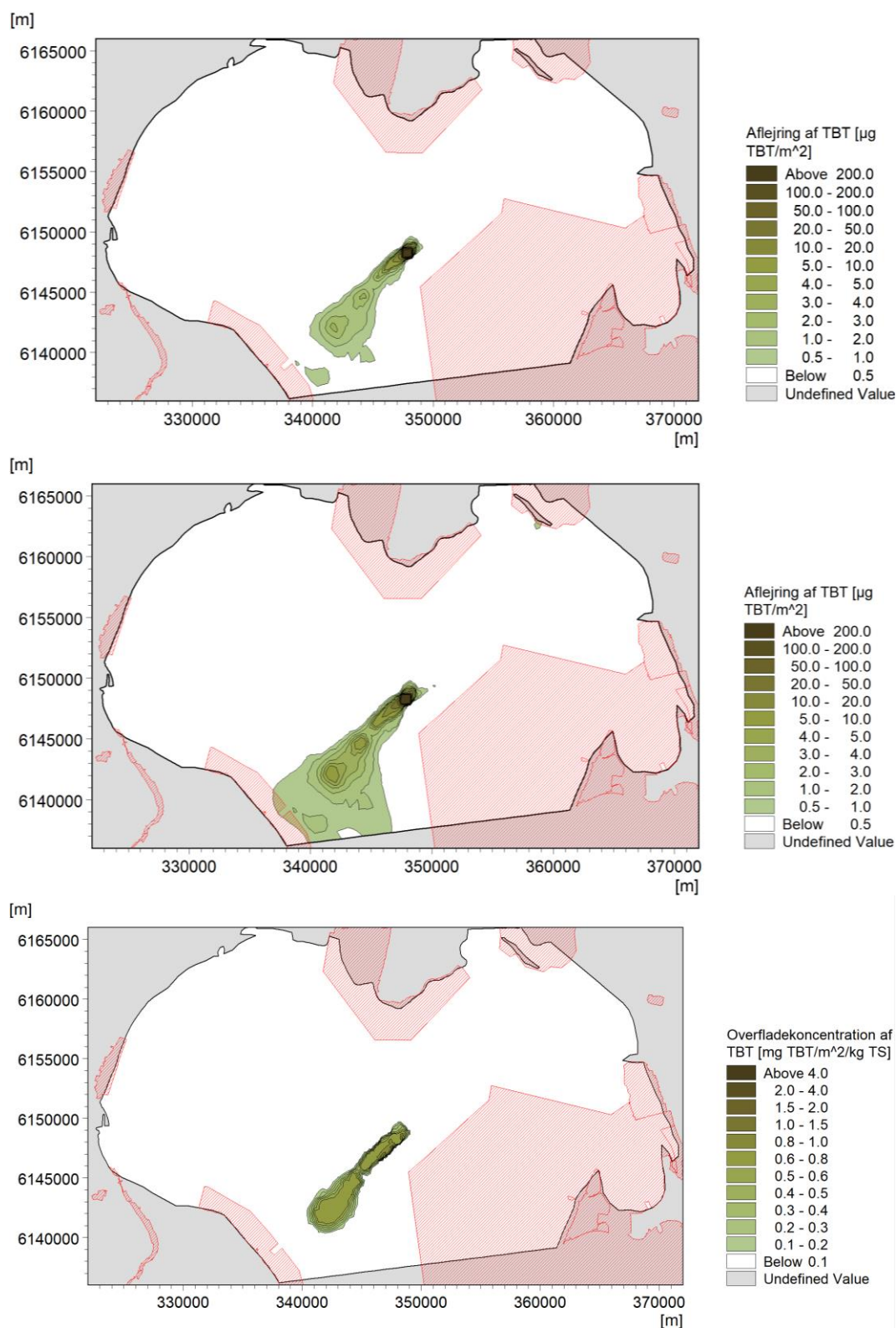


Figur 6-16 Øverst: Overskridelsesvarighed af gældende miljøkriterie for cadmium efter klappinger i perioden oktober 2021 til marts 2022. Nederst: For perioden oktober 2021 til marts 2023.

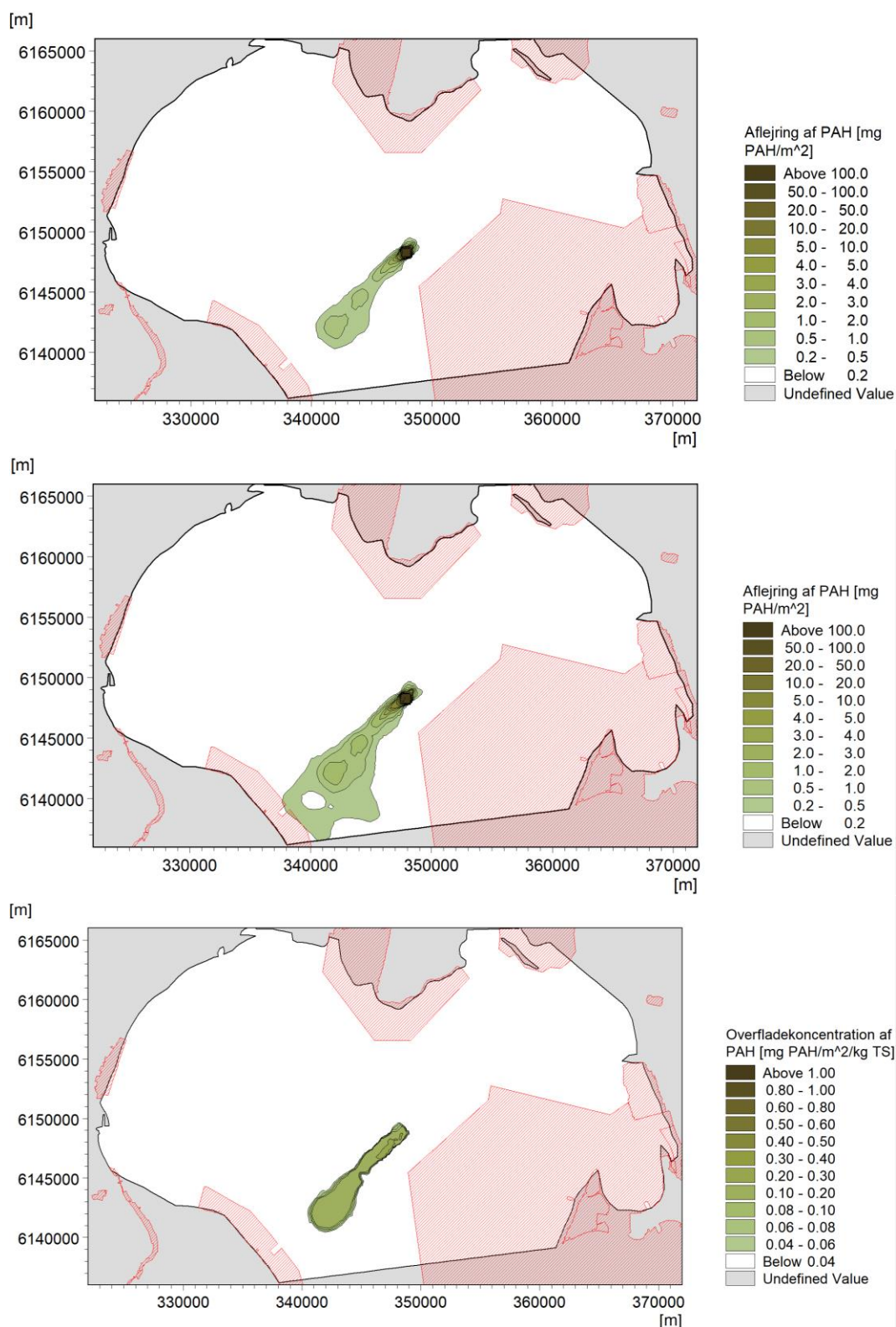




Figur 6-17 Aflejring af cadmium efter første års klappning og ved brug af klappblads Ka. Øverst: total mængde aflejret cadmium. Midt: total mængde aflejret cadmium er efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



Figur 6-18 Aflejrning af TBT efter første års klappning og ved brug af klappads Kb. Øverst: total mængde aflejret TBT. Midt: total mængde aflejret TBT efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



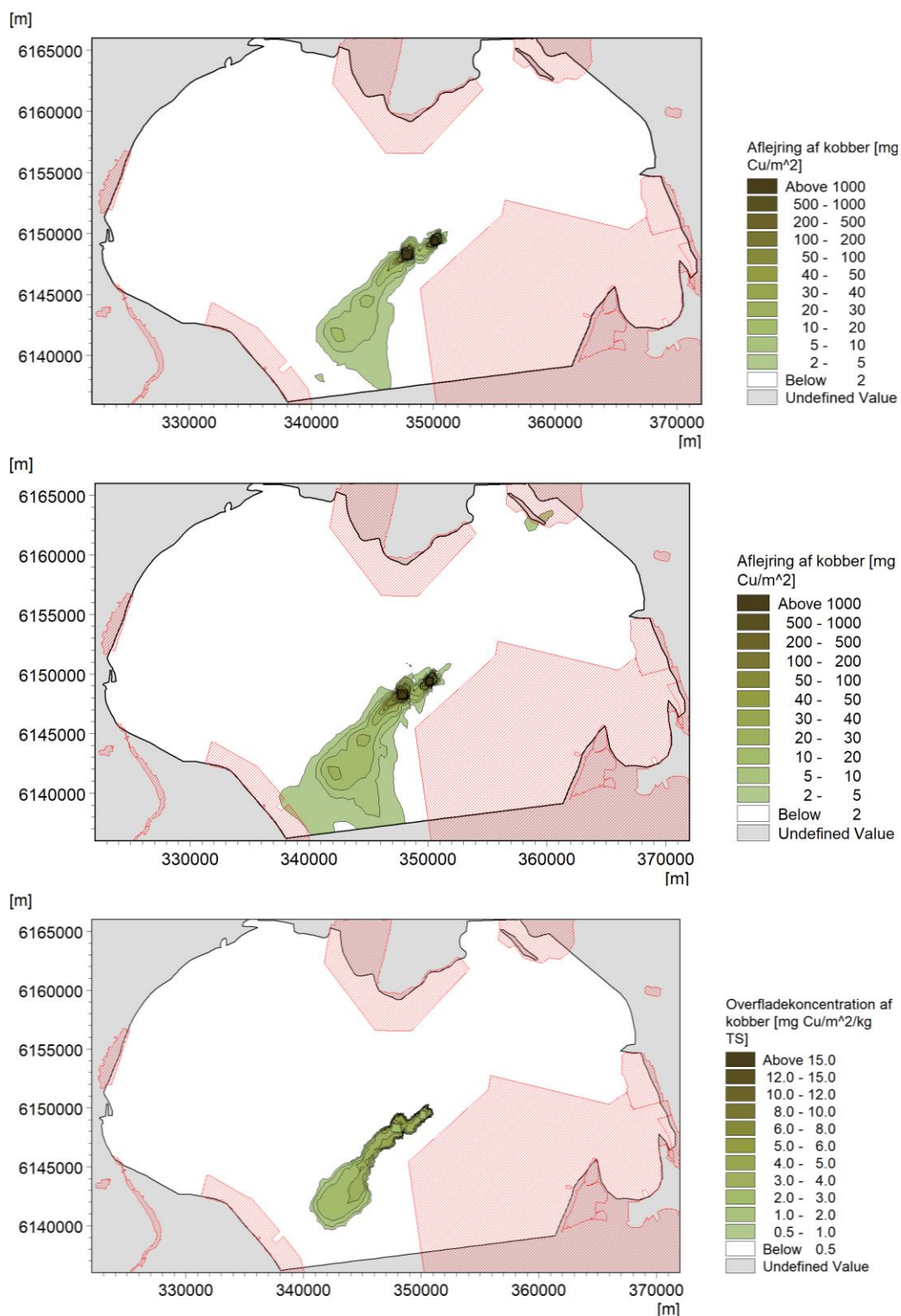
Figur 6-19 Aflejring af PAH efter første års klappning og ved brug af klappads Kb. Øverst: total mængde aflejret PAH. Midt: total mængde aflejret PAH efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.

### 6.3 Spredning af forurenede stoffer ved brug af klappads Ka og Kb

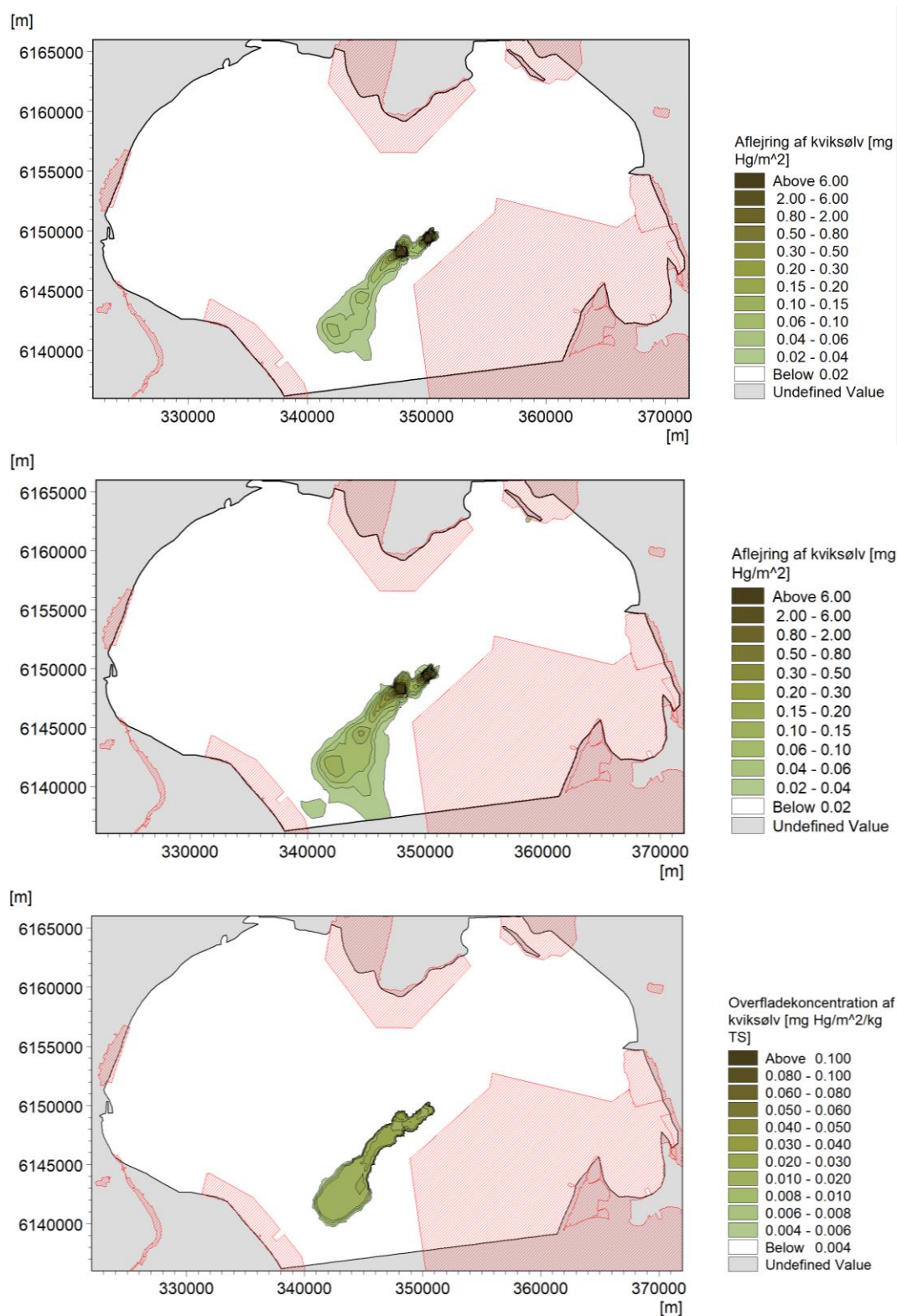
I dette afsnit er spredningen af forurenede stoffer ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb vurderet. Klappadserne har kapacitet til at optage den samlede klappmængde og er derfor vurderet for halvdelen og den fulde mængde af materialet.

Spredningen af forurenede stoffer følger spredningen af det finkornede sediment. Hvor stor en aflejring der finder sted, er derfor udelukkende bestemt af stofkoncentrationen i klappmaterialet og sammensætningen af det aflejrede sediment. De groveste fraktioner vil spredes mindst og aflejres tættest på klappadserne, mens de fine fraktioner vil spredes over et meget stort område og aflejres i meget tynde lag langt væk fra området. Da de fine fraktioner relativt adsorberer en større del af de forurenende stoffer, vil forureningsgraden falde i de områder hvor der aflejres sediment med målbare tykkelser. De følgende figurer viser de totale aflejringer af de forurenende stoffer: kobber, kviksølv, bly, zink, cadmium, TBT og PAH efter første og andet år med klappinger, samt en overfladekoncentration (mg stof per kvadratmeter per kg TS) i de områder, hvor der aflejres mere end 5 mm sediment. I områderne med mindre aflejring er der ikke vurderet på en overfladekoncentration. I beregningerne af overfladekoncentrationer er det antaget at overfladesedimentet aflejres med en tørdensitet på  $600 \text{ kg/m}^3$ . Som en konservativ antagelse er det desuden antaget, at de forurenende stoffer forbliver bundet til sedimentet. Overfladekoncentrationen er angivet som mg stof/m<sup>2</sup>/kg TS og afspejler dermed koncentrationen i de øverste 1,67 mm sediment. Det ses, at overfladekoncentrationen er mindre end koncentrationen i klappmaterialet, hvilket skyldes en kornsortering og at de mest finkornede fraktioner, som bærer en relativ større del af forureningen spredes over et meget stort område, mens de grove fraktioner (med en relativ mindre del af forureningen) aflejres mere lokalt.

