

Hirtshals Havn udvidelse

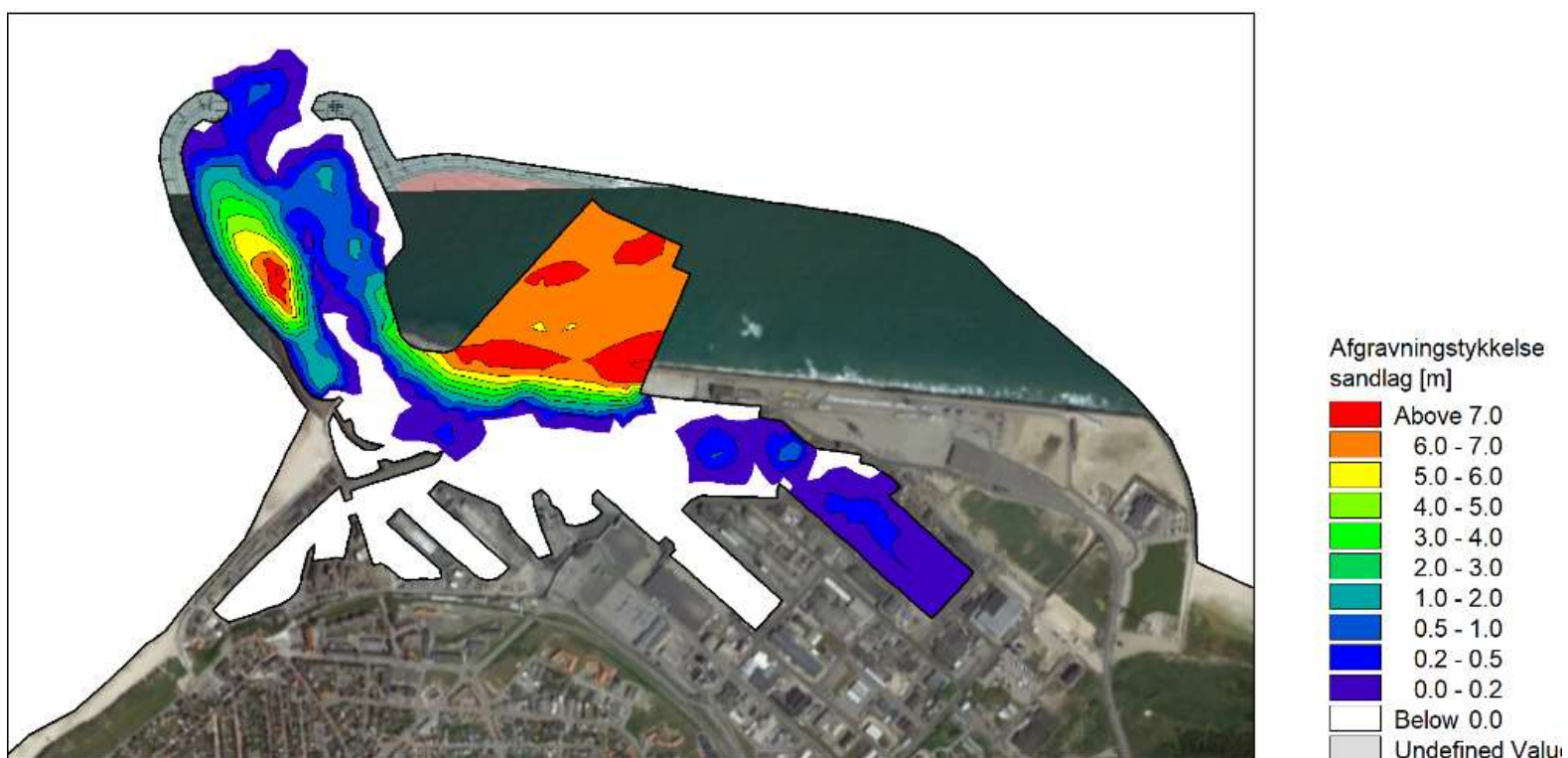
Sedimentspredning ved udvidelse af Hirtshals Havn

Rapport
Projektnr. 11829317

Dato 20-10-2023



**PORT OF
HIRTSHALS**
HIRTSHALS HAVN
Udarbejdet for Hirtshals Havn



Hirtshals Havn udvidelse

Sedimentspredning ved udvidelse af Hirtshals Havn

Rapport
Projektnr. 11829317

Udarbejdet for: Hirtshals Havn
Repræsenteret ved: Niels Kiersgaard

Kontaktperson: Niels Kiersgaard, nk@portofhirtshals.dk
Projektleder: Bo Brahtz Christensen
Kvalitetsansvarlig: Kasper Kærgaard
Udarbejdet af: Bo Brahtz Christensen
Projektnr.: 11829317
Godkendt af: Kasper Kærgaard>
Godkendelsesdato: 20. oktober 2023
Revision: Final 1.2
Klassifikation: **Begrænset**
Filnavn: 11829317-Sedimentspredning ved udvidelse af Hirtshals Havn-Final-1.2.docx

Indholdsfortegnelse

1	Introduktion	8
2	Sammenfatning	9
3	Metodebeskrivelse	12
3.1	Hydrodynamisk model	12
3.2	Gravespild	12
3.3	Klappingsbeskrivelse nærfelt	13
4	Datagrundlag	15
4.1	Havneudvidelsen	15
4.2	Batymetrisk grundlag	16
4.3	Jordbundsforhold	16
4.4	Vandstandsmålinger	19
4.5	HD modellens drivdata	19
5	Modelopsætning	21
5.1.1	Batymetri og beregningsnet	21
5.1.2	Modellens drivdata	22
5.1.3	Lokal verifikation af model	23
5.1.4	Vandudveksling gennem havnemunding	25
6	Sedimentspredning relateret til gravespild ved uddybning	27
6.1	Forventede gravemængder	27
6.2	Graveplan	32
6.2.1	Gravespildprocenter	32
6.2.2	Produktionsrater	33
6.2.3	Varighed af gravearbejder	33
6.2.4	Gravespildsrater	33
6.3	Sedimentspredning i forbindelse med uddybning	34
6.3.1	Overskridelsesvarigheder	37
6.3.2	Maksimumkoncentration	41
6.3.3	Aflejring	42
6.4	Opsummering	43
7	Sedimentspredning relateret til klapping af kohæasive materialer	44
7.1	Klap materiale	44
7.2	Tidspunkter for klapping og mængder	45
7.3	Strømforhold på klapplads	47
7.4	Bølgeforhold på klapplads	49
7.5	Sedimentspredning i forbindelse med klapping	50
7.5.1	Overskridelsesvarigheder	50
7.5.2	Maksimumkoncentration	54
7.5.3	Aflejring	56
7.6	Opsummering	58
8	Sedimentspredning relateret til bypass af ikke-kohæasive materialer	59
8.1	Bypass materiale	60
8.2	Tidsskalaer for områdets dynamik	61
8.3	Strømforhold på bypasspladsen	63
8.4	Bølgeforhold på bypasspladsen	66
8.5	Bypass af 180.000 m ³ under forhold som i februar 2021	67
8.6	Migration af 180.000 m ³ bypass materiale februar 2021	72

8.7	Bypass af 180.000 m ³ under forhold som i oktober 2021	75
8.8	Migration af 180.000 m ³ bypass materiale oktober 2021	79
8.9	Opsummering	81
9	Sedimentspredning relateret til kystnær bypass.....	82
10	Referencer	85

Figurer

Figur 1-1	Planlagt havneudvidelse.	8
Figur 3-1	Nærfeltsbeskrivelse og overførsel til fjernfeltet.	13
Figur 4-1	Plantegning af den fremtidige havneudvidelse med dybdekoter.	15
Figur 4-2	Pejlinger modtaget fra Hirtshals Havn.	16
Figur 4-3	Søkort anvendt til fastlæggelse af batymetri i bassiner hvor der ikke foreligger pejlinger.	16
Figur 4-4	Ler-koter (mDVR90) baseret på borehuller og kajak-kerner. Bemærk fraværet af ler- koter i Øst bassinet.	17
Figur 4-5	Ler-kote overflade i havnen fastlagt ud fra borekerneinformation.	17
Figur 4-6	Kornkurvefordeling i B14 i 3 forskellige dybder.	18
Figur 4-7	Positioner for prøvetagning af M5, M6, M9, M10, M11 og M12.	18
Figur 4-8	Kornkurvefordeling af overfladesedimentet i M5, M6, M9, M10, M11/G30, M11 og M12.	19
Figur 4-9	DMI vandstandsdata fra Hirtshals Havn 2021.	19
Figur 4-10	UKNS2 modellens udstrækning og batymetri, fra ref. /4/.	20
Figur 5-1	Modelområdet udstrækning.	21
Figur 5-2	Model batymetri med fremtidig havneudvidelse uden uddybning og indikation af klapplads, bypassplads og kystnær bypass-plads.	22
Figur 5-3	Model beregningsnet med fremtidig havneudvidelse.	22
Figur 5-4	Sammenligning af UKNS2 modelleret vandtemperatur ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.	23
Figur 5-5	Sammenligning af UKNS2 modelleret saltholdighed ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.	23
Figur 5-6	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 1. kvartal 2021.	24
Figur 5-7	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 2. kvartal 2021.	24
Figur 5-8	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 3. kvartal 2021.	24
Figur 5-9	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 4. kvartal 2021.	24
Figur 5-10	Modelleret vandføring i den kommende nye havnemunding.	25
Figur 5-11	Modelleret ud- og indstrømning i den kommende ny havnemunding.	25
Figur 5-12	Modelleret ændring i vandvolumen i havnen i forhold til initialvandstand.	26
Figur 6-1	Batymetri forud for uddybning med nedbrudte bølgebrydere.	27
Figur 6-2	Batymetri efter uddybning.	27
Figur 6-3	Estimerede afgravningstykkelser med sandholdigt sediment.	28
Figur 6-4	Estimerede afgravningstykkelser med siltholdigt sediment.	28
Figur 6-5	Estimerede afgravningstykkelser med lerholdigt sediment.	28
Figur 6-6	Områdeinddeling i 5 zoner.	29
Figur 6-7	Diagram til klassificering af jordtyper, ref. /6/.	30
Figur 6-8	Eksempel på flokkulationsfaktor som funktion af partikel-diameter, ref. /12/.	31
Figur 6-9	Antaget gravesekvens og gravespilsrater.	34
Figur 6-10	Beregnet sedimentflux gennem havnemunding, som følge af uddybningsarbejder. ...	35
Figur 6-11	Kumuleret sedimenttab gennem havnemunding opgjort på ler fraktion, silt fraktion, sand fraktion og alle fraktioner.	35

Figur 6-12	Øjebliksbillede af sedimentfane under uddybning af indsejlingen i en periode med sydvestgående strøm.	36
Figur 6-13	Øjebliksbillede af sedimentfane under uddybning af indsejlingen i en periode med østgående strøm.	36
Figur 6-14	Øjebliksbillede af sedimentfane under uddybning af indsejlingen i en periode med sydvestgående strøm kort tid efter en strømvending.	37
Figur 6-15	Varighed med overskridelse af 2 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.	38
Figur 6-16	Varighed med overskridelse af 5 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.	39
Figur 6-17	Varighed med overskridelse af 10 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.	40
Figur 6-18	Varighed med overskridelse af 15 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.	41
Figur 6-19	Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet.	42
Figur 6-20	Aflejringskort for gravespild. Enheden 1 kg/m ² kan lidt forsimplet ækvivaleres med 1 mm/m ²	42
Figur 7-1	Klapplads indikeret med sort skravering, hvorpå der over en 5-årig periode må klappes op til 500.000 m ³ oprenset materiale fra indsejlingen, ref. /11/.	44
Figur 7-2	Klappningsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybnings-område P1 og P2.	46
Figur 7-3	Klappningsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybnings-område P4.	46
Figur 7-4	Klappningsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybnings-område P3.	46
Figur 7-5	Klappningsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybnings-område P4.	47
Figur 7-6	Strømroser visende dybdemidlet strøm på klapplads. Øverst: årsvariation. Nederst: den fulde klapperiode.	48
Figur 7-7	Strømroser visende dybdemidlet strøm på klapplads. Øverst: årsvariation. Nederst: den fulde klapperiode.	48
Figur 7-8	Strømroser visende dybdemidlet strøm på klapplads. Øverst: årsvariation. Nederst: den fulde klapperiode.	49
Figur 7-9	Bølgeroser på klapplads. Årsvariation (2021) og i modelperiode for klappning.	50
Figur 7-10	Varighed med overskridelse af 2 mg/l i klapperioden på 109 dage. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	51
Figur 7-11	Varighed med overskridelse af 5 mg/l i klapperioden på 109 dage. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	52
Figur 7-12	Varighed med overskridelse af 10 mg/l i den fulde klapperiode. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	53
Figur 7-13	Varighed med overskridelse af 15 mg/l i den fulde klapperiode. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	54
Figur 7-14	Maksimumkoncentration (dybdemidlet) i den fulde klapperiode. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	55
Figur 7-15	Maksimumkoncentration (dybdemidlet) i klapperioden med lerholdigt materiale. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	56
Figur 7-16	Aflejringskort efter ophør af klappning. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	57
Figur 7-17	Aflejringskort efter ophør af klappning af lerholdigt materiale. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.	58
Figur 8-1	Bypass klapplads hvorpå der årligt må foretages bypass af op til 500.000 m ³ oprenset sand fra indsejlingen, ref. /10/.	60

Figur 8-2	Bølgeroser ved P2 på bypassplads. Årsvariation (2021) og 3 tilfældigt udvalgte perioder af en varighed på 5 dage.	61
Figur 8-3	Strømroser visende dybdemidlet strøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, efterfølgende plot tilfældigt udvalgte perioder af en varighed på 5 dage.	62
Figur 8-4	Strømroser visende dybdemidlet strøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021.....	63
Figur 8-5	Strømroser visende bundstrøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021....	64
Figur 8-6	Strømroser visende overfladestrøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021....	65
Figur 8-7	Bølgeforhold ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021.	66
Figur 8-8	Øjebliksbillede af klapskyer ved kraftig vestgående strøm. Klapskyer fra 3 klapninger med 4 timers mellemrum.....	67
Figur 8-9	Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	68
Figur 8-10	Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	69
Figur 8-11	Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	70
Figur 8-12	Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	71
Figur 8-13	Aflejret klapmasse 52 timer efter sidste klapning. Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	72
Figur 8-14	180.000 m ³ jævnt udlagt bypass materiale i form af 0,18 mm finsand.....	73
Figur 8-15	Bundændringer relateret til migration af udlagt bypass efter 8 døgn, 16 døgn, 24 døgn og 32 døgn.	74
Figur 8-16	Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 07-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	75
Figur 8-17	Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 07-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	76
Figur 8-18	Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 07-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	77
Figur 8-19	Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 08-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.	78
Figur 8-20	Aflejret klapmasse 52 timer efter sidste klapning.	79
Figur 8-21	Bundændringer relateret til migration af udlagt bypass efter 9 døgn, 18 døgn, 28 døgn og 37 døgn.	80
Figur 9-1	Placering af den kystnære bypass klapplads.	82
Figur 9-2	Overskridelsesvarighed af 15 mg/l. Øverst: med vestgående strømning. Midt: Svage strømme i skiftende retninger. Nederst: Østgående strømning.....	83

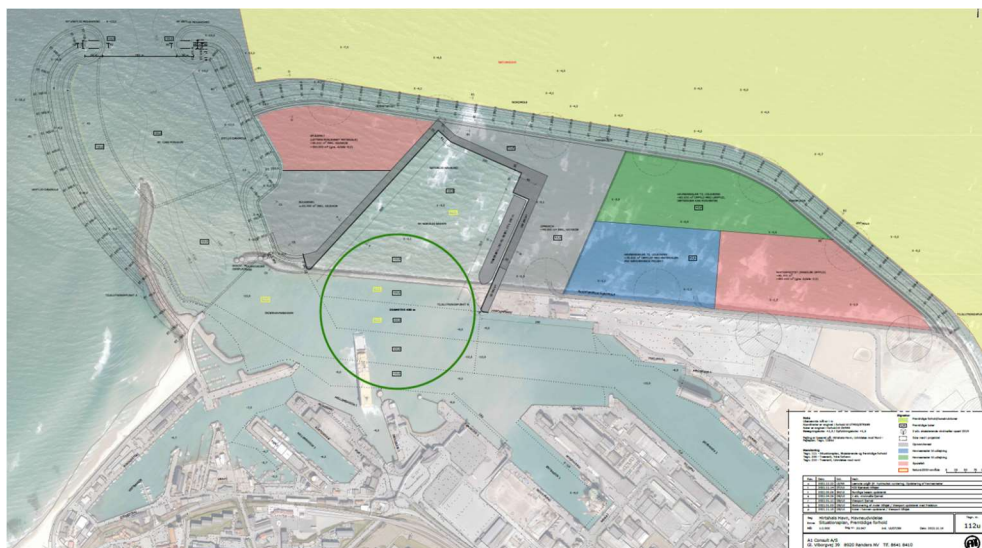
Figur 9-3 Aflejret klapmasse 30 timer efter sidste klapning. Øverst: med vestgående strømning. Midt: Svage strømme i skiftende retninger. Nederst: Østgående strømning. 84

Tabeller

Tabel 6-1	Oversigt over estimerede uddybningsmængder.....	29
Tabel 6-2	Antaget tørdensitet for de 3 sedimenttyper.....	29
Tabel 6-3	Estimerede opgravede tørstofmasser ved uddybning.	30
Tabel 6-4	Antagelser om sedimenttypernes sammensætning.	31
Tabel 6-5	Faldhastigheder opgjort på sedimenttype.....	31
Tabel 6-6	Antagelser om gravespild ved uddybningsarbejder.....	32
Tabel 6-7	Produktionsrater ved gravning med BHD og CSD.....	33
Tabel 6-8	Varighed af gravearbejder.....	33
Tabel 6-9	Gravespildsrater og fordeling i vandsøjlen.	34
Tabel 7-1	Konservativ antagelse om klapmaterialets sammensætning.	45
Tabel 7-2	Realistisk antagelse om klapmaterialets sammensætning.....	45
Tabel 7-3	Faldhastigheder opgjort på sedimenttype.....	45
Tabel 8-1	Historiske oprensningmængder og bypassmængder i perioden 2017-2022.....	59
Tabel 8-2	Bypass materialets relative sammensætning.	60
Tabel 8-3	Undersøgte klap- og bypassmængder.....	60
Tabel 8-4	Sedimenttab fra bypassplads ved klapning af 180.000 m ³ i februar 2021 1, 52 timer efter sidste klapning.	72
Tabel 8-5	Sedimenttab fra bypassplads ved klapning af 180.000 m ³ i oktober 2021 1, 52 timer efter sidste klapning.	79
Tabel 9-1	Klapmængder.....	82

1 Introduktion

Hirtshals Havn planlægger en større havneudvidelse mod nord (se Figur 1-1), og har i den forbindelse bedt DHI om at udføre sedimentspredningsberegninger i forbindelse med uddybning af det nye havneområde.



Figur 1-1 Planlagt havneudvidelse.

Størstedelen af materialet fra uddybningen er sand. En mindre del af uddybningsmaterialet er kohæsivt og vil i udgangspunktet blive nyttiggjort og anvendt til opfyld. Der er dog som et alternativ til nyttiggørelse udført spredningsberegninger baseret på klappning af materialet på klapppladsen nord for havnen, som har været brugt til klappning af oprensningsmaterialer fra havnens indsejlingssektor (sand).

Ligeledes er der undersøgt betydningen af klappning af 180.000 m³ postglaciale sand på bypasspladsen øst for havnen. Arbejdsperioden for opsugning og klappning af 180.000 m³ sand vil være relativt kort (lidt over en måneds varighed) og det har derfor været nødvendigt at undersøge to klappscenarier med forskellige typer af strømforhold. De to typer strømforhold er karakteriseret ved: 1) Dominerende vestgående og dominerende østgående strømning, samt perioder med svage strømforhold fra skiftende retninger og 2) Dominerende østgående strømning samt perioder med svage strømforhold fra skiftende retninger.

Endelig er der for de samme typer af strømforhold lavet en screening af klappning af 12.000 m³ postglaciale sand på den nye mere kystnære bypassplads øst for havnen.

2 Sammenfatning

Denne rapport beskriver sedimentspredningen og påvirkning heraf, som den planlagte udvidelse og uddybning af Hirtshals havn vil afstedkomme, under antagelse af at uddybningsarbejderne først foretages efter etablering af de ydre moler og bølgebrydere. Der er Natura 2000 områder umiddelbart øst og vest for indsejlingskorridoren, hvorfor det er nødvendigt at få klarlagt om havneudvidelsen kan etableres uden at skabe kritiske påvirkninger på det omkringliggende miljø.

Den planlagt udbygning af havnen mod nord indebærer et behov for uddybning, hvor der skønsmæssigt er beregnet et uddybningsbehov (in-situ volumen) på $\sim 1,9 \text{ Mm}^3$, hvoraf $0,35 \text{ Mm}^3$ vurderes at være kohæsivt sediment. Opgjort som tørstofmasse udgør den samlede uddybningsmængde cirka 2,6 Mt. I udgangspunktet vil al uddybningsmateriale blive nyttiggjort og anvendt til opfyld af det fremtidige havneområde. Kohæsive materialer er dog ikke et optimalt opfyldningsmateriale, da det sætter sig over tid. Der er derfor lavet en selvstændig undersøgelse af påvirkningen ved klapning af de kohæsive materialer på klappladsen nord for havnen.

Udbygningen af havnen mod nord fører til en svækkelse af den østgående nettosedimenttransport og øger derfor kysterosionen på en 1-5 km strækning øst for havnen, hvis påvirkning vil kunne kompenseres med en øget bypassmængde. I relation til dette er der undersøgt påvirkning af klapning af 180.000 m^3 oprenset sand på den store bypassklapplads nordøst for havnen. Endvidere er påvirkningen fra klapning af 12.000 m^3 på en mere kystnær klapplads øst for havnen også undersøgt.

Sedimentspredning i forbindelse med uddybning i havnen og indsejling er primært drevet af tidevandsprismet og udvekslingen gennem havnemundingen. Den største sedimentspredning sker i forbindelse med uddybningen af indsejlingen. Det frigivne gravespild ved uddybningen af havnen er vurderet med udgangspunkt i optagningsmetoderne, mængderne og tørdensiteterne. I denne vurdering er det samlede gravespild i forbindelse med uddybningsarbejderne estimeret til 103.857 ton, svarende til 4,04% af den samlede uddybningsmængde. Størstedelen af gravespildet frigives under meget afskærmede forhold og vil derfor blive aflejret inde i havneområdet og ikke påvirke Natura 2000 områderne udenfor. Det samlede sedimentspredningsbidrag gennem havnemundingen er på baggrund af modelberegningen estimeret til 3.851 ton, hvilket udgør 3,7% af det ved uddybningsarbejdet udløste gravespild. Den afskærmede uddybning er dermed med til at sikre en meget lille sedimentspredning til de udenfor havnen beliggende områder. De materialer som slipper ud af havnen vil spredes ud over et stort område med kyststrømmen. Dvs. i det kystnære område både øst og vest for havnen.

Sedimentspredning i forbindelse med klapning af kohæsive materialer er vanskeligt at regne på, idet spredningen er stærkt afhængig af materialets evne til at klumpe. Der er udført to sæt beregninger, hvor der i den ene beregning er anvendt en meget konservativ antagelse om, at materialet ikke klumper, men opfører sig som enkeltpartikler. I tillæg til dette er der udført en simulering baseret på et mere realistisk scenarie, hvor en større del af materialet er bundet i klumper. Klapplads området overlapper med Natura 2000 området øst for havnen og et miljømæssigt aftryk kan derfor ikke undgås. De kohæsive materialer afviger fra det naturligt forekommende overfladesediment

(postglacialt sand) og er dermed ikke en del af den naturlige sedimenttransport langs kysten.

Når materialet eroderes, vil det typisk være i små kornstørrelser, som vil sprede sig over et meget stort område. Fodafttrykket finder derfor primært sted i forbindelse med selv klapningen. En mindre del af materialet vil i forbindelse med klappning spredes med strømmen i forlængelse af klapplassen. Lidt væk fra klapplassen overstiger aflejringstykkelserne ikke 1 cm. Spredningen og sedimenttabet i forbindelse med klappning er helt klart overvurderet i det konservative scenarie. I det realistiske scenarie er det cirka 2/3 af det klappede materiale, som fortsat befinder sig på klapplassen ved simuleringens ophør. Dette tab er i høj grad relateret til det siltholdige klappmateriale fra området P5 i Østbassinet, hvor materialesammensætningen er usikker. Viser materialet sig at være mere lerholdigt vil materialet være mere klumpende så spredningen bliver mindre. Er materialet mere sandholdigt, vil det ikke blive klappet, men i stedet blive nyttiggjort til opfyld.

Klapskyerne har en begrænset udstrækning, men har til at begynde med meget høje sedimentkoncentrationer, som aftager i takt med at materialet udfældes. Indholdet af finsand samt dets faldhastighed er af betydning for hvor langt og hvor længe finsandet kan transporteres og holdes i suspension. Varigheden, hvorover der er skyggevirkning i forbindelse med passage af den enkelte klapsky, er relativt kort, hvorfor påvirkningen vil være periodisk og effekten mere beskeden. Ligeledes vil en del af den statistisk beregnede skyggevirkning forekomme i perioder, hvor der i forvejen er mørkt.

Desuden er sedimentspredning ved klappning i forbindelse med bypass belyst. Dels som spredning via klapskyer og dels ved en morfologisk beregning som alene ser på migreringen af udlagt bypassmateriale. Klappning af 180.000 m³ bypass materialet vil typisk strække sig over lidt mere end en måned. Spredningen relateret til klappning vil derfor afhænge af de fremherskende bølge- og strømforhold i perioden hvorover klappingerne finder sted. I perioder med dominerende vestgående strøm tabes en større del af klappmaterialet til området vest for bypasspladsen og havnen, hvorfor bypassseffekten reduceres. I perioder med skiftende strømretninger kan hovedparten af klappmaterialet fastholdes på bypasspladsen. I perioder med dominerende østgående strøm spredes en større del af klappmaterialet til området øst for bypasspladsen. Tilførsel af bypass materiale bør derfor undgås i perioder med dominerende vestgående strømning, idet bypassseffekten under disse forhold vil være reduceret markant og samtidig risikerer at bidrage til sedimentation af indsejlingskorridoren.

Der er i forbindelse med klapskyernes spredning ingen nævneværdig interaktion med den indre del af kystprofilen i området stik syd for bypasspladsen, hvor det er fundet at havneudvidelsen vil øge erosionen i området med størrelsesordenen 3 m/år på strækningen 1 – 5 km øst for havnen. Oprensede materialer som klappes på bypasspladsen vil gradvist føres ind mod kysten. I perioder med skiftende strømretninger vil materialet kunne føres ind til området langs den nordlige bølgebryder og området øst for havnen. I perioder med dominerende østgående strøm vil materialet typisk føres ind på kysten cirka 2,5 km øst for havnen og over en strækning på omkring 8 km. Tidsskalaerne for at en større mængde af bypass materialet når ind til kysten, er skønsmæssigt mere end et år. Simuleringsperioderne er for korte til at kvalificere tidsskalaen mere præcist. I februar 2021 simuleringen med tilførsel af 180.000 m³ bypass, er 88% af materialet fortsat fastholdt på selve bypasspladsen efter 32 dage. I oktober 2021 simuleringen er 76% af materialet fastholdt efter 37 dage.

Med udgangspunkt i klapningsscenarierne er det fundet, at man om muligt bør undgå bypass i perioder med dominerende vestgående strøm. Benyttes den sydlige og vestlige del af bypasspladsen vil bypassmaterialet hurtigere kunne føres ind på kysten og ligeledes bedre modvirke en fra havneudbygningen lokal kysterosion.

Klapningsberegningerne af 12.000 m³ oprenset sand placeret mere kystnært indikerer, at den mere kystnære placering af bypass materialet vil gøre større gavn i forhold til at modvirke et øget erosionspres øst for havnen, som udbygningen bidrager til. Der er ikke udført morfologiske beregninger herfor, da disse kompliceres af forekomsten af sandbølger i kombination med den beskedne klapmængde.

3 Metodebeskrivelse

3.1 Hydrodynamisk model

Hovedformålet med den til dette projekt etablerede hydrodynamiske model er at beskrive strøm og vandstandsforhold til beregning af sedimentspredning i forbindelse med uddybning af havnen og ved klappning af materiale på klappads nord for havnen og bypassplads øst for havnen. I modelbeskrivelsen er det antaget, at de ydre bølgebrydere og indre dæmninger (volde og/eller spuns) er etableret forud for uddybningen, da dette vil sikre en mindre sedimentspredning. Hele uddybningen foregår afskærmet med undtagelse af et mindre område omkring den ydre del af munden. Sedimentspredningen vil derfor i meget høj grad være relateret til tidevandsudvekslingen gennem havnemunden. Der er derfor lagt vægt på, at modellen er i stand til at afspejle den i havnen målte vandstandsvariation og det dertil hørende tidevandsprisme.

Den hydrauliske model er konstrueret således, at modellens beregningsnet er særlig fint i havnen og det omkringliggende område. Udenfor dette område øges netstørrelsen gradvist. Modelbatymetrien er baseret på de nuværende vanddybder. Ved at basere beregningen på de nuværende vanddybder fremfor de uddybede bliver den relative vandudveksling større lige som opholdstiden i havnen bliver kortere. Med andre ord udvekslingsdynamikken gennem havnemunden bliver kraftigere. Antagelsen vurderes derfor at være konservativ og resultere i den største sedimentspredning.

Saltholdigheden foran havnemunden varierer kun i beskedent omfang og med en noget længere tidsskala end tidevandet. Det samme gør sig gældende for vandtemperaturen, som primært følger en sæsonbestemt årsvariation. På denne baggrund er det valgt at anvende en barotrop 3D-strømningsbeskrivelse, dvs. en beskrivelse som ikke inkluderer densitetseffekter skabt af gradienter i salt og temperatur. Der er valgt en 3D-model beskrivelse, da denne giver mulighed for at beskrive gravespildet mere præcist i forhold til placering i vandsøjlen.

Sedimentspredningen væk fra havneområdet finder sted med tidevandsudvekslingen gennem havnemunden og vil spredes kystnært mod øst eller vest afhængig af strømforholdene. Betydningen af bølgedrevne strømme spiller en rolle i den indre del af kystprofilen (brydningszonen). For at kunne inkludere denne effekt afvikles den hydrodynamiske 3D-model koblet med en spektral bølgemode, hvorfra bølgenes reaktionskraft beregnes og overføres til HD-modellen.

Vandstandsforholdene varierer med tidevandet (12,5 timer) overlejret af bidrag fra vindstuvning (dage). Strømforholdene og vandskiftet inde i havnen vil primært være tidevandsdrevet, mens strømmingen udenfor havnen primært er metrologisk drevet. Strømmen vil derfor på trods af tidevandet typisk være rettet mod øst eller vest i længerevarende perioder (dage).

3.2 Gravespild

Gravespildet er vurderet på baggrund af de anvendte uddybningsmetoder, deres produktionskapacitet og materialesammensætningen. Gravespildet fordeles i vandsøjlen alt afhængig af uddybningsmetode. I den udviklede graveplan er der antaget brug af både mekaniske og hydrauliske optagningsmetoder.

Uddybningsarbejder vil i praksis blive udført med en række afbrydelser i form af nedetid og/eller en etapeinddelt udførelse. I sedimentspredningsberegningen er det antaget, at uddybningsarbejderne foretages 24/7 og i en sammenhængende cyklus af alle uddybningsområder, da dette typisk vil resultere i den største miljøpåvirkning og dermed afspejle en konservativ tilgang i miljøkonsekvensvurderingen.

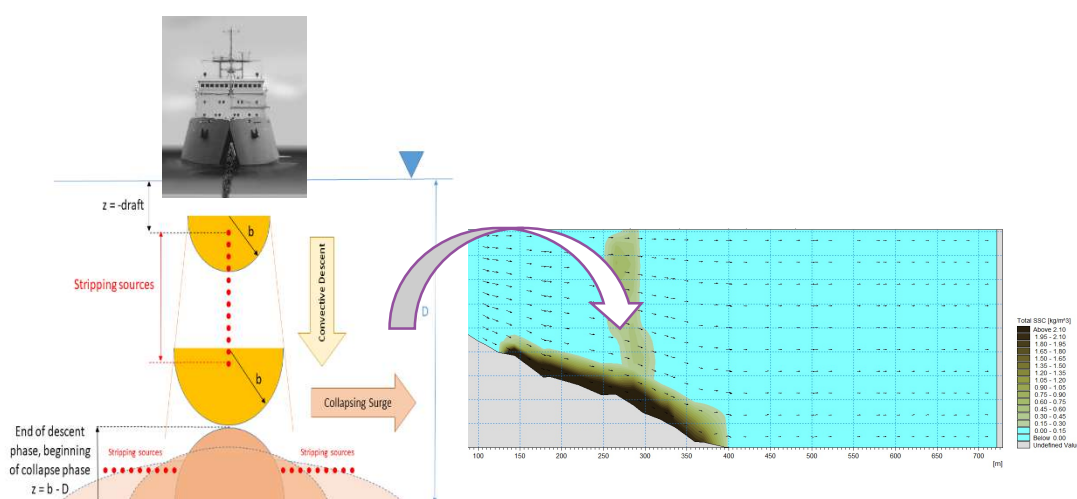
3.3 Klappingsbeskrivelse nærfelt

De opgravede kohæsive materialer er glaciale eller senglaciale aflejringer og dermed godt konsolideret med en relativt høj rumvægt. Der forventes derfor ingen væsentlig bulkkningsvirkning ved opgravning af materialet. Med andre ord er der anvendt en antagelse om at klappvolumenet er det samme som det opgravede in-situ volumen.

Klapmaterialet inddeles i 3 eller 4 fraktioner afhængig af om det modelleres som enkeltpartikler eller som klumper og enkeltpartikler. Materialet er fastlagt med udgangspunkt i de geotekniske informationer og på baggrund af denne er der fastlagt en gennemsnitlig sammensætning af sedimenttypen opdelt på ler, silt og sand.

Når der klappes postglacialt sand i forbindelse med bypass inddeles klapmaterialet i 3 fraktioner og ikke-kohæsivt som enkeltpartikler.

Klapningerne antages foretaget med splitpram med en kapacitet på 1.000 m³ ved klaping af kohæsivt materiale og med en TSHD (Trailer Suction Hopper Dredger) med en kapacitet på 1.500 m³, ved klaping af sandmaterialer på bypasspladsen øst for havnen. Selve klapingen modelleres med en nærfeltsmodel indbygget i MIKE 3 spildmodulet. Nærfeltsmodellen beregner den synkende sedimentsky i detaljer, samt hvordan nærfeltet overføres til fjernfeltet (MIKE 3), og således sedimenternes samlede opholdstider i vandet. Her har især det relative tørstofindhold stor betydning for hvor kraftig en densitetsstrøm, der dannes ved faldet mod bunden i nærfeltsberegningen.



Figur 3-1 Nærfeltsbeskrivelse og overførsel til fjernfeltet.

Nærfeltsberegningen inkluderer de densitetsdrevne effekter i udbredelsen ved bunden samt afrivningen af sedimenter under faldet mod bunden.

Nærfeltbeskrivelsen og de tilhørende processer, samt nærfeltsbeskrivelsens overførsel til fjernfeltet er illustreret i Figur 3-1.

4 Datagrundlag

Dette kapitel beskriver det til studiet anvendte datagrundlag.

4.1 Havneudvidelsen

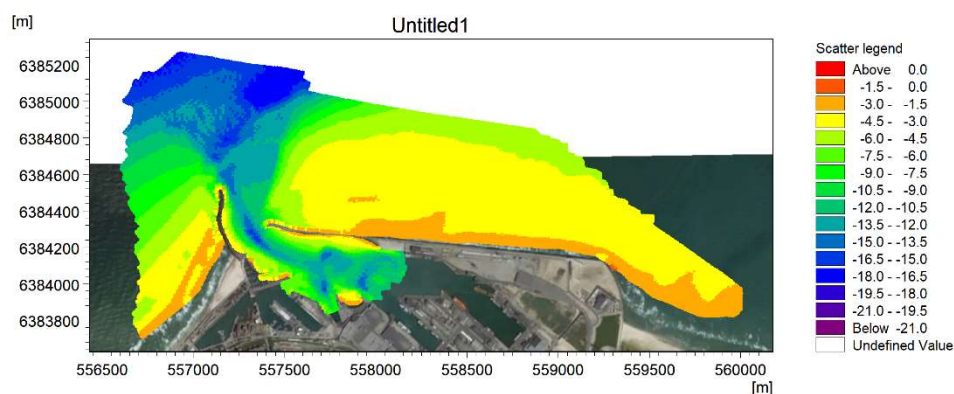
Havneudvidelsens udformning og fremtidige dybdeforhold er baseret på den i Figur 4-1 viste plantegning, ref. /5/.



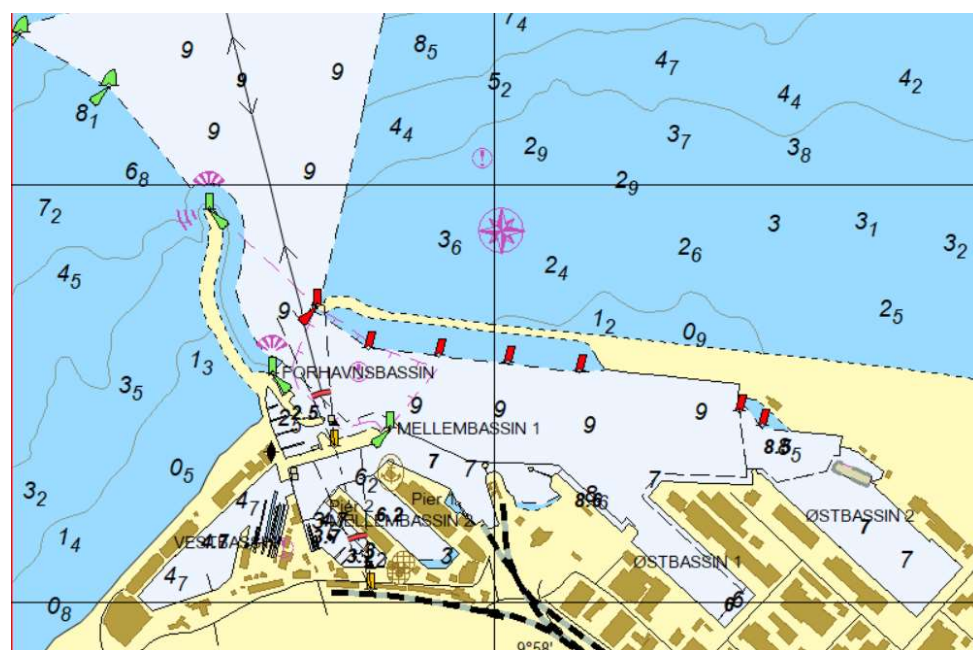
Figur 4-1 Plantegning af den fremtidige havneudvidelse med dybdekoter.

