

---

# MILJØKONSEKVENSRAPPORT

---

FREDERICIA HAVN

## **BILAG 12 HYDRAULISK MODELLERING OG SEDIMENTSPREDNING**

ETABLERING AF NY RO/RO KAJ 23 OG FORLÆNGELSE AF KAJ 19 I FREDERICIA HAVN  
PROJEKTNUMMER 23.1000.56



---

# RAPPORT

---

FREDERICIA HAVN

**Udvidelse af Fredericia Havn – Hydraulisk modellering og sedimentspredning**  
PROJEKTNUMMER 23.1000.56



VERSION: 4

28-09-2022

## HAVNE & GEOTEKNIK

Udarbejdet af: AOUL, BUJO, LOPT, PTES, CHBR

Kontrolleret af: PERR

Godkendt af: LOPT

## **Forord**

Fredericia Havn ønsker at udvikle havnen med en forlængelse af den eksisterende containerkaj, kaj 19, samt en ny kaj 23 pier til håndtering af ro-ro-trafik samt kemikalier.

Denne rapport er et bilag til Miljøkonsekvensvurderingen udarbejdet af SWECO Danmark A/S.

Rapporten beskriver analyser ift. bølger, strøm, håndtering af bundsedimenter (forurenede og ikke forurenede) og spild ifm. uddybning ved havnen.

## Indholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Indledning</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Bølgeforhold</b>	<b>4</b>
2.1	Havneudvidelsens påvirkning på bølger ved lystbådehavn og Gl. Havn	6
<b>3</b>	<b>Hydrodynamisk model</b>	<b>8</b>
3.1	Modelbeskrivelse	8
3.1.1	Vanddybder	10
3.1.2	Beregningsnet	12
3.1.3	Randbetingelser på vandstandsrande	16
3.1.4	Tilstrømning	19
3.1.5	Vind og vindfelter	20
3.1.6	Model basis parametre	25
3.2	Kalibrering og eftervisning af modellen	25
3.3	Beregningsperiode	27
3.4	Resultater – normale forhold	27
3.4.1	Horisontal strøm	28
3.4.2	Vertikale opadgående strømninger	33
3.4.3	Vertikale nedadgående strømninger	34
3.5	Resultater – ekstreme forhold	34
3.5.1	Horisontal strøm	34
3.5.2	Vertikale opadgående strømninger	39
3.5.3	Vertikale nedadgående strømninger	39
<b>4</b>	<b>Sedimentspredning</b>	<b>41</b>
4.1	Projektbeskrivelse	42
4.1.1	Forhold ved kaj 19	42
4.1.2	Forhold ved kaj 23	44
4.2	Uddybningsprocessen og beskrivelse af sedimenter	48
4.2.1	Sediment ved kaj 19	51
4.2.2	Miljøfremmede stoffer ved tidligere dokgrav, kaj 19	53
4.2.3	Sediment ved kaj 23	57
4.3	Resultater af spildsimuleringer	64
4.3.1	Uddybning ved kaj 19	64
4.3.2	Uddybning ved kaj 23	65
4.3.3	Effekt af skibe i Vesthavn og Centerhavn ifm. anlægsfasen	68
<b>5</b>	<b>Konklusion</b>	<b>69</b>
<b>6</b>	<b>Referencer</b>	<b>71</b>



## 1 Indledning

ADP A/S vil udvide Fredericia Havn med to nye projekter:

- Etablering af to Roll On/Roll Off-lejer (RO/RO) samt flytning af kemikaliehåndtering ved ny kaj 23 som erstatning for eksisterende kemikaliekaj (kaj 23).
- Forlængelse af eksisterende container kaj (ca. 230 m) og opfyld af Vesthavnen (kaj 19).

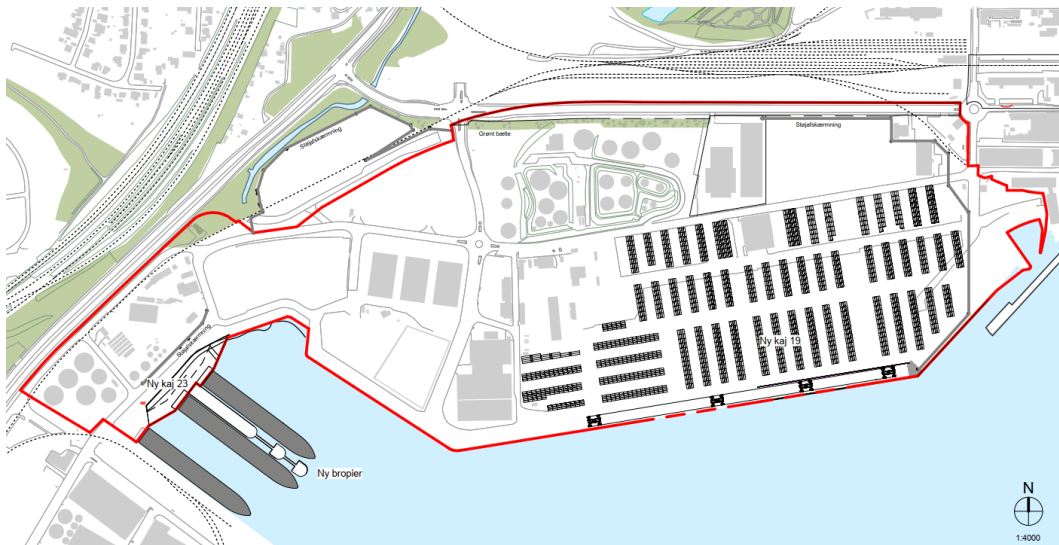
Figur 1-1 viser kaj nummerering og overblik for eksisterende forhold. Eksisterende og fremtidige forhold er vist i hhv. Figur 1-2 og Figur 1-3.



Figur 1-1: Eksisterende forhold med kaj nummerering.



Figur 1-2: Eksisterende forhold. Centerhavn med kaj 23 til venstre og Vesthavn med kaj 19 til højre.



Figur 1-3: Situationsplan, fremtidige forhold.

Der skal udarbejdes en miljøkonsekvensrapport for projektet. Denne rapport er bilag til miljøkonsekvensvurderingen.

Projekterne består lidt nærmere af:

- Ved eksisterende kaj 19 etableres en forlængelse så kajkapaciteten for containerhåndtering fordobles og det fremtidige bagareal optimeres til containerhåndtering og oplag. Pga. dårlige geotekniske forhold skal der bortgraves sediment fra havbunden. Grundet tidligere lokalitet for flydedok er sedimentet forurenede med miljøfremmede stoffer i en mindre del af området, der skal bortgraves.
- I dag håndteres RO/RO-trafikken fra kaj 18. Det nye kaj 23-anlæg etableres så det kan håndtere både RO/RO-trafikken og kemikalieanlæg. Det består af en indre kaj der udbygges bag spuns inderst i bassinet mellem kaj 22 og 24. En Pier etableres på pæle samt to duc d'alber (fortøjningsanlæg). Pga. dårlige geotekniske forhold skal en del havbundssediment bortgraves, i den inderste del af bassinet.

Denne rapport beskriver grundlaget for en vurdering af miljøkonsekvenserne ved havneudvidelsen:

- Bølgeforhold er undersøgt i forbindelse med tidligere projekt ved havnen og resultater beskrives og vurderes i denne rapport.
- Projektets påvirkning af strømforhold er analyseret gennem numerisk simulering af nuværende og fremtidige forhold.
- I forbindelse med projektet skal der uddybes for begge de to nye projekter pga. dårlige geotekniske bundforhold. Der er derfor udført analyser af det materiale

der skal graves op og derefter numeriske spredningsberegninger for arbejdet ved kaj 19 og kaj 23. Beregningerne beskriver påvirkning ifm. uddybningsarbejderne i form af omfanget af spredningen af fine partikler i Lillebælt. Lillebælt er yngleplads for bl.a. marsvin og der er Natura 2000-områder, hvor der findes meget følsom natur. Der skal i projektet ikke klappes materiale til havs (genplacere materiale).



## 2 Bølgeforhold

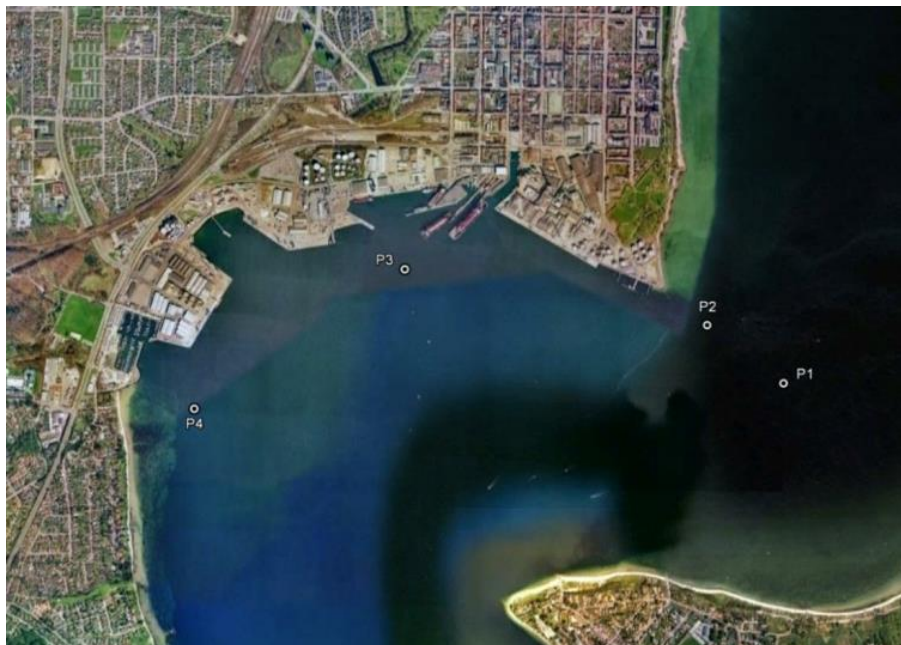
Projektet vurderes ikke at ændre væsentligt på bølgeforhold i Lillebælt, pga. den ringe udstrækning i Lillebælt ved kaj 19 og kaj 23 udvidelsen beliggende tilbagetrukket i Centerhavnen, se Figur 2-1. Vurdering af bølgeforhold baseres derfor på data for samme område udarbejdet ifm. et tidligere projekt som vist i Ref. /1/. I referencen beskrives bølgemodellen i detaljer og gengives derfor ikke her.

Generelt ligger havnen godt beskyttet for bølgepåvirkning, grundet placeringen i den nordligste del af Lillebælt beskyttet af Skanseodden mod større bølger fra østlige retninger. Det maksimale frie stræk mod øst er ca. 3,8 km og mod syd ca. 5,7 km. Det effektive frie stræk dermed mindre.

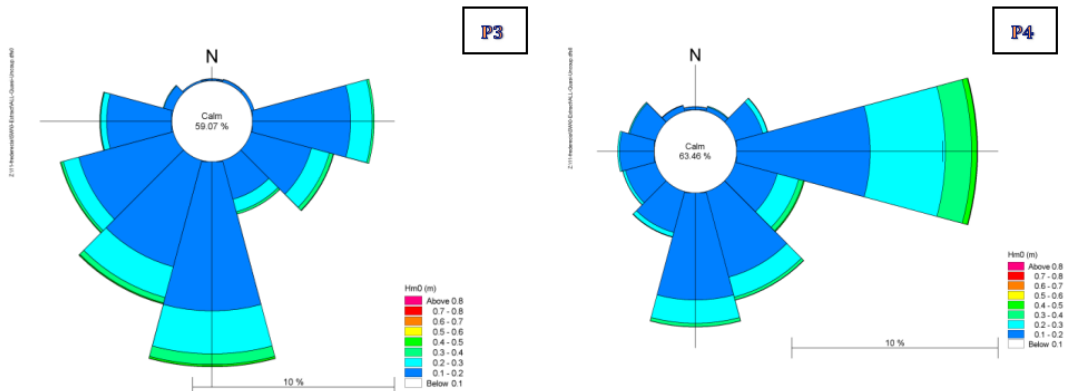
På Figur 2-1 er vist punkter hvor data er udtrukket og beskrevet i detaljer baseret på en rapport udarbejdet af DHI (Ref. /1/). Punkterne P3 og P4 vurderes som mest repræsentative.

I Figur 2-2 er vist bølgeroser hvor der ses en tydelig forskel i hyppighed af østlige bølger for P4 i forhold til P3. Figur 2-3 og Tabel 2.1 viser hhv. overskridelses-sandsynlighed og tabel for design bølgehøjder. En bølge med returperiode på 50 år ses at være i størrelsesordenen  $H_s = 1,3$  m fra sydlig retning.

Bølgehøjderne er relativt små og vil ikke være udslagsgivende for design af konstruktionerne. Når der etableres nye kajer vil refleksionsmønstre ændre sig. Det vurderes at det grundet de relativt små bølgehøjder ikke vil påvirke forholdene i Lillebælt. Der forventes let øget bølgeuro i Fiskerihavnen, men det håndteres uden afværgeforanstaltninger efter ønske fra Fredericia Havn.



Figur 2-1: Placering af positioner foran havnen hvor der er genereret bølgedata (Ref. /1/).

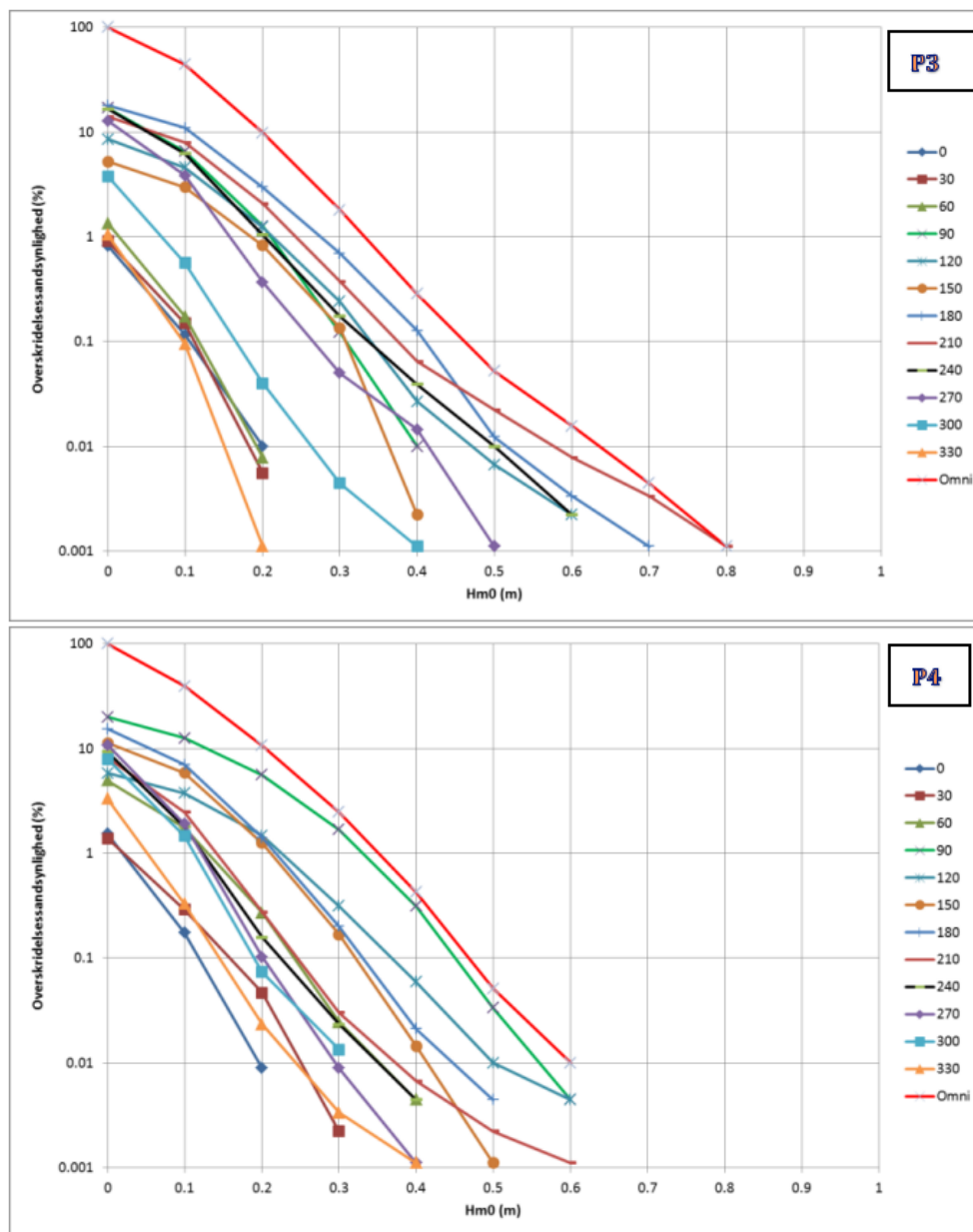


Figur 2-2: Bølgerose for punktet P3 og P4 baseret på data fra 1999-2009. (Ref. /1/). De østlige bølger begynder at påvirke området i punktet P4 hvorimod de sydlige bølger er primære for punktet P3.

Signifikant bølgehøjde, Hm0 [m]; Pos. P3	Bølgeretning (30°interval) [°N]												
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330	
Returperiode [år]													
1	0.20	0.26	0.36	0.36	0.45	0.41	0.50	0.54	0.55	0.45	0.39	0.21	
10	0.37	0.44	0.56	0.65	0.74	0.64	0.88	1.00	1.02	0.79	0.68	0.51	
50	0.48	0.56	0.69	0.83	0.93	0.79	1.12	1.32	1.34	1.01	0.87	0.69	
100	0.53	0.60	0.74	0.90	1.01	0.85	1.22	1.44	1.47	1.11	0.95	0.76	

Signifikant bølgehøjde, Hm0 [m]; Pos. P4	Bølgeretning (30°interval) [°N]											
	0	30	60	90	120	150	180	210	240	270	300	330
Returperiode [år]												
1	0.28	0.38	0.50	0.47	0.52	0.42	0.47	0.44	0.39	0.32	0.33	0.24
10	0.47	0.61	0.74	0.80	0.84	0.63	0.79	0.81	0.73	0.59	0.61	0.56
50	0.60	0.75	0.89	1.01	1.04	0.77	1.01	1.06	0.96	0.77	0.78	0.76
100	0.65	0.81	0.96	1.09	1.12	0.82	1.09	1.16	1.05	0.84	0.86	0.84

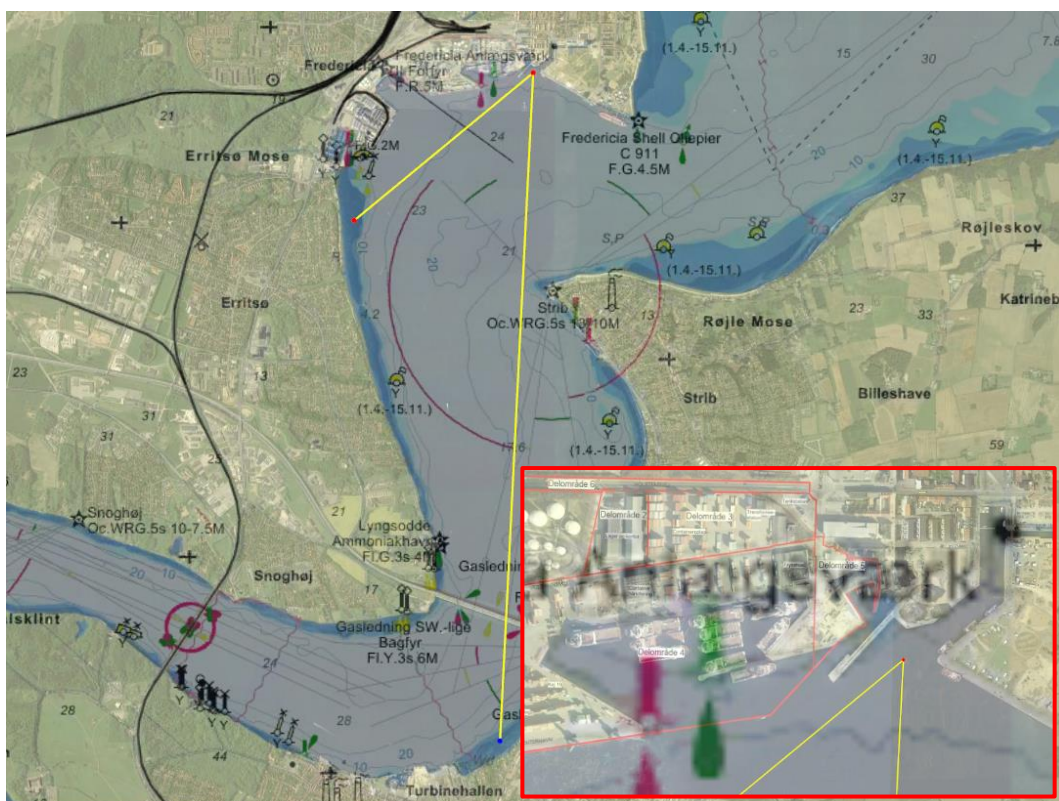
Tabel 2.1: Design forhold for signifikante bølgehøjder i punkterne P3 og P4 baseret på data fra 1999-2009 (Ref. /1/).



Figur 2-3: Overskridelsessandsynlighed for bølger i punktet P3 og P4 baseret på data fra 1999-2009 (Ref. /1/).

## 2.1 Havneudvidelsens påvirkning på bølger ved lystbådehavn og Gl. Havn

Figur 2-4 viser vinkelrum hvor bølger genereret i Lillebælt kan påvirke forholdene i Gl. Havn. Jf. Ref. /1/ og figuren fås det mest direkte bølgeindfald fra vinkelrummet 180-220 grader.



Figur 2-4: Søkort der viser vinkelrum hvor bølger kan løbe ind i Gl. Havn ved Fredericia. Rød box viser zoom omkring Gl. Havn.

I forhold til bølgeforhold ved Gl. Havn og Fredericia Lystbådehavn vurderes fremtidige forhold ved kaj 23 ingen påvirkning at have, da den er tilbagetrukket i havnebassinet Centerhavn.

De fremtidige forhold ved kaj 19 vil ændres da kajen forlænges ud i Lillebælt, så der lokalt vil være en påvirkning fra den nye kaj umiddelbart uden for kajen. Den eksisterende pier mellem Gl. Havn og kaj 11 (ses yderst til højre på Figur 1-2) vil dog også i fremtiden være den struktur der primært påvirker bølgeindfald til Gl. Havn. De vestligste bølger vil blive afskåret af den nye kaj og vil være meget små. De sydligste bølger reflekteres på den nye kaj 19 forlængelse, men vil afskærmes af den eksisterende pier. Fredericia Lystbådehavn påvirkes ikke af ændringerne.

### **3 Hydrodynamisk model**

For at kunne estimere effekten af projektet på forhold i Lillebælt er der etableret en 3D beregningsmodel baseret på softwarepakken MIKE3 HDFM (HydroDynamik Flexible Mesh). Ved hjælp af denne model kan det analyseres hvilken effekt projekterne har i forhold til de eksisterende forhold uden de to projekter.

I dette kapitel 3 beskrives den hydrodynamiske modelopsætning, der også danner grundlag for spildsimuleringerne (se efterfølgende kapitel 4) for følgende udformninger:

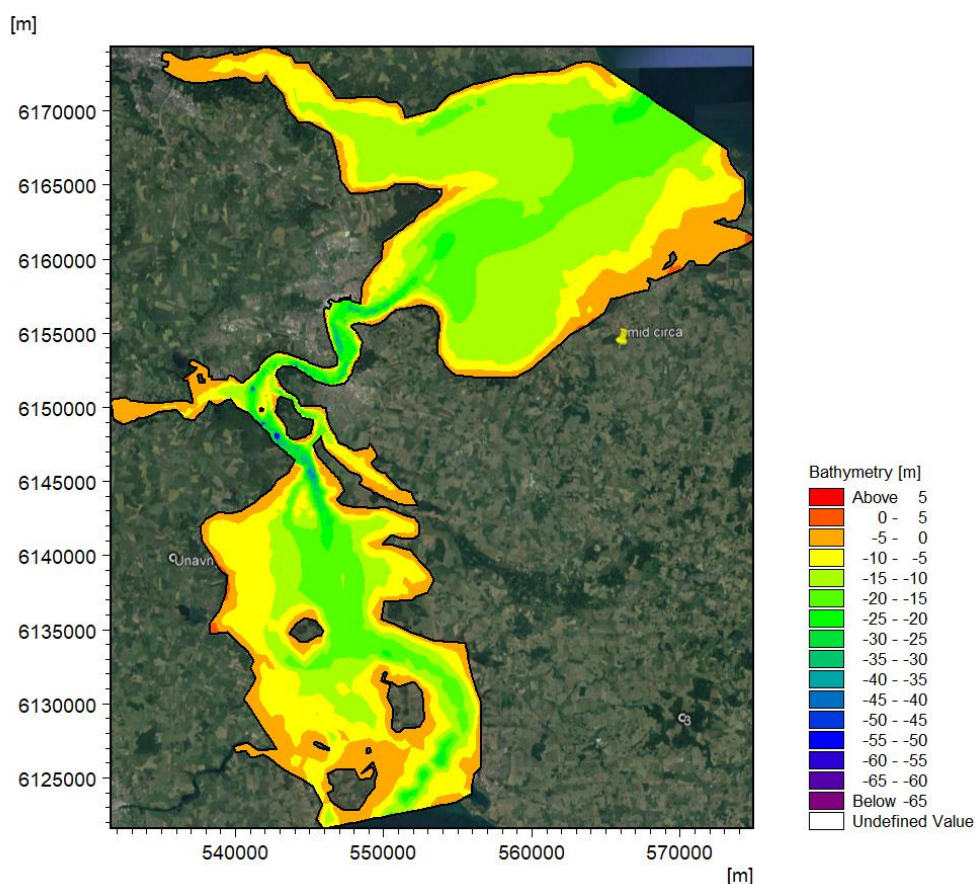
- Eksisterende forhold
- Fremtidige forhold med udvidelse ved kaj 19 og kaj 23

Der simuleres for en hændelse under uddybning og en ekstrem hændelse for vurdering af projektets påvirkning på strømmen.

#### **3.1 Modelbeskrivelse**

Vurdering af strømforhold baseres på DHI's MIKE3 FM HD (Flexible Mesh HydroDynamics), som beregner vandstand og vandføring (strømhastigheder) i alle punkter i modelområdet samt i forskellige dybder i vandsøjlen.

Modellen dækker området omkring Fredericia og Lillebælt. Udstrækningen er vist i Figur 3-1.



**Figur 3-1: Modellens udstrækning og vanddybder.**

DHI's MIKE3-modelpakke simulerer tredimensionelle strømninger med en fri overflade. Det vil sige, at de styrende fysiske ligninger for bevarelse af masse og impuls løses i et antal vertikale lag gennem vandsøjlen i alle punkter i modelområdet. For hvert af disse punkter regnes der på strøm temperatur og salinitet. Modellen kan simulere lagdeling og strøm drevet af forskel i densitet mv.

Basis for modellen og modelberegninger er dermed:

- Vanddybder
- Salinitet og temperatur
- Vandstandsvariationer på randen
- Vindfelter
- Bundruhed i hele modelområdet
- Turbulensbeskrivelse som indlagt i programmet.