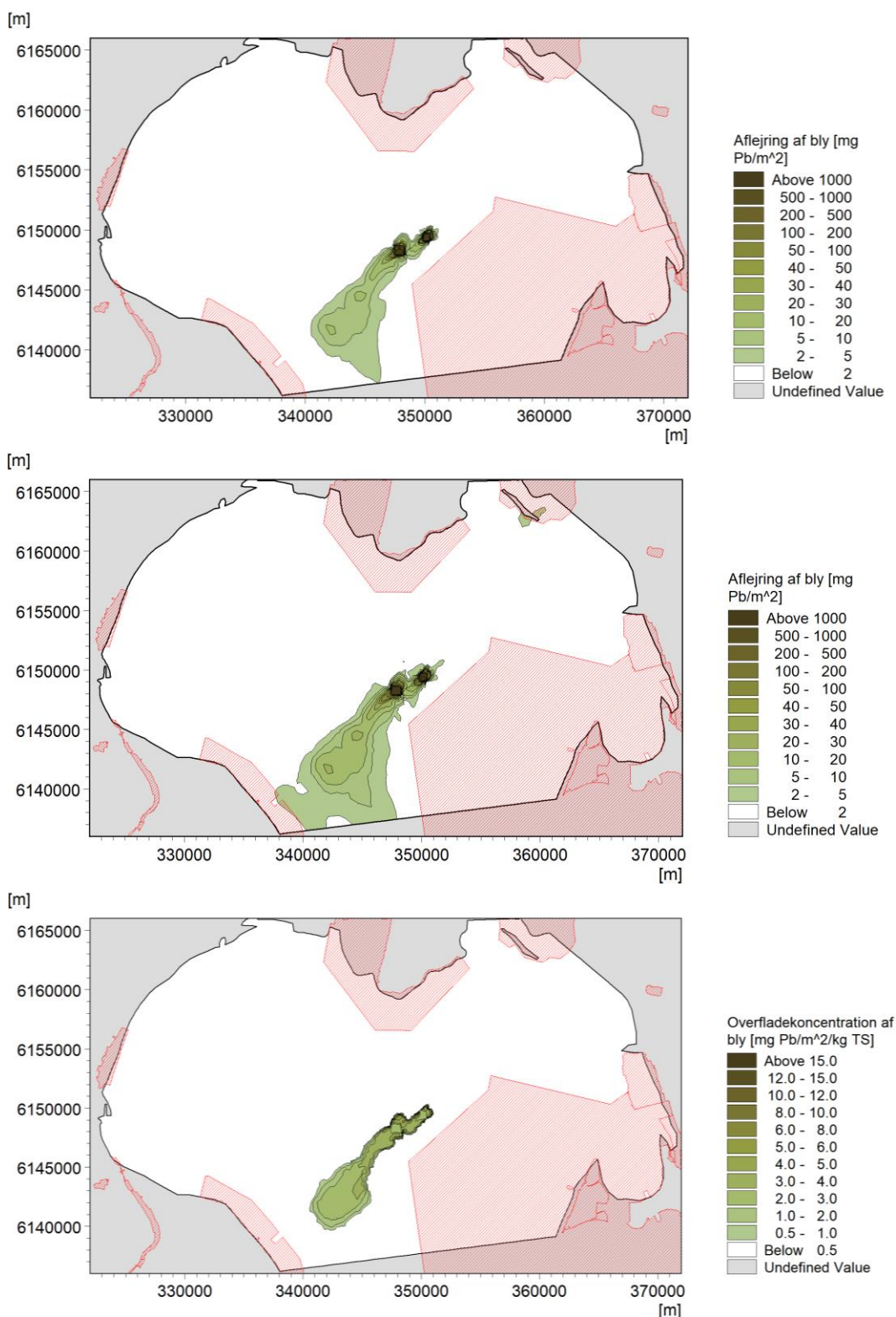
Der er ikke lavet beregninger af spredningen af tungmetaller i vandfasen for dette scenarie, men påvirkningen vil være analog med det, som er vist for de to foregående klappscenarier.



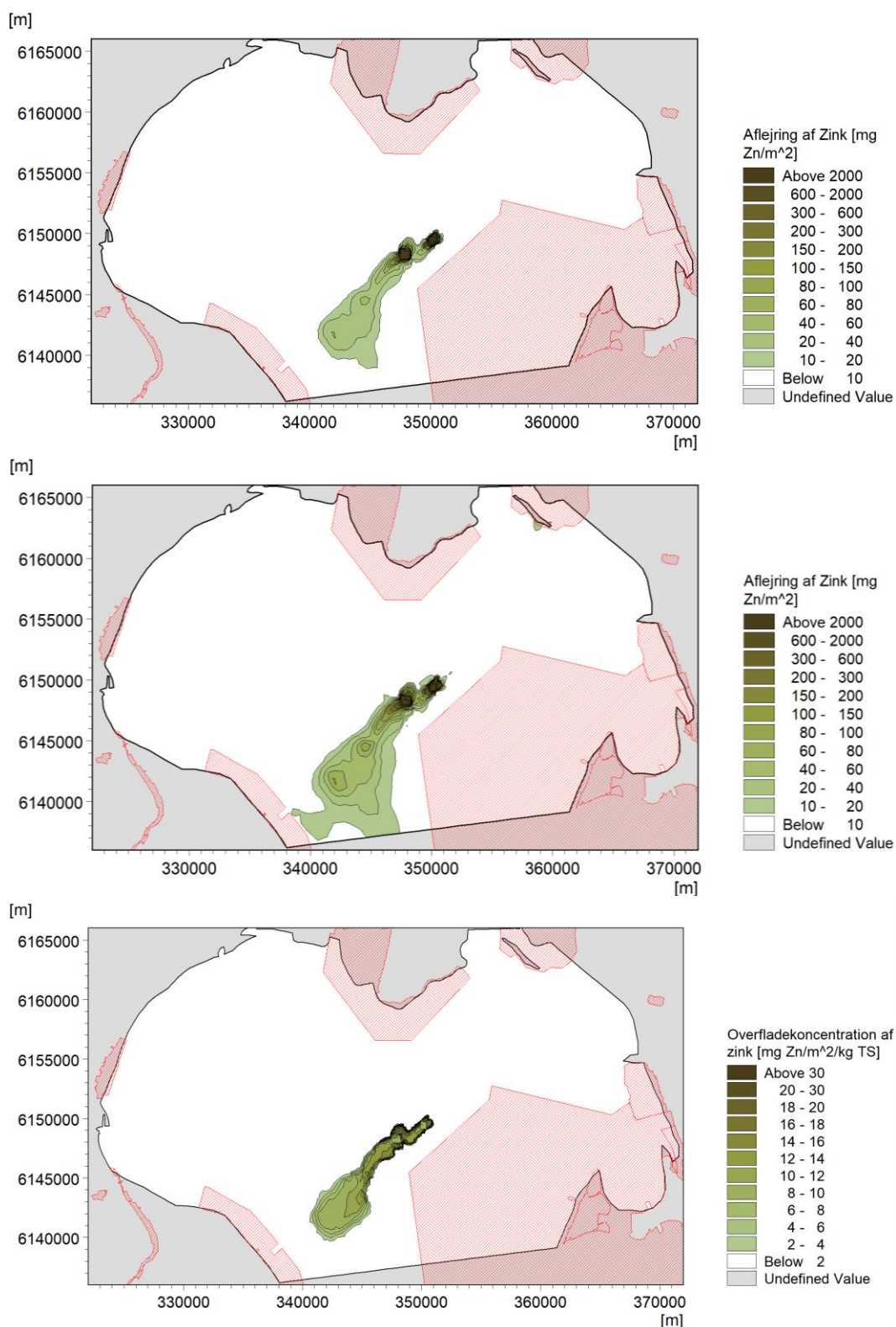
Figur 6-20 Aflejring af kobber efter klapping og ved skiftevis brug af klapplass Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret kobber. Midt: total mængde aflejret kobber efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



Figur 6-21 Aflejring af kviksølv efter klappning og ved skiftevis brug af klapplass Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret kviksølv. Midt: total mængde aflejret kviksølv efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.

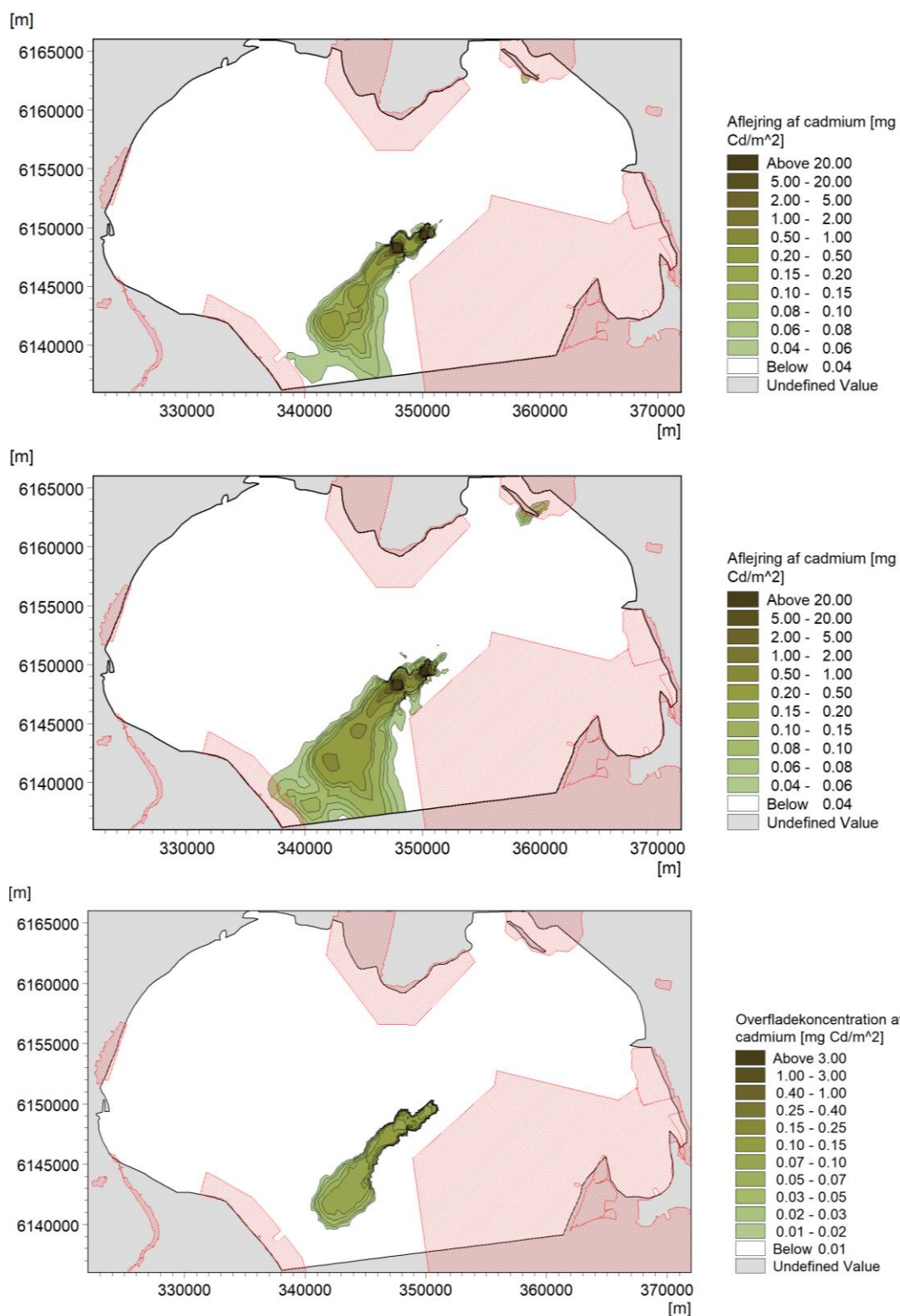


Figur 6-22 Aflejring af bly efter klappning og ved skiftevis brug af klappblads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret bly. Midt: total mængde aflejret bly efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.

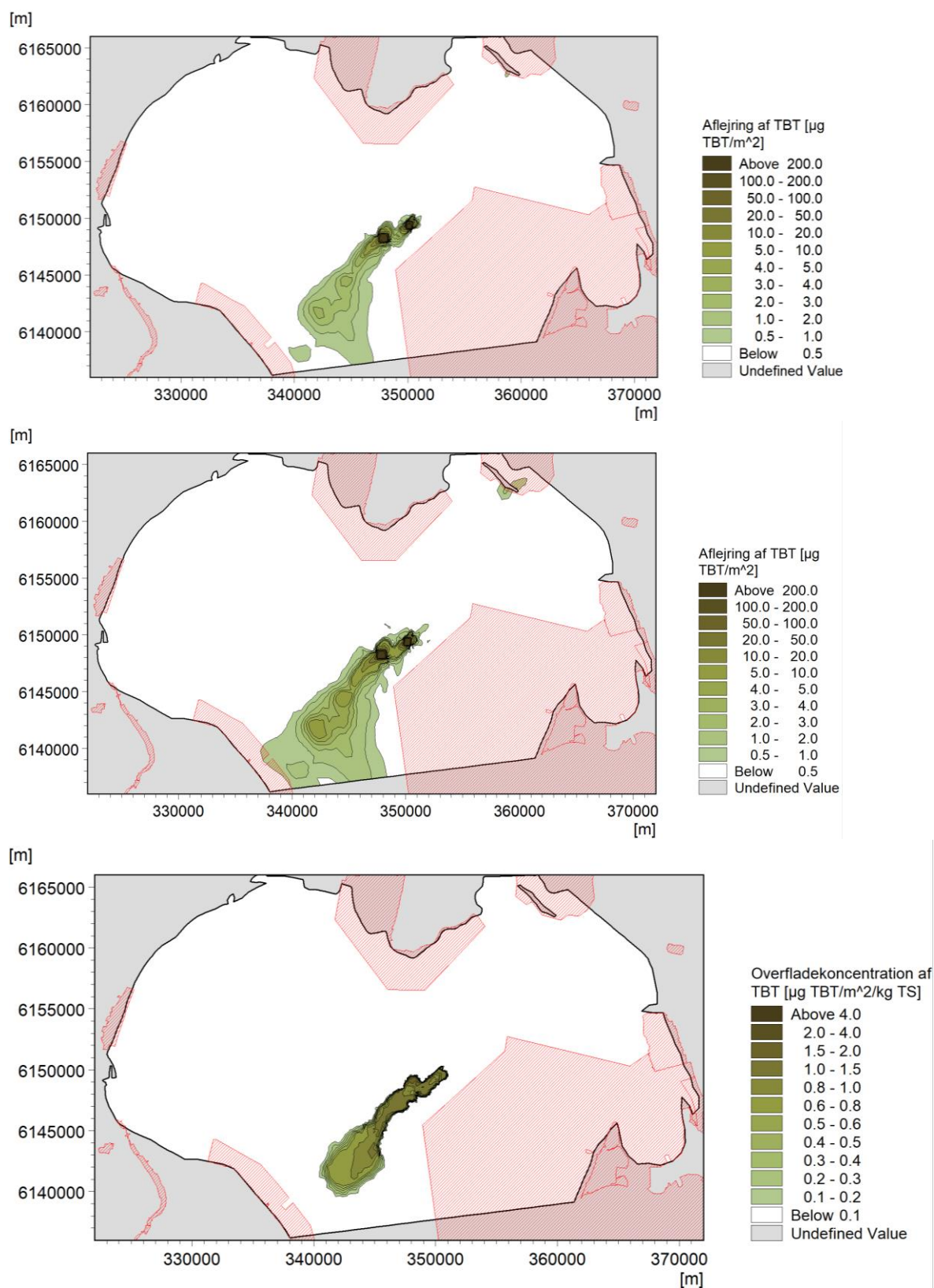


Figur 6-23 Aflejring af zink efter klappning og ved skiftevis brug af klappblads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret zink. Midt: total mængde aflejret zink efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.

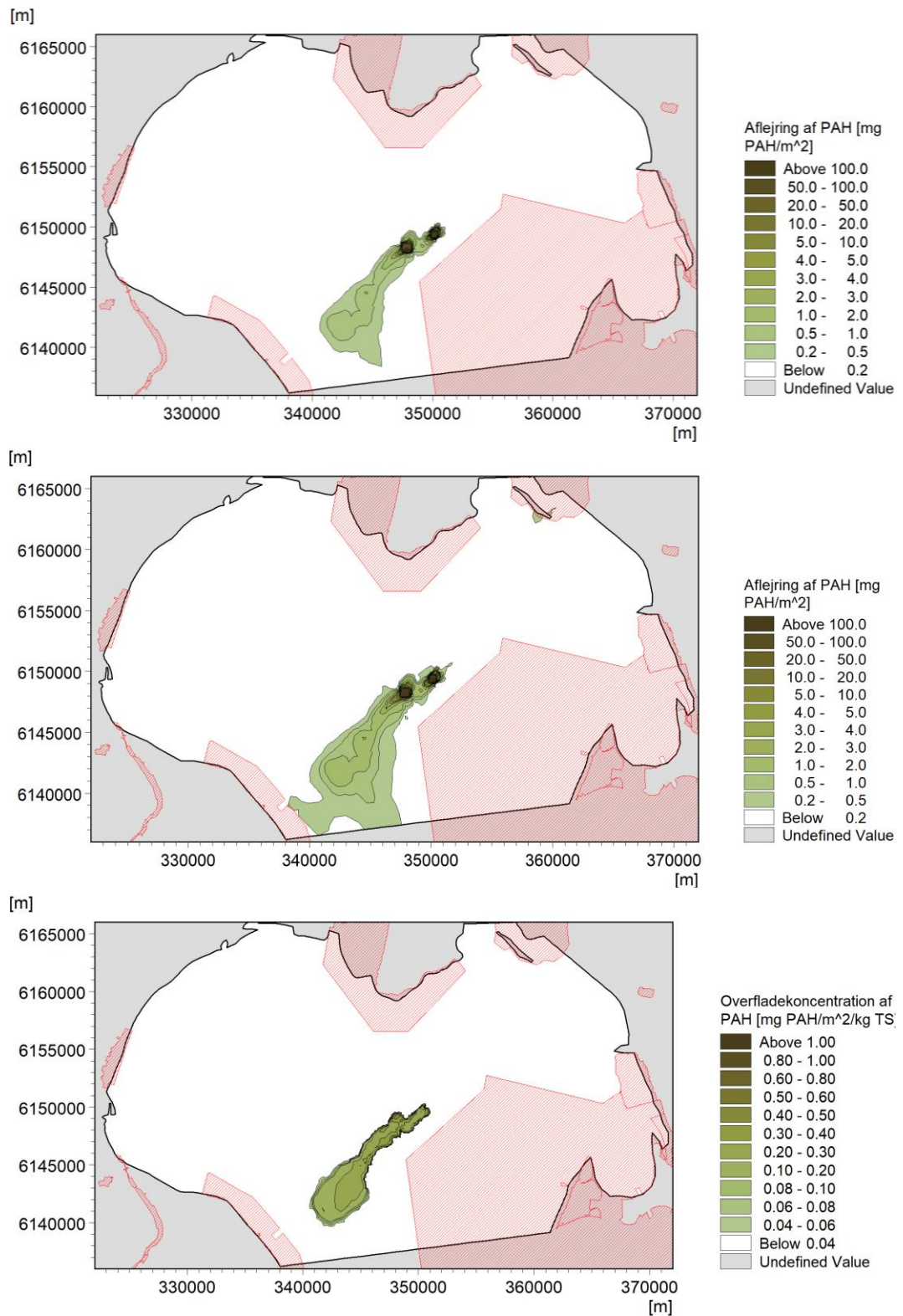




Figur 6-24 Aflejring af cadmium efter klapping og ved skiftevis brug af klappblads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret cadmium. Midt: total mængde aflejret cadmium efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



Figur 6-25 Aflejring af TBT efter klappning og ved skiftevis brug af klappblads Ka og Kb. Øverst: total mængde aflejret TBT. Midt: total mængde aflejret TBT efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.



