

Hirtshals Forlænget Vestmole

Sedimentspredning ved forlængelse af vestmole

Rapport

07-07-2025

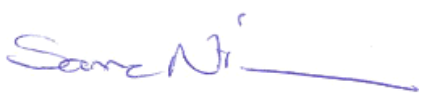
Hirtshals Forlænget Vestmole

Sedimentspredning ved forlængelse af vestmole

Rapport

Projektnr. Kundens ref.

Udarbejdet for: Hirtshals Havn
Repræsenteret ved: Niels Kiersgaard

Godkendt af	
07-07-2025	
X	
Approved by	
Signed by: Sanne Lina Niemann	

Kontaktperson: Asger Bendix Hansen, abh@dhigroup.com, +4522855913
Projektleder: Asger Bendix Hansen
Kvalitetsansvarlig: Bo Brahtz Christensen
Udarbejdet af: Sina Saremi
Projektnr.: 11832877
Godkendt af: Sanne Line Niemann
Godkendelsesdato: 02.07.2025
Revision: Final 1.1
Klassifikation: **Begrænset:** Dette dokument er tilgængeligt for personer ansat i DHI-koncernen men må ikke deles med andre udenfor DHI-koncernen uden kundens forhåndsgodkendelse.
Filnavn: DHI2025-HirtshalsForlængetVestmole-Sedimentspredning.docx

Indholdsfortegnelse

1	Indledning.....	5
2	Sammenfatning.....	6
3	Metodebeskrivelse	8
3.1	Hydrodynamisk model	8
3.2	Gravespild.....	8
4	Datagrundlag.....	9
4.1	Vestmole forlængelse	9
4.2	Batymetri.....	9
4.3	Jordbundsforhold	11
4.4	Vandstandsmålinger	12
4.5	HD modellens drivdata	13
5	Modelopsætning	14
5.1	Batymetri og beregningsnet	14
5.2	Modellens drivdata	15
5.3	Lokal verifikation af hydrodynamisk model	16
5.4	Gravemængder og sedimenttypernes sammensætning.....	18
5.5	Graveplan	20
6	Resultater	22
6.1	Perioden med dominerende østlige vinde.....	22
6.2	Perioden med dominerende vestlige vinde	27
6.3	Perioden med svage vinde fra skiftende retninger.....	32
7	Konklusion	37
8	Referencer	39

Figurer

Figur 2-1	Maksimum varighed med overskridelse af 50 mg/l inden for de 3 betragtede vejrscenarier.	7
Figur 2-2	Aflejringskort for gravespild; maksimum for de 3 betragtede vejrscenarier.	7
Figur 4-1	Plantegning der viser forlængelsen af vestmolen.....	9
Figur 4-2	Pejlinger modtaget fra Hirtshals Havn.	10
Figur 4-3	Søkort anvendt til fastlæggelse af batymetri i bassiner hvor der ikke foreligger pejlinger.	10
Figur 4-4	Positioner for prøvetagning af M5, M6, M9, M10, M11 og M12.	11
Figur 4-5	Kornkurvefordeling af overfladesedimentet i M5, M6, M9, M10, M11/G30, M11 og M12.	12
Figur 4-6	DMI vandstandsdata fra Hirtshals Havn 2021.	12
Figur 4-7	UKNS2 modellens udstrækning og batymetri, fra ref. /4/.	13
Figur 5-1	Model batymetri med fremtidig vestmole forlængelse uden uddybning.	14
Figur 5-2	Model beregningsnet med fremtidig vestmole forlængelse.	15
Figur 5-3	Sammenligning af UKNS2 modelleret vandtemperatur ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.	15
Figur 5-4	Sammenligning af UKNS2 modelleret saltholdighed ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.	16
Figur 5-5	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 1. kvartal 2021.....	17

Figur 5-6	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 2. kvartal 2021.....	17
Figur 5-7	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 3. kvartal 2021.....	18
Figur 5-8	Sammenligning af målt og modelleret vandstand 4. kvartal 2021.....	18
Figur 5-9	Diagram til klassificering af jordtyper, ref. /6/.....	19
Figur 5-10	Eksempel på flokkulationsfaktor som funktion af partikeldiameter, ref. /12/.....	20
Figur 5-11	Illustration af beregningsnettet omkring den forlængede vestmole.....	21
Figur 6-1	Øjebliksbillede af sedimentfane under en periode med østlige vinde og sydvestgående strøm.	22
Figur 6-2	Varighed for overskridelse af 10 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	23
Figur 6-3	Varighed for overskridelse af 50 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	24
Figur 6-4	Varighed med overskridelse af 100 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	25
Figur 6-5	Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet for perioden med østlige vinde.	26
Figur 6-6	Aflejringskort for gravespild for perioden med østlige vinde. Enheden 1 kg/m ² kan lidt forsimplet ækvivaleres med 1 mm.	26
Figur 6-7	Øjebliksbillede af sedimentfane under i en periode med vestlige vinde.....	27
Figur 6-8	Varighed af overskridelse af 10 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	28
Figur 6-9	Varighed for overskridelse af 50 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	29
Figur 6-10	Varighed af overskridelse af 100 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	30
Figur 6-11	Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet for vejrsценariet med dominerende vestlige vinde.	31
Figur 6-12	Aflejringskort for gravespild under vejrsценariet med dominerende vestlige vinde. Enheden 1 kg/m ² kan lidt forsimplet ækvivaleres med 1 mm.....	31
Figur 6-13	Øjebliksbillede af sedimentfane under i perioden med relativt svage vinde.....	32
Figur 6-14	Varighed med overskridelse af 10 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	33
Figur 6-15	Varighed af overskridelse af 50 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	34
Figur 6-16	Varighed af overskridelse af 100 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.	35
Figur 6-17	Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet for vejrsценariet med relativt rolige vinde.	36
Figur 6-18	Aflejringskort for gravespild i vejrsценariet med rolige vindforhold. Enheden 1 kg/m ² kan lidt forsimplet ækvivaleres med 1 mm.....	36
Figur 7-1	Maksimum varighed med overskridelse af 50 mg/l inden for de 3 scenarier.	37
Figur 7-2	Aflejringskort for gravespild; maksimum for de 3 scenarier.....	38
Figur A-1	Maksimum varighed for overskridelse af 10 mg/l inden for de 3 scenarier.	1
Figur A-2	Maksimum varighed med overskridelse af 50 mg/l inden for de 3 scenarier.	2
Figur A-3	Maksimum varighed for overskridelse af 100 mg/l inden for de 3 scenarier.	3
Figur A-4	Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet inden for de 3 scenarier.....	4
Figur A-5	Aflejringskort for gravespild; maksimum for de 3 scenarier.....	4

Tabeller

Tabel 5-1	Antagelser om sedimenttypernes sammensætning.	19
Tabel 5-2	Faldhastigheder opgjort på sedimenttype.....	20
Tabel 5-3	Antaget tørdensitet for de 3 sedimenttyper.....	20

Bilag

Bilag A Supplerende figurer

1 Indledning

Hirtshals Havn planlægger at forlænge den eksisterende vestmole for at forbedre indsejlingsforholdene til havnen. I den forbindelse har havnen bedt DHI A/S om at vurdere effekten af det sedimentspild, der forårsages af uddybningen af indsejlingen.

Størstedelen af materialet fra uddybningen er sand og kun en lille del er kohæsivt (silt eller ler). Alle materialer vil som udgangspunkt blive placeret på klappladsen nord for havnen. Effekten af sedimentspild fra klapning er tidligere blevet vurderet, som beskrevet i /15/, og er derfor ikke en del af nærværende studie.

Nærværende studie er baseret på spildberegninger, hvori det antages, at der bliver uddybet 130,000 m³ materiale med sandsuger (TSHD: Trainiling Suction Hopper Dredger), og at dette arbejde vil tage omkring 15 dage. Den i dette studie anvendte graveplan er konstrueret således, at den stemmer overens med det oprensningsarbejde, der rutinemæssigt bliver udført i indsejlingen til havnen.

2 Sammenfatning

I forbindelse med den planlagte forlængelse af vestmolen ved Hirtshals Havn planlægges en uddybning af indsejlingsområdet, hvorved der skal fjernes op til 130.000 m³ materiale fra området langs østsiden af den forlængede mole. Gravearbejdet forventes udført med sandsuger og der vil i den forbindelse spildes sediment i vandsøjlen. Denne rapport præsenterer resultaterne af et studie, hvori spredningen af sedimentspildet er vurderet baseret på simuleringer af bølger, strøm og sedimenttransport.

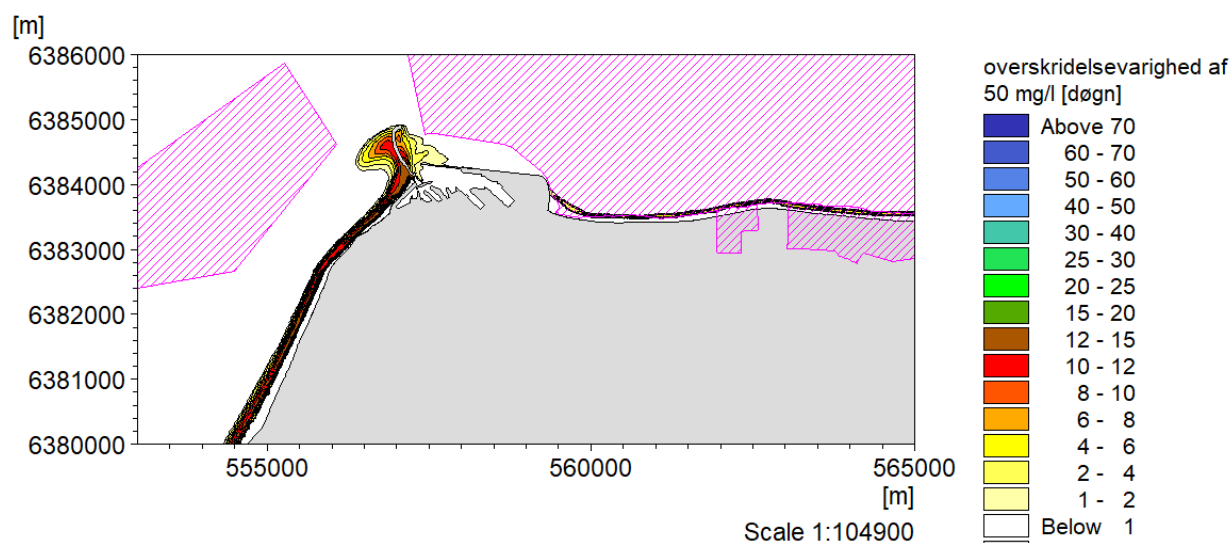
Uddybning af indsejlingen vil ske efter, at vestmolen er etableret, hvorved gravespild fra uddybningen udelukkende vil ske i det afskærmede område øst for vestmolen. De relativt rolige strømforhold i dette område bevirker, at en relativt stor andel af det spildte materiale vil aflejres lokalt og ikke spredes udenfor indsejlingsområdet. I forbindelse med uddybningsarbejdet forventes et beregnet spildtab på ~12.900 ton havbundssediment, svarende til cirka 7% af den samlede uddybningsmængde. Graveperioden forventes at forløbe over ca. 15 dage med gravning 24/7.

Effekten af spildet er vurderet baseret på modelberegninger for 3 forskellige vejrscenarier, der repræsenterer vestlige og østlige vinde, samt rolige forhold. Figur 2-1 viser den samlede overskridelsesvarighed af 50 mg/l under gravearbejdet opgjort som et maksimum over de tre undersøgte scenarier. Lokalt omkring arbejdsområdet, samt helt kystnær sydvest og øst for havnen, ses en kortvarig overskridelse på nogle få døgn over den samlede periode (15 døgn). Der findes ikke data, der beskriver naturligt forekommende suspenderede sedimentkoncentrationer, men det vurderes at en koncentration på 50 mg/l overskrides kystnært under hyppigt forekommende bølgeforhold og lidt længere fra kysten under storme. Den beregnede påvirkning vurderes derfor at være mindre end påvirkningen fra en almindeligt forekommende storm, hvor sediment resuspenderes over langt større områder.

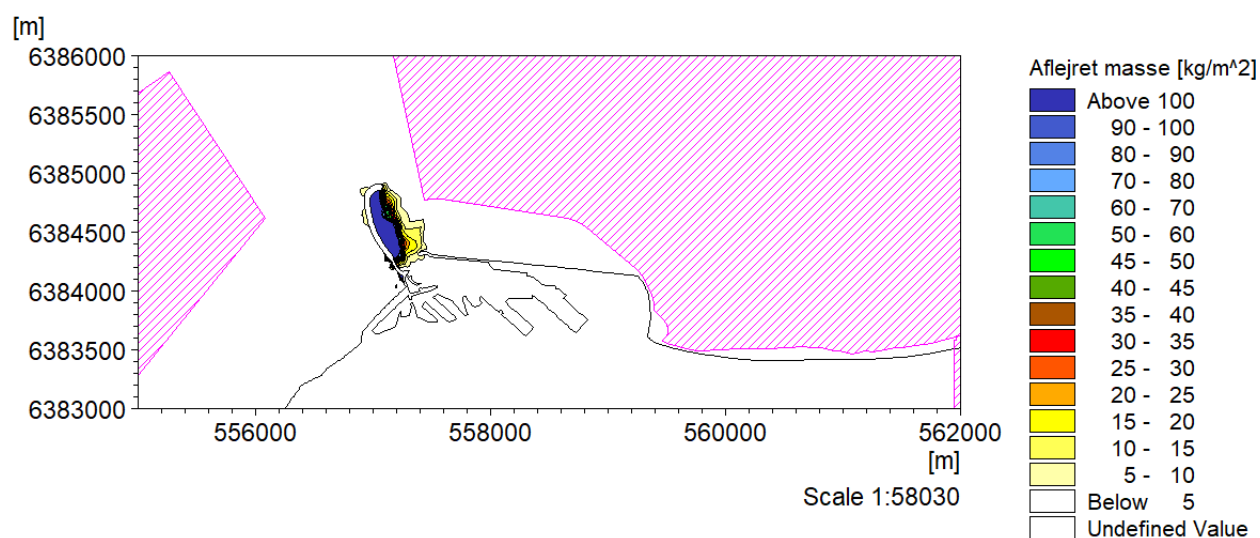
Størstedelen af gravespildet vil aflejres indenfor arbejdsområdet og kun en mindre del af materialet vil aflejres udenfor arbejdsområdet (se Figur 2-2). Udenfor arbejdsområdet overstiger den beregnede aflejring ikke 2 cm under antagelse om en tørdensitet på 1.200 kg/m³. De naturligt forekommende bundændringer i området er af størrelsesordenen 0,1-1 m/år, /14/ og det vurderes derfor, at bundændringer forårsaget af gravespildet vil være ubetydelige i forhold til den naturlige dynamik.

Det skal bemærkes, at det spildte sediment vil være meget lig det naturligt forekommende sediment i området, som resuspenderes under stormfulde forhold.

Det vurderes, at både den forøgede aflejring samt sedimentkoncentrationer, som gravearbejdet vil forårsage, vil være ubetydelige i forhold til de naturligt optrædende variationer i området.



Figur 2-1 Maksimum varighed med overskridelse af 50 mg/l inden for de 3 betragtede vejrscenarier.



Figur 2-2 Aflejringskort for gravespild; maksimum for de 3 betragtede vejrscenarier.

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 langs læsiden af den forlængede vestmole og i indsejlingen. I modelbeskrivelsen er det antaget, at uddybningen udføres efter, at den forlængede vestmole er etableret.

Den hydrauliske model er konstrueret således, at modellens beregningsnet er særlig fint i området omkring havnen. Længere væk fra havnen øges cellestørrelsen gradvist. Modelbatymetrien er baseret på de nuværende vanddybder.

Saltholdigheden foran havnemundingen 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 densitets effekter 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.

Gravespildet vil blive spredt ud af arbejdsområdet af strømme, der er drevet af en kombination af påvirkning fra bølger og vind. For at kunne inkludere bølgedreven strøm, afvikles den hydrodynamiske 3D-model koblet med en spektral bølgemodel, 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 meteorologisk drevet (bølger og vind). Strømmen ud for havnen vil derfor på trods af tidevandet typisk være rettet mod øst eller vest i længerevarende perioder (dage).

For at tage højde for variationer i vejrforhold er spildberegningerne udført for tre perioder; 1) Dominerende vestlige vinde (østgående strøm), 2) Dominerende østlige vinde (vestgående strøm) og 3) Relativt svage vinde fra skiftende retninger. De tre perioder er desuden valgt ud fra den betingelse, at den signifikante bølgehøjde foran havnen ikke overstiger 1,5-2 meter, da uddybningsarbejdet ikke vil kunne udføres i perioder med højere bølger.

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 en hydrauliske optagningsmetode, i form af en sandsuger (TSHD: Trailing Suction Hopper Dredger).

Uddybningsarbejder vil i praksis blive udført med en række afbrydelser i form af nedetid, hvis bølgerne bliver for høje. I sedimentspredningsberegningen er det antaget, at uddybningsarbejderne foretages 24/7 og dækker hele uddybningsområdet, da dette typisk vil resultere i den største miljøpåvirkning og dermed afspejle en konservativ tilgang i miljøkonsekvensvurderingen.

4 Datagrundlag

Dette kapitel beskriver det til studiet anvendte datagrundlag.