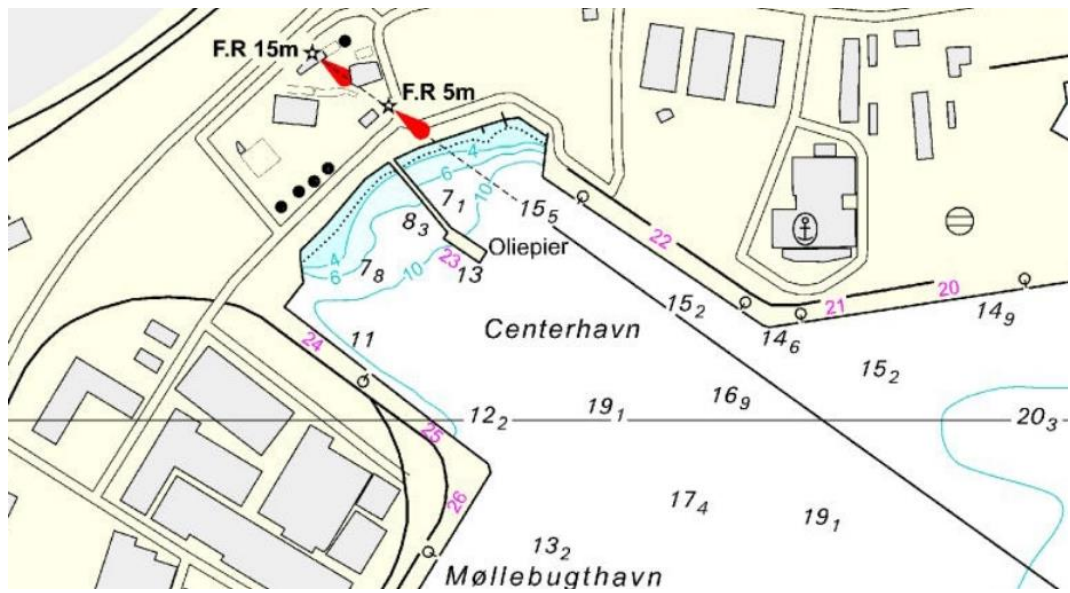
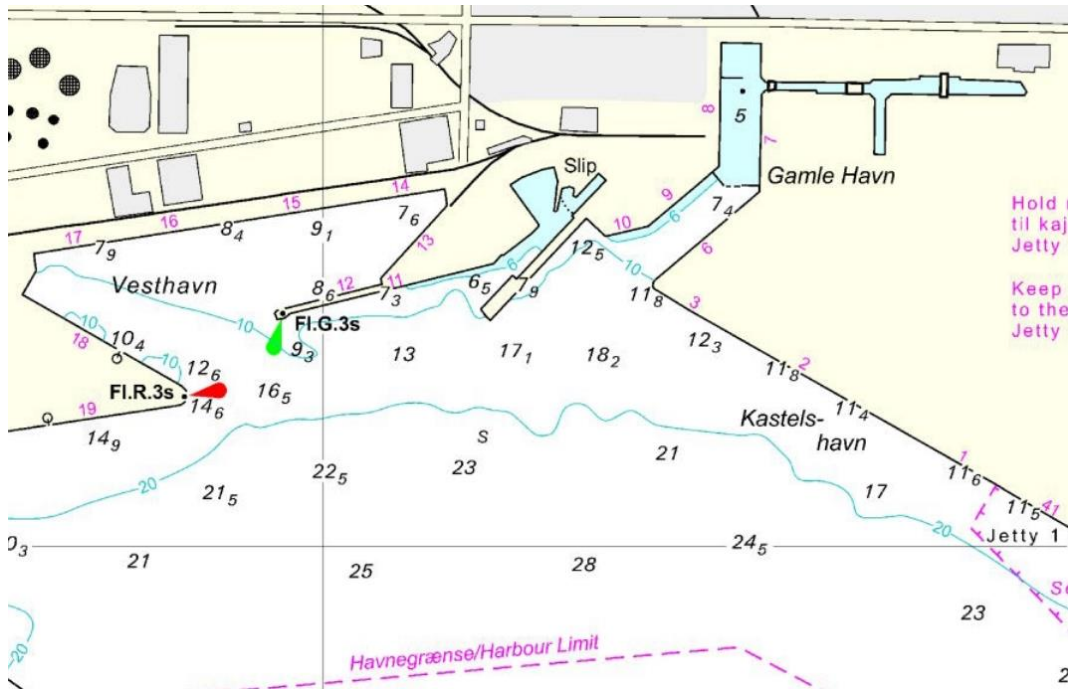
### 3.1.1 Vanddybder

Modellens vanddybder er baseret på MIKE c-map samt opmåling udført i 2018 (se Figur 3-3). MIKE c-map indlæser vanddybder fra digitale søkort. Dybdeforholdene i MIKE3 modellen kan ses på Figur 3-1, hvor der er interpoleret mellem de punkter, der er hentet ind i modellen.

Ved brug af søkort (Figur 3-2) og lokal opmåling af havnen (vist i Figur 3-3) er vanddybderne i modellen kontrolleret og rettet til, hvor der er fundet afvigelser. Det dybe 'hul' ved den fremtidige kaj 19 svarer til området hvor der tidligere har ligget en flydedok.

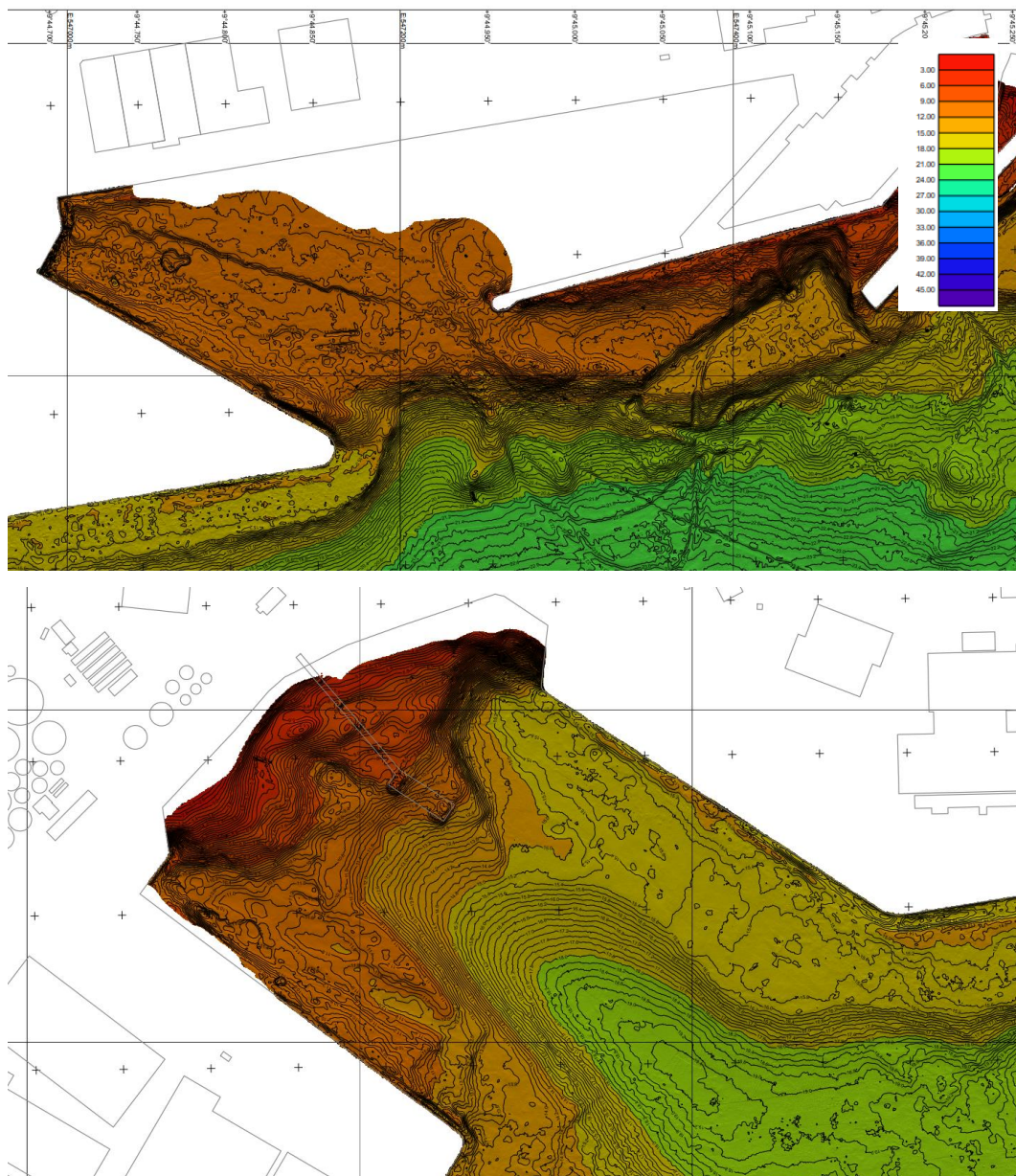
Modelområdet strækker sig fra Juelsminde i nord til Assens i syd.

Fremtidige forhold baseres på projektforslag for havneudvidelsen.



Figur 3-2: Søkort af området baseret på Den Danske Havnelods – zoom ved havnen. Kajnumre vist med lilla.





Figur 3-3: Søopmåling udført i 2018.

### 3.1.2 Beregningsnet

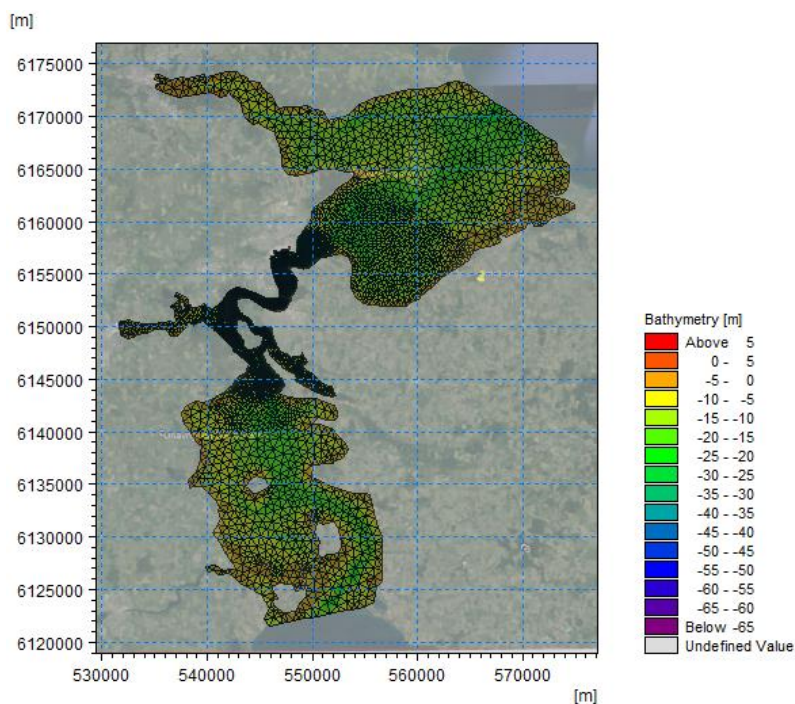
På Figur 3-4 ses det generelle beregningsnet, der er benyttet i modellen. Modellens opløsning varierer fra større celler længst væk fra kyst og området ved havnen og finest hvor der er store variationer og tæt på projektområdet ved havnen.

På Figur 3-5 ses det, at der både er brugt triangulære og rektangulære elementer i beregningsnettet. Generelt er der brugt triangulære elementer, som grundsten for

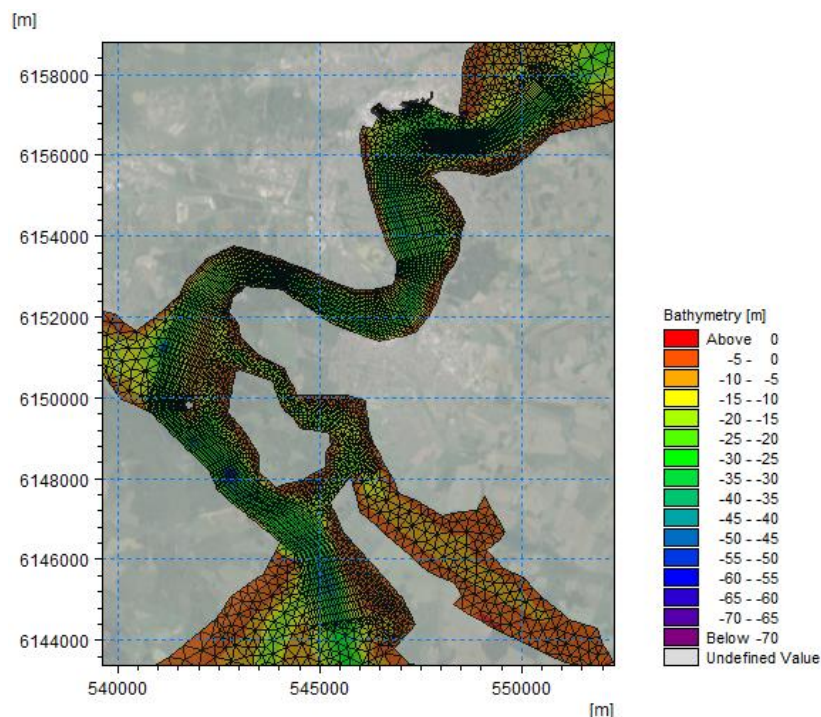
modellen til at beskrive strømmen. Elementerne varierer mellem ca. 20 m til 600 m. Da hovedstrømmen er stærk i Lillebælt, er det valgt at etablere rektangulære elementer netop der hvor strømmen er stærkest, og der er store vanddybder. De rektangulære elementer skal være vinkelrette på strømmen for at kunne beskrive den mest præcist. Rektangulære elementer har varierende sidelængder mellem 125 m til 1250 m.

Modellen er inddelt i 7 vertikale lag, der fordeles jævnt over vanddybden.

I området omkring havnen er der delvist strømløse især når hovedstrømmen i Lillebælt går mod syd.



Figur 3-4: Vanddybder og beregningsnet for hele modelområdet.

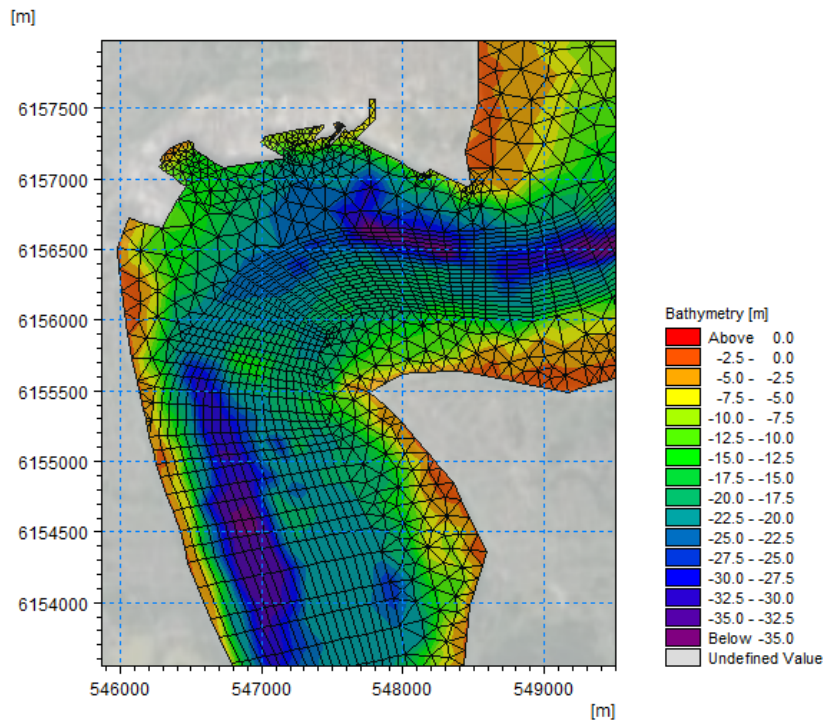


**Figur 3-5 Vanddybder og beregningsnet for Lillebælt**

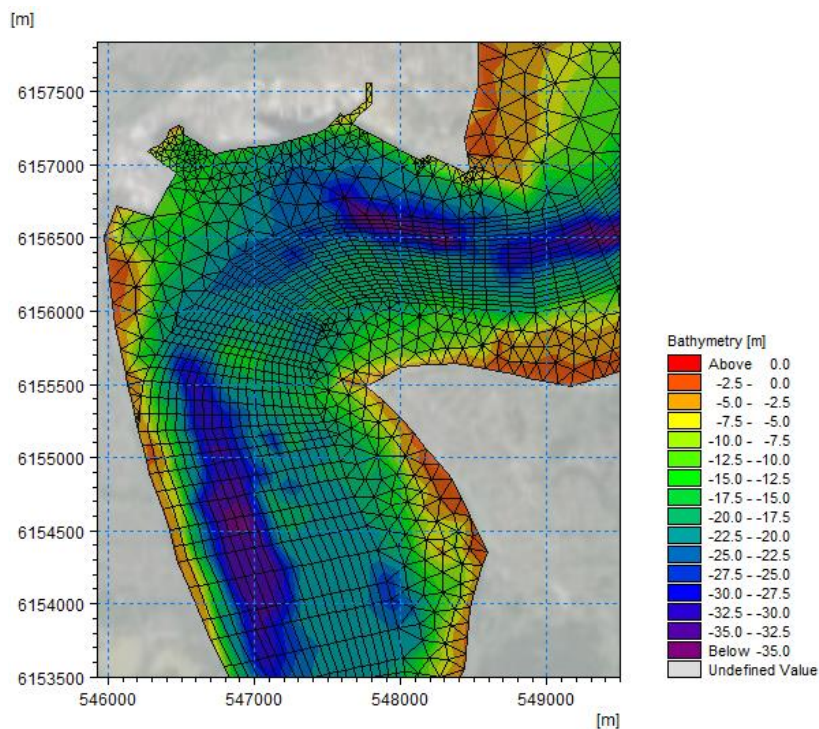
På Figur 3-6 ses modellens net for området ved Fredericia Havn, området omkring kaj 23 og kaj 19 er højt opløst for at sikre præcision i de numeriske simuleringer. Det ses ydermere, at de rektangulære elementer er valgt der hvor der er store vanddybder og hvor der dermed er forventet at være stærk strøm.

På Figur 3-7 ses modellens net for området ved kaj 19 og kaj 23 ved Fredericia Havn med de nye forhold:

- Ved kaj 19 er den eksisterende kaj forlænget ca. 230 m og den eksisterende bagvedliggende havn er fyldt op.
- Der rammes spuns i bunden af kaj 23, som ligeledes fyldes op og er afgrænsning mod land. Pæledæk regnes ikke med i modellen.



Figur 3-6: Beregningsnet for området omkring Fredericia Havn med de eksisterende forhold



Figur 3-7: Modellen for de nye forhold, hvor inderbassin ved kaj 19 og kaj 23 er opfyldt.

### 3.1.3 Randbetingelser på vandstandsrande

På Figur 3-8 ses de rande der definerer domænets udstrækning. Domænet er afgrænset af en rand med "code value" 1, som definerer, hvor domænet grænser op til land. Ved denne rand vil der ikke være nogen ind- eller udstrømning.

I Lillebælt er vandets strømning hovedsageligt styret af vandstandsgradienter mellem Kattegat og den vestlige Østersø (forårsaget af regionale atmosfæriske forhold og tidevand). Dette betyder, at den vigtigste drivkraft for strøm i domænet er randene på modellen.

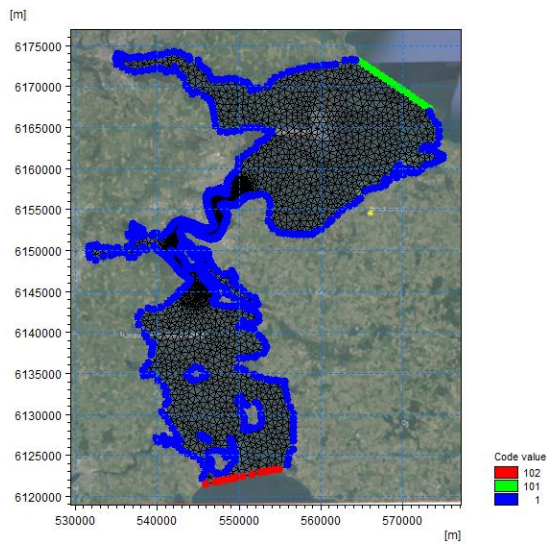
Randen mod nord markeret med den grønne farve har "code value" 101, og strækker sig mellem det nordlige Æbelø og Juelsminde. Randen mod syd markeret med rød strækker sig mellem Torø og Flovt Strand. Der forventes at være en væsentlig gennemstrømning af vand igennem begge rande.

Der er simuleret for to perioder, hver af 2 måneders varighed:

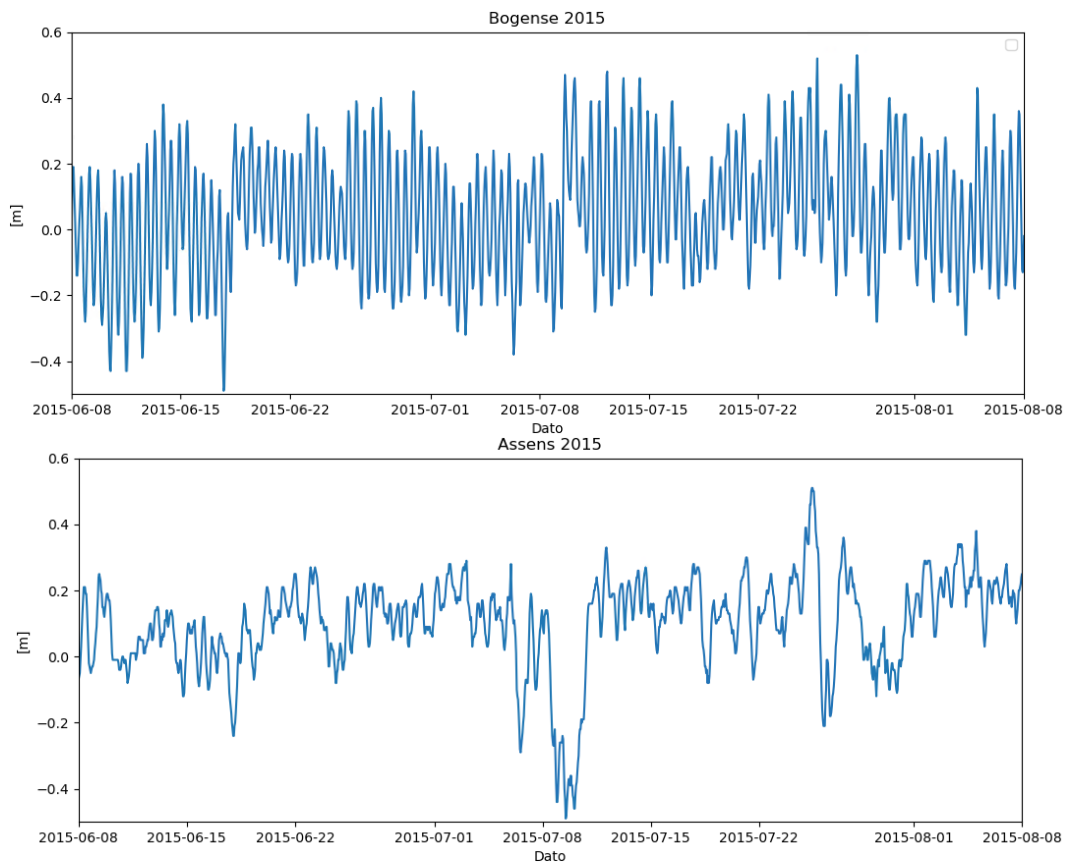
- Normale forhold:  
 Periode omkring den forventede uddybningsperiode ved Kaj 19 i juni-juli og ved Kaj 23 i september-november.
- Ekstreme forhold:  
 Perioden omkring stormen Bodil er simuleret som ekstrem hændelse. Den inkluderer en periode med ekstremt højvande nord for Fyn og lavvande i sydlige del af Lillebælt.

På randene 101 og 102 er der påsat målinger fra hhv. Bogense og Assens som vandstandsændringer, se Figur 3-9, Figur 3-10 og Figur 3-11 for hhv. normale forhold ifm. uddybning ved hhv. Kaj 23 og Kaj 19 samt ekstreme forhold. Randene svarer til måledata fra DMI's officielle vandstandsmålere. Disse rande er den primære drivkraft for både vandstandsændringer og strømninger i hele domænet. Da randene er placeret langt fra kaj 19, kaj 23 og det område i Lillebælt, hvor der er stærke strømninger, vurderes det at vandstandsændringer på randene alene er nok til at drive både strømninger og vandstandsændringer inde omkring kaj 19 og Kaj 23.

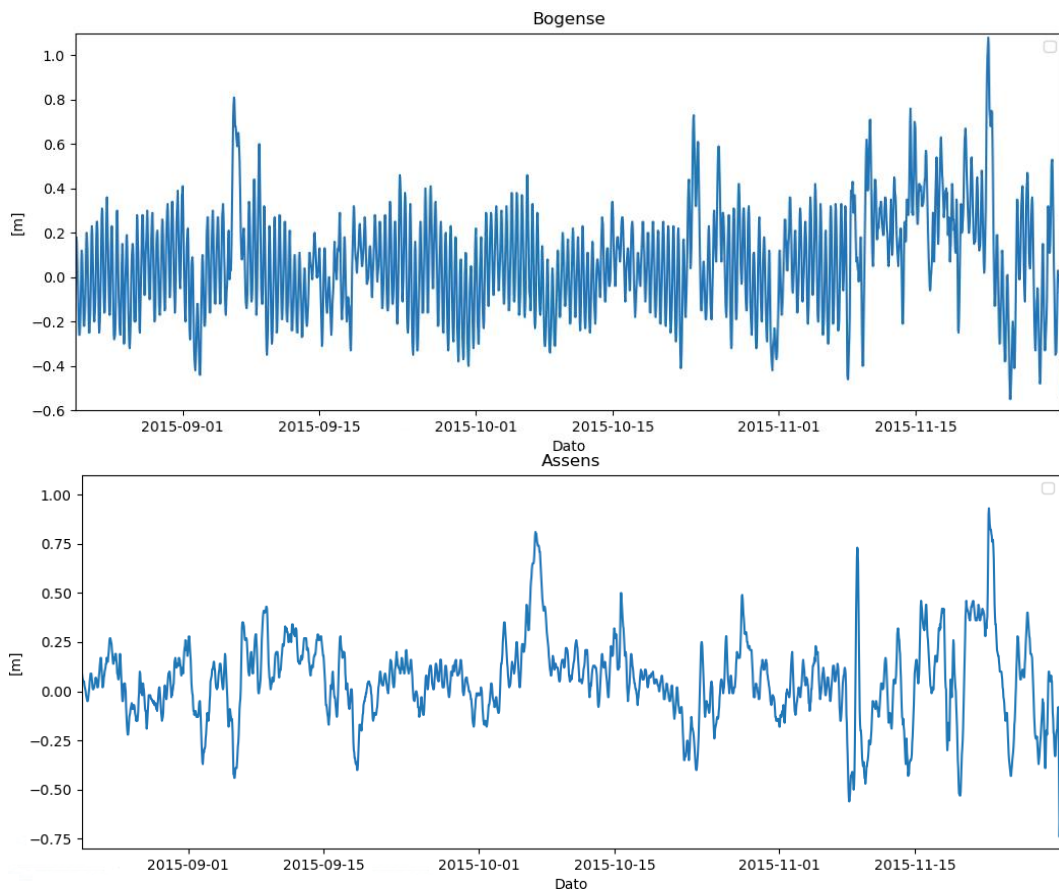
Salinitet er konservativt indsat som 0, da flokkulering af små partikler begrænses i ferskvand ift. saltvand og temperatur er indarbejdet som 10 grader. Det har ikke været muligt at etablere et præcist grundlag i form af længere tidsserie for variationer baseret på målinger af salinitet og temperatur. Området kan være lagdelt grundet de store variationer i vanddybde.