Figur 6-26 Aflejring af PAH efter klappning og ved skiftevis brug af klapplass Kb. Øverst: total mængde aflejret PAH. Midt: total mængde aflejret PAH efter år 2. Nederst: Overfladekoncentration i de øverste 5 mm sediment.

## 7 Iltforbrug og risiko for iltsvind

Ikke-forurenet sediment fra Lynetteholmen klappes i den sydlige del af Øresund. I forbindelse med klappingen skal det undersøges om der kan forekomme iltsvind, specielt i perioder hvor der forekommer en lagdeling af vandsøjlen, pga. indtrængende salt bundvand fra den nordlige del af Sundet.

### 7.1 Model og iltforbrug af klappet sediment

Der er foretaget en dataanalyse af det klappede sediments akkumulerede iltforbrug (SOD, g ilt/m<sup>3</sup>) efter hhv. 1, 6, 12, 24, 120 og 168 timer. Disse data er anvendt sammen med en BOD model ved vurderingen af mulighederne for iltsvind. Modellen indeholder 4 tilstandsvariable i vandfasen (ilt, H<sub>2</sub>S, BOD-opløst og BOD-partikulært) samt 2 i sedimentet (H<sub>2</sub>S-sediment, BOD-sediment). I vandfasen regnes såvel på opløst iltforbrug (H<sub>2</sub>S & BOD-opløst) og partikulært BOD iltforbrug, sidstnævnte kan sedimentere til bunden og indgå i sedimentets pulje ad BOD. Denne BOD pulje kan re-suspenderes af bølger og strøm. Puljen af H<sub>2</sub>S i det dumpede sediment antages at udgøre iltforbruget (SOD) efter 1 time i en opslæmning af sediment. Puljen af BOD-opløst svarer til iltforbruget (SOD) fra 1 til 12 timer i en opslæmning af sediment og BOD-partikulært svarer til iltforbruget i en opslæmning (SOD) fra 12 til 168 timer. I Bilag A findes en mere detaljeret beskrivelse af BOD modellen.

Henfaldet ved 20 °C af de iltforbrugende puljer er beregnet som efter et 1. ordenshenfald for de 3 puljer i vandfasen ud fra målinger af det akkumulerede iltforbrug i opslæmninger af sediment over 168 timer, se Tabel 7-1 samt Bilag A.

Tabel 7-1 1. Ordens henfaldskonstanter for H<sub>2</sub>S i vandet og 3 puljer af BOD.

Pulje	Henfaldskonstant 20 °C, K, 1/døgn
H <sub>2</sub> S i vandet	2,28
BOD opløst i vandet	0,64
BOD partikulært i vandet	0,37
BOD i sedimentet	0,15

I det sediment som klappes, er der beregnet et gennemsnitlig indhold af H<sub>2</sub>S, BOD-opløst og BOD partikulært pr. m<sup>3</sup> vådt sediment, se Tabel 7-2.

Tabel 7-2 Gennemsnitligt iltforbrug i klappet sediment.

Pulje	Klappet sediments iltforbrug, g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup>
H <sub>2</sub> S i vandet	160
BOD opløst i vandet	496
BOD partikulært i vandet	3435

Modellen har en beskrivelse af sedimentets "naturlige" materialisering af organisk materiale uden klappning af sediment, samt planktons produktion af ilt i vandet ligesom der er indlagt en baggrunds respiration i vandet.

Hvis iltkoncentrationen i bundvandet er lav og ikke formår at oxidere sedimentets naturlige materialisering af organisk stof eller BOD i sedimentet opstår der en iltgæld i form af  $H_2S$  i sedimentet, som kan diffundere op i bundvandet og enten indgå i vandets pulje af  $H_2S$  i vandet eller blive oxideret med  $O_2$  i vandet, se Bilag A.

## 7.2 Øresund og Køge Bugt et lejlighedsvist lagdelt system

De Danske farvande udgør forbindelsen mellem det brakke Østersø med lave saliniteter og Nordsøen med saliniteter på 35 PSU. Dette betyder, at der mere eller mindre permanent forekommer en saltlagdeling af vandmassen med et saltere bundlag og et mindre salt overfladelag. Beliggenheden af denne lagdeling, ligger i Øresundsområdet typisk i 8-15 m vanddybde. Drogdænsklen, lige syd for Saltholm udgør en undersøisk højderyg og dermed en forhindring for indtrængning af salt bundvand fra Kattegat. Under kraftige vinde fra nord og vest trænger der imidlertid salt bundvand ind over Drogden og dermed ind over klappadserne og Køge Bugt, hvor der etablerer sig en saltlagdeling.

Ser man på profiler af målt salinitet på en station centralt i Køge bugt vil der være en salinitetsforskel mellem overflade og bundvand på mere end 5 PSU i ca. 30 % af tiden.

Ved etablering af en lagdeling formindskes udvekslingen af vand og dermed ilt mellem overflade og bund. Det betyder, at den ilt som produceres af plankton samt geniltningen med luftens ilt i det øverste lag ikke kommer ned i bundlaget. Til gengæld vil bundens og bundvandets iltforbrug reducere iltkoncentrationen i bundlag og potentielt skabe iltvind over bunden.

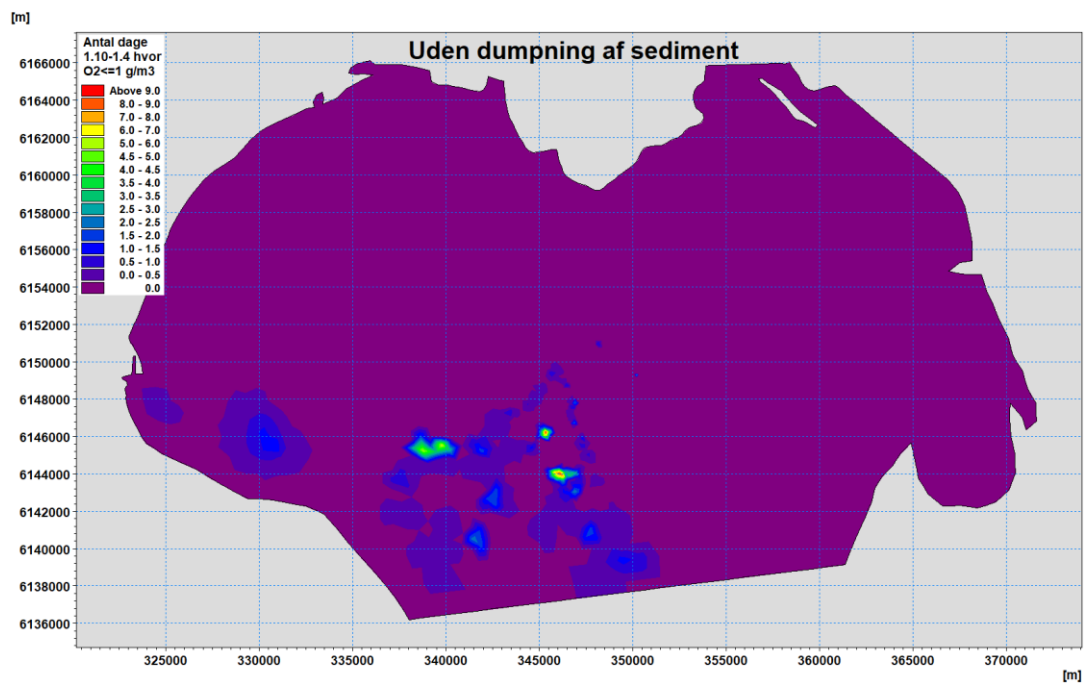
Dette er grunden til at effekterne af klappningen i det følgende koncentrerer omkring iltforholdene i bundlaget.

Køge Bugt kan betragtes som en udposning på de nord sydgående hovedstrømninger af vand gennem Øresund mellem Østersøen og Kattegat. Dvs. at der ved svagere nord og sydgående strømme ikke sker så stor en udskiftning af vandet i Køge Bugt og hovedstrømningen i den centrale del af Øresund. Der kan endda opstå idvande, dvs. en cirkulær strømning i Bugten som har samme retning som hovedstrømmen i den ydre del af Køge Bugt men en modsat retning inde i bunden af Bugten.

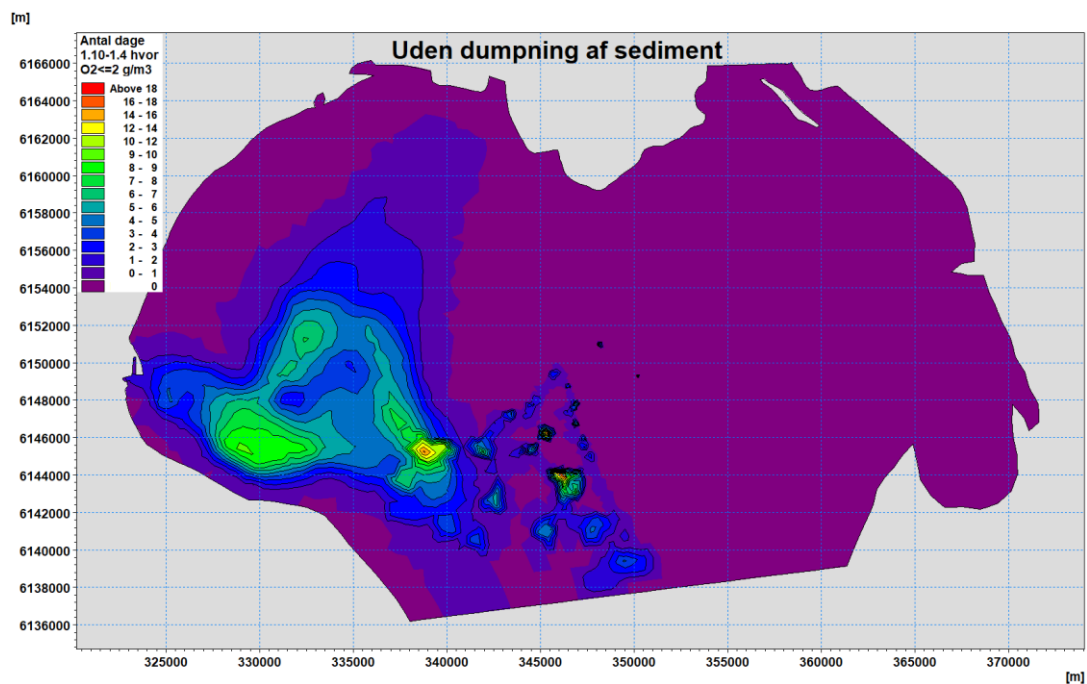
## 7.3 Bundilt i referencesituation uden klappning af sediment

Til konsekvensvurderingen er der lavet en referencekørsel uden klappning, hvorved det bliver muligt at relatere klappningernes betydning for iltforbruget og dermed risikoen for iltvind.

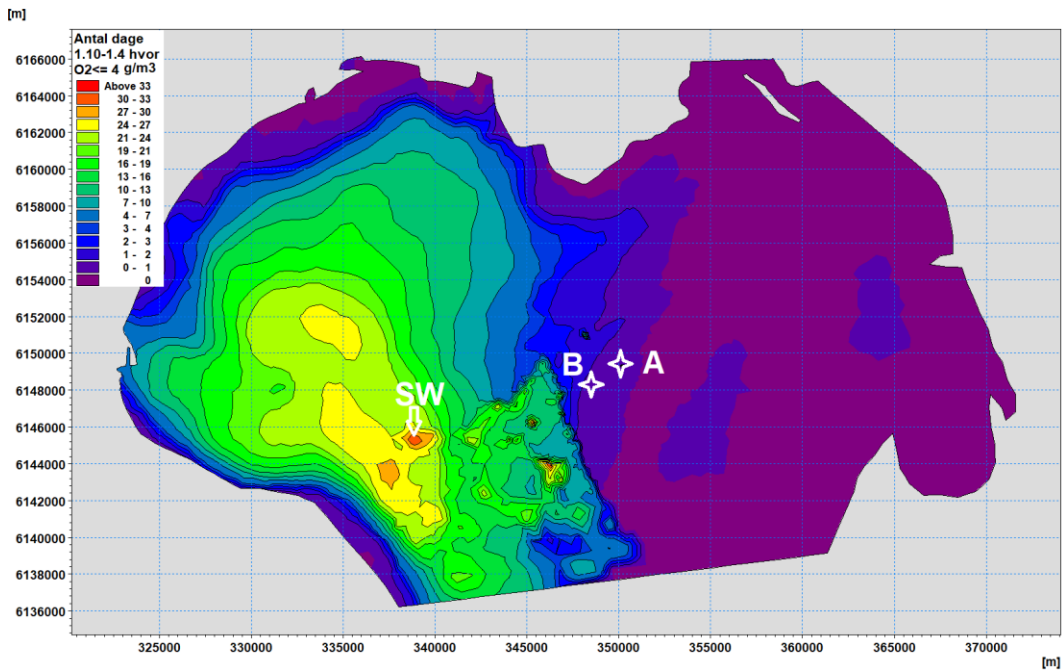
Figur 7-1 til Figur 7-3 viser de beregnede antal dage i referencekørslen med iltkoncentrationer ved havbunden (modelbundlaget) under henholdsvis 1, 2 og 4 mg/l ilt. De lave iltkoncentrationer forekommer i området vest – syd vest for klap pladserne, hvilket er i overensstemmelse med de lokal strømforhold i området. Det er kun små og få områder som udsættes for iltvind over bunden på mindre end 1 mg/l i op til en uge i løbet af vinteren, se Figur 7-1. Området med iltvind under 2 mg/l er større og strækker sig fra den sydvestlige del til den centrale del af Bugten i op til 9 døgn i løbet af vinteren, se Figur 7-2. Området med under 4 mg/l ved bunden dækker en stor del af Bugten og varer op til 25 døgn i løbet af vinteren, se Figur 7-3.



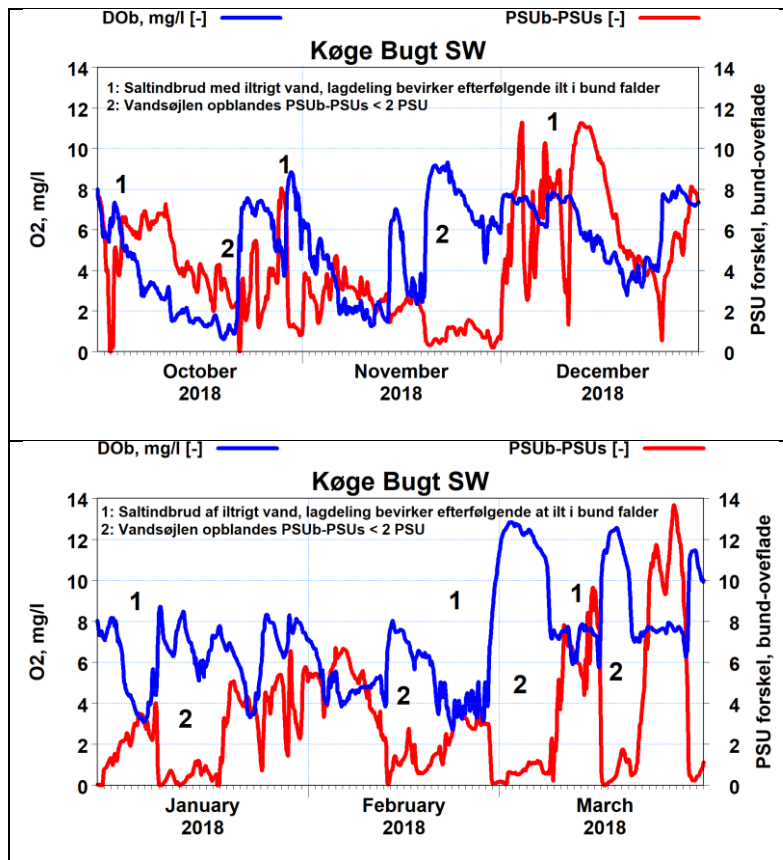
Figur 7-1 Antal dage med beregnede iltkoncentrationer under 1 mg/l i bundlaget fra 1.10 til 1.4. Reference kørsel uden dumpning.



Figur 7-2 Antal dage med beregnede iltkoncentrationer under 2 mg/l i bundlaget fra 1.10 til 1.4. Reference kørsel uden dumpning.



Figur 7-3 Antal dage med beregnede iltkoncentrationer under 4 mg/l i bundlaget fra 1.10 til 1.4. Reference kørsel uden dumping af sediment.



Figur 7-4 Udviklingen af simuleret ilt i bundlaget (DO<sub>b</sub>) på en station Køge Bugt SW, som funktion af simuleret salinitetsforskel mellem bund og overfladen (PSU<sub>b</sub>-PSU<sub>s</sub>).