4.2 Batymetrisk grundlag

Modellens batymetri er etableret med udgangspunkt i søkort (MIKE C-Map) med angivelse af garanteret vanddybde i bassiner, pejlinger modtaget fra Hirtshals Havn og Danmarks dybdemodel (DDM 2022) som dækker Danmarks eksklusive økonomiske zone i et 50 x 50 m raster. Pejlingerne fra havnen er opløst i et 0,25 m x 0,25 m raster og vist i Figur 4-2 nedenfor. Batymetrien i de inderste bassiner er fastlagt på baggrund af data fra søkort. Søkortet er vist i Figur 4-3.



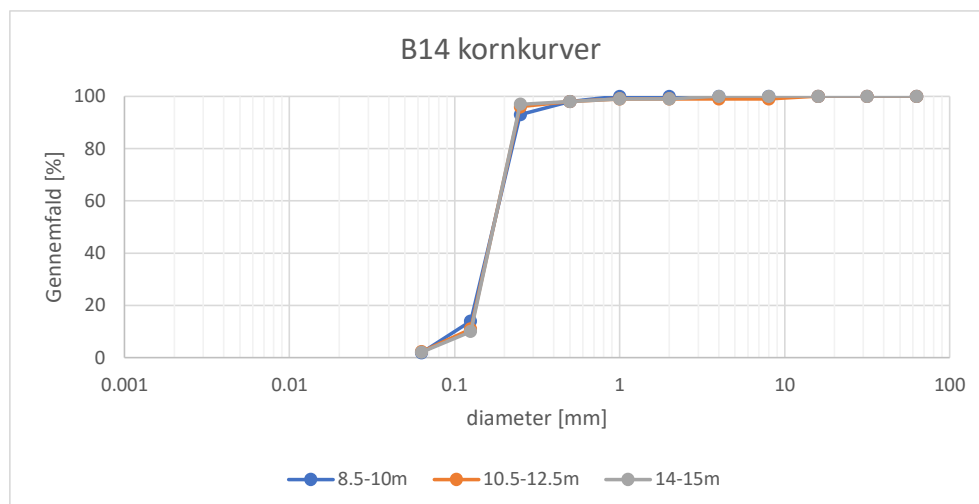
Figur 4-2 Pejlinger modtaget fra Hirtshals Havn.



Figur 4-3 Søkort anvendt til fastlæggelse af batymetri i bassiner hvor der ikke foreligger pejlinger.

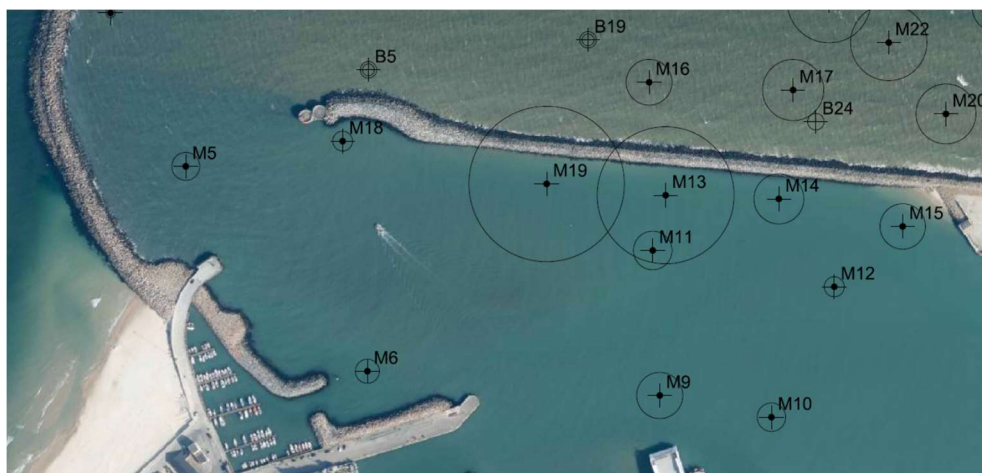
4.3 Jordbundsforhold

Jordbundsforhold som danner grundlag for uddybningsmaterialets sammensætning er fastlagt på baggrund af borekerner og prøver taget med kajakrør beskrevet i ref. /2/ og /3/. Området er generelt karakteriseret ved postglaciale sandaflejringer i den øvre del og marine senglaciale/glaciale silt indlejret i Yoldialeret i det underliggende lag. I Figur 4-4 er der angivet positioner af borehuller og kajak-kerner samt den identificerede kote for overgang fra



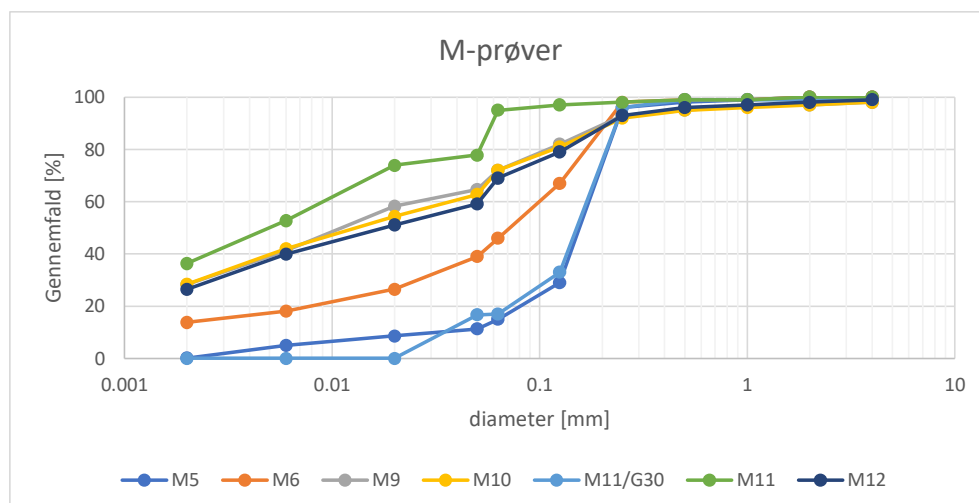
Figur 4-6 Kornkurvefordeling i B14 i 3 forskellige dybder.

Der findes ikke andre kornkurver fra dybere lag, men der findes en del i rapporten mærket M i ref. /2/, som er taget i overfladen af havnebassinet. Der findes også nogle få udvalgte kornkurver i kajakrapporten ref. /3/. Der er ikke angivet koordinater for M-samples, men positionerne er angivet på kort, jf. Figur 4-7. M19 symbolet og cirklerne omkring angiver, at det er en miljøboring og blandeprøve med indikation af udtagningsradius. B5 og B19 symbolet angiver at det er en geoteknisk boring.



Figur 4-7 Positioner for prøvetagning af M5, M6, M9, M10, M11 og M12.

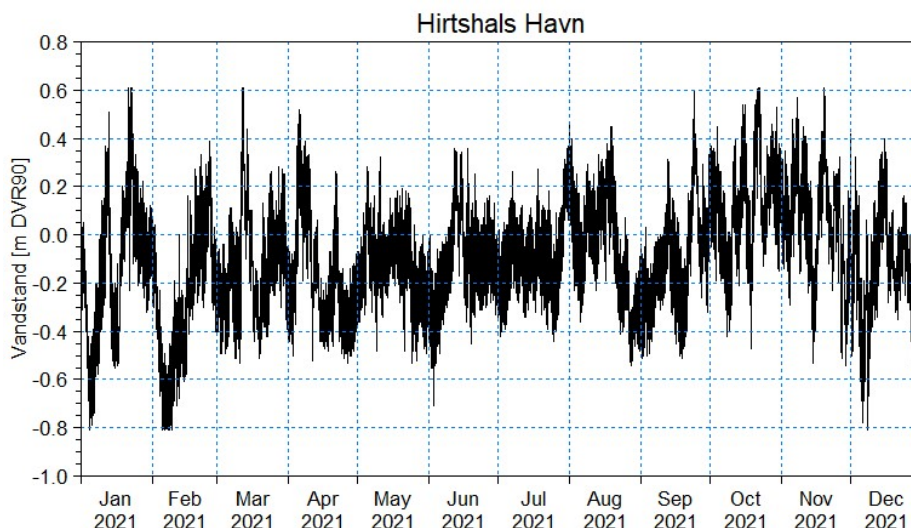
Kornkurverne fra overfladesediment er vist i Figur 4-8. Der ses som forventet en ændret gradering i materialet sammensætning i takt med at afstanden til indsejlingen øges. Vandskiftet i havnen er tidevandsdomineret og der sker derfor en udfældning af det fine sand i den ydre del, mens det mere finkornede silt er i stand til at trænger dybere ind i havnen før det udfældes. M11/G30 prøven er formentlig taget dybere end overfladesedimentet og har derfor et højere sandindhold.



Figur 4-8 Kornkurvefordeling af overfladesedimentet i M5, M6, M9, M10, M11/G30, M11 og M12.

4.4 Vandstandsmålinger

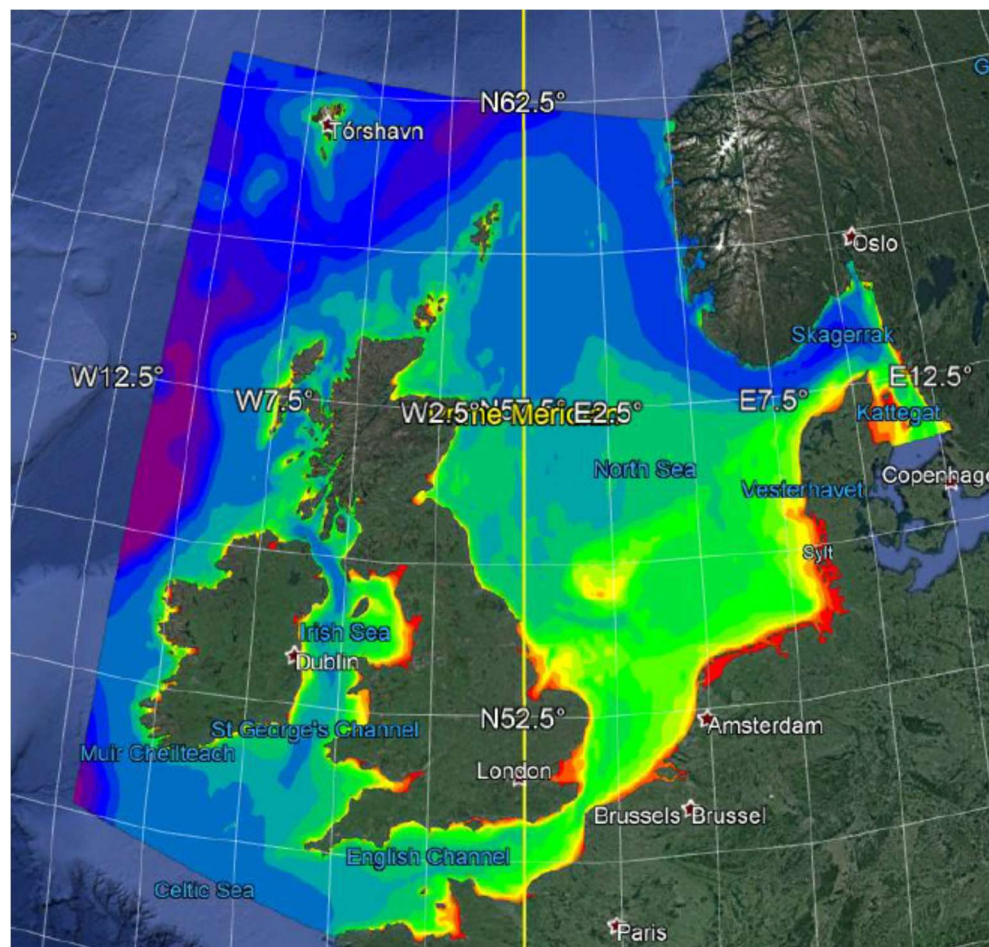
Der er via DMI hentet vandstandsmålinger fra Hirtshals Havn til verifikation af modellen. En gennemgang af målingerne viser at der er udfald på målingerne, når vandstanden falder under -0,8 m DVR90 og tilsvarende når vandstanden overstiger 0,61 m DVR90. Målingerne indeholder derfor ikke ekstremerne i højvande og lavvande, hvilket dog ikke er kritisk for dette studie, da det primært er tidevandet, som vil drive en sedimentspredning fra uddybningsarbejderne i havnen.



Figur 4-9 DMI vandstandsdata fra Hirtshals Havn 2021.

4.5 HD modellens drivdata

Modellens drivdata (randbetingelser og initialbetingelse) er udtrukket fra DHIs 3D Hydrodynamiske model UKNS2 model, ref. /4/. Ligeledes er der udtrukket randbetingelser fra UKNS2 SW til en lokal bølgemodel. UKNS2 modellens udstrækning og modelbatymetri er vist i Figur 4-10.

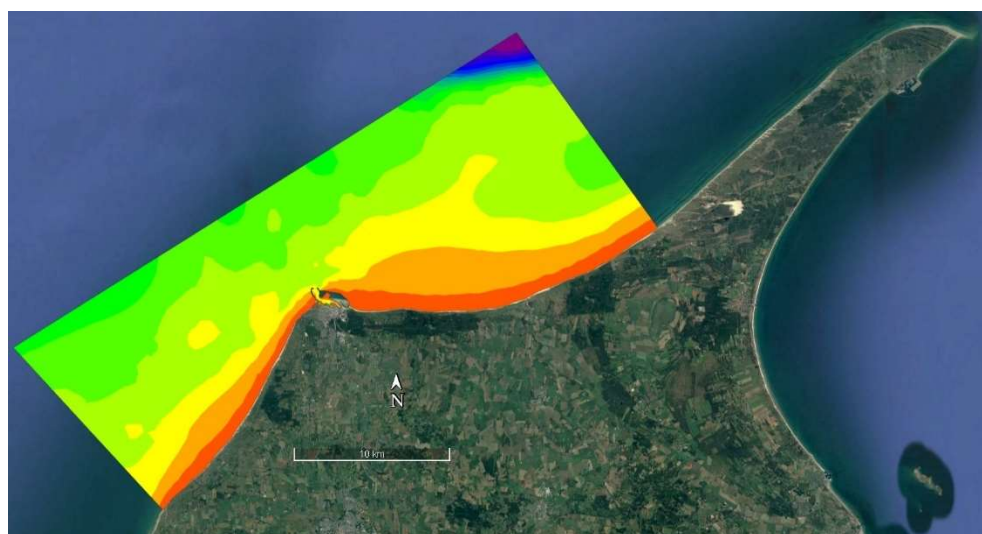


Figur 4-10 UKNS2 modellens udstrækning og batymetri, fra ref. /4/.

Vindfeltet er det samme som UKNS2 modellens, som anvender StormGeo vind med en stedlig opløsning på 0,1° i både længde- og breddegrad for vindkomponenterne (U, V) og atmosfæretryk (P).

5 Modelopsætning

I dette afsnit beskrives layout (geometri), beregningsnet og batymetri anvendt til spredningsberegninger i forbindelse med uddybning og klappning af materialer. Modellens geometri er baseret på den fremtidige udformning, mens batymetrien er baseret på de nuværende dybdeforhold. Vandskiftet i Hirtshals Havn er primært reguleret af tidevandsprismet. Tidevandsprismet udgør relativt set en større andel af havnens vandvolumen før uddybningen end efter uddybningen. En beregning baseret på den eksisterende batymetri vil derfor resultere i en større sedimentspredning (tab af materiale gennem havnemundingen) og er dermed at opfatte som en konservativ tilgang til sedimentspredningsberegningerne. Gravespild og klappspild vil afhængig af strømforholdene føres med kyststrømmen mod øst eller sydsydvest, hvilket er afspejlet i modelområdet valgte udstrækning vist i Figur 5-1 nedenfor.

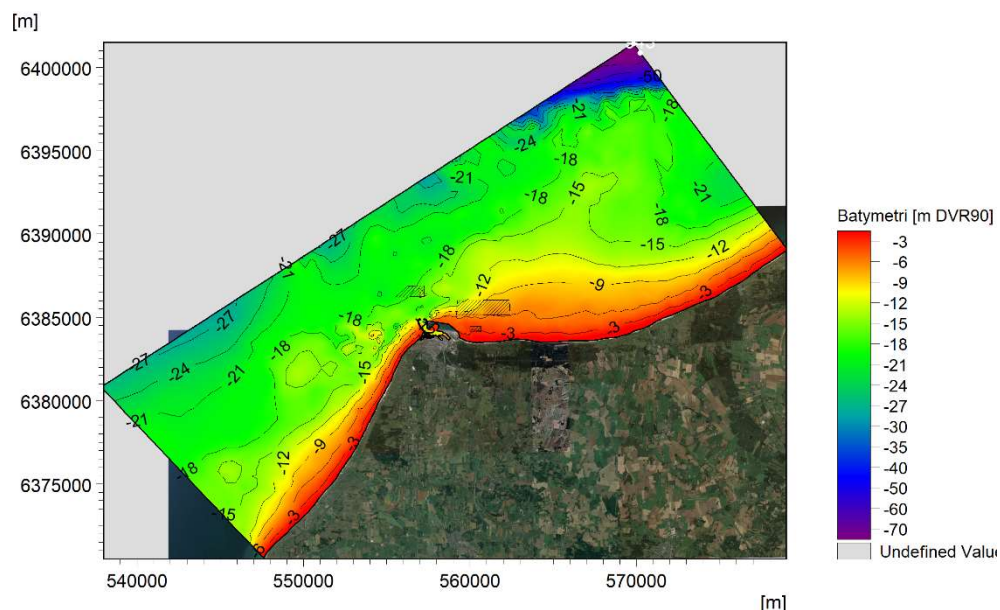


Figur 5-1 Modelområdets udstrækning.

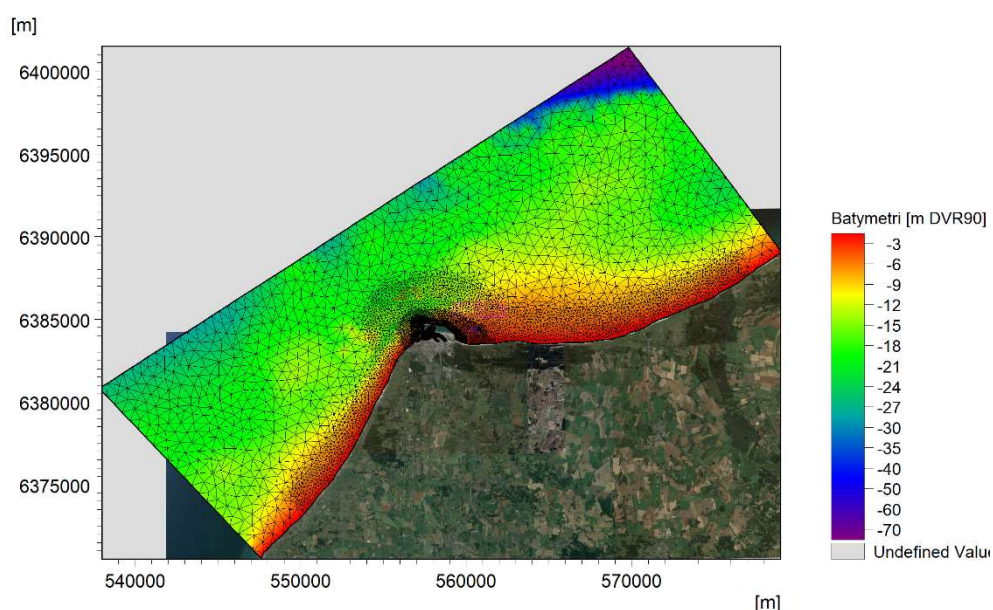
5.1.1 Batymetri og beregningsnet

Vanddybderne varierer mellem 0-78 m indenfor modelområdet. De største vanddybder optræder i modelområdets nordligste hjørne, hvor der er en begyndende stejl overgang til Skagerraks store vanddybder. I det kystnære område sydvest for havnen er kystprofilet væsentlig stejlere end i området øst for havnen. Modelbatymetrien er vist i Figur 5-2 med en ikke-lineært varierende dybdeskala. På batymetrikortet er der med sort skravering indikeret klappadsområdet nord for havnen, den store bypassplads øst for havnen og den nye lille kystnære bypassplads, ligeledes beliggende øst for havnen, men tættere på land.

3D-modellen er opbygget af fleksible trekantelementer, som kan variere i størrelse og form. Modellens horisontale beregningsnet er vist i Figur 5-3. Modellen er opbygget af 12.369 horisontale elementer, som gradvist forfines ind mod havnen og i den indre del af kystprofilet. I havnen og det omkringliggende område anvendes der en modelopløsning på 20-30 meter. Vertikalt er modellen opløst ved hjælp af 10 vertikale sigma-lag, som hver især opløser 1/10 af den lokale vanddybde.



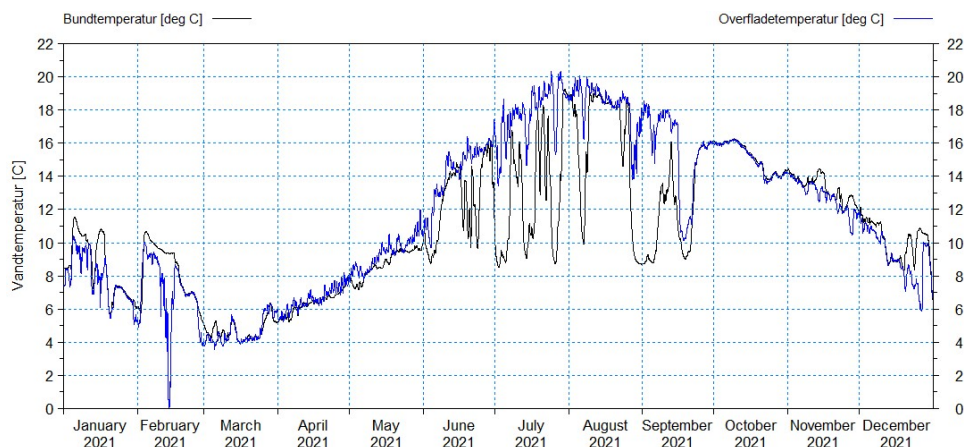
Figur 5-2 Model batymetri med fremtidig havneudvidelse uden uddybning og indikation af klapplads, bypassplads og kystnær bypass-plads.



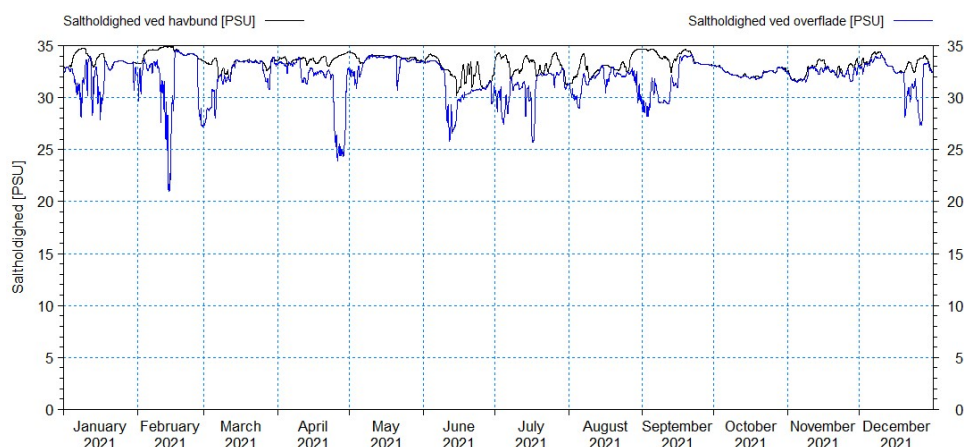
Figur 5-3 Model beregningsnet med fremtidig havneudvidelse.

5.1.2 Modellens drivdata

Data fra UKNS2 modellen indeholder udover information om vandstand og strøm også information om salt og temperatur, hvilket er krævet for en baroklin strømningsbeskrivelse. Vertikale variationer i salt og temperatur er dog typisk relativt begrænsede, idet området er beliggende ud til Nordsøen. Til at bekræfte dette er der udtrækket information om saltholdighed og vandtemperatur ved top og bund på 20 meter vanddybde nord for havnen. Det ses, af Figur 5-4 at der med undtagelse af sommermånederne er en meget lille forskel på temperaturen ved havbund og vandoverflade. For saltholdigheden er der en række hændelser, hvor forskellen i saltholdighed er helt op til 13-14 PSU kortvarigt, men set over hele året er den gennemsnitlige forskel ved top og bund kun 1,35 PSU og derfor ikke signifikant sammenhold med tidevandsudvekslingen.



Figur 5-4 Sammenligning af UKNS2 modelleret vandtemperatur ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.



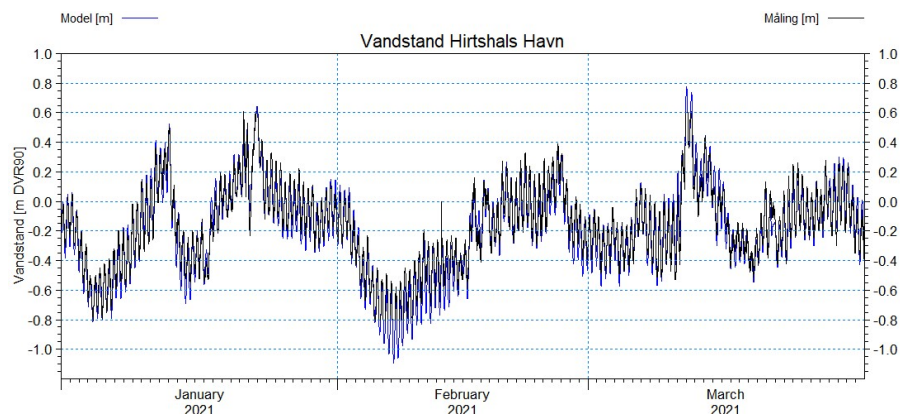
Figur 5-5 Sammenligning af UKNS2 modelleret saltholdighed ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.

Vandudvekslingen i havnen vil være domineret af tidevandet som optræder med en gentagelsesperiode på 12,5 timer. Det er derfor vurderet, at en barotrop strømningsbeskrivelse uden hensyntagen til gradienter i saltholdighed og vandtemperatur er tilstrækkeligt til at lave en kvantitativ og kvalitativ beskrivelse af sedimentspredningen i forbindelse med de uddybende gravearbejder.

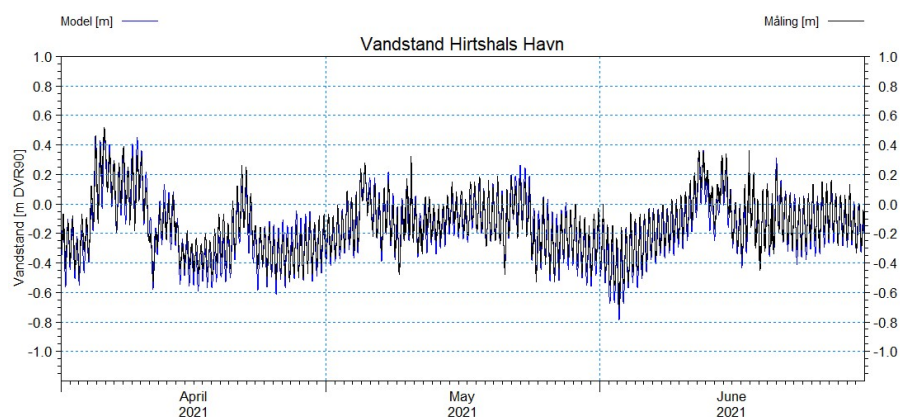
På de tre åbne modelrande, benyttes en Flather randbetingelse, ref. /7/, som påtrykker et hastighedsfelt i det vertikale plan og vandspejlsniveauet langs med randen. Parallelt med HD-modellen afvikles en SW bølgemodel, hvorfra bølgenes beregnede reaktionskraft påtrykkes, sådan at effekten af bølgedrevne strømme er indeholdt i den inderste del af kystprofilen (brydningszonen).

5.1.3 Lokal verifikation af model

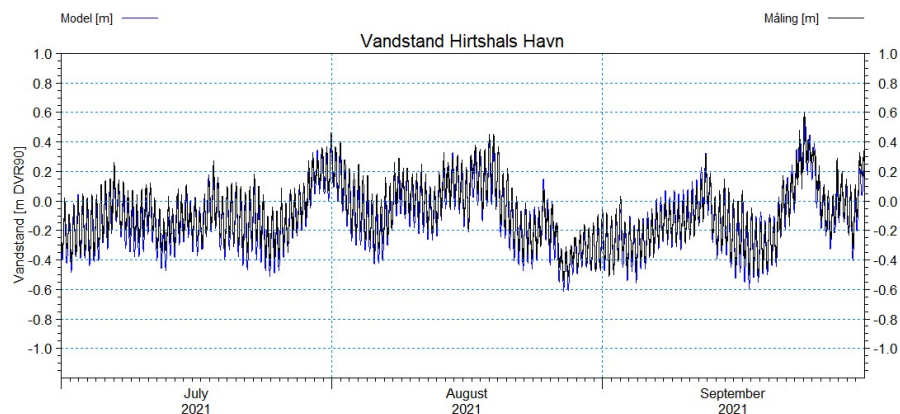
Det er begrænset, hvad der er af data til at verificere den lokale HD-model, men da vandudvekslingen gennem havnemundingen er styret af vandstandsvariationen inde i havnen, hvor der løbende foretages målinger af vandstand, er det muligt at sikre, at modellens opførsel er i overensstemmelse med det observerede. I de følgende fire figurer er der lavet en kvartalsvis sammenligning af målte og modellerede vandstande i havnen. De målte vandstande har udfald, når niveauet falder under -0,8 m DVR90 og overstiger 0,61 m DVR90. Helt generelt ses modellen at beskrive vandstandsvariationen og dermed tidevandsprismet i havnen ganske godt.



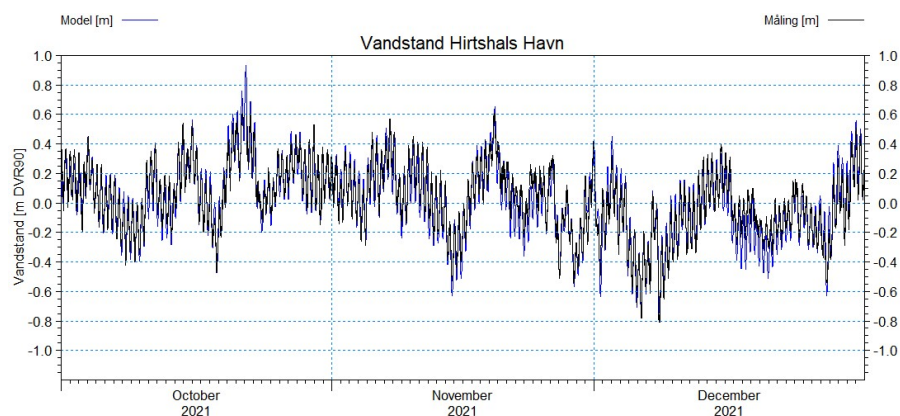
Figur 5-6 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 1. kvartal 2021.



Figur 5-7 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 2. kvartal 2021.



Figur 5-8 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 3. kvartal 2021.

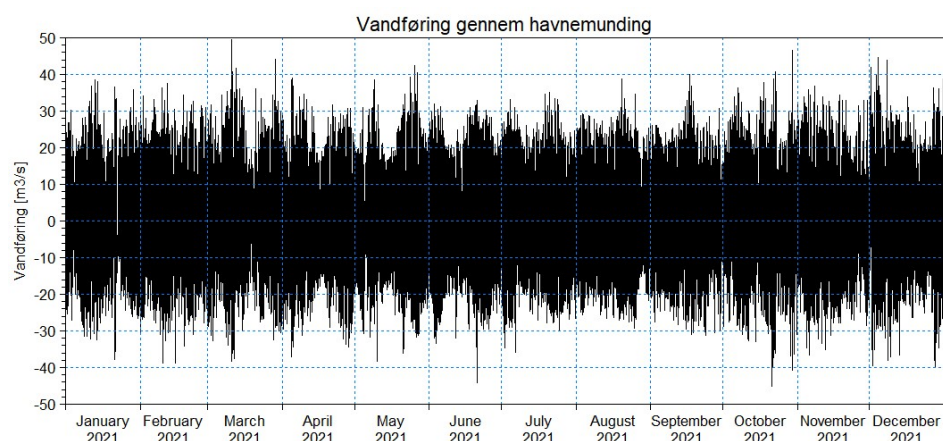


Figur 5-9 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 4. kvartal 2021.

Ud over tidevandspåvirkningen er vandstanden særligt i vinterhalvåret også påvirket af metrologisk drevne vandstandsvariationer. Tidsskalaen for disse variationer er dog helt generelt væsentlig længere end tidevandets og bliver derfor mindre betydende for udvekslingen og sedimentspredningen.

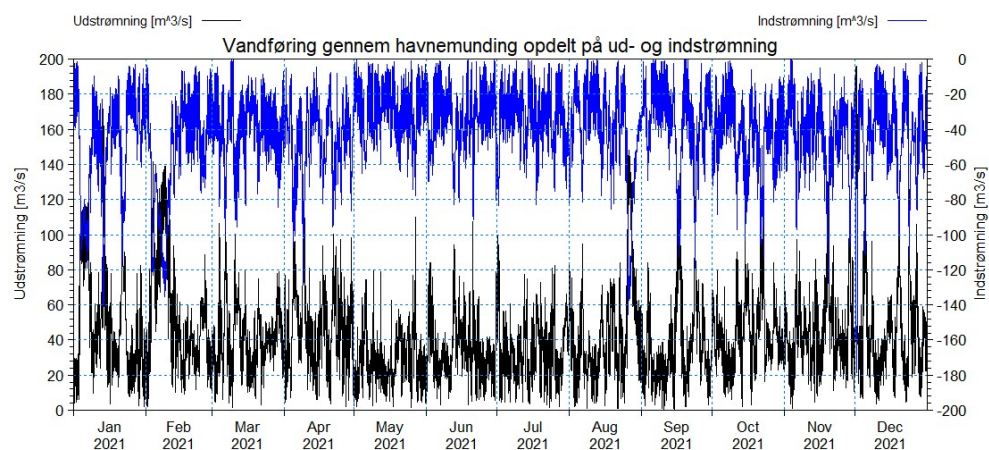
5.1.4 Vandudveksling gennem havnemunding

Tidevandets påvirkning bevirker at der løbende skubbes vand ind eller trækkes vand ud af havnemundingen. Den modelberegnete resulterende vandføring hen over året er vist i Figur 5-10. Positiv vandføring indikerer en nettoudstrømning, mens en negativ vandføring indikerer en nettoindstrømning.



Figur 5-10 Modelleret vandføring i den kommende nye havnemunding.

I munden vil tværstrømme drive en horisontal mundingshvirvel, som trækker vand ind i åbningens opstrøms side og vand ud ad åbningens nedstrøms side. Ligeledes kan der være effekter fra vertikale variationer, men de vil i hovedreglen være mindre udtalte, da der ikke er densitetseffekter med i modelleringen og da disse i en baroklin model (som inkluderer densitetseffekterne) størstedelen af tiden vil være insignifikante.



Figur 5-11 Modelleret ud- og indstrømning i den kommende nye havnemunding.

Den samlede vandvolumenændring i havnen varierer med tidevandet og de metrologisk drevne vandstandsvariationer. Det ses af Figur 5-11 at vandvolumenet i havnen reduceres med helt op til 0,73 Mm³ set i forhold til

initialvandstanden og tilsvarende øges med op til 1,12 Mm³ igen set i forhold til initialvandstanden.



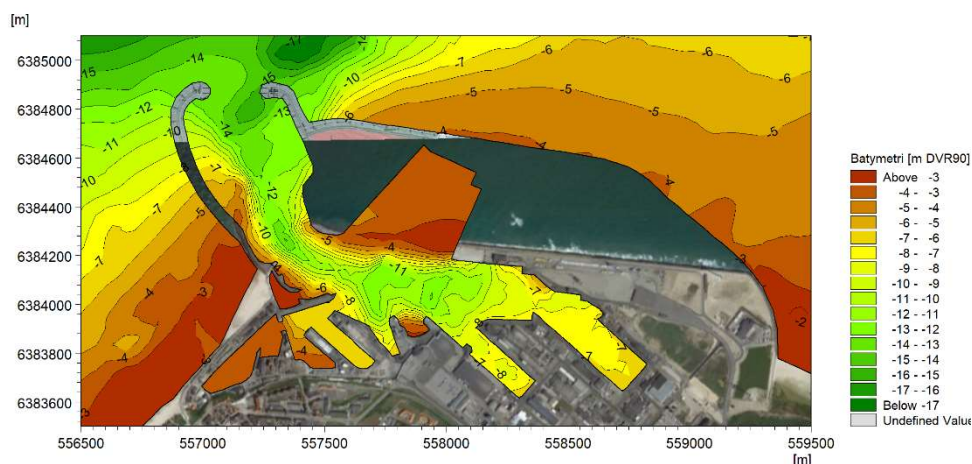
Figur 5-12 Modelleret ændring i vandvolumen i havnen i forhold til initialvandstand.

6 Sedimentspredning relateret til gravespild ved uddybning

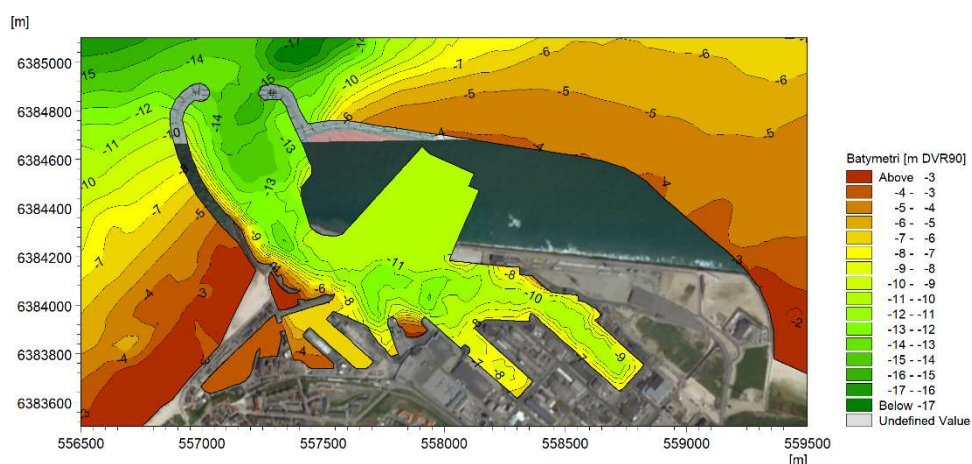
Sedimentspredningen i forbindelse med havneudvidelsen og uddybning af indsejlingen og bassiner kan begrænses ved at vente med at udføre gravearbejderne til alle ydre dækmoler er blevet etableret. Denne fremgangsmåde sikrer at gravespildet primært frigives i det aflukkede havneområde og kun spredes til området udenfor via den tidevandsdrevne udveksling gennem havneindsejlingen. Dette er antaget i det følgende.

6.1 Forventede gravemængder

De forventede gravemængder er estimeret som en differensbatymetri med udgangspunkt i den eksisterende batymetri (se Figur 6-1), hvor bølgebrydere er nedbrudt til det omkringliggende niveau, og den fremtidige uddybede batymetri (se Figur 6-2).