4.1 Vestmole forlængelse

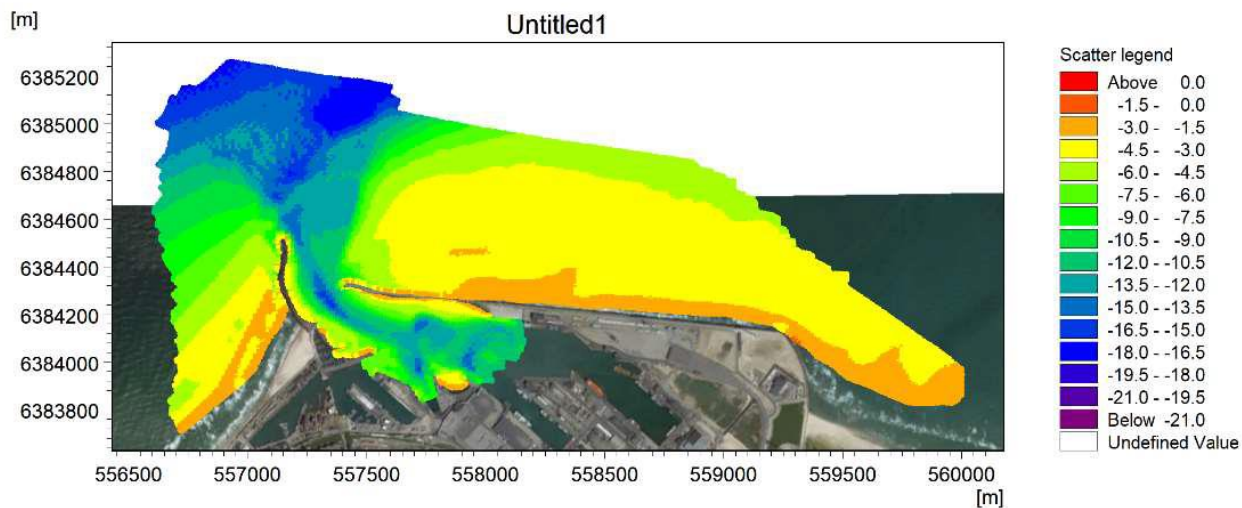
Forlængelsen af vestmolen fremtidige dybdeforhold er baseret på plantegningen vist i Figur 4-1



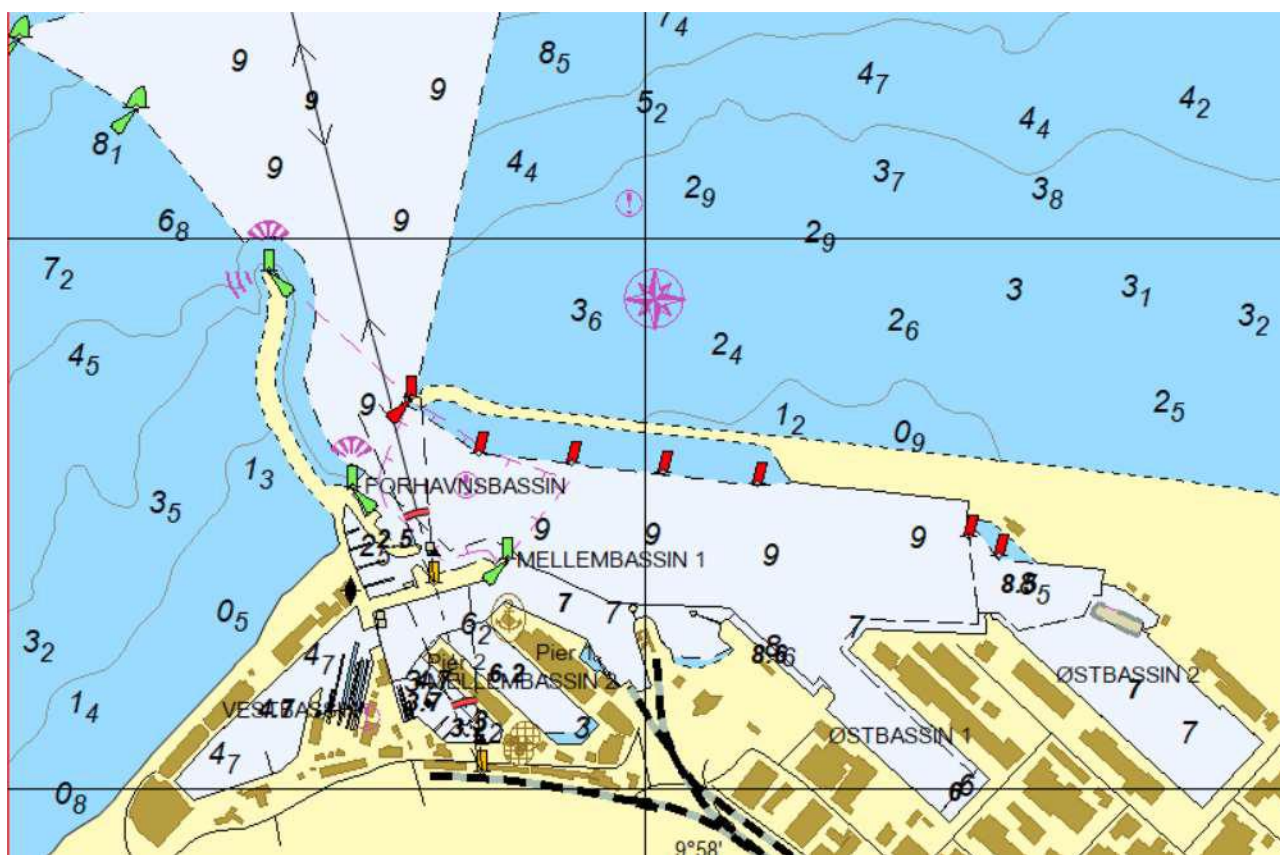
Figur 4-1 Plantegning der viser forlængelsen af vestmolen

4.2 Batymetri

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 dybdemodell (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.



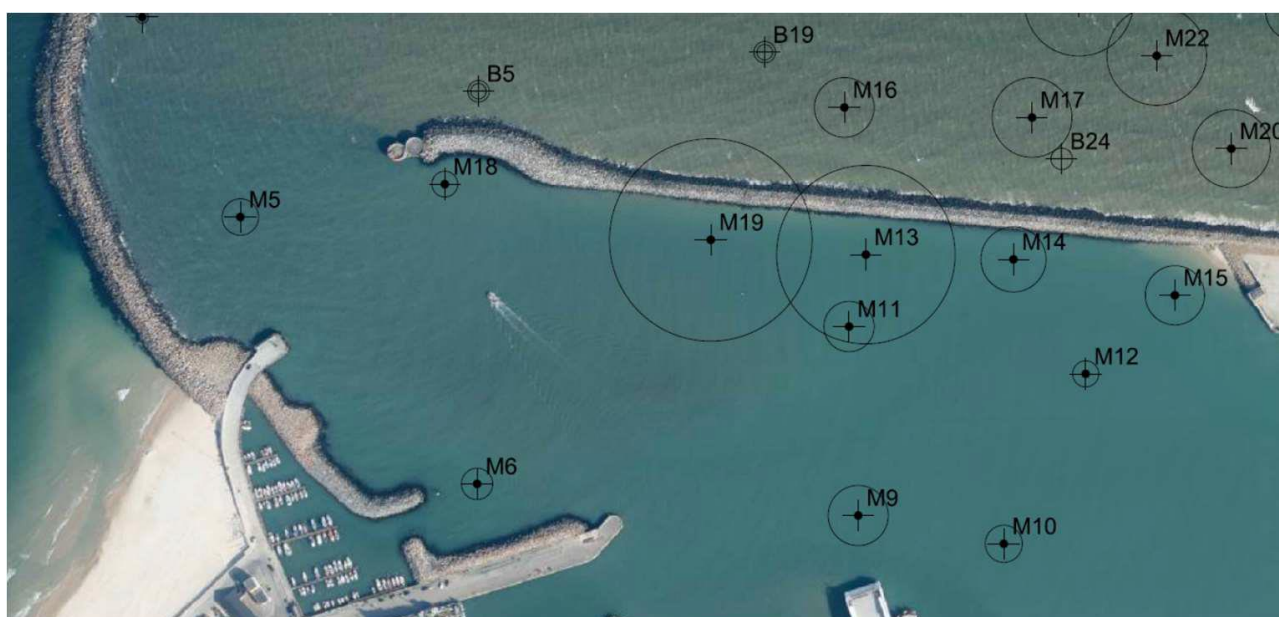
Figur 4-2 Pejlinger modtaget fra Hirtshals Havn.



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

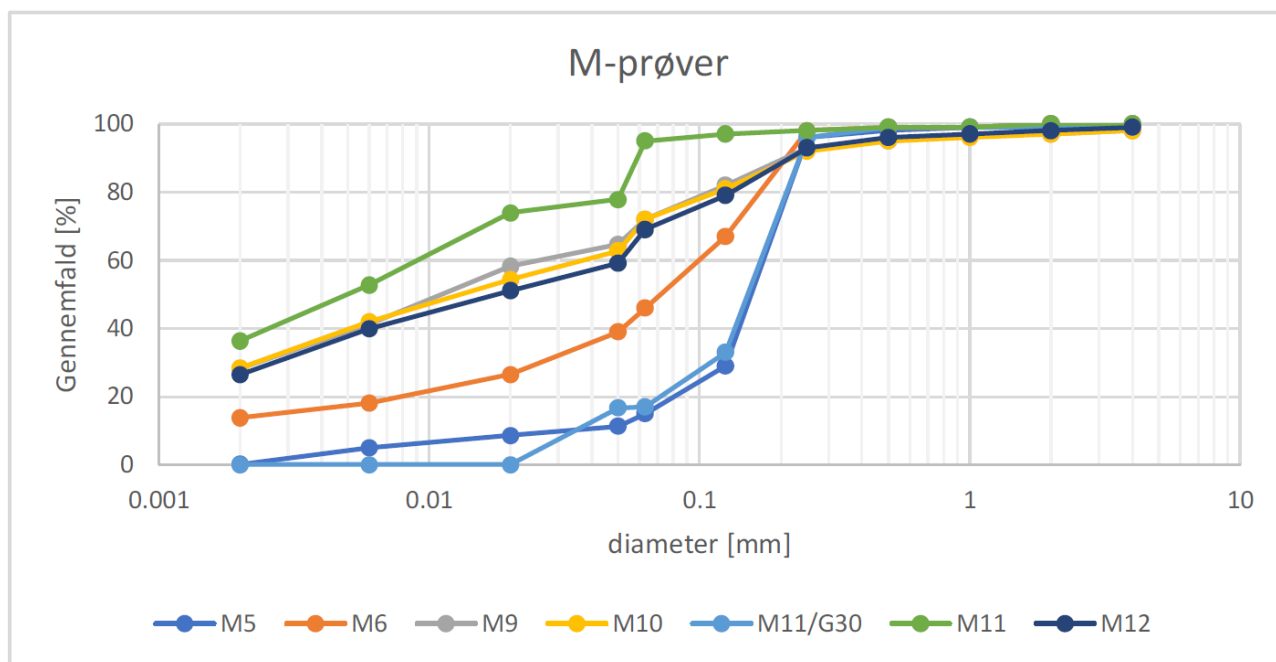
4.3 Jordbundsforhold

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. Der findes en del kornekurver 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 4-4. 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 4-4 Positioner for prøvetagning af M5, M6, M9, M10, M11 og M12.

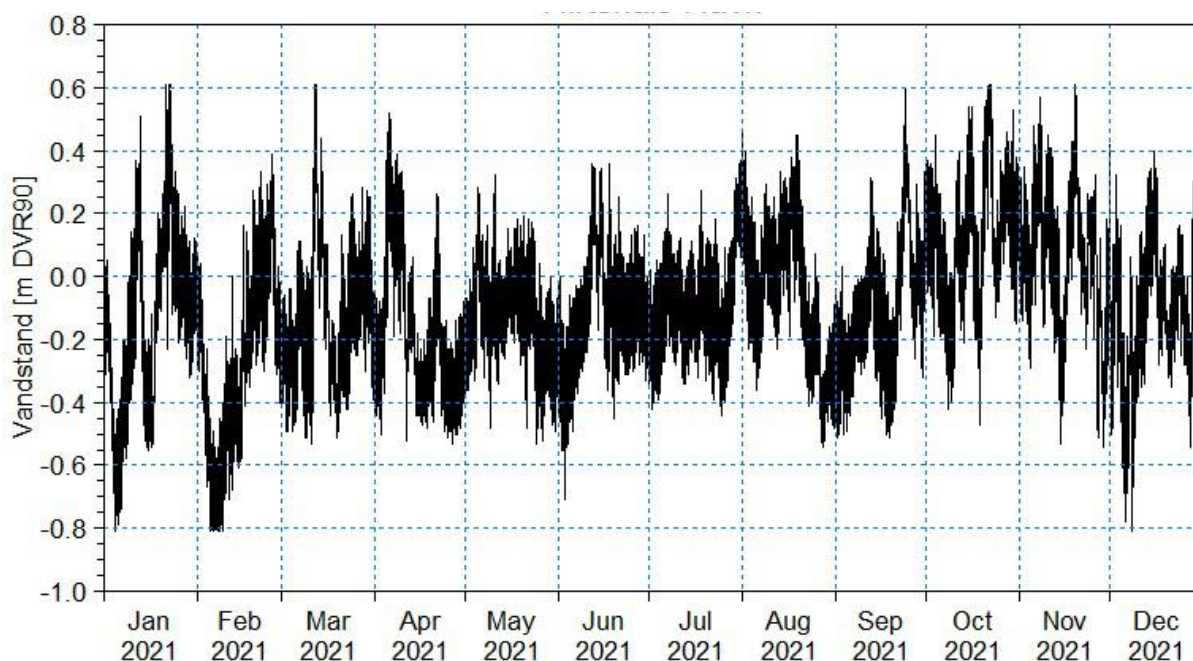
Kornkurverne fra overfladesediment er vist i Figur 4-5. Der ses som forventet en ændret gradering i materialets sammensætning i takt med at afstanden til indsejlingen øges. Vandskiftet i havnen er tidevandsdomineret og der sker derfor en udfældning af det fine sand i den ydre del, mens det mere finkornede 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 4-5 Kornkurvefordeling af overfladesedimentet i M5, M6, M9, M10, M11/G30, M11 og M12.

4.4 Vandstandsmålinger

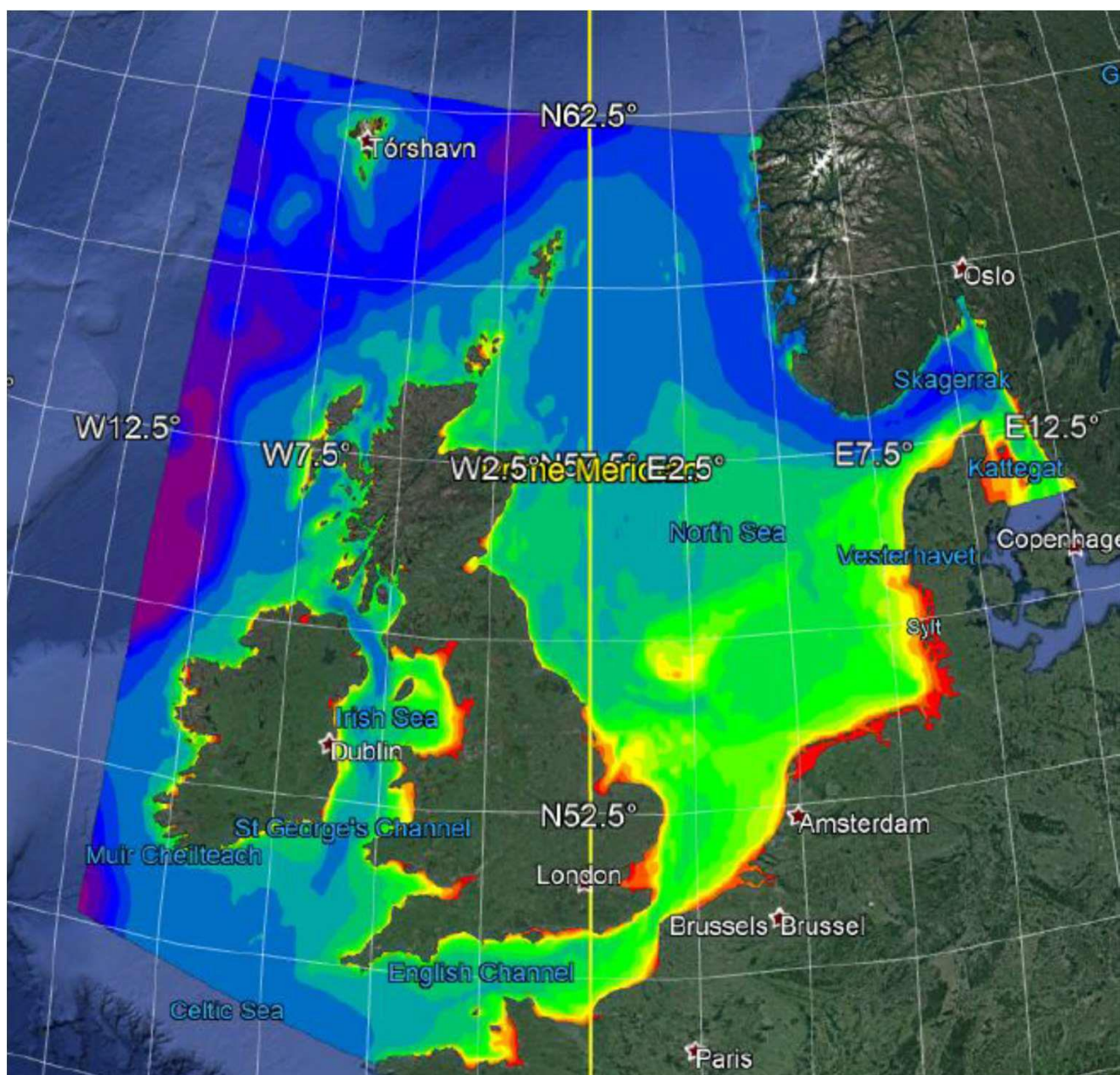
Der er via DMI hentet vandstandsmålinger fra Hirtshals Havn til verifikation af modellen. En gennemgang af målingerne viser, at der er udfald på målingerne, når vandstanden falder under -0,8 m DVR90 og tilsvarende når vandstanden overstiger 0,61 m DVR90. Målingerne indeholder derfor ikke ekstremerne i højvande og lavvande. De målte vandstandsdata er dog stadig nyttige, da de kan bruges til at validere modellen for langt størstedelen af simuleringsperioden.



Figur 4-6 DMI vandstandsdata fra Hirtshals Havn 2021.

4.5 HD modellens drivdata

Modellens drivdata (randbetingelser og initialbetingelse) er udtrukket fra DHI's 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 4-7.



Figur 4-7 UKNS2 modellens udstrækning og batymetri, fra ref. /4/.

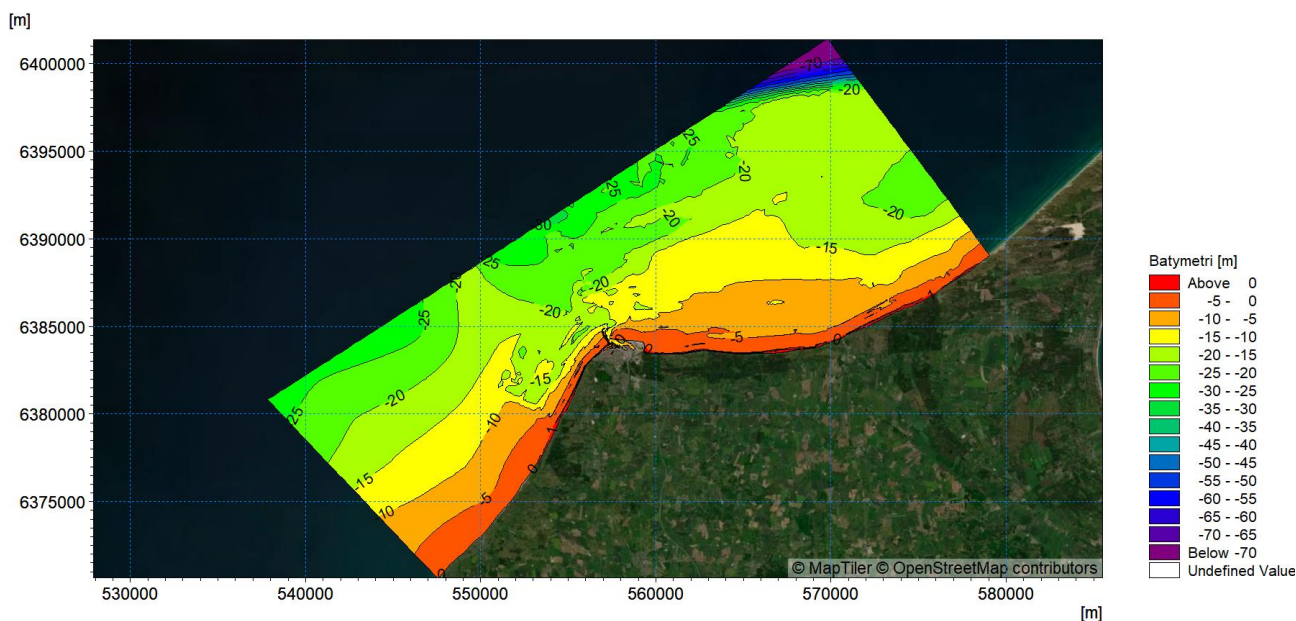
Vindfeltet er det samme som UKNS2 modellens, som anvender StormGeo vind med en stedlig opløsning på 0,1° i både længde- og breddegrad for vindkomponenterne (U, V) og atmosfæretryk (P).