Der er en tæt sammenhæng mellem saltvandsindbrud i Køge Bugt og udviklingen af iltkoncentrationen i bundvandet. Ved indbrud af iltrigt bundvand over Drogden stiger iltkoncentrationen i bundvandet, men lagdelingen og sedimentets iltforbrug bevirker, at iltkoncentrationen falder. Nedbrydes salinitetsforskellen mellem overflade og bund (PSU-b-PSUs) til under 2 PSU sker der en opblanding af vandsøjlen, som tilfører ilt til bunden. Over perioden oktober til og med marts har sedimentet den største mineralisering og dermed det største iltforbrug i efteråret (oktober- november) fordi temperaturen stadig er relativt høj i forhold til senere i vinterperioden. I perioden januar til marts reduceres sedimenters iltforbrug af lavere temperaturer, se Figur 7-4 samt Figur 4-6 og Figur 4-7.

På de to klappladser er der ikke beregnet nogen dage med iltkoncentrationer under 2 mg/l, men dog lokalt op til 2,2 dage med iltkoncentrationer under 4 mg/l på klapplad B over perioden fra oktober til og marts, se Tabel 7-3.

Placeringen af klappladserne i Øresunds hovedstrøm mellem Østersøen og Kattegat bevirker et tilstrækkeligt stort vandskifte der reducerer mulighederne for, at der opstår iltproblemer i bundlaget.

Tabel 7-3 Antal dage i perioden 1.10 – 1.4 med iltkoncentration i bundlaget mindre end eller lig med 4, 2 og 1 mg/l på de to klappladser og lokalitet SW i Køge Bugt.

Parameter	Klapplad A	Klapplad B	Køge Bugt SW
Dybde, m	12,5-14	14-15	15-16
Dage O <sub>2</sub> ≤ 4 mg/l	< 0,5	0,6-2,2	38
Dage O <sub>2</sub> ≤ 2 mg/l	0	0	20
Dage O <sub>2</sub> ≤ 1 mg/l	0	0	10

## 7.4 Bundilt ved klapping af sediment

Figur 7-5 til Figur 7-13 viser forøgelsen i antal dage med iltkoncentrationer under henholdsvis 1, 2 og 4 mg/l i klappingsperioden. Beregningerne er udført for klapping på følgende klappladser:

- A og B
- A alene, og
- B alene

Generelt er den beregnede forøgelse mindre end 1 dag for hele perioden. Dog vil der helt lokalt kunne opstå perioder med forøgelse i op til 10 dage eller mere. Dette vil specielt være udtalt for et lille område vest for klapplad B. Perioden vil falde sammen med perioder med markant lagdeling, som forekommer i marts måned (se Figur 3-5).

I Tabel 7-4 er opgjort forøgelsen i arealer med bundilt mindre end hhv. 4, 2 og 1 mg/l mellem de forskellige scenarier og referencen. Bundfaunaen bliver stresset ved længerevarende koncentrationer under 4 mg/l, under 2 mg/l begynder det at blive kritisk og noget af faunaen vil dø. Er iltkoncentrationen under 1 mg/l er der fare for udslip af H<sub>2</sub>S fra bunden og dannelse af et liglag af H<sub>2</sub>S oxiderende bakterier.

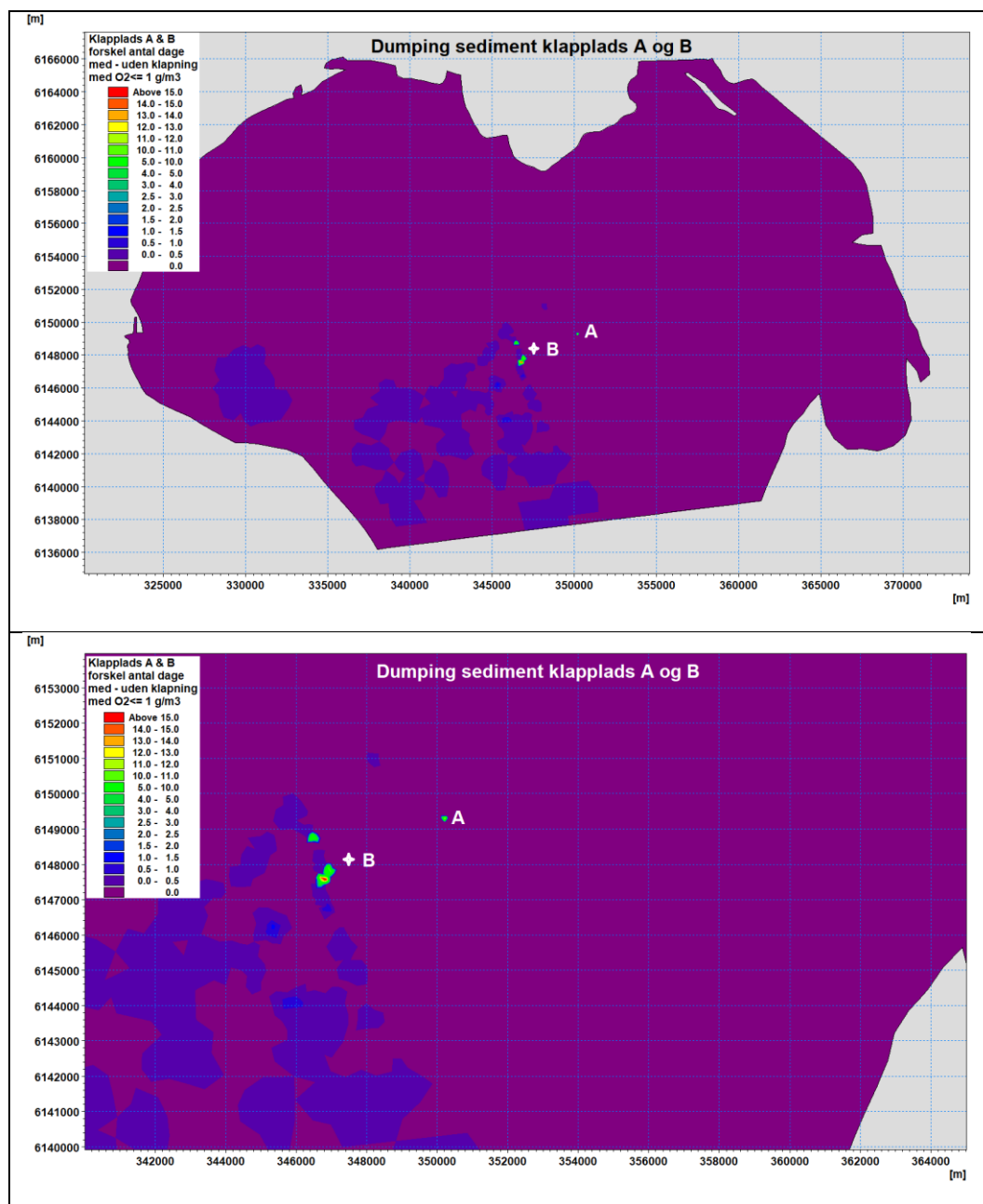
Det antages, at bundfaunaen på selve klappladserne går til ved begravning med det klappede sediment.



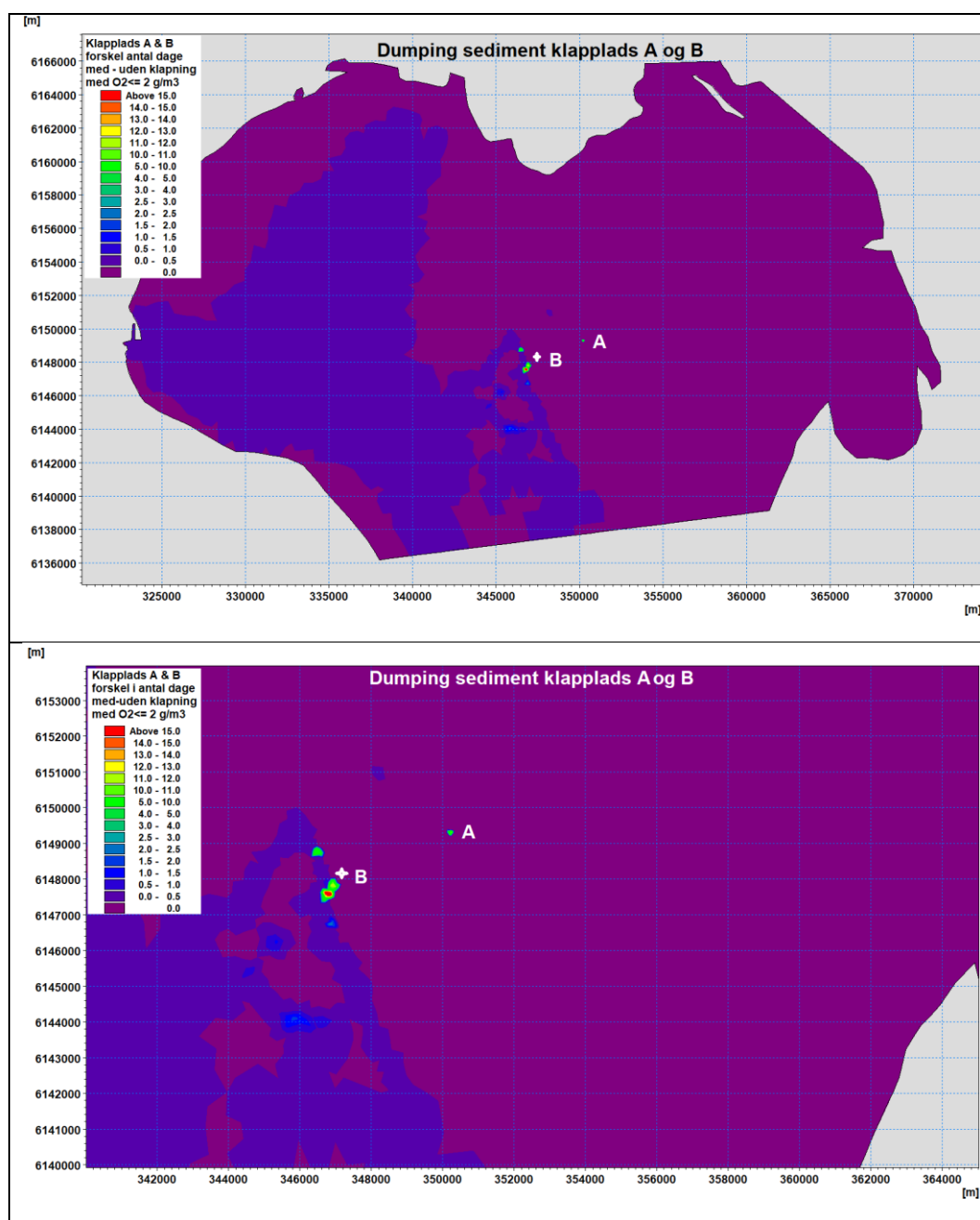
Klappes på plads A er der et sammenfald mellem arealet mærket med palette farverne gul, mørkegul/rød og selve klapppladsen, se Figur 7-9 og Figur 7-10. Dette er imidlertid ikke tilfældet ved deponering af sediment på klappplads B. Perioder med lave iltkoncentrationer forekommer på et begrænset område sydvest for klappplads B. Dette medfører, at det areal som påvirkes, når der klappes sediment på klappplads B, samlet er større end ved klapping på klappplads A.

Tabel 7-4 Forskel i arealer med bundilt med under hhv. 4, 2 og 1 mg/l mellem klappscenarie A, B og A & B og referencescenariet uden klapping.

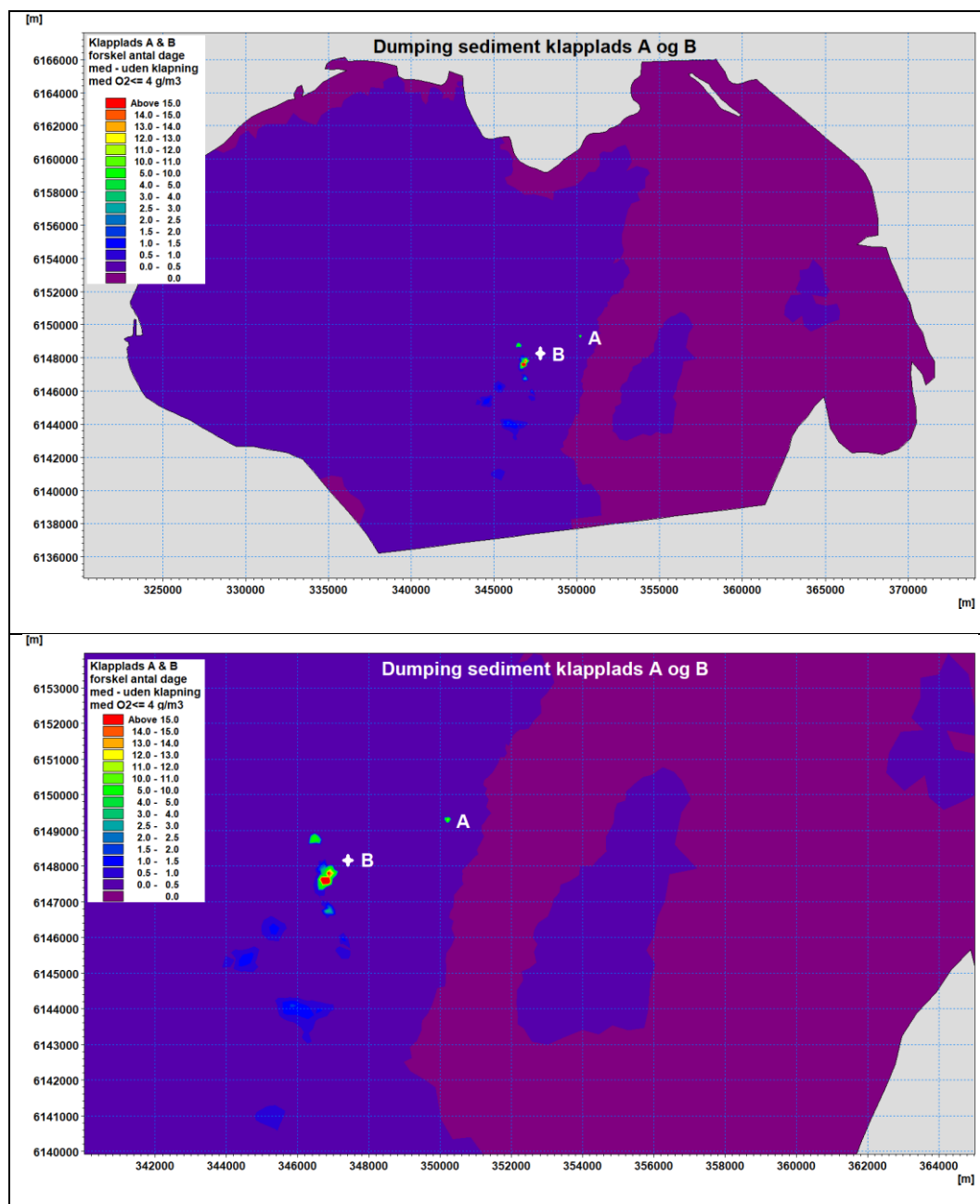
Scenarie	Klappplads A			Klappplads B			Klappplads A & B		
	Km <sup>2</sup>			Km <sup>2</sup>			Km <sup>2</sup>		
Dage\ bundilt	llt<=4 mg/l	llt<=2 mg/l	llt<=1 mg/l	llt<=4 mg/l	llt<=2 mg/l	llt<=1 mg/l	llt<=4 mg/l	llt<=2 mg/l	llt<=1 mg/l
<b>0</b>	557	889	1026	499	848	1024	528	863	1025
<b>0 &lt; dage &lt;= 0.5</b>	479	147	11	537	188	13	506	173	12
<b>0.5 &lt; dage &lt;= 1</b>	1	1	0	1	0	0	2	0	0
<b>1 &lt; dage &lt;= 2</b>	0,8	0,3	0,1	0,0	0,3	0,2	1,0	0,5	0,0
<b>2 &lt; dage &lt;= 4</b>	0,24	0,11	0,08	0,04	0,07	0,10	0,31	0,16	0,15
<b>4 &lt; dage &lt;= 8</b>	0,06	0,04	0,01	0,03	0,05	0,01	0,07	0,05	0,01
<b>8 &lt; dage &lt;= 16</b>	0,007	0,007	0,000	0,017	0,008	0,000	0,024	0,007	0,000
<b>Sum farvekode</b>									
<b>Bleg gul/rød</b>		147	11		188	13		173	12
<b>Gul/rød</b>		1	0		0	0		0	0
<b>Mørk gul/rød</b>		0,5	0,2		0,5	0,3		0,8	0,2