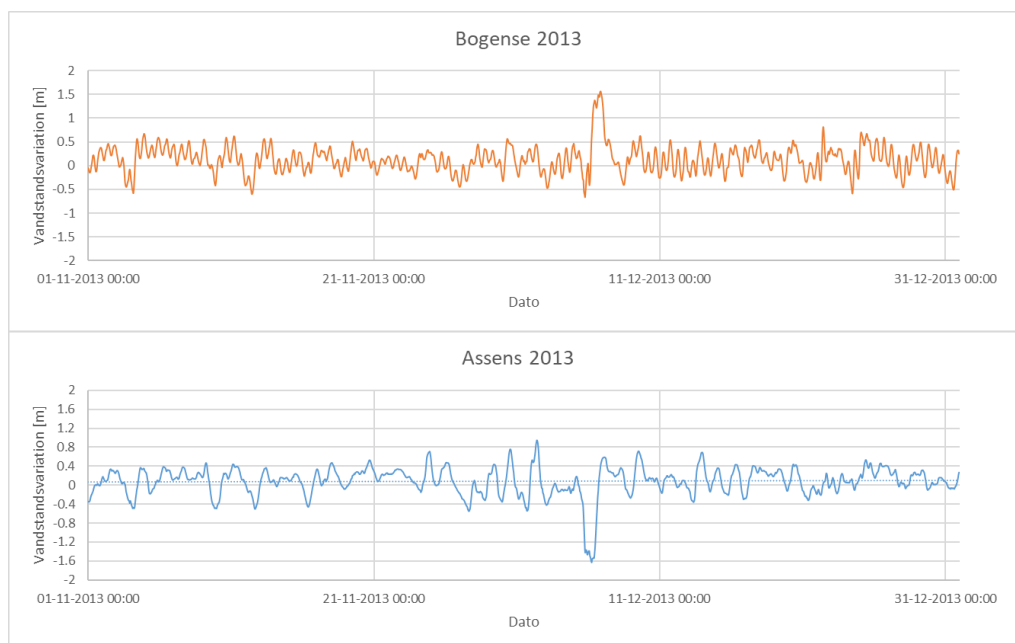
Figur 3-8: Placering af model rande.



Figur 3-9: Målte vandstandsvariationer der benyttes som randbetingelser i hhv. nord (Bogense) og syd (Assens) for simulering af spild ved Kaj 19. Den store variation mellem de to målestationer skyldes i høj grad tidevand som ved Bogense har en amplitude på ca. 0,5 m mens Assens har en tidevandsamplitude på ca. 0,1 m og dermed i højere grad er vinddrevet.



**Figur 3-10: Målte vandstandsvariationer der benyttes som randbetingelser i hhv. nord (Bogense) og syd (Assens) for simulering af spild ved Kaj 23. Den store variation mellem de to målestationer skyldes i høj grad tidevand som ved Bogense har en amplitude på ca. 0,5 m mens Assens har en tidevandsamplitude på ca. 0,1 m og dermed i højere grad er vinddrevet.**



**Figur 3-11: Målte vandstandsvariationer der benyttes som randbetingelser i hhv. nord (Bogense) og syd (Assens). Det ses at en typisk højvandshændelse fra nord har stort lavvande syd for Lillebælt.**

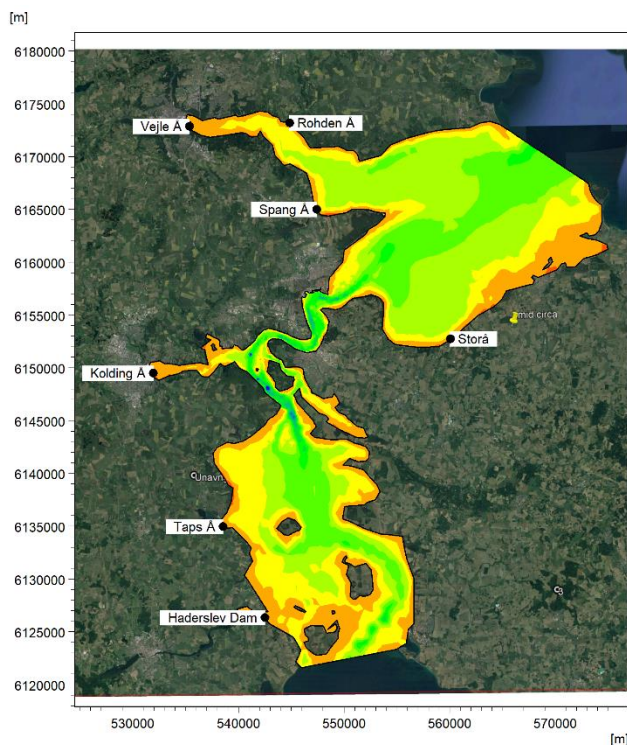
### 3.1.4 Tilstrømning

Der er i modellen inkluderet tilløb fra større åer. Vandføring er angivet i Tabel 3.1 og Figur 3-12 viser åernes placering.

Måned	Å med udløb i domænet						
	Storå	Spang Å	Rohden Å	Vejle Å	Kolding Å	Taps Å	Haderslev Dam
	Vandføring [ $m^3/s$ ]						
Januar	2.51	3.05	1.99	9.07	6.49	2.41	2.54
Februar	2.43	2.99	1.94	8.66	6.09	2.09	2.33
Marts	2.16	2.71	1.72	7.91	5.43	1.82	2.12
April	1.33	1.74	1.07	5.79	3.38	1.02	1.37
Maj	0.78	1.06	0.62	4.48	2.11	0.49	0.90
Juni	0.57	0.87	0.48	3.99	1.68	0.32	0.73
Juli	0.54	0.82	0.45	3.83	1.60	0.31	0.71
August	0.54	0.81	0.44	3.86	1.57	0.33	0.73
September	0.60	0.88	0.48	4.26	1.84	0.44	0.90
Oktober	0.73	1.12	0.59	5.14	2.57	0.77	1.26
November	1.29	1.74	1.07	6.54	4.05	1.39	1.80
December	1.88	2.44	1.55	7.95	5.42	2.06	2.25
Total årlig	15	20	12	71	42	13	18

**Tabel 3.1: Vandføring i større åer der løber til modelområdet.**





Figur 3-12: Placering af åer med tilløb til modellen.

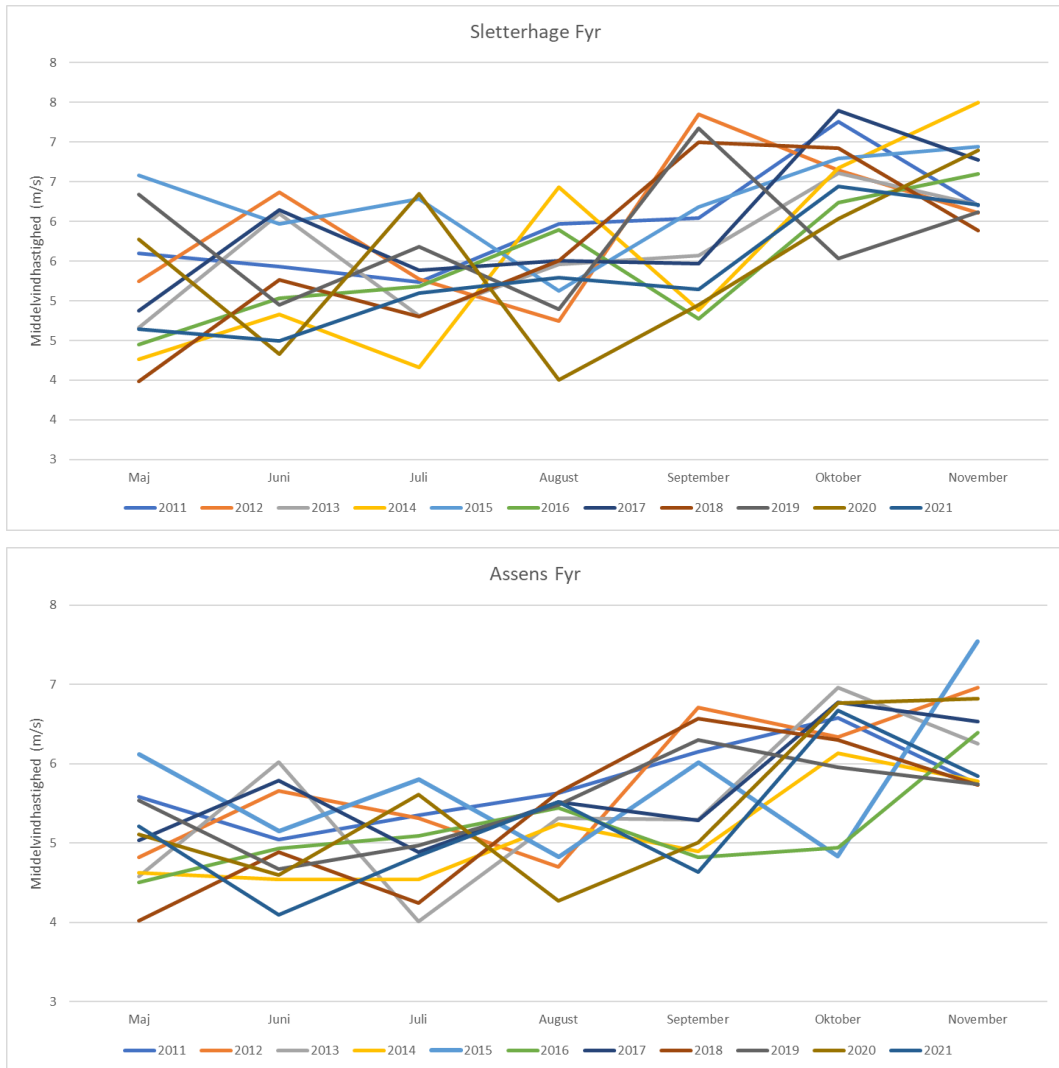
### 3.1.5 Vind og vindfelter

Som basis for modellen indlæses vindfelter, således at vindens påvirkning af vandoverflade og strømninger inkluderes i modelberegningerne. Der er ikke repræsentative målinger ved Fredericia.

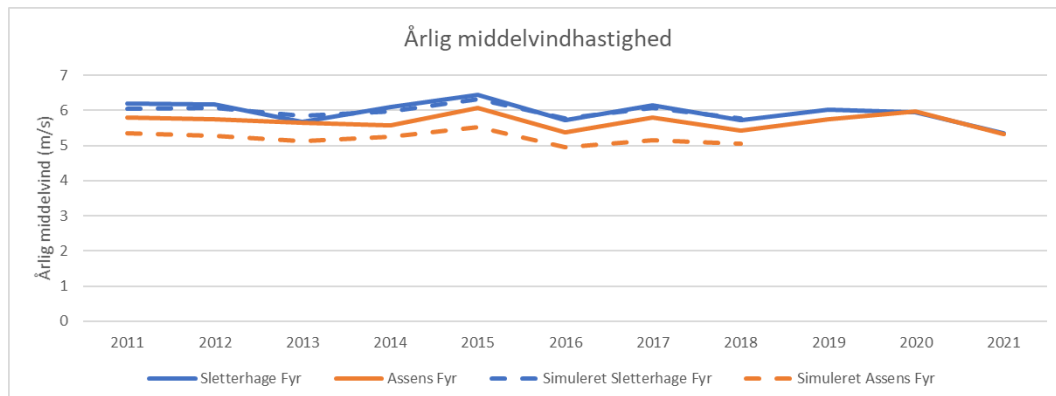
Der simuleres som vist i en normal og ekstrem periode. Den normale periode er baseret på analyser af målte vinddata fra Sletterhage Fyr og Assens Fyr. Det forventes at uddybningsperioden, hvor der potentielt skal simuleres spild, vil ligge i sommer- og efterårsmånederne juni til november.

I Figur 3-13 er vist den månedlige middelvind for maj til november. Det er på basis af data valgt at simulere år 2015, da årets måneder ligger middel til højt for begge fyr og dermed er et fornuftigt udgangspunkt for at vurdere påvirkningen. En repræsentativ sommer og efterårsperiode er derfor valgt til år 2015.

Figur 3-14 viser den årlige middelvind for årene 2011-2021 for målte og simulerede middelvindhastigheder. Som det ses, er der god overensstemmelse ved Sletterhage mens der for Assens Fyr er en lidt større variation der skyldes det snævre farvand hvilket betyder at det numeriske vindfelt ikke repræsenterer den lokale vind helt præcist. Men de årlige variationer er godt repræsenteret.



**Figur 3-13: Sammenligning af vinddata fra 2011 til 2021 i månederne maj til november for hhv. Sletterhage Fyr og Assens Fyr, månedsmidler af vindhastighed (m/s).**



**Figur 3-14: Årlig middelvind for Sletterhage Fyr og Assens Fyr, målt og simuleret.**

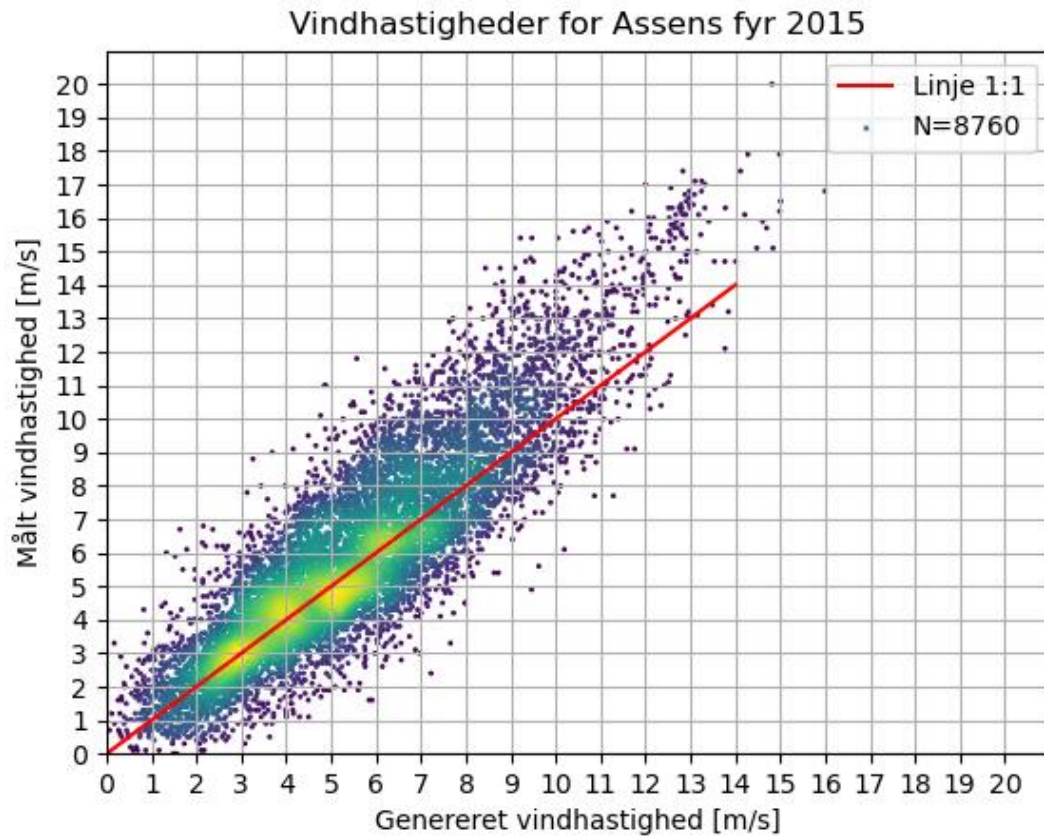
Vindfelter er udtrukket fra ECMWF. ECMWF står for "The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts", og herfra kan der udtrækkes vind og vejrdata i felter på 30x30 kilometer for den aktuelle simuleringsperiode, der indlæses og indlæses i modellen.

For at validere om vinddata anvendt i modellen er korrekt, er det holdt op i mod målt vinddata fra tre nærliggende fyr. Fyrene anvendt til sammenligning af data er Assens fyr, Sletterhage fyr og Røsnæs fyr.

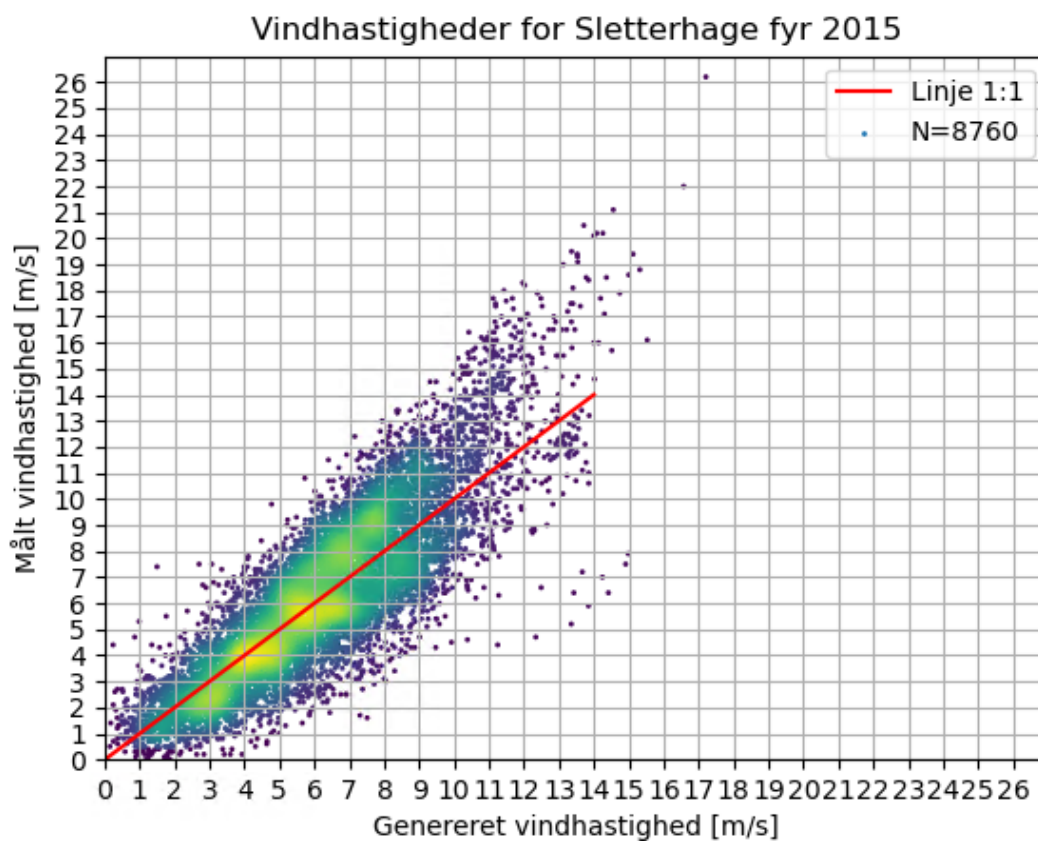
På Figur 3-15, Figur 3-16 og Figur 3-17 ses genereret data for hhv. Assens fyr, Sletterhage fyr og Røsnæs fyr (som udtrukket af ECMWF) plottet ud af x-aksen og målt data for de førnævnte fyr plottet op af y-aksen. Ydermere ses en linje med en hældning på 1 som viser hvor scatter data vil ligge, hvis genereret data og målt data antager den samme værdi. Disse grafer viser, at den genererede data generelt ligger acceptabelt tæt på den målte data.

Der ses dog en skævhed i scatter plottet på Figur 3-15, Figur 3-16 og Figur 3-17, som viser, at for både Assens fyr, Sletterhage fyr og Røsnæs fyr ligger de målte vindhastigheder højere end de genererede. Der er en tendens til, for alle tre målepunkter, at det generelt er ved de højere vindhastigheder, at afvigelsen mellem det genererede data og det målte data er størst.

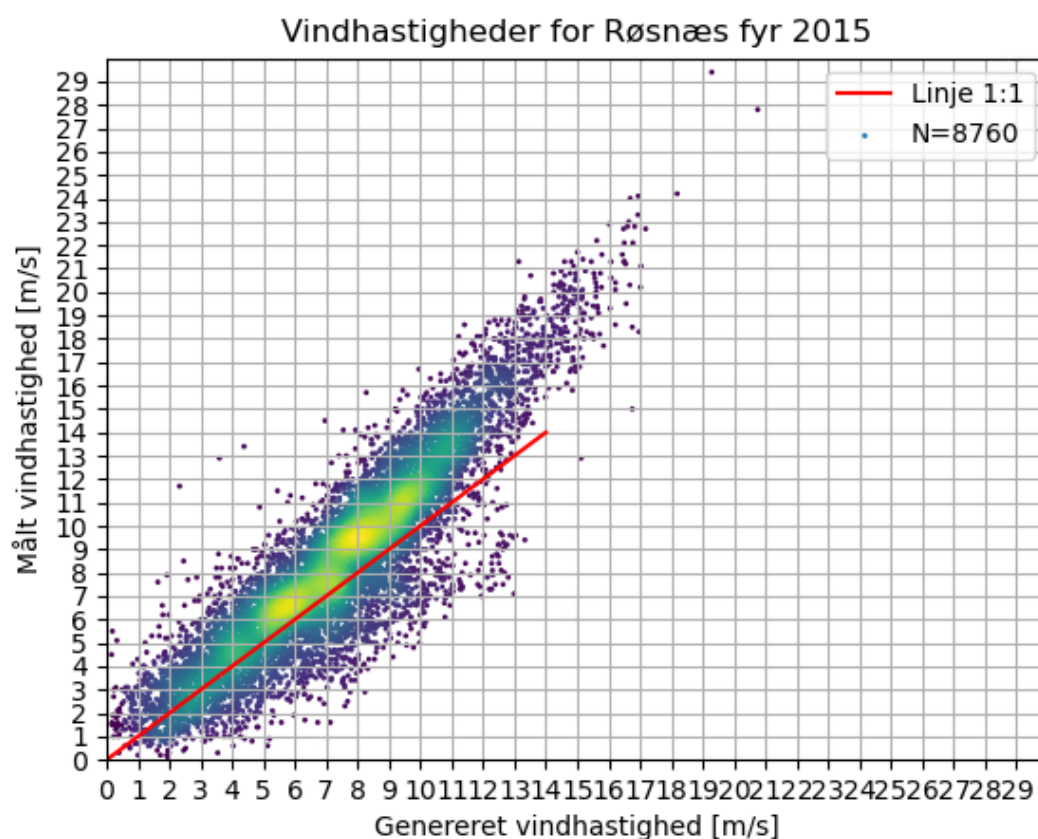
Effekt af afvigelsen i vinddata analyseres ift. kalibrering af modellen. Som det ses i følgende afsnit, er der god overensstemmelse imellem målte og simulerede vandstande.



Figur 3-15: Genererede vindhastigheder ved Assens fyr plottet mod målte vindhastigheder for Assens fyr.



Figur 3-16: Genererede vindhastigheder ved Sletterhage fyr plottet mod målte vindhastigheder for Sletterhage fyr.



Figur 3-17: Genererede vindhastigheder ved Røsnæs fyr plottet mod målte vindhastigheder for Røsnæs fyr.

### 3.1.6 Model basis parametre

Tabel 3.2 viser basis parametre for strømmodellen.

Parameter		Værdi	Enhed
Bundruhed		0,001	m
Vindfriktion, $W < 2$ m/s		0,001255	-
Vindfriktion, $2 < W < 10$ m/s		Lineær variation	-
Vindfriktion, $W > 10$ m/s		0,002425	-
Hvirvel viskositet	Horisontal	Smagorinsky formulering, skaleringsfaktor 0,28	-
	Vertikal	Standard k- $\epsilon$ model med densitets model	-
Dispersion	Horisontal	Knyttet til hvirvel viskositet med faktor 1	-
	Vertikal	Knyttet til hvirvel viskositet med faktor 0,1	-

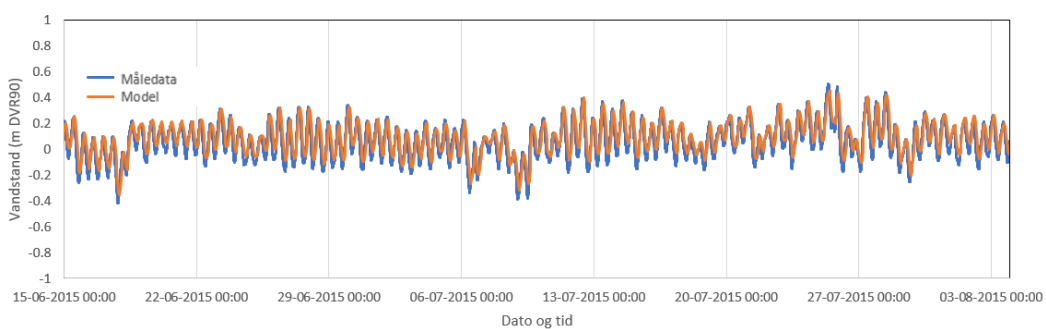
Tabel 3.2: Basis input parametre.

## 3.2 Kalibrering og eftervisning af modellen

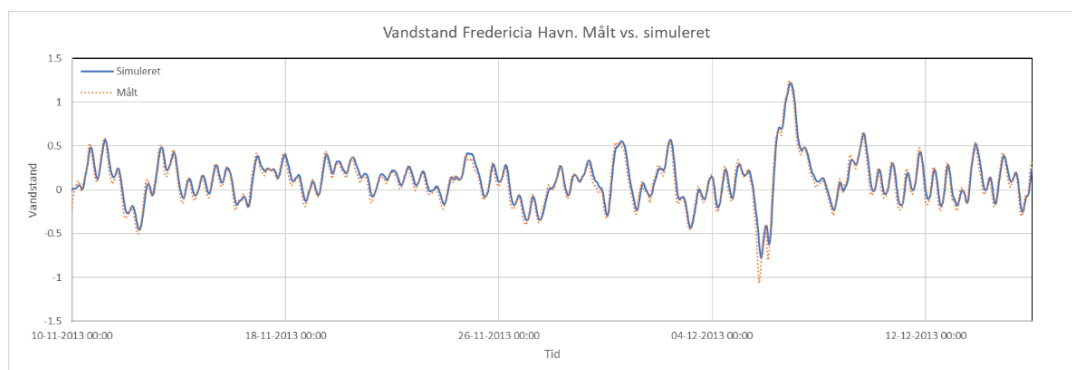
Strømningerne i modellen drives af vandstandsændringerne langs modelrandene samt vind, som er styrende for både vandstandsændringer og derfor også strøm i domænet. En nærmere beskrivelse af hvad der driver strømningerne kan ses i afsnit 3.1.3.

For at sikre at vandstanden i modellen er en god tilnærmelse til den vandstand der er målt inde i Fredericia Havn sættes de to vandstande op imod hinanden. Når vandstanden er kalibreret op imod den målte i Fredericia Havn, antages strømninger også at være korrekte. Det har ikke været muligt at sammenligne med målte strømhastigheder i domænet.