5 Modelopsætning

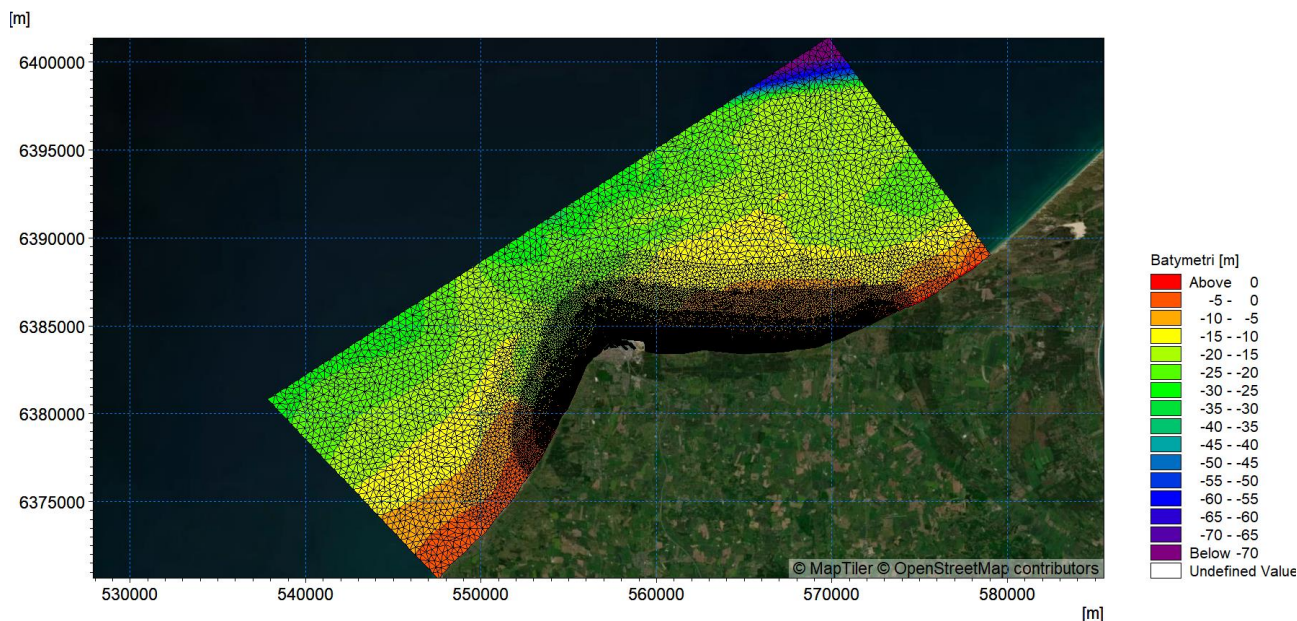
5.1 Batymetri og beregningsnet

Den anvendte model dækker et område, der strækker sig ca. 40 km langs kysten og ca. 15 km ud fra kysten. 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 kystprofilen væsentlig stejlere end i området øst for havnen. Modelbatymetrien er vist i Figur 5-1 med en ikke-lineært varierende dybdeskala.

3D-modellen er opbygget af fleksible trekantelementer, som kan variere i størrelse og form. Modellens horisontale beregningsnet er vist i Figur 5-2. Modellen er opbygget af 88.444 horisontale elementer, som gradvist forfines ind mod havnen og i den indre del af kystprofilen. 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.



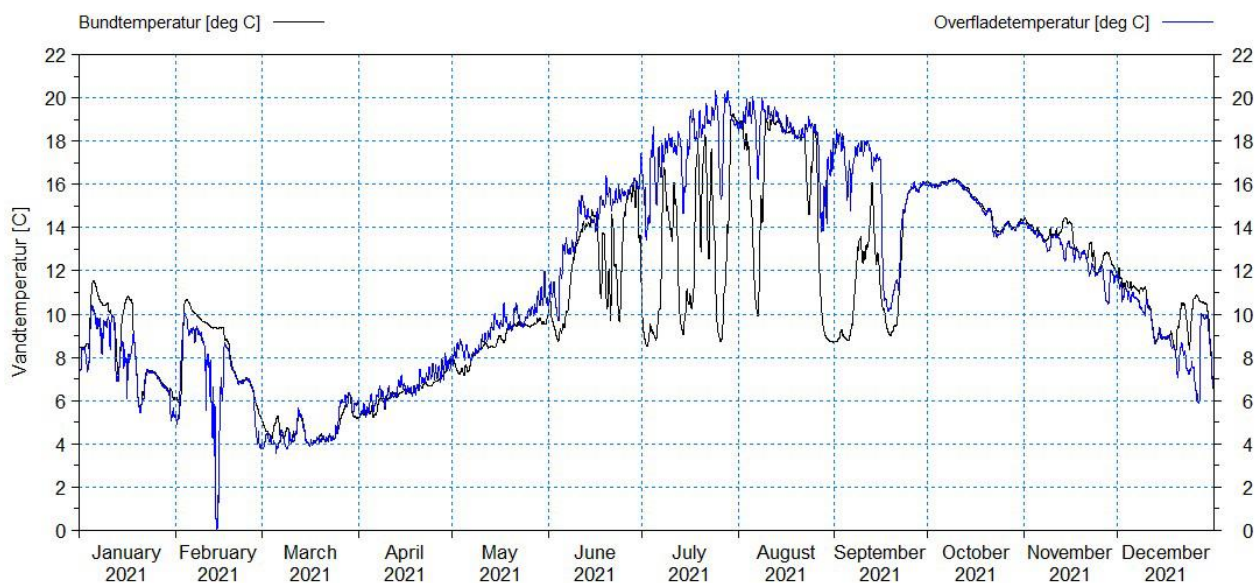
Figur 5-1 Model batymetri med fremtidig vestmole forlængelse uden uddybning.



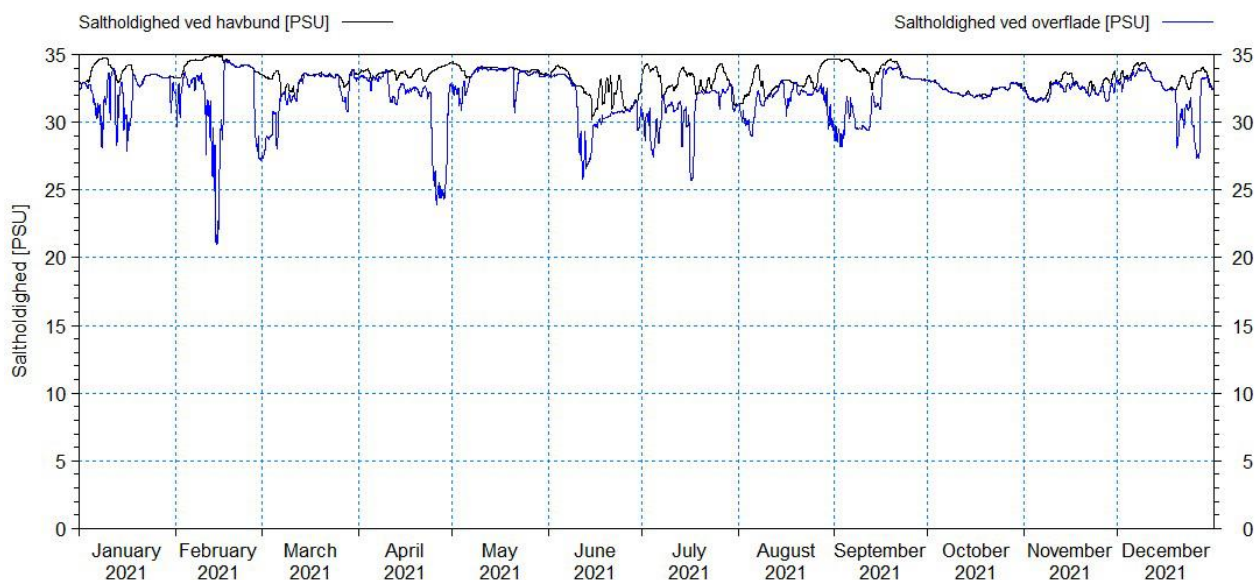
Figur 5-2 Model beregningsnet med fremtidig vestmole forlængelse.

5.2 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 5-3, 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, som kan ses i Figur 5-4, men set over hele året er den gennemsnitlige forskel ved top og bund kun 1,35 PSU og derfor ikke signifikant sammenholdt med tidevandsudvekslingen.



Figur 5-3 Sammenligning af UKNS2 modelleret vandtemperatur ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.



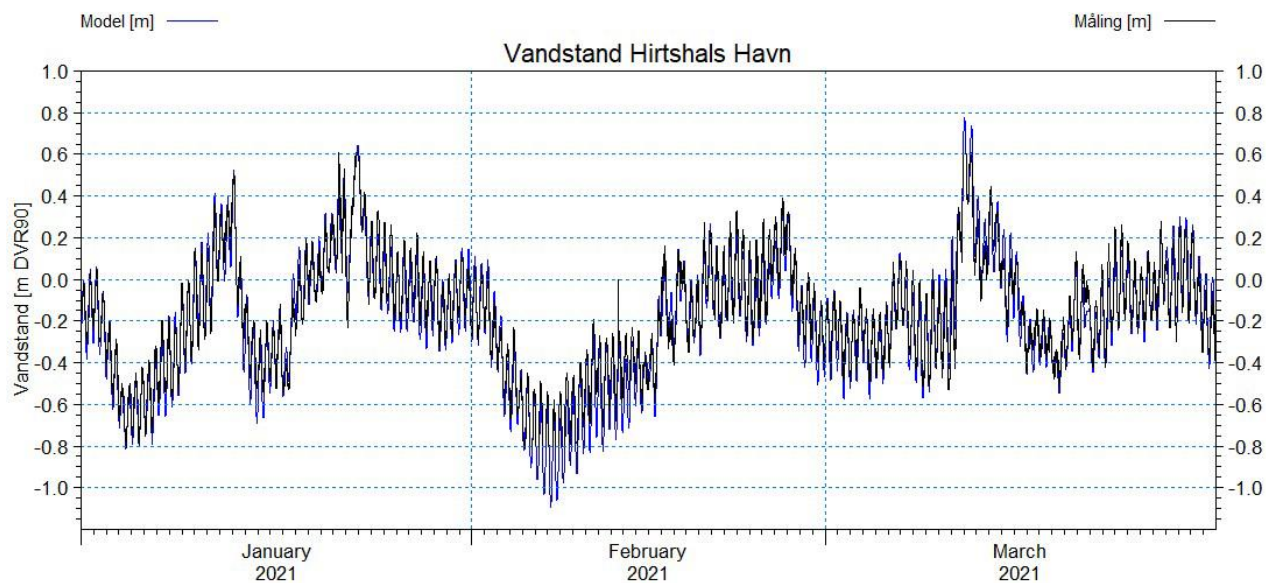
Figur 5-4 Sammenligning af UKNS2 modelleret saltholdighed ved overflade og havbund på 20 meter vand nord for Hirtshals Havn.

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.

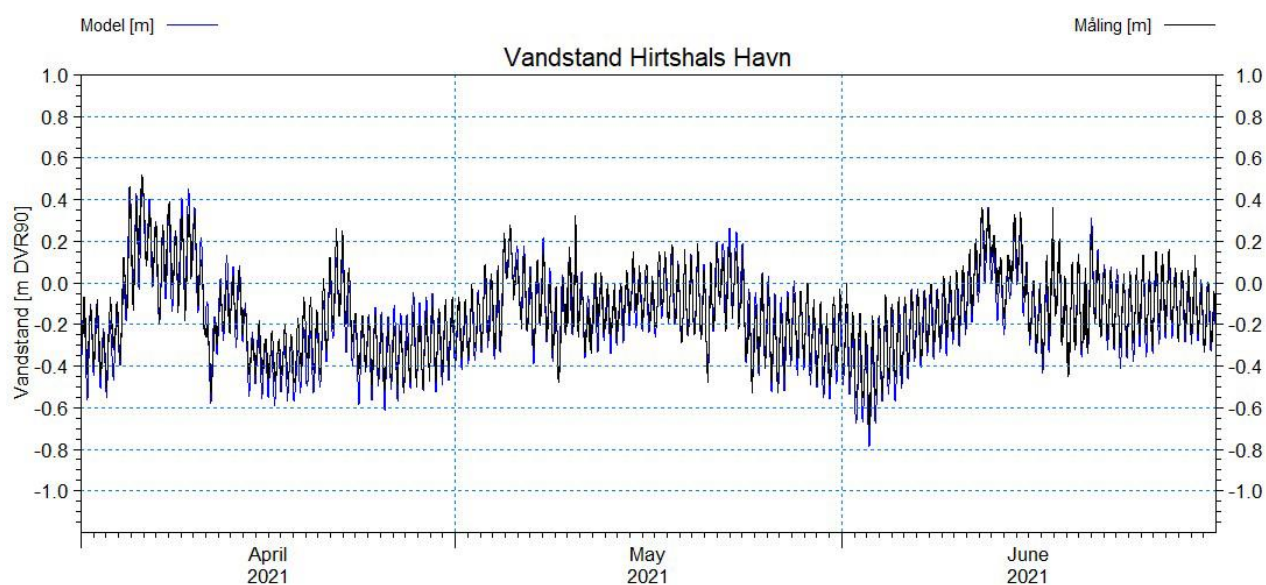
På de tre åbne modelrande, benyttes en Flather randbetingelse, ref. /7/, som påtrykker et hastighedsfelt i det vertikale plan og vandspejlsniveauet langs med randen. Parallelt med HD-modellen afvikles en SW bølgemodel, hvorfra bølgerens beregnede reaktionskraft påtrykkes, sådan at effekten af bølgedrevne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

5.3 Lokal verifikation af hydrodynamisk model

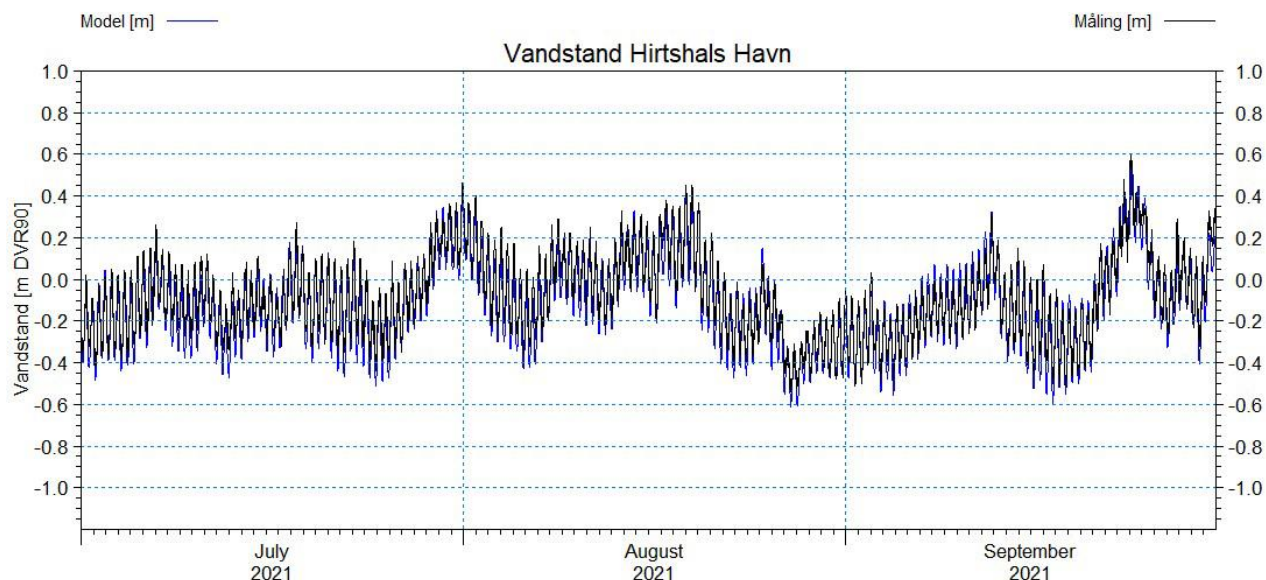
Det er begrænset, hvad der er af data til at verificere den lokale HD-model, men da vandudvekslingen gennem havnemundingen er styret af vandstandsvariationen inde i havnen, hvor der løbende foretages målinger af vandstand, er det muligt at sikre, at modellens opførsel er i overensstemmelse med det observerede. I Figur 5-5 til Figur 5-8 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.



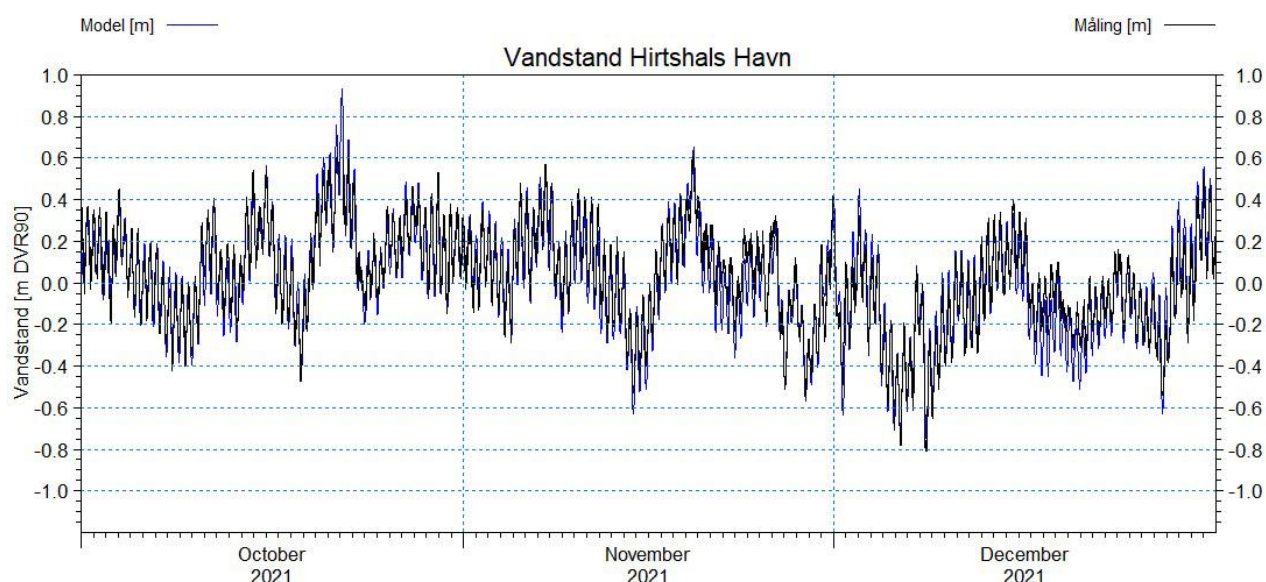
Figur 5-5 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 1. kvartal 2021.



Figur 5-6 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 2. kvartal 2021.



Figur 5-7 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 3. kvartal 2021.



