

## MEMO

Til: By & Havn og Espoo interessenter

Att.: Michael Lundgaard, By & Havn

Fra: DHI A/S

Projekt 11823523 Lynetteholm

Dato: 27-08-2021

---

Emne: Turbiditetsmonitoring og management system (TMMS),  
Lynetteholm

---

### 1 Indledning

I forbindelse etablering af Lynetteholmen er der behov for at udføre en bundudskiftning langs den fremtidige perimeter for at sikre en tilstrækkelig geoteknisk stabilitet af det fremtidige anlæg. Der er ligeledes behov for at lave en uddybning af Svælget syd for Middelgrunden for at sikre en tilstrækkelig dybgang for skibstrafikken til Prøvestenen. Afgravningsmaterialet kan opdeles på rene og forurenede materialer. Det forurenede sediment anbringes i Lynettens deponi for havnesediment, mens det rene sediment klappes på to godkendte klappladser i det sydlige Øresund (Ka og Kb). Klappinger foretages i vinterhalvåret (oktober-marts) og vil som minimum strække sig over 3 halvår.

På trods af et relativt stort tab (modelleret) fra klappladserne er der i MKR-sammenhæng ikke fundet en betydende påvirkning af de omkringliggende Natura 2000 områder. Der er derfor i implementeringsredegørelsen (ref. /1/) ikke fastsat egentlige grænser for, hvor meget sediment der må forlade klapområderne. I stedet er der angivet følgende:

#### 5.3.3 Undersøgelser og overvågning af eventuelle effekter af klapping

- A. By & Havn skal lade udføre undersøgelser før, under og efter klappingen, som dokumenterer, at klappingens eventuelle påvirkninger af miljøtilstanden ikke forringes eller skades ud over den påvirkning, der er beskrevet i miljøkonsekvensvurderingen. Forslag til ændringer af nedenstående rammer for prøvetagningsplan fremsendes til Miljøstyrelsens accept, inden planen iværksættes. By & Havn skal fremsende resultaterne vedlagt en vurdering af eventuelle miljøpåvirkninger.
- B. By & Havn skal etablere en overvågning, der sikrer, at der alene klappes sediment, når der ikke er strømforhold, som indebærer at sedimentspredningen kan medføre skade på svenske Natura 2000-områder. Hertil skal de svenske myndigheder have mulighed for at indgå i en Turbidity Management Group.

For at sikre ovenstående er det planen at udlægge fire turbiditetsmålere i klappladsområdet til kontinuert registrering af den faktiske påvirkning. Den kontinuerte registrering sikrer at der indsamles informationer om spredning i forbindelse med klapping og eventuel spredning i forbindelse med genoplslæmning af materiale. Stationerne vil ligeledes kunne bruges til at estimere den naturlige baggrundskoncentration i området Parallelt med monitoringsstationerne etableres der et TMMS (PlumeCast), som er et prognoseværktøj til

beskrivelse af den forventede spredning af planlagte klappingerne. Med udgangspunkt i Plumecast prognoserne vil man kunne identificere tidsvinduer, hvor der ikke må klappes, som følge af en uhensigtsmæssig spredning. Plumecast vil ligeledes blive anvendt til hindcast modellering og dokumentation af den faktiske påvirkning. Dette notat indeholder de seneste estimater for klappmængder samt en beskrivelse af turbiditetsmonitoringen og Plumecast systemet.

## 2 Klappingsmængder

COWI har den 23/6-2021 lavet et nyt udtræk af gravemængder fra deres 3D-model. Opgørelsen er inddelt i klappings- og deponeringsmængder for uddybning ved Svælget syd for Middelgrunden og bundudskiftningen langs Lynetteholm perimeteren.

Opgørelsen er som det fremgår af Tabel 1 og Tabel 2 inddelt i en række bidrag. I opgørelsen er det vigtigt at gøre sig klart, at bulkingsbidraget er et pseudobidrag, da det kun er udtryk for at der forventeligt vil opblandes vand i materialet i forbindelse med gravning. Mængden af sediment ændres ikke. Tages bulkingsbidraget ud af ligningen ser man at den forventede in situ afgravningsvolumen, som skal klappes, er lidt mindre end 1,6 Mm<sup>3</sup>. De opdaterede mængder er noget mindre end de 2,5 Mm<sup>3</sup> (inklusive bulkingsbidrag), som klappingstilladelsen er baseret på.

