

Til

Sund & Bælt

Dokumenttype

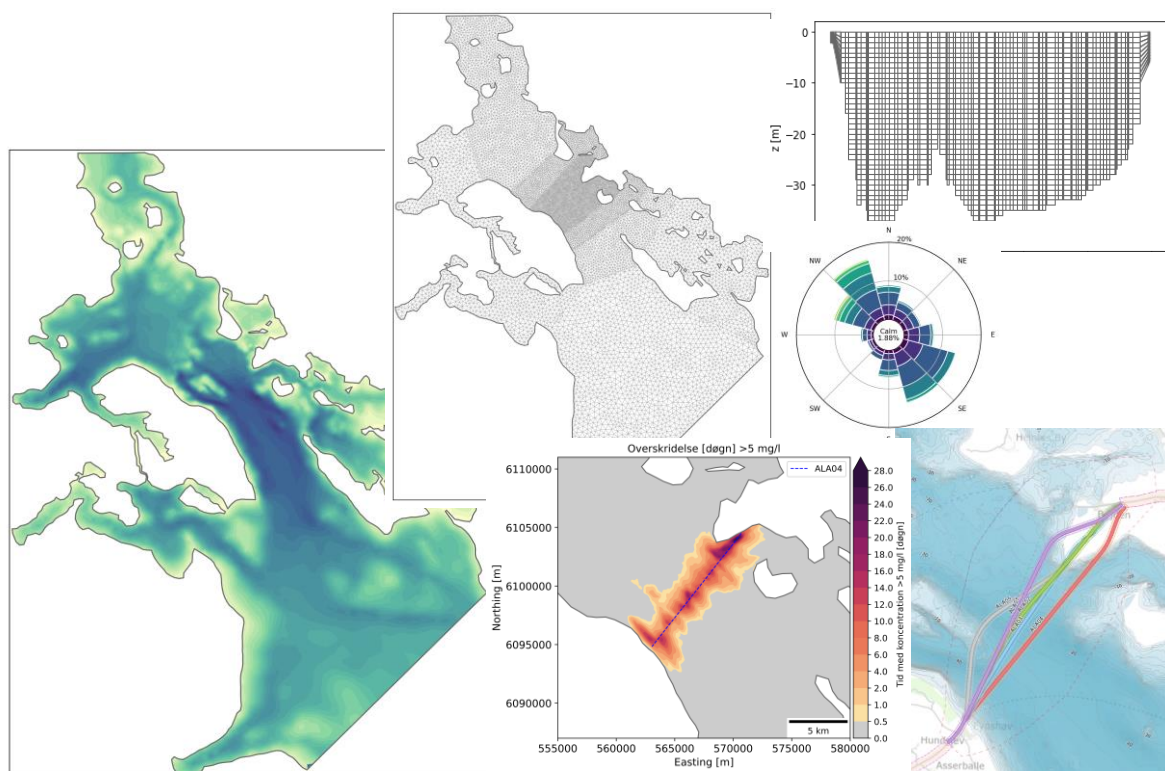
Baggrundsrapport

Dato

Marts 2024

Als-Fyn

Modellering af sedimentspild



Als-Fyn

Modellering af sedimentspild

Projekt navn **Forundersøgelse Fyn-Als forbindelsen**
Projekt nr. **1100052923**
Modtager **Sund & Bælt**
Dokumenttype **Baggrundsrapport**
Version **5**
Dato **20/03/2024**
Udarbejdet af **REM**
Kontrolleret af **DMONT**
Godkendt af **MNSF**
Beskrivelse **Modellering af sedimentspild**

Ramboll
Hannemanns Allé 53
DK-2300 Copenhagen S
Denmark

T +45 5161 1000
<https://ramboll.com>

Version	Dato	Opdateringer
3	18/09/2023	-
4	26/08/2024	Opdateret udgravningsmængder Opdaterede linjeføringer
5	20/03/2024	Opdateret efter kommentar

Confidential

Rambøll Denmark A/S
DK reg.no. 35128417

Member of FRI

Indholdsfortegnelse

1.	Resumé	3
2.	Indledning	5
3.	Metode	6
3.1	Hydrodynamisk model (HD) – kort beskrivelse	6
3.2	Sedimenttransport model – kort beskrivelse	6
4.	Hydrodynamisk model	8
4.1	Modellens set-up og parametre	8
4.1.1	Batymetri	8
4.1.2	Beregningsnet	9
4.1.3	Initialbetingelser	14
4.1.4	Randbetingelser	14
4.1.5	Atmosfærisk påvirkning	14
4.1.6	Modelleringsperiode	14
4.2	Modelfølsomhed og validering	17
4.2.1	Målinger	17
4.2.2	Randbetingelser validering	17
4.2.3	Modelfølsomhed	21
4.2.4	Validering af vandstandsniveauet	23
4.2.5	Validering af overfladetemperatur	25
4.3	Generelle forhold i projektområdet	27
5.	Sedimentspredningsmodel	29
5.1	Jordbundsforhold	29
5.2	Tunnelløsning	31
5.2.1	Sedimenttyper tunnelløsning	31
5.2.2	Sedimentspredning tidsserier for tunnelløsningen	31
5.3	Broløsning	33
5.3.1	Sedimenttyper broløsning	33
5.3.2	Sedimentspredning tidsserie broløsning	34
5.4	Opsætning af MIKE partikelsporingsmodul	36
5.4.1	Følsomhedsanalyse for partikelopløsning	36
5.4.2	Modelopsætning	37
6.	Sedimentspredningsmodel resultater	38
6.1	Følsomhedsanalyse for simulationsperiode	38
6.2	Tunnelløsning	39
6.2.1	Linjeføring ALA01	39
6.2.2	Linjeføring ALA04	45

Confidential

Ramboll - Als-Fyn

6.2.3	Linjeføring ALA09	51
6.3	Broløsning	57
6.3.1	Overskridelsesvarighed	57
6.3.2	Maksimal koncentration	60
6.3.3	Sedimentation	61
7.	Konklusion	63
8.	Referencer	64

Confidential

1. Resumé

Nærværende rapport er en baggrundsrapport, der beskriver metoder og forudsætninger der bruges til den modellering, der gennemføres til bestemmelse af sedimentspredningen ved mulig etablering af en Als-Fyn forbindelsen. Modellen er gennemført for det skitsedesign, der er udarbejdet som en del af de anlægstekniske forundersøgelser. Informationer, der er grundlag for modellen, er formidlet i det anlægstekniske notat (ref. /11/).

Den hydrodynamiske modellering er gennemført med to modeller fra DHIs MIKE 3 software:

1. numerisk baroklin hydrodynamisk 3D-model (MIKE 3 *Flow Model* (HD) model), der kalibreres og valideres, i det omfang det, er muligt med de begrænsede tilgængelige in-situ målinger fra området, og som simulerer vandstand, strøm, salinitet og temperatur.
2. partikelanalysemodel (MIKE 3 *particle tracking* (PT) model), som forudsiger suspendede koncentrationer og bundfaldsdybder, når sediment transporteres og spredes gennem vandsøjlen under påvirkning af HD-modellens resultater.

Der er udvalgt et modelår, som anses repræsentativt for de hydrodynamiske forhold, til gennemførelse for sedimentspildsberegningerne i forbindelse med anlægsaktiviteterne.

Resultaterne præsenteres i form af overskridelsesvarighed for tærskler på 5 og 10 mg/l, den maksimale koncentration målt under simulationsperioden og sedimentation. De maksimale resultater mellem de undersøgte tunnellsøninger, samt resultaterne for broløsningen er som følger (se Afsnit 6 for alle resultater både for tunnel- og broløsningen):

- Området, der overskrider tærsklen på 5 mg/l i mindst 1 døgn har et areal på maksimalt 84 km² (for tunnellsøningen) og på 0,2 km² (for broløsningen). For 10 mg/l er det maksimale areal på 30 km² for tunnellsøningen og 0,1 km² for broløsningen.
- Den gennemsnitlige afstand fra tunnelrenden, med en koncentration over 5 mg/l er maksimalt 820 m og for 10 mg/l er den gennemsnitlige afstand maksimalt 370 m fra tunnelrenden. For broløsningen, er den gennemsnitlige afstand på 75 m og 35 m for en koncentration over hhv. 5 mg/l og 10 mg/l.
- Arealet hvor der aflejres mere end 10 mm er på maksimalt 18 km² for tunnellsøningen og <0,1 km² for broløsningen. Den tilsvarende gennemsnitlige afstand med en sedimentation op til 10 mm er på 600 m og 40 m for hhv. tunnel- og broløsningen.