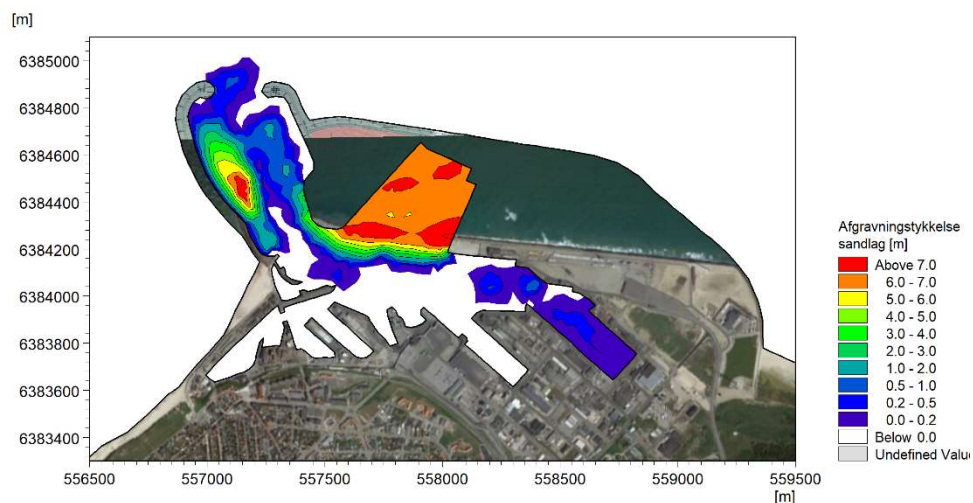
Figur 6-1 Batymetri forud for uddybning med nedbrudte bølgebrydere.



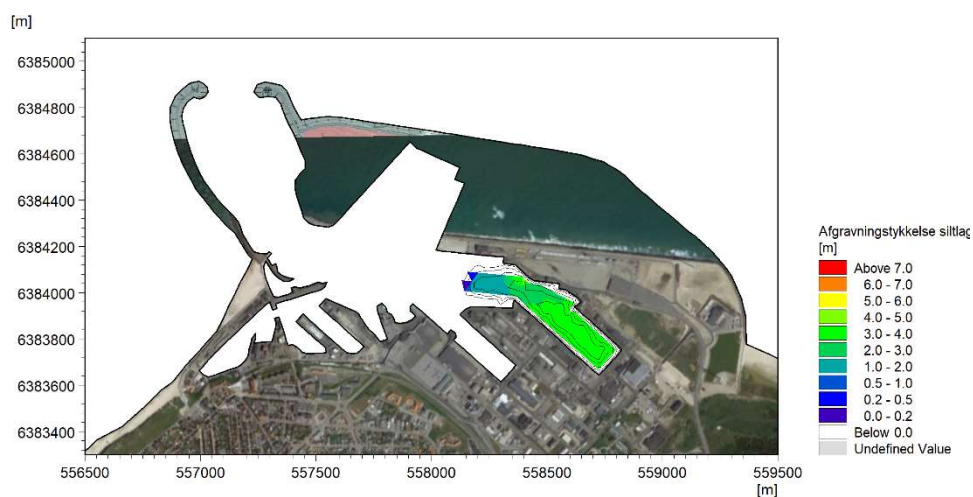
Figur 6-2 Batymetri efter uddybning.

Overgangen fra sand til ler i det underliggende lag bevirker at differensbatymetrien kan inddeles i afgravningstykkelser for sand, silt og ler. Afgravningstykkelserne opdelt på sand, silt og lerdominerede sedimenter er vist i Figur 6-3 til Figur 6-5. De estimerede mængder i Østbassinet er formentlig

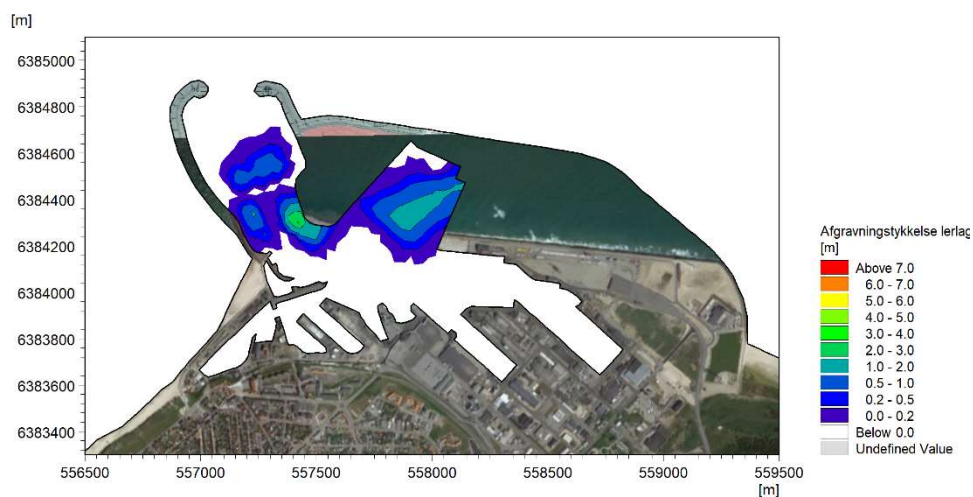
overvurderet, da de er baseret på garanterede søkortdybder og ikke faktiske pejlinger. Ligeledes er materialebeskaffenheden usikker.



Figur 6-3 Estimerede afgravningstykkelser med sandholdigt sediment.

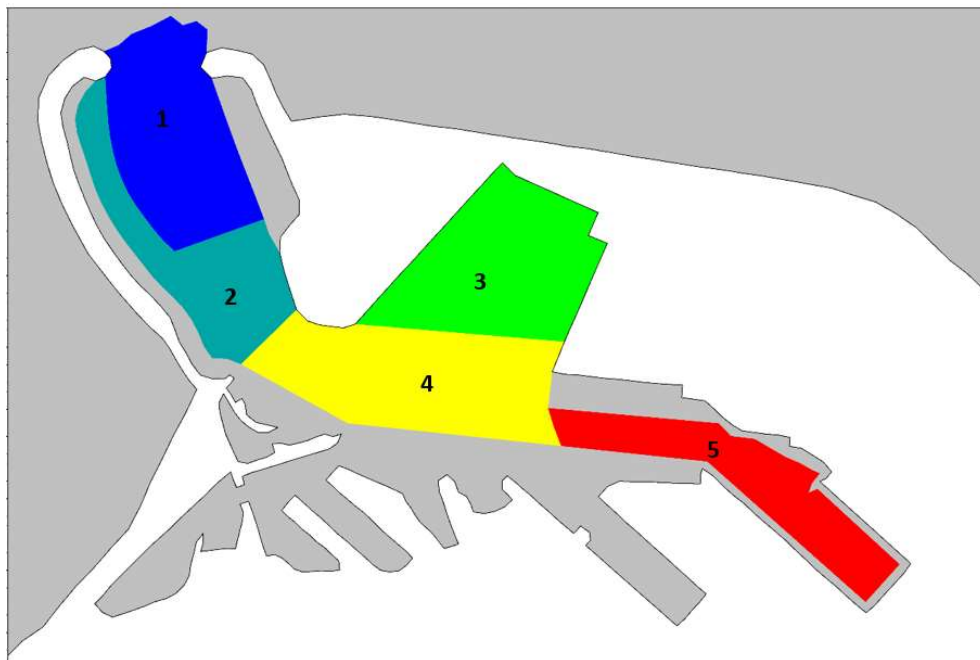


Figur 6-4 Estimerede afgravningstykkelser med siltholdigt sediment.



Figur 6-5 Estimerede afgravningstykkelser med lerholdigt sediment.

Området er opdelt i 5 zoner, som indikeret på Figur 6-6. For hver zone er der lavet en opgørelse af sedimentmængder fordelt på sandholdige, siltholdige og lerholdige materialer. Uddybningsmængderne er opgjort i Tabel 6-1. Det skal bemærkes, at område 5 ikke umiddelbart er en del af projektet og at uddybningsmængderne derfor er opgjort konservativt.



Figur 6-6 Områdeinddeling i 5 zoner.

Tabel 6-1 Oversigt over estimerede uddybningsmængder.

Område	Sand [m ³]	Silt [m ³]	Ler [m ³]	Samlet [m ³]
Polygon 1	124.600		17.100	141.700
Polygon 2	200.800		28.800	229.600
Polygon 4	327.800		21.100	348.900
Polygon 3	869.000		65.600	934.600
Polygon 5		214.900		214.900
Samlet	1.522.200	214.900	132.600	1.869.700

For at kunne beregne et gravespild er det nødvendigt at omsætte gravemængderne til en tørstofmasse. Til denne omsætning er der taget udgangspunkt i rumvægtsbestemmelser angivet i ref. /2/, som er omregnet til tørdensiteter. Omregningen til masse baseres på de i Tabel 6-2 angivne tørdensiteter.

Tabel 6-2 Antaget tørdensitet for de 3 sedimenttyper.

Sedimenttype	Sand	Silt	Ler
Tørdensitet [kg/m ³]	1.285	1.775	1.775

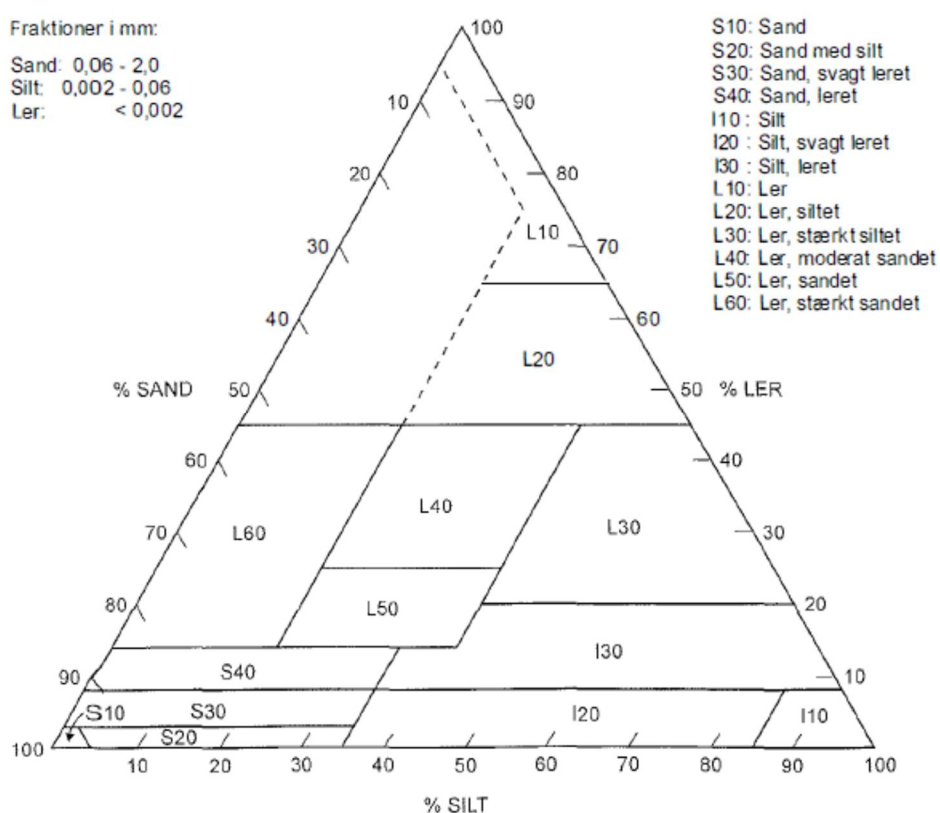
Tørdensiteterne indikerer at det postglaciale sand er løst aflejret, mens silt og ler er kompakt aflejret og med en kohæsiv struktur. De i Tabel 6-1 angivne

uddyningsmængder er omsat til opgravet tørstofmasse i Tabel 6-3 ved hjælp af sedimenttypernes tørstofdensitet.

Tabel 6-3 Estimerede opgravede tørstofmasser ved uddybning.

Område	Sand [ton]	Silt [ton]	Ler [ton]	Samlet [ton]
Polygon 1	160.111		30.353	190.464
Polygon 2	258.028		51.120	309.148
Polygon 4	421.223		37.453	458.676
Polygon 3	1.116.665		116.440	1.233.105
Polygon 5		381.448		381.448
Samlet	1.956.027	381.448	235.365	2.572.840

Informationen om kornsammensætningen er med undtagelse af det postglaciale sand relativt begrænset. Lermaterialer har kohæsive egenskaber og glaciale aflejringer vil typisk være relativt hårdt og stift. Siltdominerede materialer vil være mindre kohæsive og typisk være det materiale som resulterer i den største sedimentspredning. Jordarter er typisk klassificerede med udgangspunkt i et trekantsdiagram som vist i Figur 6-7.



Figur 6-7 Diagram til klassificering af jordtyper, ref. /6/.

Sammensætningen af sandmaterialerne er skønnet på baggrund kornkurverne, mens sammensætningen af ler- og siltematerialer er skønnet med udgangspunkt i ref. /6/. I Tabel 6-4 er den antagne sammensætning af de tre jordtyper angivet fordelt på de tre respektive fraktioner.

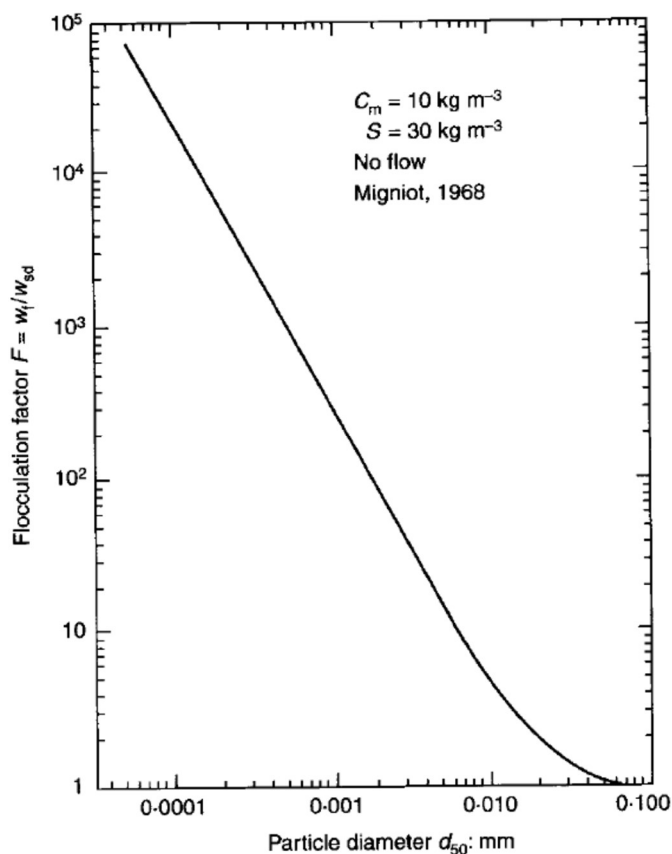
Tabel 6-4 Antagelser om sedimenttypernes sammensætning.

Sedimenttype	Lerindhold [%]	Siltindhold [%]	Sandindhold [%]
Sandmateriale	2	10	88
Siltmaterialer	5	80	15
Lermaterialer	50	45	5

Lerpartikler er karakteriseret ved en korndiameter mindre end 2 μm , mens siltpartiklers størrelse er mellem 2-63 μm og finsand 63-200 μm . Flokkulationseffekten er størst for de mindste partikler. De små lerpartikler vil derfor samle sig i lidt større partikler og ender med en faldhastighed som er mange gange større end de vil have som enkeltpartikler. Flokkulationseffekten er mindre udtalt for silt, mens finsandet ikke flokkulerer. De i Tabel 6-6 angivne faldhastigheder for de tre fraktioner er valgt så de indeholder flokkulationseffekten. Et eksempel på flokkulationseffekten er taget fra ref. /12/ og vist i Figur 6-8. Flokkulationsfaktoren angiver forholdet mellem den flokkulerede partikels faldhastighed i forhold til faldhastigheden af en enkeltpartikel med en given størrelse. Diagrammet siger for eksempel, at en siltpartikel med kornstørrelse 10 μm (finsilt) falder cirka 4 gange hurtigere på grund af flokkulation end som enkeltpartikel.

Tabel 6-5 Faldhastigheder opgjort på sedimenttype.

Materiale	Ler	Silt	Finsand
Faldhastighed [mm/s]	0,1	0,5	1



Figur 6-8 Eksempel på flokkulationsfaktor som funktion af partikel-diameter, ref. /12/.

6.2 Graveplan

Den i det følgende beskrevne graveplan er lavet med udgangspunkt i sedimenttyperne og graveområdernes beliggenhed i forhold til opfyldningsområdet. I udgangspunktet forventes alt uddybningsmateriale at blive anvendt til opfyld af det fremtidige nye havneareal. Generelt bør hydrauliske gravemetoder (CSD¹ og TSHD²) undgås til uddybning i lerlag, da det splitter materialet og samtidig tilsætter store mængder vand, som efterfølgende skal drænes fra opfyldningsområdet. Alle ler og siltdominerede sedimenter forudsættes derfor afgravet ved brug af en mekanisk gravemetode (BHD³). Det sandholdige sediment kan graves med en CSD og pumpes ind i opfyldningsområdet, når der graves i polygonerne 3 og 4. Alternativt vil der kunne anvendes en TSHD, som også er velegnet til uddybning i sandholdigt materiale. Det vil dog kræve, at der tilkobles et pumpearrangement til hopperen for at opnå samme virkemåde som CSDen. Ligeledes må man forvente at en TSHD vil operere med en lidt mindre produktionsrate end ved brug af CSD. Spildprocenten og fordelingen af spildet vil være nogenlunde det samme. Uden et tilkøbt pumpearrangement vil det være nødvendigt at tømme hopperen sekventielt i lighed med pramme anvendt sammen med BHD. I dette tilfælde vil produktionsraten næppe kunne overstige 500 m³/time. De tre øvrige områder er beliggende, så det ikke kan undgås, at en pumpeledning vil virke forstyrrende på øvrige havneaktiviteter. I Polygonerne 1, 2 og 5 er det derfor antaget at alt uddybningsmateriale afgraves med en BHD og fyldes på pramme, som tømmes mekanisk og transporteres med lastbil det sidste stykke til opfyldningsområdet. Da uddybningsarbejdet foregår under afskærmede forhold, kan man med rimelighed antage driftsperioder på:

- CSD: 150 driftstimer per uge svarende til 89,3% af den samlede tid
- BHD: 100 driftstimer per uge svarende til 59,5% af den samlede tid

I den til spildberegningerne definerede graveplan er der dog som en konservativ antagelse antaget 24/7 drift, mens ovenstående tal angiver et realistisk bud på den faktisk forventede drift ved projektudførelsen.

6.2.1 Gravespildprocenter

Ler materialerne har en høj rumvægt og må derfor forventes at være stift og klumpende (kohæsivt). Der må derfor forventes et relativt lavt gravespild ved mekanisk opgravning af materialet. Sandmaterialerne er mere løst aflejret og der må derfor forventes et større gravespild end ved gravning i ler materialer. I Tabel 6-6 er der angivet antagelser om forventet spild med udgangspunkt i udstyr og sedimenttype. Gravespildet er fastsat på baggrund af ref. /8/ og sedimenttypen.

Tabel 6-6 Antagelser om gravespild ved uddybningsarbejder.

Udstyr og sedimenttype	Gravespild [%]
BHD og sandmaterialer	4
BHD og siltmaterialer	4
BHD og lermaterialer	2
CSD og sandmaterialer	5

¹ CSD Cutter Suction Dredger

² TSHD Trailer Suction Hopper Dredger

³ BHD Back Hoe Dredger

6.2.2 Produktionsrater

Produktionsrater afhænger dels af typen og størrelsen på det anvendte udstyr, men også på vanddybderne, materialetypen, samt strøm og bølgeforhold i området. Det vil derfor i sidste ende komme til at afhænge af hvad det er for udstyr den udførende entreprenør har til rådighed for uddybningen. En CSD vil typisk have en lidt højere produktionsrate end en BHD, men produktionsraten af en BHD afhænger i høj grad af størrelsen på skovlen og om den kan udnyttes optimalt. Ligeledes kan den ekstra håndtering med pram og ilandbringning af det med BHD opgravede materiale, sætte en begrænsning på hvor store mængder der kan håndteres. CSD har ikke det samme problem, da den pumper materialet direkte til opfyldsområdet. Med udgangspunkt i dette er der derfor taget udgangspunkt i de i Tabel 6-7 angivne produktionsrater.

Tabel 6-7 Produktionsrater ved gravning med BHD og CSD.

Udstyr	Produktionsrate [m ³ /time]
BHD	400
CSD	1.000

6.2.3 Varighed af gravearbejder

Produktionsmængden, typen af udstyr og produktionsraten er bestemmende for varigheden af gravearbejderne. I det følge er varigheden opgjort for hver af de 5 delområder, sedimenttypen og udstyrstypen. Ligeledes er varigheden opgjort baseret på 24/7 drift og en realistisk produktionsdrift som tidligere angivet. Ved uddybningen i polygon 3, som udgør det nye havnebassin, er det valgt at afgrave den nederste meter af sandlaget med BHD for at sikre, at cutteren ikke kommer i kontakt med lerlaget.

Tabel 6-8 Varighed af gravearbejder.

Polygon	Udstyr	Produktionstimer	24/7 varighed [døgn]	Realistisk varighed [døgn]
1	BHD i sand	311,5	12,98	21,81
1	BHD i ler	42,8	1,78	2,99
2	BHD i sand	502	20,92	35,14
2	BHD i ler	72	3	5,04
3	CSD i sand	739	30,79	34,49
3	BHD i sand	164	6,83	11,48
3	CSD i ler	325	13,54	22,75
4	CSD i sand	327,8	13,66	15,30
4	BHD i ler	52,8	2,20	3,69
5	BHD i silt	537,3	22,39	37,61
Samlet		3.074	128	168

6.2.4 Gravespildsrater

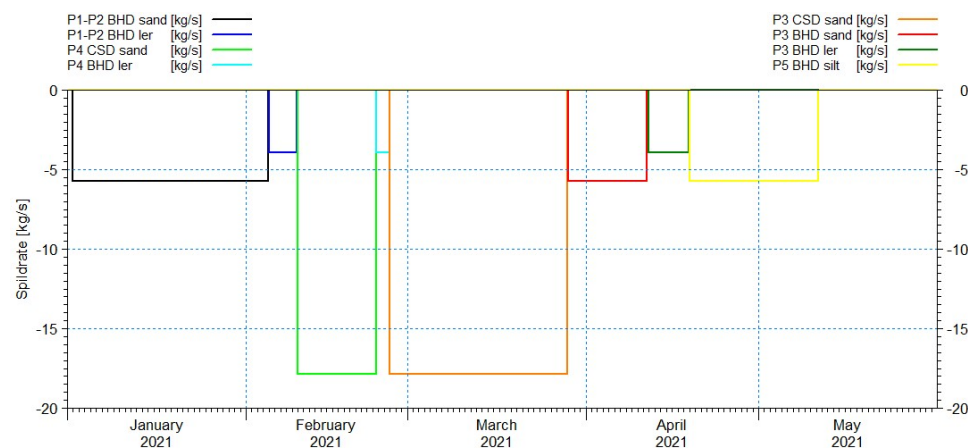
Gravespildsraterne kan beregnes med udgangspunkt i produktionsraterne angivet i Tabel 6-7, spildprocenterne angivet i Tabel 6-6 og uddybningsmaterialets tørstofdensiteter angivet i Tabel 6-2. Herved findes de i Tabel 6-9

angivne spildrater, som fordeles relativt i forhold til materialesammensætningen angivet i Tabel 6-4.

Tabel 6-9 Gravespildsrater og fordeling i vandsøjlen.

Udstyr og materiale	Gravespild [kg/s]	Fordeling
BHD i sand	5,71	Ligeligt fordelt over vandsøjlen
BHD i ler	3,94	Ligeligt fordelt over vandsøjlen
CSD i sand	17,85	Spild ved bund

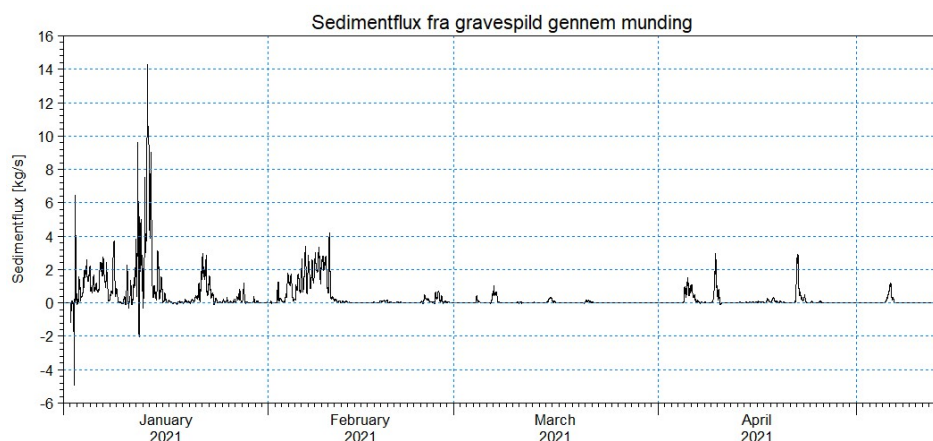
Gravearbejderne udføres med den i Figur 6-9 indikerede gravesekvens, hvor afgravningen af henholdsvis sand og ler er samlet i en sekvens i P1-P2 området. Spildraterne i plottet er angivet med et negativt fortegn (hvilket skal ignoreres), men som kan opfattes som den mængde der går tabt i forhold til opfyld. Gravearbejdet antages i modellering udført i perioden januar – maj. Varigheden er dog så lang at valg af periode ikke har nogen egentlig betydning, særligt da sedimentspredningen primært er relateret til udvekslingen drevet af tidevandsprismet.



Figur 6-9 Antaget gravesekvens og gravespildsrater.

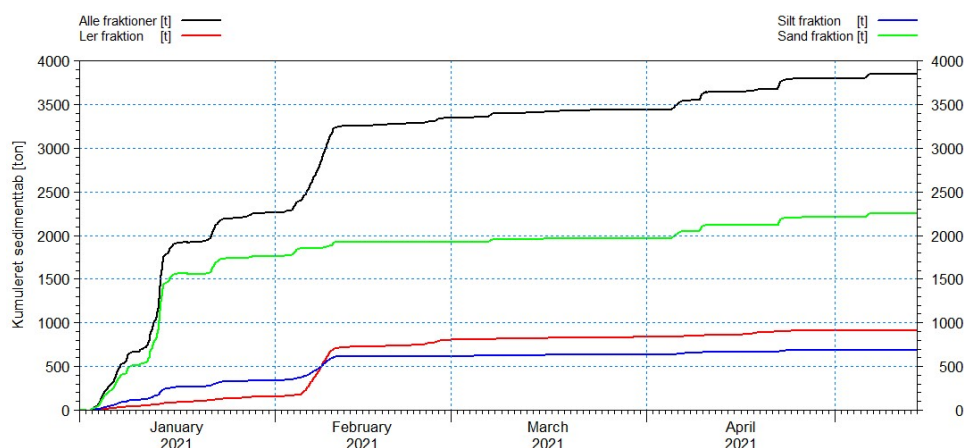
6.3 Sedimentspredning i forbindelse med uddybning

Med de ovenfor beskrevne antagelser kan det samlede gravespild i forbindelse med uddybningsarbejderne beregnes til 103.857 ton, hvilket udgør 4,04% af den samlede uddybningsmængde. Størstedelen af gravespildet vil blive aflejret inde i havneområdet og dermed ikke påvirke området udenfor. Sedimenttabet til områderne udenfor havnen kan beregnes ved hjælp af sedimentfluxen gennem havnemundingen. Den tidlige variation i sedimentfluxen er vist i Figur 6-10. I starten af perioden er der en kort periode med en indadrettet sedimentflux, hvilken skyldes at en lille del af uddybningen sker udenfor havnemundingen. I den øvrige del af graveperioden er sedimentfluxen (med en enkelt undtagelse) altid udadrettet.



Figur 6-10 Beregnet sedimentflux gennem havnemunding, som følge af uddybningsarbejder.

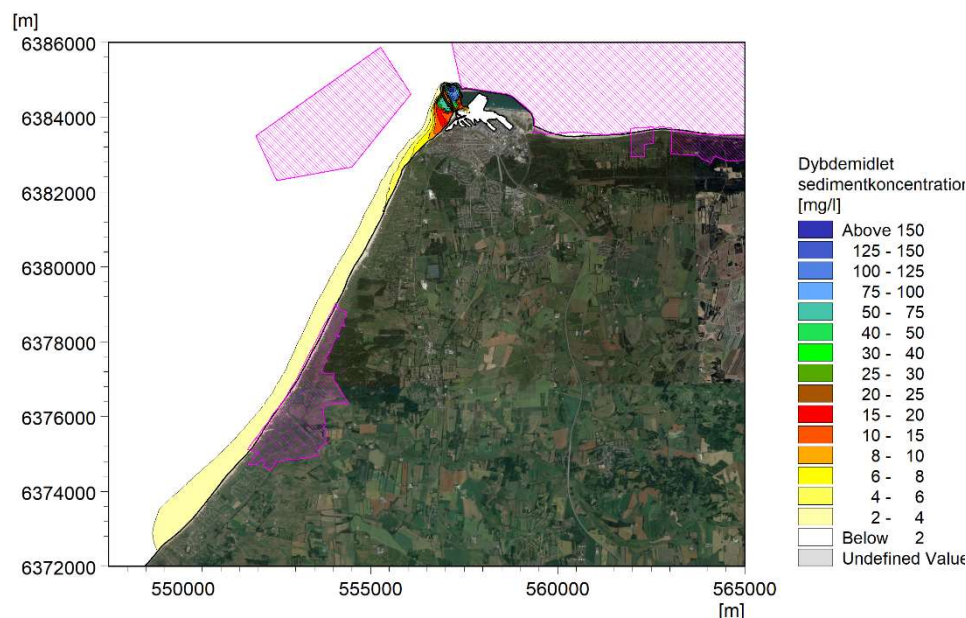
Den kumulerede sedimentflux, som angiver den samlede mængde der tabes ud af havnemundingen ved uddybningsarbejdet, er vist i Figur 6-11. Sedimentfluxen er opgjort for hver af de tre sedimentfraktioner (ler, silt og finsand), som gravespildet er inddelt i. Det ses, at det i høj grad er finsand, som spredes til området udenfor havnen. Ligeledes sker den største sedimentspredning i forbindelse med uddybningsarbejderne i områderne P1 og P2 nærmest mundingen. Ved gravningen med CSD i område P4 er der ligeledes en større spredning (relativt set). Ved uddybning i de øvrige områder er sedimentspredningen begrænset. Det samlede sedimentspredningsbidrag gennem havnemundingen er på baggrund af modelberegningen estimeret til 3.851 ton, hvilket udgør 3,7% af det ved uddybningsarbejdet udløste gravespild. Den afskærmede uddybning er dermed med til at sikre en meget lille sedimentspredning til de udenfor havnen beliggende områder.



Figur 6-11 Kumuleret sedimenttab gennem havnemunding opgjort på ler fraktion, silt fraktion, sand fraktion og alle fraktioner.

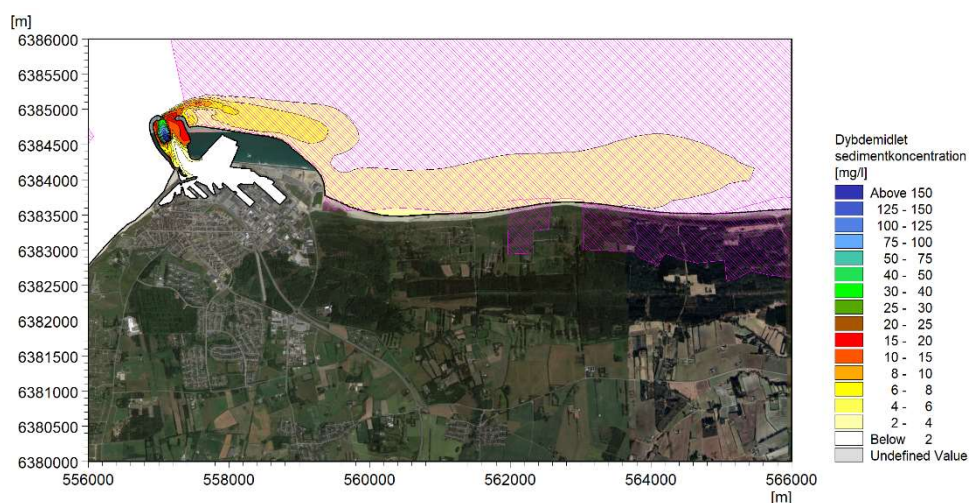
Kyststrømmen foran havnemundingen skifter hen over tid og det ved faldende tidevande udtrukne gravespild fra havneområdet vil derfor blive spredt til de kystnære områder sydvest og øst for havnen. I gravespildssimuleringen regnes der kun på gravespildet fra uddybningsarbejdet, hvorfor alle koncentrationer er uden bidrag fra den naturlige baggrundskoncentration. Sedimentfanen fra uddybningsarbejdet er i det følgende statistisk behandlet og giver derfor let

lægmand et forkert billede af sedimentfanens faktiske opførsel. Sedimentfanen kan ikke gå både mod øst og sydvest på samme tidspunkt, som de statistiske varighedsplot med overskridelse af en given sedimentkoncentration viser, idet de behandler alle forhold igennem uddybningsperioden. I Figur 6-12 er der vist et eksempel på et øjeblikbillede af sedimentkoncentrationer ved uddybning i område P1 og P2 under forhold, hvor gravespildsfanen føres mod sydvest. Natura 2000 områder er indikeret med pink skravering.



Figur 6-12 Øjeblikbillede af sedimentfane under uddybning af indsejlingen i en periode med sydvestgående strøm.

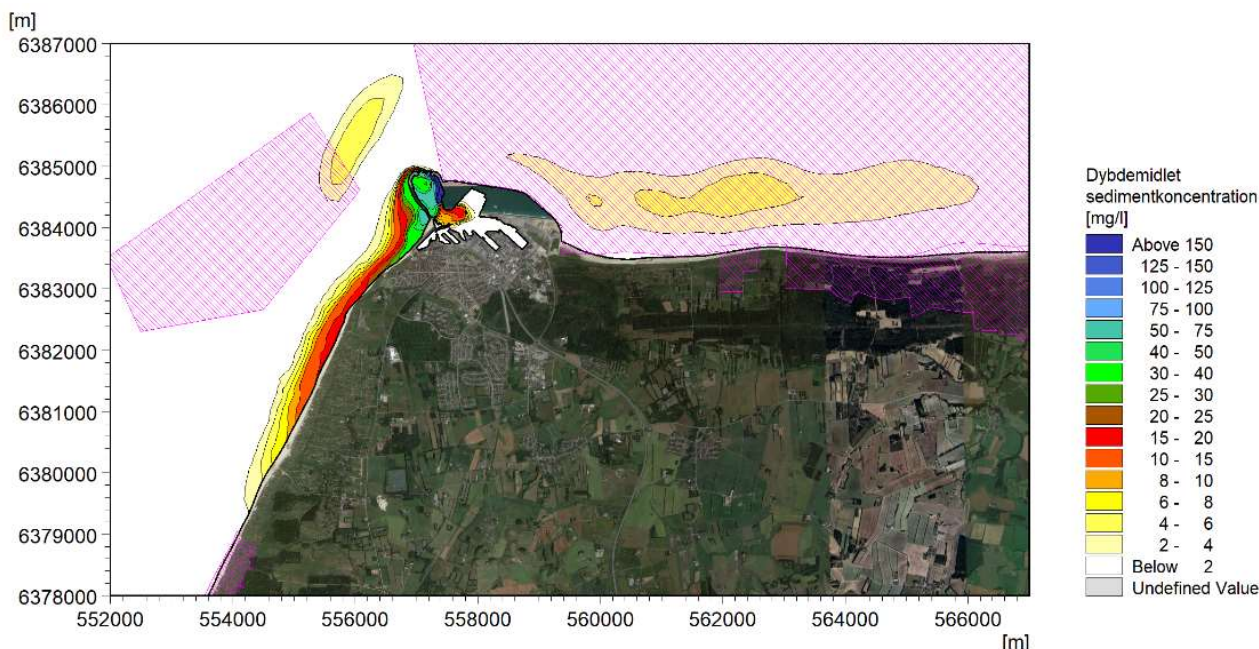
Tilsvarende er der i Figur 6-13 vist et eksempel på et øjeblikbillede af sedimentkoncentrationer ved uddybning i område P1 og P2 under forhold, hvor gravespildsfanen føres mod øst. Det ses tydeligt, at høje sedimentkoncentrationer kun optræder lokalt omkring det område, hvor der uddybes.



Figur 6-13 Øjeblikbillede af sedimentfane under uddybning af indsejlingen i en periode med østgående strøm.

Endelig er der i Figur 6-14 vist et eksempel på et øjeblikbillede af sedimentkoncentrationer ved uddybning i område P1 og P2 under forhold, hvor gravespildsfanen føres mod sydvest kort tid efter en strømvending. I denne situation bevirker de relative lave strømhastigheder i forbindelse med

strømvending, at fortyndingen bliver lille, samtidig med at bølgepåvirkning på strækningen vest for havnen opretholder materialet i suspension. Sedimentkoncentrationen vest for havnen er derfor en del højere end i de to øvrige situationer.