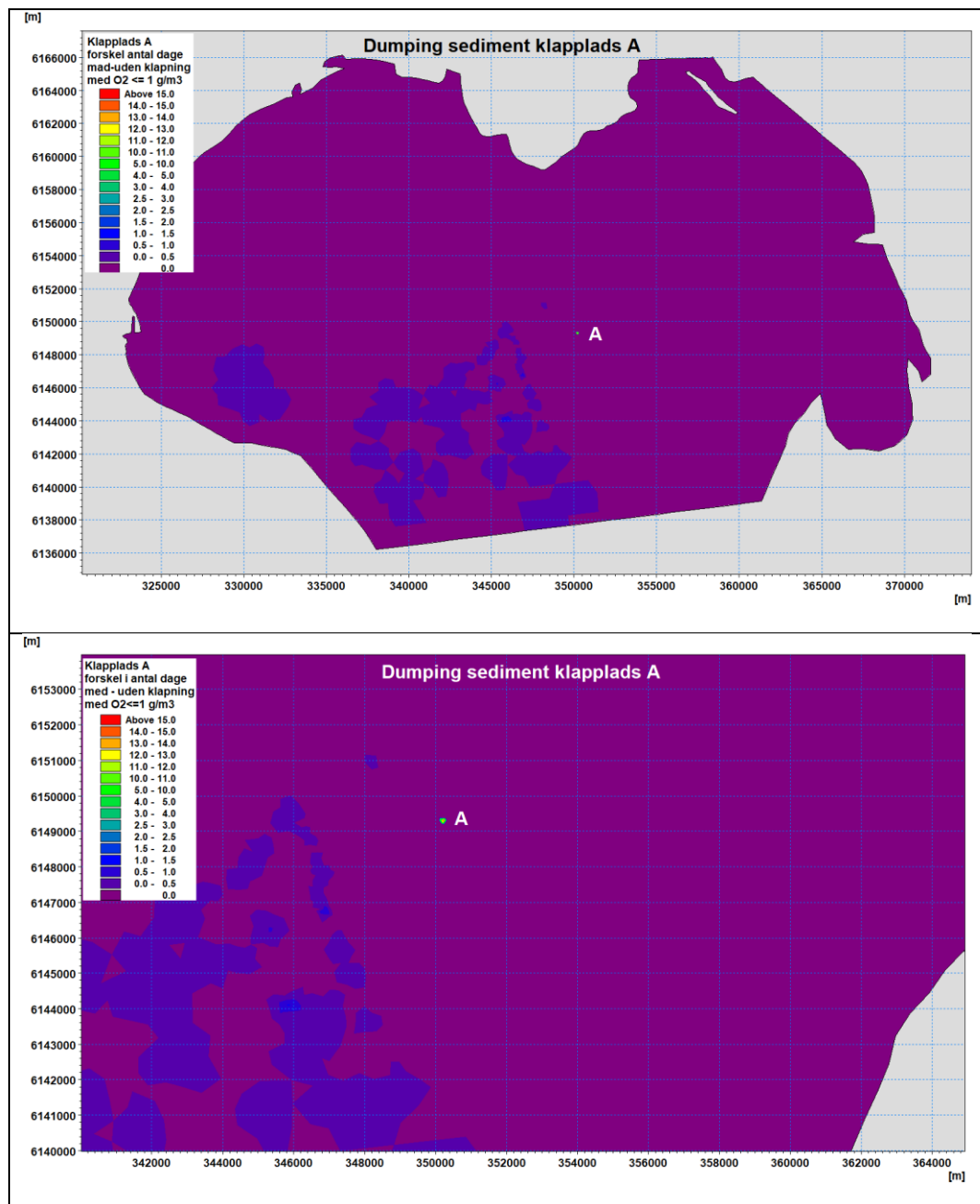
Figur 7-5 Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 1 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A og B, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappbladsene)



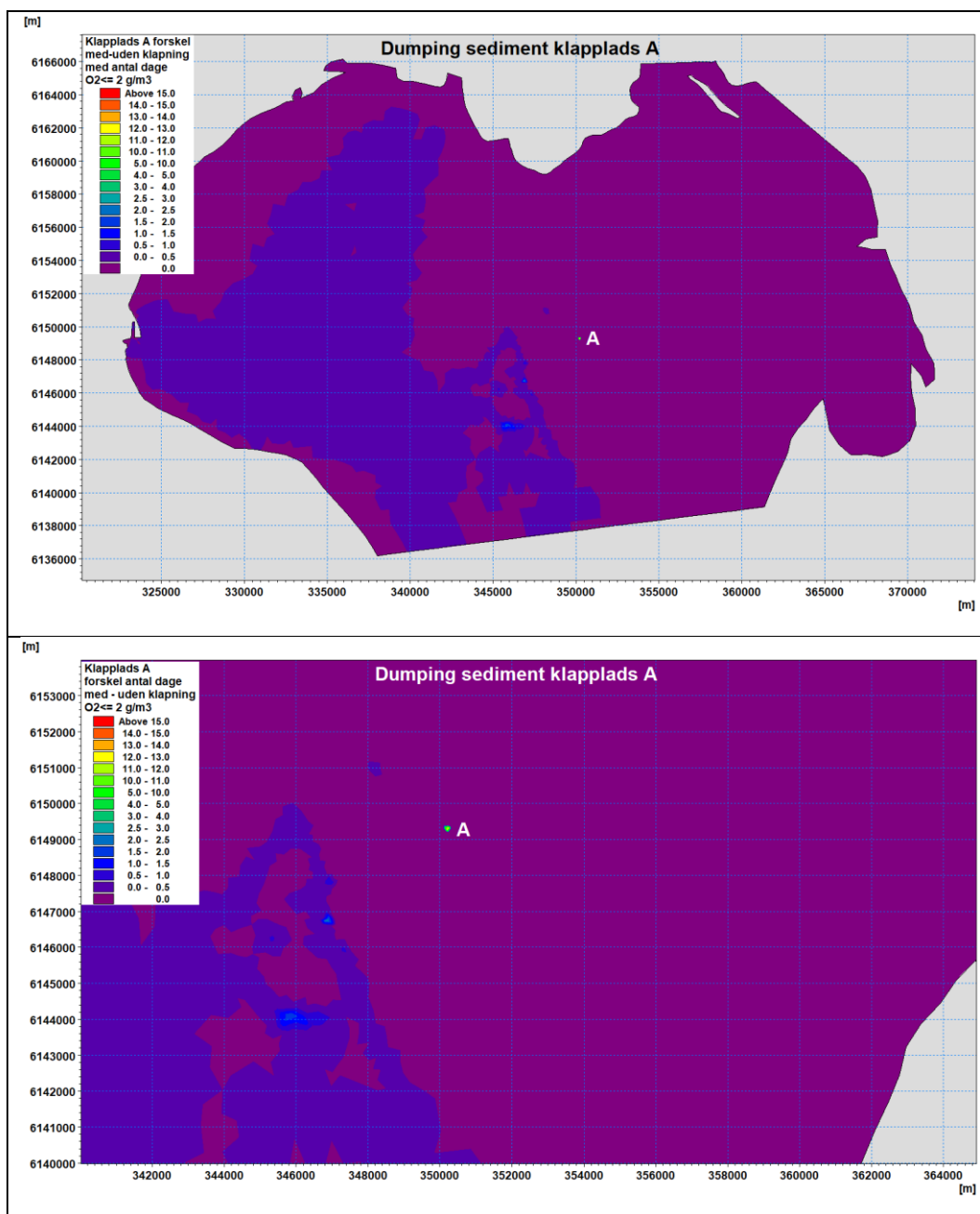
Figur 7-6 Ændring (førøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 2 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A og B, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappbladsene).



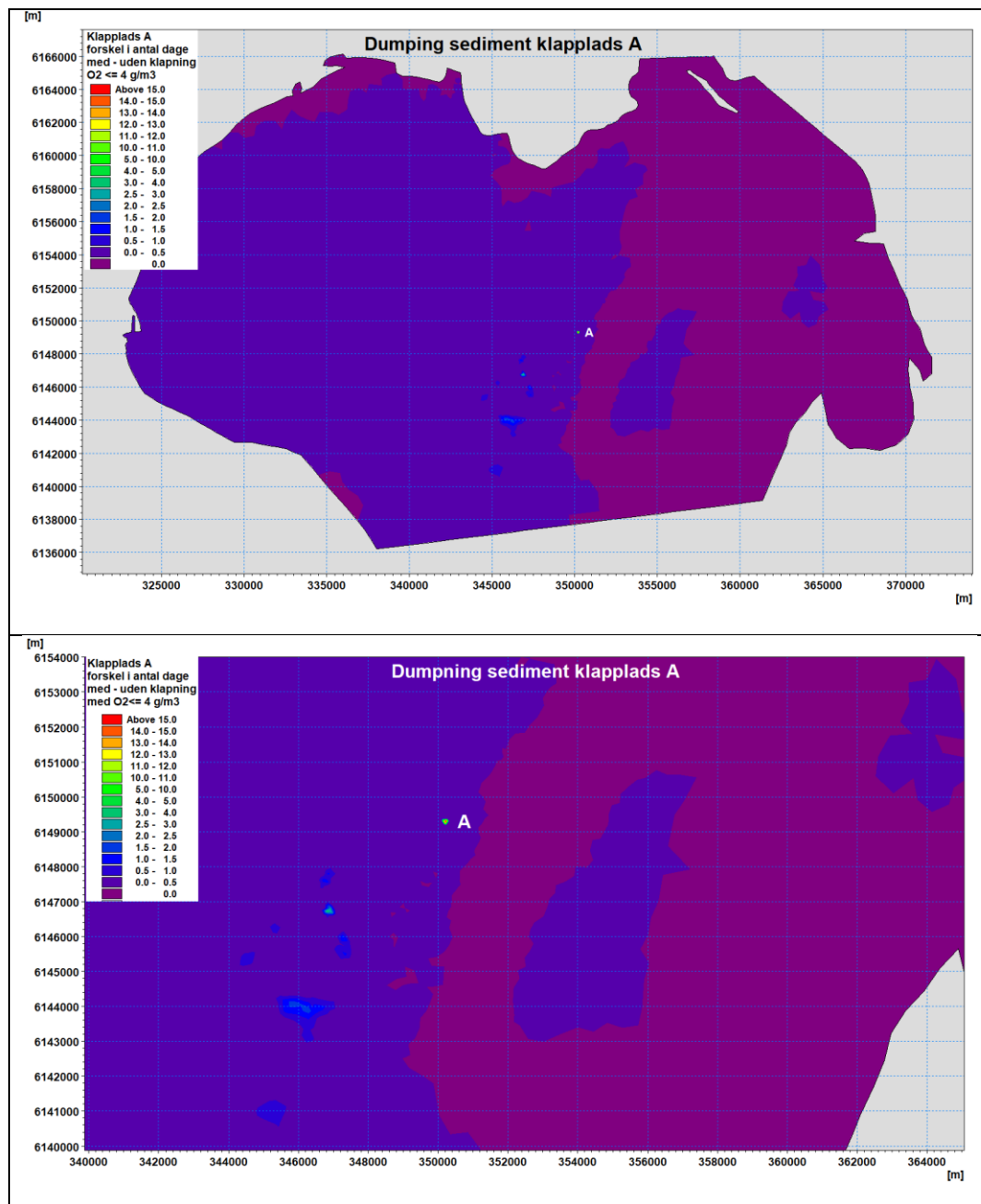
Figur 7-7 Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 4 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A og B, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappbladsene).



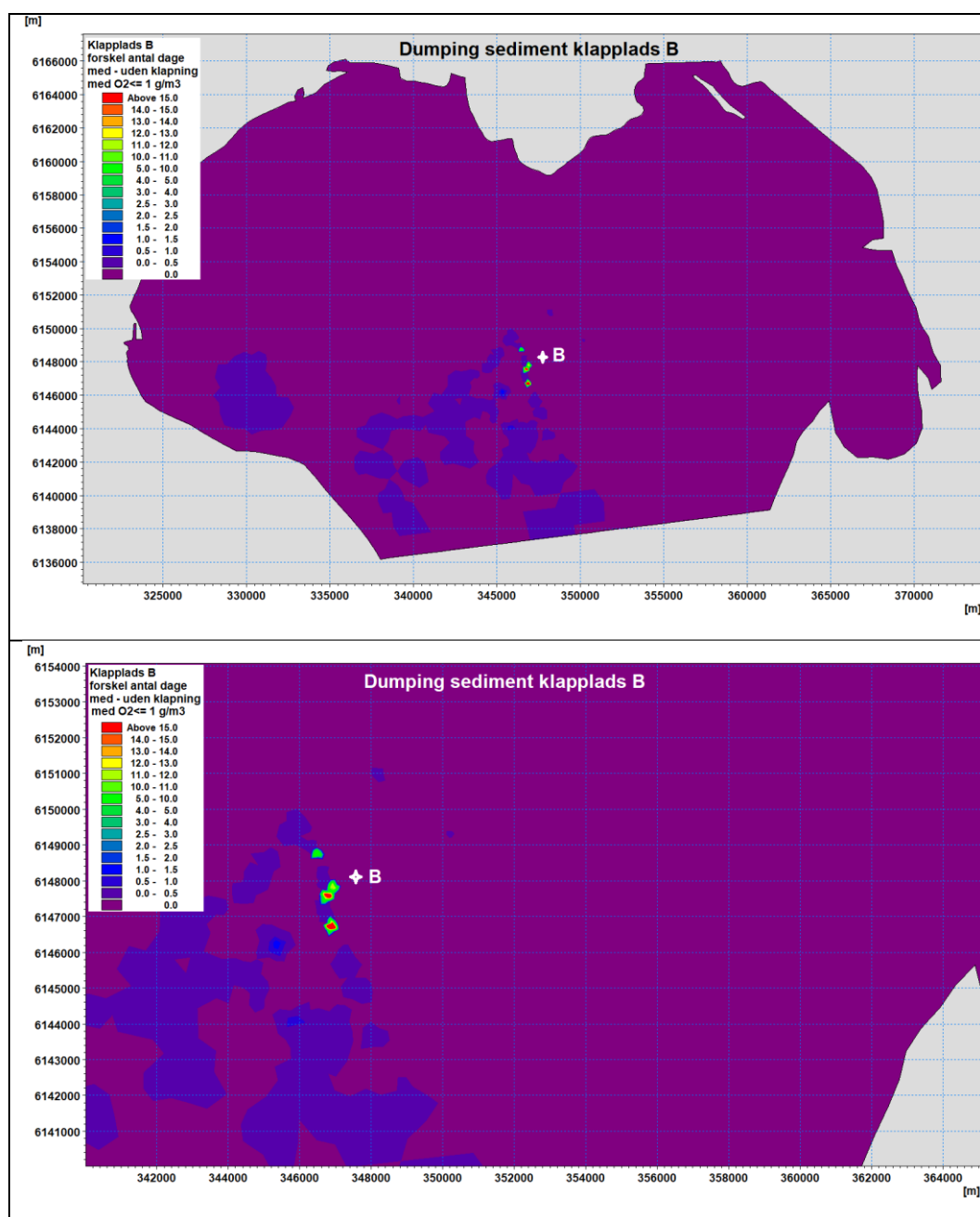
Figur 7-8 Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 1 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappbladsene).



Figur 7-9 Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 2 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).

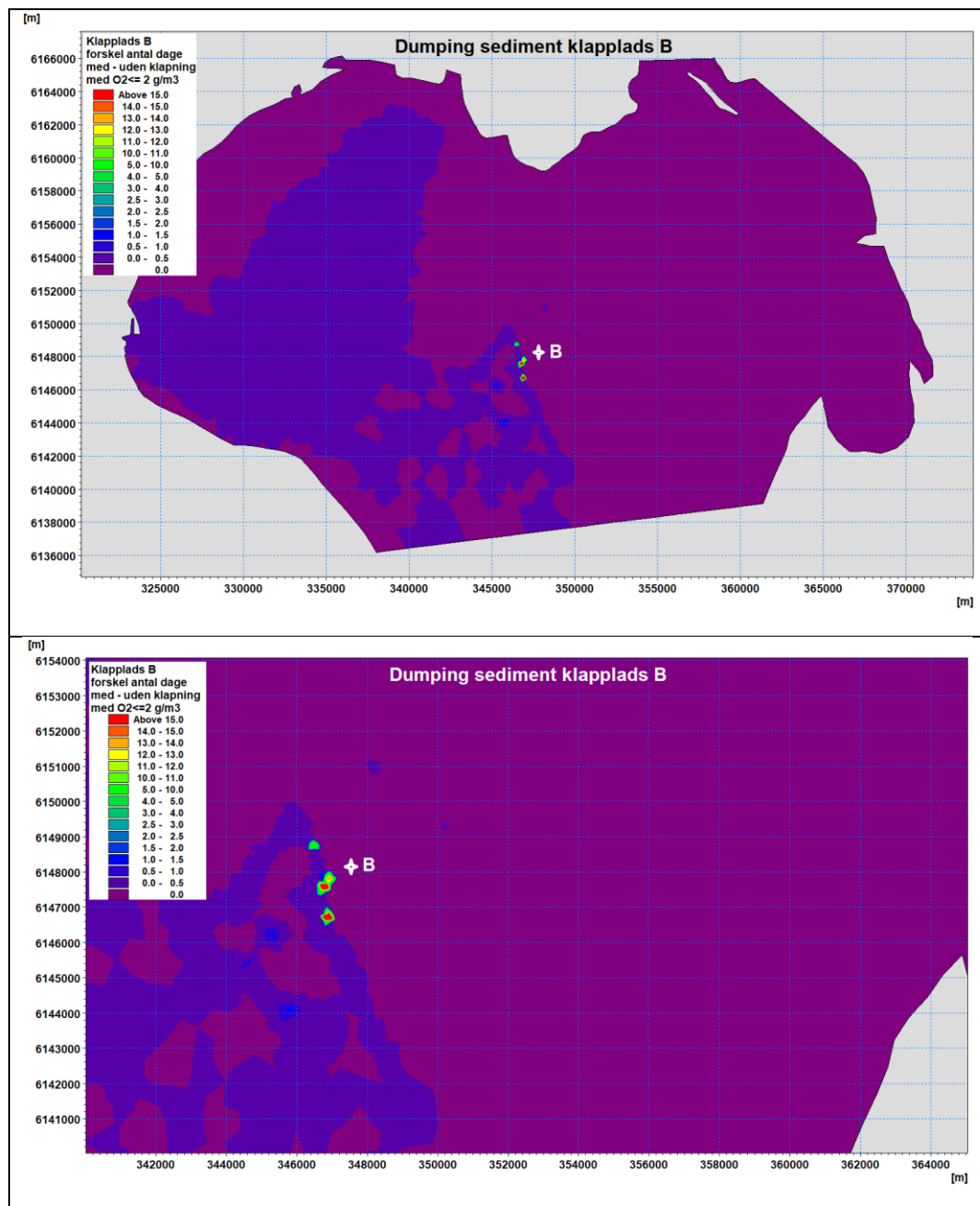


Figur 7-10 Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 4 mg/l i bundlaget. Klappning på plads A alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).