For en sedimentationstykkelse større end 20 mm er arealet på 9 km² og >0,1 km² med en gennemsnitlig afstand på 370 m og 37 m for hhv. tunnel- og broløsningen. Forskellige usikkerhedskilder skal tages i betragtning, når resultaterne i denne rapport fortolkes. De vigtigste kilder til usikkerheder er:

- Alle resultater, der præsenteres i denne rapport, er baseret på numeriske modelsimuleringer. Sådanne modeller brugt til at beskrive et systems fysiske dynamikker, medfører usikkerheder.
- For at opnå tillid til de numeriske modeller skal de kalibreres og valideres mod in-situ-målinger for at sikre, at de korrekt beskriver de fysiske processer involveret. Den numeriske HD-model blev opsat efter bedste evne af Ramboll med de tilgængelige in-situ data. Der var kun in-situ-målinger tæt på projektområdet til rådighed for vandstanden, mens der var ingen data om strømninger og densitetsprofiler, hvilket introducerer usikkerheder forbundet med HD-modellens resultater.
- De endelige resultater af sedimentspild afhænger i høj grad af mængden og placeringen af de sedimentter, der indgår i MIKE's partikelsporingsmodul. Tidsserien brugt for at beskrive sedimentspildet opbygges på baggrund af følgende antagelser:
 - Spilmængde på 3,5%
 - Sediment spildes ved vandoverfladen
 - Arbejdsperioden for tunnellsøningerne er mellem 52 og 77 uger, og udgravningen sker samtidigt på to steder. Arbejdsperioden for broløsningen er ca. 44 uger, og der udgraves kun ét sted ad gangen. For begge scenarier, antages det, at der arbejdes kontinuerlig hele døgnet, hvilket er et konservativt valg, da der vil opstå kumulative effekter.

Confidential

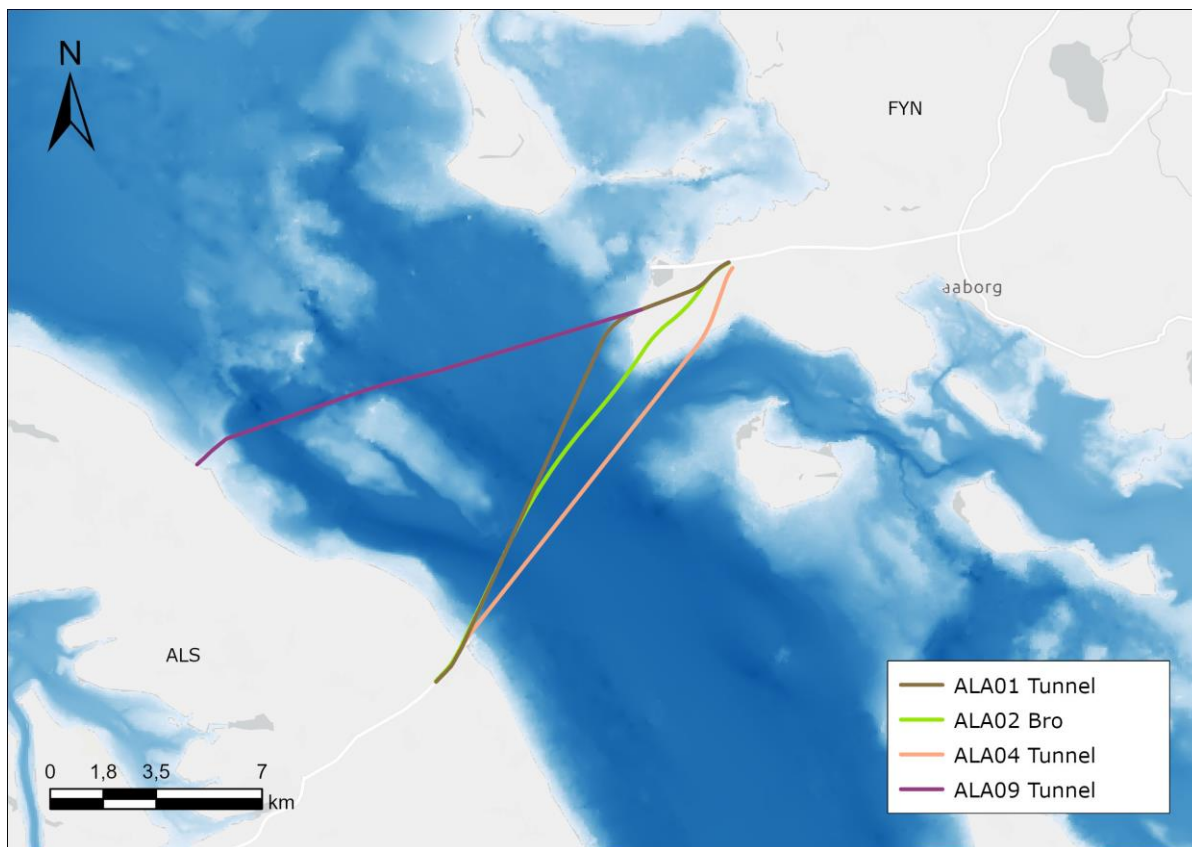
- Et hydrodynamisk repræsentativt år blev identificeret og brugt til at beregne potentielle sedimentspild. Naturlig variation i de hydrodynamiske forhold vil have indflydelse på resultaterne. For eksempel kan mere kraftige strømforhold sprede sedimentet længere væk, men samtidig reducere tykkelsen af de aflejrede sedimenter.
- Jordbundsforholdene karakteriseres i forskellige sedimentfraktioner baseret på vibrocores og grab-samples, indsamlet under geotekniske undersøgelser. Disse prøver er kun tilgængelige over en begrænset strækning og ned til en begrænset dybde.
- De endelige resultater af overskridelsen af visse koncentrationer gives baseret på gennemsnittet for koncentrationerne i hele vandsøjlen.

Confidential

2. Indledning

I forbindelse med miljøundersøgelser for en fast forbindelse mellem Als og Fyn er der udarbejdet modeller til beregning af sedimentspredning ved mulig etablering af forbindelsen.

Undersøgelsesområdet samt linjeføringerne der undersøges på nuværende tidspunkt, er bestemt i det anlægstekniske notat (ref. /11/) og ses nedenfor.



Figur 2-1. Mulige linjeføringer for Als-Fyn forbindelsen undersøgt af ref. /11/. I grå, lyserød og lilla er de undersøgte linjeføringer for sænketunnel og i grøn linjeføringen for bro.

Projektbeskrivelsen overvejer i alt 13 scenarier (ref. /11/) for de forskellige linjeføringer, der er foreslået til Als-Fyn-forbindelsen. I denne rapport vil modelleringen være baseret på **tre** tunnelforbindelser og **én** broforbindelse (vist i Figur 2-1) svarende til følgende scenarier:

1. ALA01: helt nedgravet sænketunnel
2. ALA02: skråstagsbro og betonbjælkebro med delvist og helt nedgravede fundamenter samt højt pæleværk med en sænkekasse (betegnet broløsningen)
3. ALA04: helt nedgravet sænketunnel
4. ALA09: helt nedgravet sænketunnel

Confidential

3. Metode

Følgende afsnit giver et overblik over de modelleringsværktøjer og -metoder, der anvendes i denne undersøgelse. Modelleringen af sedimentspildet er udført ved hjælp af to moduler i DHI's MIKE 3-modelleringsystem:

- en numerisk baroklin hydrodynamisk 3D-model (MIKE 3 *Flow Model* (HD) model), der kalibreres og valideres i det omfang det er muligt med de begrænsede tilgængelige in-situ målinger fra området, og som simulerer vandstand, strøm, salinitet og temperatur. En kort beskrivelse af modellen findes i afsnit 3.1.
- partikelanalysemodel (MIKE 3 *particle tracking* (PT) model), som forudsiger suspendede koncentrationer og bundfaldsdybder, når sediment transporteres og spredes gennem vandsøjlen under påvirkning af HD-modellens resultater. En kort beskrivelse af modellen findes i afsnit 3.2.

3.1 Hydrodynamisk model (HD) – kort beskrivelse

Den hydrodynamiske model er baseret på den fleksible mesh-version af MIKE 3-modelpakken til 3D-modellering af strøm, vandstand, saltholdighed og temperatur og transport af suspenderet sediment.

HD-modellen er opstillet ved hjælp af den tredimensionelle hydrodynamiske modelleringssoftware MIKE 3 HD, med en modelopsætning der dækker den sydlige del af Lillebælt-området og den vestlige del af Østersøen, som er dedikeret til Als-Fyn-forbindelsen.

Modelopsætningen bruger et fleksibelt mesh, med forskellige cellestørrelser fordelt i modelområdet. I modellen anvendes således et fint mesh langs de scenarier der modelleres, mens et grovere mesh bruges i andre dele af modelområdet.

Det skal bemærkes, at der ved opsætning af en numerisk modelsimulering, kan opstå usikkerheder når sådanne modeller anvendes til at beskrive et systems fysiske dynamikker. Yderligere, at der generelt er en usikkerhed associeret med modellen på grund af manglende in-situ data (strømhastighed, temperatur og salinitet) brugt til at kalibrere resultaterne, inden for projektområdet på nuværende tidspunkt.

3.2 Sedimenttransport model – kort beskrivelse

Til simulering af sedimentspredning er den ovennævnte HD-model koblet til en 3D-sedimenttransport model, der kan håndtere transport som følge af strøm og dispersion samt bundfældning af suspenderet sediment. Den numeriske sedimenttransportmodel MIKE 3 PT anvendes til dette formål.

MIKE 3 PT kræver, at de aktuelle strømhastigheder og vandstande er fastsat i tid og rum i et mesh, der dækker modelområdet. Disse oplysninger gives baseret på de hydrodynamiske resultater fra den ovennævnte HD-model.

Sedimentspildet er repræsenteret af et stort antal partikler, hver med en bestemt masse. Partiklerne frigives ved et kildepunkt (f.eks. placeringen af udgravningen) og flyttes successivt, efterhånden som simuleringen forløber.