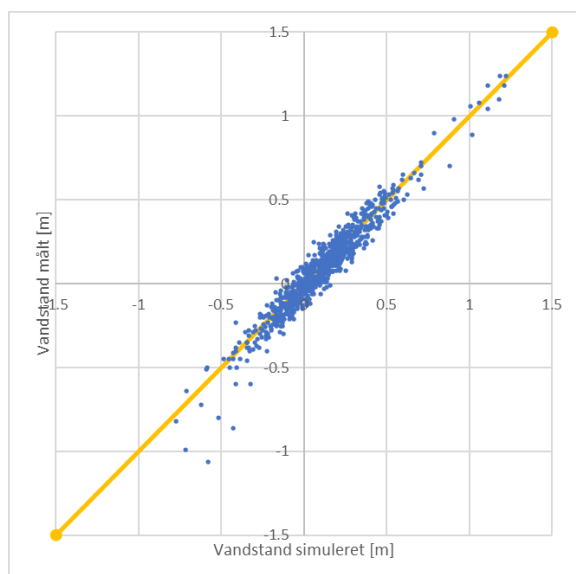
Vandstandsvariationerne for Fredericia Havn kan ses på Figur 3-18 og Figur 3-19, hvor måledata fra Fredericia Havn er den blå tidsserie og modeldata fra Fredericia Havn er den orange tidsserie. Figur 3-20 viser ligeledes en sammenligning af målt og simulerede data for ekstremhændelsen. Af figurerne fremgår en generelt god overensstemmelse mellem fase og højvandstanden mens lavvandstanden underestimeres i den normale situation. Vandstandsvariationerne vurderes dog at være tilstrækkeligt sammenfaldende med de målte data for samme periode.



**Figur 3-18: Vandstande for målte data fra Fredericia havn og vandstande simuleret for normal situation. Der ses en rimelig overensstemmelse mellem det målte og simulerede data sæt ved Fredericia.**



**Figur 3-19: Vandstande for målte data fra Fredericia havn og vandstande simuleret for ekstrem situation. Der ses en god overensstemmelse mellem det målte og simulerede data sæt ved Fredericia.**



Figur 3-20: Scatter plot af målte mod simulerede vandstande i Fredericia Havn for perioden med ekstremhændelsen.

### 3.3 Beregningsperiode

Der simuleres i tre perioder:

- I. Baseret på analyser af vindforhold er en repræsentativ simuleringsperiode valgt til perioden 8/6-2015 til 8/8-2015, mens uddybning der simuleres, sker fra 8/6-4/7-2015. Denne periode beskriver simulering af spild ifm. uddybning ved kaj 19, der forventes at vare ca. 1 mdr. Perioden er valgt som repræsentativ ift. forventet tidsplan for anlægsarbejdet og den nødvendige uddybningstid samt efterfølgende tid til eventuel bundfældelse.
- II. Spredning ifm. uddybning ved Kaj 23 simuleres overordnet fra 21/8 til 30/11 og selve spildsimulering dækker perioden fra d. 31/8 til 3/11. Perioden er valgt som repræsentativ ift. den forventede tidsplan for anlægsarbejdet. Den lange simuleringstid dækker ligeledes periode til eventuel bundfældelse.
- III. Det er desuden valgt at simulere stormen Bodil i december 2013, som repræsentativ for en ekstrem hændelse også i Fredericia. Stormen resulterede i det 6. højeste vandstand i Fredericia i den tidsperiode man har registreret vandstand frem til 2019 (Ref. /10/). Der simuleres fra 10/11-2013 til 16/12-2013.

### 3.4 Resultater – normale forhold

Ændringerne i geometrien omkring kaj 19 og kaj 23 giver anledning til ændrede strømforhold omkring havnen i Fredericia. Nærværende afsnit beskriver resultater fra simuleringer vej kaj 19 og kaj 23.

Da beregningerne er foretaget i en 3-dimensionel model, dækker den både horisontale såvel som vertikale strømningsforhold.

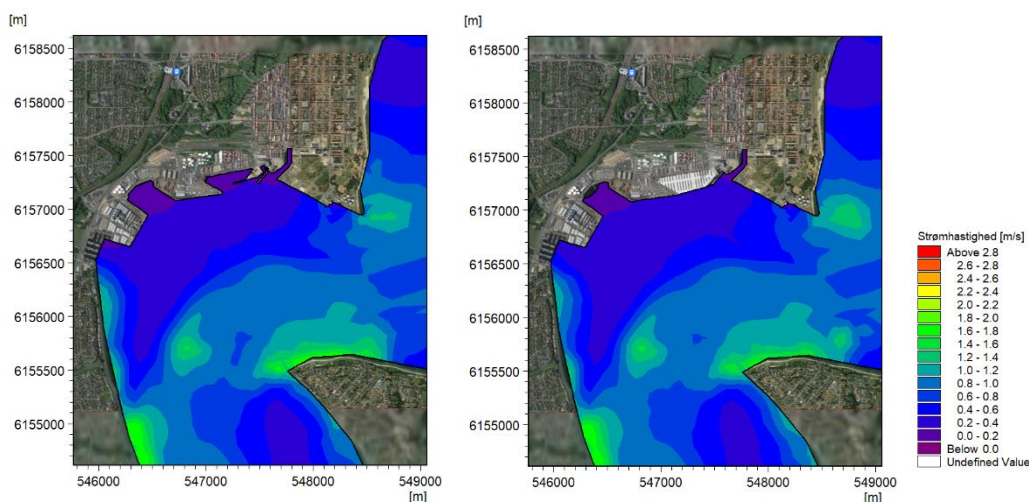


### 3.4.1 Horisontal strøm

I dette afsnit redegøres det hvorvidt de horisontale strømforhold ændres som følge af en ændring af geometrien ved kaj 19 og kaj 23.

På Figur 3-21 er de maksimale strømhastigheder for det område af Lillebælt, der ligger ved Fredericia Havn, vist, for eksisterende og fremtidige forhold. Det er den maksimale strømhastighed i hvilket som helst af punkterne i dybden der angives.

Det ses, at strømmen i Lillebælt varierer meget lidt for nuværende i forhold til fremtidige forhold. For området syd for kaj 19 og kaj 23 er strømmen stort set de samme for de eksisterende forhold som for de nye forhold og her ses ikke en ændring i strømmen af ovenstående figurer. Det vurderes derfor, at de fremtidige forhold på havnen med den nye geometri ikke influerer væsentligt på strømmen i Lillebælt. Det skyldes i høj grad at den eksisterende udformning af havnen omkring kaj 19 påvirker strømmen i samme retning som den fremtidige udformning. For kaj 23 ligger det tilpas tilbagetrukket i havnebassinet til ikke at influere på strømmingen.

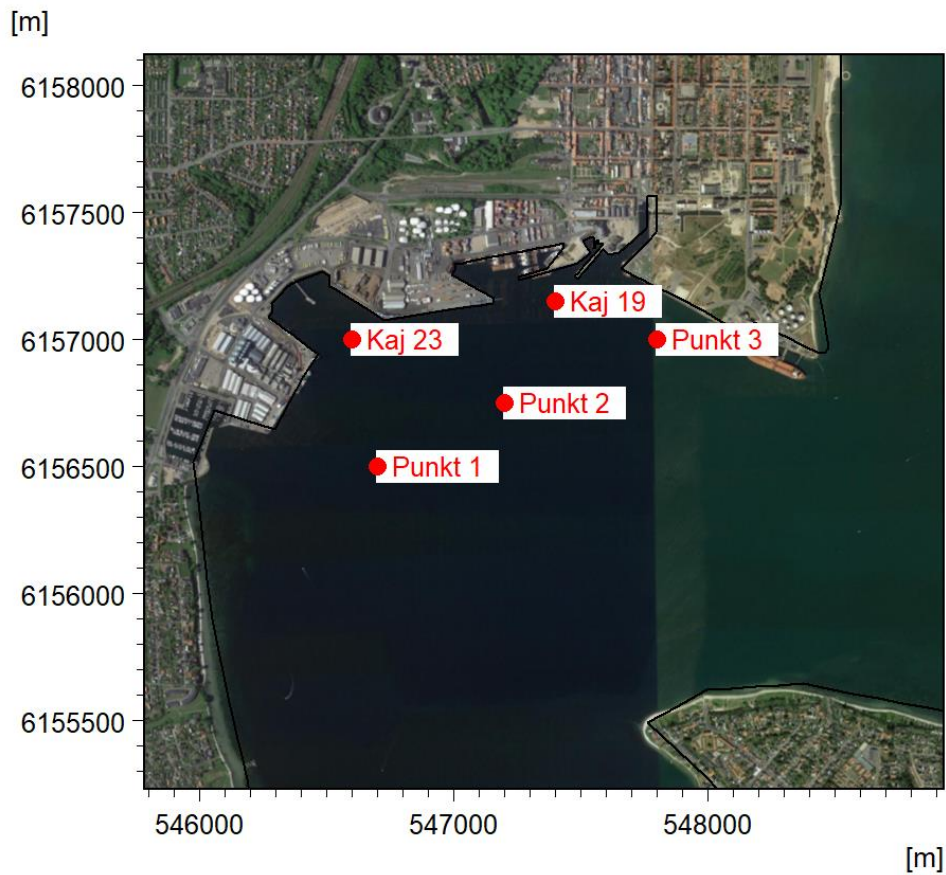


**Figur 3-21: De maksimale strømhastigheder i området i ethvert beregningspunkt. Eksisterende forhold til venstre og fremtidige forhold til højre. Samme skala for strømhastighed.**

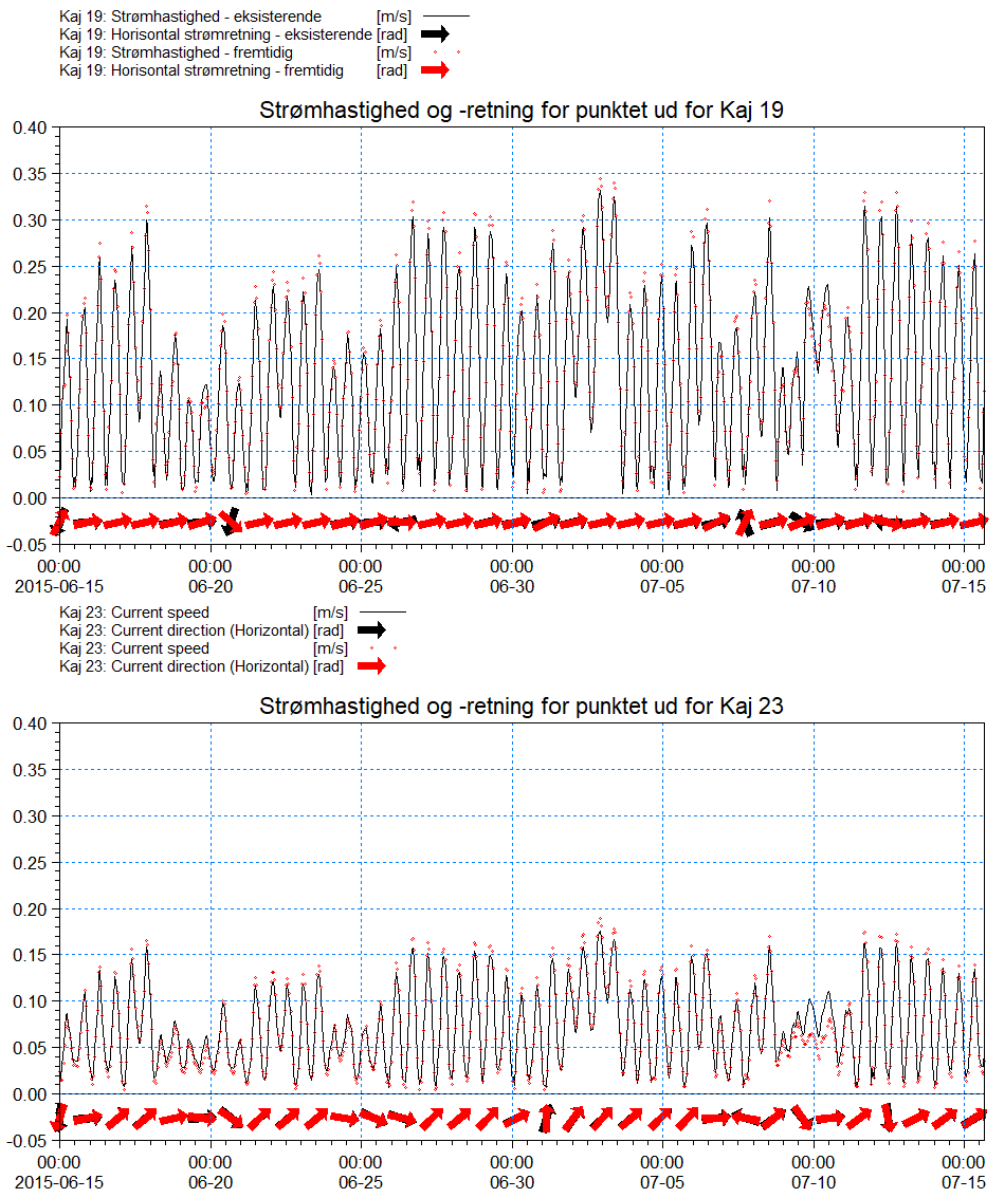
Figur 3-22 viser hvor der er udtrukket tidsserier for strømhastighed og retning i det øverste beregningslag. Strømhastighed og retning er vist i Figur 3-23 for to punkter der ligger ud for Centerhavnen og kaj 23 samt ud for den fremtidige kaj 19 forlængelse. Der ses af figurerne en lille forskel i peak værdier af størrelsesordenen cm. Derudover ses der en god overensstemmelse i retninger undtagen når strømmen vender.

I Figur 3-24 er vist tilsvarende tidsserier for tre ekstra punkter længere ude i Lillebælt. Ved det vestligste punkt 1, ses ingen forskel. For de øvrige punkter 2 og 3 ses en lille forskel af størrelsesordenen cm på peak værdierne. Strømrøtninger stemmer godt overens undtagen når strømmen vender hvor meget små variationer ses meget tydeligt.

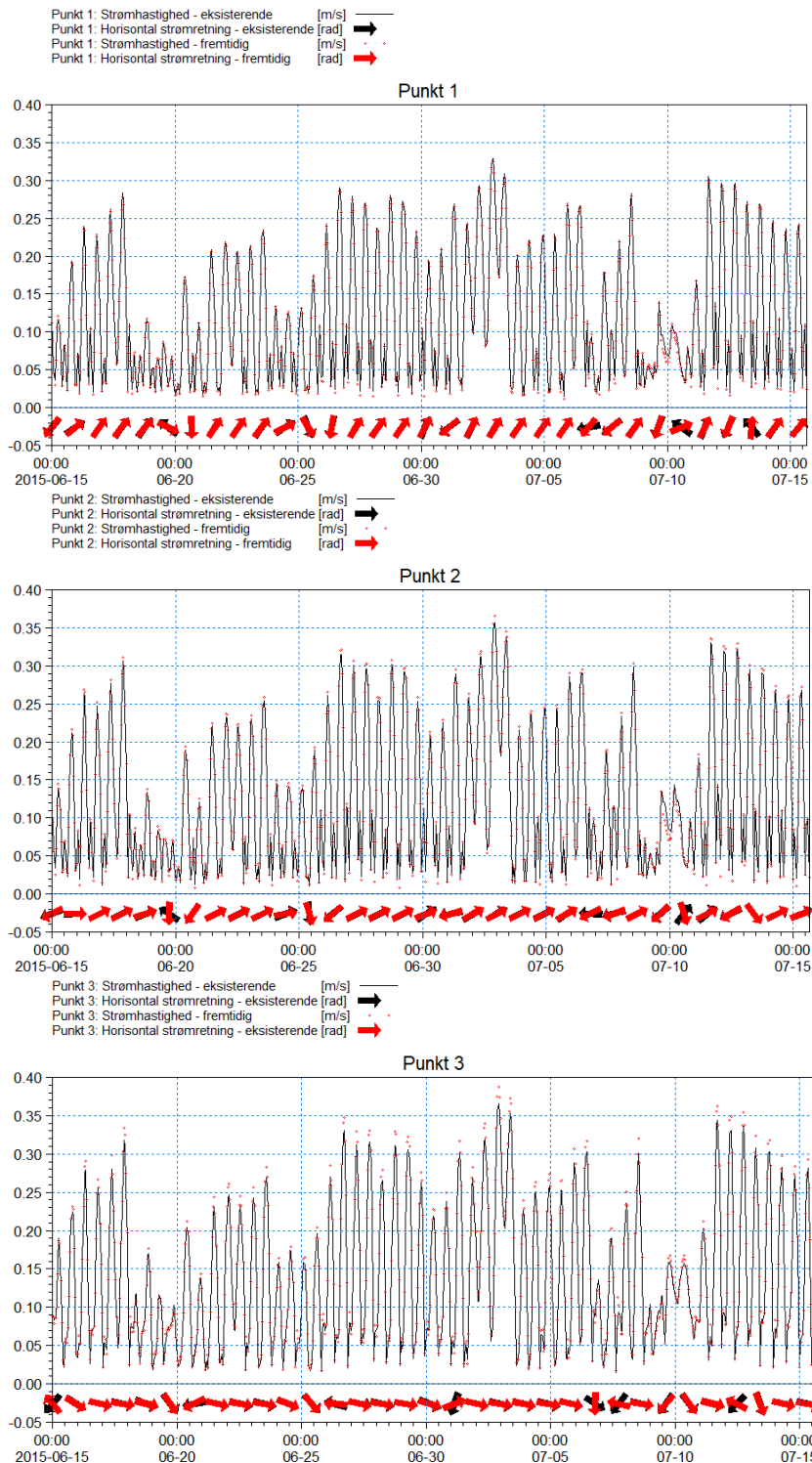
De simulerede forskelle i strømhastigheder vurderes til ikke at have nogen betydning for den overordnede strømning gennem Lillebælt.



Figur 3-22: Punkter hvor tidsserier er udtrukket for både eksisterende og fremtidige forhold.

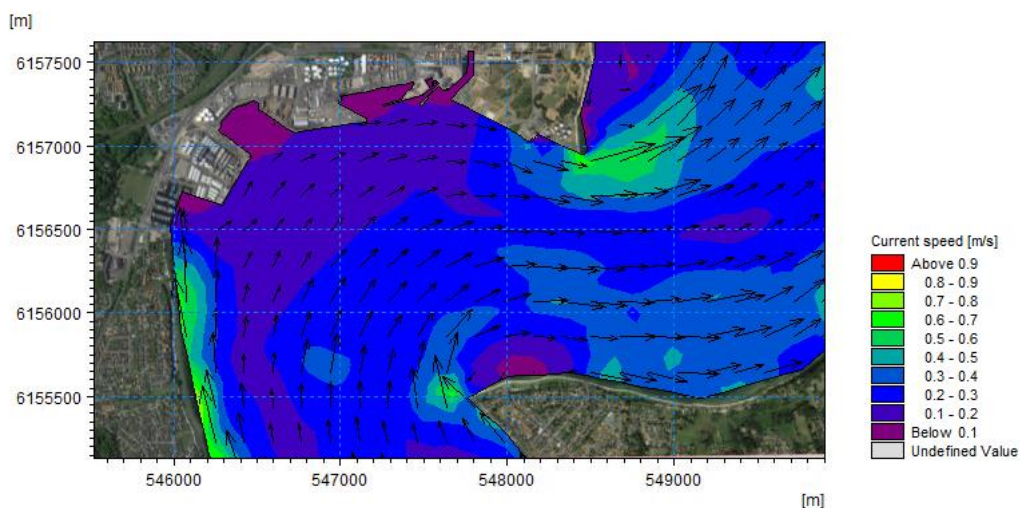


**Figur 3-23: Strømhastighed og retning i punkterne ud for kaj 19 og kaj 23 angivet i Figur 3-22. For eksisterende og fremtidige forhold.**

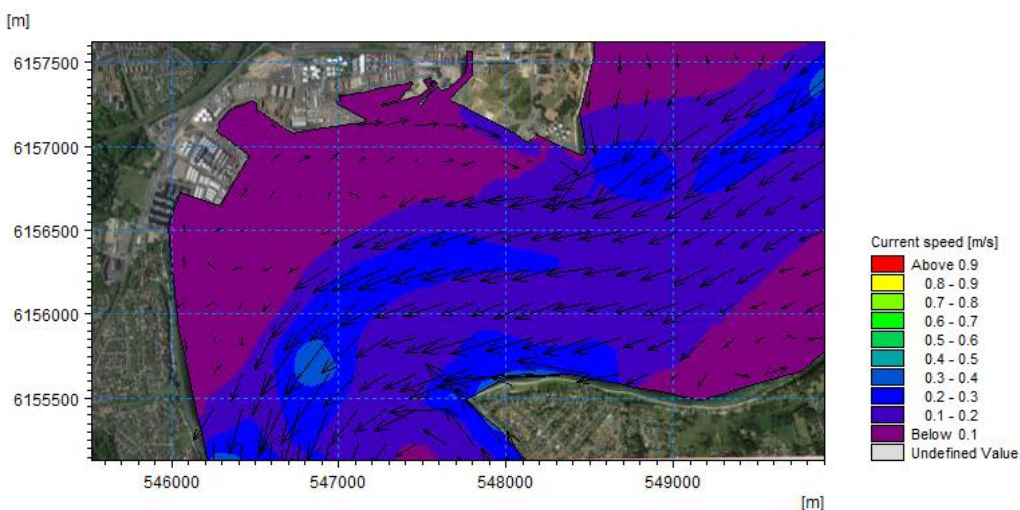


**Figur 3-24: Strømhastighed og retning i punkterne 1-3 angivet i Figur 3-22. For eksisterende og fremtidige forhold.**

Figur 3-25 viser et øjebliksbillede af overfladestrøm for en typisk nordgående situation mens Figur 3-26 viser et øjebliksbillede af overfladestrøm for en typisk sydgående situation. Der ses et tydeligt billede af, at strømmen inde foran havnen primært går med uret rundt i en hvirvel (dannelse af idvande ved sydgående strøm i Lillebælt). De største strømhastigheder ved havnen fås for nordgående strøm i Lillebælt. Inde i havnebassinene ses en meget lav strømhastighed.



Figur 3-25: Strømhastighed og retning for en primært nordgående hovedstrøm i Lillebælt.



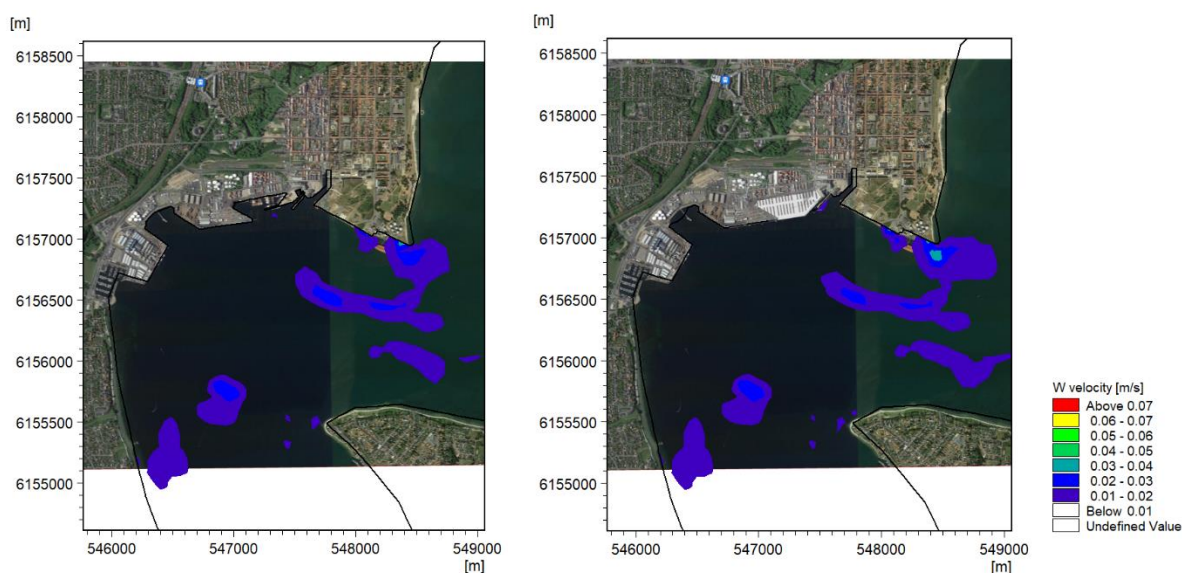
Figur 3-26: Strømhastighed og retning for en primært sydgående hovedstrøm i Lillebælt.

### 3.4.2 Vertikale opadgående strømninger

De vertikale strømforhold omkring kaj 19 og kaj 23 for de eksisterende og fremtidige forhold beskrives i dette afsnit. På Figur 3-27 ses de maksimale opadgående strømhastigheder. Figur 3-27 viser strøm for de eksisterende forhold ved kaj 19 og kaj 23 til venstre og de fremtidige forhold til højre.

Her ses den samme tendens som for de horisontale strømme, hvor der generelt er meget små ændringer i strømhastighederne. Der er ingen synlig ændring i området syd for Fredericia Havn men en meget lille ændring ved kaj 19 forlængelsen. Derudover ses en lille ændring ved Skanseodden øst for Fredericia Havn.

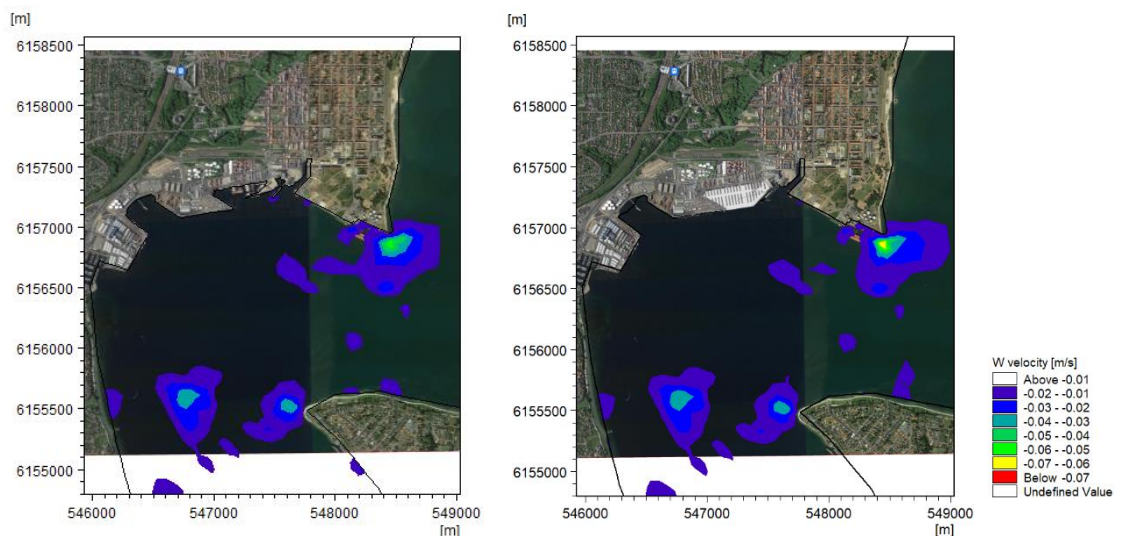
Generelt er ændringerne i strøm vurderet til at være meget små og uden en betydning for den vertikale opblanding eller erosionsforhold i øvrigt.