Tabel 1 Estimerede klappingsmængder i m<sup>3</sup>.

Område	Teoretisk mængde	Overdybder (0,2 m)	Tillæg for usikkerhed	Spild	Bulkning	Samlet
Perimeter med intern dæmning	1.290.649	n/a-	193.597	-29.685	363.640	1.818.202
Svælget	30.000	56.746	13.012	-1.995	24.441	122.203
Total	1.320.649	56.746	206.609	-31.680	388.081	1.940.405

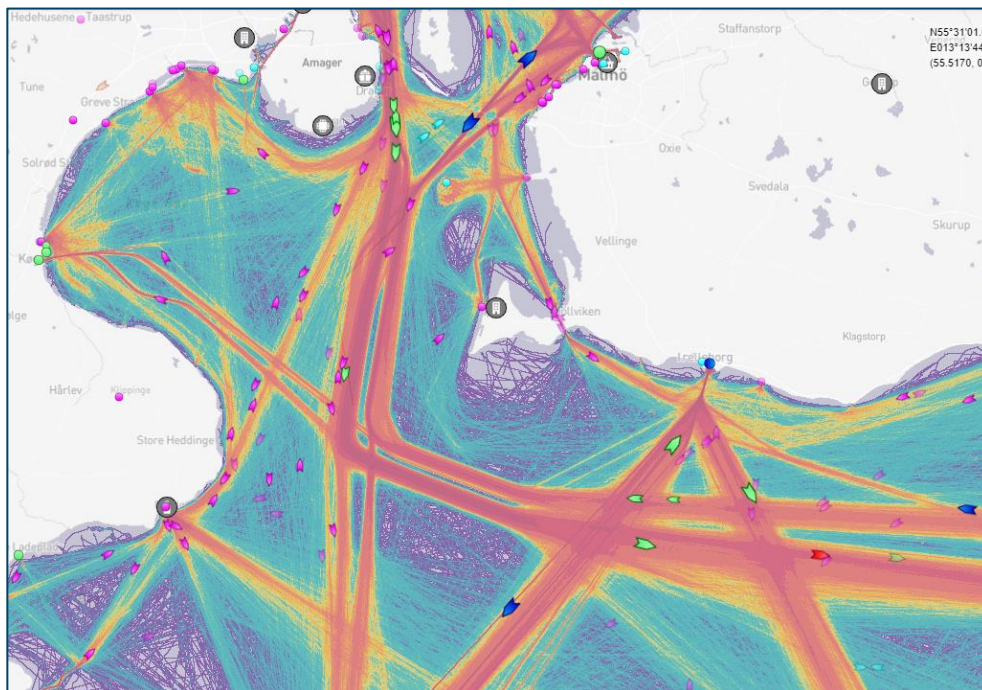
Tabel 2 Estimerede mængder til deponering i m<sup>3</sup>.

Område	Teoretisk mængde	Overdybder (0,2 m)	Tillæg for usikkerhed	Spild	Bulkning	Samlet
Perimeter med intern dæmning, Levantkaj og adgangsvej	366.674	n/a	55.001	-8.434	103.310	516.552
Svælget	-	5.000	750	-115	1.409	7.044
Total	366.674	5.000	55.751	-8.549	104.719	523.596

I MKR-sammenhæng blev det antaget at klappingen vil blive foretaget i løbet af to vinterhalvår. Med den seneste plan vil klappingerne blive udført over minimum tre vinterhalvår. Disse ændringer må samlet set forventes at medføre en reduceret påvirkning i forhold til spredningsberegningerne som ligger til grund for MKR.

### 3 Monitoring

Der har været overvejelser om at etablere en online monitoring af turbiditet, idet denne information vil kunne bruges til en løbende overvågning og tilpasning af PlumeCast modellen. Online monitoring kræver, at der etableres overfladebøjer på pågældende lokalitet. De to klappladser ligger i et relativt befærdet område med megen skibstrafik, jf. Figur 3. På denne baggrund er det blevet vurderet, at der vil være en relativ stor risiko for påsejling af overfladebøjer med medfølgende ødelæggelse af måleudstyr. Denne løsning er derfor fravalgt.



Figur 1 Skibsdensitet i det sydlige Øresund (kilde: Marine Traffic).