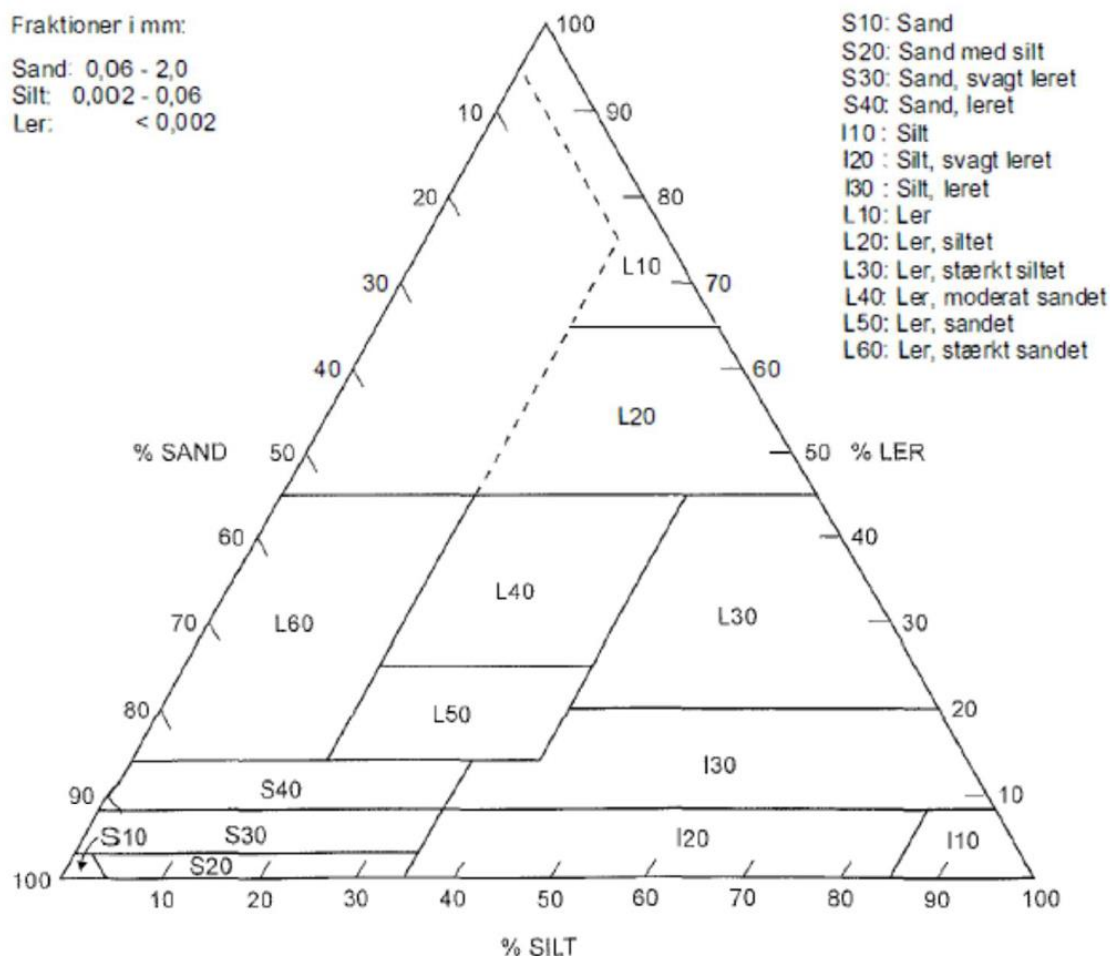
Figur 5-8 Sammenligning af målt og modelleret vandstand 4. kvartal 2021.

Ud over tidevandspåvirkningen er vandstanden særligt i vinterhalvåret også påvirket af metrologisk drevne vandstandsvariationer. Det ses, at modellen giver en god repræsentation af disse variationer.

5.4 Gravemængder og sedimenttypernes sammensætning

Den graveplan der er repræsenteret i modelberegningerne antager, at det samlede volumen for uddybningen er 130,000 m³.

Med undtagelse af det postglaciale sand er informationen om kornsammensætningen 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 5-9.



Figur 5-9 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/. Den antagne sammensætning af de tre jordtyper er angivet i Tabel 5-1.

Tabel 5-1 Antagelser om sedimenttypernes sammensætning.

Sedimenttype	Lerindhold %	Siltindhold %	Sandindhold %
Sandmaterialer	2	10	88
Siltmaterialer	5	80	15
Lermaterialer	50	45	5

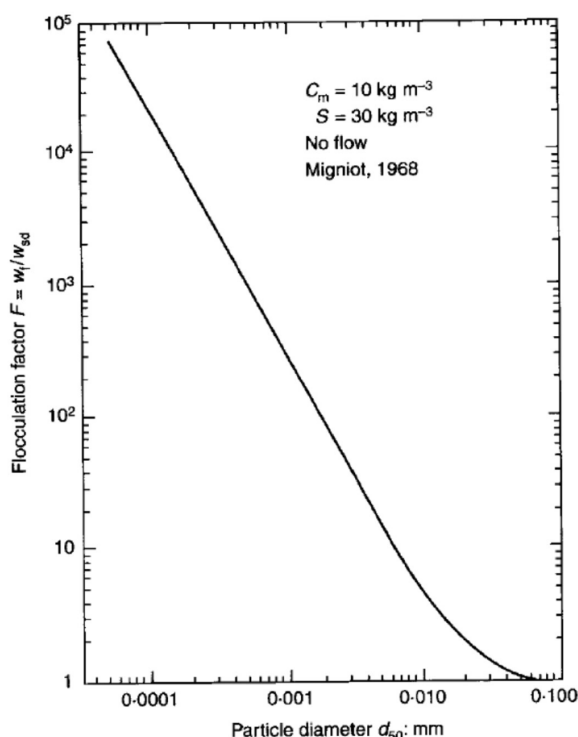
De tilgængelige data fra borekerner og prøver taget med kajkrør beskrevet i sektion 4.3 (ref. /2/ og /3/) indikerer, at materialet i uddybningsområdet ved vestmolen kan karakteriseres som sand. I modellen er derfor anvendt en sedimentsammensætning, der svarer til den, der er angivet for sandmaterialer i Tabel 5-1.

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 5-2 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

5-10. 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 5-2 Faldhastigheder opgjort på sedimenttype.

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



Figur 5-10 Eksempel på flokkulationsfaktor som funktion af partikeldiameter, ref. /12/.

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 5-3 angivne tørdensiteter. Tørdensiteterne indikerer at det postglaciale sand er løst aflejret, mens silt og ler er kompakt aflejret og med en kohæsiv struktur.

Tabel 5-3 Antaget tørdensitet for de 3 sedimenttyper.

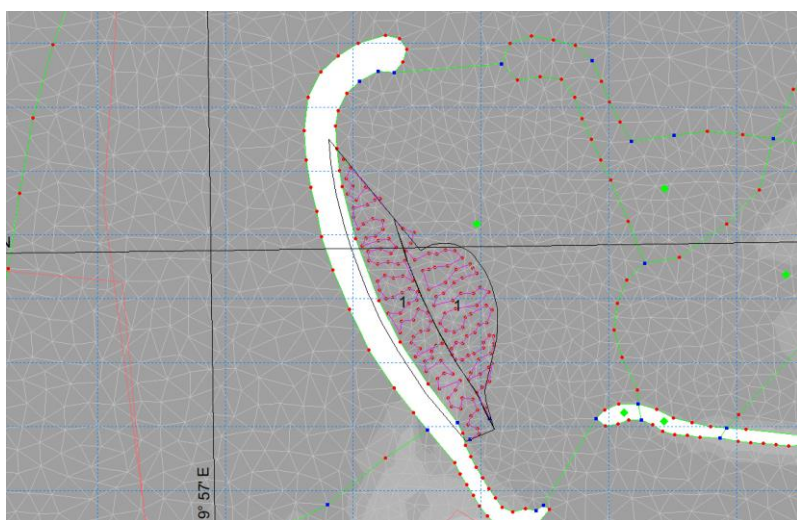
Sedimenttype	Ler	Silt	Finsand
Tørdensitet [kg/m ³]	1.775	1.775	1.285

5.5 Graveplan

Sedimentspredningen i forbindelse med uddybning af indsejlingen ved vestmolens forlængelse kan begrænses ved at vente med, at udføre gravearbejderne til vestmolen er blevet etableret. Denne fremgangsmåde sikrer, at gravespildet primært frigives i det afskærmet havneområde. De udførte simuleringer er derfor udført under antagelse af, at gravearbejdet udføres efter, at vestmolen er forlænget.

Beregningsmodellen er opsat under antagelse af, at gravearbejdet vil blive udført med en sandsuger (TSHD), hvor overløb er tilladt, og at det gravede materiale vil blive placeret på klappladsen ca. 2 km nord for havnen. Desuden antages det, at TSHD'en har en in-situ gravekapacitet på 850 m³, og hver gravecyklus (inklusive klapning ved klappladsen) tager omkring 2,3 timer og en produktionsrate af 370 m³ per time. Disse specifikationer svarer nogenlunde til det oprensningsarbejde, der tidligere er udført i indsejlingsområdet.

Med henblik på at sikre konservative estimater er den simulerede graveplan konstrueret under antagelse af 24/7 drift. Dette giver en arbejdsperiode på omkring 15 dage. Model simuleringen dækker en periode på 20 dage for også at medtage, hvordan sedimentskyerne spreder sig i dagene efter gravearbejdet er afsluttet. Området langs vestmolen, der skal uddybes, er vist i Figur 5-11. Graveskibets antagne rute er vist med det lyserøde linjeforløb i uddybningsområdet.



Figur 5-11 Illustration af beregningsnettet omkring den forlængede vestmole

Den sorte polygon angiver uddybningsområdet og den lyserøde linje angiver sandsugers rute.

Det antages, at 20% af finpartiklerne (ler og silt) og 5% af sandet vil blive spildt og at dette vil fordeles ligeligt over vandsøjlen. Den samlede mængde spildt materiale vil dermed udgøre 12.888,2 tons svarende til 7,03 % af den samlede uddybningsmængde.

6 Resultater

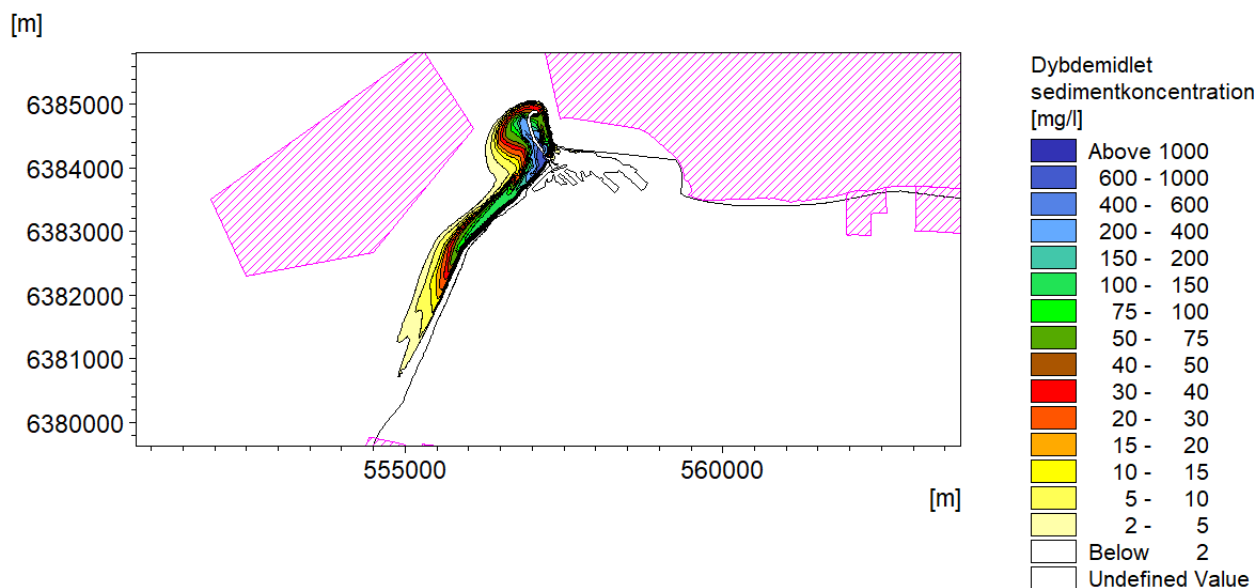
Det sediment der spildes under uddybningsarbejdet spredes hovedsageligt på grund af den kyststrøm, der strømmer på tværs af indsejlingen (parallelt med kysten). I perioder med vestlige vinde vil denne kyststrøm være rettet mod øst og i perioder med østlige vinde vil den være rettet mod vest.

For at tage højde for den mulige variation i vejrforholdene under gravearbejdet er gravespildet simuleret for tre forskellige perioder, som hver især er domineret af henholdsvis kraftige vestlige vinde, kraftige østlige vinde og relativt rolige vindforhold. Da gravearbejdet ikke kan udføres i meget hårdt vejr, er alle tre perioder dog valgt således, at den signifikante bølgehøjde foran havnen ikke overstiger 1,5-2 meter på noget tidspunkt i de 3 perioder.

Der er overordnet set to måder, hvorpå gravespildet kan påvirke det omgivende havmiljø. Dels ved at danne gravefaner (skyer) af sediment der er opslæmmet i vandsøjlen og dels ved at sedimentet aflejres på havbunden. For at adressere begge disse aspekter præsenteres både resultater for beregnede sedimentkoncentrationer og for mængden af sediment, der er aflejret på bunden.

6.1 Perioden med dominerende østlige vinde

I Figur 6-1 er der vist et eksempel på et øjeblikbillede af sedimentkoncentrationer hvor gravespildsfanen føres mod sydvest. Natura 2000 områder er indikeret med lyserød skravering.

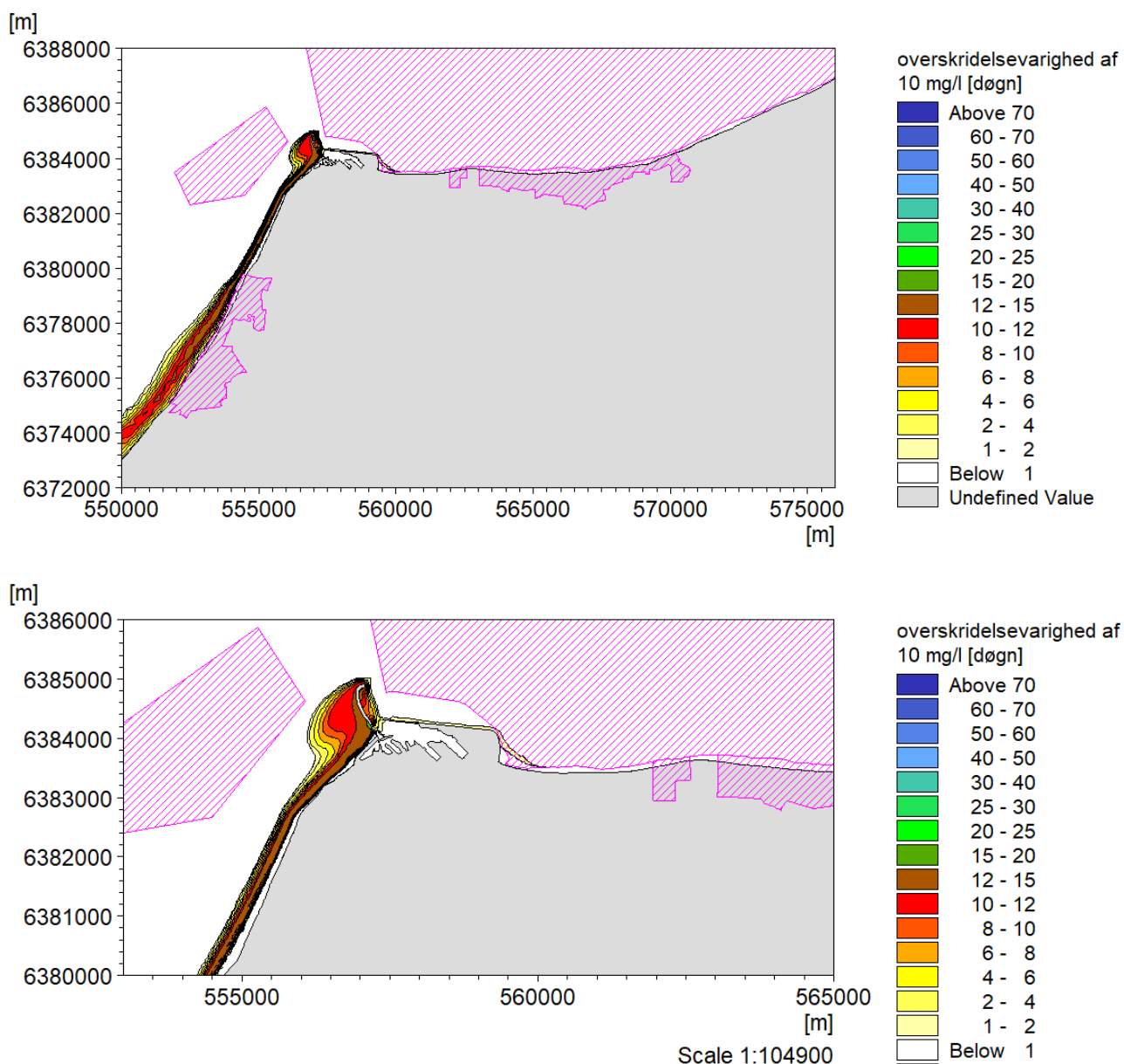


Figur 6-1 Øjeblikbillede af sedimentfaner under en periode med østlige vinde og sydvestgående strøm.

Den samlede påvirkning af sedimentfaner over hele simuleringsperioden er beskrevet ved at beregne den samlede varighed, hvor en given koncentration er overskredet. Dette er gjort for koncentrationer på 10 mg/l (Figur 6-2), 50 mg/l (Figur 6-3) og 100 mg/l (Figur 6-4). Det skal bemærkes, at disse koncentrationer refererer til den gennemsnitlige koncentration over hele vandsøjlen på den givne lokalitet.

Resultaterne viser, at der under gravearbejdet vil være relativt høje sedimentkoncentrationer umiddelbart vest for havnen, samt helt kystnært langs kysten længere mod syd. De vedvarende høje koncentrationer i det kystnære område skyldes bølgepåvirkning, som forhindrer det spildte sediment i at bundfældes. På grund af den hyppige og kraftige påvirkning fra bølger forventes det dog, at der ofte naturligt forekommer høje sedimentkoncentrationer i dette område.

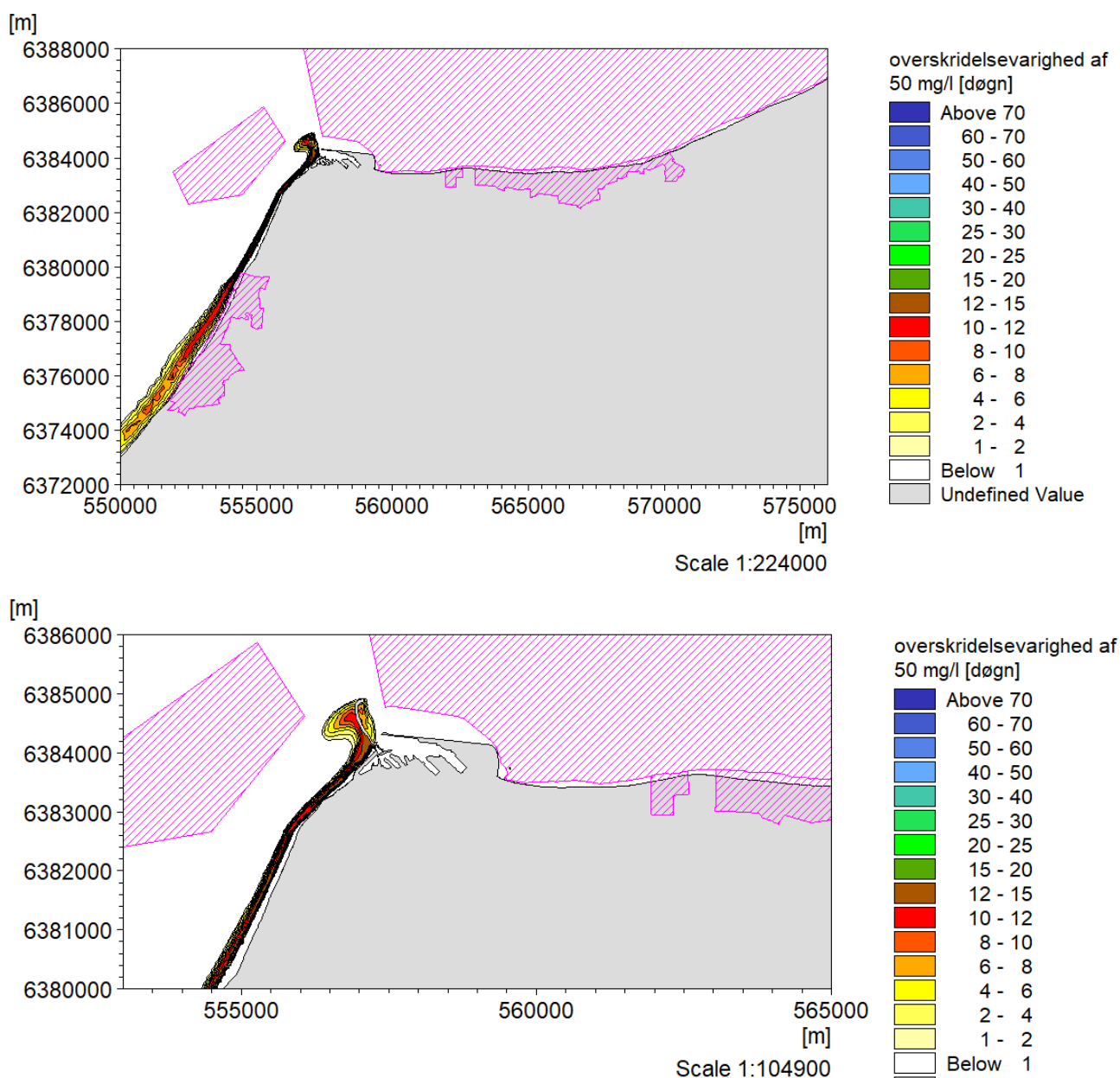
Af Figur 6-2 ses, at i området vest for havnen overskrides en koncentration på 10 mg/l i op til 15 døgn.