Modellen anvender en Lagrange-type tilgang, som kun indebærer beskrivelsen af batymetri, strøm og vandstands-felterne som rumlig diskretisering. Fordelene ved denne model er:

- Ingen numerisk diffusion,
- Ingen ophobning af sub-grid effekter,
- Effektiv opløsning af smalle plume-formede strømme.

Hver partikel flyttes inden for et tidsinterval med en afstand svarende til strømhastigheden ganget med tidsintervallet, hvilket repræsenterer advektionen. I z-planen flyttes partiklerne også en afstand tilsvarende sedimentationshastigheden ganget med tidsintervallet.

Partiklerne flyttes efterfølgende en tilfældig afstand, hvilket repræsenterer dispersionen (opdelt i 3 dimensioner), og tager højde for de ikke-løste strømningsprocesser. I en Lagrange-model er dispersionskoefficienterne uafhængige af tidsintervallet og maskestørrelsen.

Confidential

Koncentrationen af sedimentet beregnes på baggrund af partikeltætheden i mesh-cellerne i modellens domæne. Resultaterne fra MIKE 3 PT er uafhængige af MIKE 3 HD-modellens beregningsmesh, og kan gemmes i et finere mesh end det hydrodynamiske input, hvilket kan være nødvendigt for at løse de plume formede strømme der dannes ved spildet.

Transportmodellen simuleres med en scenariebaseret tilgang, dvs. modellen simuleres med hydrodynamiske forhold fra en specifik repræsentativ modelår, hvor anlægsarbejdet udføres. Scenarieperioden, der repræsenterer de hydrodynamiske forhold, vælges fra hindcast datasættet produceret af MIKE 3 HD-modellen, se Afsnit 4.

I forbindelse med sedimentspildsmodellen er der forskellige signifikante usikkerheder der skal tages i betragtning. De endelige resultater afhænger i høj grad af mængden og placeringen af de sedimenter der indgår i MIKE's partikelsporingsmodul. Sedimentspildtidsserien der opsættes som baggrund for modelleringen, tager udgangspunkt i forskellige antagelser på spildprocent, hvor sediment spildes i vandsøjlen og varigheden af gravearbejdet. Yderligere er der usikkerheder i jordbundsforholdene på grund af begrænsede in-situ jordprøver samt beregning af bundfaldshastighederne. Endeligt er der en usikkerhed i valget af det modelår der er brugt til at beregne sedimentspildet da variation i de hydrodynamiske forhold kan have en indflydelse på resultaterne. Resultaterne for modelåret er derfor de mest sandsynlige for et givet år i fremtiden.

Confidential

4. Hydrodynamisk model

4.1 Modellens set-up og parametre

Den hydrodynamiske (HD) model er blevet implementeret ved hjælp af den tredimensionelle MIKE 3 Flow Model (version 2022) software. MIKE 3-modellen er veldokumenteret, og en omfattende beskrivelse kan findes i manualerne, ref. /1/ og /2/. Et overblik over alle input parametrene, valget af MIKE 3 moduler og kilder til rand- og initialbetingelser, der blev brugt i simuleringerne, er opsummeret i Tabel 4-1. Når parametrene ikke er nævnt i denne tabel, antages de standardværdier, der er foreslået i MIKE-manualerne. Modellens opstilling beskrives i større detaljer i resten af dette afsnit.

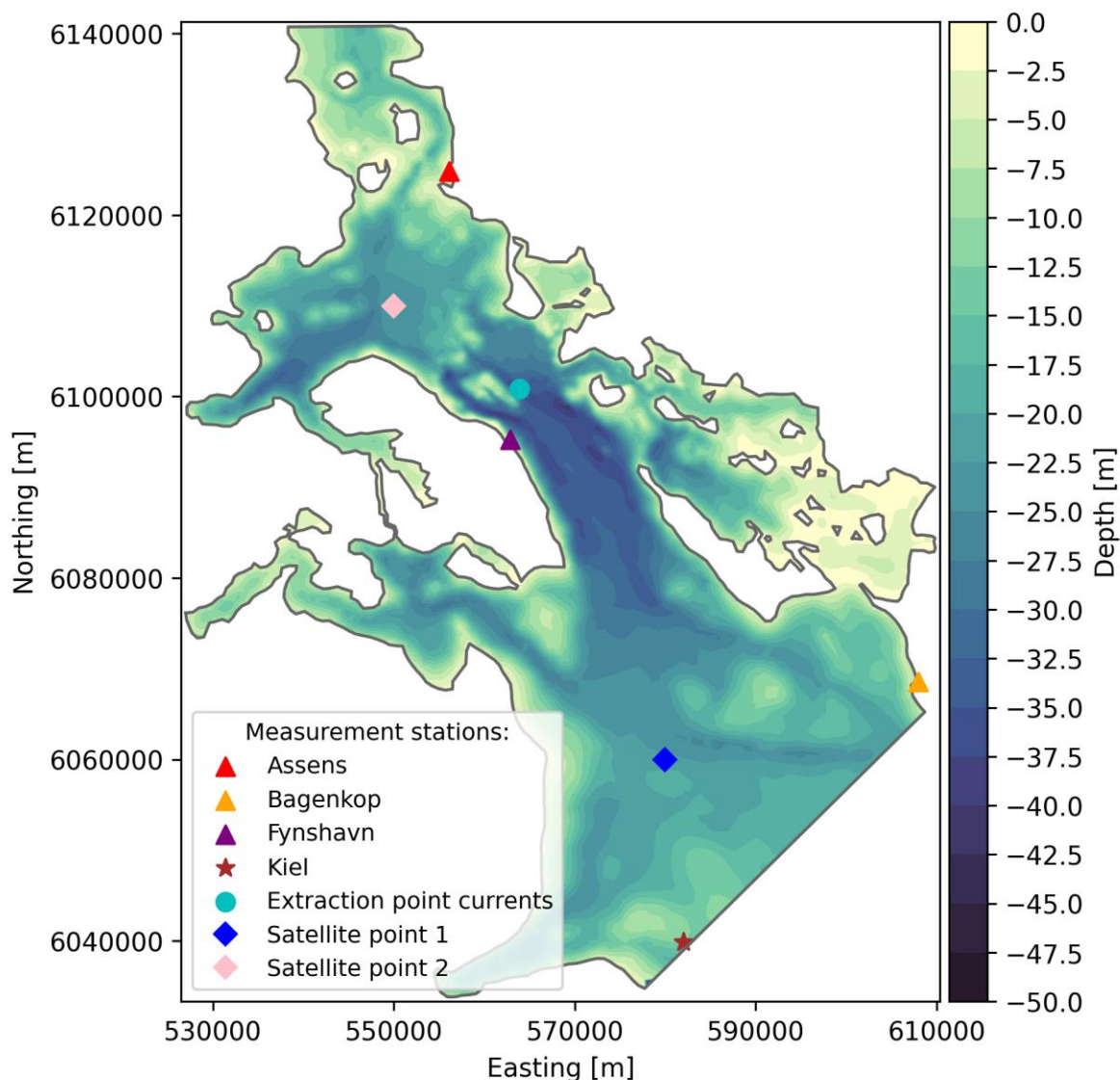
Tabel 4-1. Oversigt over input parametrene til den hydrodynamiske MIKE 3 model.

	Input parametre
Horisontalt mesh	Opløsning, maksimum element areal = 40.000 til 750.000 m ² (mindste indenfor projektområdet og stigende med afstand tunnel/bro korridor).
Vertikalt mesh	Kombinerede sigma/z-lag; 10 lige fordelte sigma-lag til en dybde af 10 m, og 40 lige fordelt z-lag med en konstant netafstand på 1 m.
Tidsperiode	01-11-2016 til 01-11-2017
Maksimalt tidskridt	120 s
Solution technique	Higher order scheme
Hvirvelviskositet	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal hvirvelviskositet: Smagorinsky formulation • Vertikal hvirvelviskositet: k-ε model
Bundfriktion	Konstant ruhedshøjde: 0,0005 m
Dispersion	<ul style="list-style-type: none"> • Horizontal dispersionskoefficient: 1 • Vertikal dispersionskoefficient: 0,01
Corioliskraft	Variierende i domænet som en funktion af breddegraden.
Atmosfærisk påvirkning	Vindhastighed og -retning, og lufttemperatur fra ERA-5 datasættet (ref. /4/)
Initialbetingelser	<ul style="list-style-type: none"> • Vandstands niveau og strømhastighed: fra "start-up" model med barotropiske betingelser • Salinitet og temperatur: 3D-felter hentet the Copernicus Baltic Sea Physics Reanalysis product (ref. /5/)
Randbetingelser	<ul style="list-style-type: none"> • Flather randbetingelser for vandstands niveau og strøm • Dirichlet randbetingelser for temperatur og salinitet • Data hentet fra Copernicus Baltic Sea Physics Reanalysis product (ref. /5/)

4.1.1 Batymetri

Modellens batymetri er præsenteret i Figur 4-1 og er baseret på data fra Danmarks Dybdemodel med 50 m opløsning og hentet fra Dataforsyningen (ref. /6/).