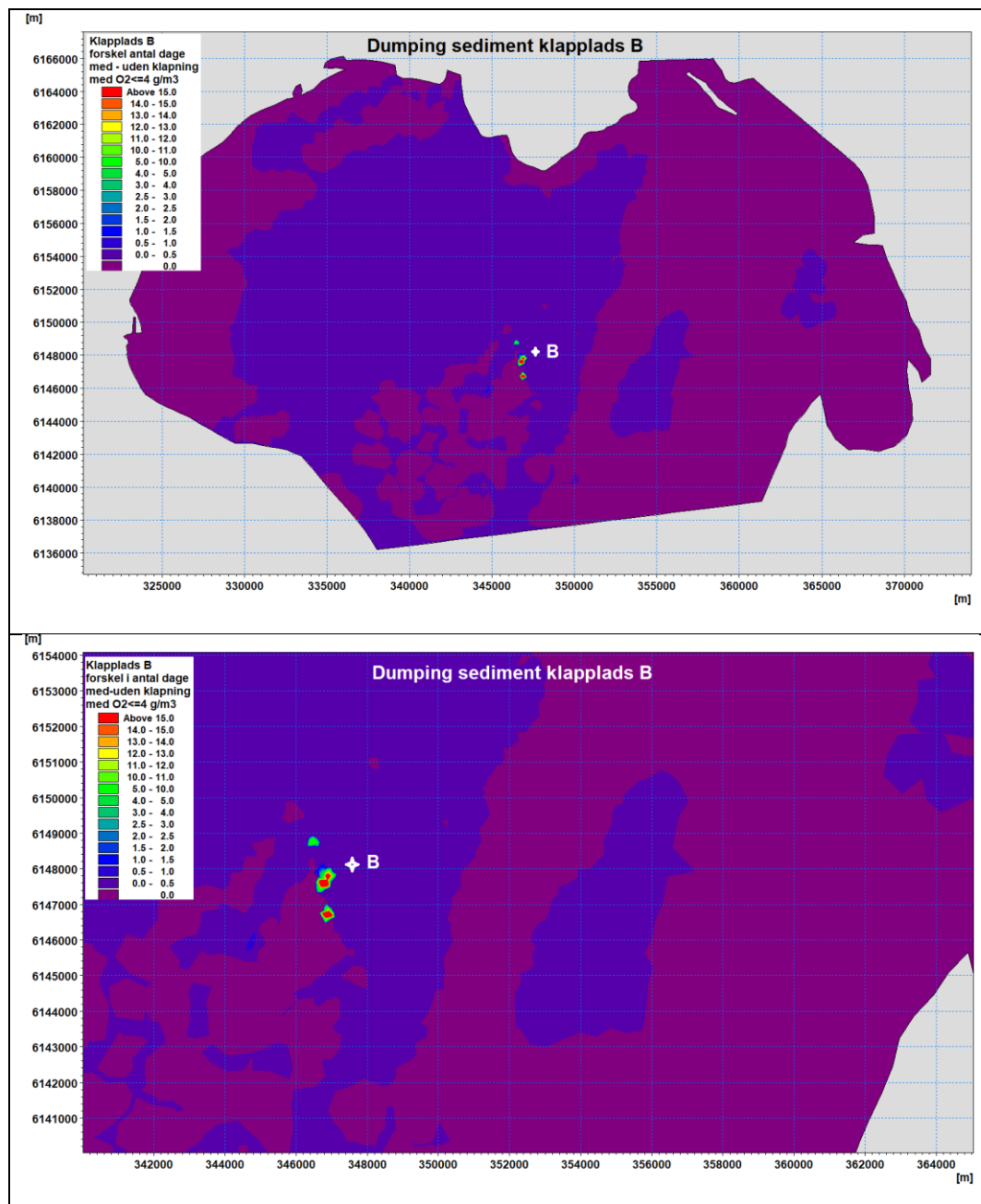


Figur 7-11 Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 1 mg/l i bundlaget. Klapping på plads B alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).





Figur 7-12 Ændring (førøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 2 mg/l i bundlaget. Klappning på plads B alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappladserne).



Figur 7-13 Ændring (forøgelsen) i antal dage med beregnede ilt koncentrationer under 4 mg/l i bundlaget. Klappning på plads B alene, (øverst hele området, nederst et zoom omkring klappadserne).

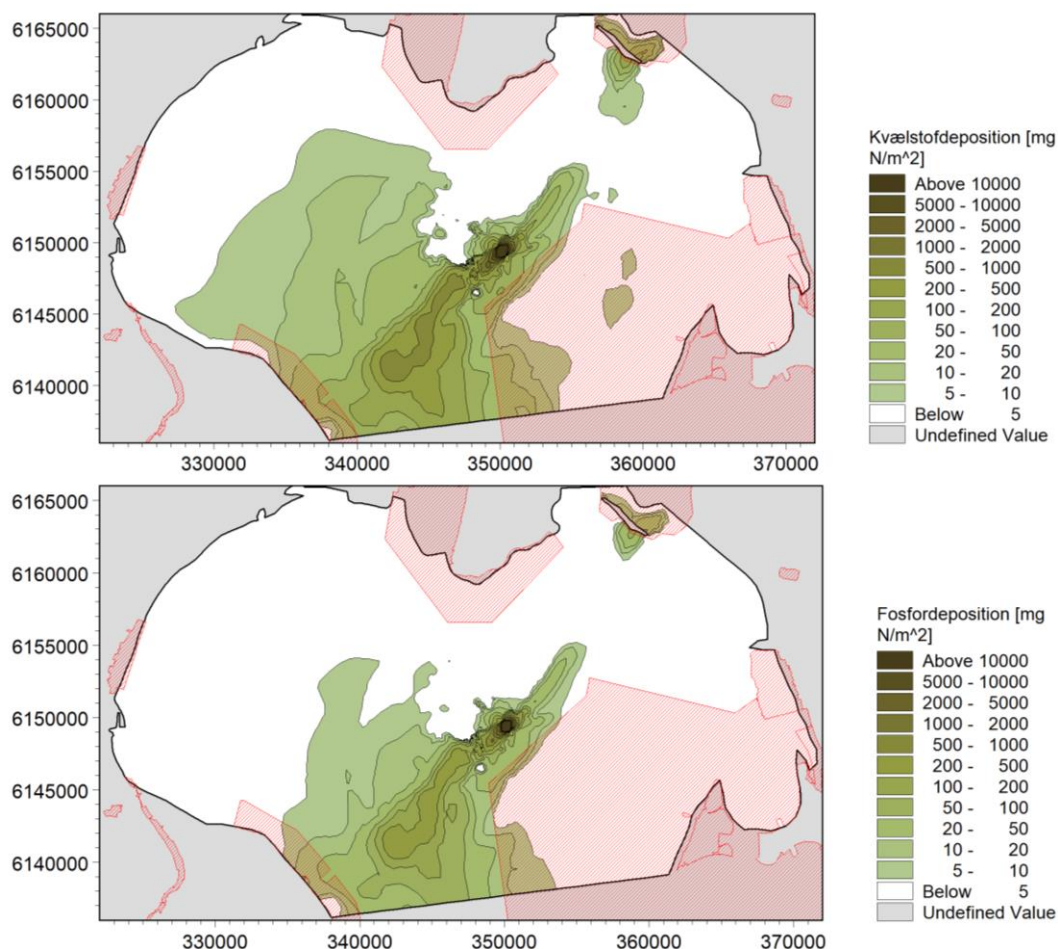
## 8 Kvælstof- og fosfordeposition som følge af klapping

I beregningen af kvælstof- og fosfordeposition er det som en førsteordens tilnærmelse antaget, at begge stoffer forbliver bundet til sedimentet og dermed følger spredningen af dette. For at kunne beregne en spredning af forurenede stoffer er det nødvendigt at kende stofkoncentrationerne i klappmaterialet. For bestemmelse af Total N og Total P er der i tillæg til de 66 prøver beskrevet i afsnit 6 udført yderligere 10 analyser fra dybereliggende lag (3,2 – 5, 2 m). Tabel 8-1 angiver repræsentative stofkoncentrationer for Total af N og P indeholdt i klappmaterialet. Disse stofkoncentrationer bruges til at vurdere den af klapping afledte spredning og tilknyttede kvælstof- og fosfordeposition.

Tabel 8-1 Koncentrationer af Total N og P i sedimentet som repræsenterer lag og områder som skal klappes, ref. /4/.

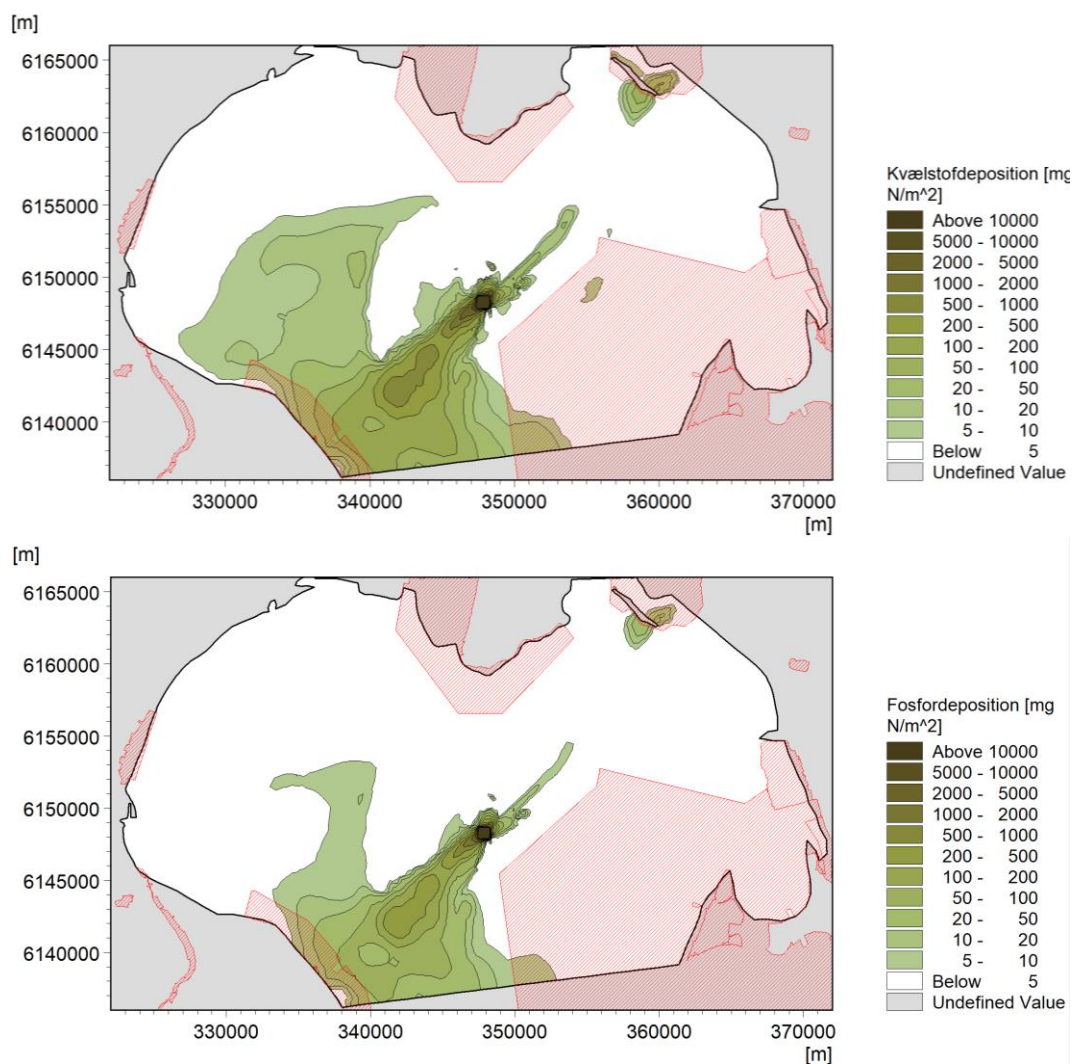
Stof	Enhed	Antal prøver	Gennemsnit
Total N (kvælstof)	mg/kg TS	76	1380
Total P (fosfor)	mg/kg TS	76	588

I Figur 8-1 er der vist beregnet kvælstof- og fosfordeposition efter 1 års klapping og ved brug af klappplads Ka. Kapaciteten af klappplads Ka er for lille til at kunne optage 2 års klappmængder.

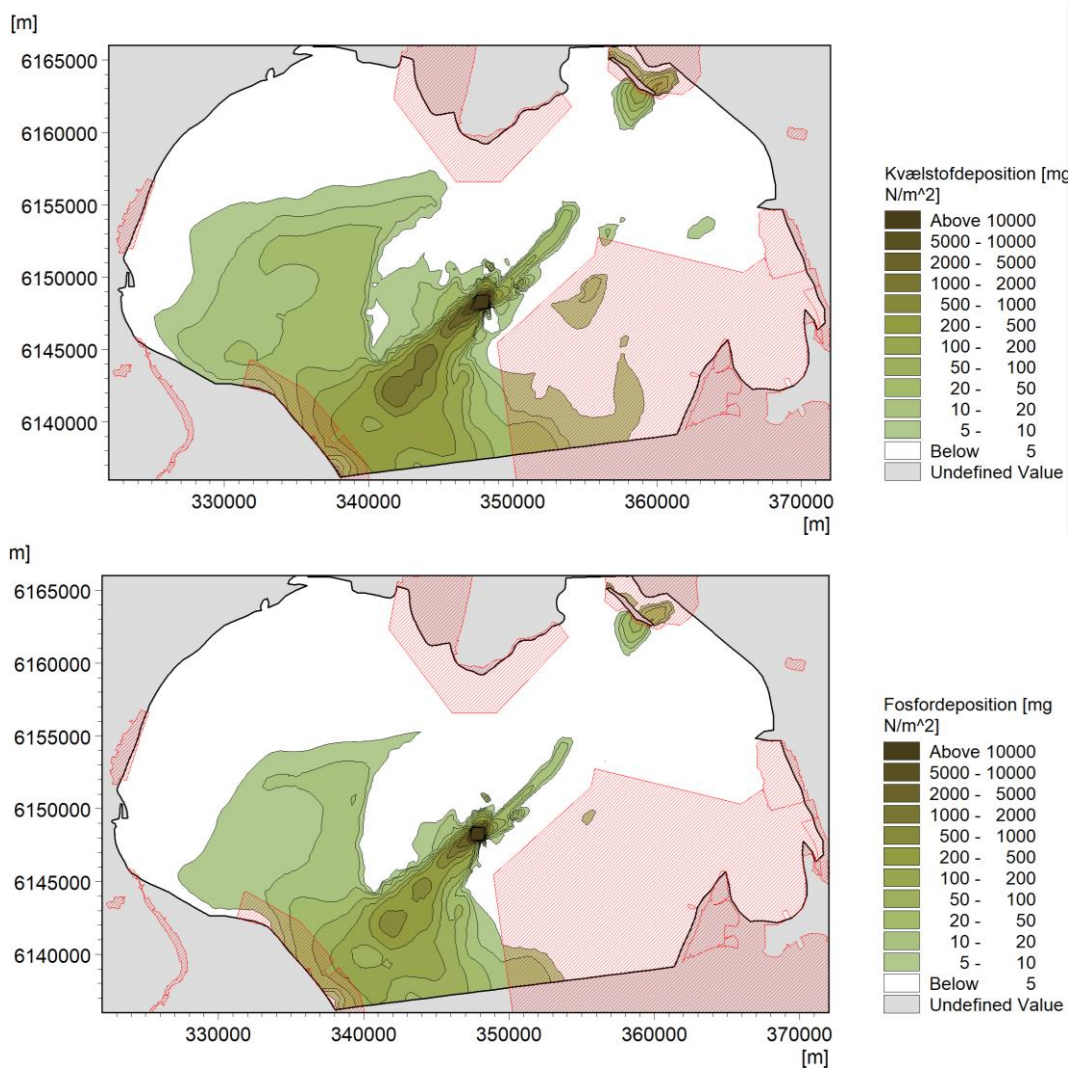


Figur 8-1 Kvælstof- og fosfordeposition efter første års klapping og ved brug af klappplads Ka.

I Figur 8-2 og Figur 8-3 er der vist beregnet kvælstof- og fosfordeposition efter henholdsvis 1 års og 2 års klappning ved brug af klappblads Kp. Kapaciteten af klappblads Kb er stor nok til at kunne optage 2 års klappmængder, idet klappmaterialets forventede løse sammensætning indebærer at en større del af materialet ikke ender på selve klappbladsområdet i forbindelse med klappning.

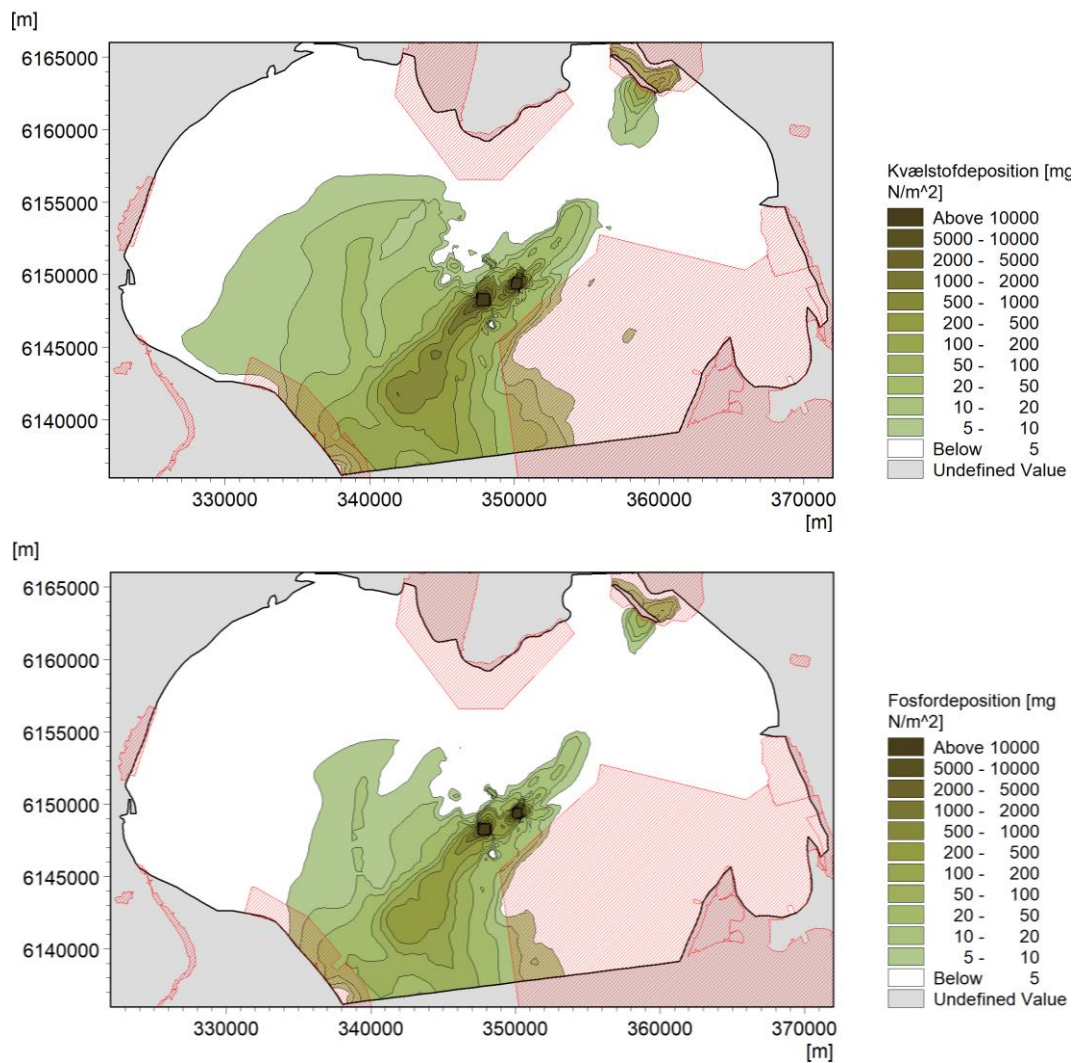


Figur 8-2 Kvælstof- og fosfordeposition efter første års klappning og ved brug af klappblads Kb.