Figur 6-2 Varighed for overskridelse af 10 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.

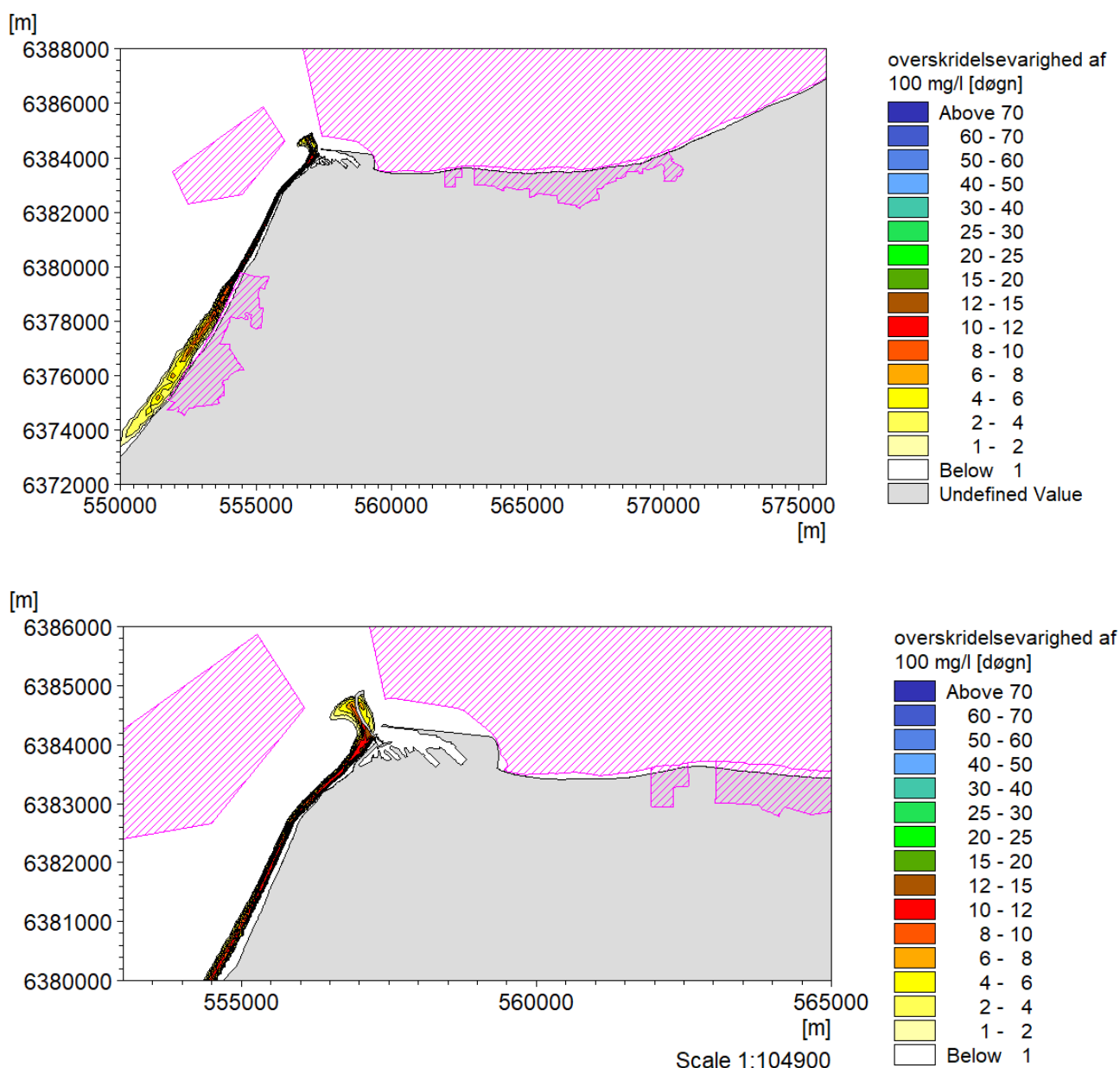
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

Af Figur 6-3 ses, at i visse områder vest for havnen overskrides en koncentration på 50 mg/l i op til 15 døgn svarende til den periode, hvor der graves.



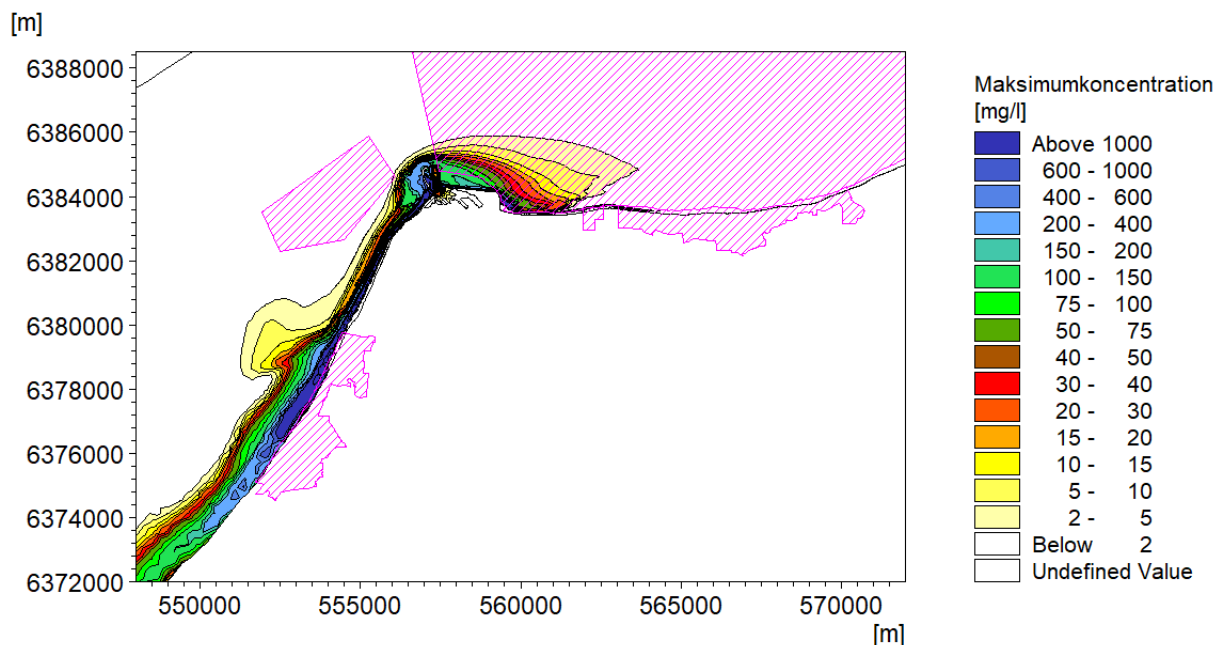
Figur 6-3 Varighed for overskridelse af 50 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

Af Figur 6-4 ses, at i visse områder vest for havnen overskrideres en koncentration på 100 mg/l i op til 10 døgn.



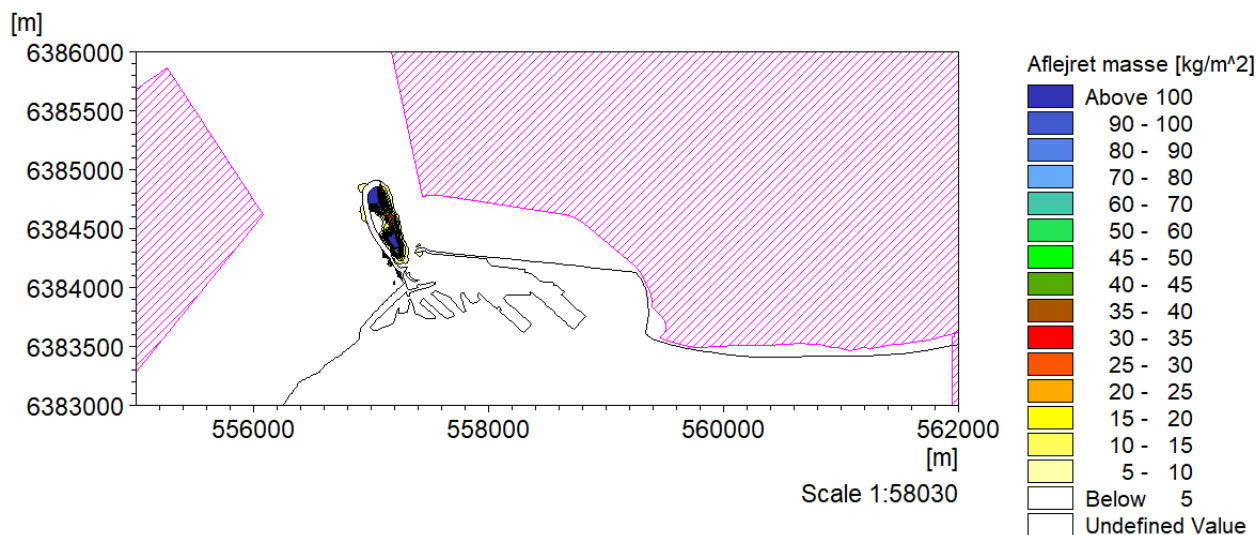
Figur 6-4 Varighed med overskridelse af 100 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

En maksimumkoncentration optræder typisk kun kortvarigt, men kan stadig være af betydning i en vurdering af, hvor stort et område sedimentfanerne påvirker. I området hvor der uddybes, vil der forekomme meget høje sedimentkoncentrationer som følge af den kontinuerle tilførsel og relativt lille spredning. I Figur 6-5 er maksimumkoncentrationen gennem den fulde uddybningsperiode vist ved hjælp af et konturplot. Det ses, at i Natura 2000 området når maksimumkoncentrationen (dybdemidlet) ikke over 75 mg/l.



Figur 6-5 Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet for perioden med østlige vinde.

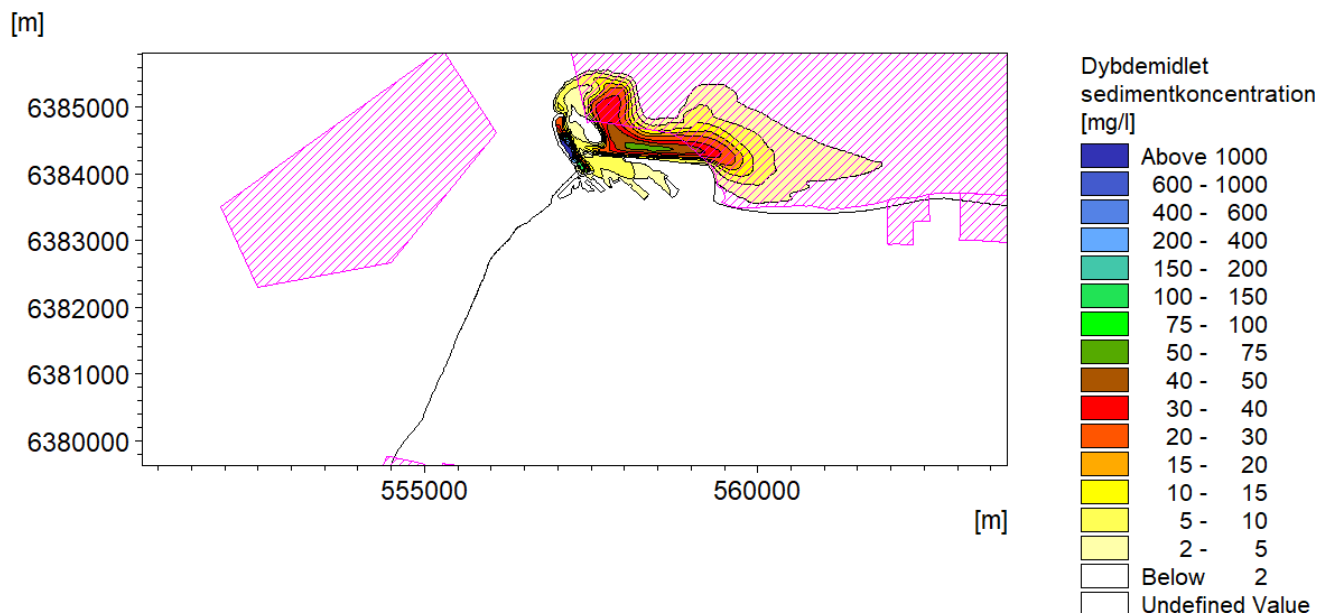
Langt størstedelen af gravespildet aflejres lokalt i og omkring uddybningsområdet. Det sediment der spredes med kyststrømmen transporteres langs med kysten og bliver aflejret over et meget stort område. I Figur 6-6 er der vist et aflejningskort for gravespildet efter uddybningen er afsluttet. I plottet er aflejringen angivet som kg/m^2 . Antages at sedimentet aflejres med en tørhedsitet på 1.000 kg/m^3 , kan den anvendte enhed ækvivaleres med mm således at 10 kg/m^2 svarer til et 1 cm tykt lag af aflejret sediment. Det ses derved, at for dette vejrscenarie er aflejringstykkelserne efter uddybningsarbejdernes ophør mindre end 5 mm ($\sim 5 \text{ kg/m}^2$) i Natura 2000 området.



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

6.2 Perioden med dominerende vestlige vinde

I Figur 6-7 er der vist et eksempel på et øjebliksbillede af sedimentkoncentrationer, hvor gravespildsfanen føres mod øst. Natura 2000 områder er indikeret med lyserød skravering.

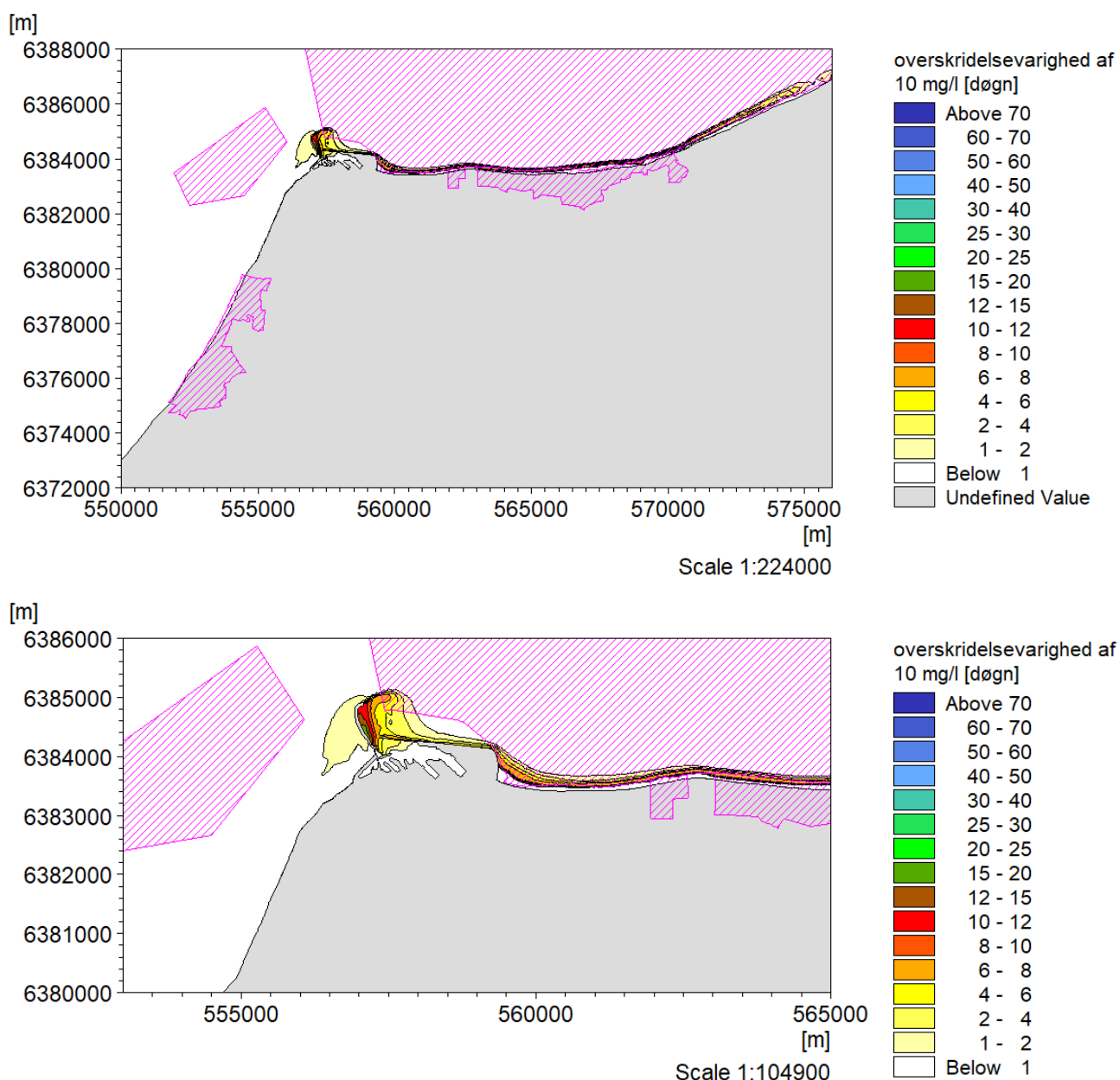


Figur 6-7 Øjebliksbillede af sedimentfane under i en periode med vestlige vinde.

Den samlede påvirkning af sedimentfaner over hele simuleringsperioden er beskrevet ved at beregne den samlede varighed, hvor en given koncentration er overskredet. Dette er gjort for koncentrationer på 10 mg/l (Figur 6-8), 50 mg/l (Figur 6-9) og 100 mg/l (Figur 6-10). Det skal bemærkes, at disse koncentrationer refererer til den gennemsnitlige koncentration over hele vandsøjlen ved en given lokalitet.