Figur 3-27: Den vertikale opadgående strøm for de eksisterende forhold til venstre og fremtidige forhold til højre. Samme skala på de to figurer. Markering for 'Below 0.01' vises ikke.

### 3.4.3 Vertikale nedadgående strømninger

Den vertikale nedadgående strøm er vist i Figur 3-28 for eksisterende hhv. fremtidige forhold. Her ses den samme tendens som i afsnit 3.4.2, nemlig at de nedadgående strømme for hhv. de eksisterende og fremtidige forhold i Lillebælt omkring Fredericia Havn kun i meget lille grad er ændret som følge af ændringerne i geometrien for havnen. Her ses det samme tendens som tidligere, hvor strømmen syd for Fredericia Havn ikke er påvirket af ændringerne i geometrien og der kun er en mindre ændring øst for Fredericia Havn nær Skanseodden. Ændringen vurderes ikke at have betydning grundet dens størrelsesorden og omfang.



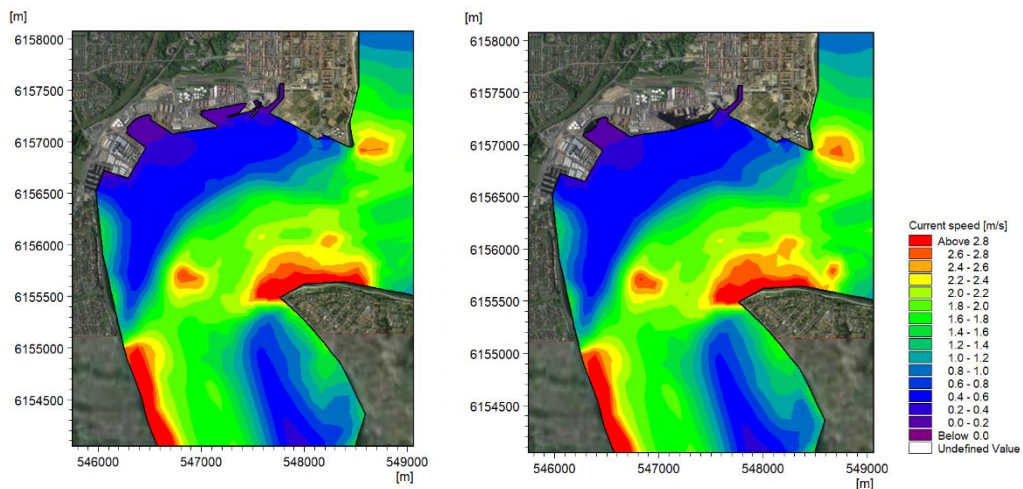
Figur 3-28: Den vertikale nedadgående strøm for de eksisterende forhold venstre og fremtidige forhold til højre. Samme skala på de to figurer. Markering for 'Below 0.01' vises ikke.

## 3.5 Resultater – ekstreme forhold

### 3.5.1 Horisontal strøm

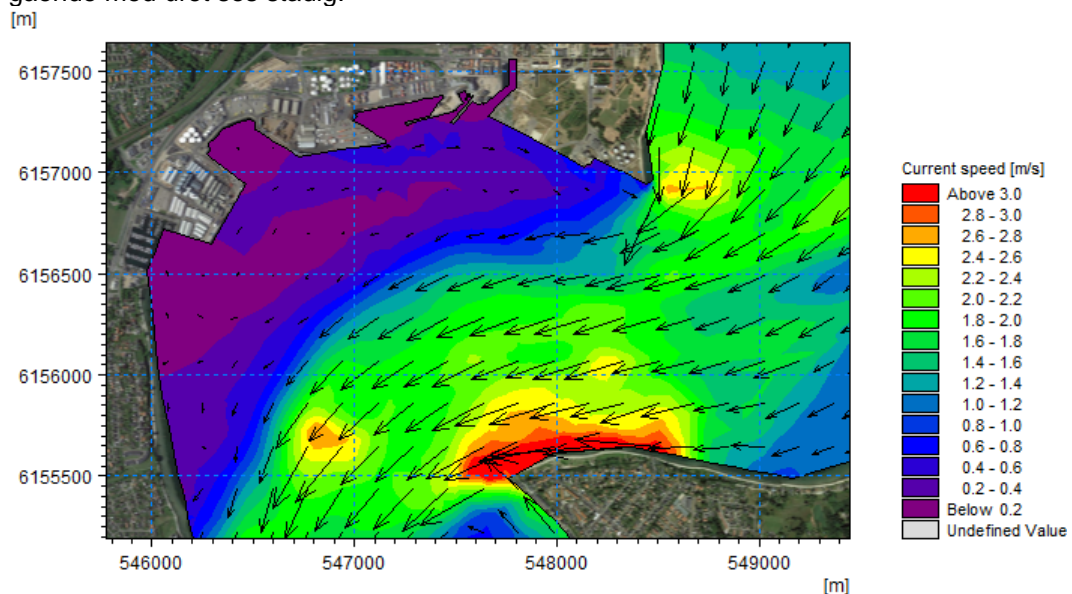
I dette afsnit redegøres det hvorvidt de horisontale strømforhold under ekstrem hændelse ændres som følge af en ændring af geometrien ved kaj 19 og kaj 23.

Figur 3-29 viser den horisontale strøm for eksisterende samt fremtidige forhold. Som det fremgår, er der en meget lille ændring i strømhastigheder. Det vurderes derfor, at de fremtidige forhold på havnen med den nye geometri ikke influerer væsentligt på strømmen i Lillebælt ifm. en ekstrem hændelse. Det skyldes i høj grad at den eksisterende udformning af havnen omkring kaj 19 påvirker strømmen i samme retning som den fremtidige udformning. For kaj 23 ligger det tilpas tilbagetrukket i havnebassinet til ikke at influere på strømmingen.



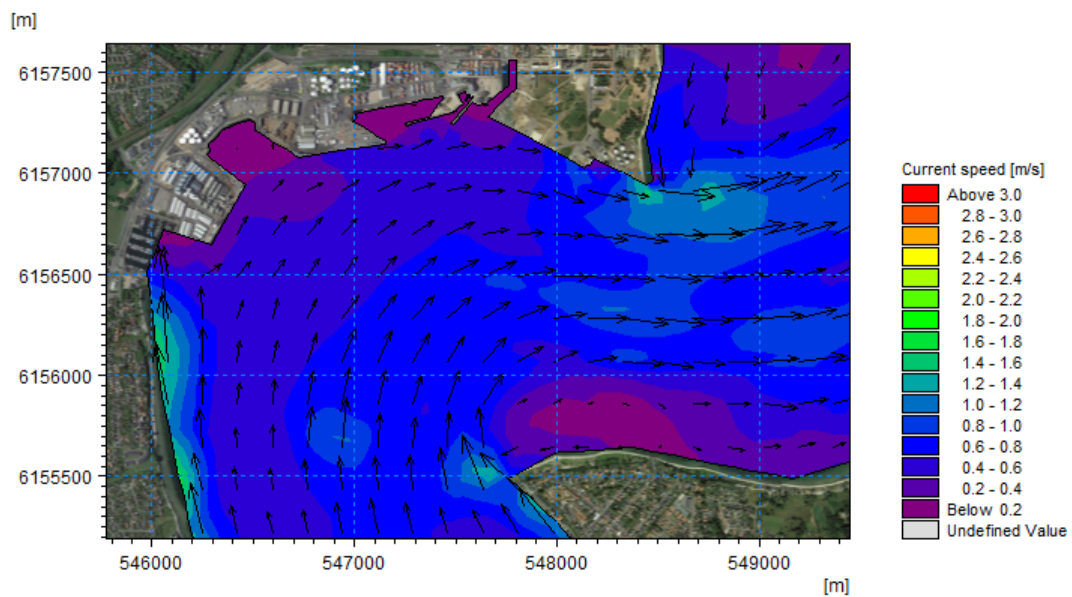
Figur 3-29: Maksimale strømhastigheder ifm. Bodil for eksisterende (tv.) og fremtidige forhold (th.).

Figur 3-30 viser et typisk strømmønster for den sydgående strøm mens Figur 3-31 viser et strømmønster for den nordgående strøm ifm. stormen Bodil. Hvirvlen foran havnen gående med uret ses stadig.



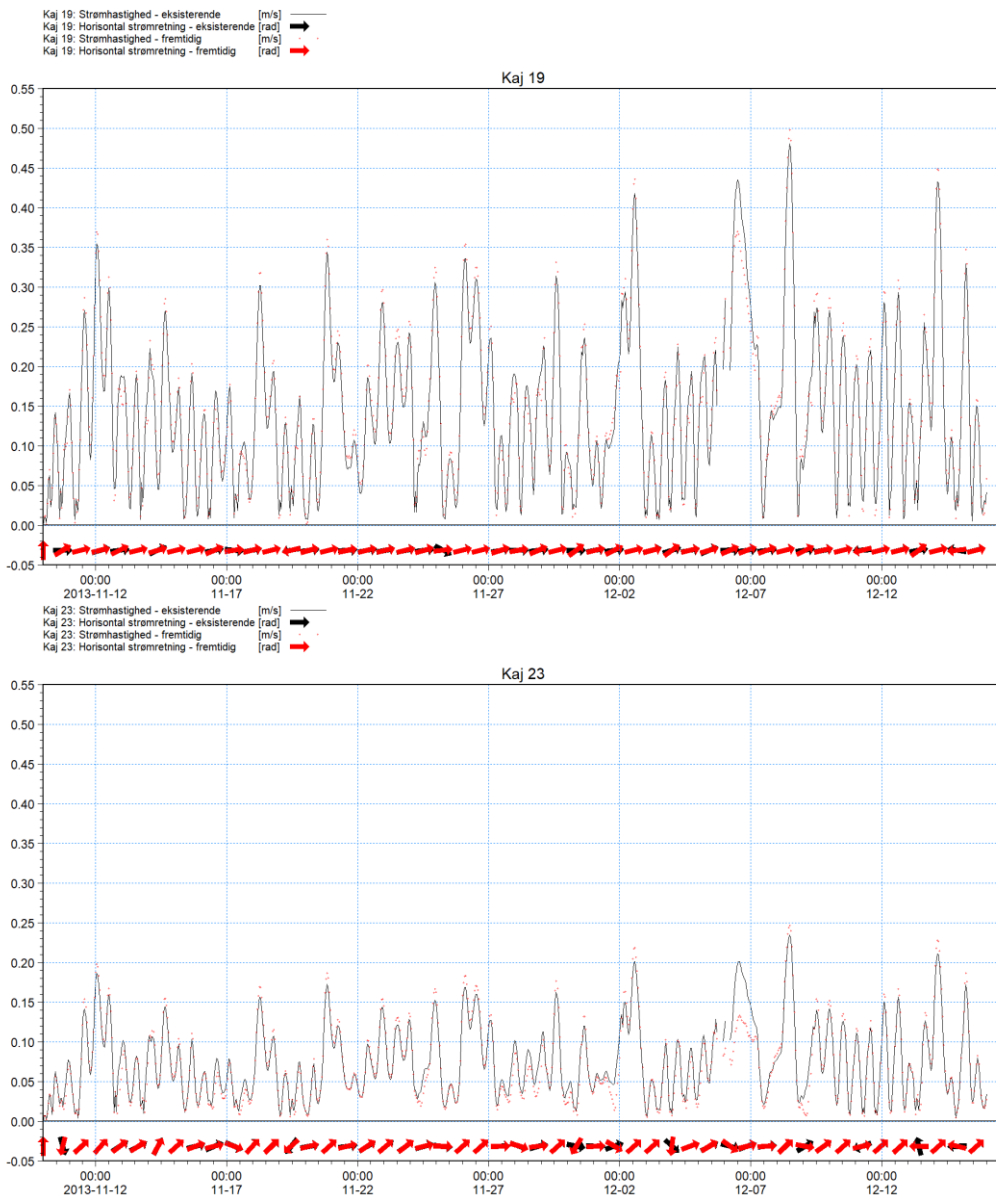
Figur 3-30: Typisk strømningsmønster ved ekstrem sydgående strøm ifm. Bodil stormen.



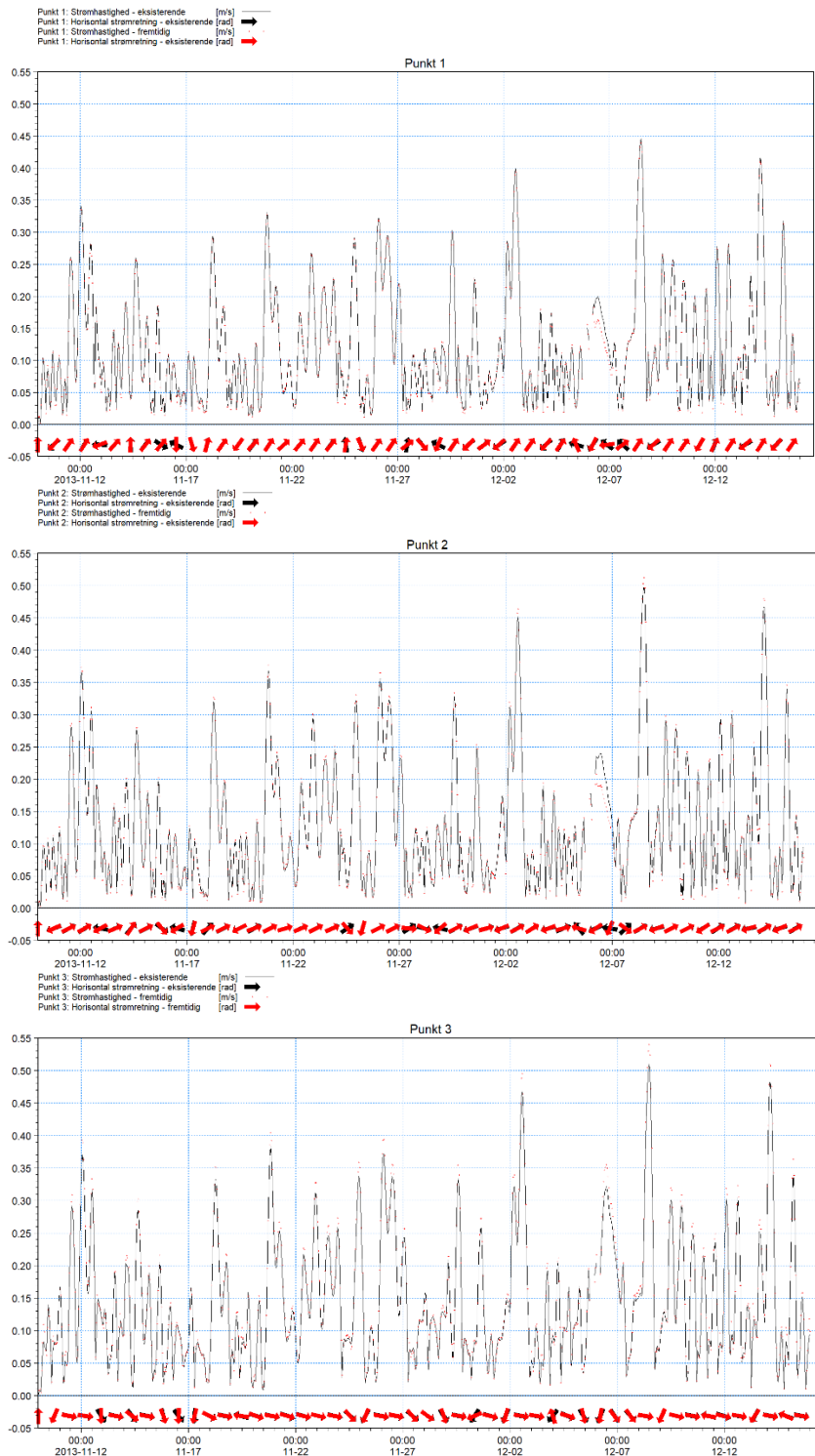


Figur 3-31: Typisk strømningmønster ved nordgående strøm ifm. Bodil stormen.

Figur 3-32 og Figur 3-33 viser strømshastigheder for eksisterende og fremtidige forhold i fem punkter ud for havnen. Som det fremgår, er der relativt små variationer i punkterne. Størst ændring er der på strækningen mellem kaj 19 og ud til Skanseodden mens der midt i Lillebælt ikke ses nogen signifikant ændring. Under ekstreme hændelser påvirkes området primært lokalt i havnen.



**Figur 3-32: Strømhastighed og retning i punkterne ud for kaj 19 og kaj 23 angivet i Figur 3-22. For eksisterende og fremtidige forhold.**



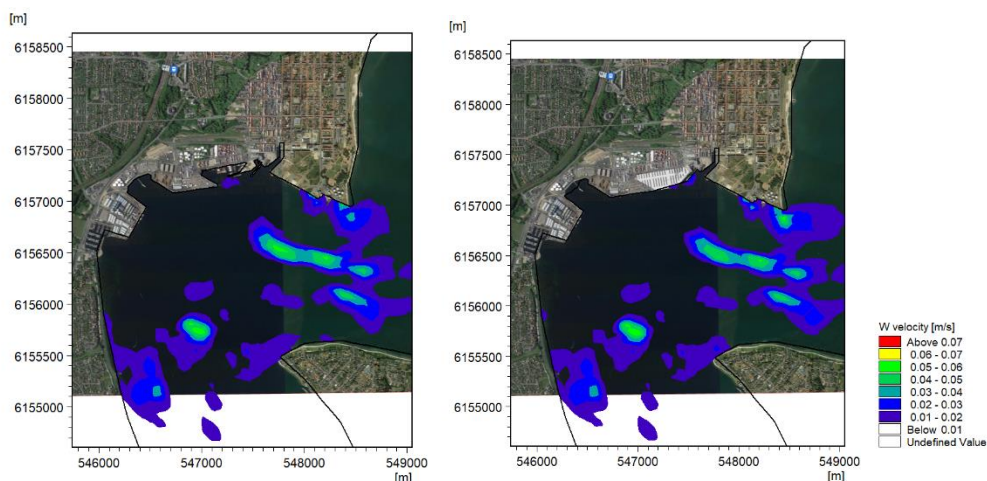
Figur 3-33: Strømhastighed og retning i punkterne 1, 2 og 3 angivet i Figur 3-22. For eksisterende og fremtidige forhold.

### 3.5.2 Vertikale opadgående strømninger

De vertikale strømforhold omkring kaj 19 og kaj 23 for de eksisterende og fremtidige forhold beskrives i dette afsnit. På Figur 3-34 ses de maksimale opadgående strømhastigheder. Figur 3-34 viser strøm for de eksisterende forhold ved kaj 19 og kaj 23 til venstre og de fremtidige forhold til højre.

Her ses den samme tendens som for de horisontale strømme, hvor der generelt er meget små ændringer i strømhastighederne. Der er ingen synlig ændring i området syd for Fredericia Havn men en meget lille ændring ved kaj 19 forlængelsen. Derudover ses en lille ændring ved Skanseodden øst for Fredericia Havn.

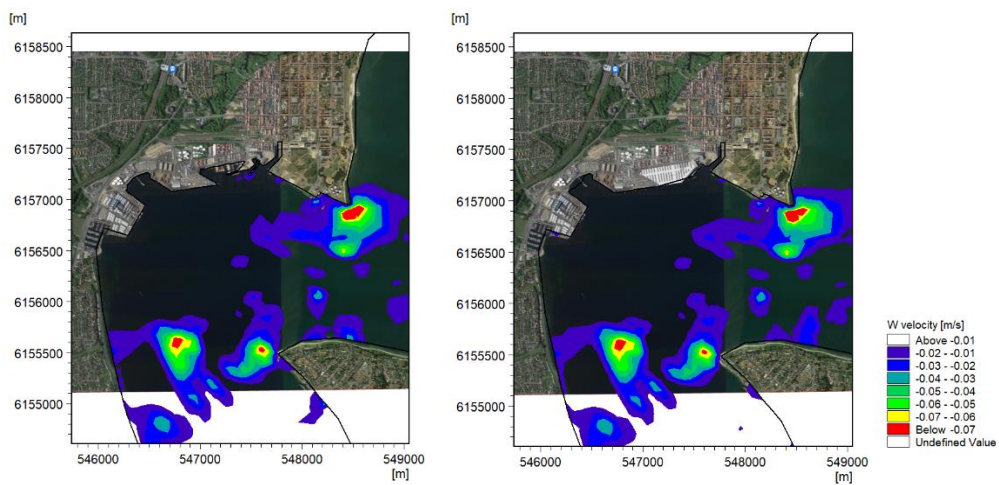
Generelt er ændringerne i strøm vurderet til at være meget små og uden en betydning for den vertikale opblanding eller erosionsforhold i øvrigt.



Figur 3-34: Den vertikale opadgående strøm for de eksisterende forhold til venstre og fremtidige forhold til højre. Samme skala på de to figurer. Markering for 'Below 0.01' vises ikke.

### 3.5.3 Vertikale nedadgående strømninger

Den vertikale nedadgående strøm er vist i Figur 3-35 for eksisterende hhv. fremtidige forhold. Her ses den samme tendens som i afsnit 3.5.2, nemlig at de nedadgående strømme for hhv. de eksisterende og fremtidige forhold i Lillebælt omkring Fredericia Havn kun i meget lille grad er ændret som følge af ændringerne i geometrien for havnen. Her ses det samme tendens som tidligere, hvor strømmen syd for Fredericia Havn ikke er påvirket af ændringerne i geometrien og der kun er en mindre ændring øst for Fredericia Havn nær Skanseodden. Ændringen vurderes ikke at have betydning grundet dens størrelsesorden og omfang.



**Figur 3-35: Den vertikale nedadgående strøm for de eksisterende forhold venstre og fremtidige forhold til højre. Samme skala på de to figurer. Markering for 'Below 0.01' vises ikke.**

## 4 Sedimentspredning

I forbindelse med projektet skal der uddybes i havneområdet ved begge kajer for at sikre geoteknisk stabile jordbundsforhold hvor der kan etableres nye kajer. Der er ved kaj 19 og kaj 23 stærkt sætningsgivende lag. Det skal i forbindelse med udarbejdelse af miljøkonsekvensvurdering klarlægges hvordan sediment spredes og dermed påvirker sårbare områder og natur i området. De væsentligste faktorer der har betydning for påvirkningen er:

- Sedimentation af materialet der uddybes. Beskrives gennem aflejring.
- Koncentration af materiale i vandsøjlen der kan påvirke dyrs evne til at se. Derudover vil selv meget små koncentrationer af fint materiale være meget synlige.
- Lysdæmpning pga. materiale i vandsøjlen kan påvirke fotosyntesen, som især er væsentlig for ålegræs. Den vurderes gennem koncentration af suspenderet materiale.

De to delprojekter forventes udført separat og effekten vurderes derfor individuelt.

Der er ikke kendskab til øvrigt marint uddybningsarbejde i området i samme forventede anlægsperiode og dermed tages der ikke kumulative effekter med i vurderingerne.

Til at vurdere spredning og bundfældning af sediment uddybet ved Kaj 19 og Kaj 23 anvendes strømodellen præsenteret i afsnit 3 suppleret med et modul kaldet MT (Mud Transport). Modulen kan beregne spredning af suspenderet kohæsionsjord, dvs. fint materiale. Materiale svarende til sand vil hurtigt synke til bunds mens mindre partikler svæver i længere tid i vandsøjlen og dermed kan transporteres længere af strømmen. Når materialet når havbunden vil det enten deponeres permanent eller midlertidigt afhængig af de lokale forhold som vanddybde, strømhastighed og bølgepåvirkning.

I dette afsnit uddybes grundlaget anvendt i sedimentspredningsmodellen samt resultater af numeriske simuleringer.

Det er besluttet at projektet ikke anvender klappning til bortskaffelse af opgravet sediment. I stedet skal materialet, der ikke kan indbygges pga. geotekniske parametre, sejles til spulefelt i Aalborg.

Anlægsarbejdets tidsplan er vist i Tabel 4.1. Der er i tabellen angivet tidsperioder længere end det forventes af hensyn til entreprenørens mulighed for at optimere processen inden for disse rammer. Som det fremgår, forventes uddybning af begge kajer at foregå i perioden ca. juni til november.

Område	Hovedaktiviteter	J	J	A	S	O	N	D	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D						
		u	u	u	e	k	o	e	a	e	a	p	a	u	u	u	e	k	o	e	n	l	g	p	t	v
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19						
Kaj 19	Anlægsfase																									
	Tilkørsel af materiale																									
	Etablering af inddæmning ved kaj 12-16																									
	Nedbrudning af centerpier og eksisterende kajer																									
	Uddybning																									
	Spunsramning																									
	Indpumpning af sand																									
	Betonarbejder																									
	Stenarbejder, bundsikring																									
	Etablering af pladser, aptering og belægning																									
	Etablering af støjvæg																									
Kaj 23	Anlægsfase																									
	Tilkørsel af materiale																									
	Nedbrydning af kemikaliekaj																									
	Uddybning																									
	Spunsramning																									
	Pæleramning																									
	Indpumpning af sand																									
	Stenarbejder, bundsikring																									
	Etablering af pladser, aptering og belægning																									
	Etablering af støjvæg																									
	Betonarbejder																									

Tabel 4.1: Anlægstidsplan for måneder benævnt fra juni, måned 1, til december, måned 19.

## 4.1 Projektbeskrivelse

### 4.1.1 Forhold ved kaj 19

I forbindelse med projektet er der udført geotekniske borer (se Ref. /5/) i punkterne som angivet i Figur 4-1. På figuren ses nye såvel som tidligere udførte borer. Boringerne består primært af følgende materialer:

- Boring 101: Ingen uddybning men primært grus og sand i de øverste lag.
- Boring 102: Sand (mellem) og fedt ler (Lillebæltslers)
- Boring 103: Sand (mellem) og fedt ler (Lillebæltslers)
- Boring 104: Sand (groft) og fedt ler (Lillebæltslers)

Det vurderes, at de øverste 1-2 meter af uddybningsmaterialet overvejende er friktionsmateriale (dvs. sand eller grus), som vil være indbygningseget. Der forventes en lille mængde gytje, som i omfang er angivet til ca. 5-12 cm tykkelse i nogle af miljøprøvetagningerne og for den ene geotekniske boring 104 af lidt større omfang som indhold i friktionsmaterialer. Det vurderes, at denne mængde ikke udgør en væsentlig påvirkning ifm. uddybning, da det for en stor dels vedkommende er indlejret under andet materiale og primært findes på randen af uddybningsområdet. For at minimere potentielt spild fra gytje skal der anvendes miljøgrab.