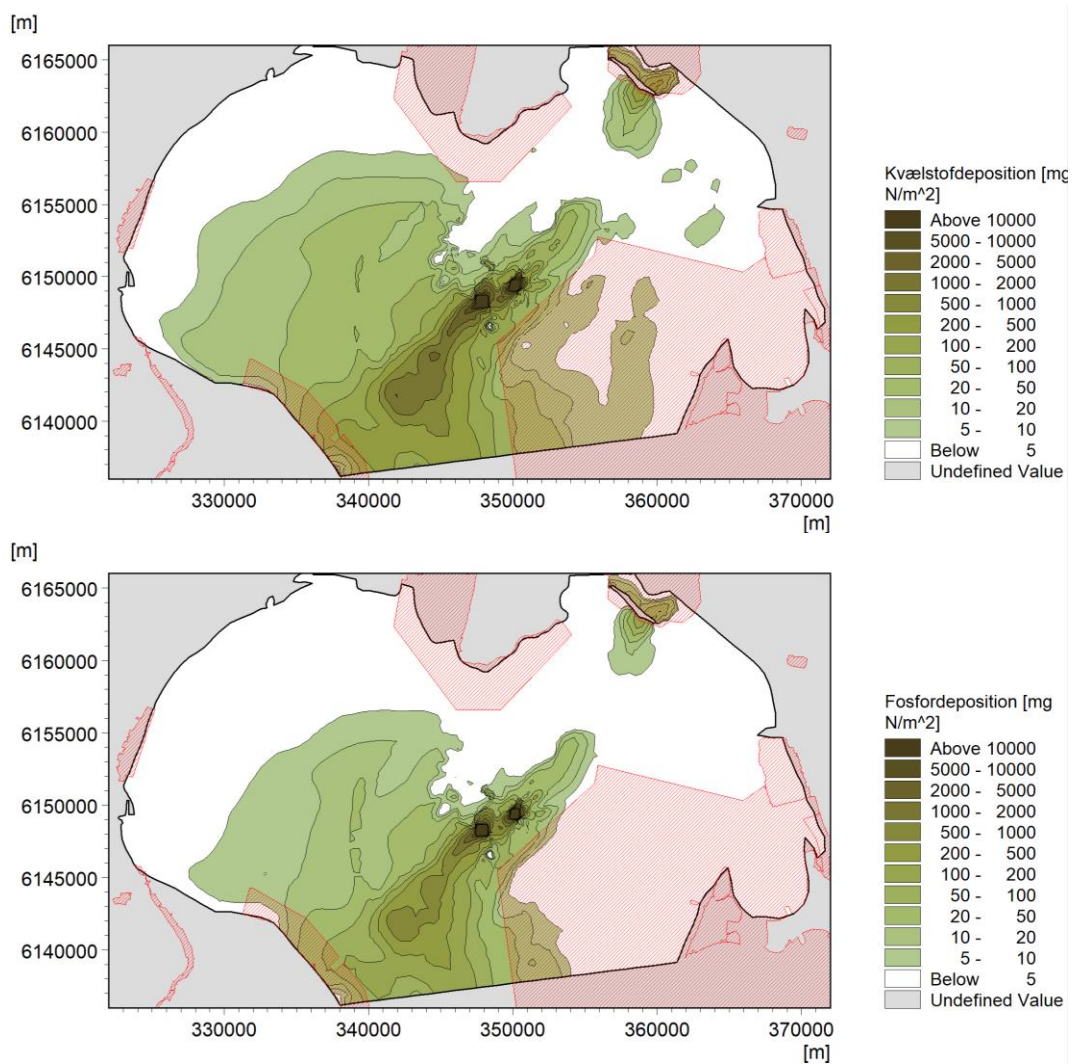


Figur 8-3 Kvælstof- og fosfordeposition efter andet års klapning og ved brug af klappads Kb.

I Figur 8-4 og Figur 8-5 er der vist beregnet kvælstof- og fosfordeposition efter henholdsvis 1 års og 2 års klapning ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb.



Figur 8-4 Kvælstof- og fosfordeposition efter første års klåpning og ved skiftevis brug af klåplads Ka og Kb.



Figur 8-5 Kvælstof- og fosfordeposition efter andet års klapping og ved skiftevis brug af klappads Ka og Kb.

## 9 Referencer

- /1/ DHI: Anlæg af Lynetteholm. VVM – Teknisk Baggrundsrapport nr. 1. Hydrauliske undersøgelser. Version endelig 1.6, 2. november 2020.t
- /2/ COWI for By & Havn: Lynetteholm, Datarapport, Sedimentationsforsøg, maj 2020.
- /3/ Grontmij | Carl Bro: Klappning af havbundsmaterialer i forbindelse med udvidelse af Københavns Nordhavn – Sedimentspredningsberegninger, marts 2011.
- /4/ COWI for By & Havn: Lynetteholm, Datarapport, Miljøkemi, PD-GEO-RP-014, Vers. 3.0, 28-08-2020.
- /5/ Vejledning fra By- og Landskabsstyrelsen. Dumpning af optaget havbundsmateriale – klappning.
- /6/ Bekendtgørelse 1625 af 19.12.2017 om fastlæggelse af miljømål for vandløb, søer, overgangsvande, kystvande og grundvand.



## BILAG

# BILAG A – Ilforbrug

## Risiko for iltsvind

## A Iltmodel

Iltmodellen består af 12 tilstandsvariable med tilhørende differentialligninger se Tabel A - 1.

Tabel A - 1 Iltmodellens tilstandsvariable

State Variable	Explanation & unit
DO (oxygen)	Dissolved oxygen, g/m <sup>3</sup>
BODsusp	BOD suspended, g/m <sup>3</sup>
BODdis	BOD dissolved, g/m <sup>3</sup>
H2S	H2S, Hydrogen Sulphide, g S/m <sup>3</sup>
BODsed	BOD sediment, g/m <sup>2</sup>
SH2S	SH2S, sediment reduced substances as g H2S-S/m <sup>2</sup>
Sum_BODsuspDepoM2	Accumulated deposition of BODsusp over time, g/m <sup>2</sup>
Sum_BODsedResM2	Accumulated resuspension of BODsed over time, g/m <sup>2</sup>
Sum_GRPRPC	Accumulated gross phytoplankton primary production, g C/m <sup>2</sup>
sum_TDO_4	Accumulated time with DO≤4 mg/l in bottom layer, days
sum_TDO_2	Accumulated time with DO≤2 mg/l in bottom layer, days
sum_TDO_1	Accumulated time with DO≤1 mg/l in bottom layer, days

De tilhørende differentialligninger er beskrevet nedenfor.

**Ilt:**

$$\frac{dDO}{dt} = \text{reaera} + \text{phtsyn} - \text{SOXI2do} - \text{respT} - \text{BODsusDecay} - \text{BODdisDecay} \\ - \text{BODsed\_min} - \text{SED\_respM3}$$

Hvor iltprocesserne er beskrevet i Tabel A - 2.

Tabel A - 2 Iltprocesser i differentieringen til ilt (DO). Type P: proces

Name	Explanation & unit	Type
reaer	Reaeration, g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
phytsyn	Photosynthesis in water column, g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
SOXI2do	DO consumption, H <sub>2</sub> S→SO <sub>4</sub> , g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
respT	DO consumption, respiration by plants & bacteria, g/m <sup>3</sup> /d	P
BODsusDecay	Degradation of suspended BOD, g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
BODdisDecay	Degradation of BOD dissolved g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
BODsed_min	Degradation of BOD in sediment, g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d	P
SED_respM3	Sediment "background" respiration, g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P

**BOD suspendered:**

$$d \frac{BOD_{susp}}{dt} = -BOD_{susDecay} - BOD_{suspSedM3} + BOD_{sedResM3} - BOD_{suspDepo}$$

Hvor BOD<sub>susp</sub> processerne er beskrevet i Tabel A - 3

Tabel A - 3 Processer i differentialligningen til suspenderet BOD. Type P:proces

Name	Explanation & unit	Type
BODsusDecay	Degradation of suspended BOD, g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
BODsuspSedM3	Sedimentation of BOD <sub>susp</sub> , g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
BODsedResM3	Resuspension of BOD <sub>sed</sub> , g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P
BODsuspDepo	Deposition of BOD <sub>susp</sub> , g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P

**BOD opløst:**

$$\frac{BOD_{dis}}{dt} = -BOD_{disDecay}$$

Se Tabel A - 4

Tabel A - 4 Processer i differentialligningen til opløst BOD, Type P: proces.

Name	Explanation & unit	Type
BODdisDecay	Degradation of dissolved BOD, g O <sub>2</sub> /m <sup>3</sup> /d	P

**H<sub>2</sub>S:**

$$d \frac{H_2S}{dt} = -SOXI$$

Se Tabel A - 5

Tabel A - 5 Processer i differentialligningen for H<sub>2</sub>S. Type P: proces

Name	Explanation & unit	Type
SOXI	Oxidation of H <sub>2</sub> S to SO <sub>4</sub> , g S/m <sup>3</sup> /d	P

**BODsed:**

$$d \frac{BODsed}{dt} = -BODsed\_min - BODsedResM2 + BODsuspDepo$$

Se Tabel A - 6

Tabel A - 6 Processer i differentialligningen for BODsed. Type P: proces

Name	Explanation & unit	Type
BODsed_min	Decay of sediment BOD, g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d	P
BODsedResM2	Resuspension of BODsed to bottom layer, g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d	P
BODsuspDepoM2	Deposition of BODsusp to sediment, g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d	P

**H<sub>2</sub>S i sedimentet (SH<sub>2</sub>S):**

$$d \frac{SH_2S}{dt} = -BODsed\_min - BODsedResM2 + BODsuspDepo$$

Se Tabel A - 7

Tabel A - 7 Processer i differentialligningen for SH<sub>2</sub>S. Type P: proces

Name	Explanation & unit	Type
SOCrh2s	Anoxic mineralisation of SOC to SH <sub>2</sub> S, g S/m <sup>2</sup> /d	P
BODsed_rh2s	Anoxic BODsed mineralisation to SH <sub>2</sub> S, g S/m <sup>2</sup> /d	P
fsh2s	Flux of SH <sub>2</sub> S from reduced sediment (below KDO <sub>2</sub> ) to oxidised sediment, g S/m <sup>2</sup> /d	P
Fsh2s_oxi	Oxidation of SH <sub>2</sub> S in sediment in oxidized zone, g S/m <sup>2</sup> /d	P

**Akkumuleret sedimentation af BOD til sedimentet (Sum\_BODsuspDepoM2)**

$$d \frac{Sum\_BODsuspDepoM2}{dt} = BODsuspDepoM2$$

Se Tabel A - 8

Tabel A - 8 Processer i differentialligningen for Sum\_BODsuspDepoM2. Type P: proces

Name	Explanation & unit	Type
BODsusPDepoM2	Deposition of BODsusp to sediment, g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d	P

**Akkumuleret resuspension af BOD fra sedimentet (Sum\_BODsuspResM2)**

$$d \frac{Sum\_BODsuspResM2}{dt} = +BODsedResM2$$

Se Tabel A - 9

Tabel A - 9 Processer i differentialligningen for Sum\_BODsuspResM2. Type P: proces

Name	Explanation & unit	Type
BODsedResM2	Resuspension of BODsed to bottom layer, g O <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> /d	P

**Sum af plankton produktion (Sum\_GRPRPC):**

$$d \frac{Sum\_GRPRPC}{dt} = GRPRPC$$

Se Tabel A - 10

Tabel A - 10 Proces i differentialligningen for Sum\_GRPRPC. Type P: proces

Name	Explanation & unit	Type
GRPRPC	Gross primary production plankton, g C/m <sup>2</sup> /d	P

**Akkumuleret bundilt <= 4 mg/l, (Sum\_TDO4)**

$$d \frac{Sum\_TDO4}{dt} = tdo\_4$$

**Akkumuleret bundilt <= 2 mg/l, (Sum\_TDO2)**

$$d \frac{Sum\_TDO2}{dt} = tdo\_2$$

**Akkumuleret bundilt <= 1 mg/l, (Sum\_TDO1)**

$$d \frac{Sum\_TDO1}{dt} = tdo\_1$$

Se Tabel A - 11

Tabel A - 11 Processer i differentialligningen for Sum\_TDO4, Sum\_TDO2 & Sum\_TDO1. Type P: proces.

Name	Explanation & unit	Type
tdo_4	Time DO<=4 mg/l, day	P
tdo_2	Time DO<=2 mg/l, day	P
tdo_1	Time DO<=1 mg/l, day	P

## A.1 Processer, hjælpeprocesser og konstanter

Processerne beskrives i den rækkefølge de optræder i foregående afsnit. I ligningerne for processerne indgår andre processer, hjælpeprocesser, tvangsfunktioner, konstanter og tilstandsvariable.

### A.1.1 Ilt

**Geniltning (reaera)**

Geniltning (reaera) foregår i modellens øverste vertikale lag og beskrives som en funktion af strømhastighed i overfladen (U), vindhastigheden 10m over vandoverfladen (U10) ganget med forskellen mellem iltmætningskoncentrationen (csair) og den aktuelle iltkoncentration (DO) i overfladelaget. Tykkelsen af det øverste lag er dz, m.

$$reaera = 3.93 * \sqrt{U} * \frac{1}{dz^{1.3}} + (2.07 + 0.215 * U10^{1.7}) * \frac{24}{100} * (csair - DO) , g O_2/m^3/d$$

**Fotosyntese i vandet (phtsyn)**

Fotosyntesen beskrives som en funktion af kendt (tvangsfunktion) variation af klorofylkoncentrationen i området (CHL) et C:CHL forhold C<sub>CHL</sub>, et C:O<sub>2</sub> forhold (vo) for fotosyntese, en lysfunktion (flig), en temperatur funktion (f<sub>tem</sub>) samt to Michaelis-Menten

funktioner der beskriver produktionens relation til N og P næringssalte (DIN, DIP). Kn1 og kp1 er halvmætning koncentrationer af næringssaltene. DIN og DIP er tvangsfunktioner, dvs. målte eller modelberegneede koncentrationer af NO<sub>3</sub>+NH<sub>4</sub>, samt PO<sub>4</sub>

$$phtsyn = CHL * C_{CHL} * vo * flig * ftem * \frac{DIN}{(DIN+kn1)} * \frac{DIP}{DIP+kp1}, \text{ g O}_2/\text{m}^3/\text{d}$$

Lysafhængigheden beregnes som en funktion af PAR (fotosyntese aktive lys, mol fotoner/ m<sup>2</sup>/s) i pågældende vandlag samt en hædnings konstant for fotosyntesen (alpa, (mol fotoner/m<sup>2</sup>/s)<sup>-1</sup>) og den maksimale specifikke vækst ved 20 °C (mypc 1/d).

$$flig = (1 - e^{-alpa * \frac{ipar}{mypc}})$$

ipar, dvs. PAR i en given dybde beregnes ud fra lyset (PAR) i overfladen samt lyssvækkelsen i vandet, der beregnes ud fra målte eller modelberegneede tidslig udvikling af områdets secchi dybde. Den daglige variation af PAR i overfladen er en tvangsfunktion, dvs. at der benyttes enten målte eller modelberegneede PAR i overfladen.

I dette tilfælde er PAR i overfladen (ios) beregnet separat ud fra modelberegnet cloudines (% skydække) samt tidpunk, længdegrad og breddegrad.