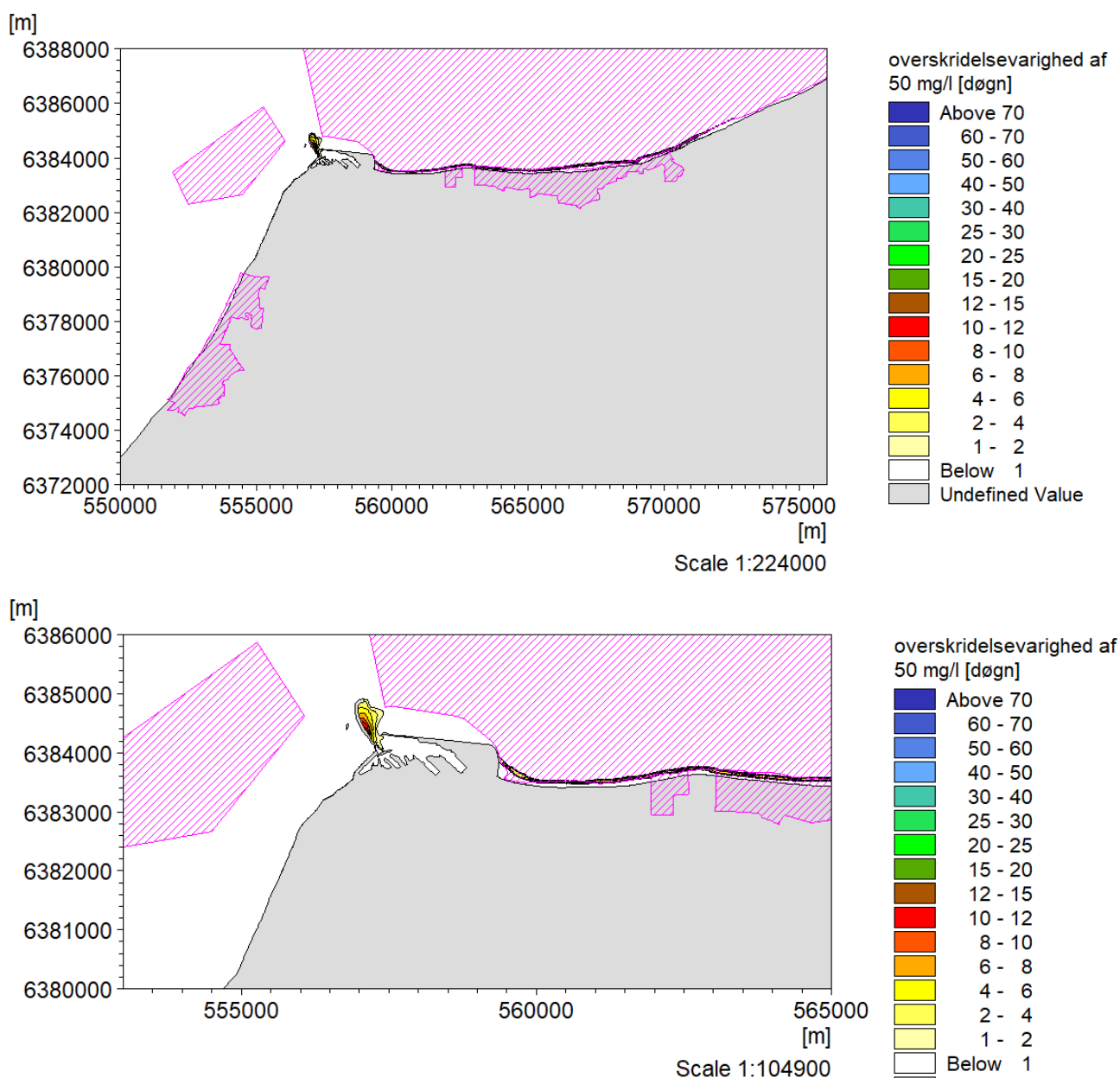
Resultaterne viser, at der under gravearbejdet vil være relativt høje sedimentkoncentrationer helt kystnært langs kysten øst for havnen. De vedvarende høje koncentrationer i det kystnære område skyldes bølgepåvirkning, som forhindrer det spildte sediment i at bundfældes. På grund af den hyppige og kraftige påvirkning fra bølger forventes det dog, at der ofte naturligt forekommer høje sedimentkoncentrationer i dette område.

Af Figur 6-8 ses, at i visse områder øst for havnen overskrides en koncentration på 10 mg/l i op til 8 døgn.



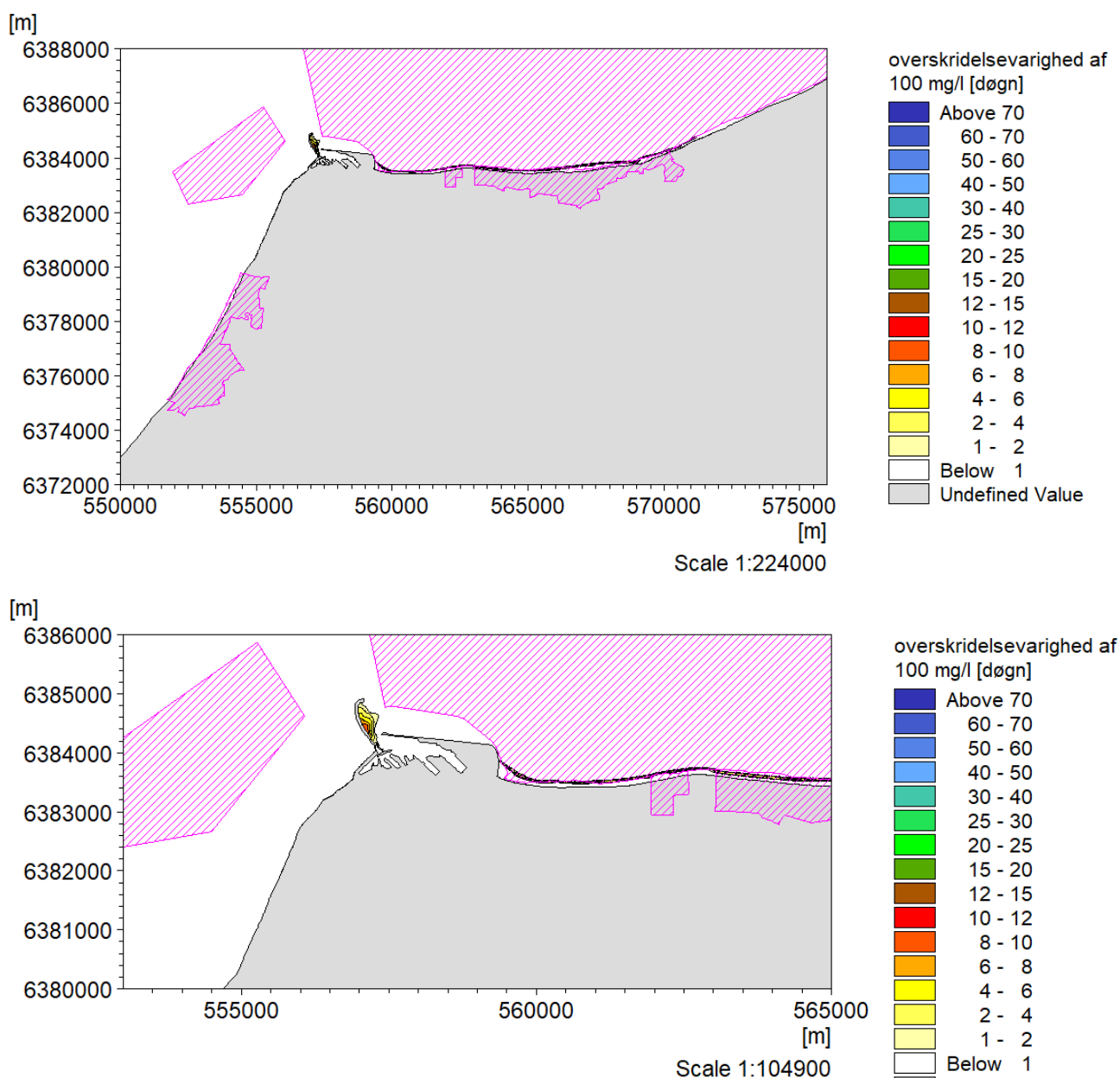
Figur 6-8 Varighed af overskridelse af 10 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

Af Figur 6-9 ses, at i visse områder øst for havnen overskrides en koncentration på 50 mg/l i op til 4 døgn.



Figur 6-9 Varighed for overskridelse af 50 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

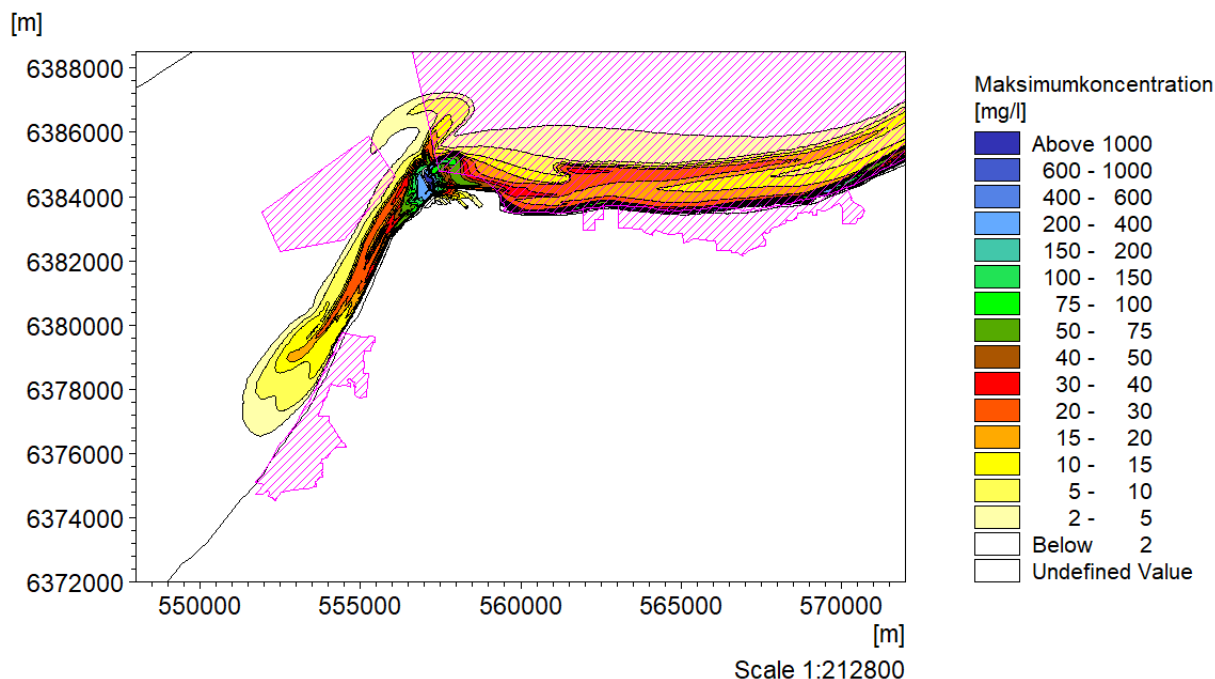
Af Figur 6-10 ses, at i visse områder øst for havnen overskrideres en koncentration på 100 mg/l i op til 2 døgn.



Figur 6-10 Varighed af overskridelse af 100 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.

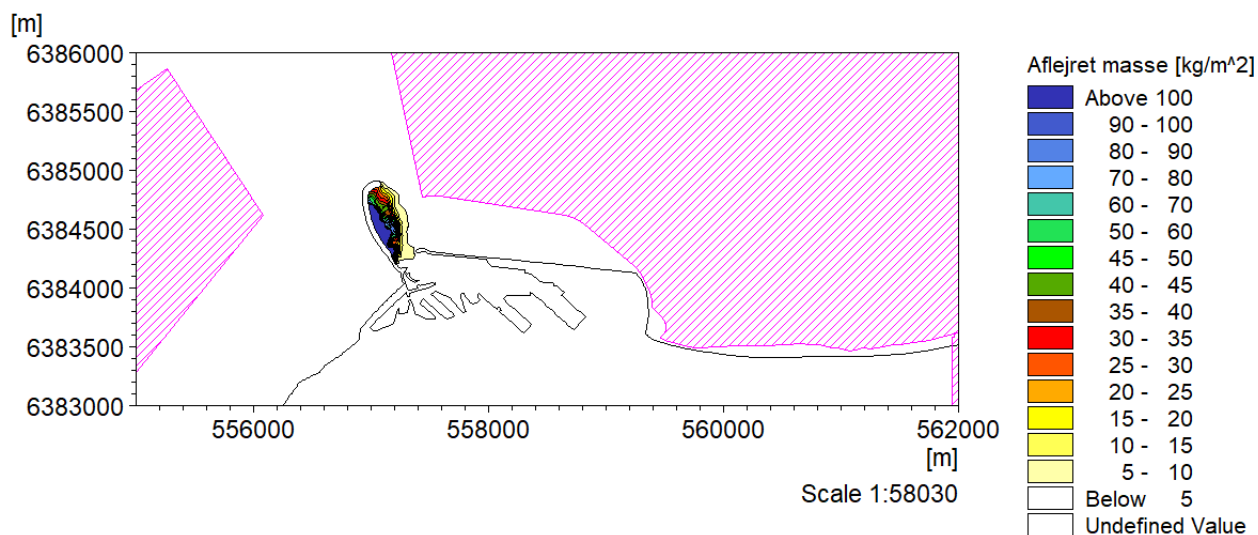
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

I Figur 6-11 er maksimumkoncentrationen gennem den fulde uddybningsperiode vist ved hjælp af et konturplot. Det ses, at i Natura 2000 området når maksimumkoncentrationen (dybdemidlet) ikke over 40 mg/l.



Figur 6-11 Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet for vejrsценariet med dominerende vestlige vinde.

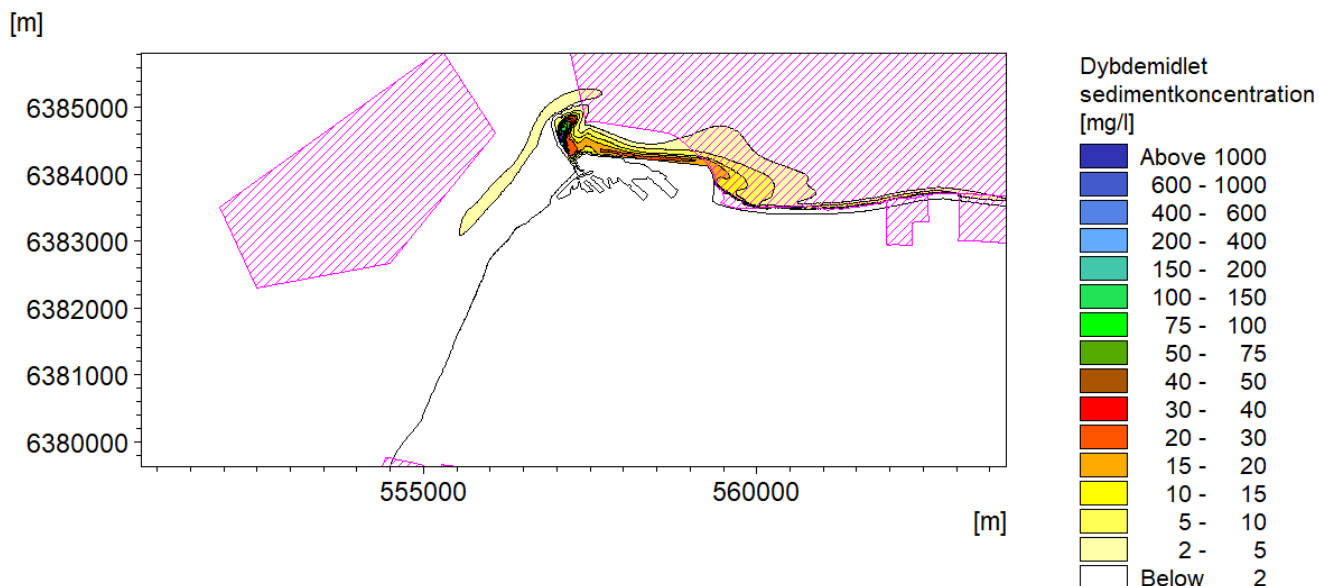
Langt størstedelen af gravespildet aflejres lokalt i området på den nordlige klappads. Uden for havnemundingen fører strømmen gravespildet langs med kysten, således det i sidste ende bliver aflejret og fordelt over et meget stort område. I Figur 6-12 er der vist et aflejringsskema for gravespildet efter uddybningen er afsluttet. Det ses, at aflejringstykkelserne efter uddybningsarbejdernes ophør er mindre end 5 mm (~5 kg/m²) i Natura 2000 området.



Figur 6-12 Aflejringsskema for gravespild under vejrsценariet med dominerende vestlige vinde. Enheden 1 kg/m² kan lidt forsimpelt ækvivaleres med 1 mm.

6.3 Perioden med svage vinde fra skiftende retninger

I Figur 6-13 er der vist et eksempel på et øjebliksbillede af sedimentkoncentrationer hvor gravespildsfanen føres mod begge retninger. Natura 2000 områder er indikeret med lyserød skravering.

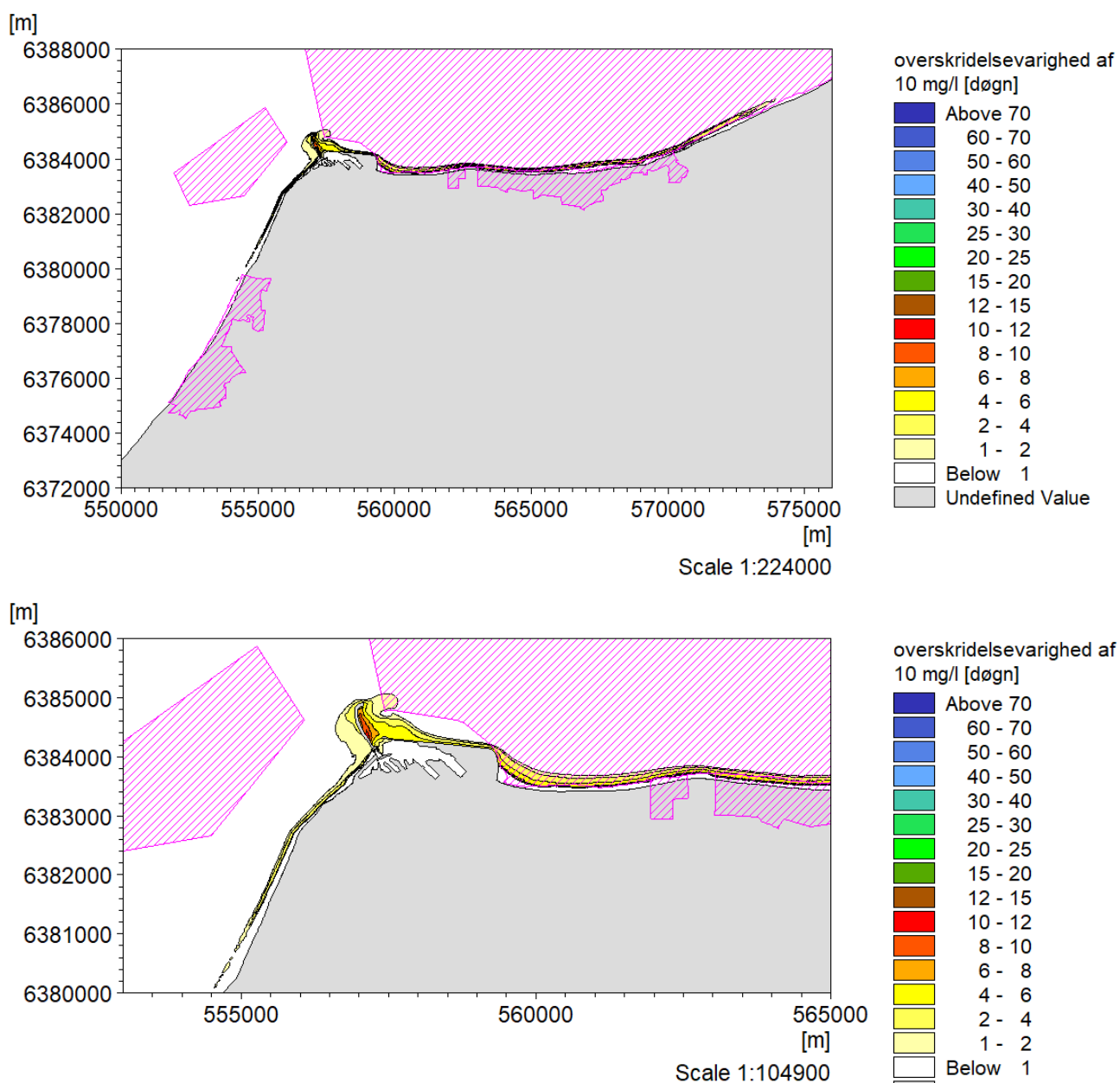


Figur 6-13 Øjebliksbillede af sedimentfane under i perioden med relativt svage vinde.