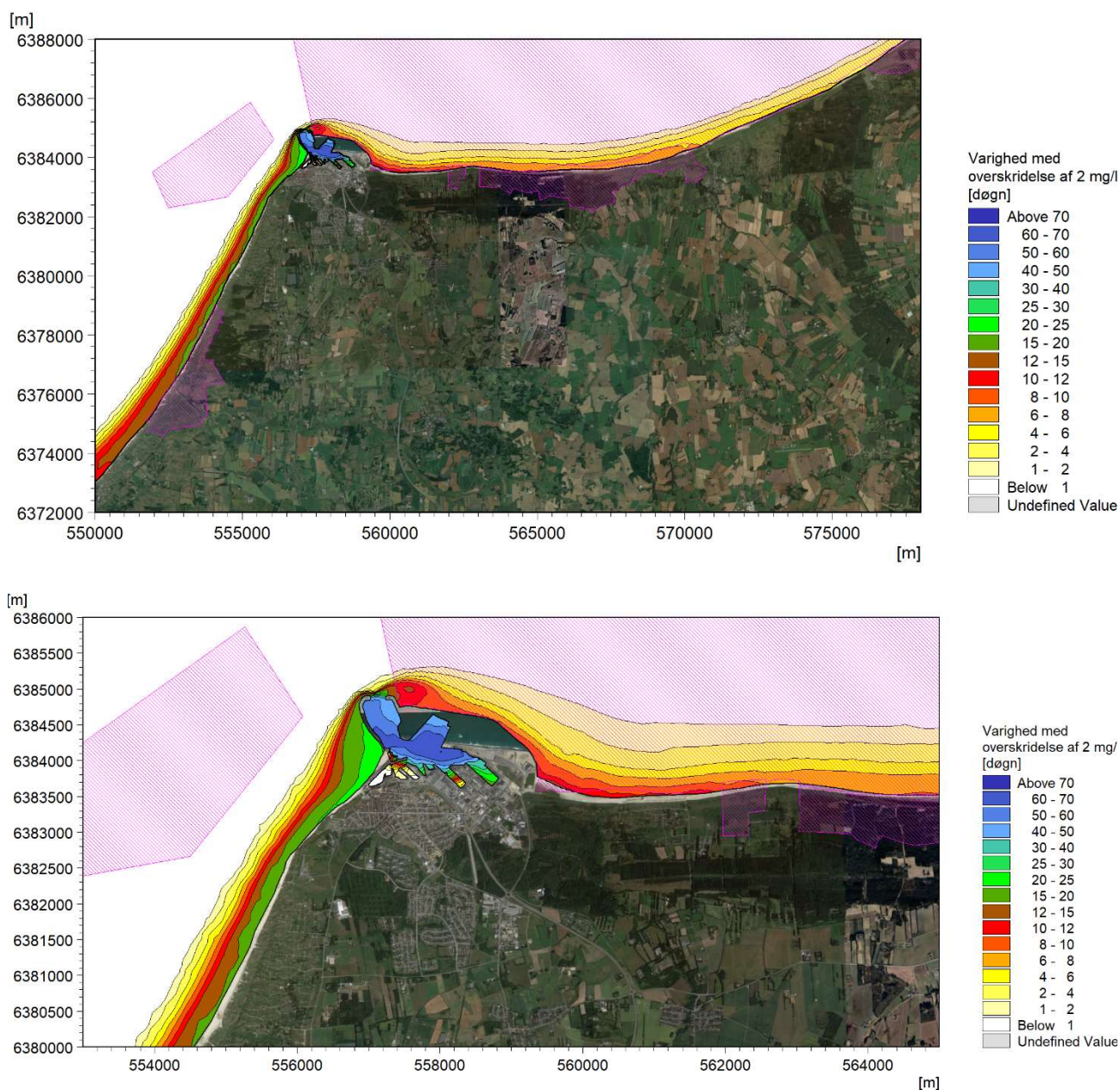


Figur 6-14 Øjebliksbillede af sedimentfane under uddybning af indsejlingen i en periode med sydvestgående strøm kort tid efter en strømvending.

6.3.1 Overskridelsesvarigheder

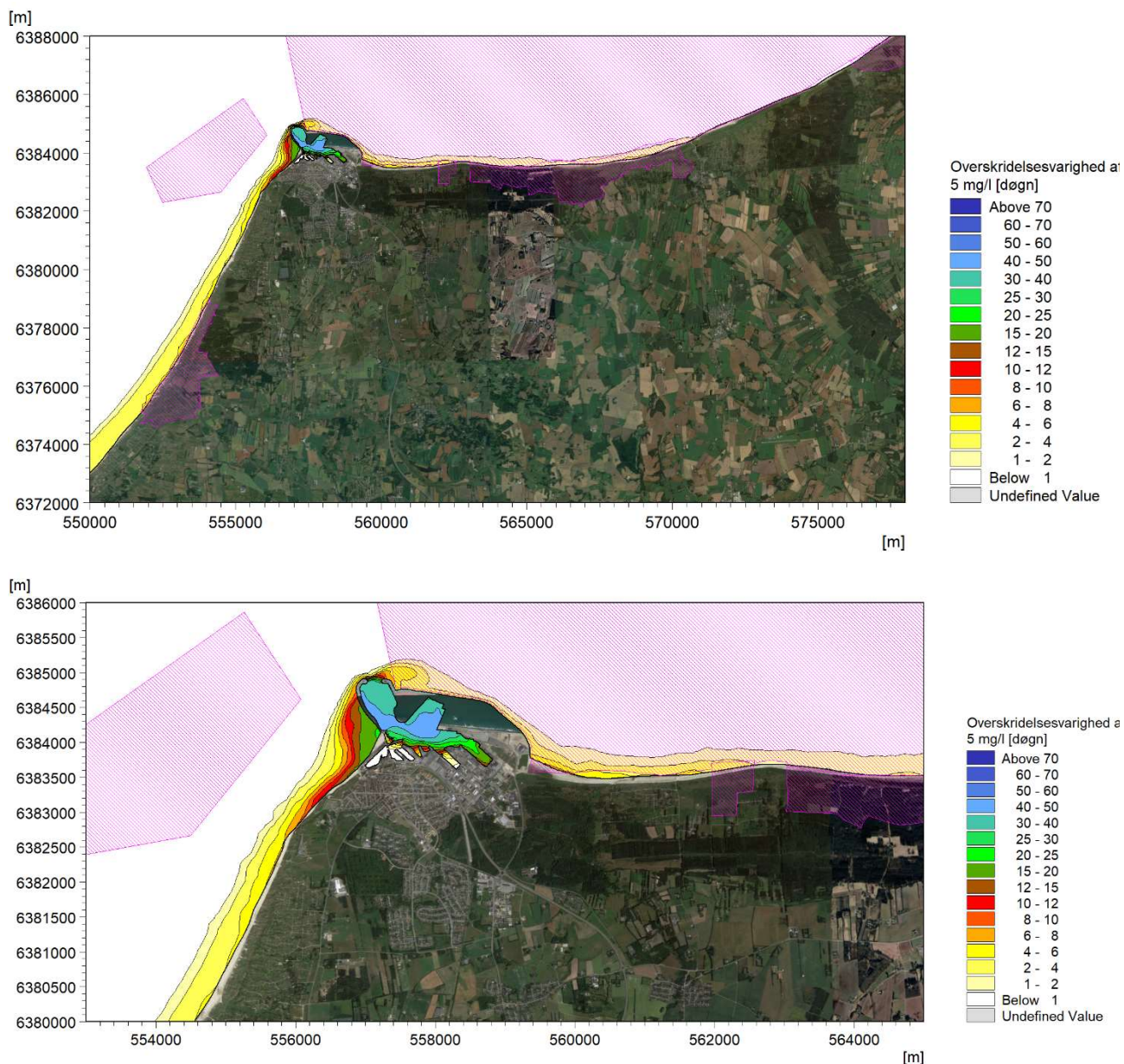
På baggrund af det modellerede gravespild er der lavet en statistisk behandling af dybdemidlet sedimentkoncentration med henblik på at fastlægge den kumulerede varighed gennem perioden hvor der uddybes, hvor en given gravespildsrelateret sedimentkoncentration overskrides. I de følgende figurer er den beregnede kumulerede overskridelsesvarighed vist for tærskelkoncentrationerne 2 mg/l, 5 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l. Grænsen for en synlig sedimentfane går typisk et sted mellem 2-5 mg/l. De to øvrige tærskelværdier angiver grænser, hvor sedimentkoncentrationerne kan have en begyndende påvirkning på flora og fauna.

I den inderste del af kystprofilet vil bølgepåvirkning medvirke til at opretholde gravespildet i suspension. Man ser derfor at de største overskridelsesvarigheder udenfor havnen er i den indre del af kystprofilet øst og vest for havnen. I Figur 6-15 er den kumulerede overskridelsesvarighed af 2 mg/l vist. Det ses, at der i området vest for havnen er en overskridelsesvarighed på op til 25 døgn og øst for havnen i Natura 2000 området på op til 15 døgn, hvilket er relativ kort tid sammenlignet med uddybningsperiodens længde på 133 dage (modelperiode). Påvirkningen opstår kun i forbindelse med uddybningen i den ydre del af havnen. Når der uddybes i områder beliggende lidt væk fra indsejlingen er tidevandsprismet for lille til at kunne trække større mængder gravespild ud af havnemundingen.



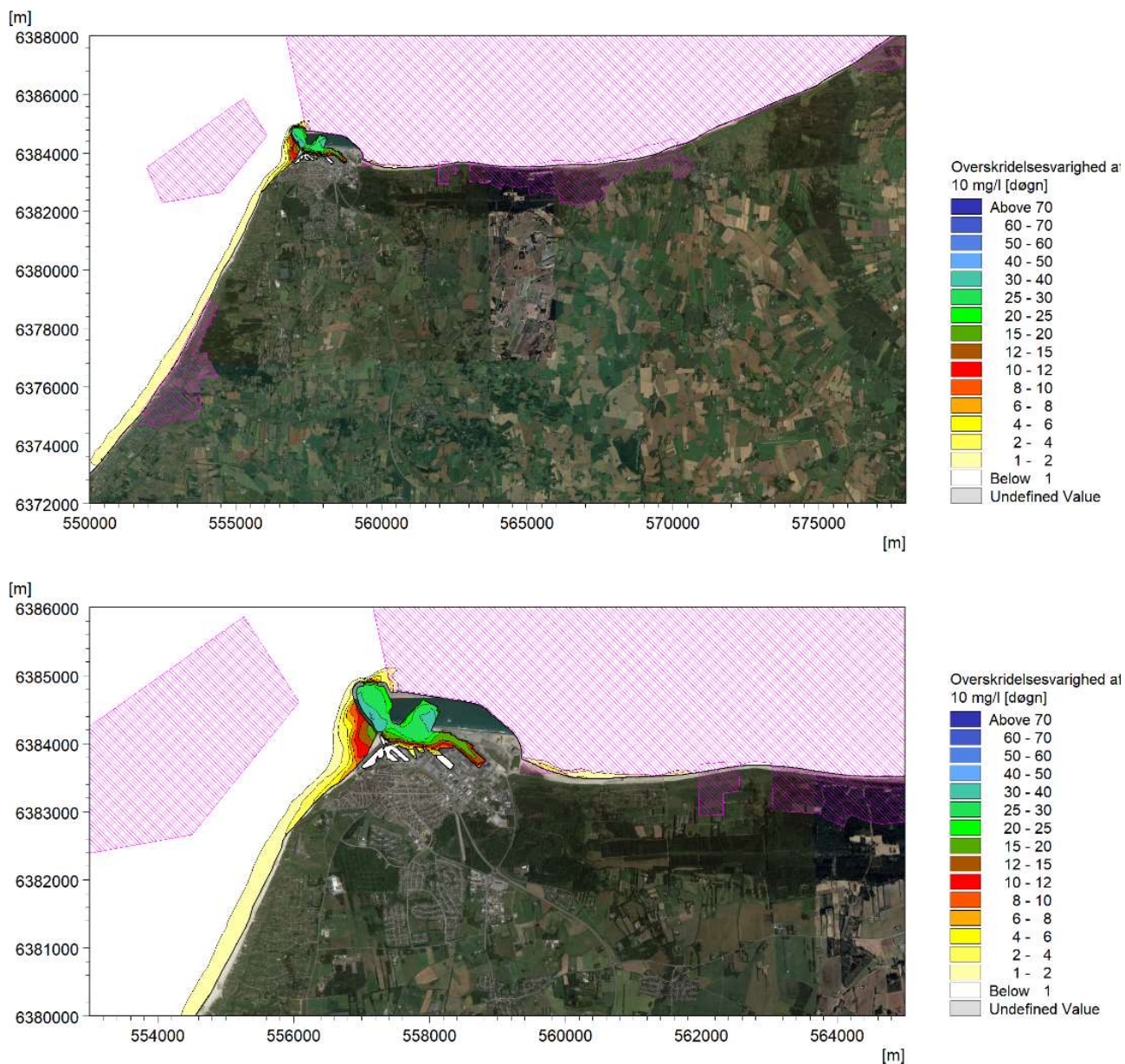
Figur 6-15 Varighed med overskridelse af 2 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.

Figur 6-16 viser den kumulerede overskridelsesvarighed af 5 mg/l, som karakteriserer en synlig sedimentfane. Det ses, at der i området vest for havnen er en overskridelsesvarighed på op til 20 døgn og øst for havnen i Natura 2000 området på op til 8 døgn, hvilket er relativt kort tid sammenlignet med uddybningsperiodens længde på 133 dage (modelperiode).



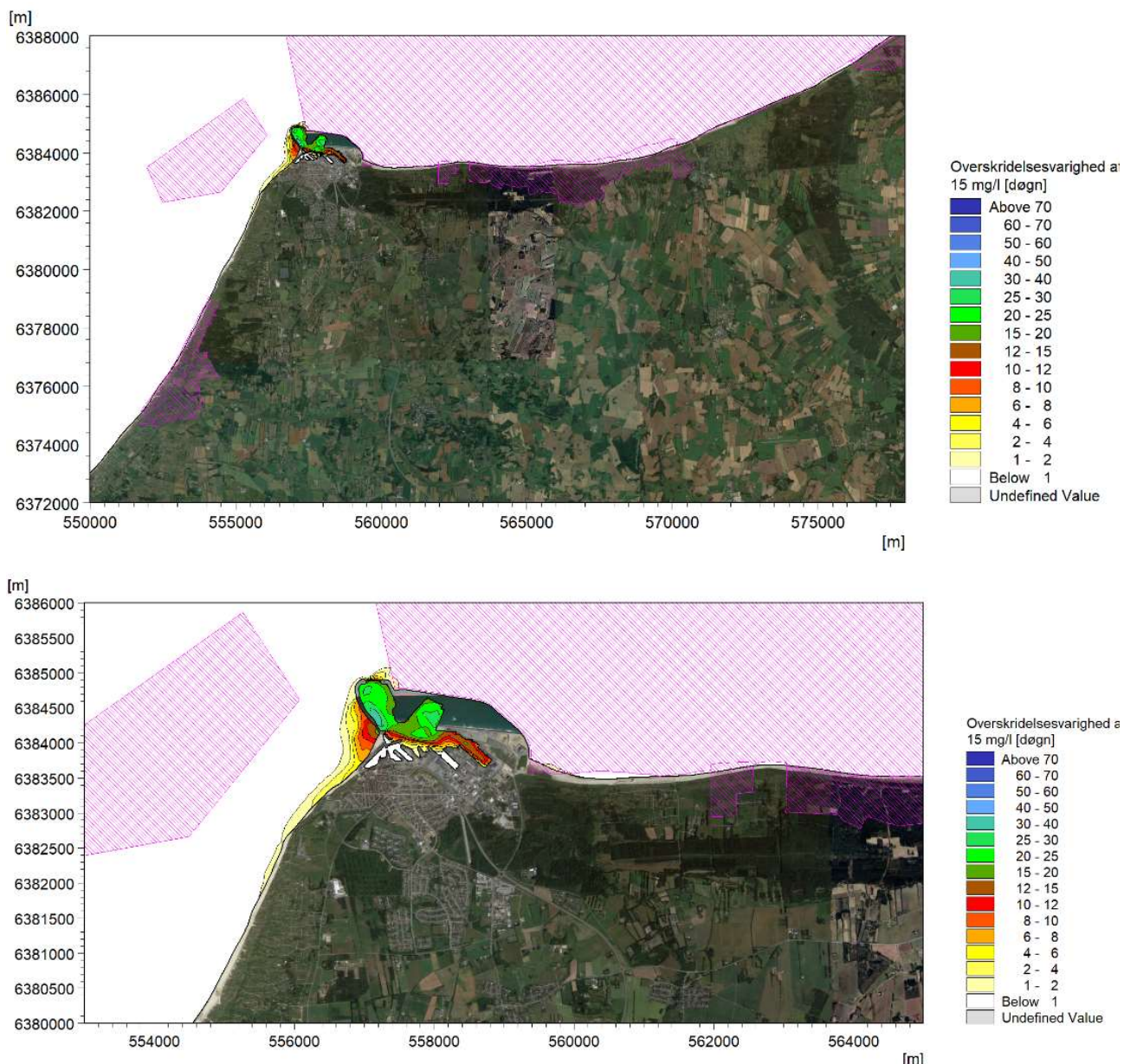
Figur 6-16 Varighed med overskridelse af 5 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.

Figur 6-17 viser den kumulerede overskridelsesvarighed af 10 mg/l, som karakteriserer en tærskelværdi for begyndende påvirkning af flora og fauna. Det ses, at der i idvandet vest for havnen er en overskridelsesvarighed på 8-15 døgn, mens området øst for havnen stort set ikke er påvirket. Påvirkningen af Natura 2000 området er dermed meget lille.



Figur 6-17 Varighed med overskridelse af 10 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.

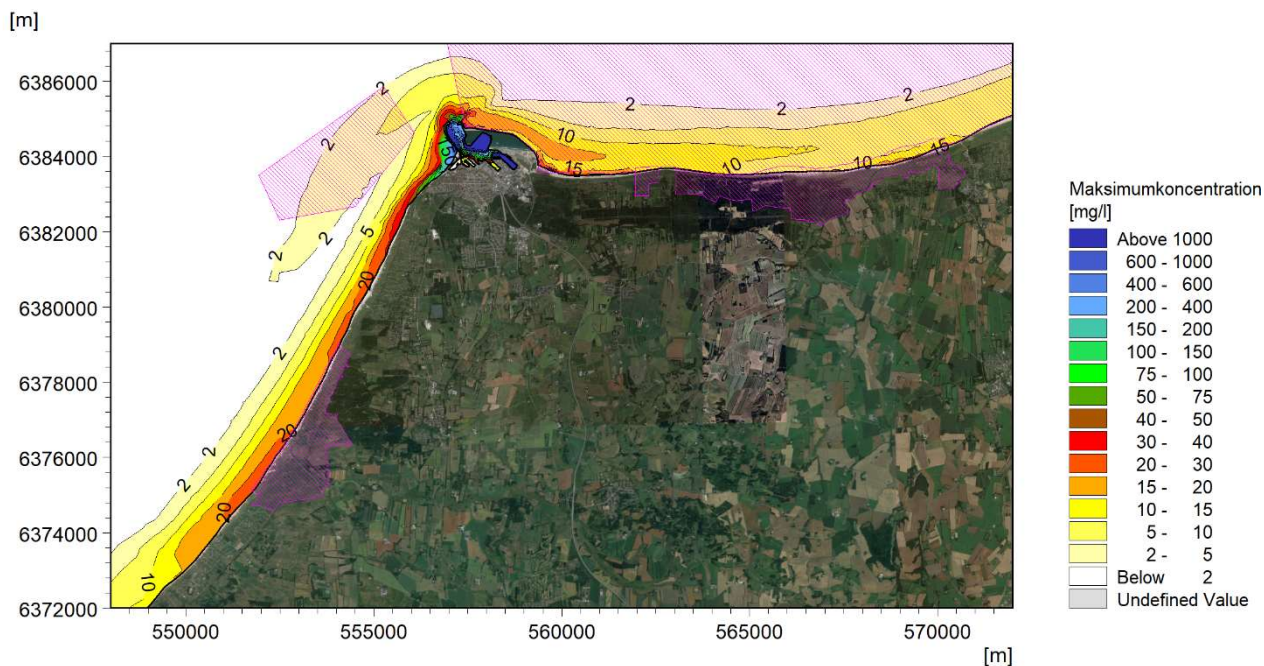
Endelig viser Figur 6-18 den kumulerede overskridelsesvarighed af 15 mg/l, som ligeledes karakteriserer en tærskelværdi for begyndende påvirkning af flora og fauna. Det ses, at der i idvandet vest for havnen er en overskridelsesvarighed på 4-15 døgn, mens området øst for havnen ikke er påvirket.



Figur 6-18 Varighed med overskridelse af 15 mg/l i hele uddybningsperioden på 133 dage.

6.3.2 Maksimumkoncentration

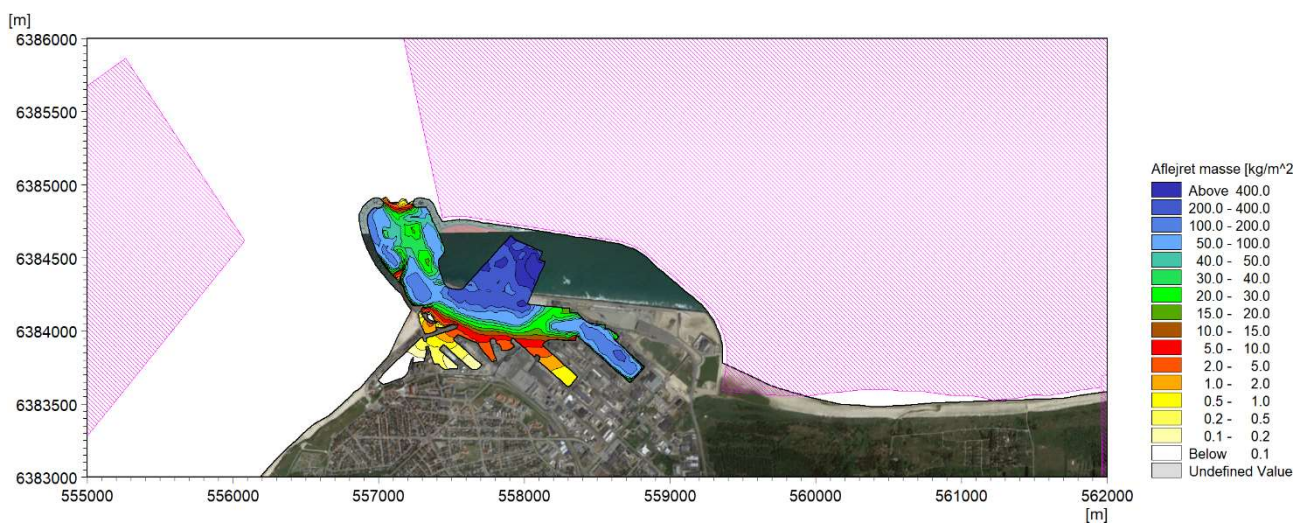
En maksimumkoncentration optræder typisk kun kortvarigt, men kan stadig være af betydning i en vurdering af uddybningsarbejdernes påvirkning på flora og fauna. I området hvor der uddybes vil der forekomme meget høje sedimentkoncentrationer, som følge af den kontinuerte tilførsel og relativt lille spredning. I Figur 6-19 er maksimumkoncentrationen gennem den fulde uddybningsperiode vist ved hjælp af et konturplot. Det ses, at maksimumkoncentrationerne udenfor havneområdet er ganske begrænsede og på et niveau som ikke afviger fra de baggrundskoncentrationer man må forvente optræder i området. I Natura 2000 området når maksimumkoncentrationen (dybdemidlet) ikke over 20 mg/l.



Figur 6-19 Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet.

6.3.3 Aflejring

Langt størstedelen af gravespildet aflejres lokalt i området, hvor der uddybes og vil derfor for størstedelens vedkommende ende med at blive genopgravet og brugt til opfyld. Uden for havnemundingen fører strømmen gravespildet langs med kysten, således det i sidste ende bliver aflejret og fordelt over et meget stort område. I Figur 6-20 er der vist et aflejningskort for gravespildet efter uddybningen er afsluttet. Det ses, at aflejringen er størst i de inderste bassiner og i de områder, hvor der afgraves de største mængder. Aflejringen uden for havne er i så tynde lag, at de ikke kan detekteres. I plottet er aflejringen angivet som kg/m^2 . Antager man at sedimentet aflejres med en tør densitet på 1.000 kg/m^3 , kan den anvendte enhed ækvivaleres med mm. Man ser derved, at aflejringstykkelserne efter uddybningsarbejdernes ophør er mindre end 0,1 mm ($\sim 0,1 \text{ kg/m}^2$) i Natura 2000 området.



Figur 6-20 Aflejningskort for gravespild. Enheden 1 kg/m^2 kan lidt forsimpelt ækvivaleres med 1 mm/m^2 .

Som et lille kuriosum, kan det nævnes at PIANC Guideline, ref. /9/, angiver en aflejringsrate på $100 \text{ g/m}^2/\text{dag}$ ($\sim 0,1 \text{ mm/m}^2/\text{dag}$), som tærskelværdi for koralrev, hvor der kan opstå en moderat til alvorlig påvirkning.

6.4 Opsummering

Gravespildsberegningerne er foretaget under antagelse om at uddybningsarbejderne først foretages efter de ydre dækmoler og bølgebrydere er blevet etableret, idet dette vil sikre at uddybningsarbejderne kan ske under afskærmede forhold, hvorved sedimentspredning af gravespild minimeres.

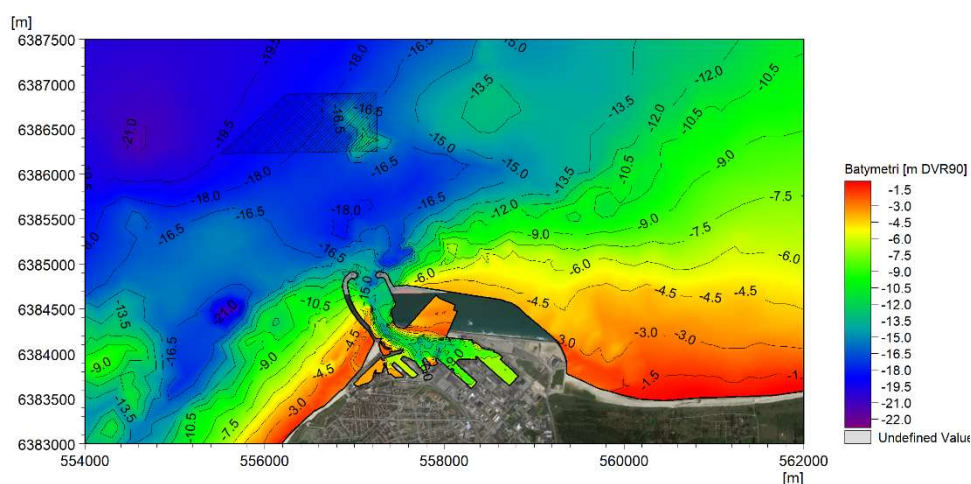
Sedimentspredningen af gravespildet til området udenfor havnen er bestemt af tidevandsprismet og hvor i havnen der uddybes. Den største spredning sker når der uddybes nær havnemundingen. Når der uddybes i de indre dele af havnen, er tidevandsprismet ikke stærkt nok til at sprede gravespildet til de omkringliggende områder udenfor havnen.

Det samlede sedimentspredningsbidrag gennem havnemundingen er på baggrund af modelberegningen estimeret til 3.851 ton, hvilket udgør 3,7% af det ved uddybningsarbejdet udløste gravespild. Den afskærmede uddybning er dermed med til at sikre en meget lille sedimentspredning til de udenfor havnen beliggende områder.

7 Sedimentspredning relateret til klapping af kohæsive materialer

I udgangspunktet forventes alle de opgravede materialer at blive anvendt til opfyld. Lermaterialer er dog typisk mindre egnede end sandmaterialer til opfyld og Hirtshals Havn ønsker derfor at få undersøgt et sedimentspredningsscenarie, hvor de kohæsive materialer (ler og silt) klappes. Sedimentets kohæsive egenskaber indebærer, at det ikke vil opføre sig som små frie enkeltpartikler, men i stedet fastholdes i klumper. Silt dominerede materialer vil være mindre kohæsive og derfor i større grad opføre sig som enkeltpartikler end lerdominerede materialer. Da der vil være en usikkerhed på hvordan det opgravede kohæsive materiale vil opføre sig efter opgravning, er der udført to klappningsscenarier, hvor der er antaget en forskellig opførsel af det klappede materiale.

Placeringen af den udpegede klapplads og områdets batymetri er vist i Figur 7-1. Klaptilladelsen ref. /11/ udløb i 2022, men tillod klapping af op til 500.000 m³ oprenset materiale fra den nuværende havns indsejlingssektor. Klappingerne skal foretages, så der ikke forekommer vanddybder mindre end 14,5 meter i forhold til middelvandstand (DVR90) i klapområdet. I tilladelsen er det forudsat at klapmaterialet er uforurenat og vil indgå i den naturlige meget store materialetransport, der er i området omkring klappladsen, og at der derfor ikke var behov for en miljøvurdering. Det kohæsive klapmateriale afviger fra den naturligt forekommende sedimenttype på stedet (postglacialt sand) og det er derfor nødvendigt at belyse, hvad der vil ske, hvis der klappes kohæsivt materiale fra uddybningsarbejderne på klappladsen.



Figur 7-1 Klapplads indikeret med sort skravering, hvorpå der over en 5-årig periode må klappes op til 500.000 m³ oprenset materiale fra indsejlingen, ref. /11/.

7.1 Klap materiale

Klapmaterialets forventede kornsammensætning er beskrevet i Tabel 6-4. Denne sammensætning forholder sig ikke til om leret er små enkeltpartikler eller større sammenhængende klumper, som hurtigt falder til bunds. En bedre forståelse af lermaterialet opførsel ved opgravning og klapping kan opnås ved at komme en prøve af materialet ned i et gennemsigtigt plasticrør med vand,

lukke enderne og derefter vende røret gentagne gange for at se i hvilken grad materialet fraktionerer. I nogle tilfælde kan leret være så hårdt at vandet forbliver klart, mens det i andre tilfælde fraktionerer, gør vandet grumset og i højere grad falder som enkeltpartikler. For at tage hensyn til sammenhængningsevnen er det nødvendigt at definere en fjerde mere grovkornet fraktion, som hurtigt vil lande og aflejres på bunden. Uden et forhåndskendskab til det kohæsive materiales opførsel ved klapning (eller omrystning i et klart plasticrør) kan omfanget af klumper ikke angives særligt præcist. Den manglende viden om lerets opførsel gør, at der er valgt at udføre en konservativ modellering, hvor partiklerne ikke udgøres af klumper og en realistisk modellering, hvor effekten af klumper bliver beskrevet ved hjælp af en grovere fjerde fraktion. Sammensætningen med de to antagelser er angivet i Tabel 7-1 og Tabel 7-2

Tabel 7-1 Konservativ antagelse om klapmaterialets sammensætning.

Sedimenttype	Lerindhold [%]	Siltindhold [%]	Sandindhold [%]
Siltmaterialer	5	80	15
Lermaterialer	50	45	5

Tabel 7-2 Realistisk antagelse om klapmaterialets sammensætning.

Sedimenttype	Lerindhold [%]	Siltindhold [%]	Sandindhold [%]	Klumper [%]
Siltmaterialer	2	40	10	48
Lermaterialer	10	20	2	68

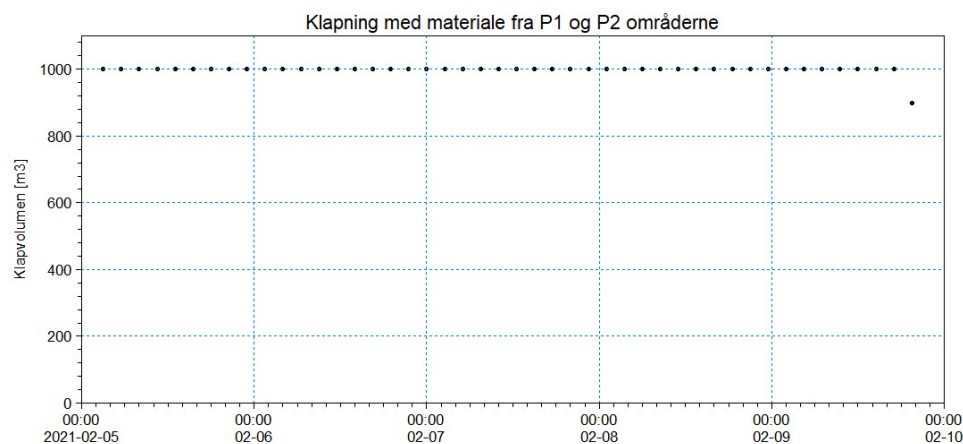
Materialets kohæsive egenskaber har betydning for faldhastighederne og det er derfor reflekteret i de for klapmaterialet anvendte faldhastigheder angivet i Tabel 7-3.

Tabel 7-3 Faldhastigheder opgjort på sedimenttype.

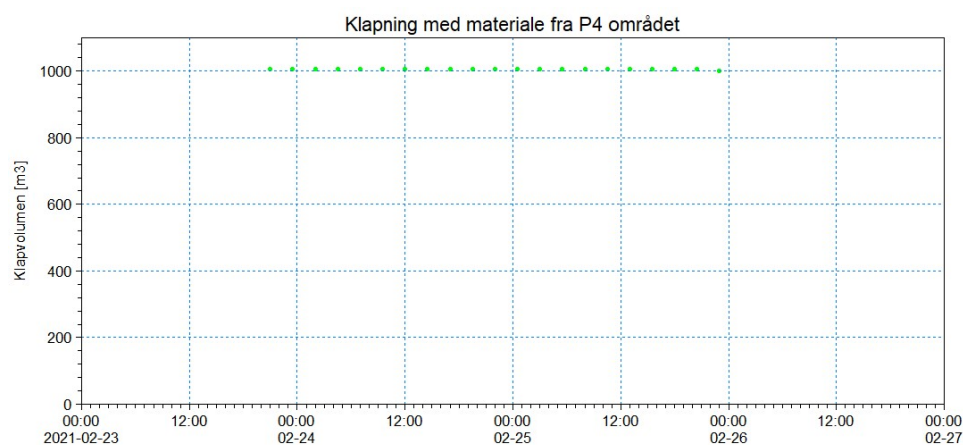
Materiale	Ler	Silt	Finsand	Klumper
Faldhastighed [mm/s]	0,1	0,5	1	50

7.2 Tidspunkter for klapning og mængder

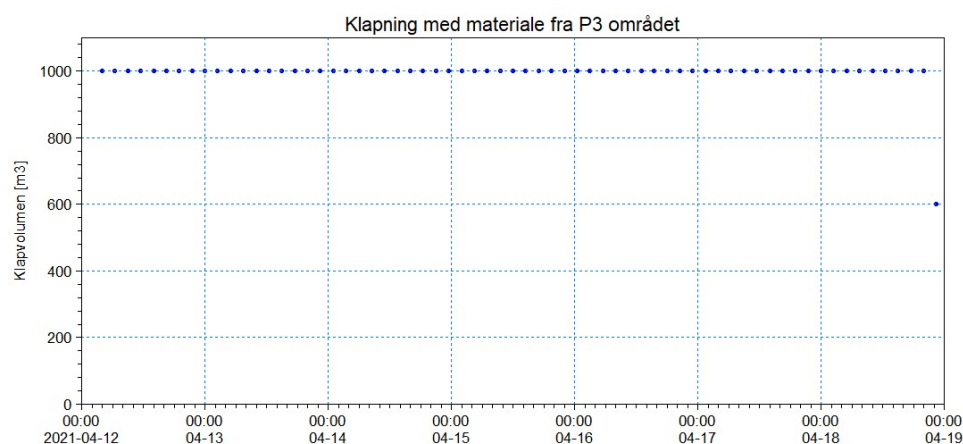
Klapsimuleringer følger samme tidsforløb som uddybningsscenariet, dog med den forskel at simuleringen først starter, når de første klapninger finder sted. Der bliver dermed kun foretaget klapninger i de perioder, hvor der afgraves kohæsive materialer. Klapningerne antages udført med en splitpram med en kapacitet på 1.000 m³. Da produktionsraten for BHD er antaget til 400 m³/time vil der forventeligt klappes med 2,5 timers mellemrum i de perioder, hvor der afgraves kohæsive materialer. Det er antaget at de kohæsive materialer i område P1 og P2 afgraves i samme sekvens. I de følgende plot (Figur 7-2 til Figur 7-5) er klapningsmængder og tidspunkt angivet for hver af de fire definerede uddybningsområder. Den sidste klapning er typisk med en lidt mindre mængde, da den er afstemt med det samlede beregnede klappvolumen.



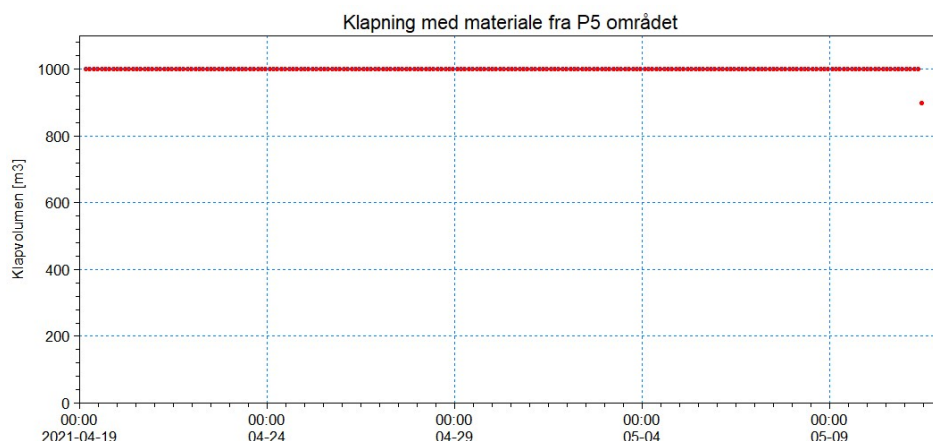
Figur 7-2 Klapningsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybningsområde P1 og P2.



Figur 7-3 Klapningsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybningsområde P4.



Figur 7-4 Klapningsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybningsområde P3.

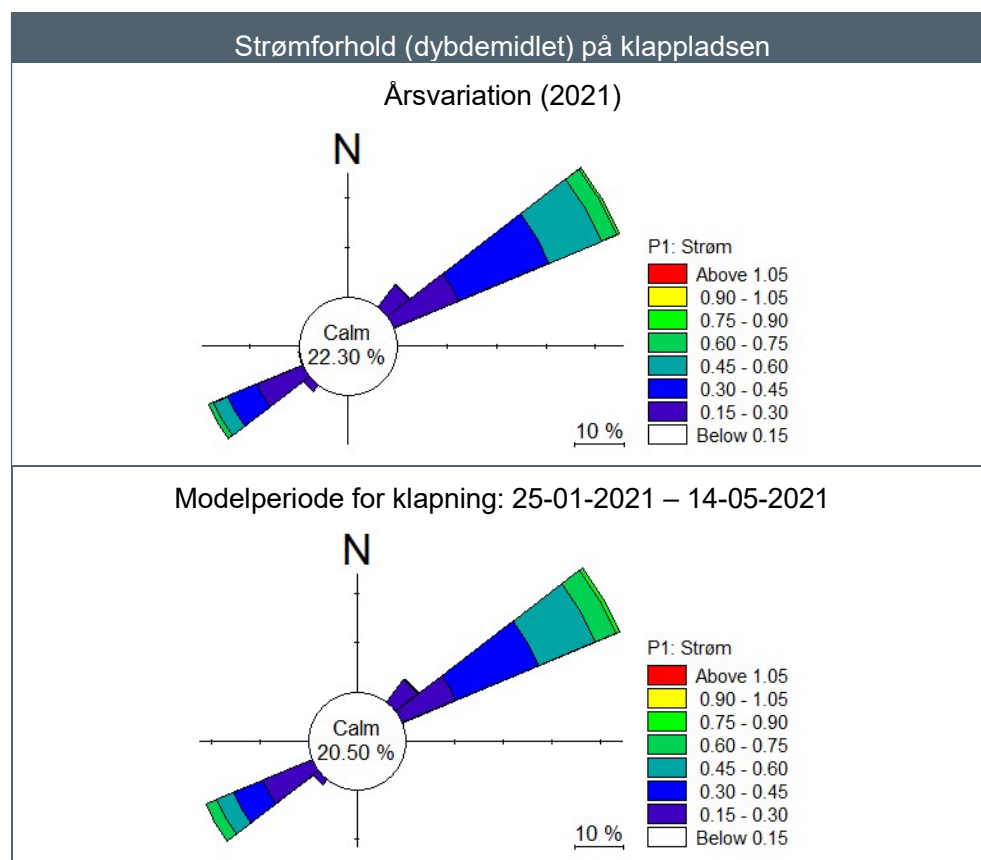


Figur 7-5 Klappingsmængde og tidspunkt for materialer fra uddybnings-område P4.