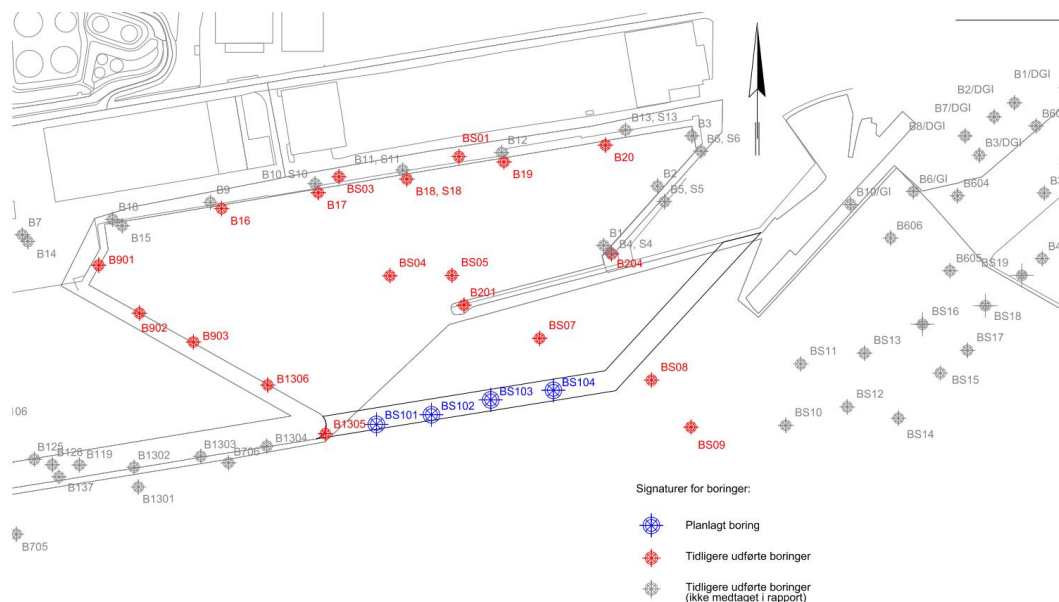
Grundet præcision i udførelsen af uddybningsarbejdet forventes det dog at ca. 50% af materialet potentielt kan indbygges bag kaj 19, mens den øvrige del (primært Lillebæltslers) skal sejles til spulefelt i Aalborg. Det vurderes at ca. 2.500 m<sup>3</sup> er forurenat

materiale, der overholder spulefeltets miljøkrav, men ikke kan indbygges bag kaj 19, selvom det er indbygningseget.

Den totale uddybningsmængde er estimeret til ca. 45.000 m<sup>3</sup>. Ca. 19.500 m<sup>3</sup> er geoteknisk og miljømæssigt indbygningseget materiale bestående af primært sand og sten med lille fraktion gytje og ler mens ca. 25.000 m<sup>3</sup> er ikke indbygningseget. Udgravningsdybderne er vist i Figur 4-2 og er på dybeste sted ned til -21 m.

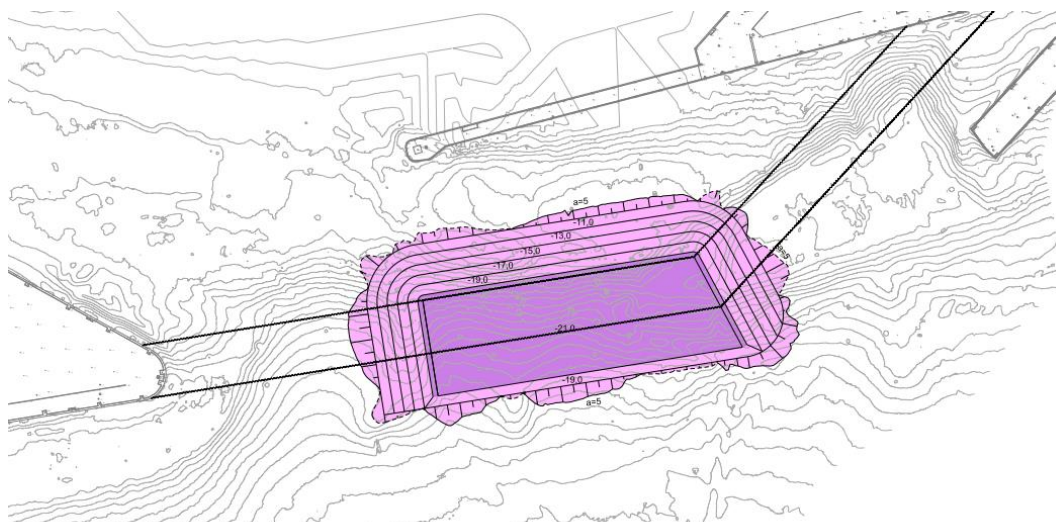
Der er stærk forurening i ca. 500 m<sup>3</sup> (baseret på areal af prøvetagningsfelt og en dybde på 0,3 m). Dette materiale opgraves med Miljøgrab (se Bilag 1: Præsentation af Miljøgrab) og beskrives nærmere i afsnit 4.2.2. Resterende mængde af toplag skal ligeledes graves med miljøgrab, da det indeholder mindre mængder af miljøfremmede stoffer og/eller gytje.

Erosionssikring udføres i en bredde på ca. 30 m langs forlængelsen af kaj 19 som angivet i Figur 4-3.



Figur 4-1: Placering af geotekniske boringer (Ref. /5/).





Figur 4-2: Uddybningsområde ved kaj 19. Der uddybes til kote -21 m DVR90.



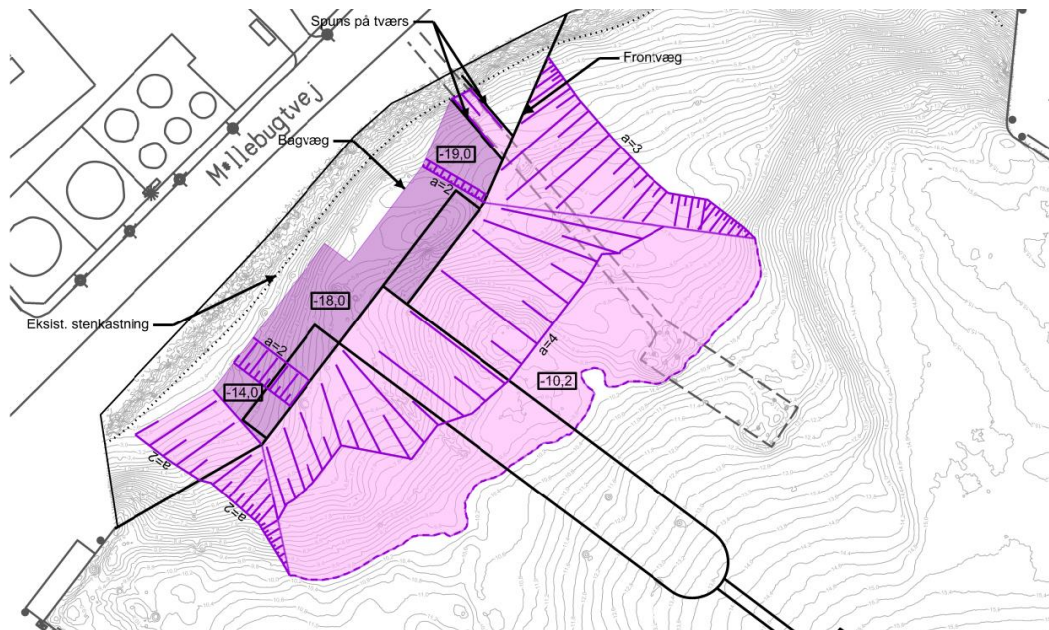
Figur 4-3: Opfyld og erosionssikring.

#### 4.1.2 Forhold ved kaj 23

I forbindelse med projektet er der udført geotekniske borer (se Ref. /6/) i punkterne som angivet i Figur 4-4.

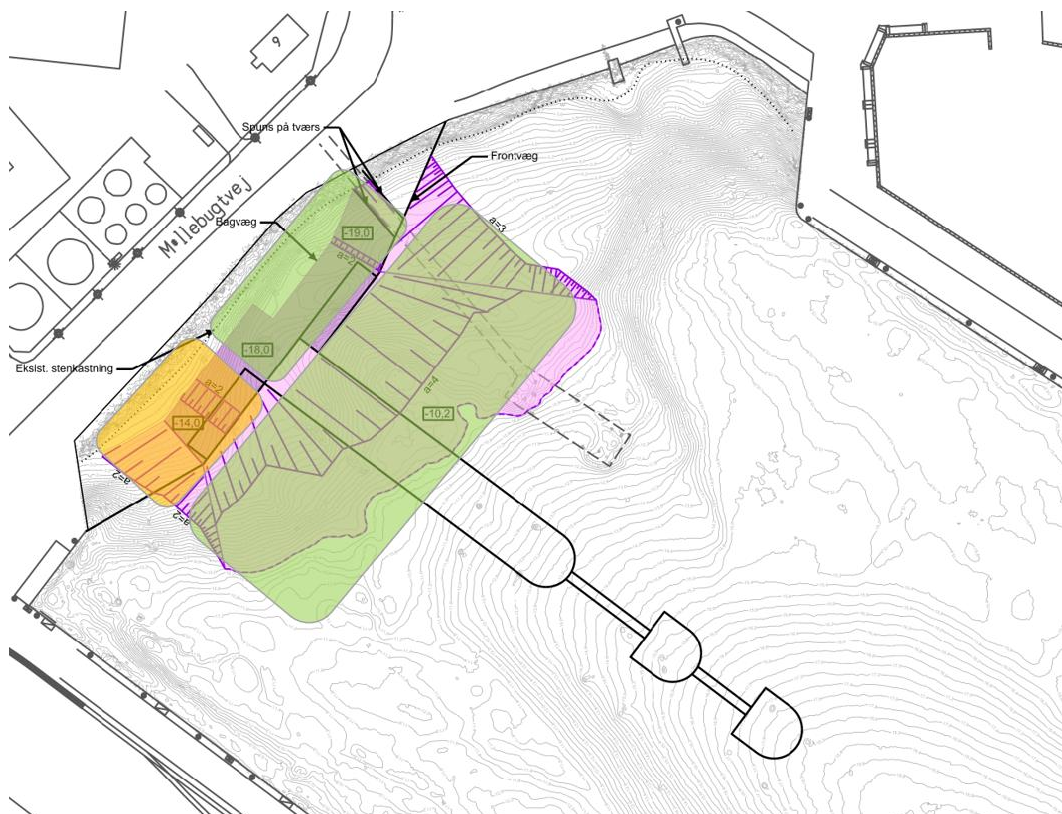
På figuren ses nye (blå) såvel som tidligere udførte borer.



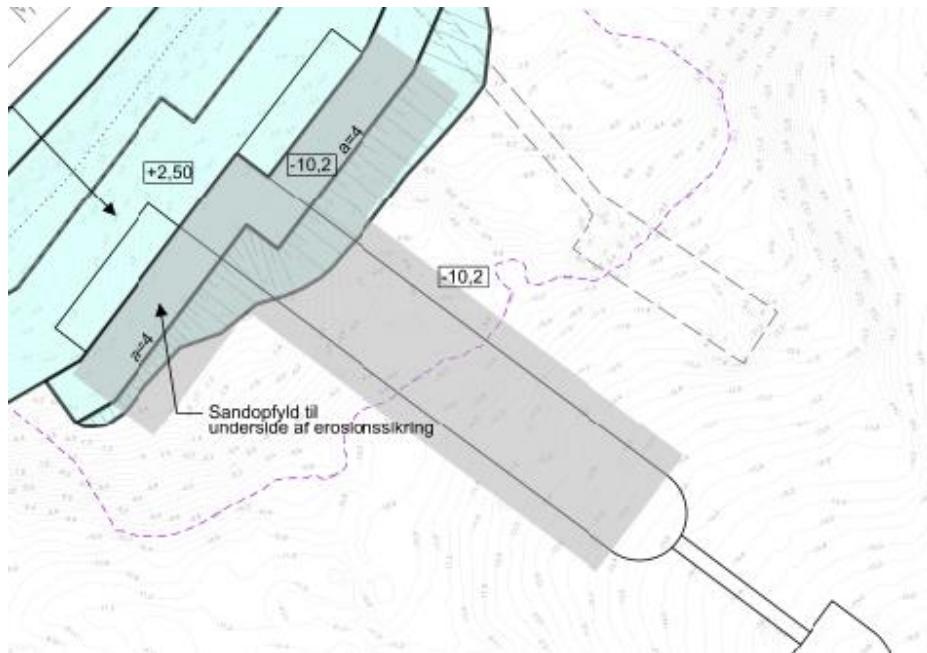


Figur 4-5: Uddybningsområde med angivne dybder.

Erosionssikring udføres som angivet i Figur 4-7.



**Figur 4-6: Oversigt over hvilke sedimenttyper der findes ved Kaj 23. Magenta markering er det område der skal uddybes. Sedimentet er beskrevet ved grønt område bestående af sandet gytje og under den gule farve er der siltet gytje.**



Figur 4-7: Erosionsbeskyttelse vist med grå raster. Uddybningsområdet er vist med stiplede linie.

## 4.2 Uddybningsprocessen og beskrivelse af sedimenter

Spild fra uddybningen stammer fra den del af sedimentet, som er kohæsionsjord. Kohæsionsjord består af små fine partikler (ler og silt), som generelt har lille bundfældningshastighed og dermed er lang tid om at bundfælde sig. Partikler af størrelsesordenen som sand vil relativt hurtigt synke til bunden igen og dermed ikke påvirke omgivelserne signifikant, da der ikke er lokal stærk strøm, der fører det væk fra uddybningslokaliteten. Kornstørrelser for sand mellem 0,06-2 mm vurderes at have en faldhastighed på ca. 0,004-0,2 m/s. Dvs. at det falder f.eks. 10 m på mellem 1 til 40 min svarende til at det ved en middelstrømhastighed på f.eks. 0,2 m/s vil bevæge sig 1 til 50 m fra uddybningen. Det primære spild sker tæt ved bunden, når grabben slipper bunden.

Der uddybes ikke ifm. ekstremhændelser, som potentielt kan give ekstreme strømme.

I dette studie estimeres omfanget af spredningen, som skal være med til at danne grundlag for en del af en miljøkonsekvensvurdering for den marine flora og fauna omkring Lillebælt.

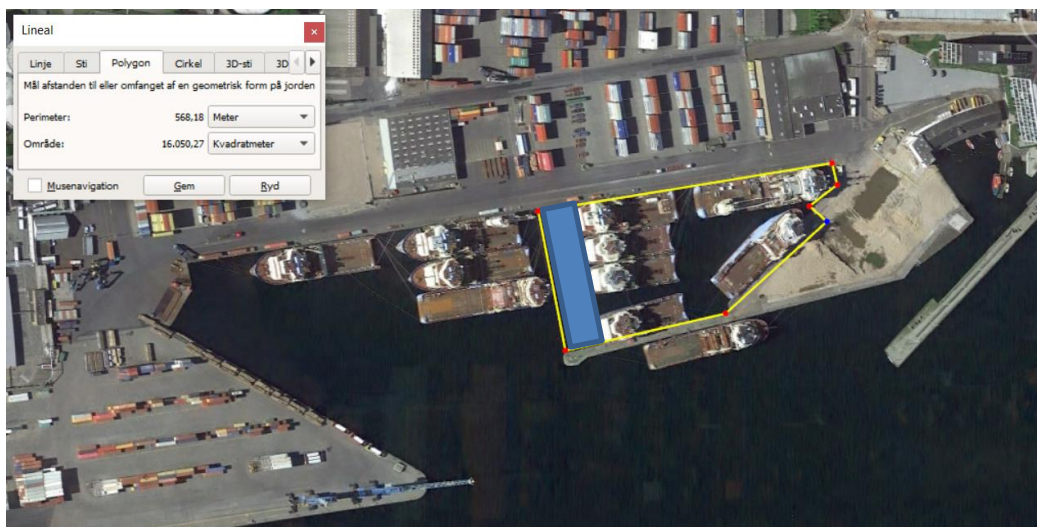
Det er indledningsvist antaget, at der uddybes først ved forurening ved kaj 19, overlappende med uddybning af sediment (indbygningseget geoteknisk og miljømæssigt), der placeres bag ved kaj 12-16, efterfulgt af resterende uddybning kaj 19 inden kaj 23 arealet uddybes. For begge kajer er det antal pramme og sejltiden til Aalborg, der er den begrænsende faktor for uddybningshastigheden. Derudover er der krav om, at uddybningen ikke sker om natten, da støjniveauet ikke tillader det: *"Støj-, støv- og vibrationsfrembringende aktiviteter, må kun udføres i følgende tidsrum: Hverdage mandag til fredag kl. 07:00-18:00 og lørdage kl. 08:00-14:00."*

### Kaj 19

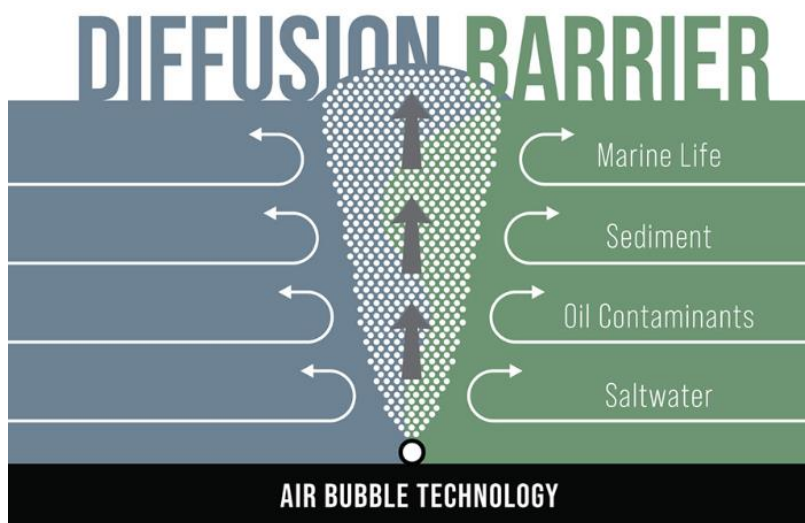
For kaj 19 skal der i alt uddybes ca. 45.000 m<sup>3</sup>, hvoraf ca. 500 m<sup>3</sup> er forurenede og derfor lægges i deponi på land, ca. 20.000 m<sup>3</sup> skal indbygges bag kaj 19 og ca. 25.000 m<sup>3</sup> skal sejles til Aalborg. Uddybningshastigheden er begrænset af hvor hurtigt prammene kan aftage materialet og sejle det til Aalborg. Det antages for denne spildmodel, at der benyttes fire pramme med en kapacitet på 500 m<sup>3</sup> hver, og at en tur-retur med slæbebåd tager ca. 2 døgn.

Det betyder, at uddybningshastigheden er begrænset til 1.000 m<sup>3</sup> pr. døgn for det materiale der skal sejles til Aalborg (lørdage reduceret til 6 t arbejde). Da det kun er en del af de 45.000 m<sup>3</sup> der skal sejles til Aalborg og den anden del der skal indbygges bag kaj 19, antages dette at kunne uddybes imens der ikke ligger nogen pram. Det betyder, at den samlede uddybningshastighed antages at være det dobbelte, altså ca. 2.000 m<sup>3</sup> pr. døgn. Dette vurderes at være et konservativt scenarie i forhold til koncentrationer i vandet. Der kan ligeledes under udførelse være vejrlig der gør at transport indstilles, hvilket ligeledes vurderes som konservativt ift. koncentrationer af opslæmmede sediment.

Figur 4-8 viser området hvor indbygningsegnet rent materiale placeres. Der lægges indledningsvist en 3-5 m høj sandpude på havbunden (havbund ligger i ca. -7,5 m-9 m), der sikrer at materialet, ikke 'løber' langs bunden og ud i Lillebælt. Sandpuden etableres så den er stabil over for eventuel bølge- og skruepåvirkning. Oven på sandpuden etableres der boblegardin (se Figur 4-9), som endnu en foranstaltning der sikrer, at der ikke spildes materiale ud i Lillebælt, når det placeres. Der er meget lidt strøm i dette indelukkede område så selv uden boblegardin forventes en meget lille spredning af finkornet sediment. Efterfølgende vil hele området bag den nye kaj blive fyldt op med geoteknisk og miljømæssigt indbygningsegnet materialer. Arealet af indelukket medfører at det opgravede materiale vil få en højde på ca. 2 m over eksisterende havbund.



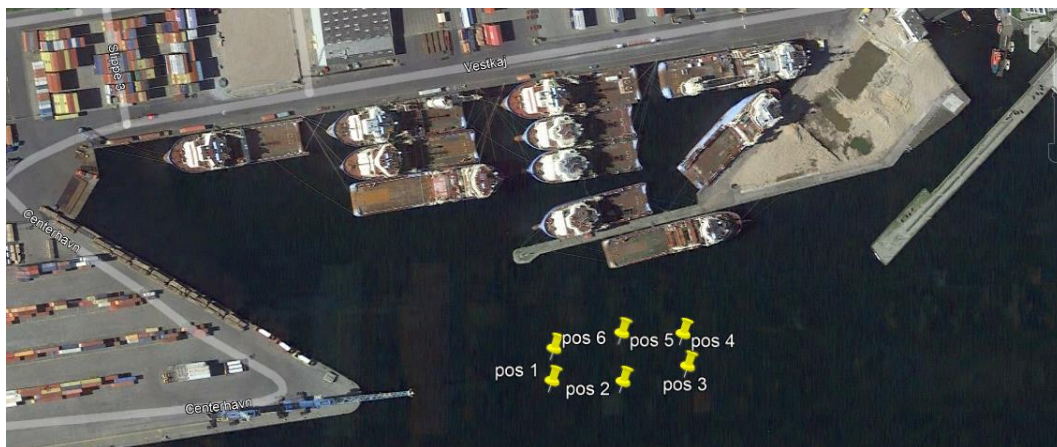
**Figur 4-8:** Område hvor der kan tilføres materiale bag forlænget kaj 19 vist med gul polygon. Den blå markering viser etablering af sandpude på 3-5 m over havbunden der skal begrænse spild mod Lillebælt, på top af sandpude etableres boblegardin.



**Figur 4-9:** Principskitse af boblegardin. De konstant opstigende bobler skaber en effektiv barriere der forhindrer passage af sediment, samtidig med at f.eks. skibe uproblematisk kan passere gardinet.

I spildmodelleringen er uddybningsfartøjets position skiftende i løbet af uddybningsprocessen for at spildmodelleringen er repræsentativ for hele uddybningsprocessen. De 6 positioner hvor uddybningsfartøjet er placeret kan ses på Figur 4-10.

Uddybningsprocessen forløber i simuleringerne fra starten af juni og ca. en måned frem. I anlægstidsplanen er der afsat mere tid for at give entreprenøren mulighed for optimering af arbejdet og tage højde for evt. vejrlig ift. transport til Aalborg. Tager arbejdet længere tid medfører det potentielt lavere koncentrationer.



Figur 4-10: Positioner for uddybning i MIKE3 HDFM Mud Transport modulet.

### Kaj 23

For Kaj 23 skal der uddybes ca. 52.000 m<sup>3</sup> og det hele skal sejles til spulefelt ved Aalborg. Der simuleres med tilsvarende metode for Kaj 19.

Men pga. gytjens struktur og svæv ønskes der under alle omstændigheder afværgeforanstaltning introduceret. Spildet forventes at være i størrelsesordenen <5%. Ved kaj 23 anbefales det yderligere at uddybe med miljøgrab, da materialet ikke har nogen struktur og vil virke flydende under håndtering af det, hvilket en miljøgrab bedst vil kunne håndtere.

Det antages, at uddybningshastigheden er 1.000 m<sup>3</sup> om dagen, da det er begrænset af antallet af pramme samt tiden en slæberunde tager. Med antagelse om anvendelse af pramme som ved kaj 19 betyder det, at uddybningen kommer til at vare i alt ca. 2½ måned for kaj 23. Også for kaj 23 viser anlægstidsplanen en lidt længere periode der skal tage højde for evt. vejrlig samt optimering af processen.

Det er i afsnit 4.3.2 lavet et konservativt estimat på den potentielle mængde gytje fra uddybning ved kaj 23, som kan nå Lillebælt og potentielt forstyrre den omkringliggende marine flora og fauna.

#### 4.2.1 Sediment ved kaj 19

Sediment ved kaj 19 består af et toplag oven på ler. Toplaget beskrives som sand, grus og en meget begrænset mængde gytje jf. afsnit 4.1. Den rene mængde af toplaget opgraves med miljøgrab til pram og lægges ind bag sandpuden ved kaj 12-16. Baseret på materialet (ikke kohæsionsmateriale) samt anvendelse af miljøgrab vurderes det, at arbejdet medfører insignifikant spild til omgivelserne. Det materiale der eventuelt spildes forventes at synke til bunds ved uddybningsområdet.

Af afsnit 4.1 ses det, at der primært optræder meget fed ler (Lillebæltsler) under toplaget ved Kaj 19, som vurderes at have en meget lille spildprocent ifm. uddybning. Der er ikke



nogen erfaringstal for spild ved uddybningsarbejde i denne type ler. Derfor er der udtaget en prøve fra den geotekniske boring 103 i en dybde svarende til kote -23 m (prøve 185, 25 m under dæk, dæk i +2 m). Det er det øverst liggende Lillebæltsler i A-rør fra borerne ved kaj 19. Materialet benyttes til at lave Andresenrør-forsøg for at kunne bestemme en spildprocent for netop dette materiale.

I forsøget er ler fra boreprøven revet til 4 mm flager og alt materiale fra denne proces er hældt i et Andresenrør med en vandsøjle på 1,9 m og saltvand fra Lillebælt (maj måned). Det revne materiale hældes i som vist på Figur 4-11.

Ud fra Andresenrør-forsøget ses det, at der ikke er noget synligt svæv eller uklarhed i vandet fra den tilsatte ler, som endda er blevet fundet. Det kan heraf konkluderes, at de kohæsive kræfter i leren er tilstrækkelige til at modvirke udvaskning i vandet uafhængig af uddybningsmetode og uafhængig af hvor finkornet materialet er. Det skyldes bl.a. at klorider fra havvand hærder ler, det får lavere plasticitetsindeks og derved opnås en endnu fastere og mere sammenhængende ler. Derudover er vandindholdet langt under flydegrænsen for normalt ler. Under uddybningsarbejder vil materialet dermed ikke blive opslæmmet, som det normalt ses ved andre materialer. Generel beskrivelse af Lillebæltsler og term forklaring kan ses i Ref. /8/ og Ref. /9/.

Ud fra forsøget er det bestemt, at der er et meget begrænset til ingen spild uafhængig af metode, og at spildprocenten vurderes konservativt til 0,1%, hvilket er indsat i spildmodellen. Det er dermed valgt at simulere materiale med en faldhastighed på 0,6 mm/s svarende til groft silt, dvs. materiale i noget større fraktioner end ler partikler, da det forventes at de ikke svæver frit enkeltvis – de kohæsive kræfter er simpelthen for store til, at materialet deles i små enkelt fraktioner. Tørvægt af materialet svarer til svagt konsolideret mudder (Ref. /3/). Det forventes, at uddybning i Lillebæltsler kan udføres med alm. grab.

Primære input parametre er angivet i Tabel 4.2. Faldhastigheder baseret på de beskrevne forsøg for det aktuelle materiale.

Parameter	Værdi	Enhed
Fraktion	Ler	-
Faldhastighed	0,6	mm/s
Vandets densitet	1010	kg/m <sup>3</sup>
Partikel densitet	2650	kg/m <sup>3</sup>
Bundruhed	0,001	m
Kritisk forskydningsspænding [Deposition]	0.07	N/m <sup>2</sup>
Kritisk forskydningsspænding [Erosion]	0.1	N/m <sup>2</sup>
Erosions koefficient	5e-05	[kg/m <sup>2</sup> /s]
Havbundsdensitet	180	Kg/m <sup>3</sup>
Spildprocent for Lillebæltsler	0,1	%

Tabel 4.2: Input parametre til spildmodellen.