Den samlede påvirkning af sedimentfaner over hele simuleringsperioden er beskrevet ved at beregne den samlede varighed, hvor en given koncentration er overskredet. Dette er gjort for koncentrationer på 10 mg/l (Figur 6-14), 50 mg/l (Figur 6-15) og 100 mg/l (Figur 6-16). Det skal bemærkes, at disse koncentrationer refererer til den gennemsnitlige koncentration over hele vandsøjlen ved en given lokalitet.

Resultaterne viser, at der under gravearbejdet vil være relativt høje sedimentkoncentrationer helt kystnært langs kysten øst og vest for havnen. De vedvarende høje koncentrationer i det kystnære område skyldes bølgepåvirkning, som forhindrer det spildte sediment i at bundfældes. På grund af den hyppige og kraftige påvirkning fra bølger forventes det dog, at der ofte naturligt forekommer høje sedimentkoncentrationer i dette område.

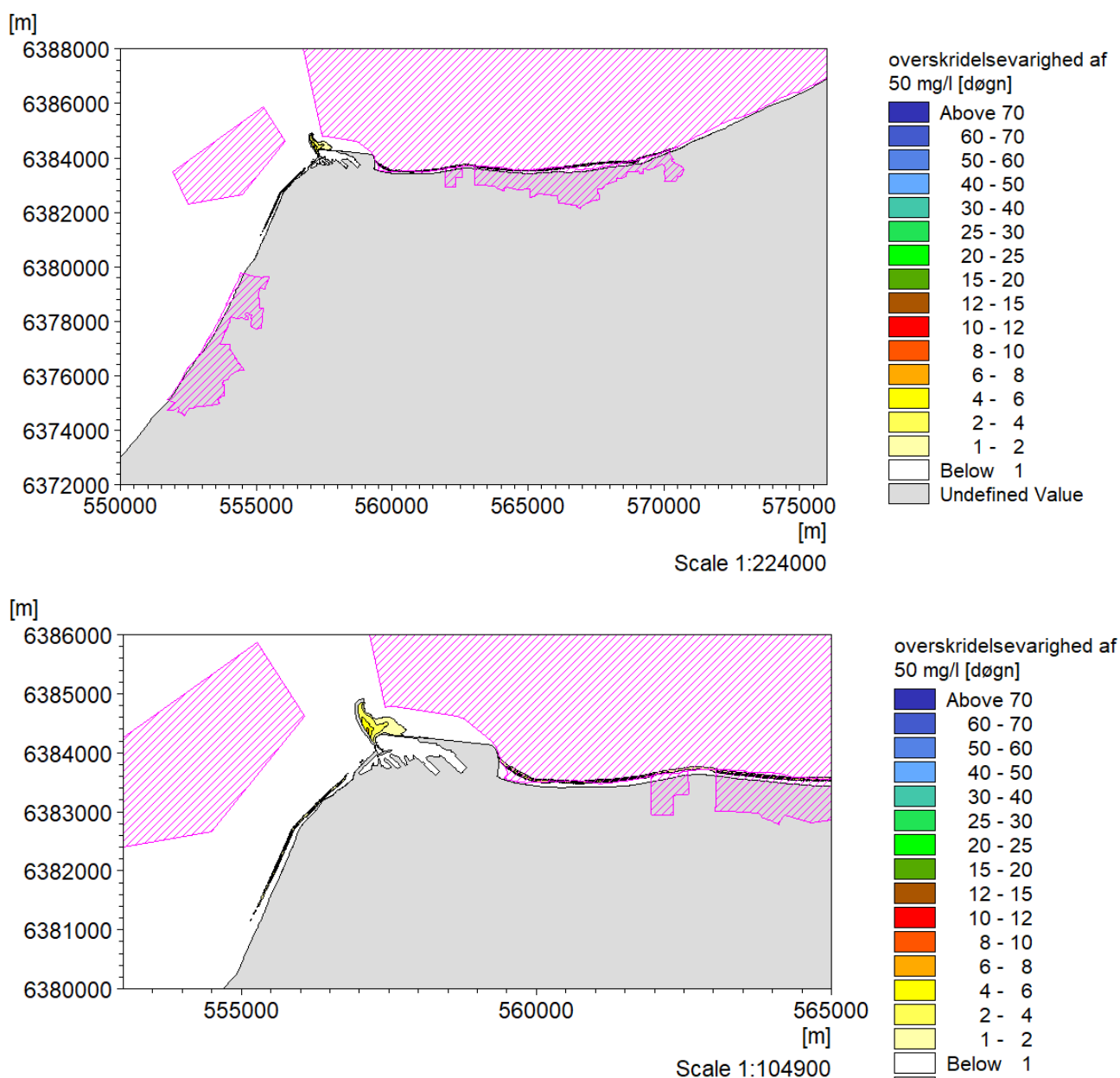
Af Figur 6-14 ses, at i visse områder øst for havnen overskrides en koncentration på 10 mg/l i op til 6 døgn.



Figur 6-14 Varighed med overskridelse af 10 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.

Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

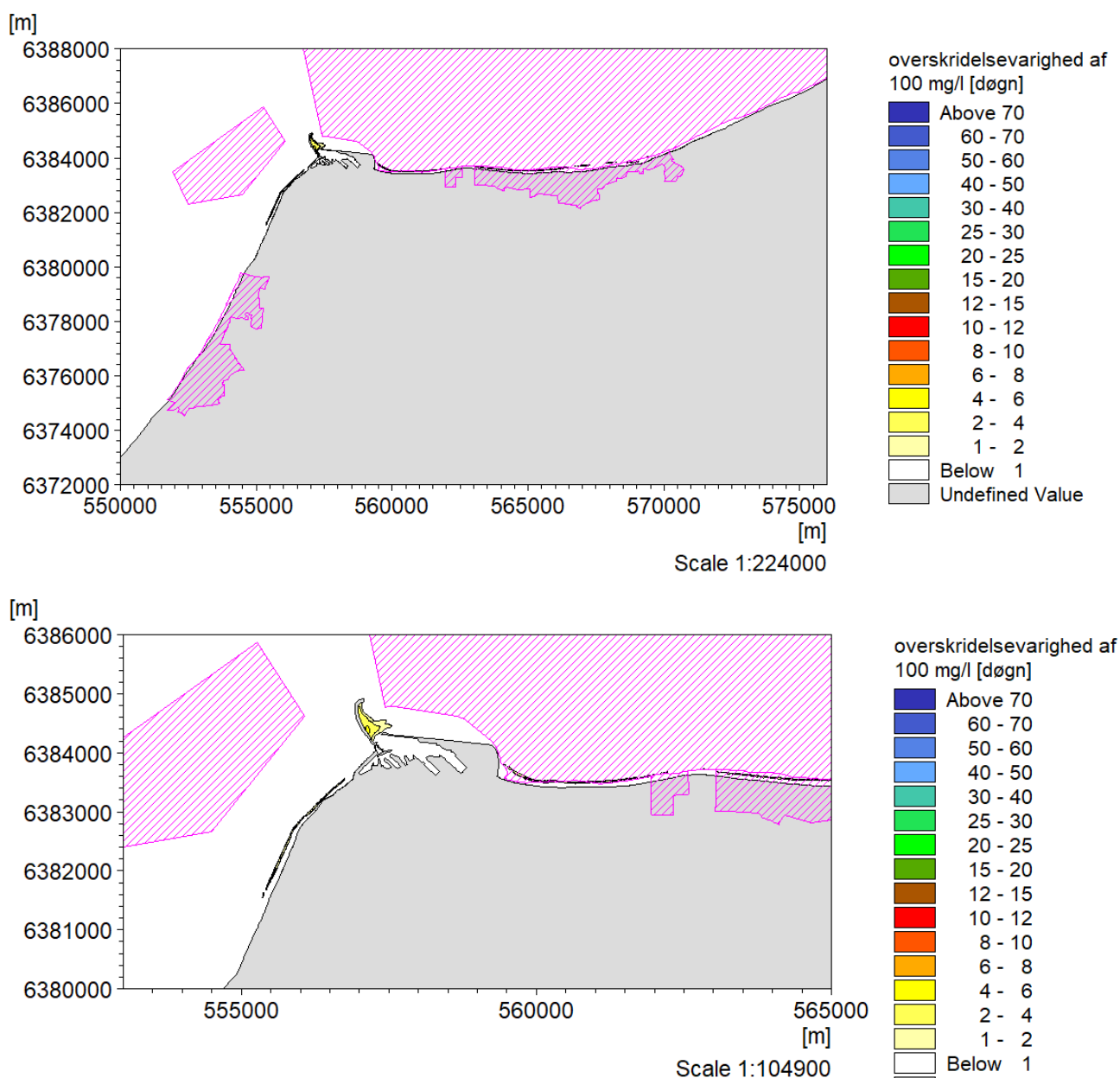
Af Figur 6-15 ses, at i visse områder øst for havnen overskrideres en koncentration på 50 mg/l i op til 2 døgn.



Figur 6-15 Varighed af overskridelse af 50 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.

Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

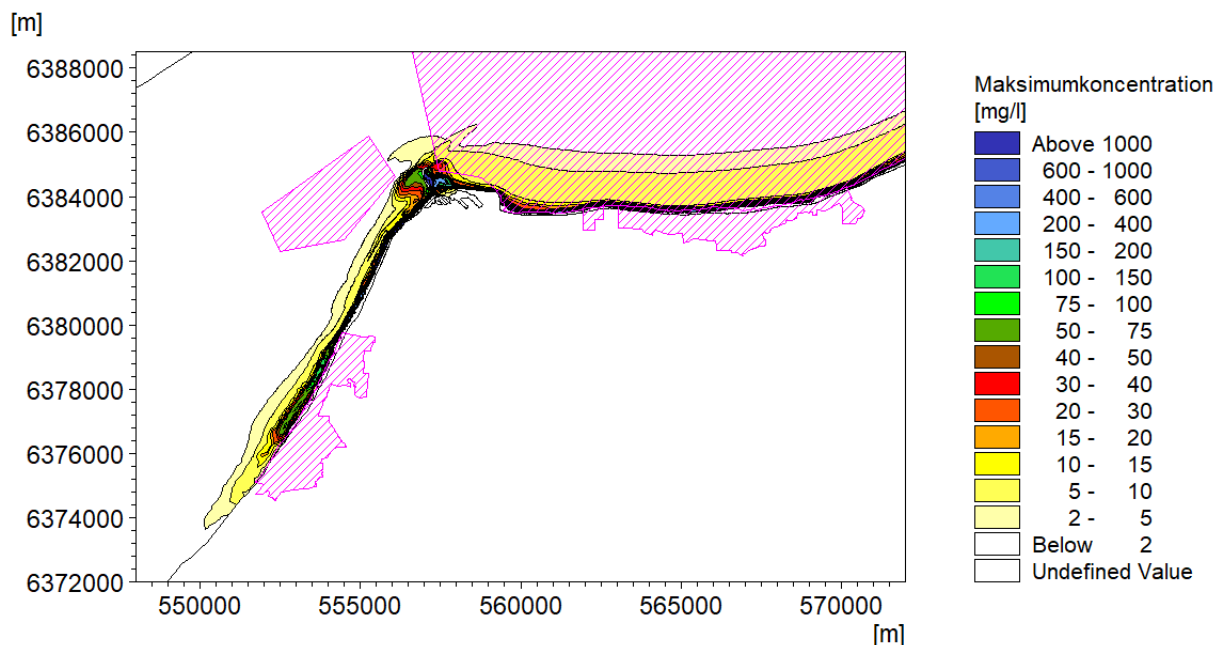
Af Figur 6-16 ses, at i visse områder øst for havnen overskrideres en koncentration på 100 mg/l i op til 2 døgn.



Figur 6-16 Varighed af overskridelse af 100 mg/l i hele modelperioden på 20 dage.

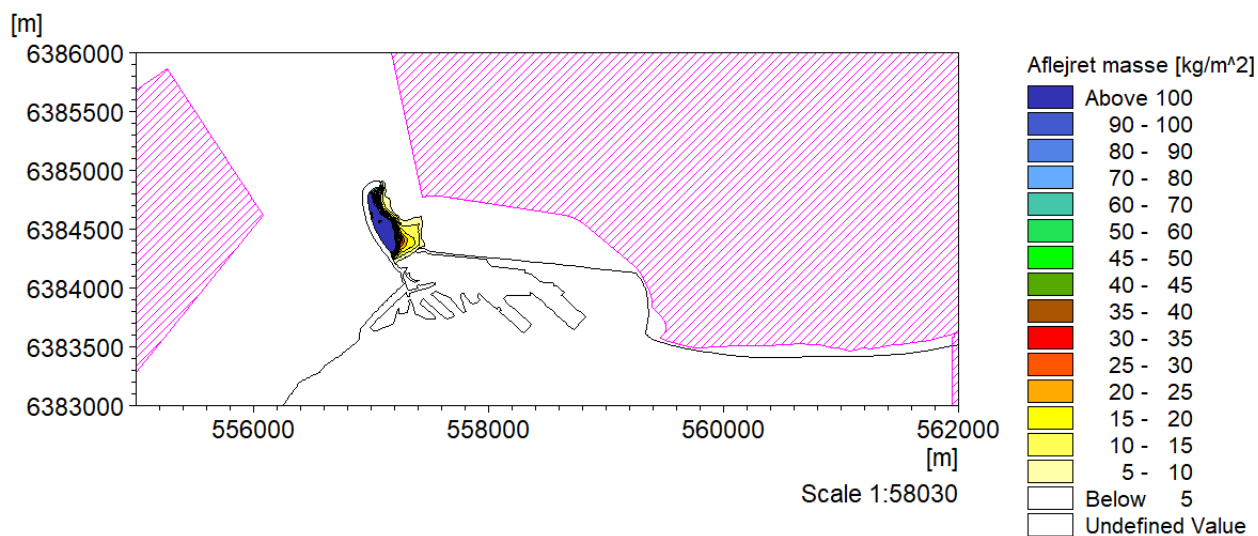
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

I Figur 6-17 er maksimumkoncentrationen gennem den fulde uddybningsperiode vist ved hjælp af et konturplot. Det ses, at i Natura 2000 området når maksimumkoncentrationen (dybdemidlet) ikke over 20 mg/l.



Figur 6-17 Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet for vejrscenariet med relativt rolige vinde.

Langt størstedelen af gravespildet aflejres lokalt i og omkring uddybningsområdet. Det sediment der spredes med kyststrømmen, transporteres langs med kysten og bliver aflejret over et meget stort område. I Figur 6-18 er der vist et aflejningskort for gravespildet efter uddybningen er afsluttet. I plottet er aflejringen angivet som kg/m^2 . Antages at sedimentet aflejres med en tørhedsitet på 1.000 kg/m^3 , kan den anvendte enhed ækvivaleres med mm således at 10 kg/m^2 svarer til et 1 cm tykt lag af aflejret sediment. Det ses derved, at for dette vejrscenarie er aflejringstykkelserne efter uddybningsarbejdernes ophør mindre end 5 mm ($\sim 5 \text{ kg/m}^2$) i Natura 2000 området.



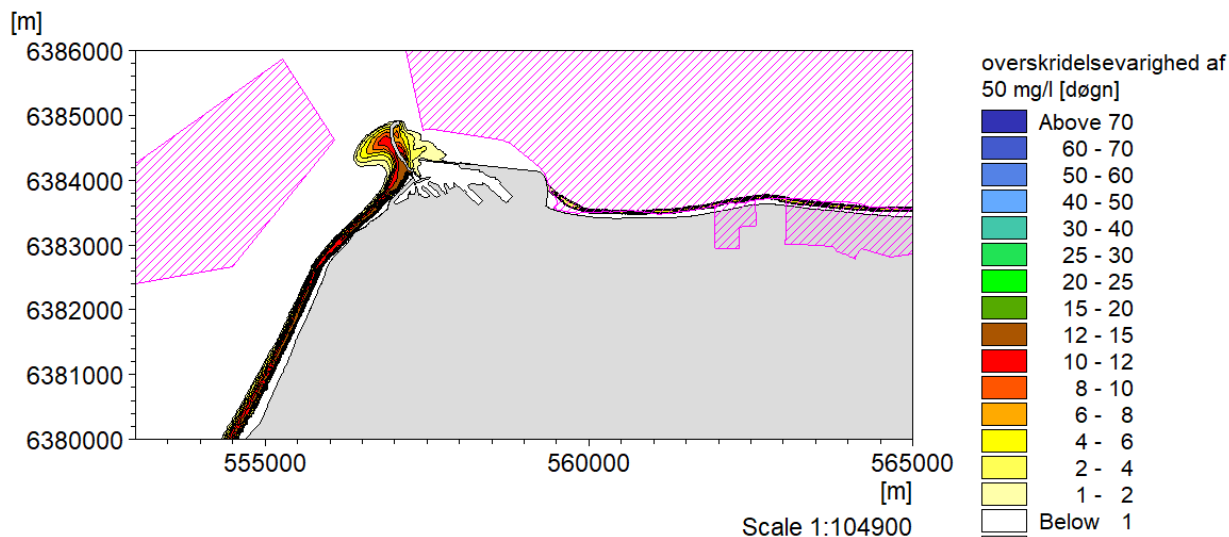
Figur 6-18 Aflejningskort for gravespild i vejrscenariet med rolige vindforhold. Enheden 1 kg/m^2 kan lidt forsimpelt ækvivaleres med 1 mm.

7 Konklusion

Der er i nærværende studie blevet udført simuleringer af det gravespild, der forventes at ske i forbindelse med den planlagte uddybning i indsejlingsområdet øst for den forlængede vestmole ved Hirtshals Havn. I det følgende gives en vurdering af betydningen af de beregnede sedimentkoncentrationer og aflejningsmængder i forhold til den naturlige sedimentdynamik i området.

Uddybning af indsejlingen vil ske efter vestmolen er etableret, hvorved gravespild fra uddybningen udelukkende vil ske i det afskærmede område øst for vestmolen. De relativt rolige strømforhold i dette område bevirker, at en relativt stor andel af det spildte materiale vil aflejres lokalt og ikke spredes udenfor indsejlingsområdet. I forbindelse med uddybningsarbejdet forventes et beregnet spildtab på omkring 13.000 ton havbundssediment, svarende til cirka 7% af den samlede uddybningsmængde. Graveperioden forventes at være ca. 15 dage.

Effekten af spildet er vurderet baseret på modelberegninger for 3 forskellige vejrscenarier, der repræsenterer vestlige og østlige vinde samt rolige forhold. Resultaterne for alle tre scenarier er præsenteret i afsnit 6. Med henblik på at give en konservativ vurdering er sedimentspildet vurderet ved at se på maksimumværdier på tværs af de 3 betragtede vejrscenarier. Figur 7-1 viser den samlede overskridelsesvarighed for 50 mg/l under gravearbejdet (maksimum over de tre scenarier). Lokalt omkring arbejdsområdet, samt helt kystnær sydvest og øst for havnen, ses en kortvarig overskridelse på nogle få døgn over den samlede graveperiode (15 døgn). Der findes ikke data, der beskriver naturligt forekommende suspendede sedimentkoncentrationer, men det vurderes, at en koncentration på 50 mg/l overskrides kystnært under hyppigt forekommende bølgeforhold og lidt længere fra kysten under storme. Den beregnede påvirkning vurderes derfor at være mindre end påvirkningen fra en almindeligt forekommende storm.