I stedet er det valgt at etablere 4 selvregistrerende målestationer, som udlægges på havbunden på passende positioner uden for klappeltern. De to af turbiditetsmålerne placeres et stykke væk fra klappladserne i de to hovedstrømningsretninger nordøst og sydvest for klappladserne. Afstanden vælges så den dækker området for sedimentfanen ved klapping på begge pladser. Der placeres yderligere to turbiditetsmålere på grænsen til Natura 2000 området øst for klappladserne. Figur 2 viser et udkast til placering af målestationer.

Faste stationer har den indbyggede svaghed, at der er en risiko for at sedimentfanen i nogle situationer styrer udenom. De faste stationer kan derfor ikke stå alene før der er klarhed over hvordan og i hvilket omfang klappingsfanerne spredes fra klappladssområdet. For at forstå omfanget af spredningen vil der blive udført transektnmålinger i forbindelse med de første klappinger. Da spredningen i høj grad er relateret til strømforholdene på stedet og materialesammensætningen, vil der efterfølgende blive planlagt togter, så der opnås viden om spredningen under forskellige strømforhold. Endvidere er der forskel på sedimentsammensætningen ved Svælget og Lynetteholm. Det vil derfor være nødvendigt at udføre transektnmålinger til bestemmelse af sedimentflux, hver gang der startes op på et graveområde med en signifikant ændret sedimentsammensætning.



Figur 2 Udkast til placering af målestationer.

Tabet og spredningen væk fra klapplassen (sedimentfluxen) i forbindelse med klapping kan estimeres ved hjælp af skibsbaserede målinger. Der foreligger ikke specifikke krav om hvor stor en mængde, der må forlade klappladserne, men det skal dokumenteres hvor meget sediment der forlader de godkendte klappladser.

Sedimenttabet til et givet tidspunkt bestemmes ved at måle sedimentkoncentrationen i sedimentfanen fratrukket evt. baggrundskoncentration, multiplicere denne måling eller målinger med vandføringen i det pågældende tværsnit. Simpelt formuleret kan spildet til et givet tidspunkt ( $S(t)$ ) beregnes som:

$$S(t) = Q(t) \times C(t),$$

hvor  $Q(t)$  er vandføringen i sedimentfanen til tiden  $t$  og  $C(t)$  er gennemsnit af netto sedimentkoncentration i fanens tværsnitsareal til tiden  $t$ , hvor netto betegner sedimentkoncentration fratrukket baggrundskoncentration. Sedimenttabet  $V$  kan estimeres ved at integrere over den tidsperiode som det tager klapskyen at passere igennem transektet:  $V = \int S(t) dt$ ,

Modelberegning af klappingerne viser at spildet fra klappoperationen typisk vil transporteres i en af de to hovedstrømsretninger, dvs. mod nordøst eller mod sydvest i en fane. Ved strømskifte vil fanen delvis forsvinde eller blive diffus. Målinger ved strømvending er uanvendelige til bestemmelse af sedimentflux. Fluxmålinger udføres derfor kun, når der er en markant fane. Til fluxmålinger kræves følgende måleparametre:

- Strømhastighed og -retning. Strømparametre kan måles fra skib eller fastmonteret måleinstrument der vurderes repræsentativt for måletværsnittet
- Sedimentkoncentration i flere profiler over tværsnittet

Sedimentfluxen måles og bestemmes ca. 200 m nedstrøms fra klapppladsens grænse. Sedimentfluxen opgøres og rapporteres i tons.

Fluxmålingen vil normalt være ukompliceret, men kan vanskeliggøres af hårdt vejr og den kraftige skibstrafik i området. Målingen skal de fleste gange laves på tværs af skibstrafikken. Dette medfører, at DHI foreslår en metode som følger:

Et skib udstyres med profilmåler til bestemmelse af sedimentkoncentrationer og en akustisk profilerende strømmåler (ADCP). Strømmåleren giver, udover strømparametre, også et mål for mængden af partikler i vandet. Mængden kan ikke umiddelbart omsættes til sedimentkoncentrationer, men anvendes til lokalisering af sedimentfanen, idet denne ofte ikke kan ses med det blotte øje.

Når klapningen påbegyndes, indledes en bemandede spildmålingskampagne som arbejder 200 m nedstrøms for klapområderne. Her måles strømparametre, sedimentkoncentrationer samt fanens udbredelse. Der udtages flere vandprøver pr. dag som anvendes til omsætning af turbiditeten til sedimentkoncentration i mg/l. Når fanens udbredelse, sedimentkoncentrationen og strømhastigheden kendes kan sedimenttabet fra klapområdet simpelt udregnes.