Figur 4-11: Test udført med Andresenrør. 43 g Lillebæltssler er revet i 4 mm tykke flager og hældes i et rør med 1,9 m vandsøjle bestående af vand fra Lillebælt. Billede 1 og 2 er umiddelbart efter at det er hældt i røret, billede tre er efter at røret vendes med bunden i vejret og alt materiale igen synker gennem vandsøjlen.

#### 4.2.2 Miljøfremmede stoffer ved tidligere dokgrav, kaj 19

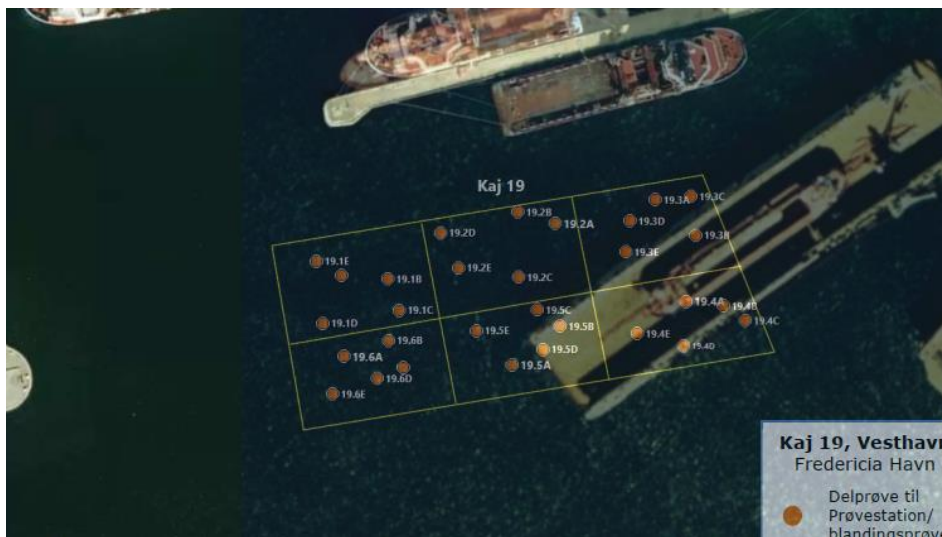
Miljøundersøgelsen er gennemført af Naturfocus (se Ref. /12/) efter afstemning med, og godkendelse af, Miljøstyrelsen. Undersøgelsen er udført ved at dykkere har nedpresset kajakrør i bunden og det opsamlede materiale er efterfølgende bragt til overfladen for vurdering og miljømæssig prøvetagning.

Prøvetagningen har primært vist forekomst af TBT, og i en enkelt prøve kobber, i koncentrationer over Miljøstyrelsens øvre aktionsniveauer. Kobber er truffet i alle øvrige prøve i koncentrationer over Miljøstyrelsens nedre aktionsniveau ligesom der i enkelte prøver er truffet bly, zink og PCB i koncentrationer lige over det nedre aktionsniveau.

Kornstørrelsesfordelingen i undersøgelsesområdet er relativt ensartet og består generelt af ca. 20% ler/silt. Størstedelen af materialerne i alle delområder er fint sand og sand samt en mindre andel fint grus på ca. 10 %. Delområde 19.6 adskiller sig dog ved et relativt højt indhold af grus og småsten. (Det skal dog bemærkes, at de enkelte Kajakstik til en vis grad er subjektivt valgt af dykkeren grundet de betydelige forekomster af skærver og sten i undersøgelsesområdet jf. Ref. /12/).

Sammenholdes lokaliseringen af miljøundersøgelsens prøvetagningsfelter med den tidligere placering af værftets flydedok (se Figur 4-12), ses det at det kraftigst påvirkede felt er lokaliseret ved enden (indsejlingen) til flydedokken. I forbindelse med drift (hævning/sænkning) af flydedokken har det primært været i dette område, at materiale fra dokken er blevet skyllet ud og dermed har påvirket havbunden mest. Påvirkningen af området generelt må således forventes at være mere diffust og der forventes samtidig ikke at forekomme kraftige punktkilder indenfor området.

Omvendt så viser spredningsmønstret også, at de påviste forekomster af miljøfremmede stoffer foreligger på en form der sedimenterer forholdsvist hurtigt og at der dermed ikke kan forventes en væsentlig spredning i forbindelse med den planlagte håndtering.



**Figur 4-12: Tidligere placering af værftets flydedok, sammenholdt med miljøundersøgelsens prøvetagningsfelter Ref. /12/. Det kraftigst belastede område (19.5, midt forned) er lokaliseret under flydedokkens åbning/indsejling.**

Alle de trufne miljøfremmede komponenter vurderes at være partikelbundne, hvorfor mobiliteten af stofferne primært vil være associeret til sedimenttransporten. Det er ligeledes vurderingen, at den påviste forekomst af miljøfremmede stoffer vil være forekommende i de øverste aflejringer som følge af sedimentation over mange år. Der vurderes ikke, bl.a. p.g.a. den store dybde (ca. 13 m), at have været påvirkning af topsedimentet med nylig skrueaktivitet, hvorfor væsentlig opblanding i selve toplaget ikke forventes i nævneværdig grad. Hverken for nuværende forhold eller fremtidige forhold der inkluderer den nye kaj med de deraf følgende strømforhold.

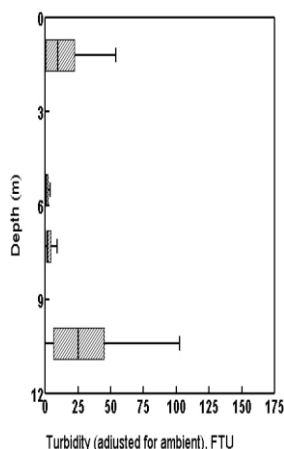
Det er et ønske, at den nødvendige håndtering af toplaget medfører så lille påvirkning af de omkringliggende områder som muligt. Suspendering af materiale i forbindelse med håndteringen skal således begrænses i videst muligt omfang. Toplaget i uddybningsområdet består generelt, primært af sandede materialer. Dette er både påvist ved sedimentundersøgelsen Ref. /12/ og i de geotekniske borerer Ref. /13/. Der er et meget lille lag af gytje der under opgravning indlejres i sand og grus.

Fjernelse af toplaget vurderes muligt at gennemføre ved anvendelse af "miljøgrab" eller ved opsugning bl.a. som beskrevet i Ref. /19/. Begge grundlæggende metoder vurderes at kunne anvendes under de givne forhold og vil reducere suspenderingen af materiale i forbindelse med flytningen til ganske få %. Jf. Miljøstyrelsen (Ref. /20/) reducerer anvendelse af miljøgrab spredningen med mellem 30-70%. Miljøgrabben er forholdsvis tidskrævende, men vil resultere i et optaget materiale med et relativt lille indhold af vand, der efterfølgende skal håndteres og det forventes ikke at forsinke uddybningen. Opsugning er hurtigere, men vil medføre at der samtidig genereres store mængder vand, der potentielt er påvirket af opløst miljøfremmede stoffer. Udformningen og funktionaliteten af sugehovedet er desuden essentiel i forhold til at mindske suspendering af materiale. Det vurderes at fjernelse af toplaget skal udføres med miljøgrab, for at sikre mindst mulig spredning.

Gennemgang af opdateret viden, bl.a. ved US-EPA ([Link](#)), indsamling af praktiske erfaringer ved Kystdirektoratet (opnået i forbindelse med uddybning af 6. bassin i 2016 <sup>1</sup>) samt samtaler med udførende entreprenører, har resulteret i, at den optimale metode til fjernelse af toplaget er identificeret til opgravning ved anvendelse af en "Miljøgrab". En præsentation af Miljøgrabben er vedlagt i Bilag 1: Præsentation af Miljøgrab.

Udfordringen i relation til sedimentspredning ved anvendelsen af miljøgrab er senest, juli 2015, gennemgået og vurderet af US Army Corps of Engineers © Ref. /14/. Her henvises der primært til tidligere anbefalinger Ref. /15/ og den heri bagvedliggende dokumentation Ref. /16/. De seneste teknologiske optimeringer, som præsenteret i bilaget, er således ikke vurderet og indarbejdet i baggrundsmaterialet. Det er således meget sandsynligt at anvendelse af en nyere, optimeret konstruktion af miljøgrab vil medføre en yderligere reduktion i suspendering af materiale, i forhold til alm. åben grab, på mere end de påviste ca. 80%. I Ref. /16/ er det påvist, at størstedelen af frigivelsen af sediment, ved anvendelse af lukket grab, forekommer ved bunden (i forbindelse med selve afgravningen) samt i toppen af vandsøjlen (sandsynligvis gennembrud af overfladen) – se Figur 4-13. Udformningen af de nyeste udgaver af miljøgrabben har bl.a. reduceret udslippet ved gennembrud af vandoverfladen, hvormed den væsentligste påvirkning således er relateret til selve arbejderne ved bunden hvilket vil resultere i hurtig gensedimentering af materialet og dermed minimal spredning.

<sup>1</sup> Redegørelse til Esbjerg Kommune om oprensningen i Esbjerg Havn jf. påvirkningstilladelse, Journal nr. 15/11253. Kystdirektoratet, 17. februar 2017. Ikke publiceret.



**Figur 4-13: Bestemmelse af turbiditet ved brug af lukket grab (Ref. /16/). (FTU = Formazin Turbidity Unit, høje værdier betyder uklart vand).**

Der er i Ref. /16/ foretaget konkrete bestemmelser af koncentrationen af suspenderet materiale ved brug af de daværende typer af grab. Laveste konkrete måling af koncentration af suspenderet sediment i forbindelse med opgravning af bundmateriale ligger på 14 mg sediment/l – med et gennemsnit, opgjort over arbejdet i hele vandsøjlen, på 31 mg/l. En antagelse om at arbejder med opgravning af materiale med miljøgrab, ved indarbejdelse af de seneste teknologiske forbedringer, vil medføre en sedimentfrigivelse på i størrelsesordenen af ca. 30 mg/l vurderes således med god margin at kunne repræsentere det forventede arbejde.

Miljøundersøgelsen Ref. /12/ har vist, at det gennemsnitlige indhold af TBT i toplaget er ca. 740 µg TBT/kg tørstof. Sammenholdes disse værdier vil opgravningen af toplaget således medføre en umiddelbar påvirkning af vandsøjlen med en koncentration af TBT på op til 0,022 µg/l. Miljøstyrelsen har senest i 2021 Ref. /17/ videreført EU-Kommissionens kravværdier for TBT i miljøet. Korttidskriteriet for TBT i havmiljøet er således fastsat til 0,0015µg/l. Den umiddelbare påvirkning af vandsøjlen er således ca. 15 gange større end kvalitetskriteriet. Den faktiske påvirkning vil dog være væsentlig lavere pga. opblandingen, da der kun forekommer en påvirkning fra/ved området omkring skovlen, når denne er nedsænket i vandet. Den del af vandsøjlen hvor skovlen ikke befinder sig vil ikke være påvirket – ligesom der ikke vil forekomme en påvirkning i al den tid hvor skovlen er uden for vandsøjlen (tømning af indhold på transportenhed, ventetid på tømning af transportenhed samt repositionering for ny opgravning). I praksis vil der således både vertikalt – og navnlig tidsmæssigt – forekomme en stor fortynding af den del af vandsøjlen der er påvirket. I uddybningsområdet vil dette, i forbindelse med den normale arbejdsprocedure for opgravning af toplaget, medføre en stor initial opblanding. Denne vurderes at medføre en fortynding med mindst en faktor 15 hvormed den reelle påvirkning, for arbejdsproceduren som helhed, vurderes at kunne udføres indenfor rammerne af Miljøstyrelsen kvalitetskriterier.

Det materialebundne TBT der eventuelt spildes vil grundet materialets sammensætning af relativt groft materiale hurtigt falde til bunds og deponere tæt på opgravningsstedet. Som nævnt er der meget lille forekomst af gytje, der er indlejret i de øvrige materialer.

Baseret på øvrige erfaringer med opgravning af toplag fra arealer med tidligere "havneaktiviteter" anbefales det desuden, at tømning af det opgravede materiale over på transportenheden foretages gennem en rist, således at evt. forekomst af større fremmedlegemer (f.eks. dæk og andre fendermaterialer) kan blive sorteret fra og håndteret separat.

Det opgravede stærkt forurenede toplag deponeres på land i godkendt depot for forurenede affald.

#### 4.2.3 Sediment ved kaj 23

Sedimentet ved kaj 23 er hovedsageligt bestående af sandholdig gytje og en mindre andel siltholdig gytje. På Figur 4-6 kan det ses hvilke typer sediment der primært optræder i de forskellige områder. Magenta markering er det område der skal uddybes, grønt område er sediment bestående af sandet gytje og under den gule farve er der siltet gytje.

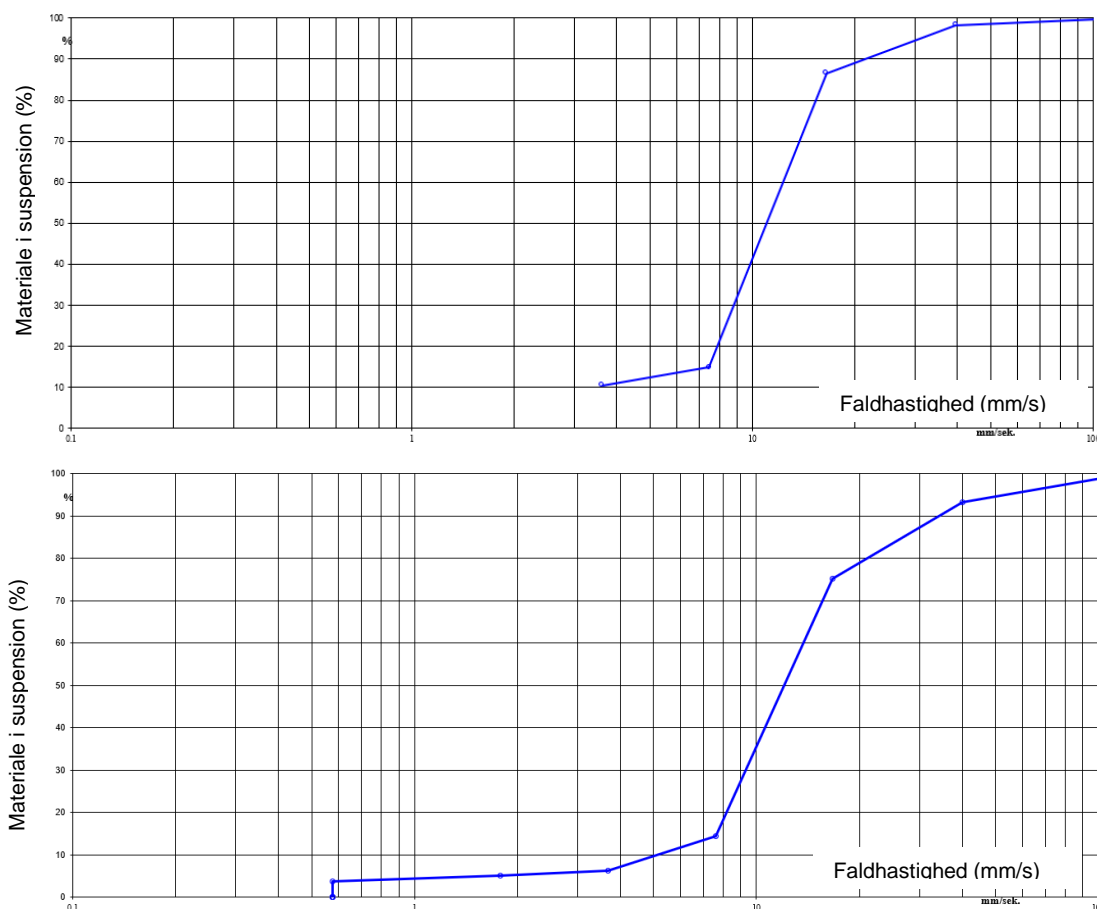
Det forventes, at der under uddybning af sedimenttyperne ved kaj 23 kan forekomme høje spildprocenter, i særdeleshed den siltede gytje og sand i det nordøstligste hjørne af kaj 23, hvis der anvendes hydraulisk grab. Der er dog samtidig meget lave strømhastigheder, da uddybningsområdet ligger trukket langt tilbage for de større strømhastigheder i Lillebælt.

Der er udtaget A-rør prøver ved kaj 23, hvor prøvematerialet er benyttet til at udføre et Andresenrør-forsøg for at bestemme faldhastighederne (se Figur 4-14). Prøverne er taget fra boring B1 i kote -9.7 m (prøve nr. 57 udtaget ca. 11,5 m under dæk, dæk i +1,8 m og havbund i -7,3 m). Den udtagne prøve er blødgjort og efterfølgende grundigt blandet op i Andresenrøret. Efter opblanding er der udtaget prøver til forskellige tidspunkter. Faldhastighederne kan ses på Figur 4-15, hvor faldhastigheden er angivet i mm/s ud af x-aksen og procentandelen af materiale stadig i suspension er angivet op ad y-aksen. Den relativt høje faldhastighed svarer til sand, skaller, sammenhængende gytje og andre fraktioner som findes i gytjen. Parametre for findelt gytje svarer til den nederste 'hale' på kurven.

Ud fra Figur 4-15 kan bundfældningstiden ved kaj 23 bestemmes idet dybden ved kajen også er kendt. Bundfældningstiden benyttes til at give et estimat på om materialet bundfælder sig inden de lave strømningshastigheder bærer materialet ud i Lillebælt.



**Figur 4-14: Forsøg med materialet ved kaj 23 i Andresenrør: Billedet viser det opløste materiale efter adskillige omblandinger. Der udtages prøver i bunden til bestemmelse af faldhastighed. Materialet er taget fra boring B1 i kote -9.7m (prøve nr. 57 udtaget ca. 11,5 m under dæk, dæk i +1,8 m og havbund i -7,3 m).**



**Figur 4-15:** Viser to faldhastighedskurver for materialet fra A-rør prøven ved kaj 23, hvor faldhastigheden er angivet i mm/s ud af x-aksen og procentandel i suspension er angivet op ad y-aksen. Prøven er udtaget fra boring B1.

### Spildmodellering ved kaj 23

Der er på baggrund af resultaterne fra Andresenrør-forsøget på en A-rør prøve fra kaj 23, som ses på Figur 4-15, bestemt input parametre til spildmodellering for uddybningsarbejderne ved kaj 23.

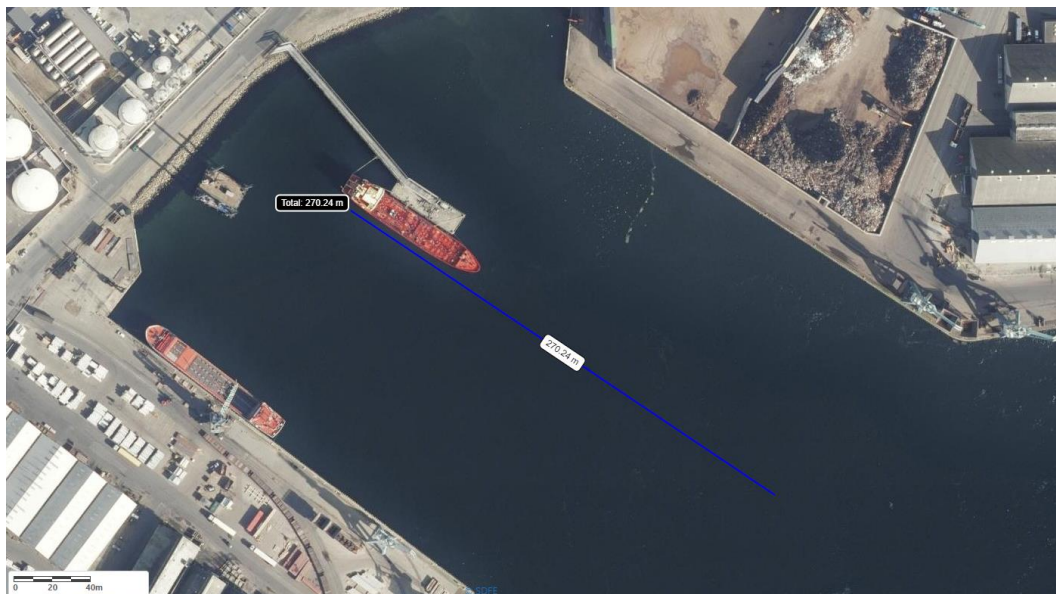
Den totale uddybningsmængde ved kaj 23 er estimeret til ca. 52.000 m<sup>3</sup>. Baseret på de geotekniske boringer i området (primært B1, B2, B7 beskrevet i Ref. /6/) fremgår det, at de øverste ca. 1,5 meter (ca. 12.000 m<sup>3</sup>) af sedimentet består af lidt grove materialer som sand og grus, hvilket relativt hurtigt sedimenterer tæt på uddybningsarbejdet. Derfor vurderes uddybningsmængden der potentielt giver anledning til kritisk spild at svare til ca. 40.000 m<sup>3</sup>. Ved brug af hydraulisk grab vurderes normalt en spildprocent på 5% baseret på intensive studier bl.a. ifm. uddybning ved Øresundsbroen. Det svarer altså til ca. 2.000 m<sup>3</sup>.



Af mængden på 2.000 m<sup>3</sup> er der ud fra faldhastighedskurven på Figur 4-15 konservativt bestemt en mængde, som under stærke strømforhold potentielt kan nå ud af Centerhavnen og spredes ud i Lillebælt.

Afstanden til Lillebælt fra midten af uddybningsområdet ses i Figur 4-16 at være ca. 270 m. Eksisterende vanddybder varierer fra ca. 5 m tættest på land til ca. 19 m. Af Figur 4-18 ses strømhastigheder i området for uddybning at svare til mellem maksimalt ca. 0,06 m/s for sommermånederne til maksimalt 0,12 m/s i september til november. Normalt ses hastighederne at ligge under 0,6 m/s. Antages konservativt en direkte strømning mod Lillebælt med en hastighed konstant over dybden tager det derfor typisk  $270 \text{ m} / 0,06 \text{ m/s} = 4500 \text{ s}$  (75 min). Hvis det igen konservativt antages at spild sker i overfladen og skal nå at bundfælde over 19 m svarer det til en kritisk faldhastighed for at det når ud i Lillebælt på  $10 \text{ m} / 4500 \text{ s} = 4,2 \text{ mm/s}$ . For denne kritiske faldhastighed ses af Figur 4-15, at ca. 8-10% af materialet stadig er i suspension. Som repræsentativ faldhastighed er der regnet på 1,8 mm/s for disse 8-10%. For studie af sensitivitet er der ligeledes simuleret med en faldhastighed på 0,9 mm/s og konservativt med samme mængde materiale og deraf spilmængde.

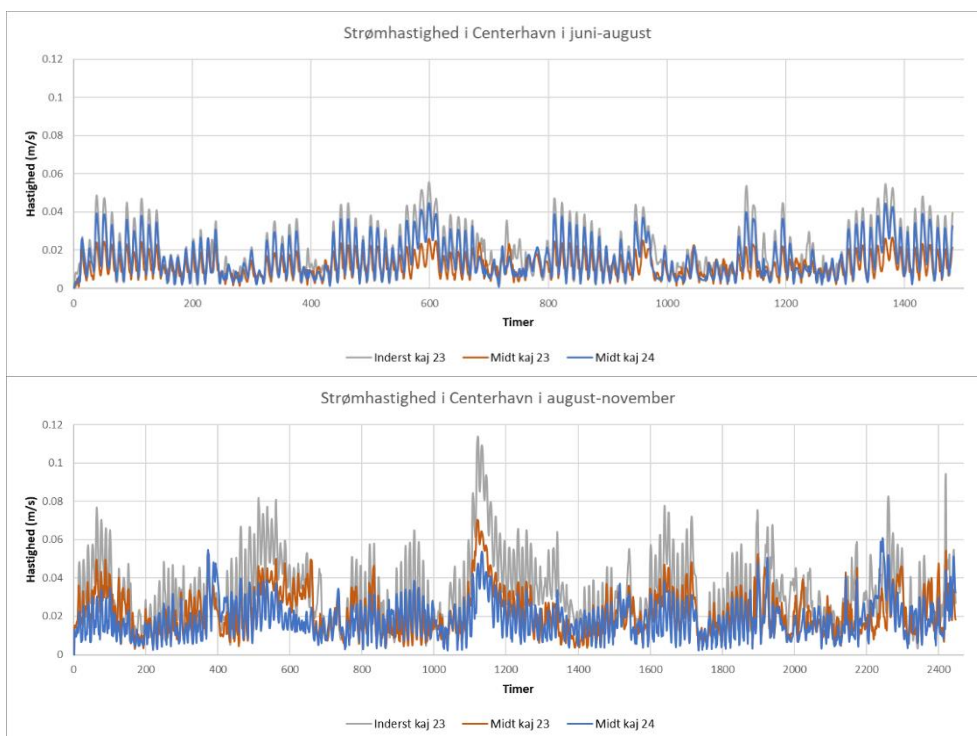
Der er i denne overslagsberegning konservativt udeladt, at det meste spild forventes at foregå i den nederste del af vandsøjlen, da der graves med miljøgrab samt at der i det meste af uddybningsområdet er maksimalt 10 m vanddybde.



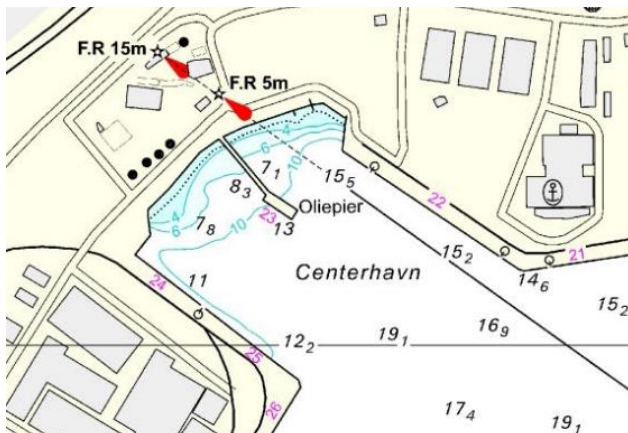
Figur 4-16: Afstand til Lillebælt fra uddybningsområdet.



Figur 4-17: Punkter hvor der er udtrukket strømdata. Koordinaterne er i UTM 32 som følger; Langs kaj 24 (546371E, 6157047N), Inderst kaj 23 (546392E, 6157174N), Langs kaj 22 (546586E, 6157138N), Midt kaj 23 (546498E, 6157084N).



Figur 4-18: Strømhastigheder udtrukket i øverste lag i den simulerede periode.



Figur 4-19: Vise vanddybderne ved Centerhavnen (Ref. 17).

Der simuleres uddybning i to positioner, som ses på Figur 4-20. Der graves 32.000 m<sup>3</sup> i position 1 og 20.000 m<sup>3</sup> i position 2, da den nuværende dybde er større ved position 2 end position 1 og der dermed skal uddybes mere ved position 1.



Figur 4-20: Positionerne for simulering af gravearbejder i spildmodellen. 1: [546330N, 6157152E] 2: [546366E, 6157129N].

Tabel 4.3 viser input parametre til spildsimulering ved kaj 23. For sensitivitet og for at tage højde for usikkerhed i faldhastighedskurven er der desuden regnet med en faldhastighed på 0,9 mm/s. Faldhastigheder er som beskrevet baseret på de aktuelle materialer på havbunden.