Confidential

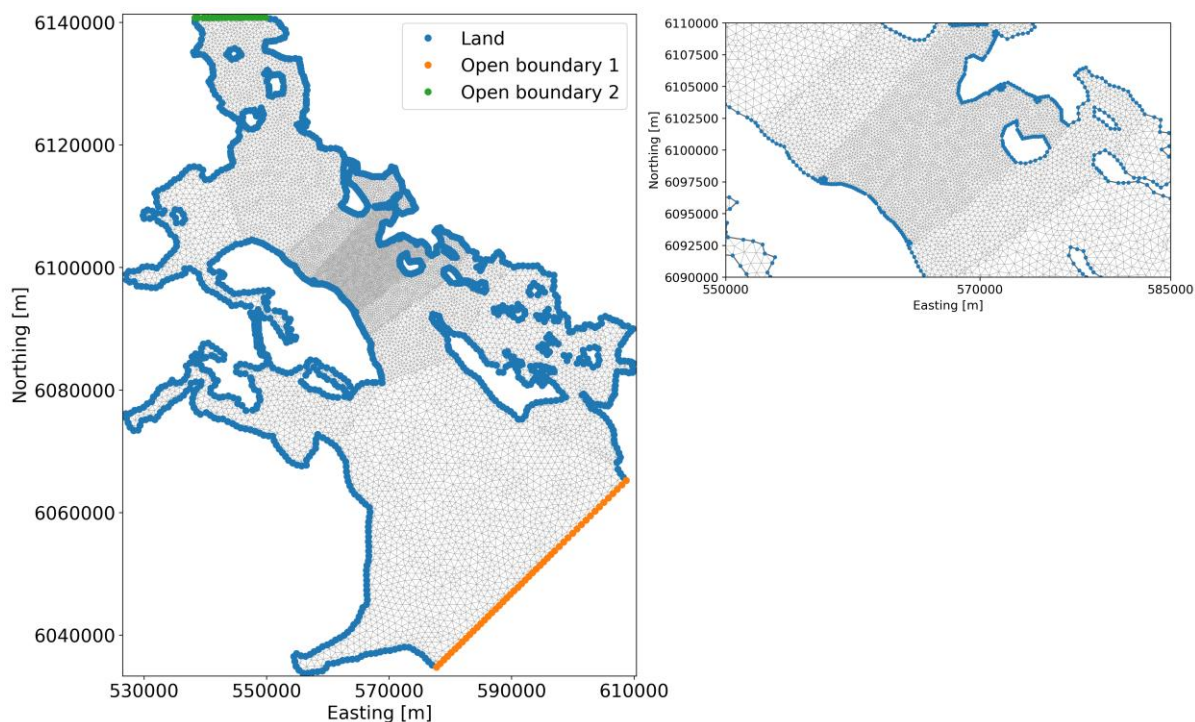


Figur 4-1. Modellens domæne og dybdeprofil. Derudover vises målestationerne brugt til kalibrering og validering af den hydrodynamiske model. Vandstandsmålestationer er angivet med trekanter, stationer præsenteret som en stjerne inkluderer vertikale profiler af temperatur, salinitet samt strømhastighed og -retning. Valideringspunktet ("Extraction point currents"), der bruges til at identificere et hydrodynamisk repræsentativt år baseret på nuværende målinger, er markeret som en cirkel. Satellitpunkterne, der bruges til at validere overfladetemperaturen, er markeret med diamant-symbol. En detaljeret beskrivelse af hver målestation findes i Afsnit 4.2.1.

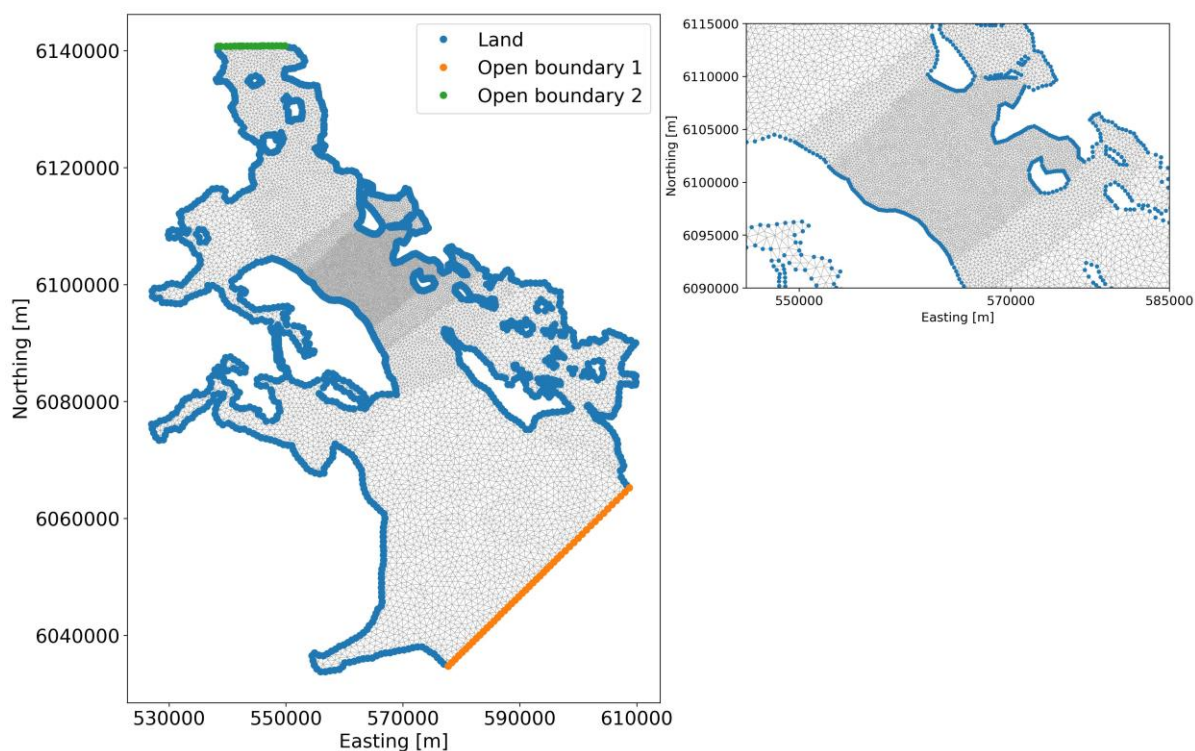
4.1.2 Beregningsnet

Det horisontale beregningsnet vises i Figur 4-2 for tunnelloøsningerne ALA01 og ALA04 og for broløsningen, og i Figur 4-3 for tunnelloøsning ALA09. Begge beregningsnet består udelukkende af trekantede elementer. Beregningsnettet har 19.532 elementer (beregningceller) i det øverste lag. De mindste elementer, der ligger omkring linjeføringen, har et areal på 11.000 – 40.000 m² med et gennemsnit på 25.780 m². Dette svarer til en opløsning på omkring 160 m i et kvadratisk net. Elementområderne øges med afstanden fra linjeføringen, og de største elementer har et maksimalt areal på 750.000 m² (elementer tættest på den sydlige grænse). En finere horisontal opløsning anvendes i sedimentspildmodellen, se Afsnit 5.

Confidential



Figur 4-2. Modellens domæne og horisontale beregningsnet af den hydrodynamiske model brugt til tunnelløsningerne ALA01 og ALA02 samt broløsningen. I modellen er der to åbne grænser.

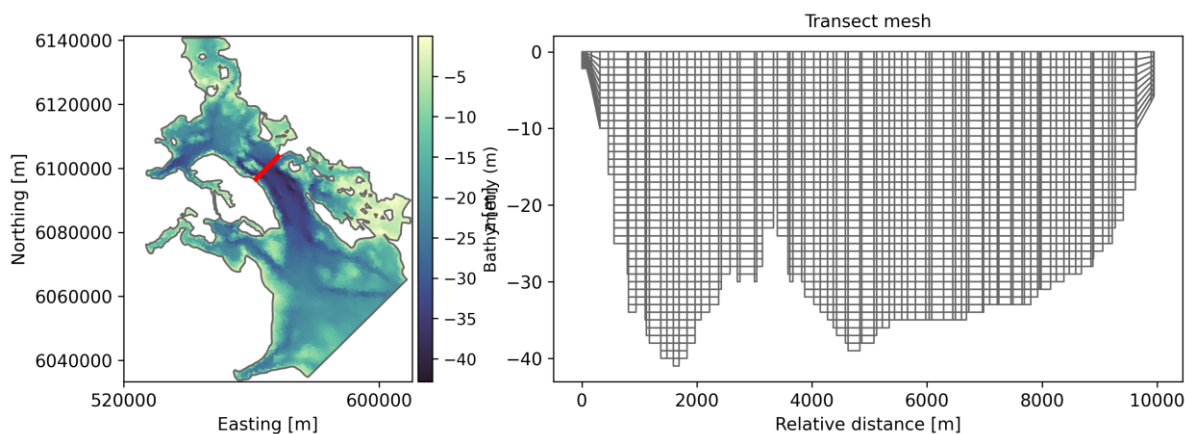


Figur 4-3. Modellens domæne og horisontale beregningsnet af den hydrodynamiske model brugt til tunnelløsningen ALA09. I modellen er der to åbne grænser.

Det lodrette domæne blev diskretiseret ved hjælp af i alt 50 lag, hvor de nederste 40 lag er defineret som horisontale z-lag med en konstant lagtykkelse på 1 m. De øverste 10 lag fra overfladen til en vanddybde på 10 m er defineret som sigma-lag (lagtykkelse jævnt fordelt over

Confidential

den aktive vanddybde). Den vertikale opløsning ses i Figur 4-4 og gælder for begge beregningsnet.