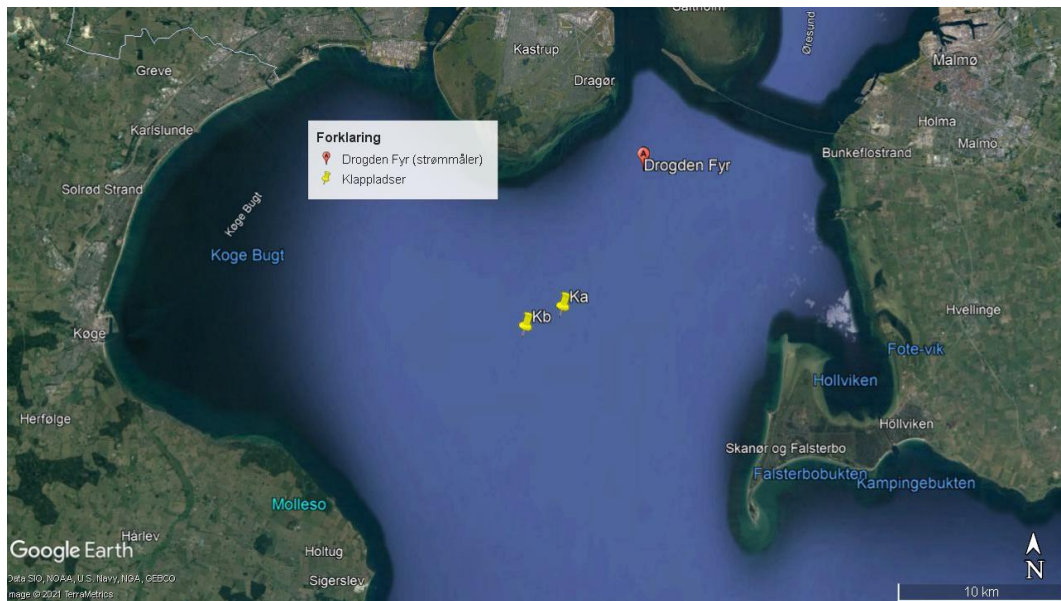
Målingerne kan efterfølgende korreleres med den aktuelle klapprate som oplyses af operatøren. Dette benyttes til opbygning af en database. Når den bemandede spildmåling indstilles, kan der vha. klapraten og strømmen (der fortløbende måles online eller beregnes af en numerisk model) udtrækkes et realistisk spild. Dette vil blive suppleret/kontrolleret ved bemandede målinger på udvalgte dage i resten af graveperioden.

Både i perioden med bemandede spildmålinger og i perioden med spildestimering udstedes en ugentlig eller månedlig rapport der kort beskriver data og angiver det samlede spild (tab) for perioden i tons.

Der er for nylig udført en prøvegravning ved Lynetteholm, hvor det blev fundet, at der forventeligt vil være større klumper i klapmaterialet. Det forventes derfor at en stor del af det klappede sediment umiddelbart deponeres på bunden i klappfeltet og at sedimentspredningen i forbindelse med klappning vil være væsentlig mindre end tidligere modelleret. Det er muligt at den store mængde ophobede materiale på havbunden kan resuspenderes ved en kraftig strømhændelse. En sådan erosion vil kunne identificeres af de selvregistrerende målestationer. Stationerne etableres så de eksempelvis registrerer sedimentkoncentrationen hvert 15. minut i et givet niveau over havbunden. Stationerne tages hver 4 eller 6 uge for data og der publiceres tidsserier af målte sedimentkoncentrationer til dokumentation af eventuelle resuspensionshændelser og sedimentspredning i forbindelse med klappning. Ved klapperperiodens begyndelse tages stationerne efter eksempelvis 14 dage for hurtigt at etablere et kalibreringsgrundlag til PlumeCast modellen.