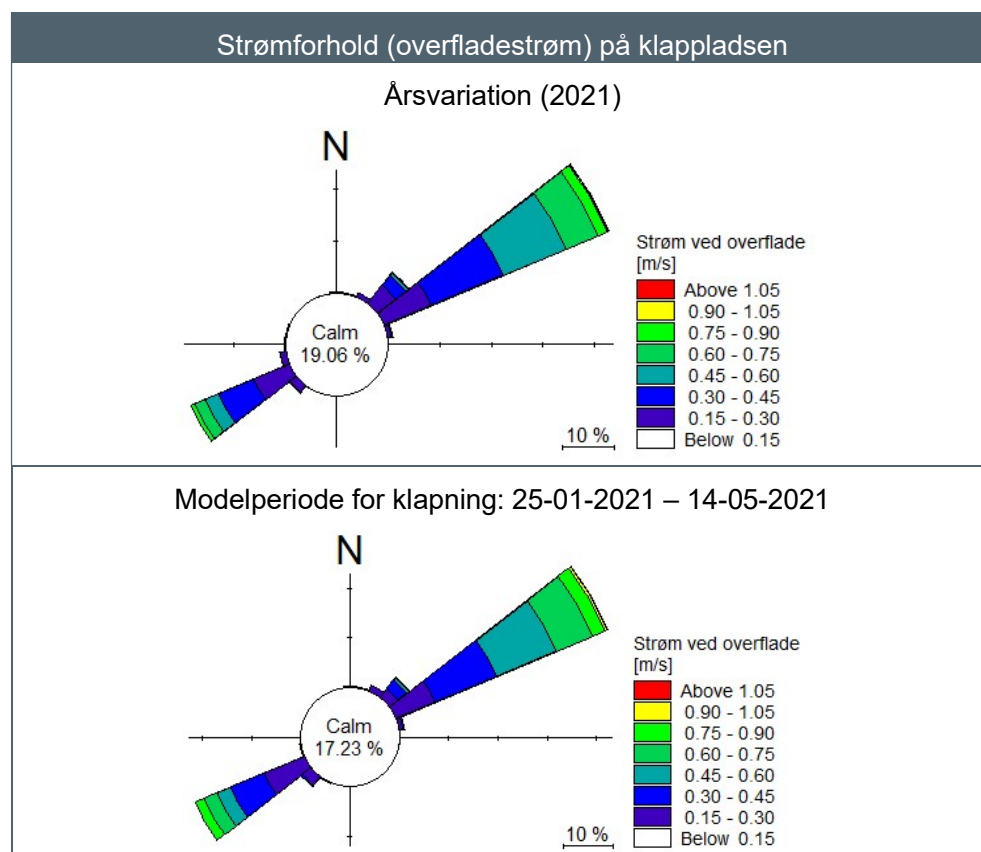
7.3 Strømforhold på klapplads

Strømforholdene på klappladsen varierer som følge af påvirkning fra tidevand og passage af meteorologiske vejrsystemer. Det vil derfor være tilfældigt hvilket strømforhold der optræder, når der klappes. Perioderne med klapping er dog så lange, at man må forvente at der samlet set kan opnås en repræsentativ sedimentfaneudbredelse. Strømmens årsfordeling (2021) på klappladsen og i den fulde periode, hvor igennem der foretages klappinger, er illustreret ved hjælp af en strømrose for dybdemidlet strøm i Figur 7-6. Strømroserne viser den retning strømmen er rettet mod. Det ses, at der ikke er megen forskel på strømforholdene i den fulde klapperperiode sammenlignet med årsvariationen. Strømmen er lidt kraftigere i klapperperioden, idet dens tidlige beliggenhed er svagt biased til vinterhalvåret. Det fremgår også af strømrosen, at østgående strømning optræder cirka dobbelt så hyppigt som vestgående strømning. Forholdene er derfor karakteriseret ved en østgående nettodrift af vandstrømning og sedimenttransport.

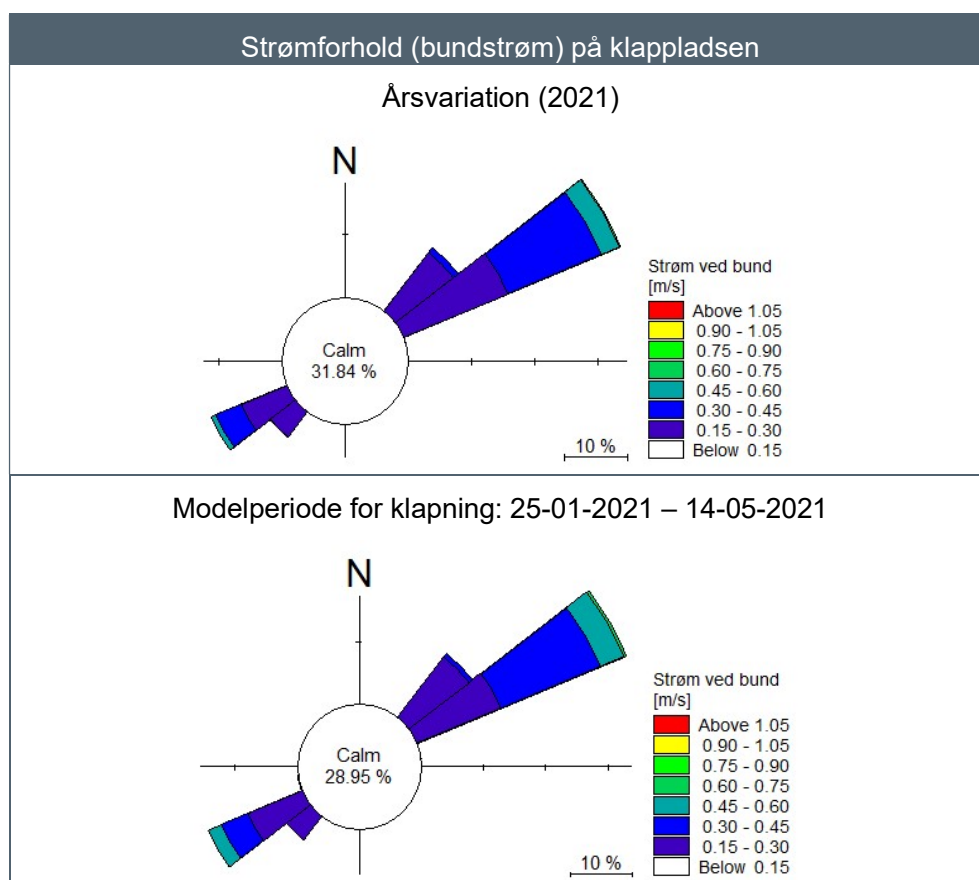
Strømforholdene ved overflade og bund er vist i Figur 7-7 og Figur 7-8. Strømroserne for overfladestrøm og bundstrøm indeholder de samme trends som den dybdemidlet strøm. Bundstrømmen er naturligt svagere som følge af påvirkning fra bundfriktion. Som for dybdemidlet strøm er både bundstrøm og overfladestrøm svagt forstærket i klapperperioden sammenholdt med årsvariationen.



Figur 7-6 Strømroser visende dybdemidlet strøm på klapplads. Øverst: årsvariation. Nederst: den fulde klapperiode.



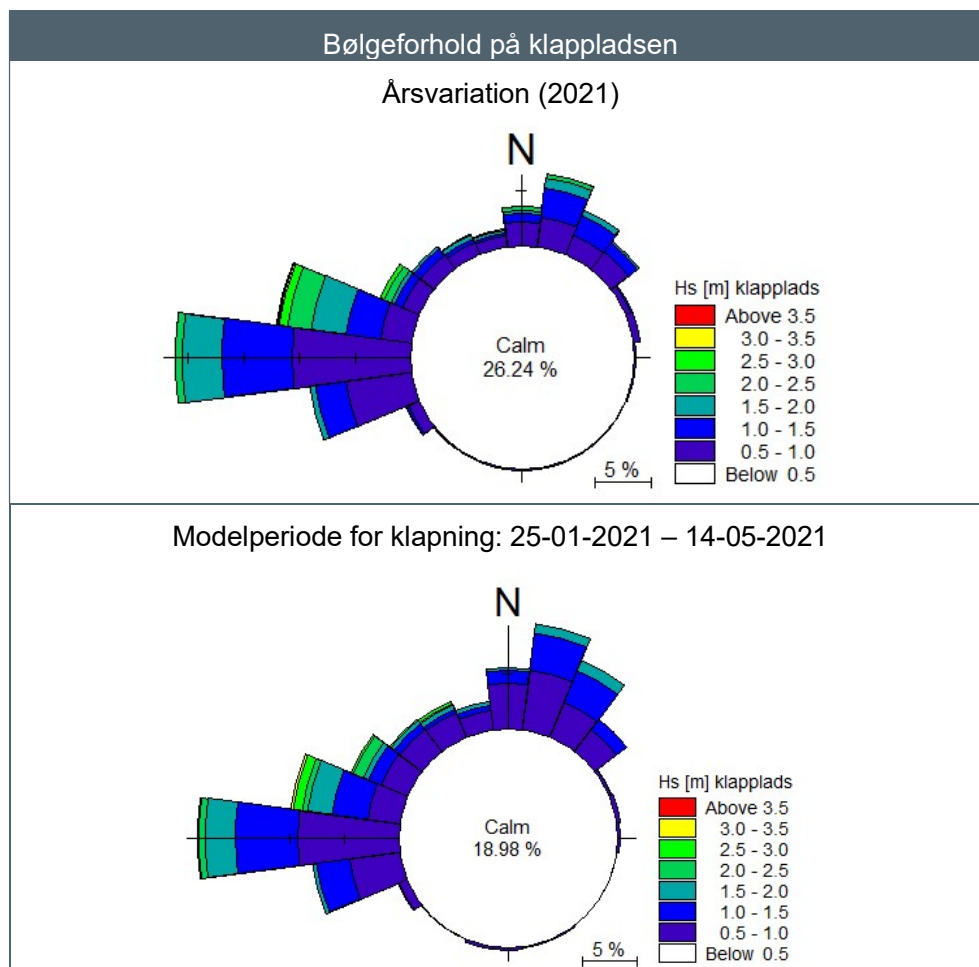
Figur 7-7 Strømroser visende dybdemidlet strøm på klapplads. Øverst: årsvariation. Nederst: den fulde klapperiode.



Figur 7-8 Strømroser visende dybdemidlet strøm på klappads. Øverst: årsvariation. Nederst: den fulde klapperiode.

7.4 Bølgeforhold på klappads

Bølgerne har betydning for turbulensniveauet på klapplassen og dermed for, hvor let klappmaterialet udfældes og re-suspenderes. På dybere vand mærkes de kortperiodiske vindgenererede bølger i mindre grad ved bunden end langperiodiske dønninger. Bølgenes højde og retning varierer med vindforholdene. I hård sø vil det ikke være muligt at foretage klapping, men det er der ikke taget hensyn til her. Det vil også være i disse perioder man må forvente den største sedimentspredning i forbindelse med en klapping. Bølgeforholdenes årsvariation (2021) og i den fulde klapperiode er illustreret ved hjælp af bølgeroser i Figur 7-9. Roserne angiver den retning som bølgerne kommer fra. Det ses, at bølgeforholdene i klapperioden minder meget om årsvariationen. Bølgehøjderne er lidt højere i klapperioden, idet dens tidslige beliggenhed er svagt biased til vinterhalvåret. Ligeledes optræder bølger fra nord lidt mere hyppigt i klapperioden end set over hele året. De dominerende bølgeretninger er fra vest og nordvestvest, samt fra nordnordøst.



Figur 7-9 Bølgeroser på klappads. Årsvariation (2021) og i modelperiode for klapping.

7.5 Sedimentspredning i forbindelse med klapping

Hele klappadsområdet tages i brug i forbindelse med klappingerne af kohæsivt materiale (ler og silt). Samlet set udføres der 137 klappinger med lerholdigt materiale og 215 klappinger med siltholdigt materiale. Totalt set 348 klappinger, som er fordelt på perioderne:

- 5/2 - 9/2 2021: 46 klappinger med lerholdigt materiale
- 23/2 – 25/2 2021: 21 klappinger med lerholdigt materiale
- 12/4 – 18/4 2021: 66 klappinger med lerholdigt materiale
- 19/4 – 11/5 2021: 215 klappinger med siltholdigt materiale

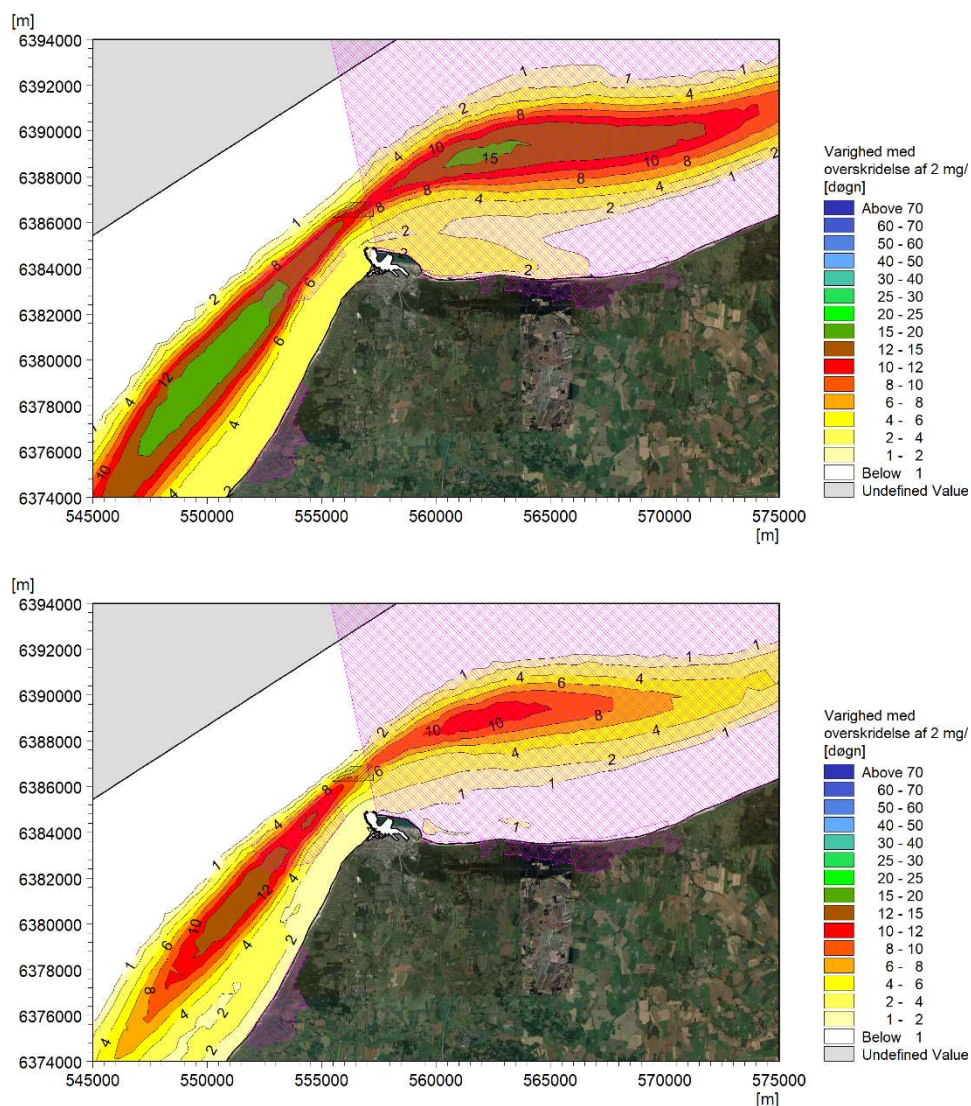
Det skal bemærkes at hovedparten af det klappede er siltholdigt materiale fra område 5, som ikke umiddelbart er en del af projektet. Der klappes samlet set i op mod 37 dage i løbet af modelperioden og kun i de perioder, hvor der i graveplanen uddybes i ler eller siltholdigt materiale. I de øvrige perioder graves der sandholdige materialer som nyttiggøres til opfyld af det fremtidige havneområde.

7.5.1 Overskridelsesvarigheder

Klapskyernes påvirkningsområde er i de følgende plot statistisk beregnet og giver derfor let lægmand et forkert billede af klapskyernes faktiske opførsel. De

enkelte klappninger danner en klapsky af begrænset udstrækning som føres med strømmen og som hvis forholdene tillader det udfældes gradvist. Klapskyerne vil derfor bevæge sig som perler på en snor og ikke som en stor kontinuert sammenhængende fane, som de statistisk beregnede varighedsplot med overskridelse af en given sedimentkoncentration ellers let kan give indtryk af.

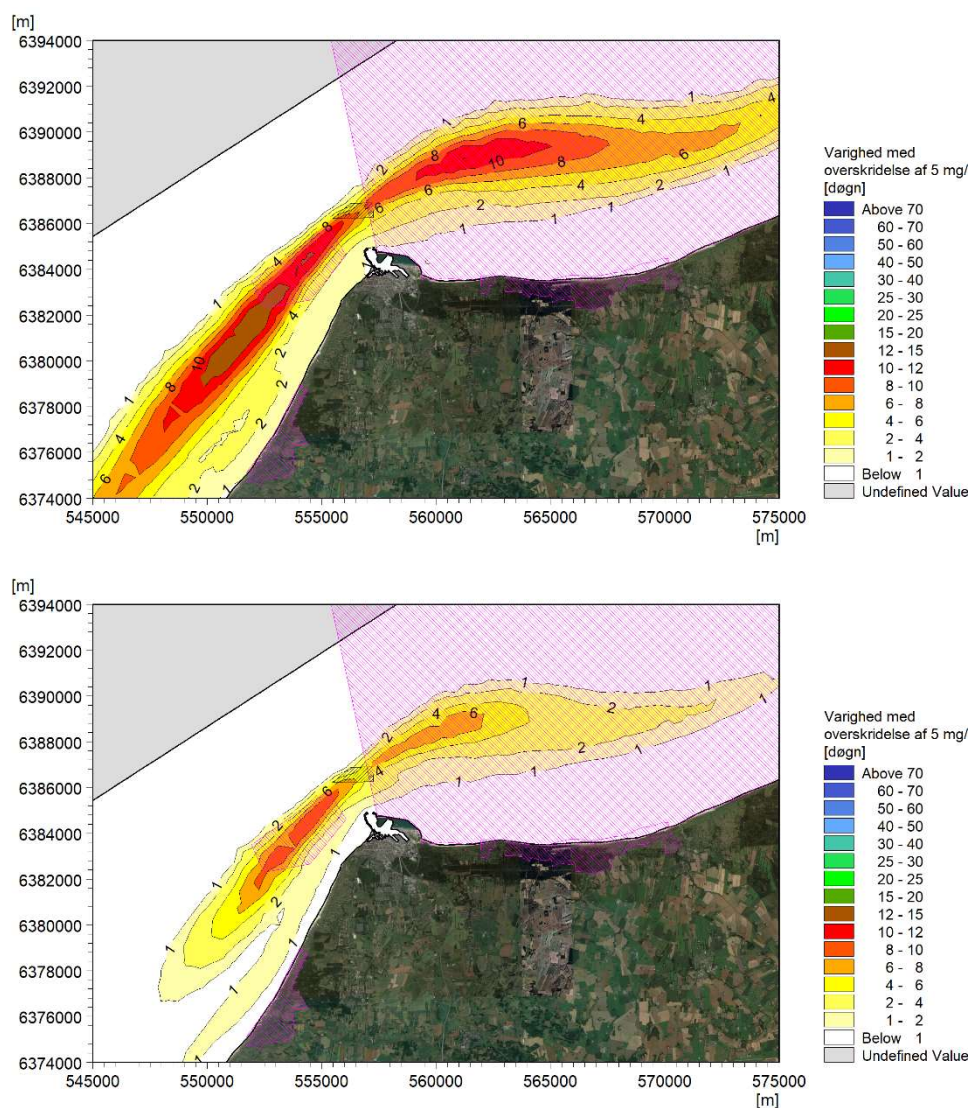
I Figur 7-10 er den beregnede overskridelsesvarighed af en sedimentkoncentration på 2 mg/l ud over den naturlige baggrundskoncentration vist for scenariet med en konservativ materialeantagelse (øverst) og en realistisk materialeantagelse (nederst). Det ses som forventet, at der er spredning til områderne øst og vest for klapplassen. Klappanen udbredes til Natura 2000 området (indikeret med pink skravering). I områderne øst og vest for havnen er der en overskridelse af 2 mg/l på op til 15-20 dage i scenariet med en konservativ antagelse om materialesammensætning, mens det for det mere realistiske scenarier er op til 10-12 dage i området øst for havnen og 12-15 dage i det mindre område vest for havnen.



Figur 7-10 Varighed med overskridelse af 2 mg/l i klapperioden på 109 dage.
Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning.
Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

I Figur 7-11 er den beregnede overskridelsesvarighed af en sedimentkoncentration på 5 mg/l ud over den naturlige baggrundskoncentration vist for

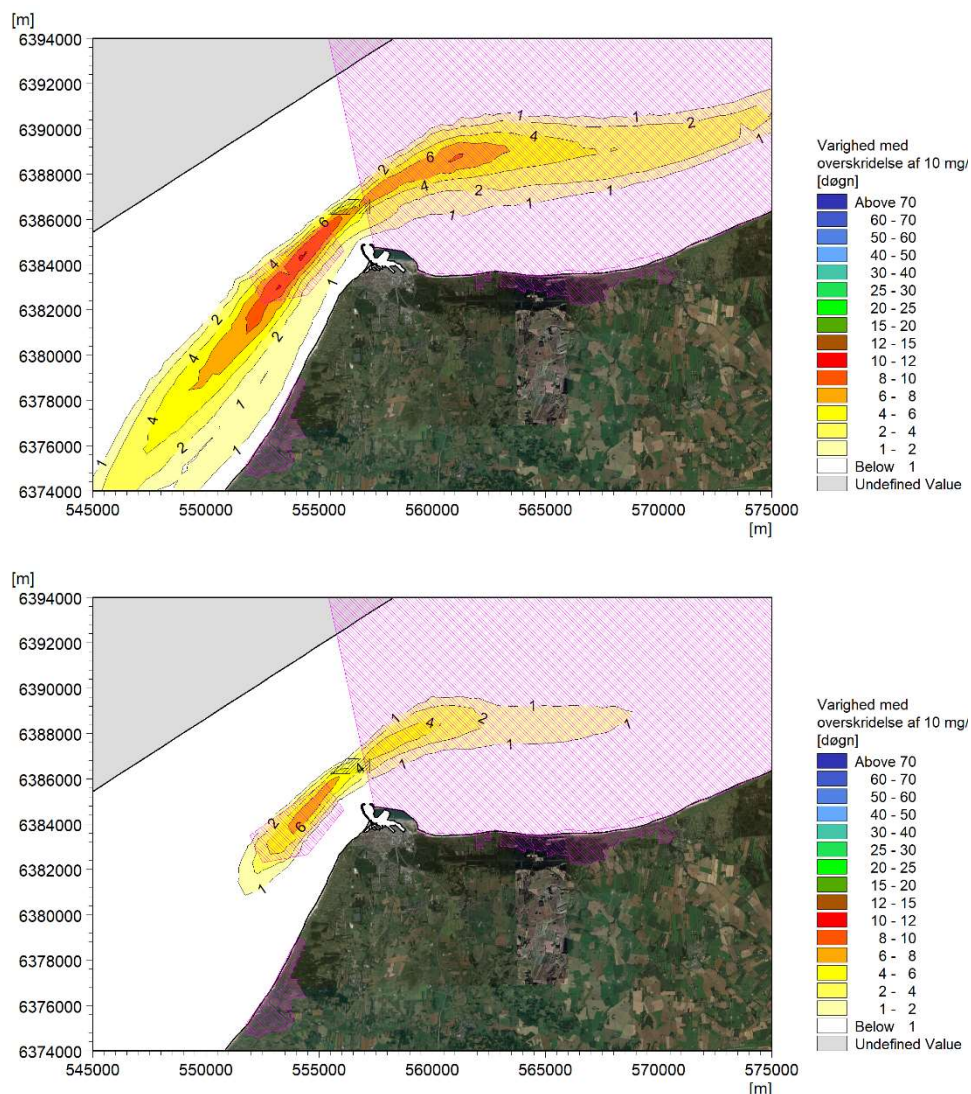
scenariet med en konservativ materialeantagelse (øverst) og en realistisk materialeantagelse (nederst). Sedimentkoncentrationer på 2-5 mg/l repræsenterer typisk kriteriet for en synlig sedimentfane. Der er som forventet spredning til områderne øst og vest for klappladsen. I Natura 2000 området øst og vest for havnen er der en overskridelse af 5 mg/l på op til 10-12 dage i scenariet med en konservativ antagelse om materialesammensætning og 6-8 dage i det realistiske scenarie. I det mindre område vest for havnen er overskridelsen 10-12 dage med konservative antagelser og 8-10 dage med realistiske antagelser.



Figur 7-11 Varighed med overskridelse af 5 mg/l i klapperperioden på 109 dage.
Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning.
Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

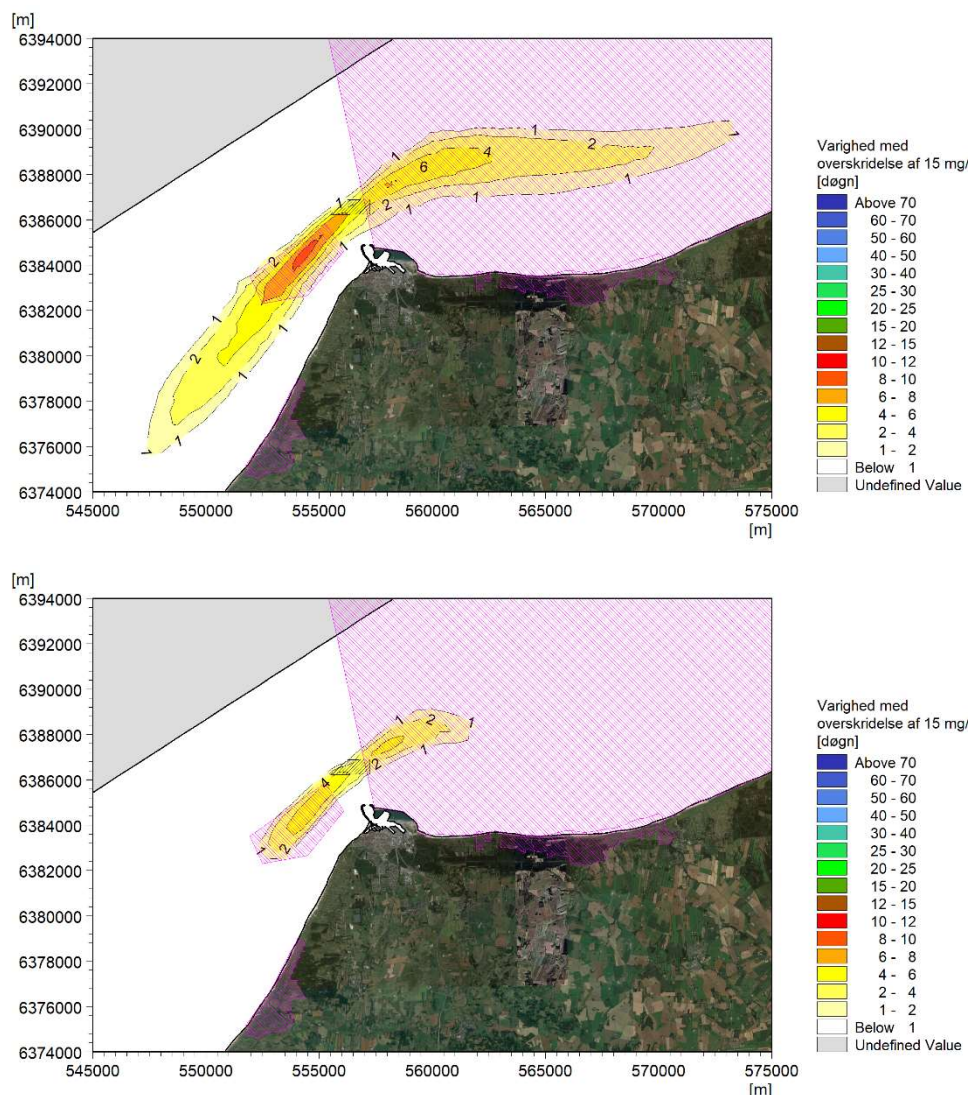
I Figur 7-12 er den beregnede overskridelsesvarighed af en sedimentkoncentration på 10 mg/l ud over den naturlige baggrundskoncentration vist for scenariet med en konservativ materialeantagelse (øverst) og en realistisk materialeantagelse (nederst). Sedimentkoncentrationer på 10-15 mg/l repræsenterer typisk en tærskelværdi for begyndende påvirkning af flora og fauna. Der er som forventet spredning til områderne øst og vest for klappladsen. I Natura 2000 området øst og vest for havnen er der en overskridelse af 10 mg/l

på op til 8 dage i scenariet med en konservativ antagelse om materialesammensætning og 4-6 dage i det realistiske scenarie. I det mindre område vest for havnen er overskridelsen 10 dage med konservative antagelser og 8-10 dage med realistiske antagelser.



Figur 7-12 Varighed med overskridelse af 10 mg/l i den fulde klapperperiode.
Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning.
Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

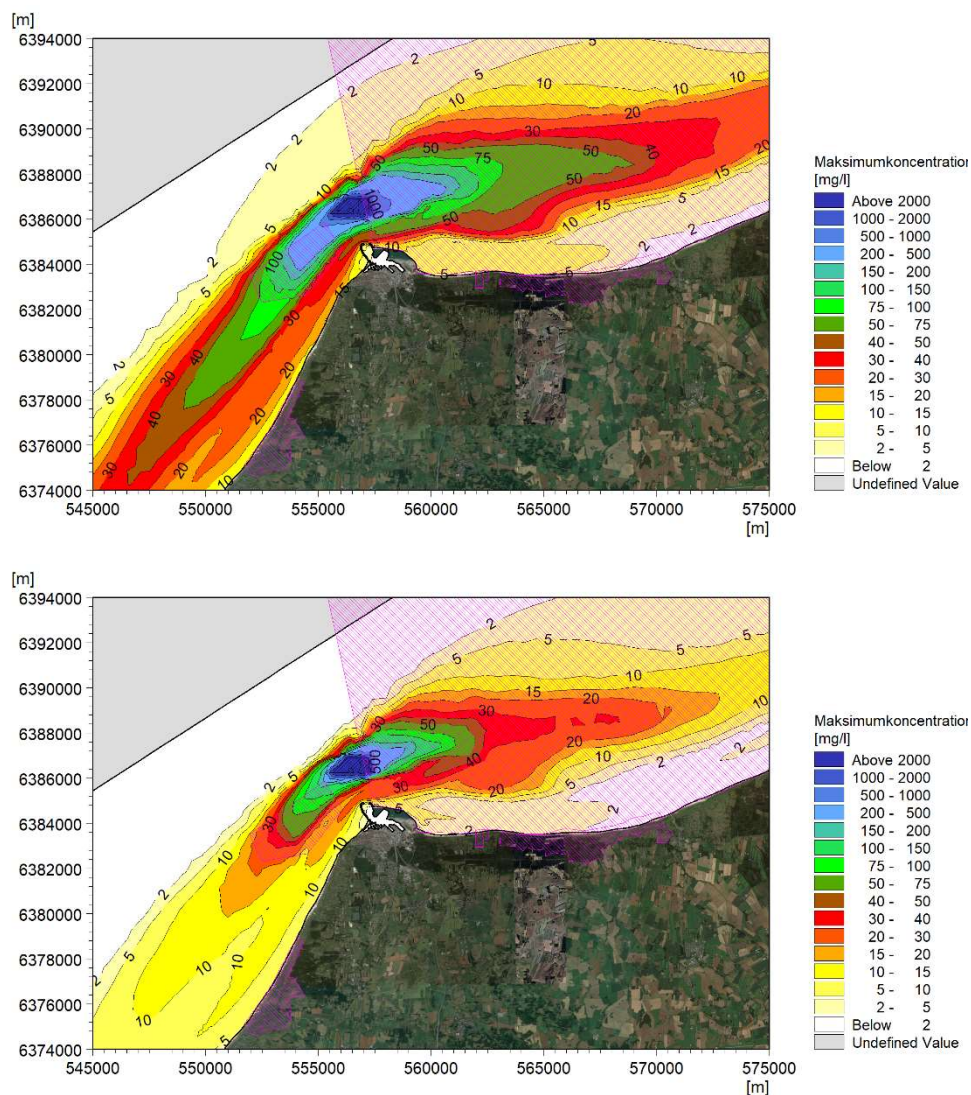
I Figur 7-13 er den beregnede overskridelsesvarighed af en sedimentkoncentration på 15 mg/l ud over den naturlige baggrundskoncentration vist for scenariet med en konservativ materialeantagelse (øverst) og en realistisk materialeantagelse (nederst). Sedimentkoncentrationer på 10-15 mg/l repræsenterer typisk en tærskelværdi for begyndende påvirkning af flora og fauna. Der er som forventet spredning til områderne øst og vest for klapplassen. I Natura 2000 området øst og vest for havnen er der en overskridelse af 10 mg/l på op til 6-8 dage i scenariet med en konservativ antagelse om materialesammensætning og 4 dage i det realistiske scenarie. I det mindre område vest for havnen er overskridelsen 8-10 dage med konservative antagelser og 4-6 dage med realistiske antagelser.



Figur 7-13 Varighed med overskridelse af 15 mg/l i den fulde klapperperiode.
 Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning.
 Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

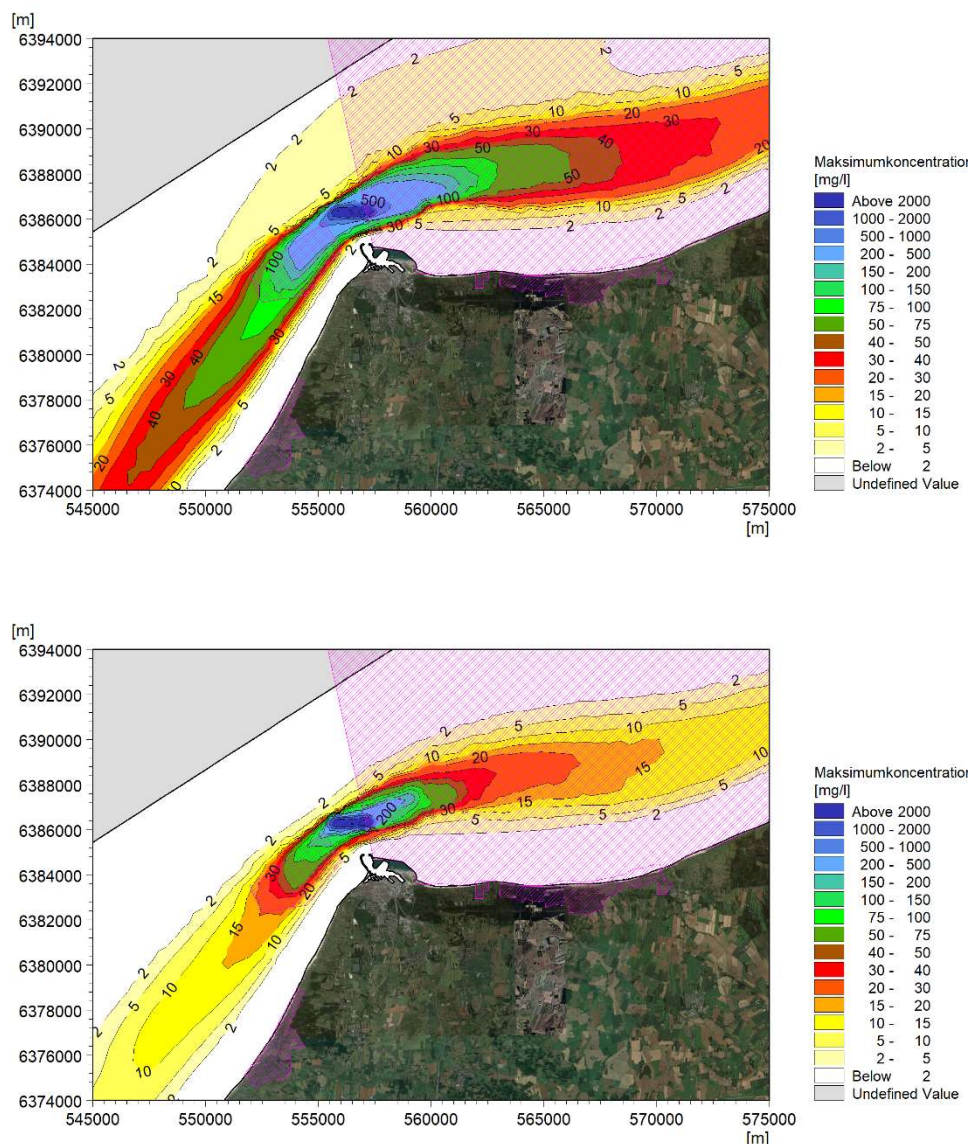
7.5.2 Maksimumkoncentration

Maksimumkoncentrationerne bliver meget høje ved klapping, men kun ganske kortvarigt da hovedparten af klappematerialet falder til bunden. Selvom en maksimumkoncentration typisk kun optræder ganske kortvarigt, kan den stadig være af betydning i en vurdering af påvirkning på flora og fauna. I Figur 7-14 er dybdemidlet maksimumkoncentration (af fjernfeltet) vist for scenariet med en konservativ materialeantagelse (øverst) og en realistisk materialeantagelse (nederst). Det ses, at maksimumkoncentrationerne bliver meget høje i klappadsområdet og i overgangene til de to Natura 2000 områder beliggende øst og vest for klappadsen. Maksimumkoncentrationerne er kraftigt reduceret i det realistiske scenarie sammenholdt med det konservative scenarie.



Figur 7-14 Maksimumkoncentration (dybdemidlet) i den fulde klapperperiode.
Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning.
Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

Da det siltholdige klappmateriale fra polygon 5 ikke umiddelbart er en del af projektet, er der øverst i Figur 7-15 vist dybdemidlet maksimumkoncentration (af fjernfeltet) for scenariet med en konservativ materialeantagelse (øverst) og en realistisk materialeantagelse (nederst). Det ses, at maksimumkoncentrationerne med antagelse om klumper reduceres noget i forhold til scenariet, hvor der også klappes siltholdigt materiale fra polygon 5 området.