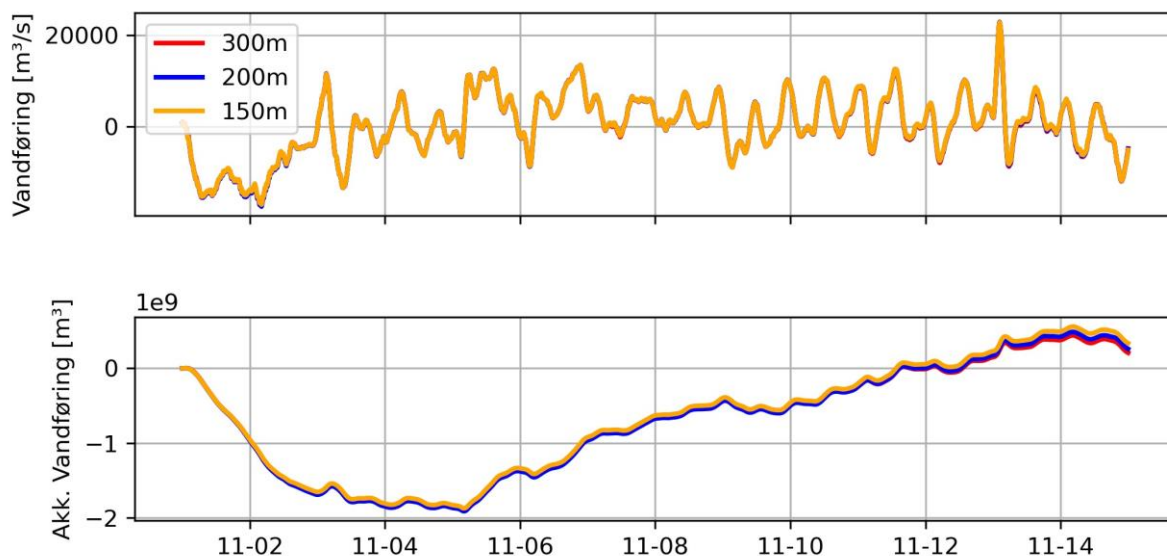


Figur 4-4. Vertikale mesh af tværsnittet (rød linje på batymetri kortet til venstre) fra Als (0 m relative distance) til Fyn (10000 m relative distance). Den lodrette opløsning er på 1 m.

Grid konvergering

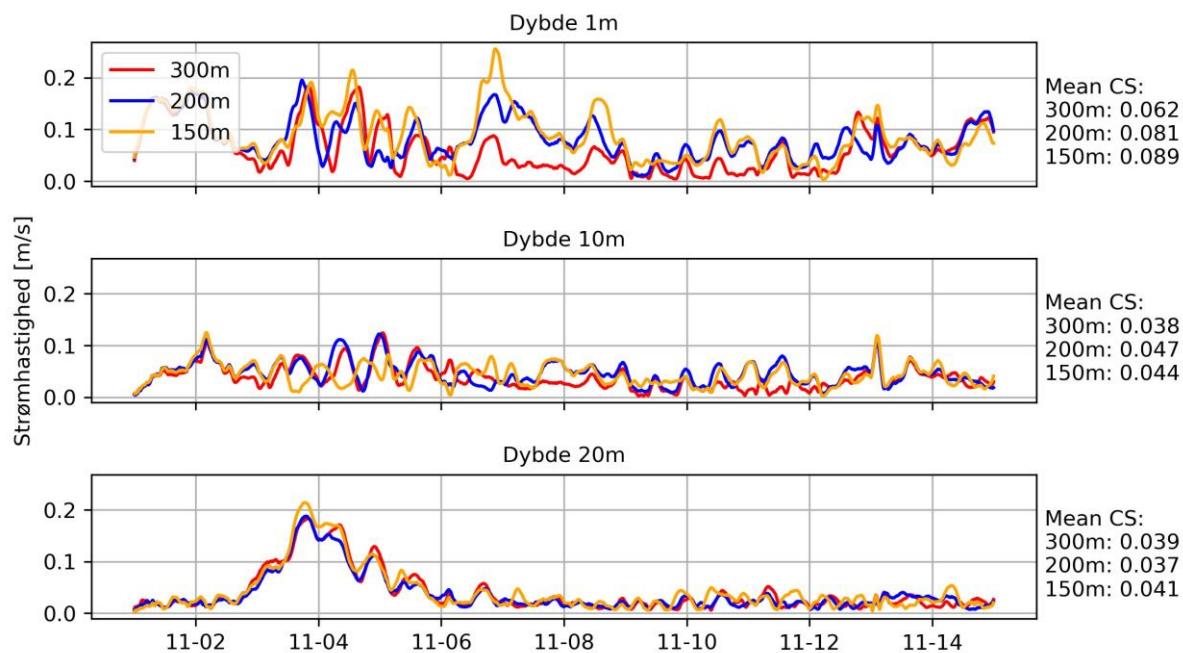
En række grid konvergeringstest er blevet udført for at kontrollere, om HD-model resultaterne er signifikant påvirket af opløsningen. En to-ugers simulering blev udført ved at bruge samme opsætningen som vist i Tabel 4-1, dog ved at variere de horisontale element-størrelser omkring projektområdet. Resultaterne for vandføring, strømhastighed, saltholdighed og temperatur for element-størrelser på 300 m, 200 m og 150 m vises som tidsserier i Figur 4-5, Figur 4-6, Figur 4-7 og Figur 4-8. Resultaterne vises som strømroser i Figur 4-9 og Figur 4-10.

Resultaterne viser, at de forskellige horisontale element-størrelser kun har en begrænset påvirkning på HD-modellens resultater. En horisontal meshopløsning på 200 m blev valgt for at sikre nøjagtige resultater samtidig med at holde CPU-tiderne håndterbare. Derudover blev lignende tests udført for at undersøge indflydelsen af varierende vertikale meshopløsninger og forskellige kombinationer af sigma- og z-lag. En opløsning på 1 m og en kombination af sigma- og z-lag blev fundet tilstrækkeligt detaljeret til formålet med denne undersøgelse.

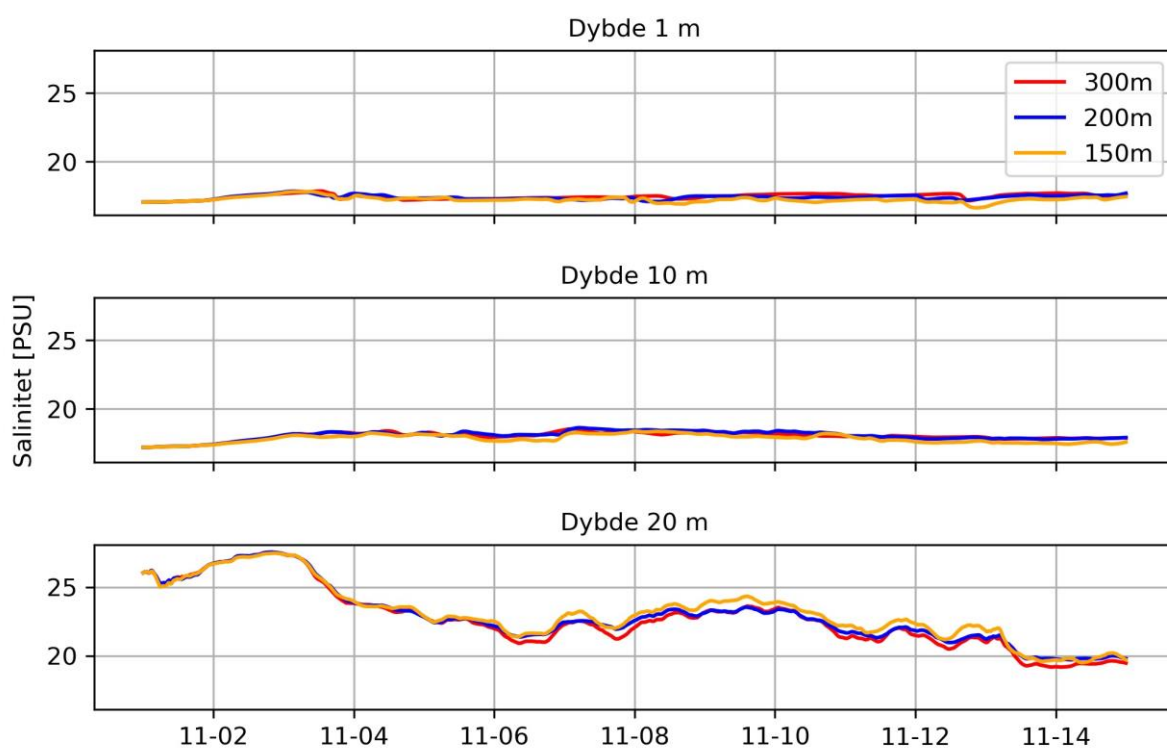


Figur 4-5. Tidsserie af vandføring (top panel) og akkumuleret vandføring (nederste panel) for forskellige element-størrelser. Vandføringen er beregnet for et tværsnit og ikke et punkt.