Strømforholdene har stor betydning for hvor meget der vil blive spredt i forbindelse med klappning. Det er derfor relevant at have adgang til kontinuerte strømmålinger, særligt i forbindelse med hindcast, hvor man kan sammenligne modelleret og målt strøm. I forbindelse med forecast af sedimentfaner, kan man kun bagudrettet sammenligne strømprognosen med den faktiske målte strøm. En kontinuert strøminformation tænkes indhentet fra forsvarets strømmåler beliggende ved Drogden Fyr, da DHI har adgang til disse data og forsvaret har planer om at gøre disse data offentligt tilgængelige. Strømmåleren ved Drogden Fyr blev udlagt i efteråret 2020. Figur 3 viser placeringen af Drogden Fyr (strømmåler), samt de to klappladsers centerpunkt.





Figur 3 Klappladser og placering af strømmåler ved Drogden Fyr.

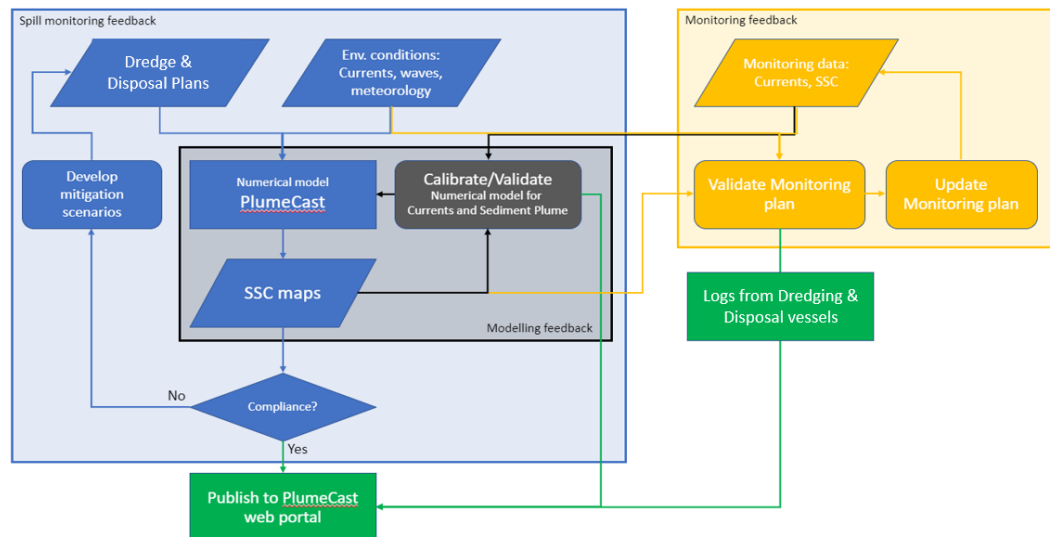
## 4 PlumeCast

Turbiditetsmonitoring og management systemet (PlumeCast) vil blive brugt til at beskrive sedimentspredningen i forbindelse med klapping af materiale i Køge Bugt. Formålet med at anvende PlumeCast er følgende:

1. Forecast af sedimentspredning på baggrund af information om operatørens planlagte klappinger. At definere tidsvinduer, hvor der ikke må klappes som følge af en uønsket stor spredning. At anviser tidsvinduer, hvor klapping vil kunne udføres mere hensigtsmæssigt.
2. Hindcast af sedimentspredning beregnet på baggrund af klappingsloggen indeholdende de faktiske klappmængder og tidspunkter.
3. PlumeCast er tilgængelig på en webportal og giver dermed potentiel adgang for relevante interessenter.

Dele af opgravede materiale langs med Lynetteholms perimeter planlægges klappet på de to klappladser i Køge Bugt Ka og Kb. Klappingerne forventes foretaget med splitpramme. Klapskyer har en 3-dimensionel udstrækning. Monitoring ved hjælp af faste eller semi-mobile målestationer er derfor ikke tilstrækkeligt til at beskrive udbredelsen og intensiteten af en klapsky (sedimentfane). DHI foreslår derfor at benytte PlumeCast til at beskrive den rumlige og tidlige udbredelse af sedimentfanerne i forbindelse med klapping. PlumeCast kombinerer monitoring af sedimentfanen og en state-of-the-art model med en numerisk beskrivelse af klapskyens fysik til at beskrive udbredelsen af sedimentfanen. Systemet kan bruges til forecast baseret på planlagte klappinger og hindcast baseret på faktiske udførte klappinger. Modellen vil løbende blive kalibreret/tilpasset den information som kommer ind via turbiditetsmålinger. Forecast modellen vil typisk blive afviklet to gange om ugen til at forudsige påvirkningen og sedimentspredningen af de planlagte klappinger. I vinterhalvåret vil lavtrykbanernes bevægelse have stor betydning for strømforholdene. Usikkerhed på lavtrykbanerne vokser over tid og det er derfor vurderet at PlumeCast prognoserne bør afvikles to gange ugentligt.