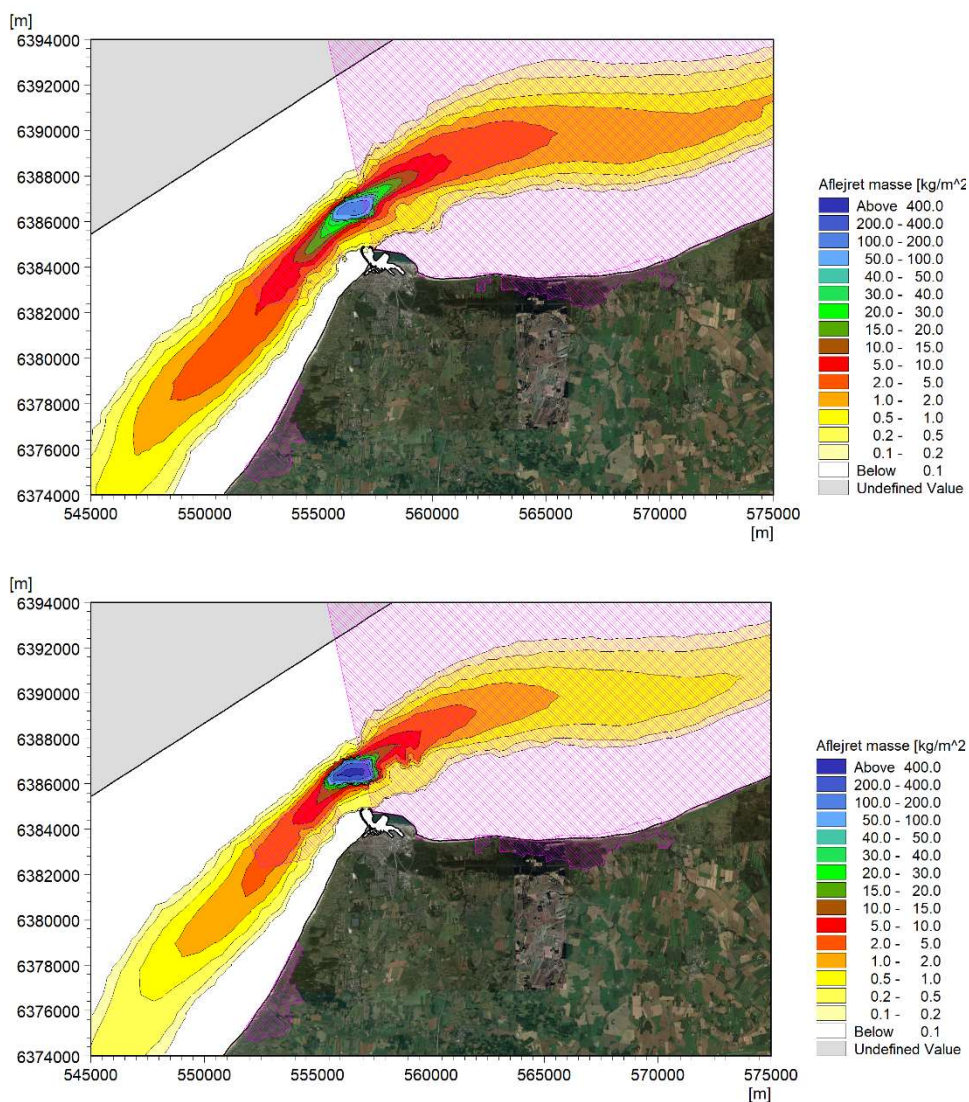


Figur 7-15 Maksimumkoncentration (dybdemidlet) i klapperperioden med lerholdigt materiale. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

7.5.3 Aflejring

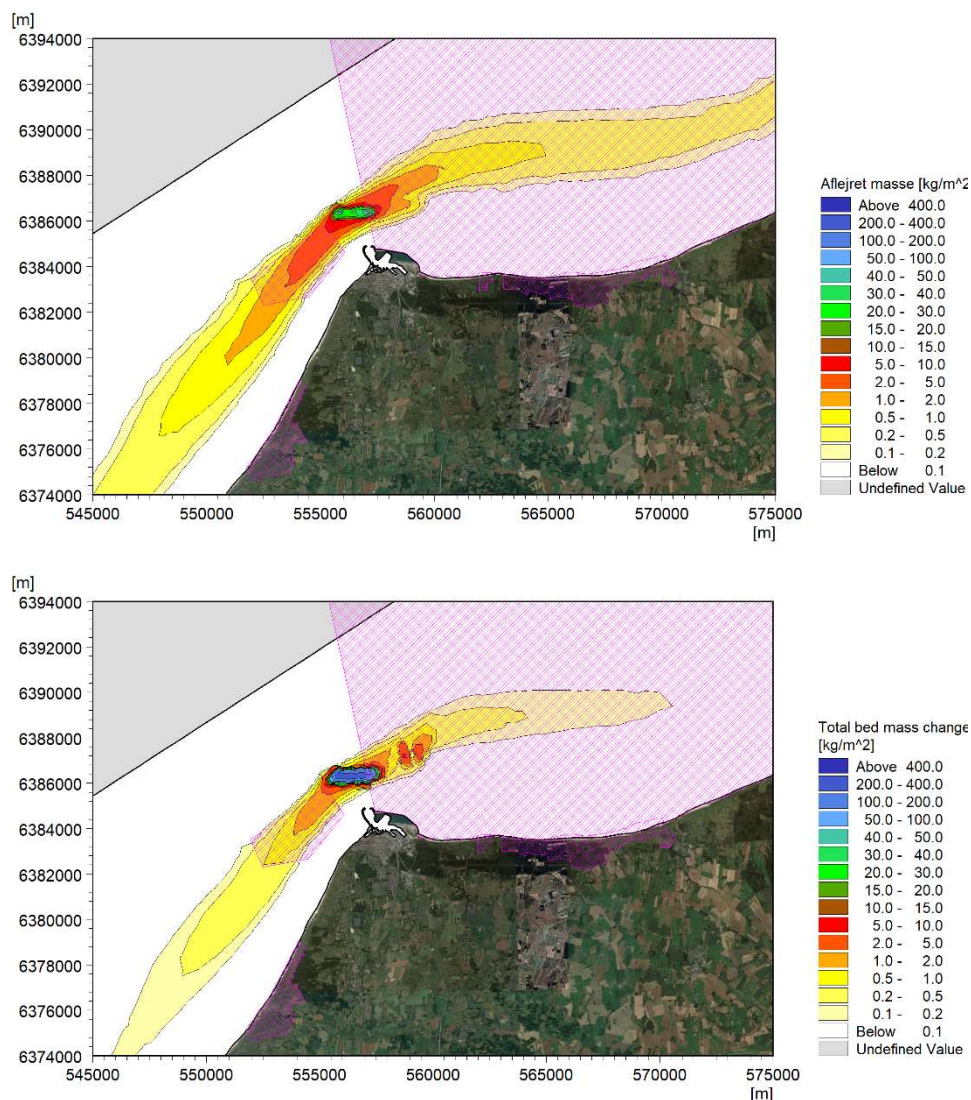
Langt størstedelen af klapp materialet aflejres på klapppladsen, hvorfra det over tid kan eroderes og spredes med strømmen. I Figur 7-16 er der vist et aflejringsskort efter ophør af klappning for det konservative scenarie (øverst) og det realistiske scenarie (nederst). Det ses, at aflejringen som ønsket er størst på klapppladsen, men at der sker spredning til nærområderne. I plottet er aflejringen angivet som kg/m^2 . Antager man at sedimentet aflejres med en tør densitet på 1.000 kg/m^3 , kan den anvendte enhed ækvivaleres med mm. Lidt væk fra klapppladsen overstiger aflejringstykkelserne ikke 1 cm, jf. overgangen fra brun farve til rød. Spredningen og sedimenttabet er helt klart overvurderet i det konservative scenarie. I det realistiske scenarie er det cirka $2/3$ af det klappede materiale, som fortsat befinder sig på klapppladsen ved simuleringens ophør. Tabet er i høj grad relateret til det siltholdige klappmateriale fra området P5, hvor materialesammensætningen er usikker. Viser materialet sig at være mere

lerholdigt vil spredningen blive mindre. Er det mere sandholdigt, vil det ikke blive klappet, men i stedet blive nyttiggjort til opfyld.



Figur 7-16 Aflejningskort efter ophør af klapping. Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning. Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

I tillæg til ovenstående er der i Figur 7-17 indsat aflejningskort for klapping af det lerholdige materiale. Spredningen bliver mindre som følge af at der klappes en mindre mængde, men det ses også at tilstedeværelse af klumper har en stor betydning for hvor meget spredning der vil være, særligt for når der er tale om lerholdigt materiale.



Figur 7-17 Aflejringskort efter ophør af klappning af lerholdigt materiale.
Øverst: konservativ antagelse om materiale sammensætning.
Nederst: realistisk antagelse om materiale sammensætning.

7.6 Opsummering

I udgangspunktet vil de ved uddybning opgravede kohæsive materialer blive nyttiggjort og anvendt til opfyld. Hirtshals Havn har dog ønsket at få undersøgt sedimentspredningen ved klappning på klapppladsen nord for havnen. Kohæsive materialers beskaffenhed er usikker på grund af flokkulation og sammenhæng i form af klumper ved opgravning. Der er derfor simuleret et konservativt og realistisk scenarie for klappmaterialets opførsel. I det konservative scenarie antages materialet at smuldre og være uden klumper. I det realistiske scenarie er en større del af materialet karakteriseret ved klumper. Er materialet mere klumpende (kohæsivt) end antaget vil spredningen være nedsat i forhold til det realistiske scenarie. Klapppladsen overlapper Natura 2000 området, så en påvirkning vil ikke kunne undgås. Den største forskel i forhold tilladelsen er at materialet afviger fra det naturligt forekommende (postglacialt sand). Men eroderes materialet vil det typisk være i små kornstørrelser, som vil sprede sig over et meget stort område. Fodafttrykket finder derfor primært sted i forbindelse med selv klappningen.

8 Sedimentspredning relateret til bypass af ikke-kohæsive materialer

Udbygningen af havnen mod nord fører til en svækkelse af den østgående nettosedimenttransport og øger derfor kysterosionen på en 1-5 km strækning øst for havnen, ref. /14/. Sedimentbypass vil kunne anvendes som en mitigerende foranstaltning til at modvirke den af havneudvidelsen skabte kysttilbagetrækning. I den nuværende klaptilladelse for bypass og nyttiggørelse af oprenset sediment, må der årligt foretages bypass af op til 500.000 m³ oprenset sand fra indsejlingen, ref. /10/. Den nuværende tilladelse er gældende frem til 15. august 2028. Mængden af bypass varierer med oprensingsbehovet samt prioriteringen for anvendelse af det oprensede materiale. De historiske oprensningsmængder er angivet i Tabel 8-1 nedenfor. I 2017 og 2018 blev en del af det oprensede materiale klappet på den gamle klapplads nord for havnen. I 2017, 2021 og 2022 er en større del af det oprensede materiale anvendt ved Lønstrup. Ligeledes er der i perioden tilført beskedne mængder til Tornby og Nørlev. Før 2017 blev der klappet på klappladsen nord for havnen, hvor vanddybderne er noget større end på bypasspladsen.

Tabel 8-1 Historiske oprensningsmængder og bypassmængder i perioden 2017-2022.

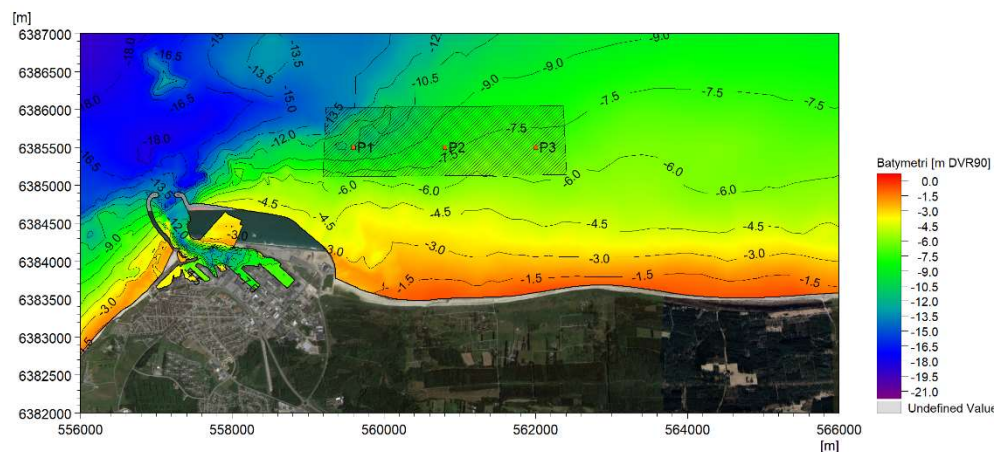
År	Bypass [m ³]	Oprenset mængde [m ³]
2017	238.211	381.330
2018	115.822	235.132
2019	315.018	322.559
2020	371.150	390.694
2021	102.986	252.904
2022	176.876	509.570

Bypass foretages primært i vinterhalvåret, men kan i princippet foretages på alle tider af året. Mængderne i de enkelte kampagner varierer, men bypassmængderne er typisk 180.000 m³ i de største enkelte kampagner. Klappingerne forårsager en sedimentspredning og dermed en miljøpåvirkning, som skal vurderes for den fremtidige havneudvidelse. Ligeledes er det interessant at undersøge, hvordan det klappede oprensningsmateriale migrerer efter klapping. Der er derfor lavet to undersøgelser.

I den første undersøgelse er der lavet sedimentspredningsberegninger for klapping af 180.000 m³ bypass materiale på den nuværende bypassplads nordøst for havnen. Placeringen af den nuværende bypassplads og områdets batymetri er vist i Figur 8-1. Størstedelen af bypasspladsen vurderes at være beliggende udenfor området med sandbølger.

I den anden undersøgelse udlægges de 180.000 m³ jævnt fordelt på klappladsen og det undersøges ved hjælp af en morfologisk sandtransport model, hvordan det udlagte sandmateriale migrerer væk fra bypasspladsen. Simuleringerne er dermed med til at eftervise hvilke områder af kysten, som får nytte af det tilførte bypass. Bypassmaterialet vil være af samme beskaffenhed, som det eksisterende bundmateriale i området, men i den morfologiske simulering regnes der udelukkende på transporten af det på bypasspladsen fordelte klapmateriale.

Strømf forholdene varierer i området, hvilket betyder at både sedimentspredningen og migreringen af klapp materialet vil variere med strømf forholdene i den pågældende periode, hvorover det foretages (undersøges). Effekterne af klappning er derfor valgt undersøgt for to perioder i løbet af året.



Figur 8-1 Bypass klappplads hvorpå der årligt må foretages bypass af op til 500.000 m³ oprenset sand fra indsejlingen, ref. /10/.

8.1 Bypass materiale

Bypass materialer stammer fra oprensning af indsejlingen og er primært finsand. Oprensning af bypass materialer vil typisk blive udført med en TSHD (Trailer Suction Hopper Dredger), som opsuger og selv klapper materialet. For klapp materialets sammensætning er der antaget en sammensætning og faldhastigheder, som angivet i Tabel 8-2.

Tabel 8-2 Bypass materialets relative sammensætning.

Materiale	Ler	Silt	Finsand
Andel [%]	2	10	88
Faldhastighed [mm/s]	0,1	0,5	1 / 2,2

I tabellen er der angivet to faldhastigheder for finsand, hvor 1 mm/s repræsenterer en kornstørrelse på 0,1 mm og 2,2 mm/s en kornstørrelse på 0,17 mm. Sidstnævnte svarer til mediankornstørrelse i B14, jf. Figur 4-6. Der kan være en tendens til, at det er lidt finere sediment som fanges i indsejlingen. Der er derfor udført en sedimentspredningsberegning for hver af de to faldhastigheder.

Tabel 8-3 Undersøgte klapp- og bypassmængder.

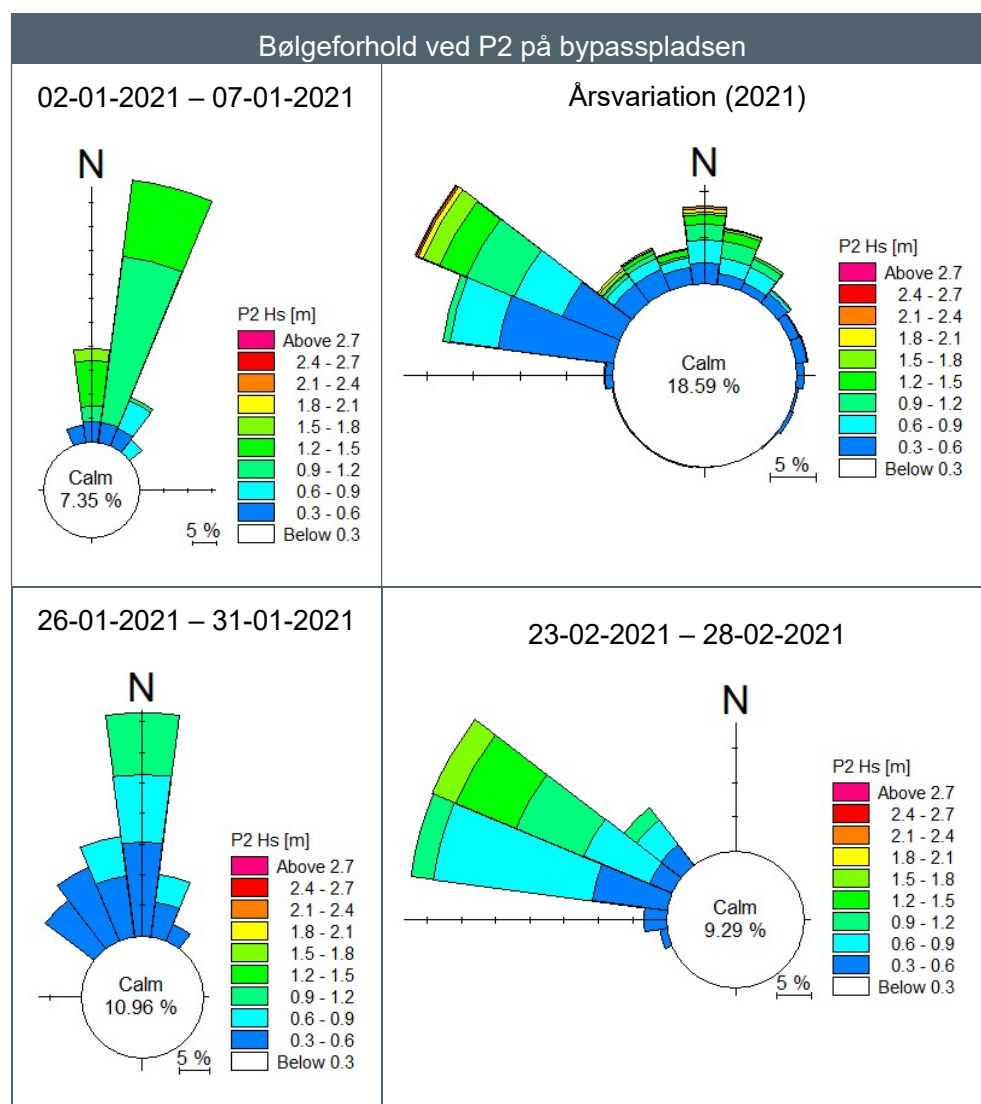
	Volumen [m ³]	Tørstofmasse [ton]	Vådmasse [ton]
Per klappning	1.500	1.928	2.700
Samlet	180.000	231.300	324.000

Den anvendte TSHD antages at have en kapacitet på 1.500 m³ og en arbejds cyklus på 4 timer mellem de enkelte klappninger. I omsætningen til tørstofmasse er der antaget en tørstofdensitet på 1.285 kg/m³, idet de postglaciale sandaflejringer har en våddensitet på op til 1.800 kg/m³ ifølge ref. /2/. Der foretages 4 klappninger per dag svarende til en arbejds cyklus på 16 timer/døgn. Klappninger udføres nonstop hen over alle ugens dage med undtagelse af dage med vejrlig. I modelberegningerne er vejrlig defineret ved at

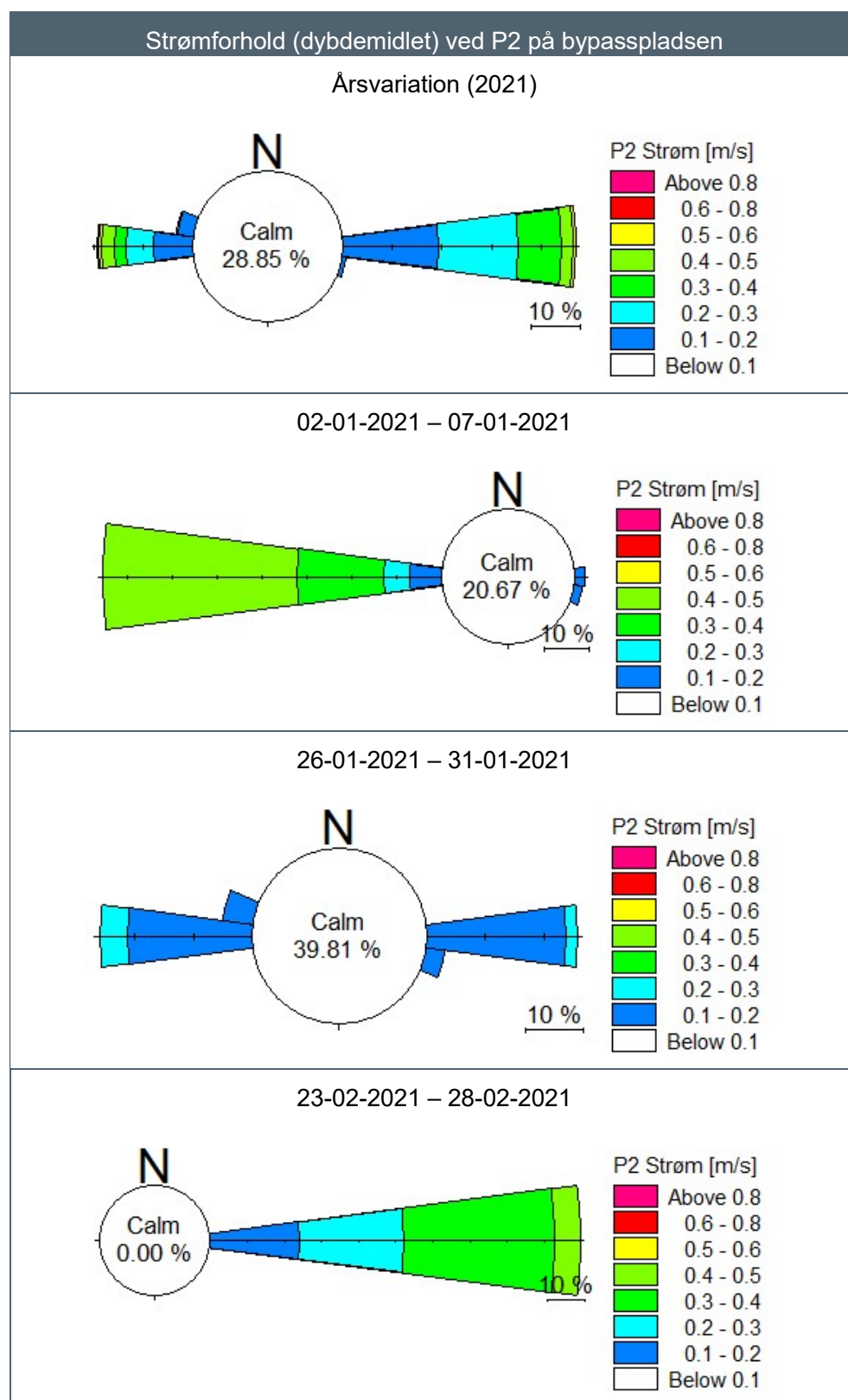
den signifikante bølgehøjde overstiger 1,5 m i punktet P2 på bypasspladsen. Tabel 8-3 viser en oversigt for de samlede undersøgte bypassmængder og per klappning.

8.2 Tidsskalaer for områdets dynamik

Strøm- og bølgeforholdene på bypasspladsen varierer som følge af påvirkning fra tidevand og metrologiske vejrsystemer. Tidsskalaerne for bestemte strøm og bølgeforhold er derfor ofte af flere ugers varighed. I Figur 8-3 og Figur 8-2 er bølge og strømforholdene i P2 plottet i form af roser udvalgt hen over tre "tilfældigt" udvalgte 5 dages perioder og sammenholdt med den fulde årsvariation (2021). Det ses, at ingen af de 3 viste bølgeroser er i stand til at afspejle årsvariationen og det tilsvarende gør sig gældende for strømroserne. Det er dermed klart at sedimentskyernes spredning i forbindelse med en klappnings kampagne vil være afhængig af strøm og bølgeforholdene i den pågældende periode. Migreringen af det på klapppladsen aflejrede materiale vil være mindre følsomt, da tidsskalaerne for dette er væsentligt længere end klapskyernes spredning.



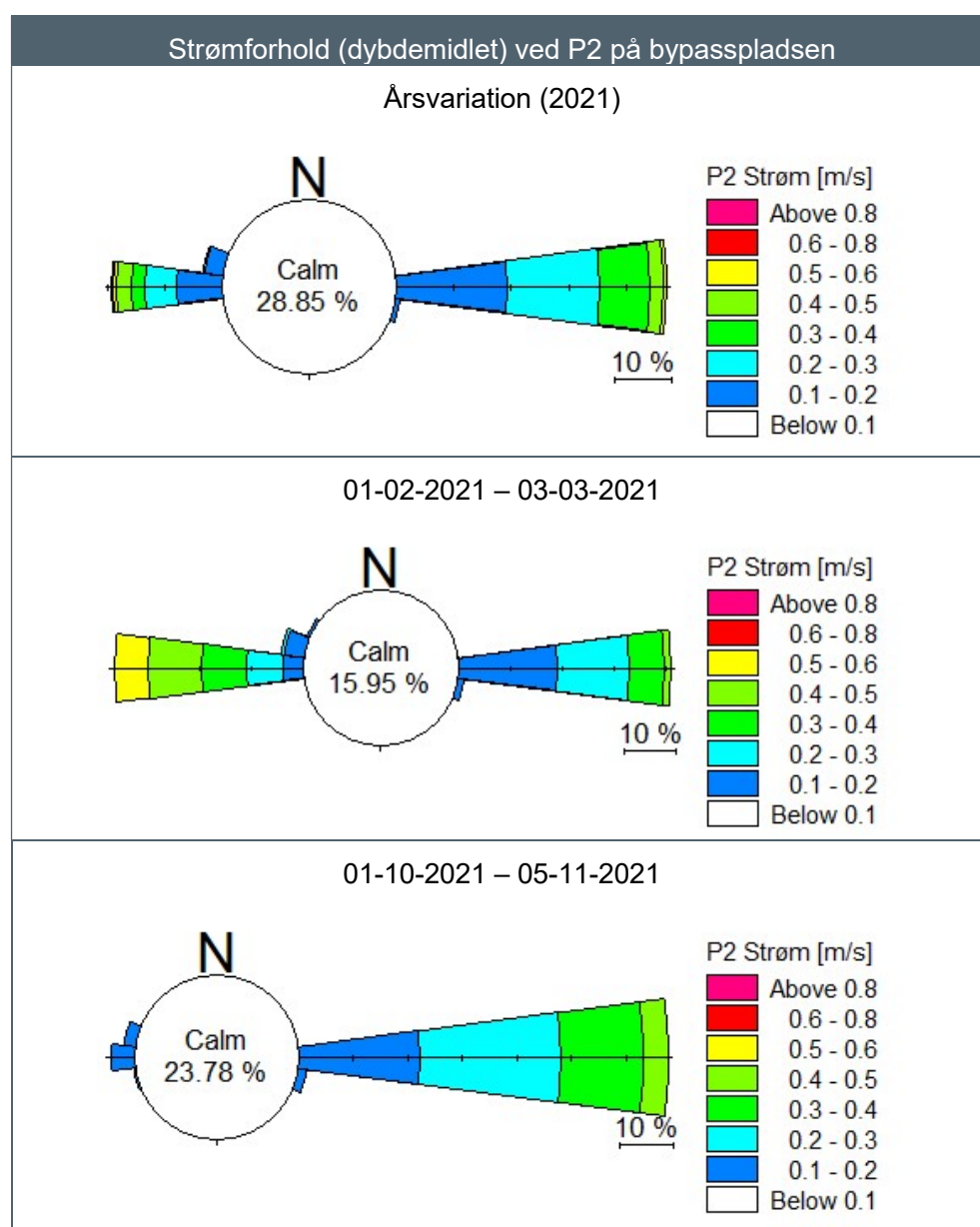
Figur 8-2 Bølgeroser ved P2 på bypassplads. Årsvariation (2021) og 3 tilfældigt udvalgte perioder af en varighed på 5 dage.



Figur 8-3 Strømroser visende dybdemidlet strøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, efterfølgende plot tilfældigt udvalgte perioder af en varighed på 5 dage.

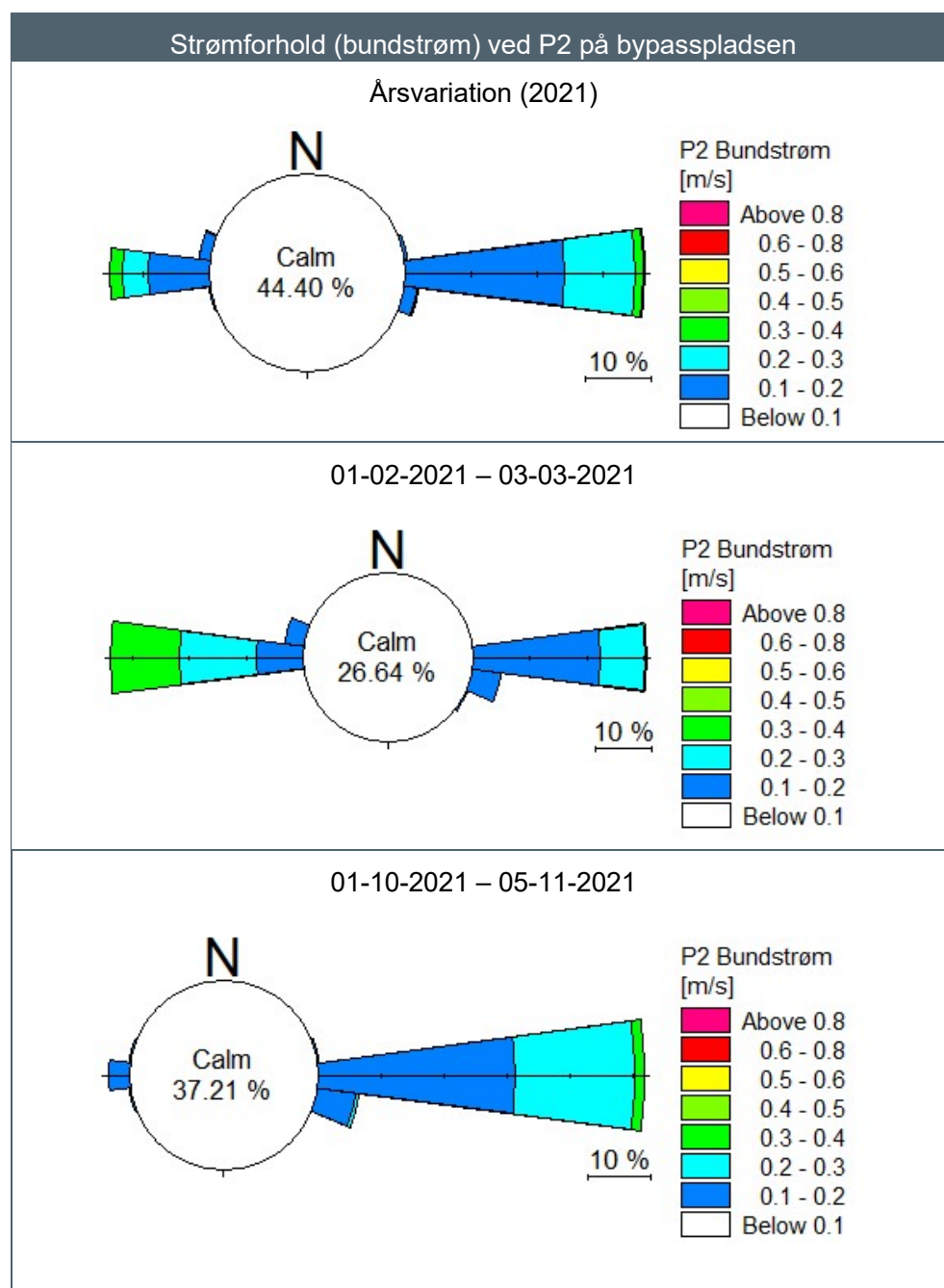
8.3 Strømforhold på bypasspladsen

Klapning af 180.000 m³ vil med en daglig klapmængde på 6.000 m³, 7 dages arbejdsuge og ingen nedetid eller vejrlig, kunne udføres på 30 dage. Er der dage med vejrlig eller nedetid bliver perioden længere. En gennemgang af de historiske oprensingsmængder viser, at det oftest er i vinterhalvåret, at der oprenses og hvor strøm og bølger i hovedreglen er lidt kraftigere end i sommerhalvåret. Da strømforholdene på klaptidspunktet er ukendte, er det valgt at undersøge effekterne af en klappningsmængde på 180.000 m³ for to forskellige perioder af året. De to perioder er valgt at finde sted i henholdsvis februar og oktober. I oktober perioden er der 5 dage med vejrlig, hvorfor perioden med klapning i dette tilfælde er 5 dage længere end perioden i februar, hvor der ikke optræder vejrlig, som påvirker arbejdsforholdene.



Figur 8-4 Strømroser visende dybdemidlet strøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021.

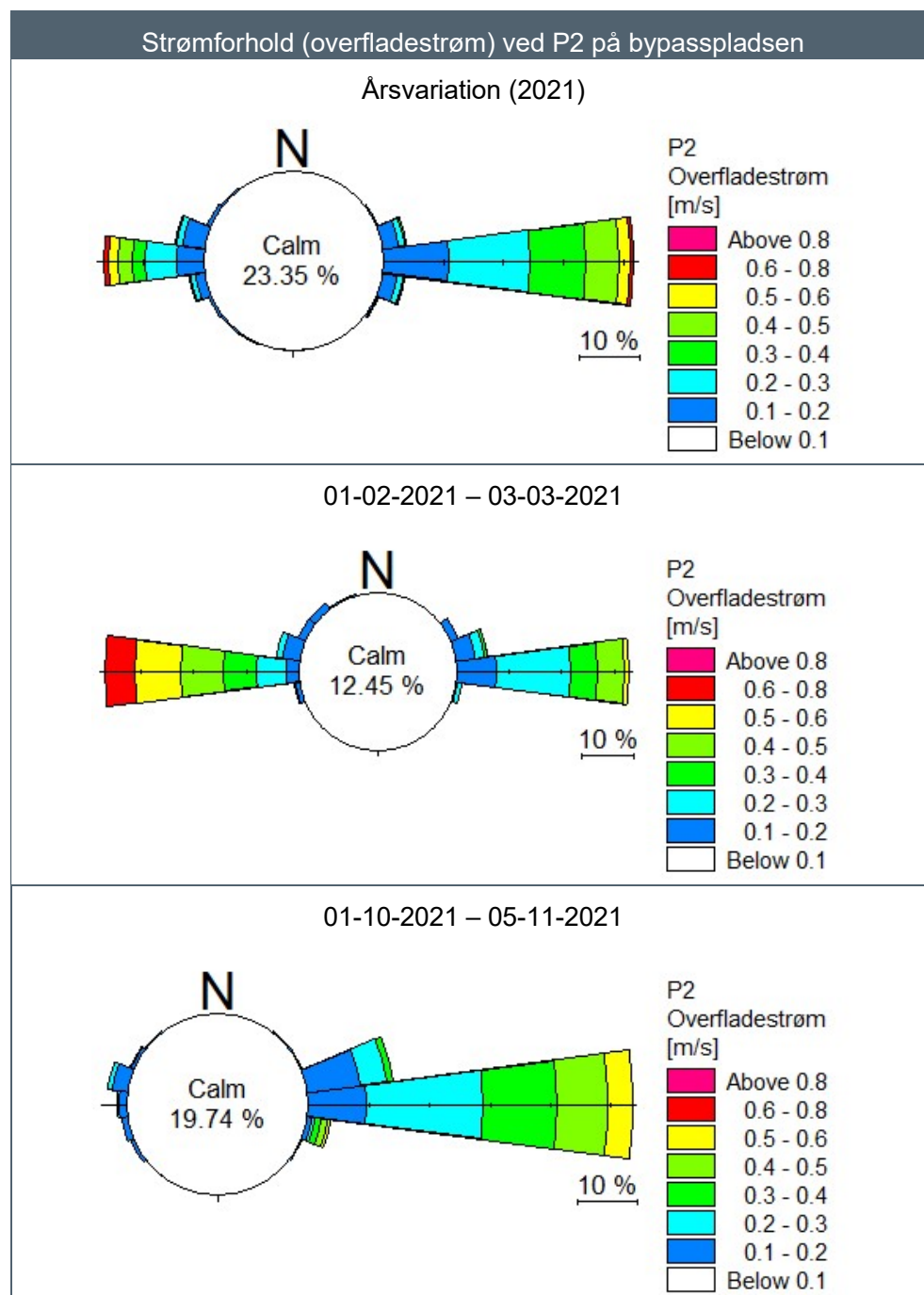
Strømforholdenes årsvariation (dybdemidlet) ved P2 på bypasspladsen samt forholdene i de to perioder med klappning er vist i Figur 8-4 for dybdemidlet strøm. Strømroserne viser den retning strømmen er rettet mod.



Figur 8-5 Strømroser visende bundstrøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021.

Det ses, at strømforholdene i begge klapperperioder afviger fra årsvariationen. I februar er der perioder med både øst og vestgående strømning. Den vestgående strømning er mere hyppigt forekommende og tilsvarende er den østlige strømning lidt mindre hyppigt forekommende end, når der sammenlignes med årsvariationen. Den vestgående strømning er kraftigere end den østgående strømning. Generelt er der i perioden mere dynamiske forhold end sammenlignet med årsvariationen ("calm" udgør en mindre procentdel af perioden).

I oktober er der stort set kun østgående strømning. Ligeledes er der også i denne periode mere dynamiske forhold end sammenlignet med årsvariationen. Da strømroserne i de to perioder er væsentlig forskellige, vil de bidrage til at give et billede af variationerne i sedimentspredning relateret til klappning af bypass materiale.