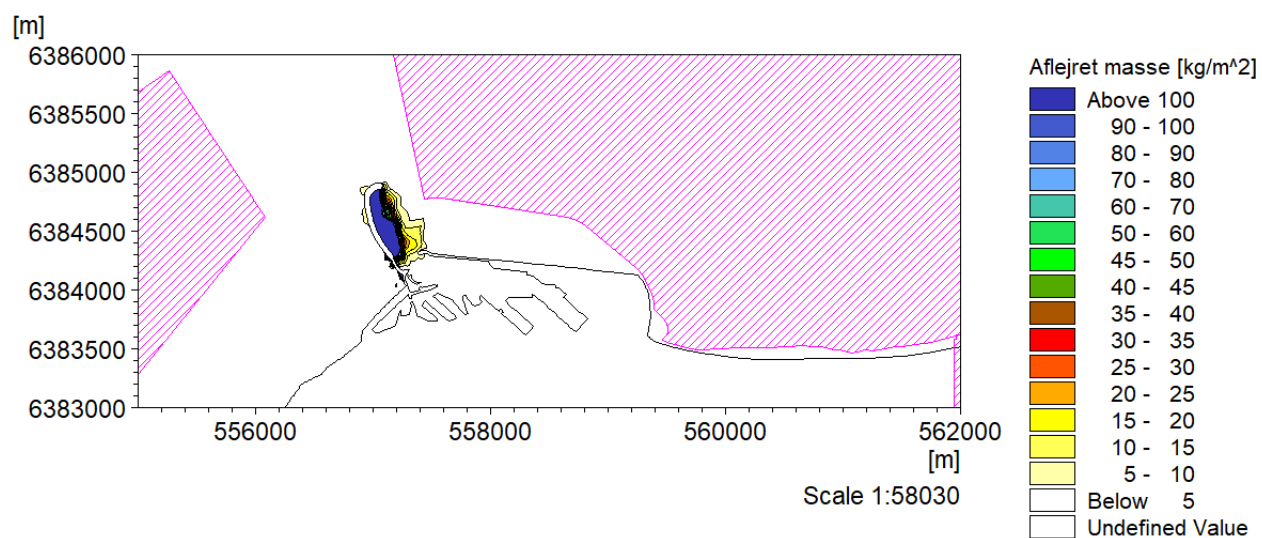


Figur 7-1 Maksimum varighed med overskridelse af 50 mg/l inden for de 3 scenarier.
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.

Størstedelen af gravespildet vil aflejres inden for arbejdsområdet og kun meget lidt materiale vil aflejres udenfor arbejdsområdet (se Figur 7-2). Udenfor arbejdsområdet overstiger den beregnede aflejringstykkel ikke 2 cm. De naturligt forekommende bundændringer i området er af størrelsesordenen 0.1-1 m/år, /14/, og det vurderes derfor, at bundændringer forårsaget af gravespildet vil være ubetydelige i forhold til den naturligt forekommende dynamik.

Det skal bemærkes, at det spildte sediment vil være meget lig det naturligt forekommende sediment i området under stormfulde forhold.

Det vurderes, at både den forøgede aflejring samt sedimentkoncentrationer, som gravearbejdet vil forårsage, vil være ubetydelige i forhold til de naturlige variationer af disse parametre i området.

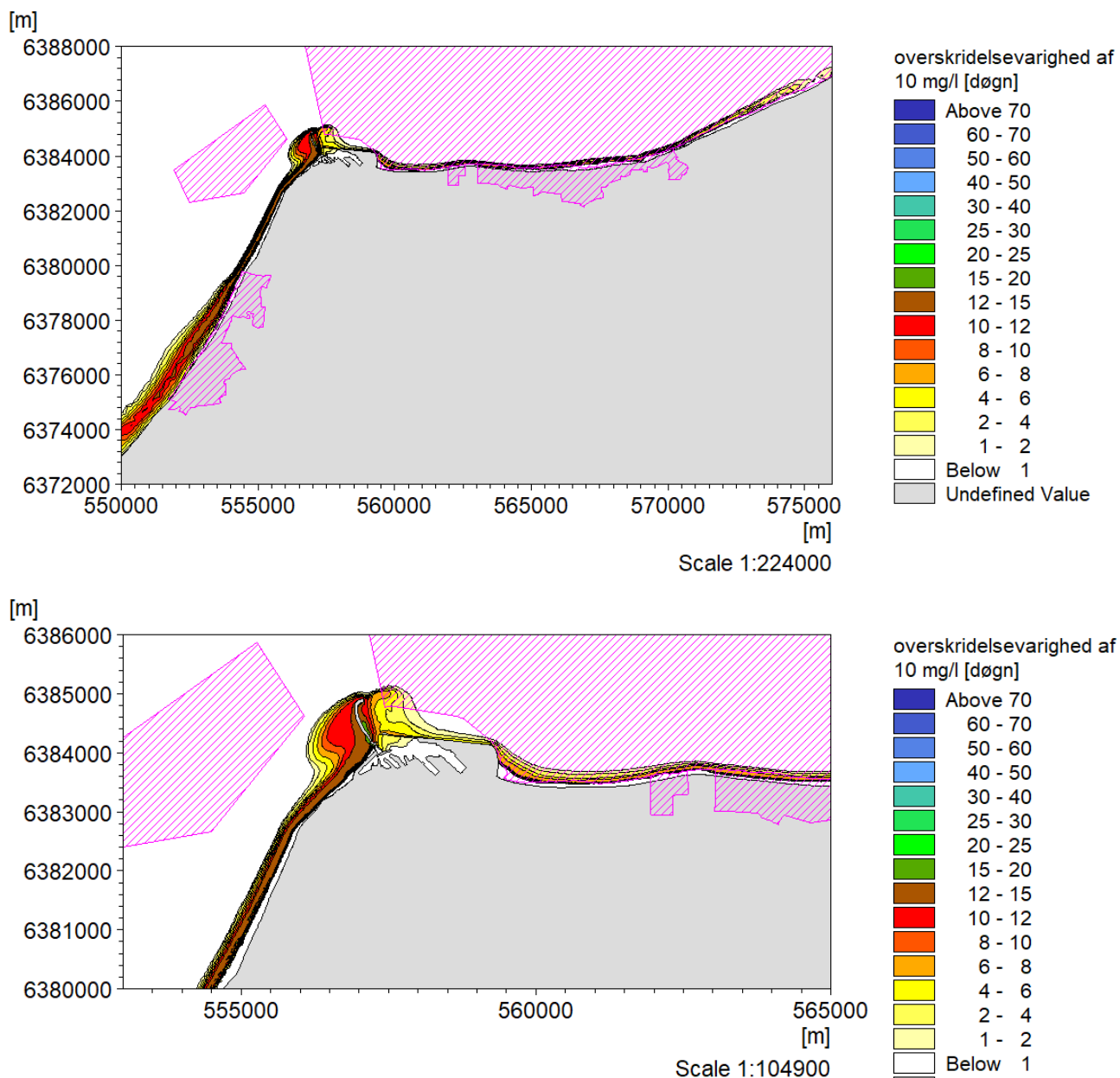


Figur 7-2 Aflejningskort for gravespild; maksimum for de 3 scenarier.

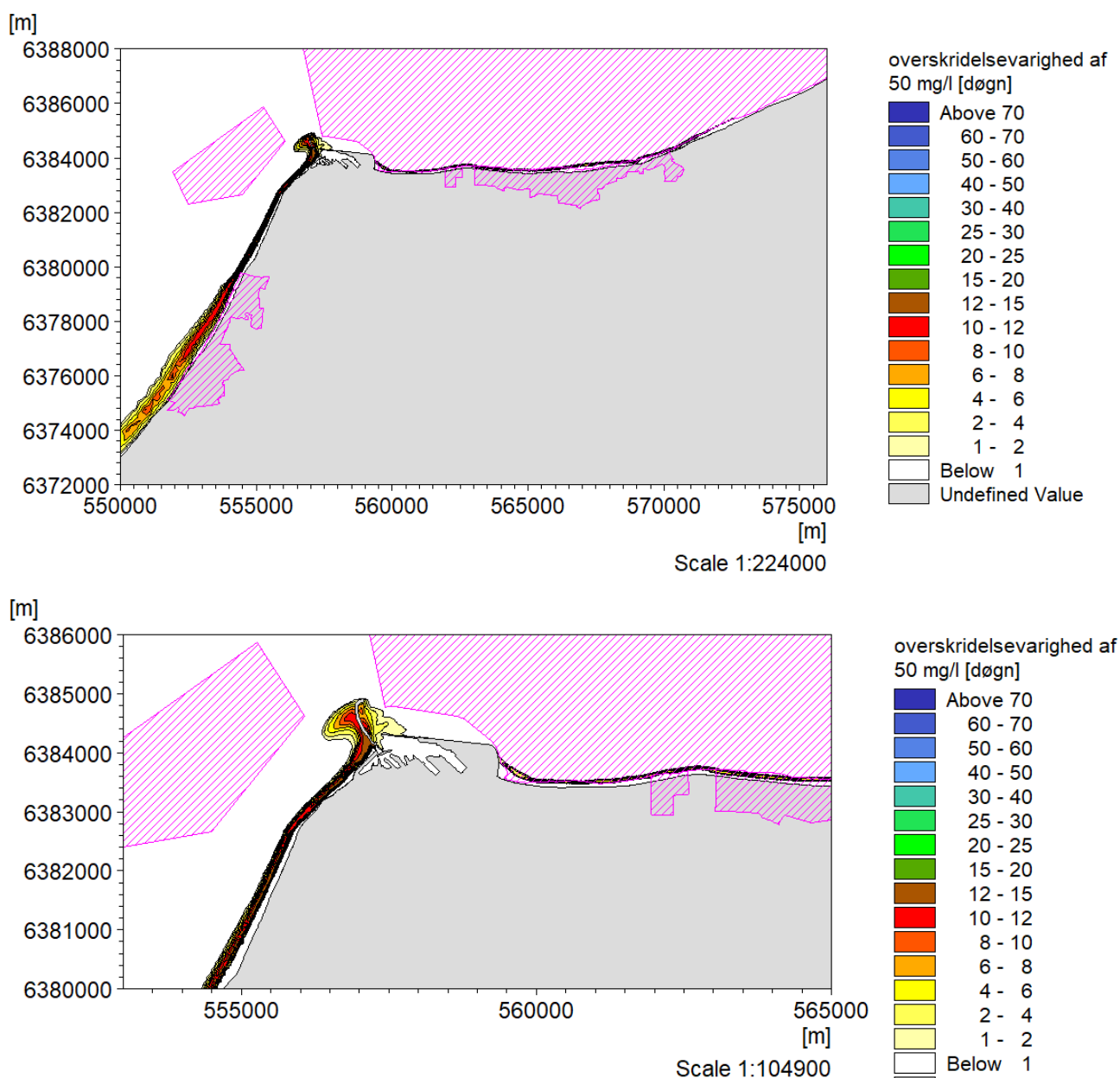
8 Referencer

- /1/ Rambøll, marts 2023. Hirtshals Havn – Udvidelse mod nord. Indvirkning på kystudvikling. Version 2.3.
- /2/ SWECO, 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.
- /15/ DHI (2023). Sedimentspredning ved udvidelse af Hirtshals Havn.

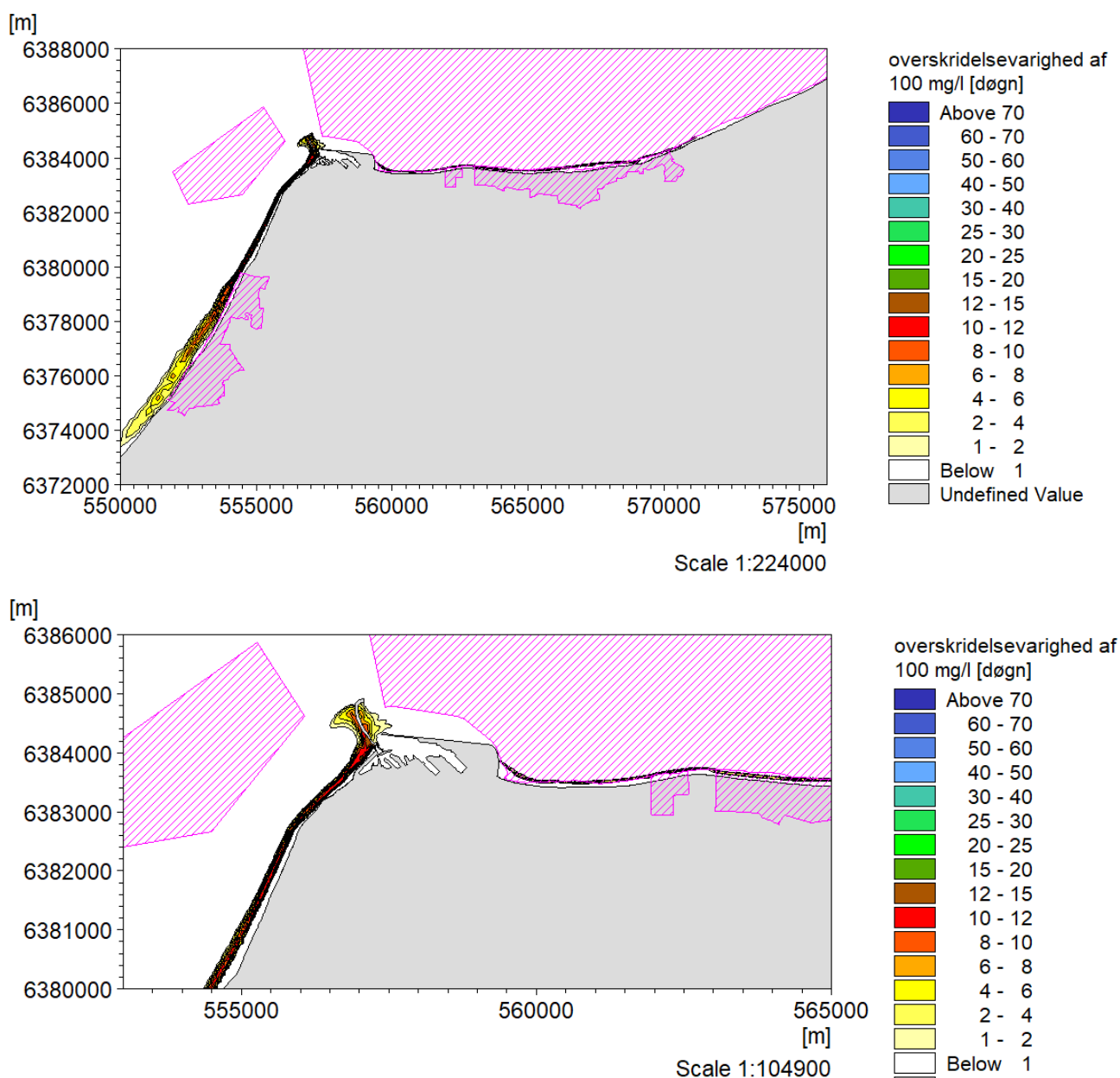
Bilag A Supplerende figurer



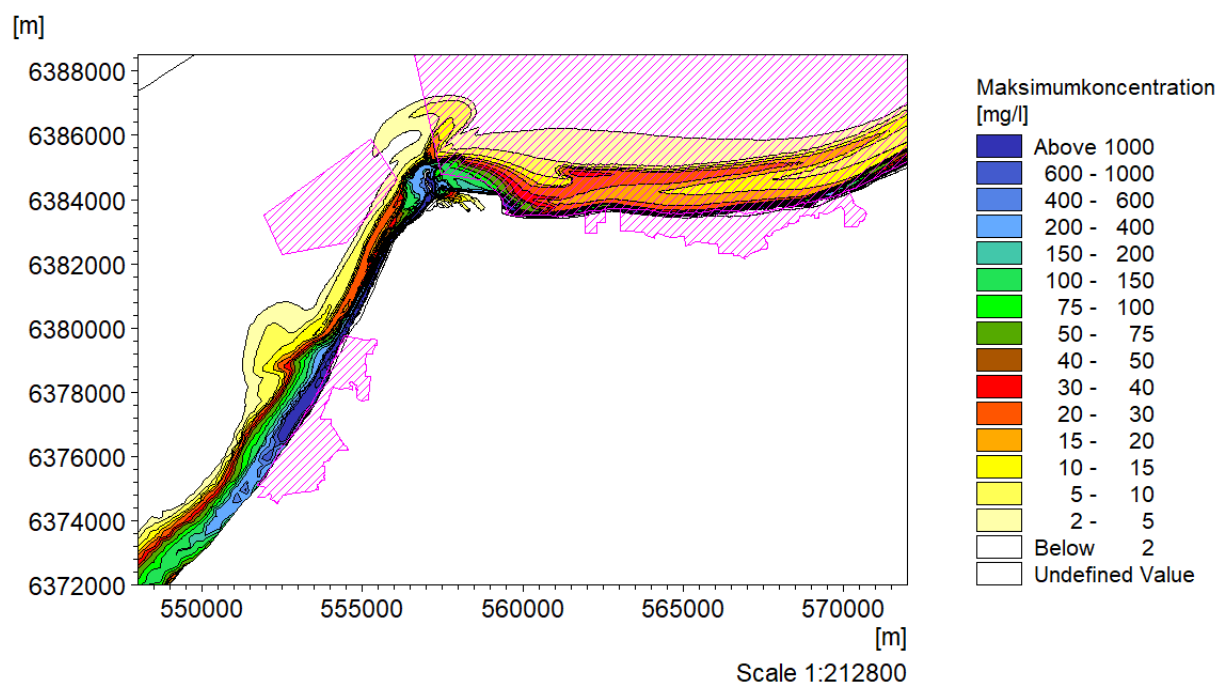
Figur A-1 **Maksimum varighed for overskridelse af 10 mg/l inden for de 3 scenarier.**
 Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.



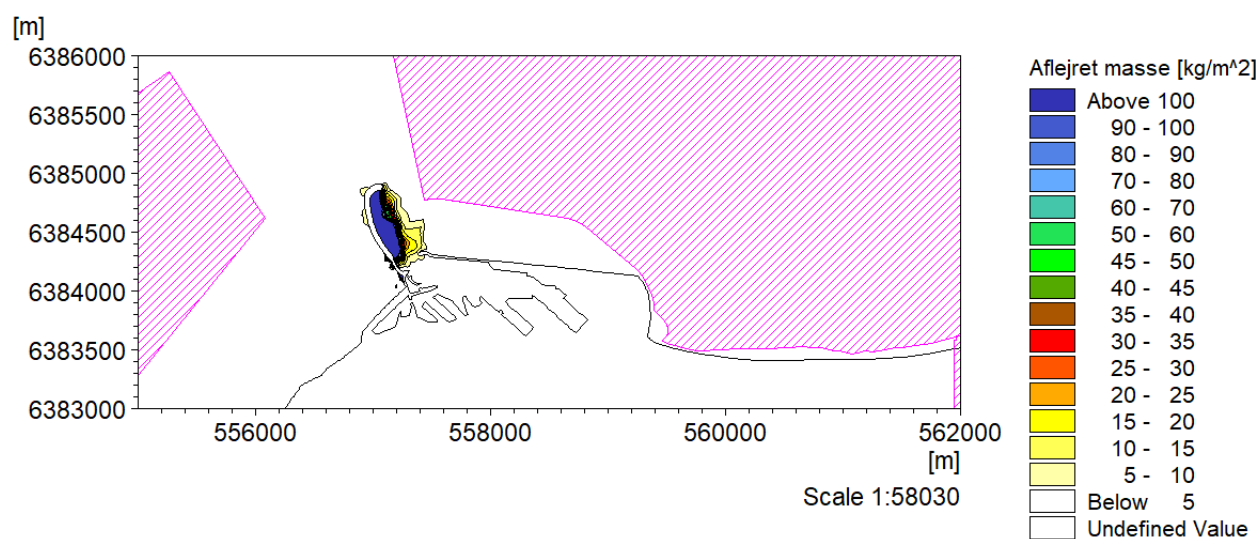
Figur A-2 Maksimum varighed med overskridelse af 50 mg/l inden for de 3 scenarier.
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.



Figur A-3 Maksimum varighed for overskridelse af 100 mg/l inden for de 3 scenarier.
Forskellen mellem det øverste plot og det nederste er udelukkende udstrækningen af det viste område.



Figur A-4 Maksimumkoncentrationer under uddybningsarbejdet inden for de 3 scenarier.



Figur A-5 Aflejningskort for gravespild; maksimum for de 3 scenarier.