Flowdiagrammet i Figur 4 vist i illustrerer hvordan PlumeCast systemet er skruet sammen. Modellen bliver opdateret (kalibreret/valideret) i takt med at der kommer informationer om målt turbiditet og sedimentkoncentrationer.



Figur 4 TMMS flowdiagram.

## 4.1 Den numeriske model og anvendelse

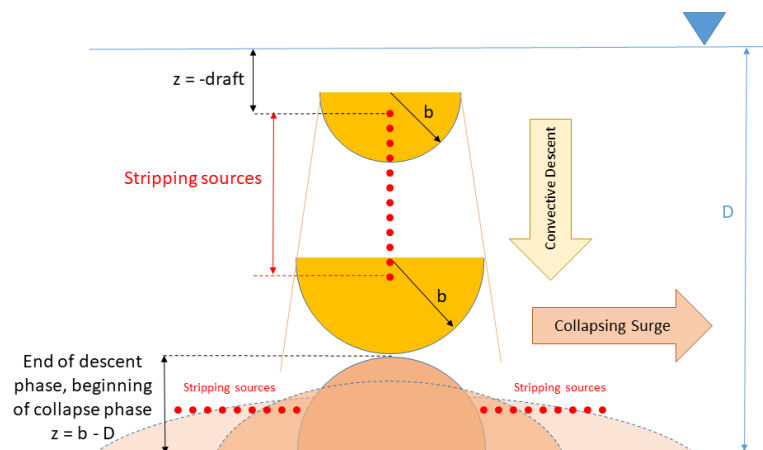
Hydrodynamikken og sedimentspredningsmodellen vil blive baseret på DHIs state-of-the-art MIKE-FM 3D software, som er baseret på et fleksibelt beregningsnet, hvor opløsningen kan tilpasses efter behov. Modellens udstrækningsområde vil blive tilpasset behovet, så der sikres en korrekt strømningsbeskrivelse og spredning af sedimentfanen.

En nøgleparameter i forbindelse med simulering af klapskyer er beregningen af nærfeltet og de fysiske processer ved åbning af splitprammen. I nærfeltet er klapmaterialets bevægelse mod bunden og udbredelse i mødet med bunden bestemt af densitetsdrevne effekter, som er indeholdt i nærfeltsbeskrivelsen. Uden for nærfeltet er sedimentets spredning bestemt af strømfeltet i det omkringliggende vand og materialets faldhastighed. Disse processer er indeholdt i modellen.

En række af de fysiske processer i nærfeltbeskrivelsen er vist i Figur 5. Processerne som tages i betragtning er:

- Afrivning af sediment under faldet mod bunden (stripping)
- Udfald af tunge fraktioner, eksempelvis klumper
- Indlejring af sedimentfane i situationer med kraftig lagdeling
- Kollaps ved havbund og spredning hen over havbund samt aflejring på havbund

Klumper i klapmaterialet har stor betydning for hvordan klapmaterialet vil opføre sig i sin bevægelse mod bunden. Det er dog svært at vide noget om hvor mange klumper der typisk vil være i klapmaterialet. Indhold af klumper vil kunne reducere sedimentspredningen markant. Modellen vil derfor blive kalibreret og opdateret i takt med at der fra monitoringsprogrammet kommer informationer om sedimentflux og sedimentkoncentrationer observeret i forbindelse med klapping.