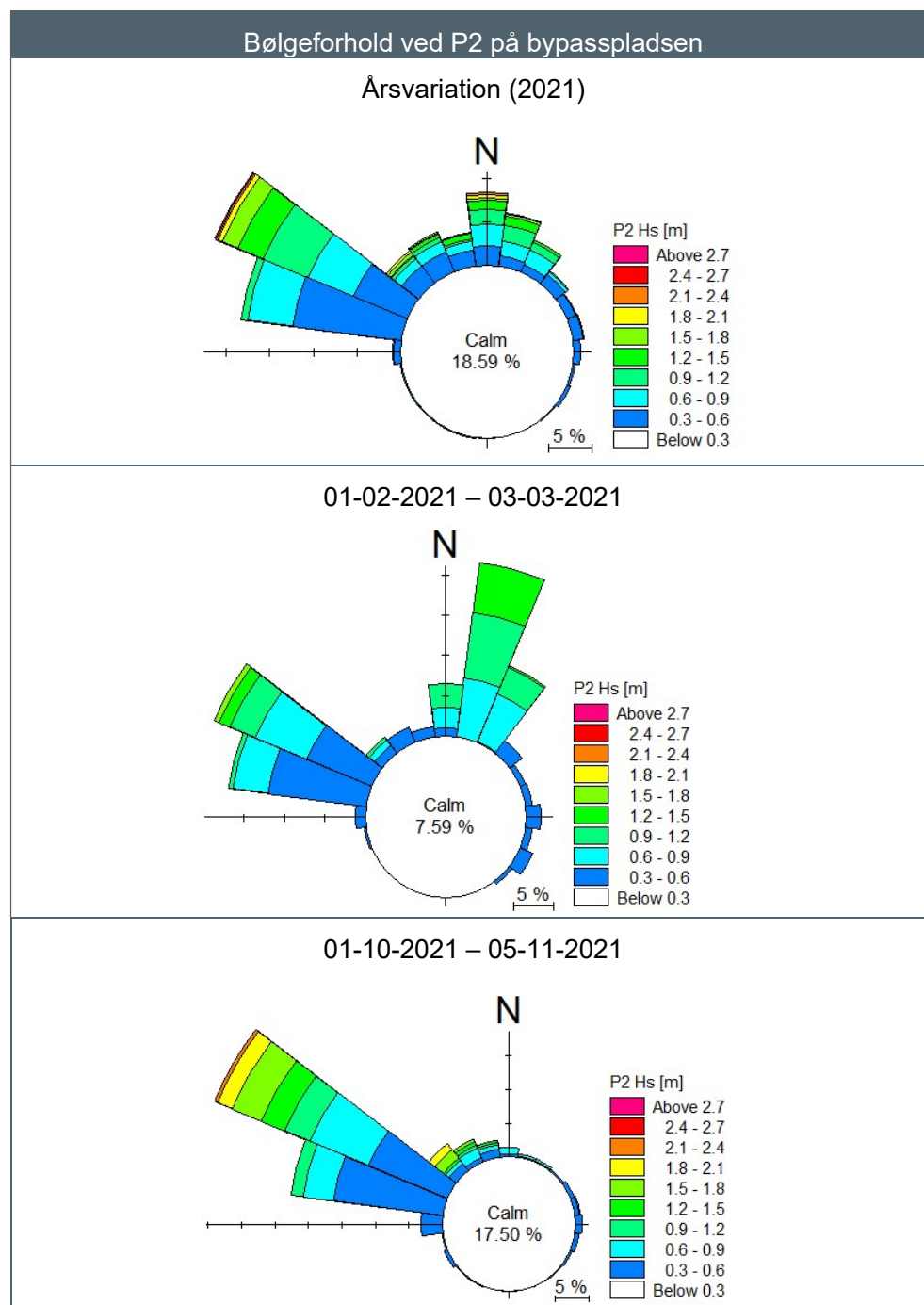


Figur 8-6 Strømroser visende overfladestrøm ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021.

I Figur 8-5 og Figur 8-6 er der vist strømroser for henholdsvis bundstrøm og overfladestrøm i de to undersøgte klappingsperioder, samt for hele året. Dynamikken er som for de dybdemidlede strømroser, blot lidt svagere ved bunden og stærkere ved overfladen.

8.4 Bølgeforhold på bypasspladsen

Bølgerne har betydning for turbulensniveauet på bypasspladsen og dermed for, hvor let klapmaterialet udfældes og re-suspenderes. Ligeledes har de i kombination med strømmen betydning for bundtransportens retning. I den indre del af kystprofilen (brydningszonen) syd for bypasspladsen genererer bølgerne ved skråt indfald bølgedrevne strømme og har dermed stor betydning for den kystnære strøm og sedimenttransport. Bølgernes højde og retning varierer ligesom strømmen med tidsskalaer, som ofte er af ugers varighed.



Figur 8-7 Bølgeforhold ved P2 på bypassplads. Øverst: årsvariation, midt: bypass af materiale i februar 2021 og nederst: bypass af materiale i oktober 2021.

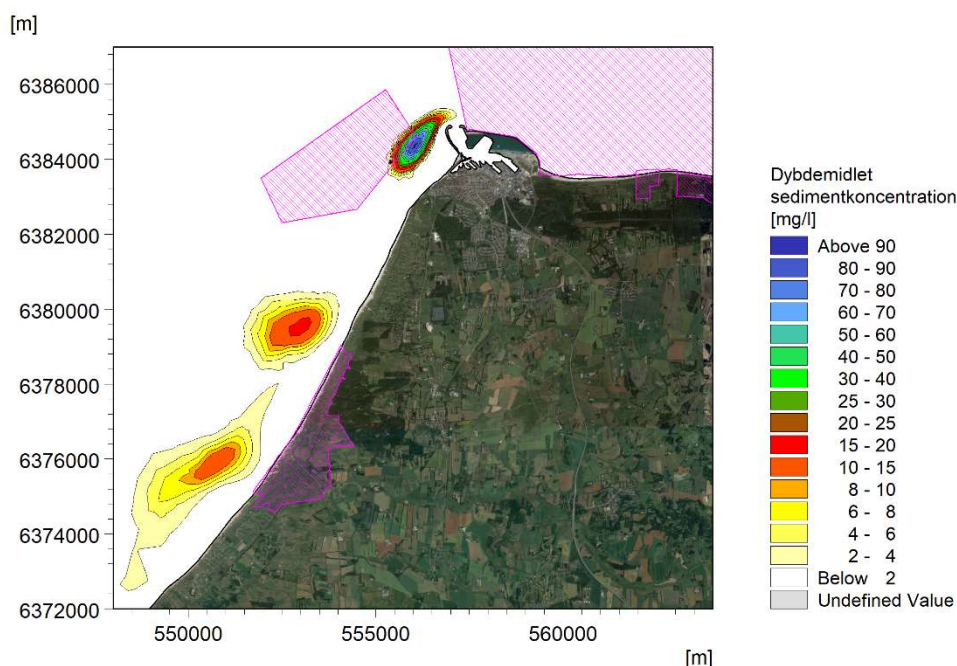
Bølgeforldenes årsvariation (2021) og i de 2 undersøgte bypass scenerier i februar og oktober er illustreret ved hjælp af bølgeroser vist i Figur 8-7. Roserne angiver den retning som bølgerne kommer fra.

Der er ingen ekstrembølger i februar og dermed ingen vejrlig. I oktober perioden overstiger den signifikante bølgehøjde 1,5 m på bypasspladsen (P2), hvilket fører til 5 dage med vejrlig (11. oktober, 15-16. oktober og 21-22. oktober). På disse 5 dage foretages der ingen klapninger, idet det er antaget, at TSHD-fartøjet ikke kan operere under sådanne forhold.

8.5 Bypass af 180.000 m³ under forhold som i februar 2021

I denne periode er strømmen rettet mod både vest og øst med en overvægt i vestgående retning. Perioder med ingen eller kun svag strøm er mindre udtalt end set for hele året. Indkommende bølger er primært fra NVV og NNØ og mindre end 1,5 m (H_s) med enkelte undtagelser.

I modelberegningen regnes der kun på klappmaterialet, hvorfor alle koncentrationer er uden bidrag fra den naturlige baggrundskoncentration. Klapskyernes faners udbredelse er i det følgende statistisk beregnede og giver derfor let lægmand et forkert billede af klappfanernes faktiske opførsel. De enkelte klappninger danner en klapsky, som føres med strømmen og som hvis forholdene tillader det udfældes gradvist. Sandfraktionen udfældes hurtigst samtidig med, at den til at begynde med dominerer sammensætningen af materialet i klapskyen.

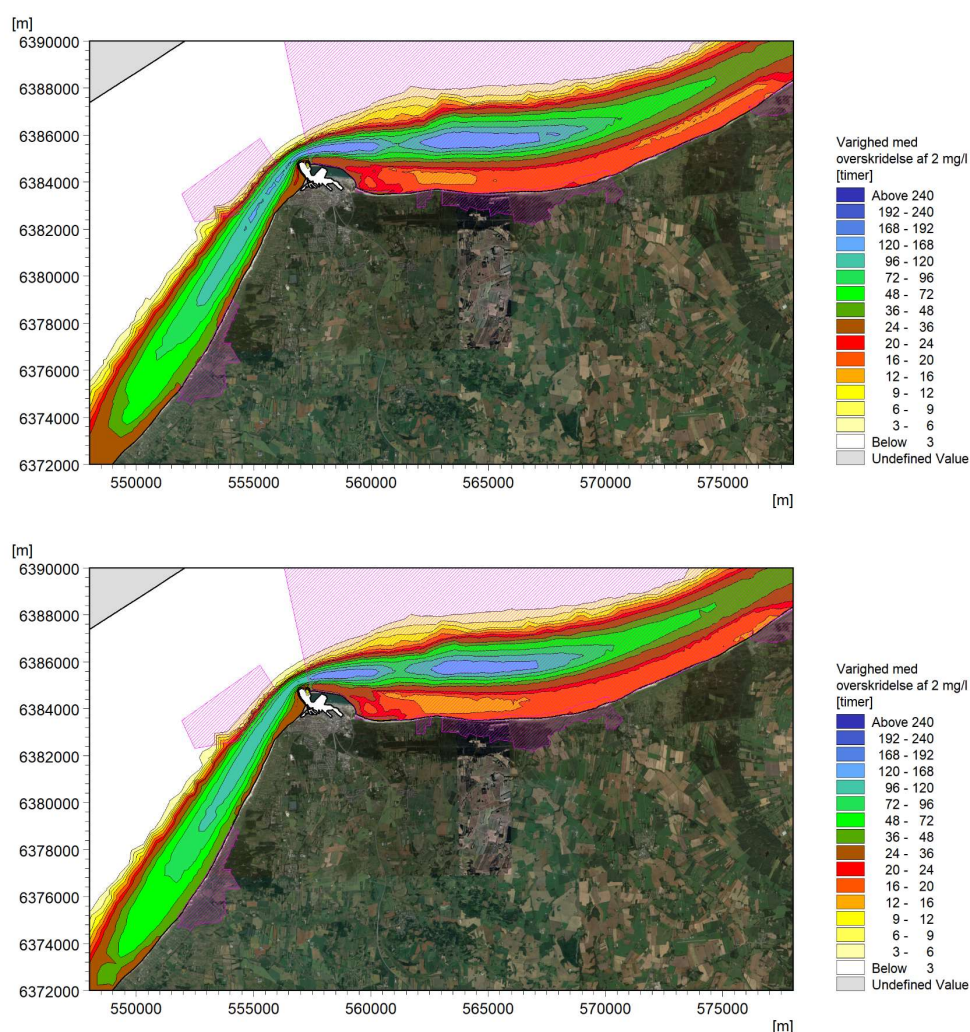


Figur 8-8 Øjeblikbillede af klapskyer ved kraftig vestgående strøm. Klapskyer fra 3 klappninger med 4 timers mellemrum.

I Figur 8-8 er der vist et eksempel på et øjeblikbillede af sedimentkoncentrationer frembragt af tre klappninger den pågældende dag i en situation med kraftig vestgående strøm. Natura 2000 områder er indikeret med pink skravering. Den blå klapsky lige vest for munden indikerer, at der fortsat er et indhold af finsand i klapskyen, mens de to øvrige klapskyer kun er domineret af det tilbageværende finkornede materiale (ler og silt partikler), som ligeledes dilueres undervejs. Klapskyerne vil derfor typisk bevæge sig som voksende

perler på en snor og ikke som en kontinuert sammenhængende fane, som er det indtryk, man let får af de statistisk beregnede varighedsplot med overskridelse af en given sedimentkoncentration.

Faldhastigheden af det finkornede sand har betydning for, hvor hurtigt klapskyerne mister hovedparten af sit materiale. I de følgende plot er der vist varighedsplot med overskridelsesvarighed af sedimentkoncentrationer på henholdsvis 2 mg/l, 5 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l (dybdemidlet) ud over den naturlige baggrundskoncentration for beregningerne med antagelse om en faldhastighed af finsandet på henholdsvis 1 mm/s og 2,2 mm/s.

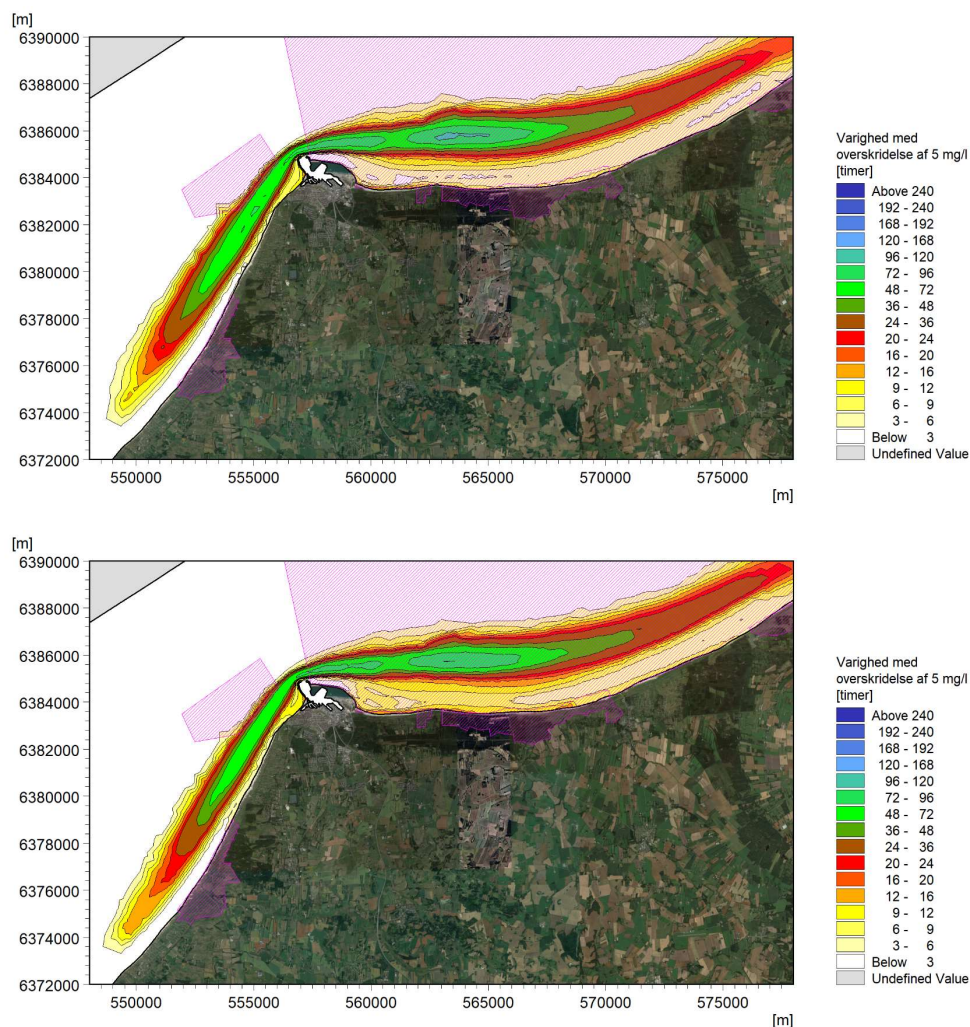


Figur 8-9 Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i perioden med klaping plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.

Klapskyerne føres i nogle situationer med strømmen vest om havnen, mens den i andre perioder spredes mod øst. Faldhastigheden af finsandet har ingen signifikant betydning for varighederne med overskridelse af 2 mg/l (se Figur 8-9), hvilket skyldes bidragene fra ler- og siltfraktionerne. Det ses, at en del af klappmaterialet tabes til området vest for havnen og bypasseffekten er derfor nedsat ved klaping med dominerende vestgående strøm. Skyggepåvirkningen er af beskeden varighed og optræder periodisk i forbindelse med de enkelte klapinger. I det lyseblå områder er overskridelsesvarigheden typisk ~140 timer,

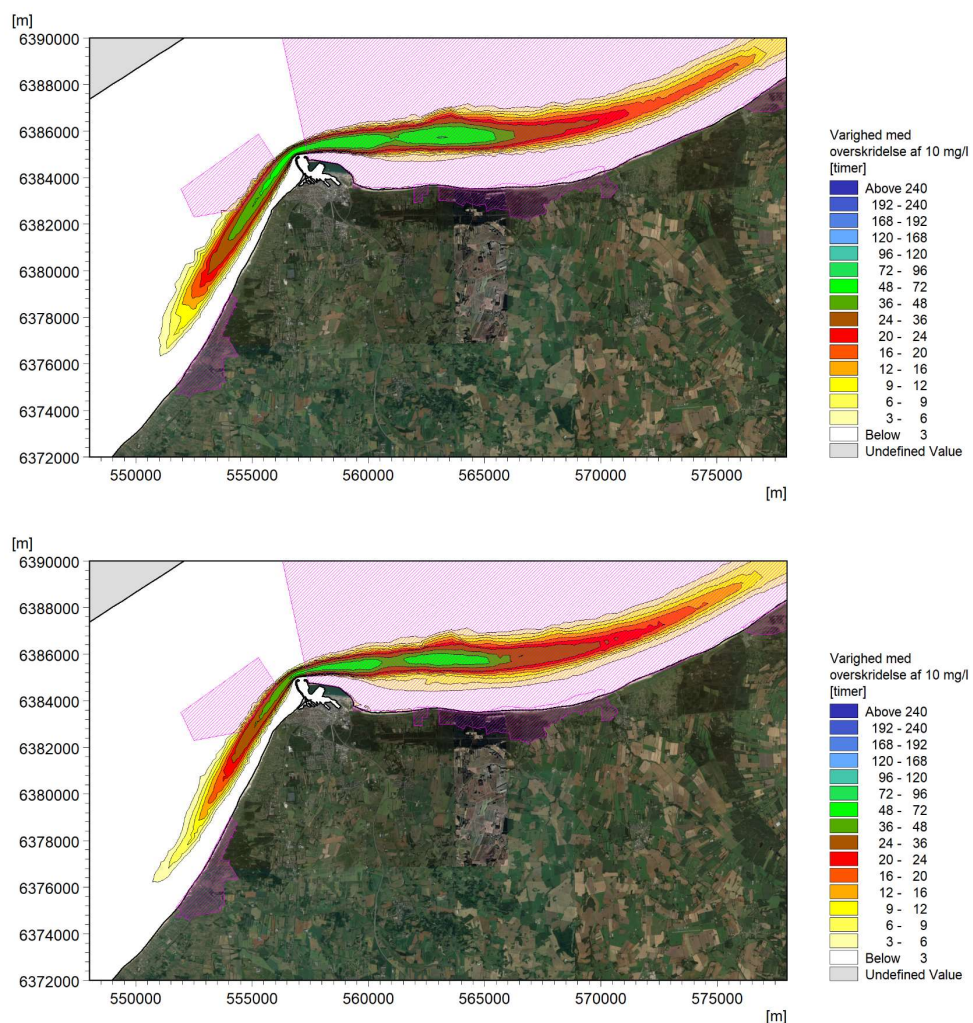
hvilket skal sammenholdes med perioden, hvorover klappingerne foretages (720 timer). Endelig vil dele af den beregnede skyggevirksom optræde i perioder, hvor det i forvejen er mørkt.

Varighederne med overskridelse af 5 mg/l (se Figur 8-10) overskrides lokalt i op til ~100 timer, hvilket igen skal sammenholdes med perioden hvorover klappingerne foretages (720 timer) og det faktum at skyggepåvirkningen kun optræder periodisk.

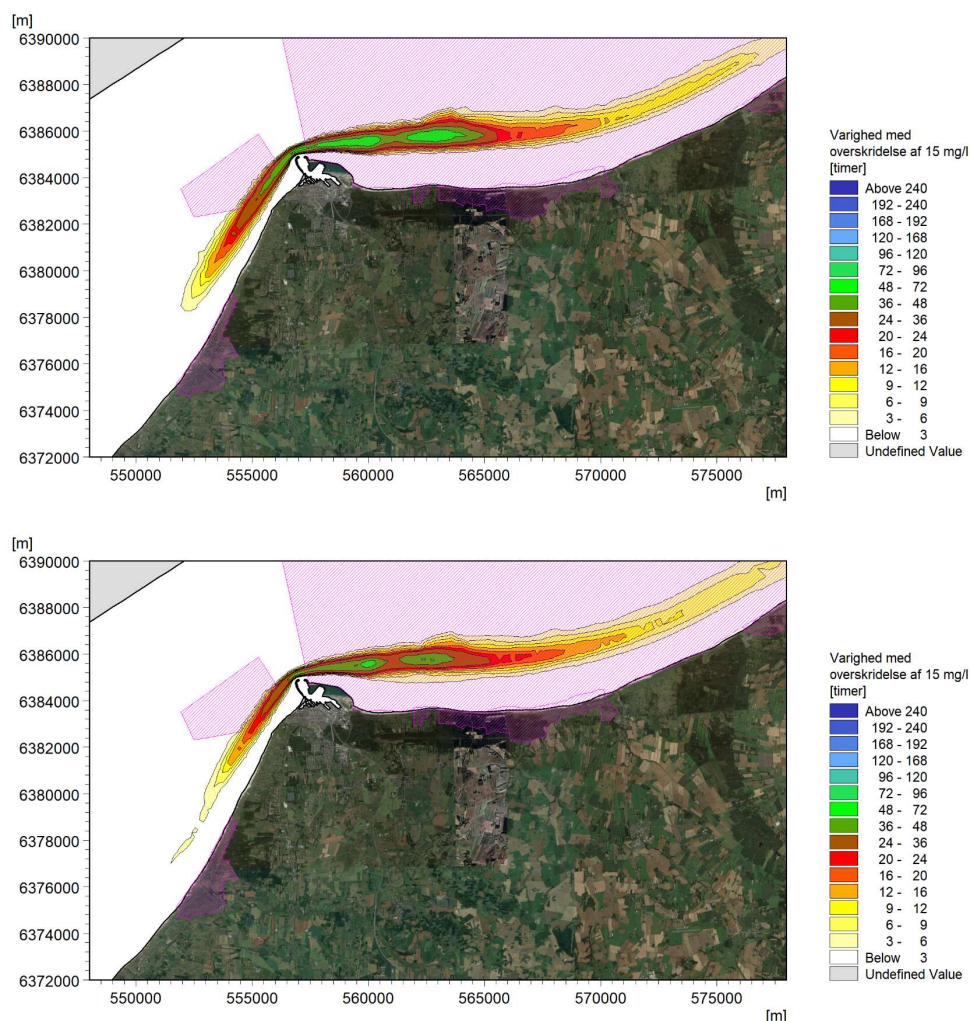


Figur 8-10 Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i perioden med klappning plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.

I Figur 8-11 og Figur 8-12 er der vist tilsvarende plots af varigheder med overskridelse af henholdsvis 10 mg/l og 15 mg/l. Her overskrides 10 mg/l lokalt i op til ~60 timer og 15 mg/l i op til ~55 timer. I disse plot ses faldhastigheden af finsandet at have en større betydning for varighederne med overskridelse i bypasspladsens nærområde.



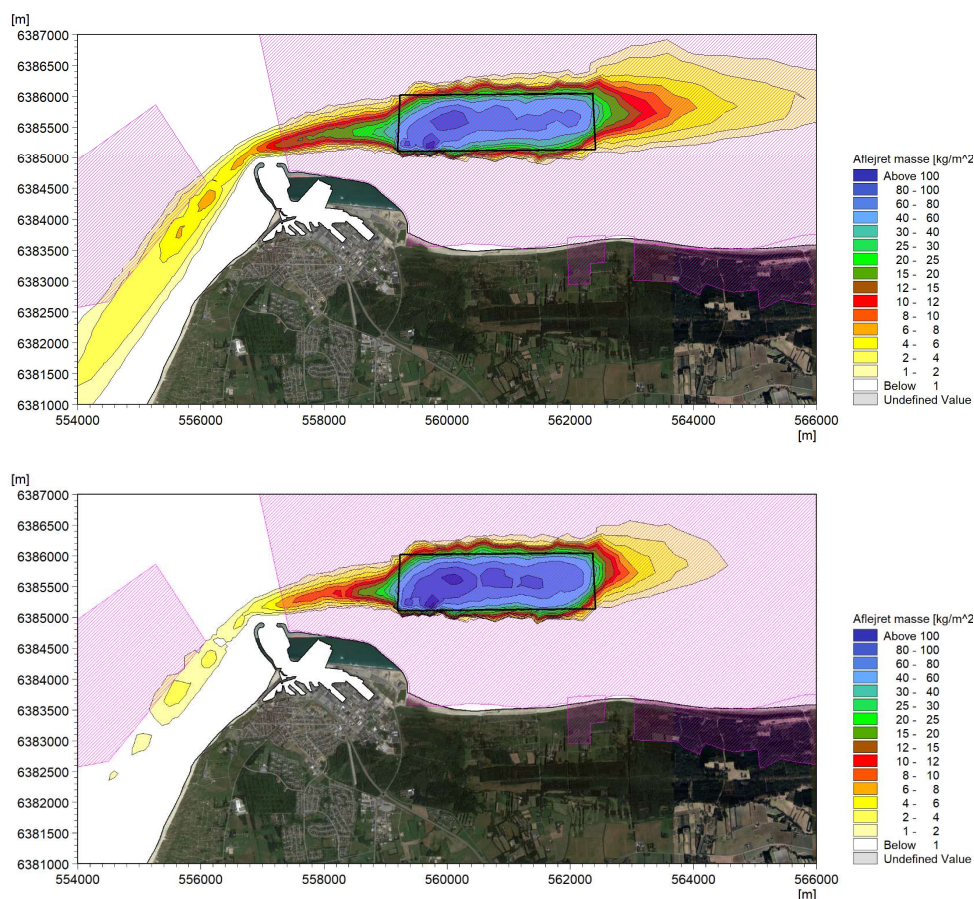
Figur 8-11 Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.



Figur 8-12 Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i perioden med klappning plus 2 efterfølgende dage (01-02-2021 – 05-03-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.

Der klappes på 20 lokaliteter langs 6 vest-østgående linjer (120 klappninger) igennem den 30 dage lange periode startende i vest og sluttende i øst. Figur 8-13 viser den på baggrund af klappningerne aflejrede sedimentmængde 52 timer efter sidste klappning, med antagelse om en faldhastighed af finsandet på henholdsvis 1 mm/s og 2,2 mm/s. Det ses, at der i perioder med kraftig vestgående strøm er spredning til vest om havnen og at klapskyerne ikke interagerer med kystzonen syd for bypasspladsen. En del af det klappede materiale tabes med klapskyerne og særligt i situationer med vestgående strøm vil bypass-effekten reduceres. Spredningstabet vil afhænge af oprensningens materialets indhold af finsand samt den repræsentative faldhastighed herfor. I Tabel 8-4 er der opgjort hvor stor en del af den klappede masse, som er fastholdt på bypasspladsen, 52 timer efter den sidste klappning, under antagelse af to forskellige faldhastigheder for finsandet (i modelberegningen er bundtransport af materialet efter aflejring ikke indeholdt). Det ses, at 66,8% af den klappede mængde er fastholdt på bypasspladsen med en faldhastighed af finsandet på 1 mm/s og 82,1% med faldhastighed på 2,2 mm/s. Klappingsmodellen kan ikke beskrive, hvordan det tilbageværende sand vil spredes (migrere) over længere tid, da en detaljeret bundtransportbeskrivelse ikke er indeholdt. Den langsgående nettosedimenttransport vil set over en længere tidsskala være rettet mod

øst, men det vil være tværtransporten, som styrer om bypass kan/vil vandre ind mod kysten og dermed virke dæmpende på erosionspresset i området. Til at beskrive migrationen af det klappede sandmateriale er der udført en morfologisk sandtransportberegning, som alene ser på migrationen af det tilførte bypass.



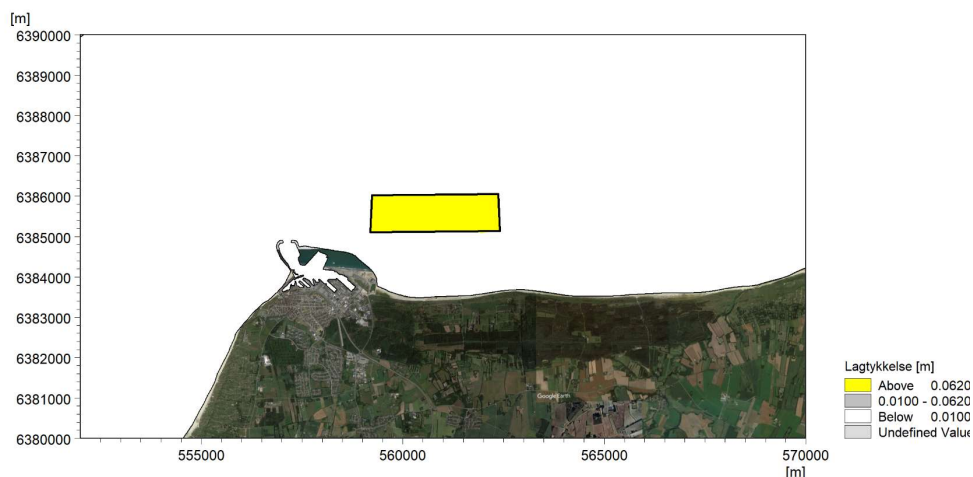
Figur 8-13 Aflejret klapmasse 52 timer efter sidste klapning. Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.

Tabel 8-4 Sedimenttab fra bypassplads ved klapning af 180.000 m³ i februar 2021 1, 52 timer efter sidste klapning.

Faldhastighed [mm/s]	Klappet masse [ton]	Aflejret masse [ton]	Fastholdelsesgrad [%]
1	231.300	154.572	66,8
2,2	231.300	189.976	82,1

8.6 Migration af 180.000 m³ bypass materiale februar 2021

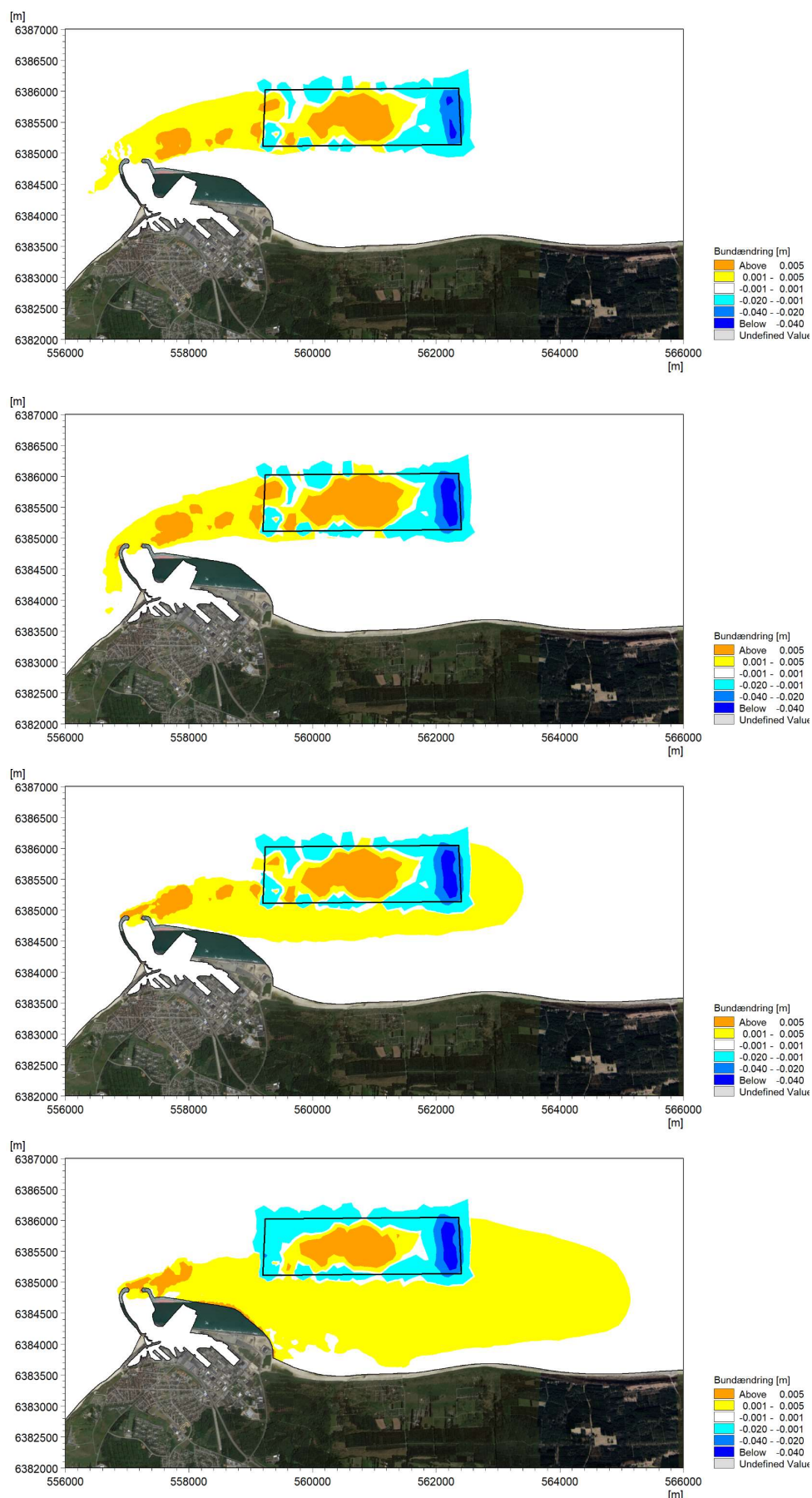
Til at vurdere effekten af bypassplads og bypassmængden er der gennemført en morfologisk beregning dækkende samme modelperiode, som hvorover klapningerne ovenfor blev foretaget i (01-02-2021 – 05-03-2021). I den morfologiske beregning er der initialt udlagt 180.000 m³ sand med en median kornstørrelse på 0,18 mm. Materialet er udlagt jævnt fordelt på hele bypasspladsen i et ~6,2 cm tykt lag, se Figur 8-14.



Figur 8-14 180.000 m³ jævnt udlagt bypass materiale i form af 0,18 mm finsand.

Strøm og bølger vil erodere det tilførte bypass. I den morfologiske beregning migrerer bypassmaterialet væk fra bypasspladsen i takt med påvirkningen fra strøm og bølger. Dette er illustreret i Figur 8-15, hvor bundændringer relateret til bypassmaterialet er plottet efter 8, 16, 24 og 32 dage. Det ses, at materialet i den første del af perioden grundet strømforholdene vandrer mod vest hen forbi havnen, hvor det fanges ved indsejlingen. I den sidste del af perioden, hvor strømmen er østgående, spredes materialet langs med nordmolen samt syd og øst for bypasspladsen. Perioden med østgående strøm er ikke helt lang nok til at bypassmaterialet når helt ind på kysten, men modelresultaterne indikerer at bypassmaterialet over en længere tidsskala vil føres ind til kysten i området syd og øst for bypasspladsen.

Efter de 30 dage er 158.000 m³ af de 180.000 m³ fortsat på bypasspladsen, svarende til at blot 12% af materialet er migreret væk fra udlægningsområdet. For at følge migrationen af alt bypassmaterialet vil det være nødvendigt at modellere en væsentlig længere periode. Det materiale som har forladt bypasspladsen er fordelt over et større område i et ganske tyndt lag. Bypass har derfor kun en egentlig betydning for dæmpning af kysterosion, når der ses over længere tidsskalaer og væsentlig større akkumulerede bypassmængder.

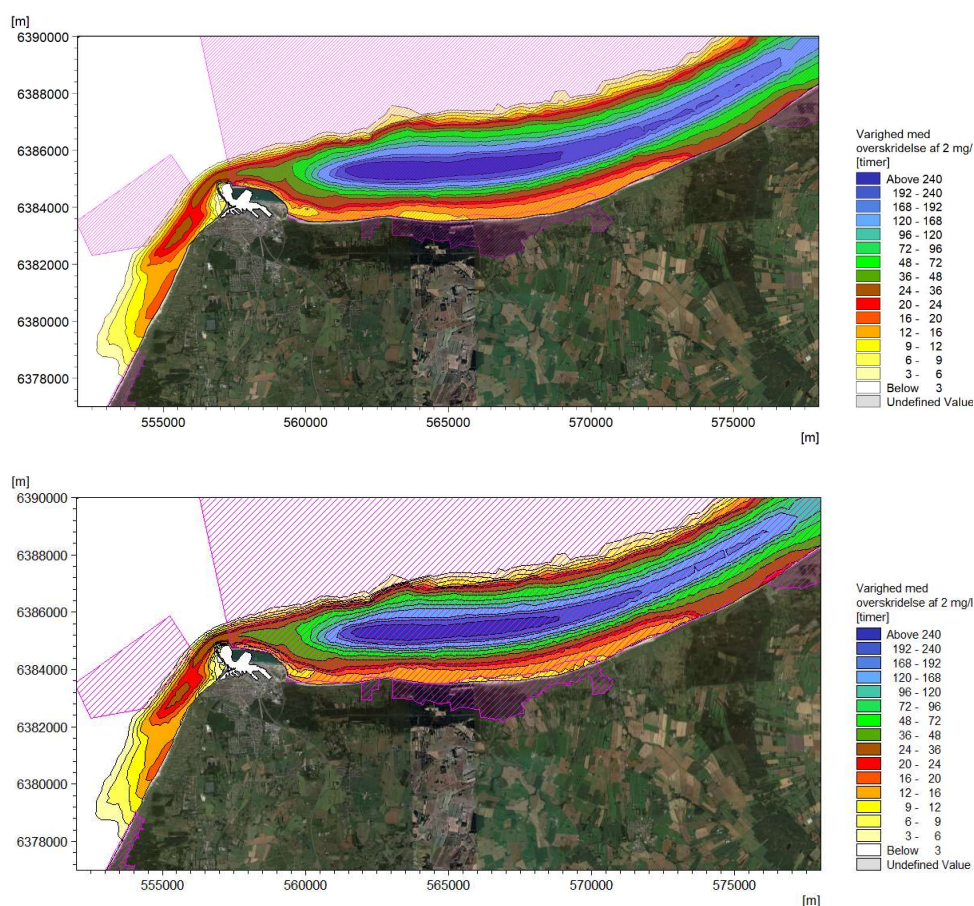


Figur 8-15 Bundændringer relateret til migration af udlagt bypass efter 8 døgn, 16 døgn, 24 døgn og 32 døgn.

8.7 Bypass af 180.000 m³ under forhold som i oktober 2021

I oktober perioden er strømmen rettet mod øst igennem størstedelen af tiden. Perioder med ingen eller kun svag strøm er lidt mindre udtalt end set for hele året. De kraftigste strømme er svagere end i februar perioden. Indkommende bølger er primært fra NVV. På 5 af dagene (11. oktober, 15-16. oktober og 21-22. oktober) overstiger den signifikante bølgehøjde 1,5 m (H_s), så der optræder mere bølgedynamik end i februar perioden.

I modelberegningen regnes der kun på klappmaterialet, hvorfor alle koncentrationer er uden bidrag fra den naturlige baggrundskoncentration. Klapskyernes faner er i det følgende statistisk beregnede og dermed ikke udtryk for øjebliksbilleder. De enkelte klappinger danner en klapsky, som føres med strømmen og som hvis forholdene tillader det udfældes gradvist. Sandfraktionen udfældes hurtigst samtidig med, at den til at begynde med dominerer sammensætningen af materialet i klapskyen. Klapskyerne vil derfor typisk bevæge sig som voksende perler på en snor og ikke som en kontinuert sammenhængende fane, som er det indtryk man let får af de statistisk beregnede varighedsplot med overskridelse af en given sedimentkoncentration.