Confidential

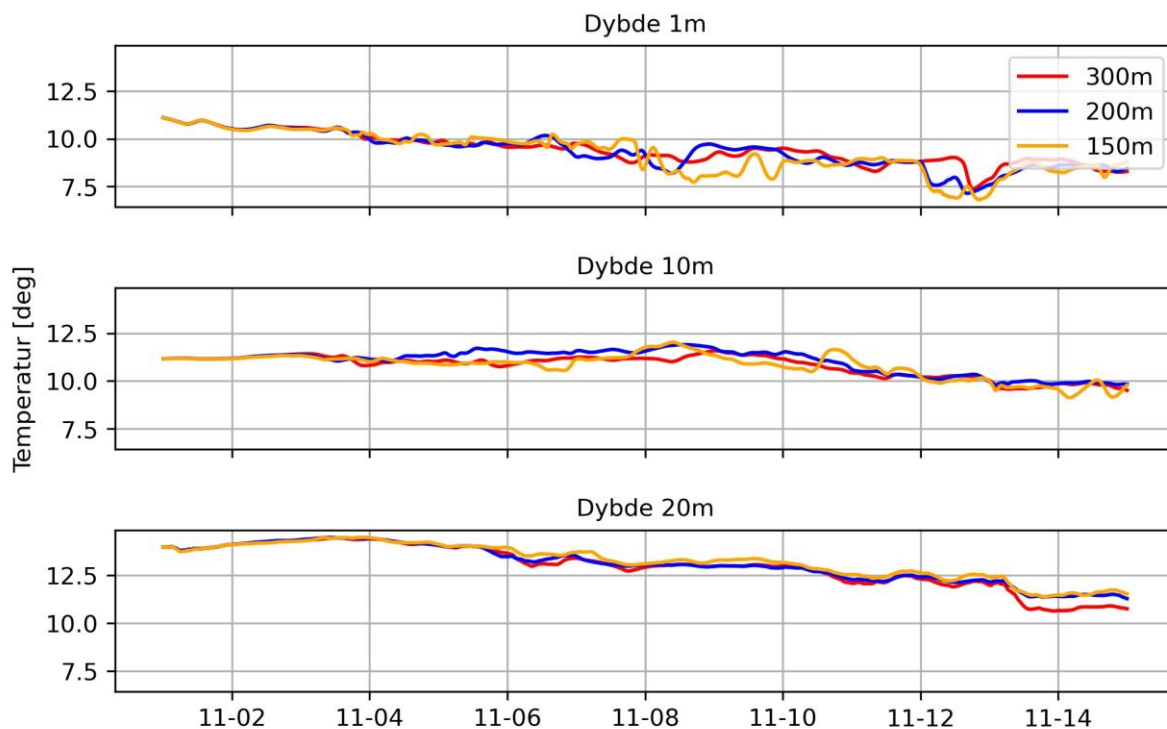


Figur 4-6. Tidsserier af strømhastighed i forskellige vanddybder simuleret med forskellige element-størrelser. Med CS betegnes strømhastigheden.

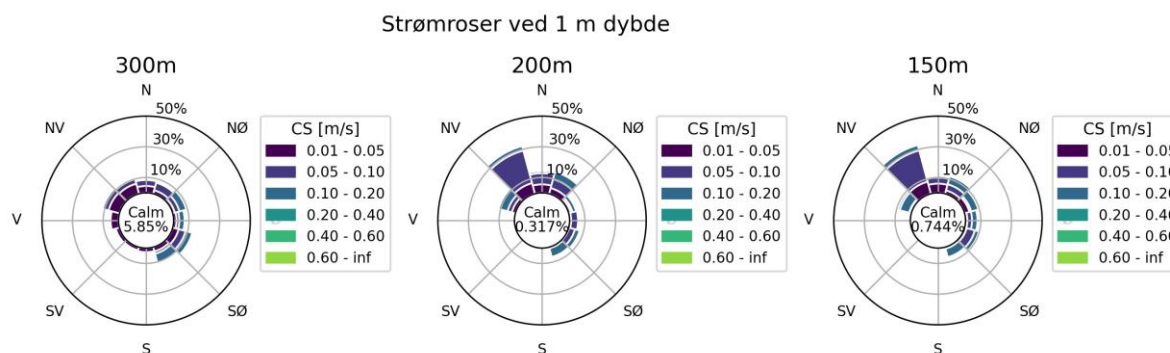


Figur 4-7. Tidsserie af salinitet i forskellige dybder simuleret med forskellige element-størrelser.

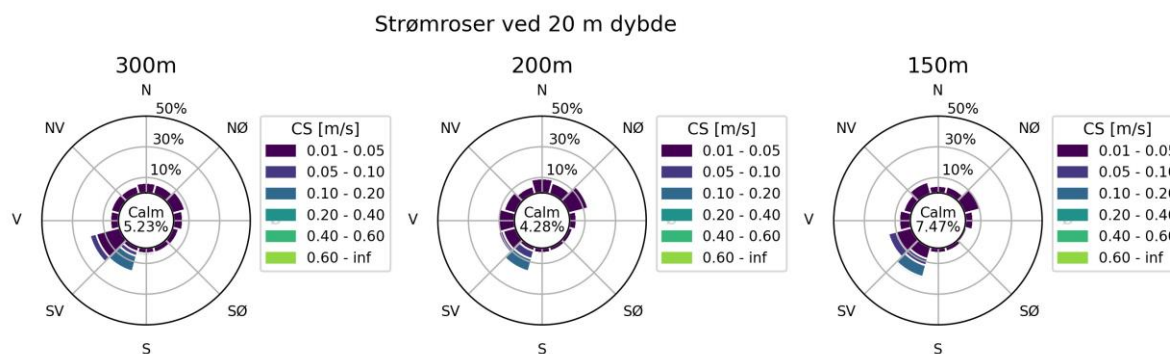
Confidential



Figur 4-8. Tidsserie af temperatur i forskellige dybder simuleret med forskellige element-størrelser.



Figur 4-9. Strømroser i 1 m dybde for forskellige horisontale mesh.



Figur 4-10. Strømroser i 20 m dybde for forskellige horisontale mesh.

Confidential

4.1.3 Initialbetingelser

Initialbetingelserne for vandstand og strømhastighed er fundet ved at køre modellen med en "start-up" periode på to uger før opstartsdatoen. Modellen er kørt under barotropiske betingelser (i.e. uden densitetsforskelle) og de resulterende parametre er derefter brugt som initialbetingelser i den officielle model. Med en barotropisk model generes strøm og vandstand uden at de påvirkes af salinitet og temperatur (densiteten) hvilket er tilstrækkelig for at generere initialbetingelser.

Der er indlagt initialfelter for temperatur og salinitet for at beskrive lagdelingen ved igangsættelse af simuleringsperioden. Initialfelterne for temperatur og salinitet er hentet fra E.U. Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) Baltic Sea Physics Reanalysis produkt (ref. /5/). At have gode initialbetingelser reducerer markant spin-up tiden af en 3D-model og forbedrer modellens performance i høj grad. Baltic Sea Physics Reanalysis produktet er baseret på NEMO-Nordic cirkulationsmodellen, som anvender data assimilation for temperatur- og salinitetsfelterne.

4.1.4 Randbetingelser

På de åbne modelrande (se Figur 4-2), er der indlagt randbetingelser for strømhastigheder, salinitet og temperatur. Alle randbetingelserne stammer fra CMEMS Baltic Sea Physics Reanalysis produktet (ref. /5/). For vandstand er randbetingelserne taget fra vandstandsmålestationen ved Assens for den nordlige rande, og Kiel og Bagenkop for den sydlige (se placering i Figur 4-1). For den sydlige rande er vandstanden interpoleret mellem Kiel og Bagenkop målestationerne.

Father's randbetingelse anvendes til at beskrive det hydrodynamiske input, hvilket er en kombination af vandstanden og strømhastighederne på randen. Temperaturen og saliniteten (vertikale profiler) er defineret som Dirichlet-randbetingelser (specificerede værdier) der kun påtrykkes ved indstrømning.

4.1.5 Atmosfærisk påvirkning

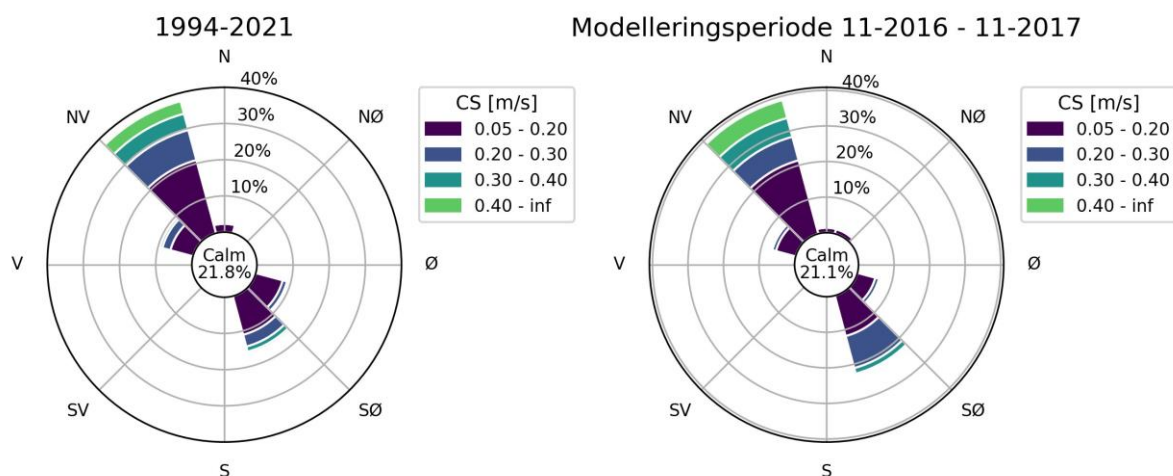
Modellen bruger data fra ERA-5 Global Reanalysis produktet (ref. /4/) til at definere vindhastighed og -retning samt de atmosfæriske temperaturforhold i området. De brugte data har en opløsning på 0.25° .