Parameter	Værdi	Enhed
Fraktion	Gytje	-
Faldhastighed	1.8 / 0,9	mm/s
Vandets densitet	1010	kg/m <sup>3</sup>
Partikel densitet	2650	kg/m <sup>3</sup>
Bundruhed	0,001	m
Kritisk forskydningsspænding [Deposition]	0.07	N/m <sup>2</sup>
Kritisk forskydningsspænding [Erosion]	0.1	N/m <sup>2</sup>
Erosions koefficient	5e-05	[kg/m <sup>2</sup> /s]
Havbundsdensitet	180	Kg/m <sup>3</sup>
Spildprocent for fraktionen	5	%

Tabel 4.3: Input parametre til spildmodellen.

### 4.3 Resultater af spildsimuleringer

I dette afsnit bliver resultaterne fra spildmodellen præsenteret.

#### 4.3.1 Uddybning ved kaj 19

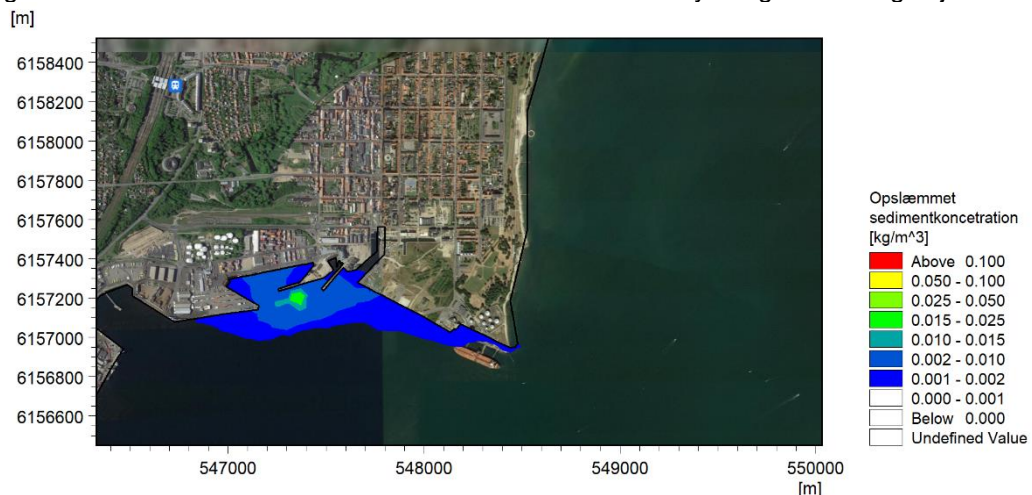
Som beskrevet simuleres der i perioden 8/6-2015 til 8/8-2015, mens uddybning der simuleres, sker fra 8/6-4/7-2015. Denne periode beskriver simulering af spild ifm. uddybning ved kaj 19, der forventes at vare ca. 1 mdr.

Signaturforklaringen på figurer der bliver præsenteret i dette afsnit, indeholder inddelinger der svarer til tre særligt kritiske niveauer for den marine flora og fauna. Niveauerne er for "Total Suspended Sediment Concentration" (Total SSC) og antager værdierne 2 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l. Der er på signaturforklaringen indlagt flere niveauer end de tre særligt kritiske for at vise graderingen af koncentrationen. De kritiske værdier svarer til:

- 2 mg/l: Der er synlig fane af sediment, der medfører begyndende reduktion af sigt med påvirkning af f.eks. ålegræs.
- 10 mg/l: Begyndende biologisk adfærdsændring.
- 15 mg/l: Påvirkning på fødesøgende fugle.

På Figur 4-21 ses et plot af området omkring kaj 19, hvor den maksimale koncentration af opslæmmet sediment til alle punkter i modellen i løbet af hele simuleringen er plottet ovenpå et baggrundskort. Det vil sige tidslig udvikling ikke er medtaget i denne figur, og det vides ud fra denne figur derfor ikke hvor lang tid koncentrationen optræder. Der er ingen påvirkning syd for Fredericia Havn.

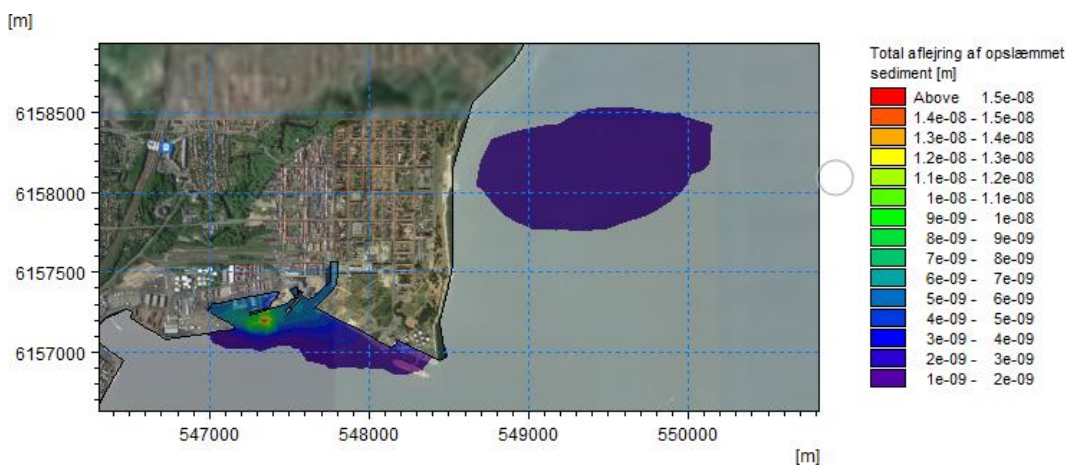
Figur 4-21 viser hvilken udbredelse der må forventes fra uddybningen omkring kaj 19.



**Figur 4-21: Maksimal total opslæmmet sediment koncentration under udgravning ved kaj 19. Farveskala vises for både 1 mg/l, 2 mg/l, 10 mg/l og 15 mg/l total SSC, som er kritiske niveauer (2 mg/l svarer til 0,002 kg/m<sup>3</sup>).**

Det ses, at udbredelsen af sedimentet vil være minimal og næsten er begrænset til havneområdet. Resultaterne viser, at der ikke vil ske en ophobning af sediment i GI. Havn. Den lokale hvirvel foran havnen ses primært at sprede materialet ud mod Skanseodden.

På Figur 4-22 ses den totale akkumulerede aflejring af sediment som følge af uddybningen ved kaj 19 i Fredericia Havn, ved afslutningen af den ca. 30 dage lange simuleringsperiode. Grundet den lave spildprocent, de store vanddybder og strøm sker der en hurtig opblanding af det opslæmmede sediment, hvilket giver meget lave koncentrationer og dermed også neglige aflejringstykkelser.



Figur 4-22: Aflejring af sediment, som følge af uddybningen ved kaj 19.

#### 4.3.2 Uddybning ved kaj 23

Som beskrevet er der simuleret ifm. uddybning ved Kaj 23 for perioden fra 21/8 til 30/11 og selve spildsimulering dækker perioden fra d. 31/8 til 3/11.

I afsnit 4.2.1 præsenteredes sedimentforholdene for uddybningsområdet, hvor det generelle billede er, at der er meget organisk materiale, gytje, og at det er delvist sandet og siltet (inderst i bassin). For kaj 23 estimeres mængden som potentielt finder vej ud i den primære strøm i Lillebælt ud fra faldhastigheder bestemt ved forsøg baseret på tests udført på sedimentprøver og ud fra strømmen beregnet i den hydrodynamiske model. På basis af disse resultater opsættes den numeriske spildmodel.

Ved uddybning af kaj 23 vil der potentielt forekomme meget spild fra det organiske gytje og silt. Vurdering baseret på tidligere studier estimerer ca. 5% ved almindelig type grab. For dette projekt anvendes miljøgrab der minimerer vandoptag ifm. uddybningen. For en sådan type grab forventes spild at kunne reduceres med 30-70% (Ref. /20/). Grundet materialets beskaffenhed i Centerhavnen forventes reduktionen nok at være i den lave ende, dvs. en potentiel reduktion på ca. 30%. Dette er dog ikke medtaget i denne beregning, således at der antages et spild på 5%.

På Figur 4-18 ses det at strømhastighederne inde ved kaj 23 er meget små, under 0,06 m/s i maksimal hastighed ved en almindelig sommerperiode og 0,12 m/s ved almindelig efterårsperiode. Generelt forventes det, at meget materiale vil bundfælde inden det potentielt når den primære strøm i Lillebælt.

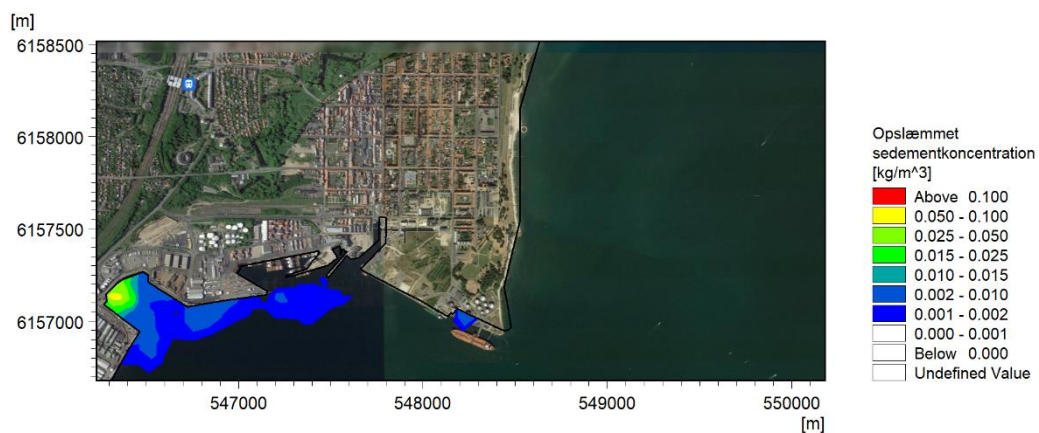
Strømdata fra MIKE3-modellen indikerer at strømmen i kaj 23 har en overvejende tendens til at løbe ind ved kaj 22 og rundt langs kajen for derefter at strømme ud i Lillebælt ved kaj 24.

På Figur 4-23 ses en skitse af det primære strømningsbillede i og omkring kaj 23 markeret med retningsbestemte pile. Denne skitse viser, at fra der strømmer materiale ud af kaj 23 og til spildet kommer ud i Lillebæltstrømmen bliver det først ført op langs kaj 19 og ud mod Skanseodden i en hvirvel der går med uret. På hele denne strækning har materialet tid til at bundfælde sig inden det når ud hvor det potentielt kan have konsekvenser for den marine flora og fauna.

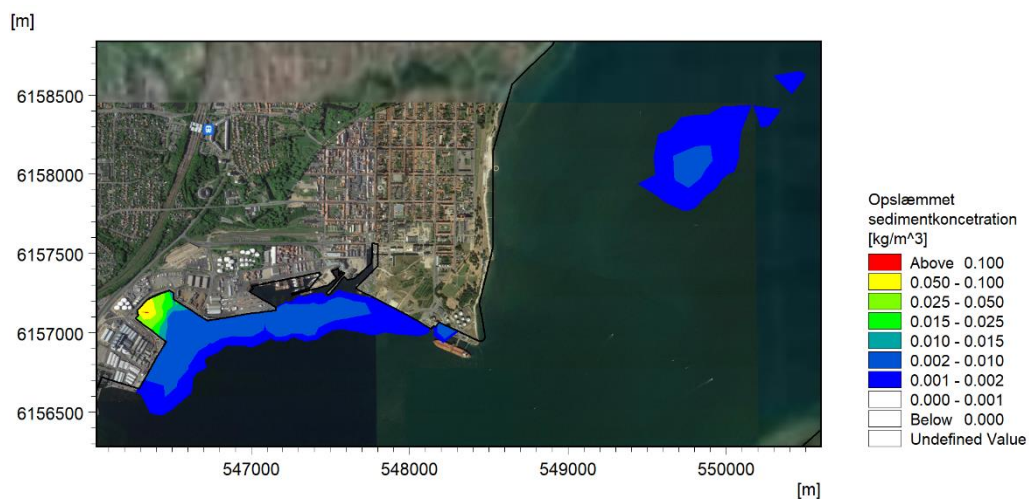


**Figur 4-23:** Det primære strømningsbillede for kaj 23 og ud mod strømmen i Lillebælt, hvor rød markerer strømningerne i Centerhavnen ved kaj 23, orange markerer de langsgående strømninger og den grønne viser strømmingen i Lillebælt.

Figur 4-24 viser maksimal total opløst koncentration i den 30 dage lange simuleringsperiode, under udgravning ved kaj 23 for et materiale med en faldhastighed på 1,8 mm/s. Denne faldhastighed er vurderet til at repræsentere det materiale der her mulighed for at nå Lillebælt inden det bundfæles. Des ses af figuren, at påvirkningen primært er lokalt omkring havnen. I Figur 4-25 vises resultatet af en sensitivitetanalyse hvor der er simuleret med en faldhastighed på 0,9 mm/s der viser samme overordnede billede af påvirkningen (mængden af materiale der spildes, er konservativt fastholdt for den reducerede faldhastighed). Dog er der for denne simulering materiale i meget lille omfang der når ud forbi Skanseodden. Koncentration er under 10 mg/l.



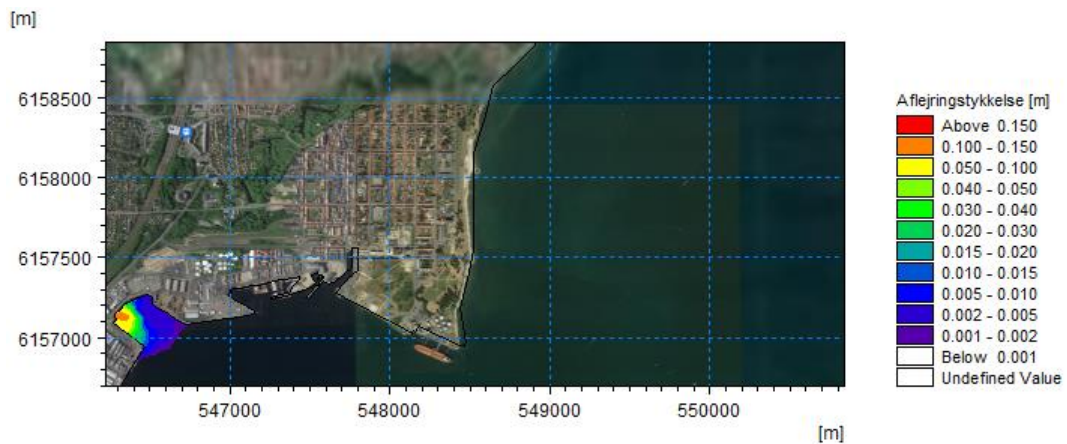
Figur 4-24: Maksimal total opslæmmet sediment koncentration under udgravning ved kaj 23.



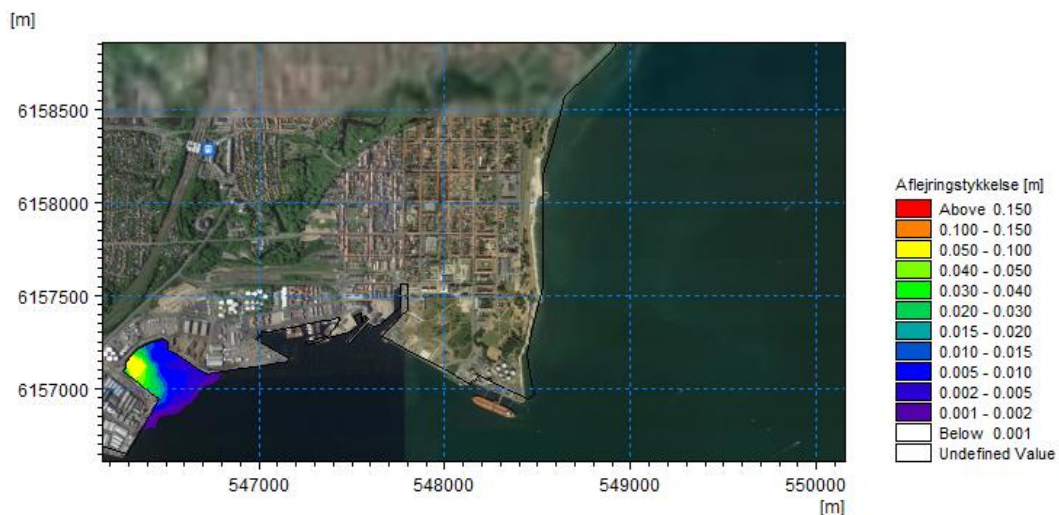
Figur 4-25: Sensitivitet med en faldhastighed på 0,9 mm/s: Maksimal total opslæmmet sediment koncentration under udgravning ved kaj 23. Materiale-mængden svarer til simuleringen med faldhastighed på 1,8 mm/s hvilket er konservativt.

Figur 4-26 og Figur 4-27 viser den akkumulerede aflejring af materiale for hhv. faldhastighed på 1,8 mm/s og sensitivitetsanalysen på 0,9 mm/s. Aflejring ses at være stærkt begrænset uden for Centerhavnen hvor mægtighed er <1 mm.





Figur 4-26: Aflejring af sediment, som følge af uddybningen ved kaj 23.



Figur 4-27: Sensitivitet med en faldhastighed på 0,9 mm/s: Aflejring af sediment, som følge af uddybningen ved kaj 23. Materiale-mængden svarer til simuleringen med faldhastighed på 1,8 mm/s hvilket er konservativt.

#### 4.3.3 Effekt af skibe i Vesthavn og Centerhavn ifm. anlægsfasen

Denne analyse medtager ikke effekten af skruvand på spredning af det materiale som er i suspension. Det vurderes dog, at det er relativt få situationer hvor skruvand vil have en væsentlig påvirkning under anlægsarbejdet.

Ved kaj 19 forventes skruvand ikke at have en påvirkning, da der ikke er væsentlig sejlads tæt på uddybningsområdet og det er åbent farvand.

Ved kaj 23 kan der være en potentiel påvirkning, da der er flere typer af skibe, der anløber de eksisterende kajer samt tilfælde hvor flere slæbebåde kan være i aktion i bassinet. I tilfælde af at der benyttes slæbebåde, vil arbejdet evt. kunne stoppes for at minimere at materialet 'blæses' ud af Centerhavnen. Ligeledes vil anvendelse af boblegardin minimere spild til omgivelserne (dette er ikke inkluderet i simuleringerne).

## 5 Konklusion

Denne rapport har beskrevet analyser og resultater der er udført for at belyse konsekvenserne af projektet samt uddybningsarbejdet ved kaj 19 og kaj 23. De væsentligste analyser og konklusioner er:

- Bølgedata i området er beskrevet ud fra et tidligere udført studie.  
Der ses meget begrænset bølgepåvirkning grundet placeringen i Lillebælts nordvestligste krog, hvor en design bølgehøjde svarer til ca.  $H_s = 1,3$  m for en 50-års hændelse.  
Det vurderes, at anlæg af de fremtidige kajer ikke vil ændre væsentligt på bølgeforholdene i Gl. Havn og Fredericia Lystbådehavn og ingen ændring i Lillebælt generelt.
- Der er opsat en 3D vandstands- og strømmodel for Lillebælt, der viser god overensstemmelse med vandstandsmålinger i Fredericia for både en normal og ekstrem hændelse.  
Strømhastigheden i Lillebælt påvirkes kun i begrænset omfang af havneudvidelsen grundet dens placering inden for de ydre kajer eller i forlængelse af eksisterende kajer.  
Den primære forskel ses i området fra kaj 19 til Skanseodden.  
Der forventes ikke anderledes påvirkning af bundsediment omkring dokgraven end der er i dag.
- Materialer ved kaj 23 og kaj 19 er meget forskellige.  
Der er udført faldhastighedsanalyser med Andresenrør, for at få et præcist estimat for spredning ifm. uddybningsarbejdet. Forsøgene er baseret på materiale udtaget ved geotekniske borer og miljøprøver.  
For kaj 19 består uddybningsmaterialet primært af meget fedt ler (Lillebæltsler) under toplag af grus, sand og meget begrænset mængde gytje. En del af materialet er stærkt forurenat (ca. 500 m<sup>3</sup>) og skal deponeres på land. Den resterende del, som er indbygningseget og ikke forurenat, indbygges bag den nye forlængede kaj 19, mens ikke indbygningseget og forurenat materiale sejlet til spulefelt ved Aalborg.  
For kaj 23 er materialet primært organisk materiale med indhold af silt og sand. Alt materiale er ikke indbygningseget og sejles til spulefelt ved Aalborg. Det vurderes derfor, at der skal uddybes med miljøgrab for at minimere spildet fra optagning samt vandmængden når det placeres på pram.

Der er samlet set følgende estimerede uddybningsmængder og håndtering:

Beskrivelse	Kaj 23	Kaj 19
Uddybning i alt	~52.000 m <sup>3</sup>	~45.000 m <sup>3</sup>
- <i>Forurenet sendes til landdeponi</i>		~500 m <sup>3</sup>
- <i>Indbygningseget</i>		~19.500 m <sup>3</sup>
- <i>Ikke indbygningseget (spulefelt Aalborg)</i>	~52.000 m <sup>3</sup>	~25.000 m <sup>3</sup>

- Spild ved kaj 19 er beregnet baseret på numerisk spildsimulering.

Resultaterne viser at spildet vil strække sig mod Skanseodden, men være af begrænset omfang. Grundet hvirvlen foran havnen der bevæger sig med uret for både nord- og sydgående hovedstrøm i Lillebælt, forplanter spredningen sig kun nord og øst for havnen.

Der er meget lille påvirkning af Gl. Havn.

- Spild ved kaj 23 er simuleret med den numeriske model. Det primære sediment består af stærkt organisk materiale. Opgravning sker i et område med meget små strømhastigheder.

Der er regnet på 'svæv' af gytjen og i ekstreme forhold vil det i begrænset omfang blive spredt til Lillebælt. Denne effekt minimeres væsentligt ved brug af miljøgrab. Den positive effekt af at benytte miljøgrab på spildprocessen er ikke medregnet i nærværende analyse. Dvs. at analysen på flere parametre forventes at være en meget konservativ beregning af påvirkningen fra gytje.

Aflejring af spildt materiale ses primært at ske inden for Centerhavnens område.

- Effekt af skibes skruevand er ikke simuleret.

Det antages ikke at være en påvirkning under anlægsarbejde ved kaj 19, da der ikke er sejlads tæt på uddybningsområdet og det ligger ud til åbent farvand.

Ved kaj 23 vil det kunne have en effekt. Benyttes der flere slæbebåde i bassinet vil arbejdet evt. kunne indstilles midlertidigt for at minimere spild. Ligeledes vil anvendelse af boblegardin minimere spild til omgivelserne, dette er ikke medtaget i simuleringerne.

## 6 Referencer

- Ref. /1/: DHI-rapport: Ændring i strøm- og bølgeforhold efter ombygning af kajer og lystbådehavn. Numerisk modellering, april 2012.
- Ref. /2/: DHI: Boundary generator model. Tilgået efterår 2021.
- Ref. /3/: DHI: MIKE3 MT manual. 2017.
- Ref. /4/: DHI: Boundary Conditions Generator: <https://boundary-generator.dhigroup.com/> tilgået 2021.
- Ref. /5/: Sweco: Geoteknisk rapport, kaj 19. Version 0, maj 2021.
- Ref. /6/: Sweco: Geoteknisk rapport, kaj 23. Version 0, maj 2021.
- Ref. /7/: Geodatastyrelsen: Den danske havnelods. Søkort udtrykket 2021.
- Ref. /8/: Danmarks Geologi fra Kridt til i dag, Aarhus. Geokompender Nr. 1, Geologisk Institut 1995.
- Ref. /9/: Dansk Geoteknisk Forening: Vejledning i Ingeniørgeologisk prøvebeskrivelse. DGF bulletin 1, revision 2, december 2021.
- Ref. /10/: Kystdirektoratet: Hølvandsstatistikker 2017.
- Ref. /11/: Notat. ADP – Forlængelse af kaj 19. Vurdering af miljømæssig optimal håndtering af toplag fra kommende uddybningsområde. Sweco A/S. 1. juni 2022.
- Ref. /12/: Sedimentundersøgelse ud for Kaj 19 og Kaj 23 i forbindelse med udvidelse af hhv. Vesthavn og Centerhavn i Fredericia. Naturfocus. 10. oktober 2021.
- Ref. /13/: ADP. Fredericia Havn, Forlængelse af Kaj 19. Geoteknisk undersøgelsesrapport. Sweco. 20. maj 2021.
- Ref. /14/: Dredging and Dredged Material Management. US Army Corps of Engineers®. Engineering and Design. EM 1110-2-5025. 31. July 2015.
- Ref. /15/: Technical Guidelines for Environmental Dredging of Contaminated Sediments. US Army Corps of Engineers®. Engineer Research and Development Center. ERDC/EL TR-08-29. September 2008.
- Ref. /16/: Dredge Bucket Comparison Demonstration at Boston Harbor. US Army Corps of Engineers®. ERDC/CHL CHETN-VI-35. March 2001.
- Ref. /17/: Fastsættelse af kvalitetskriterier for vandmiljøet. TBT - CAS nr. 36643-28-4 Miljøstyrelsen, August 2021.
- Ref. /18/: Projektforslag. ADP Fredericia Havn, Forlængelse af Kaj 19. Sweco. 1. oktober 2021.
- Ref. /19/: Små havne – Løsningsforslag. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 30 2005.
- Ref. /20/: Miljøstyrelsen: Gennemgang af oprensningsteknikker. <https://www2.mst.dk/udgiv/publikationer/2001/87-7944-673-6/html/kap04.htm#8.9>.

## Bilag 1: Præsentation af Miljøgrab

For mere information se evt. [www.cablearm.com](http://www.cablearm.com).



**ENVIRONMENTAL CLAMSHELL DREDGING**  
 ACHIEVING CUSTOMER SATISFACTION BY REDUCING PROJECT OWNER COSTS AND INCREASING DREDGER PROFIT THROUGH INCREASED SEDIMENT REMOVAL EFFICIENCY.  
**RESUSPENSION ⇒ RELEASE ⇒ RESIDUAL = RISK**

**Sloping Profile**  
 Allows for angled, lateral movement along an inclined bottom. Previously, over dredging in "steps" were required. These steps are then often filled in with capping material.

**Lightweight**  
 Eliminates the processing of hard, uncontaminated sediment.

**Venting System with Open Center**  
 Decreases downward pressure during bucket descent and seals in material during bucket ascension.

**Over-Square Footprint**  
 Width greater than opened length minimizes outward flow of material during bucket closure. (up to 100 m<sup>2</sup>)

**Material Location**  
 Center of Mass of material is located below the center of the bucket's containment area minimizing material washout during bucket closing and ascension.

**Level-Cut**  
 Produces a near flat surface opposed to the pothole effect which can create a pool of contamination.

**Overlapping Side Plates**  
 Minimize outward flow (windrowing) of material during bucket closure and seals in material during bucket ascension.

**Low Water Content**  
 Squeezes and drains water to minimize transportation/disposal costs.

**150° Cutting Edge**  
 Allows the bucket to "scoop" material which lowers the materials center of mass within the containment area.

**CLAMVISION®**  
 PRECISE XYZ DREDGE POSITIONING SOFTWARE

**Cable Arm**  
 info@cablearm.com

**Cable Arm Positioning**