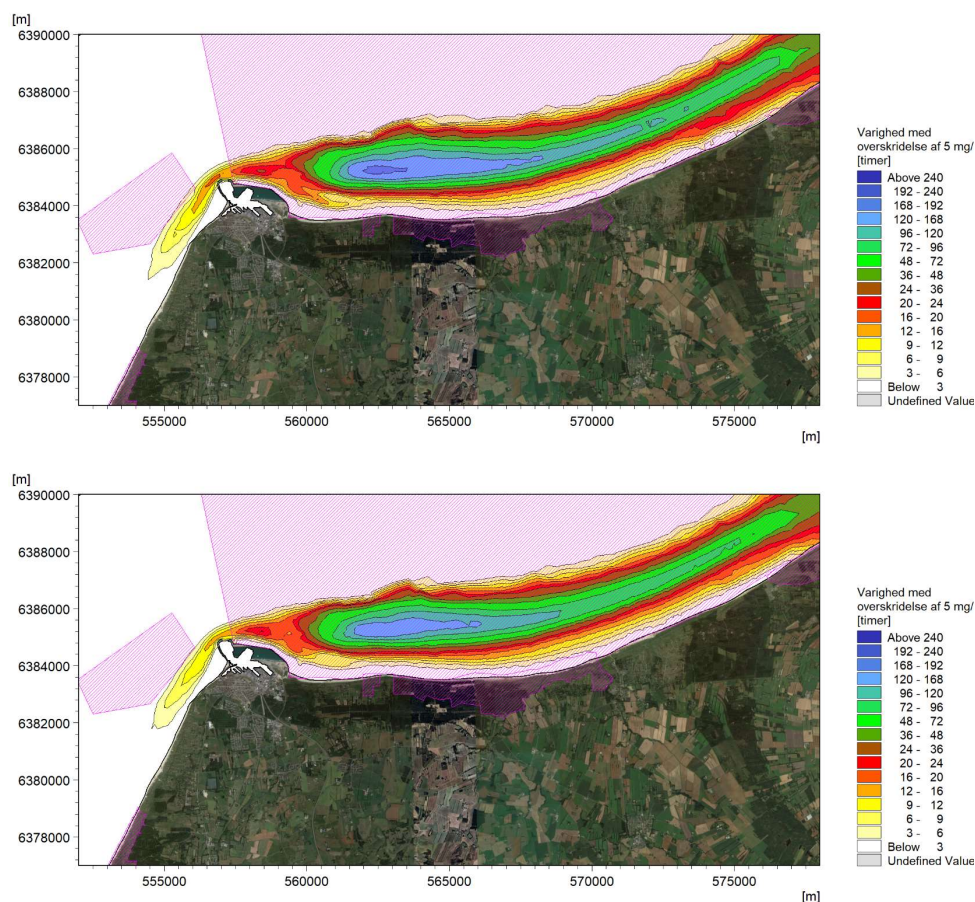
Figur 8-16 Overskridelsesvarighed af 2 mg/l i perioden med klapping plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 07-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.

Faldhastigheden af det finkornede sand har betydning af for hvor hurtigt klapskyerne mister hovedparten af sit materiale. I de følgende plot er der vist

varighedsplot med overskridelsesvarighed af sedimentkoncentrationer på henholdsvis 2 mg/l, 5 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l ud over den naturlige baggrundskoncentration for beregningerne med antagelse om en faldhastighed af finsandet på henholdsvis 1 mm/s og 2,2 mm/s.

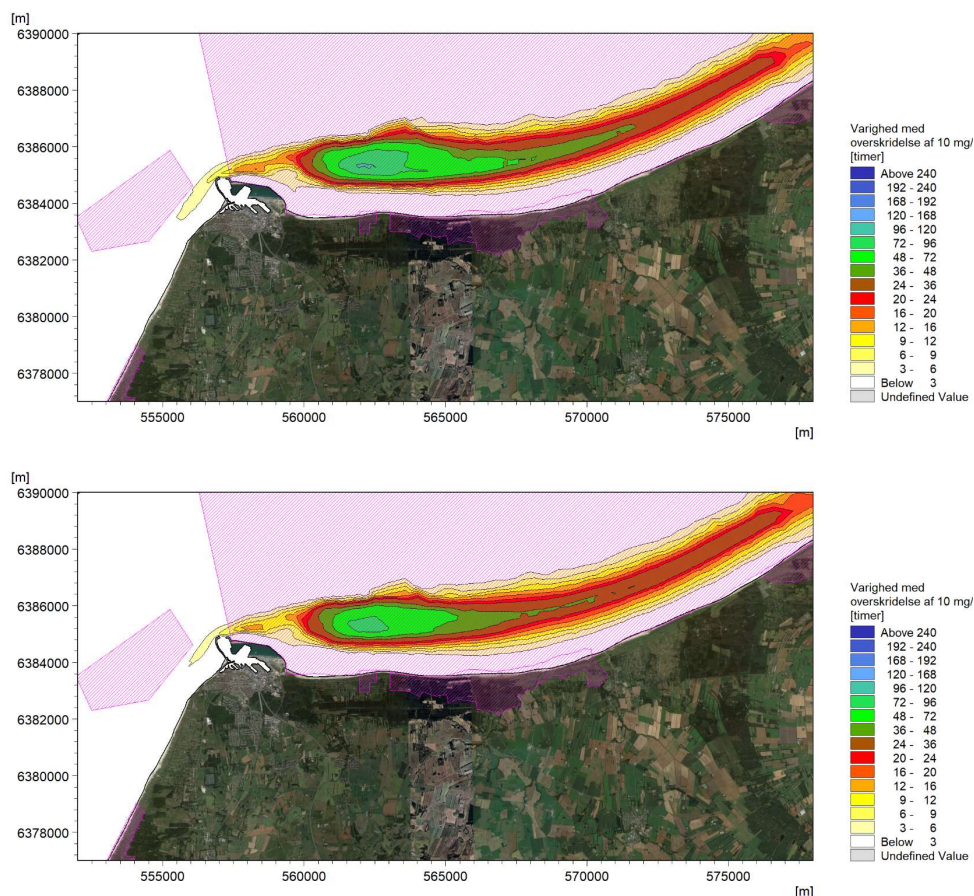
Klapskyerne føres i nogle situationer med strømmen vest om havnen, men primært er spredningen mod øst. Faldhastigheden af finsandet har ingen signifikant betydning for varighederne med overskridelse af 2 mg/l (se Figur 8-16), hvilket skyldes bidragene fra ler- og siltfraktionerne. Det ses, at der kun tabes en megen beskeden del af klappmaterialet til området vest for havnen. Bypasseffekten er derfor stort set ikke påvirket i denne periode. Skyggepåvirkningen er mere udtalt end i februar perioden, men optræder kun periodisk i forbindelse med de enkelte klappinger. I det blå område er overskridelsesvarigheden typisk ~300 timer, hvilket skal sammenholdes med perioden hvorover klappingerne foretages (840 timer). Endelig vil dele af den beregnede skyggevirksomhed optræde i perioder, hvor det i forvejen er mørkt.

Varighederne med overskridelse af 5 mg/l (se Figur 8-17) overskrides lokalt i op til ~150 timer, hvilket igen skal sammenholdes med perioden hvorover klappingerne foretages (840 timer) og det faktum at skyggepåvirkningen kun optræder periodisk.

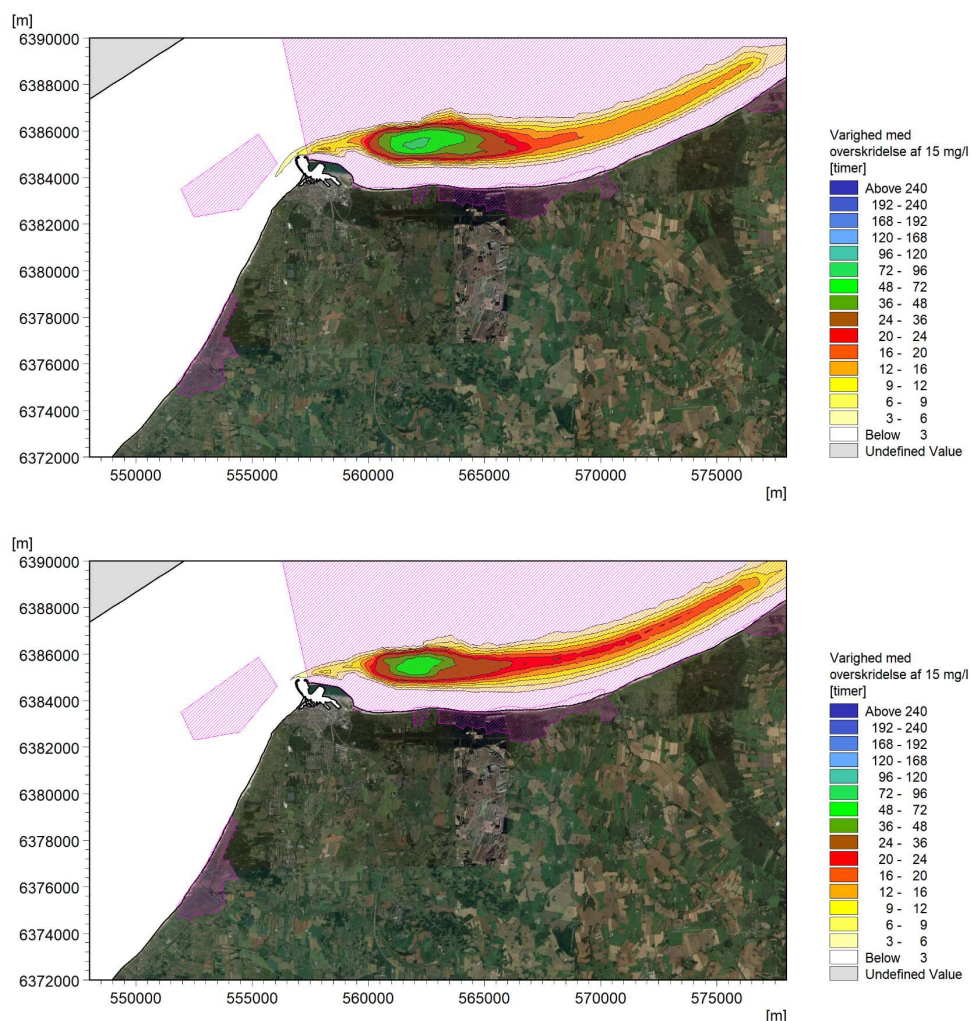


Figur 8-17 Overskridelsesvarighed af 5 mg/l i perioden med klapping plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 07-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.

I Figur 8-18 og Figur 8-19 er der vist tilsvarende plots af varigheder med overskridelses af henholdsvis 10 mg/l og 15 mg/l. Her overskrides 10 mg/l lokalt i op til ~80 timer og 15 mg/l i op til ~60 timer. I disse plot ses faldhastigheden af finsandet at have en større betydning for varighederne med overskridelse i bypasspladsens nærområde.



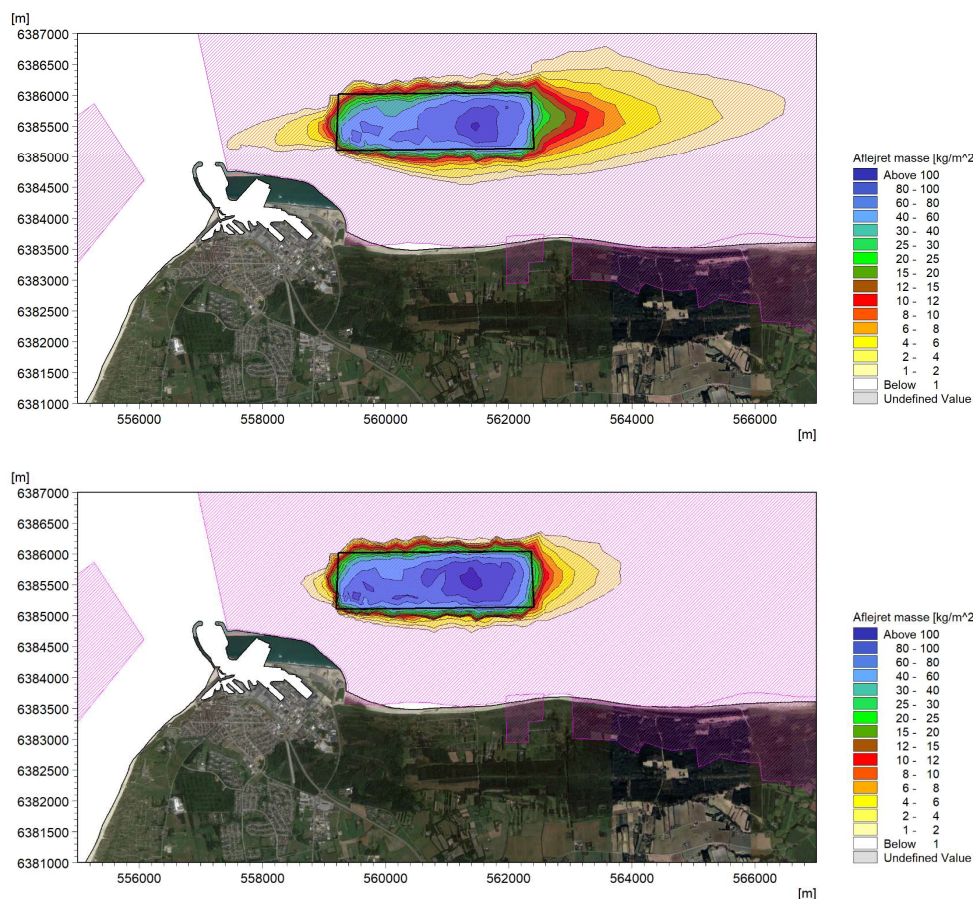
Figur 8-18 Overskridelsesvarighed af 10 mg/l i perioden med klapning plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 07-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.



Figur 8-19 Overskridelsesvarighed af 15 mg/l i perioden med klappning plus 2 efterfølgende dage (01-10-2021 – 08-11-2021). Øverst: faldhastighed af finsand 1 mm/s, nederst faldhastighed af finsand 2,2 mm/s.

Der klappes på 20 lokaliteter langs 6 vest-østgående linjer (120 klappninger) igennem den 35 dage lange periode startende i vest og sluttende i øst. Figur 8-20 viser den på baggrund af klappningerne aflejrede sedimentmængde, 52 timer efter sidste klappning, med antagelse om en faldhastighed af finsandet på henholdsvis 1 mm/s og 2,2 mm/s. Det ses, at der primært er spredning til området øst for bypasspladsen og at klapskyerne ikke interagerer med kystzonen syd for bypasspladsen. En del af det klappede materiale tabes med klapskyerne og særligt i situationer med vestgående strøm vil bypasseffekten reduceres. Spredningstab vil afhænge af oprensningens indhold af finsand samt den repræsentative faldhastighed herfor. I Tabel 8-5 er der opgjort hvor stor en del af den klappede masse, som er fastholdt på bypasspladsen under antagelse af to forskellige faldhastigheder for finsandet (i modelberegningen er bundtransport af materialet efter aflejring ikke indeholdt). Det ses, at 74,0% af den klappede mængde er fastholdt på bypasspladsen 52 timer efter den sidste klappning med en faldhastighed af finsandet på 1 mm/s og 86,0% med faldhastighed på 2,2 mm/s. Tabet er mindre end for februar perioden, hvor der optræder kraftigere strømme. Klappingsmodellen kan ikke beskrive, hvordan det tilbageværende sand vil spredes over længere tid, da en detaljeret bundtransportbeskrivelse ikke er indeholdt. Den langsgående nettosediment-

transport vil set over en længere tidsskala være rettet mod øst, men det vil være tværtransporten, som styrer om fodringen kan/vil vandre ind mod kysten og dermed virke dæmpende på erosionspresset i området. Til at beskrive migrationen af det klappede sandmateriale er der udført en morfologisk sandtransportberegning, som alene ser på migrationen af det tilførte bypass.



Figur 8-20 Aflejret klappmasse 52 timer efter sidste klapping.

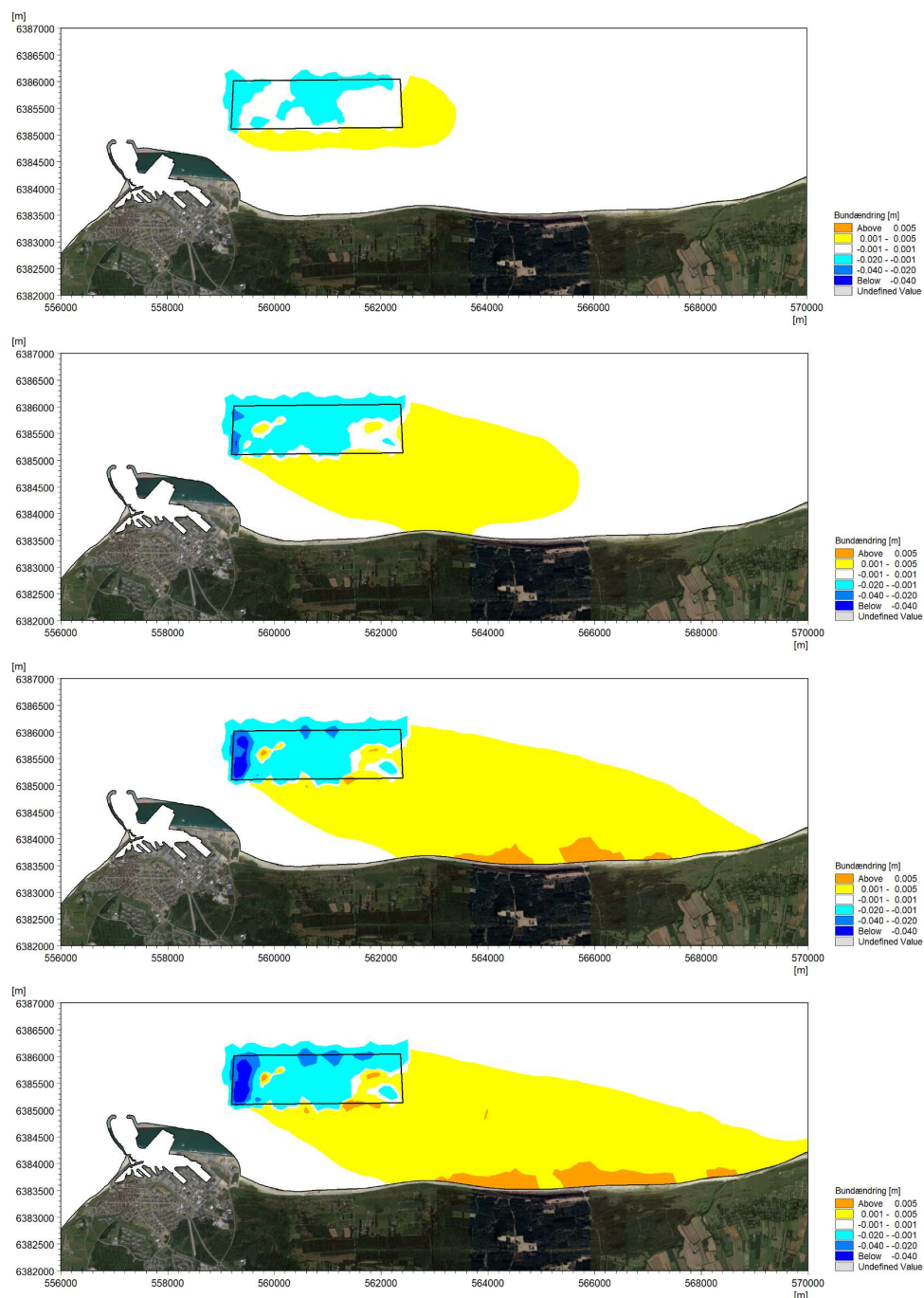
Tabel 8-5 Sedimenttab fra bypassplads ved klapping af 180.000 m³ i oktober 2021 1, 52 timer efter sidste klapping.

Faldhastighed [mm/s]	Klappet masse [ton]	Aflejret masse [ton]	Fastholdelsesgrad [%]
1	231.300	171.259	74,0
2,2	231.300	198.966	86,0

8.8 Migration af 180.000 m³ bypass materiale oktober 2021

Til at vurdere effekten af bypassplads og bypassmængden er der gennemført en morfologisk beregning dækkende samme modelperiode, som klappingerne ovenfor blev foretaget i (01-10-2021 – 07-11-2021). I beregninger er der initialt udlagt 180.000 m³ sand med en median kornstørrelse på 0,18 mm. Materialet er udlagt jævnt fordelt på hele bypasspladsen i et ~6,2 cm tykt lag, se Figur 8-14.

Strøm og bølger vil over tid erodere det tilførte bypass. I den morfologiske beregning migrerer bypassmaterialet væk fra bypasspladsen i takt med påvirkningen fra strøm og bølger. Dette er illustreret i Figur 8-21, hvor bundændringer relateret til bypassmaterialet er plottet efter 9,25, 18,5, 27,75 og 37 døgn. Det ses, at materialet gradvist migrerer i en sydøstlig retning ind mod kysten. I slutningen af perioden når dele af materialet helt ind til kysten, hvor det er fordelt over en strækning på omkring 8 km i en afstand cirka 2,5 km vest for havnen. Efter de 37 dage er 137.000 m³ af de 180.000 m³ fortsat på bypasspladsen, svarende til at blot 24% af materialet er migreret væk fra udlægningsområdet.



Figur 8-21 Bundændringer relateret til migration af udlagt bypass efter 9 døgn, 18 døgn, 28 døgn og 37 døgn.

For at følge migrationen af alt bypassmaterialet vil det være nødvendigt at modellere en væsentlig længere periode. Det materiale som har forladt bypasspladsen er fordelt over et større område i et ganske tyndt lag. Bypass har derfor kun en egentlig betydning for dæmpning af kysterosion, når der ses over længere tidsskalaer og væsentlig større akkumulerede bypassmængder. Ikke desto mindre giver den morfologiske simulering et klart billede af, hvilke områder af kysten som vil få glæde af den tilførte bypassmængde.

8.9 Opsummering

På baggrund af de 2 modellerede klapscenarier på bypasspladsen, kan det konkluderes at bypasseffekten er afhængig af strøm og bølgeforhold i den periode, hvor der klappes. I perioder med dominerende vestgående strøm tabes en del af klapmaterialet til området vest for bypasspladsen og havnen, hvorfor bypasseffekten reduceres.

I perioder med skiftende strømretninger kan hovedparten af klapmaterialet fastholdes på bypasspladsen.

I perioder med dominerende østgående strøm spredes en større del af klapmaterialet til området øst for bypasspladsen.

Skyggepåvirkningen fra klapskyer er af beskeden varighed og optræder kun periodisk i forbindelse med de enkelte klapninger. Endelig vil dele af den beregnede skyggevirksomhed optræde i perioder, hvor det i forvejen er mørkt.

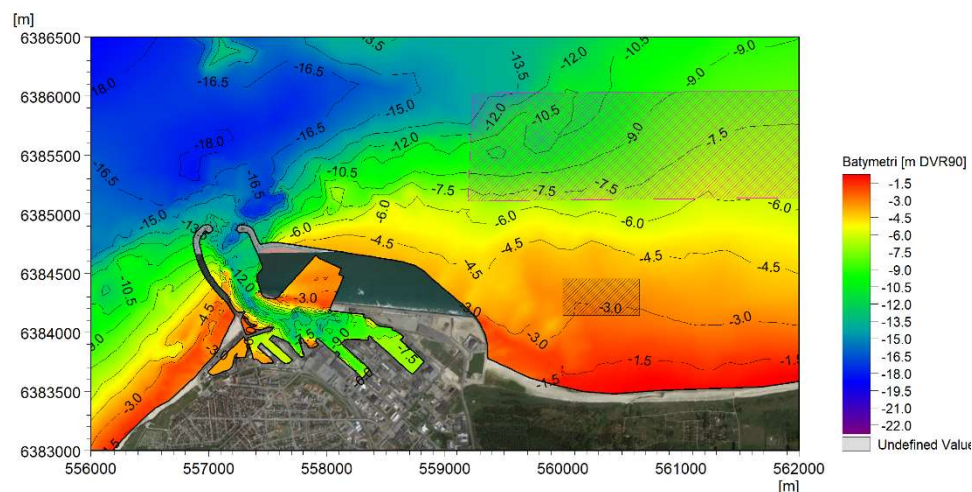
Klapskyerne har ingen nævneværdig interaktion med den indre del af kystprofilen i området stik syd for bypasspladsen. Der kan tabes bypassmateriale i situationer med vestgående strøm (tilbageførsel). Dels via klapskyerne, men også som følge af en vestgående sandtransport. Oprensede materialer som klappes på bypasspladsen vil gradvist føres ind mod kysten. I perioder med skiftende strømretninger vil materialet kunne føres ind til området langs den nordlige bølgebryder og området øst for havnen. I perioder med dominerende østgående strøm vil materialet typisk føres ind på kysten cirka 2,5 km øst for havnen og over en strækning på omkring 8 km. Tidsskalaerne for at en større mængde af bypass materialet når ind til kysten, er skønsmæssigt mere end et år. Simuleringsperioderne er for korte til at kvalificere tidsskalaen mere præcist. I februar 2021 simuleringen med tilførsel af 180.000 m³ bypass, er 88% af materialet fortsat fastholdt på selve bypasspladsen efter 32 dage. I oktober 2021 simuleringen er 76% af materialet fastholdt efter 37 dage.

Med udgangspunkt i klappingsscenarierne er det fundet, at man om muligt bør undgå bypass i perioder med dominerende vestgående strøm. Benyttes den sydlige og vestlige del af bypasspladsen, vil bypassmaterialet hurtigere kunne føres ind på kysten og ligeledes bedre modvirke en fra havneudbygningen lokal kysterosion.

9 Sedimentspredning relateret til kystnær bypass

Modelleringen af bypass på den store bypass plads nordøst for havnen indikerer, at klappning i dette område af 180.000 m³ oprenset materiale (isoleret set) kun har en meget lille betydning for erosionsforholdene på strækningen øst for havnen. Bypass har primært en betydning, når der ses på akkumulerede mængder over længere tidsskalaer. Hirtshals Havn har fået en ny kystnær bypass tilladelse, ref. /11/, som tillader kystnært bypass af 2 x 12.000 m³ over en 10-årig periode.

Hovedformålet med den her udførte modellering er at få belyst miljøpåvirkningen ved kystnært sediment bypass og sekundært bidrage til forståelsen af om den mere kystnært klappede mængde vil kunne bidrage mere mitigerende på kysterrosion øst for havnen. Det er åbenlyst at mængden som må tilføres over en 10-årig periode i sig selv, er så lille, at den ikke vil kunne få nogen egentlig betydning for kysterrosionen. Placeringen af den nye mere kystnære bypassplads er vist sammen med batymetrien i Figur 9-1. Den store bypassplads nordøst for havnen er ligeledes indikeret.

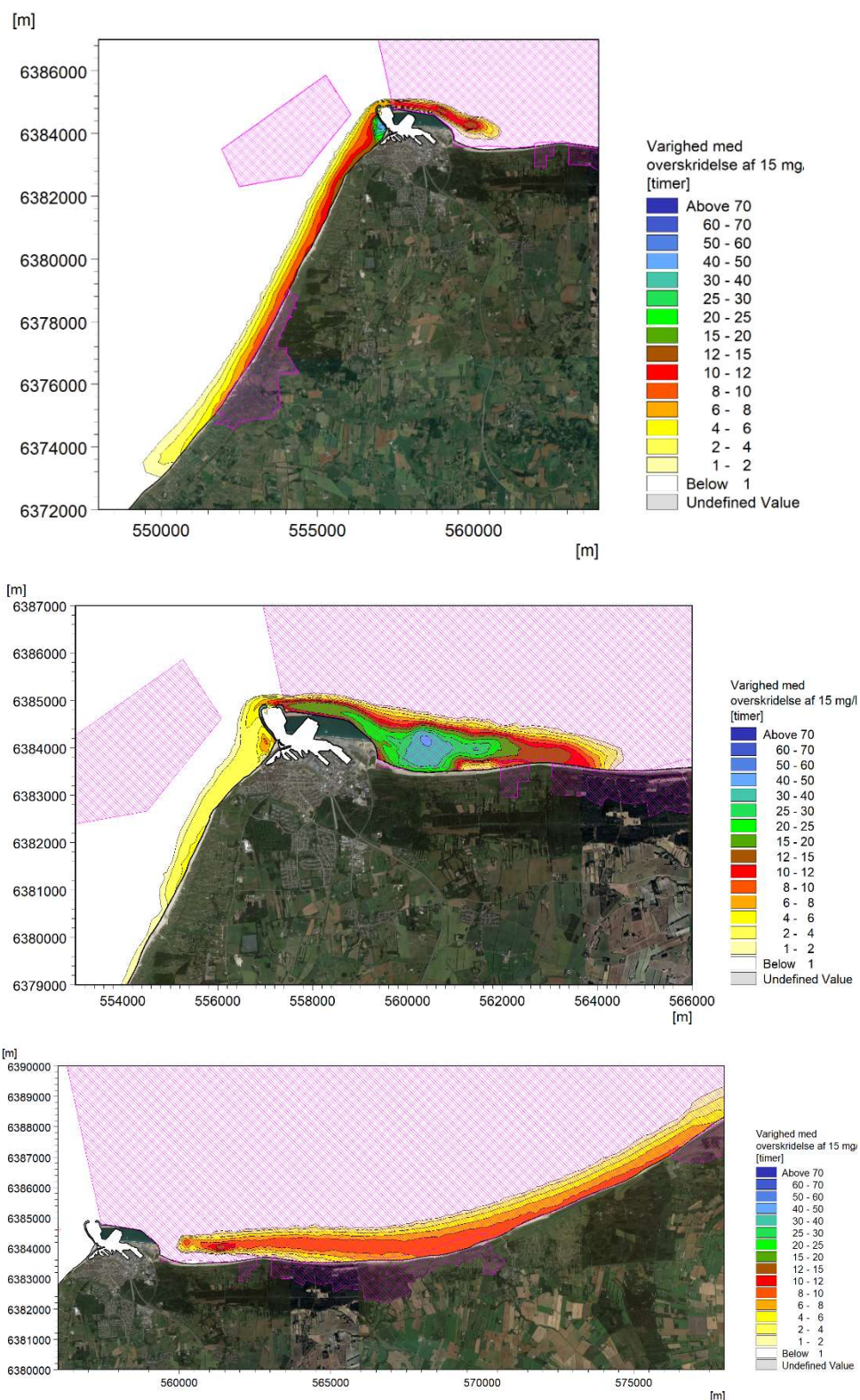


Figur 9-1 Placering af den kystnære bypass klappblads.

Bypassmaterialet antages at have samme sammensætning, som angivet i Tabel 8-2. Oprensning og bypass antages foretaget med en TSHD med en kapacitet på 1.000 m³ og en arbejdscyklus på 4 timer mellem de enkelte klappninger. I omsætningen til tørstofmasse er der antaget en tørstofdensitet på 1.285 kg/m³, idet de postglaciale sandaflejringer har en våddensitet på op til 1.800 kg/m³ ifølge ref. /2/. Der foretages 4 klappninger per dag svarende til en arbejdscyklus på 16 timer/døgn. Klappninger udføres hen over en 3 dages periode. Tabel 8-3 viser en oversigt for de samlede mængder og per klappning.

Tabel 9-1 Klappmængder.

	Volumen [m ³]	Tørstofmasse [ton]	Våddmasse [ton]
Per klappning	1.000	1.285	1.800
Samlet	12.000	15.420	21.600



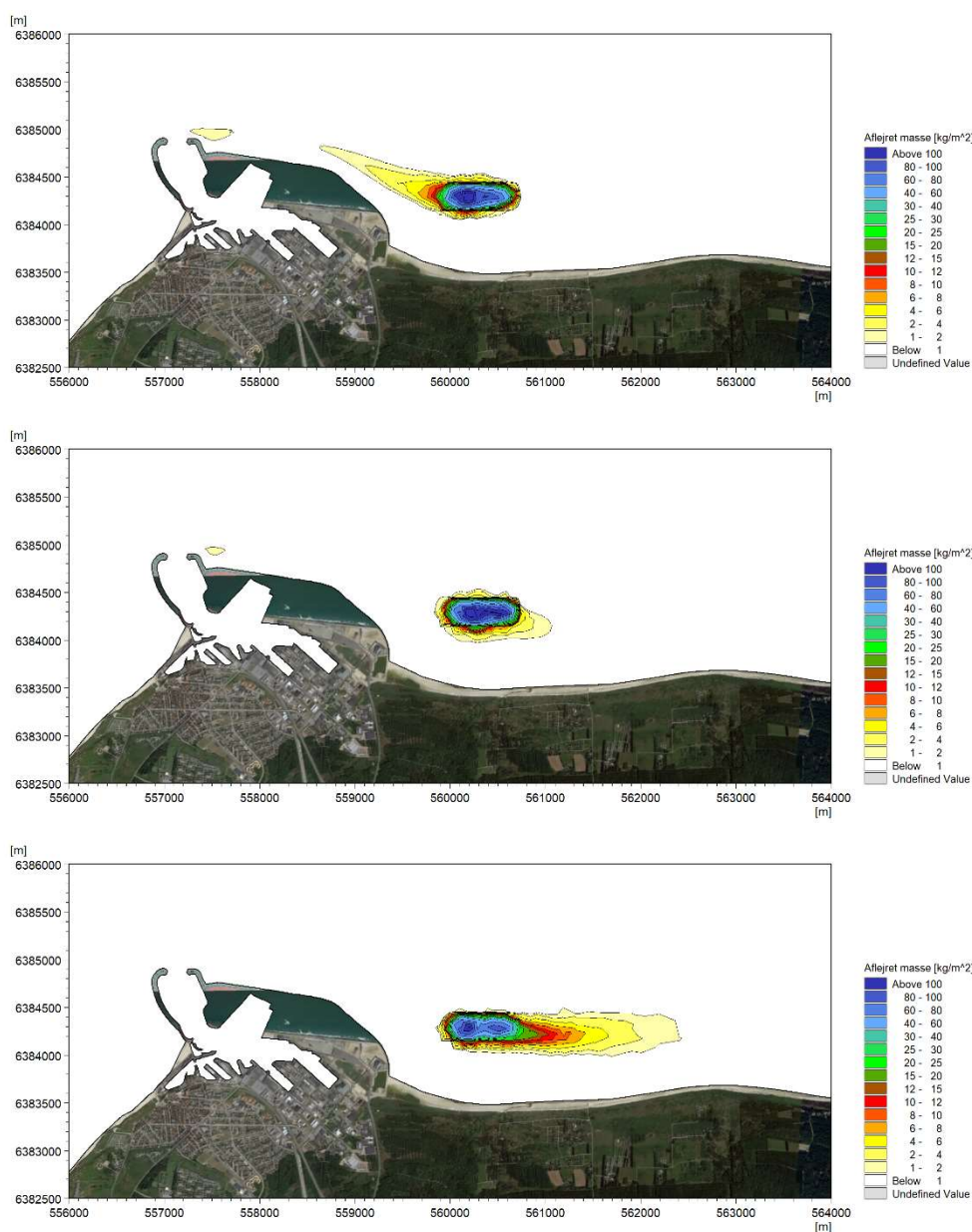
Figur 9-2 Overskridelsesvarighed af 15 mg/l. Øverst: med vestgående strømning. Midt: Svage strømme i skiftende retninger. Nederst: Østgående strømning.

Klapningerne er undersøgt for de samme 3 strømscenarier som indikeret med bølge- og strømroser i Kapitel 8 (Figur 8-2 og Figur 8-3), men klapperperioden er 2 dage kortere. Til at afspejle om den mere kystnære bypass, kan have en mitigerende effekt en kysterosion, er der taget udgangspunkt i kort visende

varighed med overskridelse af en sedimentkoncentration ud over naturlig baggrund på 15 mg/l, samt aflejningskort efter klappingerne.

Kort med overskridelsesvarigheder er vist i Figur 9-2. Ved vestgående strømning tabes der sediment til området vest for havnen, så bypass bør foretages i perioder med svage strømme i skiftende retninger eller østgående strøm. I de to sidste strømscenarier kommer sedimentfanen helt ind til kysten, hvilket indikerer at den kystnære bypass vil kunne få en bedre virkende mitigerende effekt.

I Figur 9-3 er der vist aflejningskort for hver af de tre klappingsscenarier. Det ses umiddelbart at den bedste fordeling opnås, når der klappes under forhold med østgående strøm. Modellen kan ikke beskrive hvordan sedimentet vil spredes over længere tid. Den langsgående nettosedimenttransport vil være rettet mod øst, men det vil være tværtransporten og sandbølgerne, som styrer om fodringen kan/vil vandre ind mod kysten og dermed dæmpe for erosionspresset i området.



Figur 9-3 Aflejret klapmasse 30 timer efter sidste klapping. Øverst: med vestgående strømning. Midt: Svage strømme i skiftende retninger. Nederst: Østgående strømning.

10 Referencer

- /1/ Rambøll, marts 2023. Hirtshals Havn – Udvidelse mod nord. Indvirkning på kystudvikling. Version 2.3.
- /2/ SWEKO, 15. juli 2022. Geoteknisk – Foreløbig undersøgelsesrapport nr. 1. Hirtshals Havn – Geotekniske forundersøgelser og miljøprøver.
- /3/ BioApp, 23. marts 2022. Analyse af sediment fra Hirtshals Havn, 2022. Notat 010-2022.
- /4/ DHI, april 2018. Hydrodynamic Model of North Sea and UK Waters (UKNS2), Setup and Validation, version 2.
- /5/ A1 Consult A/S, 14. november 2022. Hirtshals Havn, Havneudvidelse. Situationsplan, Fremtidige forhold rev. P.
- /6/ Fobian, A (2000). Kornfordelingen i nogle danske jordarter. Geologisk Tidsskrift, hæfte 3, pp. 1-32. København.
- /7/ Flather, R. A. (1976). A tidal model of the northwest European continental shelf. Memo. Soc. Roy. Liege, 6 (10), pp. 141-164.
- /8/ CEDA/IADC (2018). Dredging for Sustainable Infrastructure. The Hague, the Netherlands. Revision no. 672.
- /9/ PIANC, Working Group 108 of World Association for Waterborne Transport Infrastructure. (2010). Dredging and Port Construction Around Coral Reefs. Brussels: PIANC Secretariat General.
- /10/ Kystdirektoratet (2018). Tilladelse til bypass og/eller nyttiggørelse af oprenset sediment fra Hirtshals Havn. Journal nr. 17/03147-35. 15-07-2018.
- /11/ Miljø- og Fødevareministeriet, Miljøstyrelsen (2017). Hirtshals Havn, Sejlrenden, Klaptilladelse. Journal nr. SVANA-4102-00066. 22-06-2017.
- /12/ Whitehouse, R., Soulsby, R., Roberts, W. and Mitchener, H. (2000). Dynamics of estuarine muds. A manual for practical applications. Thomas Telford Publishing.
- /13/ Kystdirektoratet (2023). Tilladelse til bypass med rent oprensningssediment fra indsejlingen delområde A1, til Hirtshals Havn, Hjørring Kommune. Journal nr. 22/22498. 03-02-2023.
- /14/ DHI (2023). Sediment budget omkring Hirtshals Havn og effekten af havneudvidelsen. Rapport 1.0, 20-10-2023.