4.1.6 Modelleringsperiode

Perioden fra 01-11-2016 til 01-11-2017 blev valgt som grundlag for simuleringerne af de hydrodynamiske forhold. Denne periode blev identificeret som et hydrodynamisk repræsentativt år, baseret på nuværende målinger for valideringspunktet tæt på projektområdet (se Figur 4-1 for lokalitet). Målingerne dækker omkring 27 års tilgængelige data for strømhastigheder på flere dybder. Strømroser for den valgte periode sammenlignes med strømroser for hele observationsperioden på 27 år. Resultaterne vises i Figur 4-11 og Figur 4-12 ved en dybde på henholdsvis 4.5 m og 23 m. Der observeres en god overensstemmelse i både størrelse og retning af vindhastigheden.

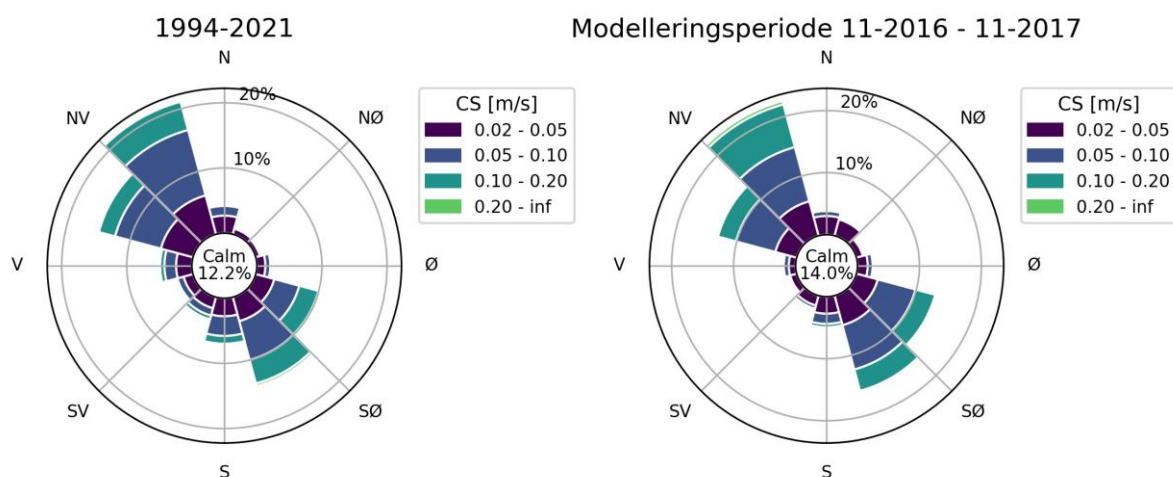
Confidential

Strømroser ved 4.5 m dybde



Figur 4-11. Strømroser baseret på strømhastigheder målt i 4.5 m dybde ved linjeføringslokationen. Til venstre er rosen for hele målingsperioden og til højre er rosen for det valgte repræsentative år.

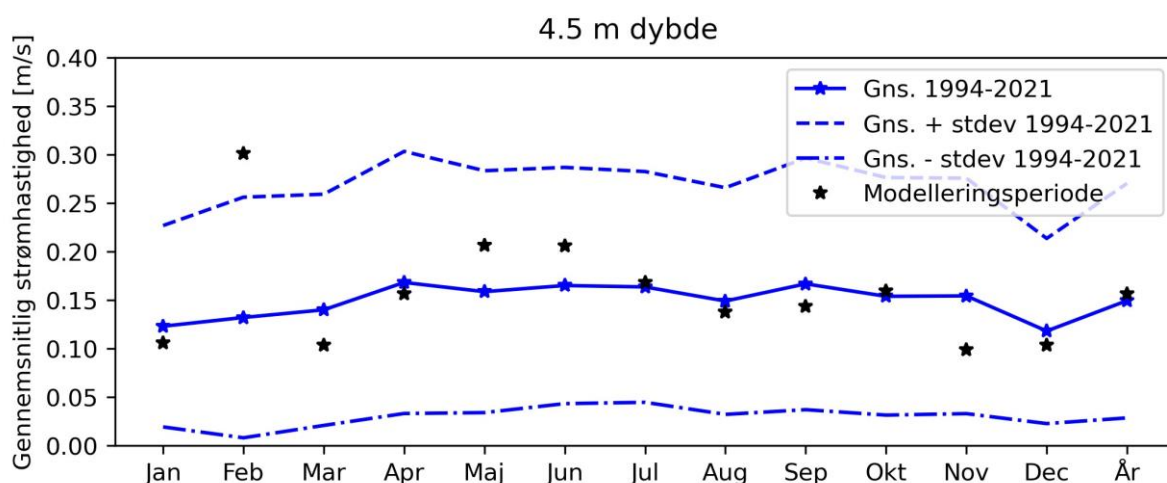
Strømroser ved 23 m dybde



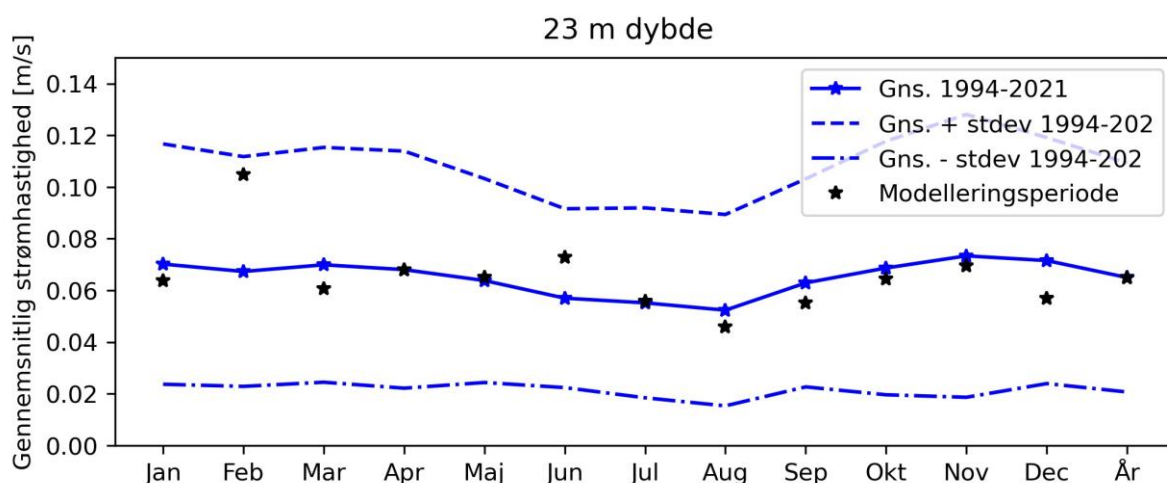
Figur 4-12. Strømroser baseret på strømhastigheder målt i 23 m dybde ved linjeføringslokationen. Til venstre er rosen for hele målingsperioden og til højre er rosen for det valgte repræsentative år.

Månedlige gennemsnit og standardafvigelser for strømhastighederne baseret på målingerne præsenteres i Figur 4-13 og Figur 4-14, ved dybder på henholdsvis 4 m og 26 m. Den udvalgte modelleringsperiode repræsenterer den overordnede tendens for hele perioden (1994-2021) godt, med middelstrømhastigheder, der er lidt større end gennemsnittet for 1994-2021.

Confidential



Figur 4-13. Strømhastighedsstatistikker ved 4.5 m dybde som funktion af månederne fra det valgte repræsentative år (01-11-2016 to 01-11-2017), sammenlignet med gennemsnittet for 1994-2021. Strømhastighederne er målt ved valideringspunktet vist i Figur 4-1.



Figur 4-14. Strømhastighedsstatistikker ved 23 m dybde som funktion af månederne fra det valgte repræsentative år (01-11-2016 to 01-11-2017), sammenlignet med gennemsnittet for 1994-2021. Strømhastighederne er målt ved valideringspunktet vist i Figur 4-1.

Confidential

4.2 Modelfølsomhed og validering

I dette afsnit præsenteres følsomheden af HD-modellen over for udvalgte parametre samt udført validering af HD-modellen. I Afsnit 4.2.1 beskrives de tilgængelige in-situ- og satellitdata. Herefter præsenteres valideringen af randbetingelserne i Afsnit 4.2.2. Følsomheden af modellen over for udvalgte inputparametre forklares i Afsnit 4.2.3. Endelig beskrives valideringen af modellen for vandstands niveauet og overfladetemperaturen i henholdsvis Afsnit 4.2.4 og 4.2.5.

4.2.1 Målinger

To kilder til målinger er blevet anvendt i dette projekt: in-situ målinger og satellitobservationer.

In-situ målinger

Data fra fire forskellige målestationer blev anvendt til at validere modellen. Placeringerne af disse stationer vises i Figur 4-1. Et overblik over de målte parametre på hver af målestationerne findes i Tabel 4-2.