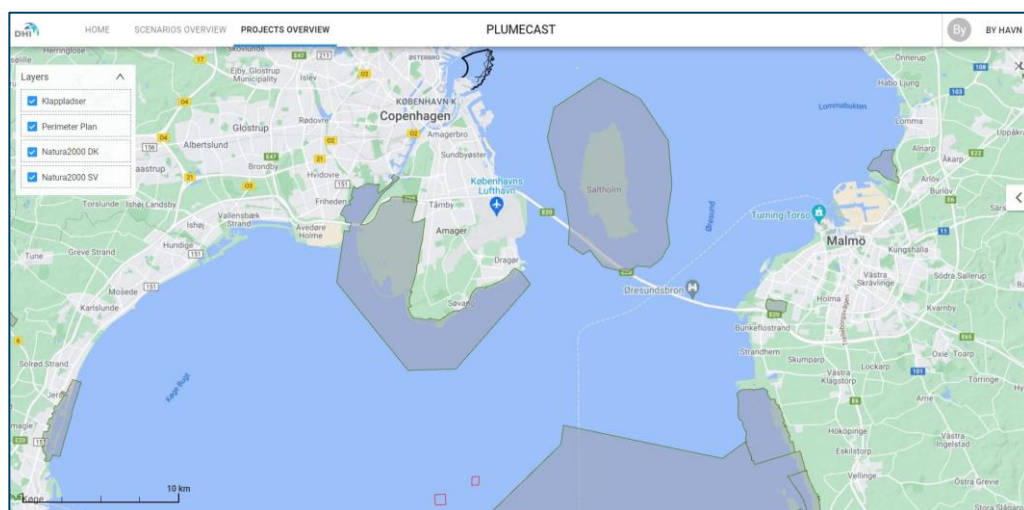


Figur 5 Skematisk beskrivelse af nærfeltmodellens indeholdte fysiske processer.

Der udføres to typer af modellering: forecast og hindcast. Når de første klappinger starter op, vil PlumeCast blive afviklet for et 7 dages forecast vindue. Forecastet vil opdateret efter 3-4 dage og sammenholdt med den forrige prognose. Hindcast vil ligeledes blive modelleret for en 7-døgns periode og i takt med at foregående uges klappingslog modtages fra entreprenøren. Forecast og hindcast vil blive forbedret i takt med at modellen bliver kalibreret.

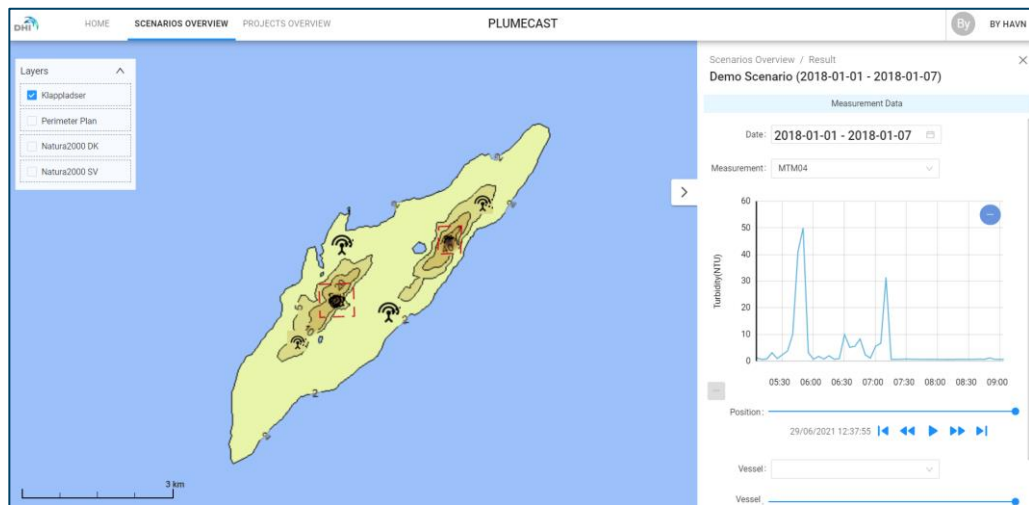
## 4.2 Eksempler fra PlumeCast platformen

PlumeCast vil blive platformen hvor monitorings og modellerings data vil kunne tilgås. Modelscenarierne (forecast og hindcast) vil blive defineret og afviklet via platformen. PlumeCast anvendes eksempelvis i Baltic Pipe projektet i forbindelse med at nedgravningen af rørledningen i Faxe Bugt. PlumeCast indeholder en nem adgang og intuitiv platform til at definere, afvikle og præsentere resultatet af klappings-scenarier. De følgende to figurer viser eksempler på hvad der eksempelvis kunne vises på PlumeCast webportalen.



Figur 6 Projektområdet med indikation af klappladser og Natura 2000 områder.





Figur 7 Analyse vindue. Udbredelse af sedimentfane ved klapping på de to klappladser og informationer fra en monitoringsstation.

## 5 Referencer

- /1/ Transportudvalget (2020-2021): Lov om anlæg af Lynetteholm. Implementeringsredegørelse. Juni 2021. L.220 – bilag 41.