Temperaturafhængigheden (ftem) beskrives ud fra en referencetemperatur på 20 °C og temperaturen (temp), hvor tetg er en konstant (ca. 1.04).

$$ftem = tetg^{(temp-20)}$$

### **Oxidering af H<sub>2</sub>S (SOXI2do)**

Iltforbrug ved oxidering af H<sub>2</sub>S til SO<sub>4</sub> (SOXI2do) beskrives som en temperatur afhængig 1. ordens henfaldskonstant ved 20 °C (ksd, 1/d) ganget koncentrationen af H<sub>2</sub>S samt en funktion af iltkoncentrationen (sqdo). Hvor vsh g O<sub>2</sub>/g S.

$$SOXI2do = kse * ksf^{(temp-20)} H2S * sqdo * vsh$$

### **Respiration fra planter & bakterier i vandet (respT)**

Vandets respiration der skyldes planteplankton og bakterier beskrives ud fra målt eller modelberegnet respiration ved 20 °C (resp, g O<sub>2</sub> m<sup>3</sup>/d) og iltkoncentrationen (DO)

$$respT = resp * tetat2^{(temp-20)} * \frac{DO}{DO + mdo}$$

### **Henfald af suspenderet BOD (BODsusDecay)**

Henfaldet af suspenderet BOD (BODsus) er en funktion af en 1. ordens henfaldsrate ved 20 °C, koncentrationen af BODsus og en funktion af iltkoncentrationen (sqdo).

$$BODsusDecay = BODsusDecayRate * tetBODsus2^{(temp-20)} * BODsus * sqdo$$

### **Henfald af opløst BOD (BODdisDecay)**

Henfaldet af opløst BOD (BODdis) er en funktion af en 1. ordens henfaldsrate ved 20 °C, koncentrationen af BODdis og en funktion af iltkoncentrationen (sqdo).



$$BODdisDecay = BODdisDecayRate * tetBODdis2^{(temp-20)} * BODdis * sqdo$$

### **Sediment respiration SED\_respM3**

Sedimentets iltforbrug beskrives ud fra 3 processer, sedimentets "baggrunds" respiration bestemt af puljen af organisk C i sedimentets øverste 10 cm SOCresp, g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>/d, samt af henfaldet af BOD i sedimentet (BODsed\_resp) samt oxideringen af sedimentets H<sub>2</sub>S pulje (fsh2s\_oxi, g S/m<sup>2</sup>/d), hvor vsh er en konstant (g O<sub>2</sub>/g S) og dz lagtykkelsen af bundlaget i m.

$$SED_{respM3} = (SOCresp + BODsed\_resp + fsh2s\_oxi * vsh)/dz$$

### **Sedimentets "baggrunds" respiration SOCresp**

Sedimentets baggrundsrespiration beskrives som et iltforbrug der skyldes en mineralisering af sedimentets pulje af organisk C (SOC) i de øverste 10 cm. Iltforbruget aktiveres hvis nedtrængningen af ilt i sedimentet (KDO<sub>2</sub>) er større end 0.005 m. Hvis ilt nedtrængningen er mindre end 0.005 m vil mineraliseringen af resultere i en produktion af H<sub>2</sub>S som indgår i sedimentets SH<sub>2</sub>S pulje. Nedtrængningen af ilt i sedimentet beskrives som en funktion af iltkoncentrationen i bundlaget.

If KDO<sub>2</sub>>0.005 then:

$$SOCresp = krsc1 * krsc2 * SOC * tetc^{(temp-20)} * vo * sqdo, \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{d}$$

Else 0

Krsc1 er en henfaldskonstant (1/d), krsc2 et konstant der bestemmer hvor mineraliserbart SOC er ud fra sedimentets C:N forhold, SOC er sedimentets pulje af organisk C, vo er O:C forholdet og sqdo en funktion af iltkoncentrationen i bundlaget og kan antage en værdi mellem 0 og 1. SOC og sedimentets N indhold beregnes ud fra kort over bølgers og strøms forskydningsspænding samt relationer mellem forskydningsspænding og bundtypers indhold af organisk C og N.

### **Sedimentets iltforbrug af BODsed (BODsed\_resp)**

Sedimentets iltforbrug der skyldes henfald af BOD i sedimentet, er en funktion af en 1. ordens temperaturafhængigt henfald (k\_BODsed, 1/d), puljen af BOD i sedimentet (BODsed, g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>) samt en funktion sqdo af ilt koncentrationen i bundvandet.

If KDO<sub>2</sub>>0.005 then:

$$BODsed_{resp} = k_{BODsed} * tetaBODsed^{(temp-20)} * BODsed * sqdo, \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{d}$$

Else 0

### **Sedimentets oxidering af H<sub>2</sub>S (fsh2s\_oxi)**

Sedimentets pulje af H<sub>2</sub>S (SH<sub>2</sub>S) diffunderer (difh2s, m/d) langsomt ind i sedimentets oxiderede zone (KDO<sub>2</sub>) fra dybereliggende lag, hvor der sker en oxidering til SO<sub>4</sub>. vsh er en konstant (gO<sub>2</sub>/g S).

If KDO<sub>2</sub>>0.005 then:

$$fsh2s_{oxi} = \frac{difh2s}{(KDO2-0.005)} * SH2S * sqdo * vsh, \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{d}$$

Else 0

## A.1.2 Suspenderet BOD (BOD<sub>susp</sub>)

### Henfald af suspenderet BOD (BOD<sub>susDecay</sub>)

Se under ilt

### Sedimentation af suspenderet BOD (BOD<sub>suspSedM3</sub>)

Sedimentationen af suspenderet BOD beskrives ud fra en sedimentationsrate (sedRate, 1/d)

$$BOD_{suspSedM3} = \frac{sedRate}{dz} * BOD_{susp}, \text{ g BOD/m}^3/\text{d}$$

### Resuspension af BOD<sub>sed</sub> (BOD<sub>sedResM3</sub>)

Resuspensionen af BOD<sub>sed</sub> til BOD<sub>susp</sub> i bundlaget beskrives som en funktion af bølgernes og strømmens forskydningsspænding (T<sub>wc</sub>), som er en tvangsfunktion beregnet med en anden model. Overskrider T<sub>wc</sub> den kritiske forskydningsspænding (T<sub>ce1</sub>) forekommer en resuspension af en styrke som bestemmes af konstanterne E1 (g BOD/m<sup>2</sup>/s) og E<sub>n</sub>.

$$BOD_{sedResM3} = E1 * 86400 * POW \left( \left( \frac{T_{wc}}{T_{ce1}} - 1 \right), E_n \right) * BOD_{sed} * \frac{1}{dz}, \text{ g BOD/m}^3/\text{d}$$

## A.1.3 Opløst BOD (BOD<sub>dis</sub>)

### Henfald af BOD<sub>dis</sub> i vandet (BOD<sub>disDecay</sub>)

Se under ilt

## A.1.4 H<sub>2</sub>S i vandet

### Oxidering af H<sub>2</sub>S i vandet (SOXI)

Oxidering af H<sub>2</sub>S til SO<sub>4</sub> (SOXI) beskrives som en temperaturafhængig 1. ordens henfaldskonstant ved 20 °C (k<sub>sd</sub>, 1/d) ganget koncentrationen af H<sub>2</sub>S samt en funktion af iltkoncentrationen (sqdo).

$$SOXI = k_{se} * k_{sf}^{(temp-20)} H2S * sqdo$$

## A.1.5 BOD i sedimentet (BOD<sub>sed</sub>)

### Henfald af BOD i sedimentet (BOD<sub>sed\_min</sub>)

Mineralisering af sedimentets BOD er et 1. ordens temperaturafhængigt henfald (k<sub>BODsed</sub>, 1/d) af BOD puljen i sedimentet (BOD<sub>sed</sub>, g O<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>). henfaldet kan enten resultere i et sediment iltforbrug hvis der er ilt i bundvandet eller en produktion af SH<sub>2</sub>S.

$$BOD_{sed\_min} = k_{BODsed} * teta_{BODsed}^{(temp-20)} * BOD_{sed}, \text{ g BODsed/m}^2/\text{d}$$

### Deposition af BOD<sub>susp</sub> til BOD<sub>sed</sub> (BOD<sub>suspDepoM2</sub>)

I bundlaget sker der en sedimentation af BOD<sub>susp</sub> til puljen af BOD<sub>sed</sub>

$$BOD_{suspDepoM2} = BOD_{suspSedM3} * dz, \text{ g BOD/m}^2/\text{d}$$

### **Resuspension af BOD fra sedimentet til vandet (BODsedResM2)**

Der forekommer en resuspension af BOD fra sedimentet hvis den bølge og strømgenererede bundforskydning er større end den kritiske forskydningspænding, se afsnittet med suspenderet BOD

$$BODsedResM2 = BODSedResM3 * dz, \text{ g BOD/m}^2/\text{d}$$

## A.1.6 H<sub>2</sub>S i sedimentet (SH2S)

### **Mineralisering af SOC til H<sub>2</sub>S i sedimentet (SOCrh2s)**

I afsnittet under Ilt beskrives sedimentets "baggrunds" iltforbrug hvis der er ilt i bundvandet og ilten trænger 0.005 m ned i sedimentet (KDO2) ifølge nedenstående relation:

If KDO2>0.005 then:

$$SOCresp = krsc1 * krsc2 * SOC * tetc^{(temp-20)} * vo * sqdo, \text{ g O}_2/\text{m}^2/\text{d}$$

Else 0

I tilfælde af at der ikke er tilstrækkeligt ilt i bundvandet således at det oxiderede lag (KDO2) er mindre end 0.005 m mineraliseres SOC via sulfatreduktion hvilket resulterer i en produktion af H<sub>2</sub>S i sedimentet:

If KDO2<=0.005 then:

$$SOCrh2sp = krsc1 * krsc2 * SOC * tetc^{(temp-20)} * vsc, \text{ g S/m}^2/\text{d}$$

Else

$$SOCrh2sp = krsc1 * krsc2 * SOC * tetc^{(temp-20)} * vsc * (1 - sqdo), \text{ g S/m}^2/\text{d}$$

I tilfælde af at iltkoncentrationen i bundvandet er lav (dvs. sqdo <1) vil mineraliseringen af SOC dels resultere i et iltforbrug samt en produktion af H<sub>2</sub>S i sedimentet under KDO2. konstanten vsc er S:C forholdet for sulfatreduktionen til H<sub>2</sub>S ved mineralisering af organisk stof.

### **Henfald af BOD i sedimentet under iltfrie forhold ved reduktion af SO<sub>4</sub> (BODsed\_rh2s)**

Henfaldet af BOD i sedimentet, der er beskrevet under BODsed, kan ske ved at der udløses et iltforbrug hvis der er ilt i bundvandet eller en produktion af H<sub>2</sub>S ved reduktion af SO<sub>4</sub> se nedenstående lignings system.

If KDO2<=0.005 then:

$$BODsed_{rh2s} = BODsed_{min} * \frac{1}{vsh}, \text{ g S/m}^2/\text{d}$$

Else

$$BODsed_{rh2s} = BODsed_{min} * \frac{1}{vsh} * (1 - sqdo), \text{ S/m}^2/\text{d}$$

Funktionen  $\alpha_{DO}$  er en funktion af iltkoncentrationen i bundvandet som har værdier 0 til 1 alt efter hvor meget ilt der er i vandet.

### **Flux af H<sub>2</sub>S i sedimentet op i sedimentets oxiderede zone eller op i bundvandet (fsh2s)**

Fluxen beskrives ved nedenstående ligningssystem

If  $K_{DO2} \leq 0.005$  then:

$$f_{sh2s} = SH_{2S} * \frac{diff_{h2s}}{K_{DO2}}, \text{ g S/m}^2/\text{d}$$

Else 0

### **Oxidering af H<sub>2</sub>S i sedimentets oxiderede zone (fsh2s\_oxi)**

Se under afsnittet om ilt.

#### **A.1.7 Akkumuleret deponering af BOD<sub>susp</sub> i sedimentet (Sum\_BOD<sub>susp</sub>DepoM2)**

Modellen beregner den over tid akkumulerede mængde af suspenderet BOD (BOD<sub>susp</sub>) der sedimenterer til sedimentets pulje af BOD (BOD<sub>sed</sub>). Dette BOD kan resuspenderes af bølger og strøm.

Deponering af BOD<sub>susp</sub> til sedimentet (BOD<sub>susp</sub>DepoM2)

$$Sum\_BOD_{susp}DepoM2 = SBOD_{susp}DepoM2, \text{ g BOD/m}^2/\text{d}$$

BOD<sub>susp</sub>DepoM2 er beskrevet under BOD<sub>susp</sub>.

#### **A.1.8 Akkumuleret resuspension af BOD<sub>sed</sub> fra sedimentet (Sum\_BOD<sub>sed</sub>ResM2)**

Modellen beregner den over tid akkumulerede mængde af sedimentets BOD (BOD<sub>sed</sub>) der resuspenderes til vandets pulje af BOD (BOD<sub>susp</sub>). Dette BOD kan sedimentere igen til sedimentets pulje af BOD.

Resuspension af BOD<sub>sed</sub> fra sedimentet (BOD<sub>sed</sub>RespM2)

$$Sum\_BOD_{sed}ResM2 = BOD_{sed}ResM2, \text{ g BOD/m}^2/\text{d}$$

BOD<sub>sed</sub>ResM2 er beskrevet under BOD<sub>susp</sub>.

#### **A.1.9 Akkumuleret bruttoproduktion af plankton (Sum\_GRPRPC)**

Den akkumulerede bruttoproduktion af plankton pr. m<sup>2</sup> sker ved en beregning af den dybde integrerede gennemsnitlig produktion ganget med dybden.

$$GRPRPC = water\_column\_average\left(\frac{pytsyn}{v_o}\right) * depth, \text{ g C/m}^2/\text{d}$$

#### A.1.10 Akkumuleret tid med bundilt $\leq 4$ mg/l (TDO\_4)

Den akkumulerede tid med iltkoncentrationer over bunden mindre eller lig 4 mg/l beregnes ved integration af følgende proces:

IF DO $\leq$ 4 THEN

$t_{do\_4} = 1$  , dag

ELSE 0

#### A.1.11 Akkumuleret tid med bundilt $\leq 2$ mg/l (TDO\_2)

Den akkumulerede tid med iltkoncentrationer over bunden mindre eller lig 2 mg/l beregnes ved integration af følgende proces:

IF DO $\leq$ 2 THEN

$t_{do\_2} = 1$  , dag

ELSE 0

#### A.1.12 Akkumuleret tid med bundilt $\leq 1$ mg/l (TDO\_1)

Den akkumulerede tid med iltkoncentrationer over bunden mindre eller lig 2 mg/l beregnes ved integration af følgende proces:

IF DO $\leq$ 1 THEN

$t_{do\_1} = 1$  , dag

ELSE 0

## A.2 1. Ordens BOD henfaldskonstanter

Det klappede sediments iltforbrug (SOD) over tid kan beskrives ud fra nedenstående formelapparat:

$$SOD_t = SOD_{168} * (1 - e^{-K*t}), \text{ g BOD}$$

Hvor  $SOD_t$  er den akkumulerede SOD til tiden t og  $SOD_{168}$  er det akkumulerede SOD efter 168 timer. K er 1. ordens henfaldskonstanten (1/d).

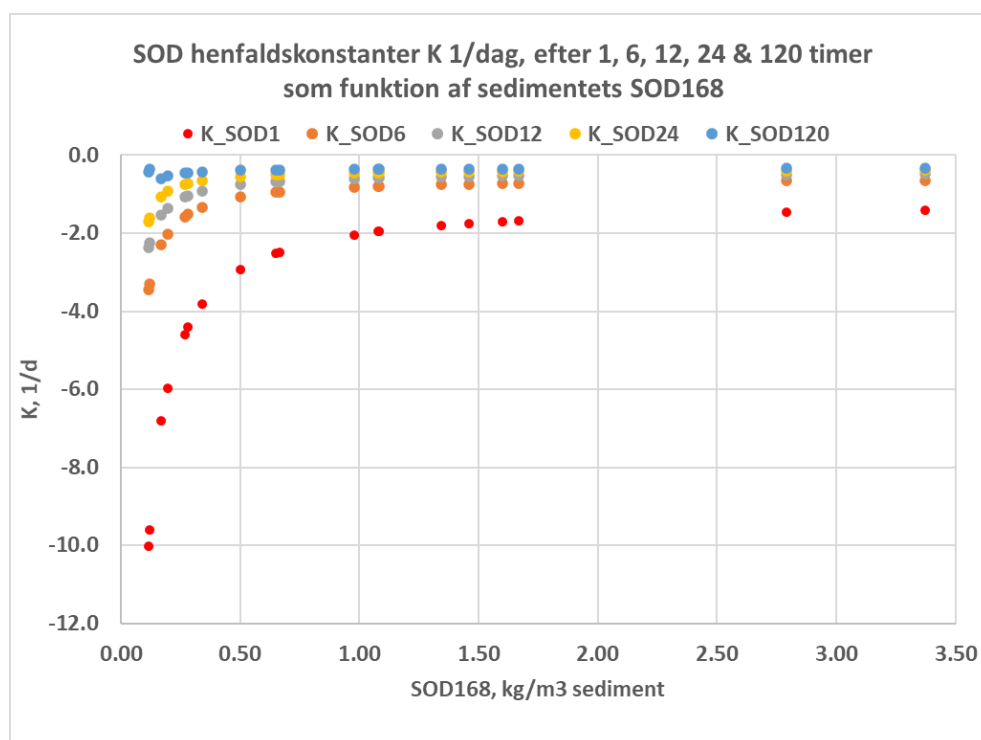
K findes ud fra følgende relation ved kendt  $SOD_{168}$  (7 døgn).

$$K = \ln \left( \frac{SOD_t}{SOD_{168}} - 1 \right) * \frac{1}{t}, \text{ 1/d}$$

I Figur A - 1 er 1. ordenshenfaldskonstanterne for hhv. 1, 6, 12, 24 og 120 timer præsenteret som funktion af sedimentets SOD efter 168 timer. Det fremgår af figuren at henfaldet K ændrer sig over tid hvor K er størst efter 1 time og faldende efter 6, 12, 24, og 120 timer.

Dette resulterer i at SOD opdeles i 3 puljer af BOD.

- En pulje af med høj K som repræsenterer BOD ved oxidering af H<sub>2</sub>S. Denne pulje defineres ved iltforbruget efter 1 time.
- En pulje med en mellemhøj K som repræsenterer BOD ved oxidering af opløst BOD (BODdis). Denne pulje defineres ved iltforbruget fra 1-12 timer.
- En tredje pulje med relativ lav K som repræsenterer BOD ved oxidering af partikulært bundet BOD (BODsus). Denne pulje defineres ved iltforbruget fra 12 timer til 168 timer.



Figur A - 1 K 1. ordens henfaldskonstanter efter 1, 6, 16 24 og 120 timer som funktion af det klappede sediments SOD<sub>168</sub>

I Tabel A - 12 er de anvendte 1. ordens henfaldskonstanter præsenteret.

Tabel A - 12 1. Ordens henfalds konstanter for H<sub>2</sub>S i vandet og 2 puljer af BOD.

Pulje	Henfaldskonstant 20 °C, K, 1/døgn
H <sub>2</sub> S i vandet	2,28
BOD opløst i vandet	0,64
BOD partikulært i vandet	0,37