Alt data er downloaded fra EU's CMEMS Baltic Sea In-Situ Near Real Time Observations produkt (ref. /7/). Dette in-situ data produkt fungerer som interface mellem centre, der distribuerer in-situ målinger fra nationale og internationale observationssystemer. Tidsserie stationerne Assens, Bagenkop og Fynshavn er drevet af *Danmarks Meteorologiske Institut (DMI)*, mens Kiel målestation er en del af det tyske *Federal Maritime and Hydrographic Agency (BSH)*. Yderligere information om in-situ data produktet kan findes i brugermanualen /8/.

In-situ målingerne bliver kvalitetsvurderet, før de bliver distribueret af CMEMS. Detaljer om dette er angivet i kvalitetsinformationsdokumentet /9/. Derudover viser en visuel inspektion af dataene, at der er meget få outliers. Derfor anses dataene for at være af tilstrækkelig kvalitet til at kunne bruges til kalibrering og validering af modellen.

Tabel 4-2. Målte parameter ved målestationerne vist i Figur 4-1. Bemærk at kun de målte parametre der bruges til kalibrering/validering, er nævnt; parametre der er målte, men ikke brugt i dette studie er ikke nævnt.

Målestation	Longitudo [m UTM32]	Latitude [m UTM32]	Parametre
Assens	556127	6124826	Vandstands niveau
Bagenkop	607980	6068575	Vandstands niveau
Fynshavn	562899	6095234	Vandstands niveau
Kiel	582029	6039892	Overfladetemperatur og salinitet ved forskellige dybder
			Strømhastighed ved forskellige dybder

Satellitobservationer

På grund af manglen på in-situ målinger tilgængelige i modelområdet, blev andre datakilder til at validere modellen undersøgt. Satellitdata er en god kilde til at supplere in-situ data, da dataene dækker et stort rumligt område.

Havoverfladetemperatur (SST) data, der er afledt af infrarøde radiometre om bord på satellitter, er anvendt i studiet. Dataene er hentet fra CMEMS Baltic Sea – L3s Sea Surface Temperature Reprocessed produktet, ref. /10/.

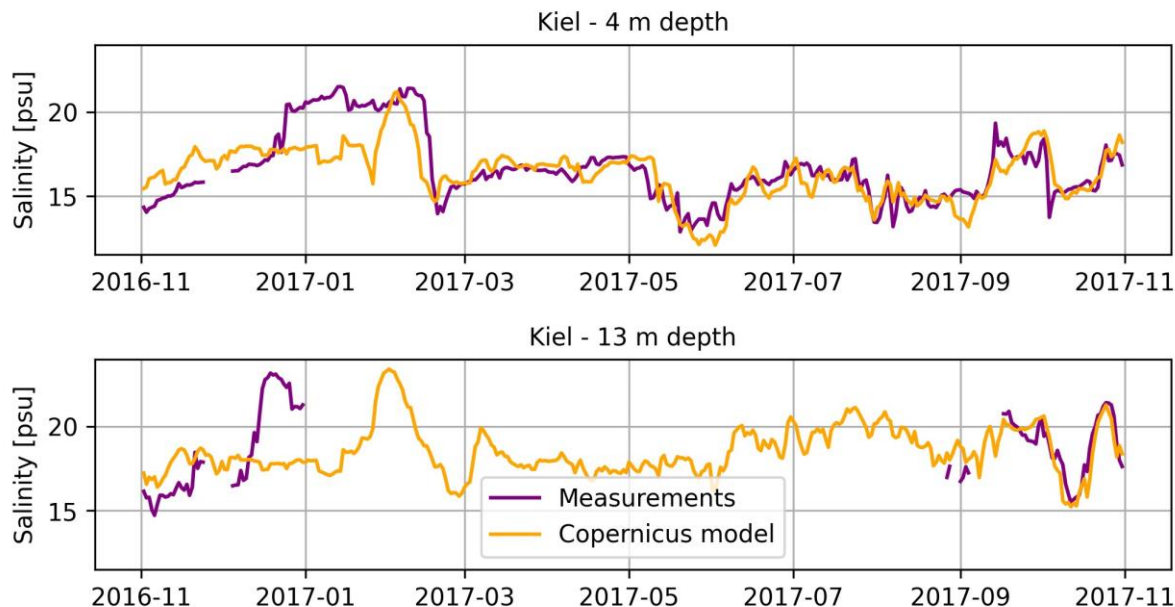
4.2.2 Randbetingelser validering

Kiel målestationen, der ligger tæt på den sydlige åbne modelrande (se Figur 4-1 for placering) er brugt til at validere randbetingelserne, der anvendes i HD-modellen. Generelt er data fra (CMEMS) Baltic Sea Physics Reanalysis produktet (ref. /5/), der anvendes som randbetingelser, i god overensstemmelse med målingerne og anses for passende til at anvende i HD-modelsimulationerne.

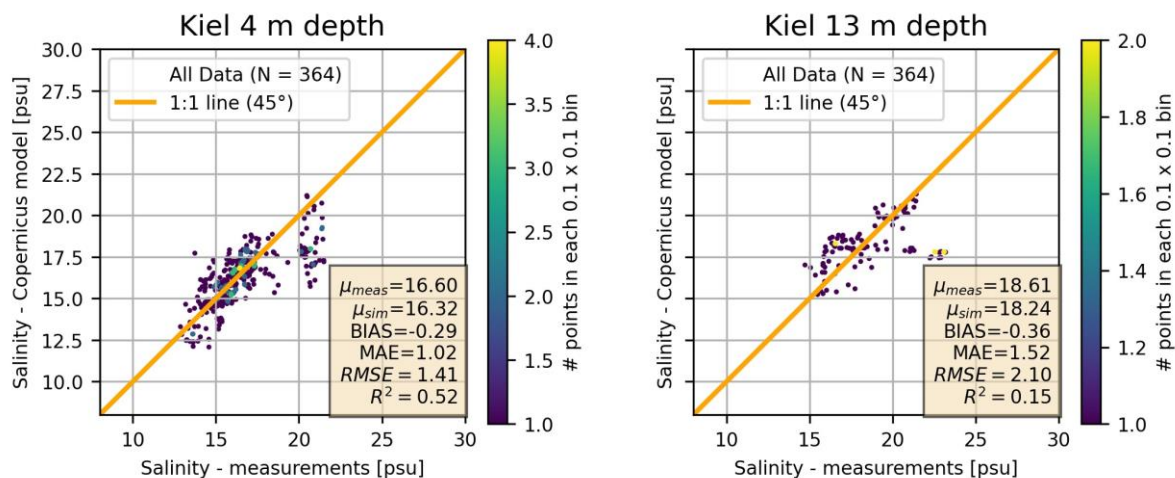
Confidential

Salinitet

Sammenligningen af saltholdigheden mellem (CMEMS) Baltic Sea Physics Reanalysis-produktet (ref. /4/), brugt til at generere randbetingelserne, og målingerne på Kiel stationen præsenteres i Figur 4-15 og Figur 4-16.



Figur 4-15. Tidsserie sammenligning af salinitet ved Kiel målestation (se Figur 4-1 for placering).

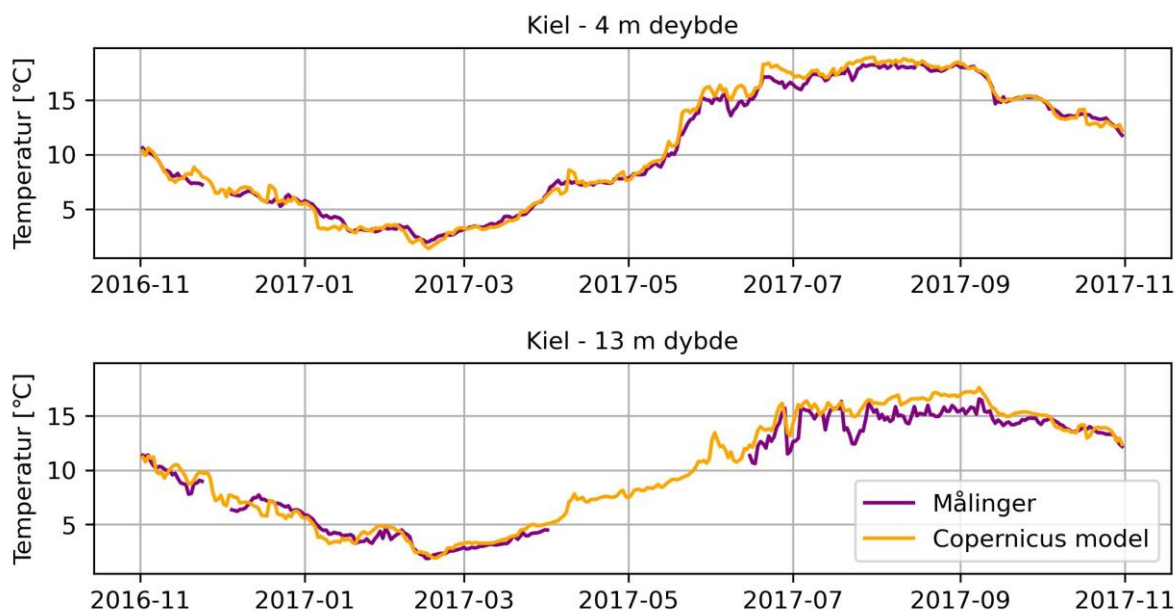


Figur 4-16. Densitetsscatterplot af salinitet ved Kiel målestation (se Figur 4-1 for placering). RMSE står for Root Mean Square Error og MAE for Mean Absolut Error. Data for perioden vist i Figur 4-15 er inkluderet i disse plots.

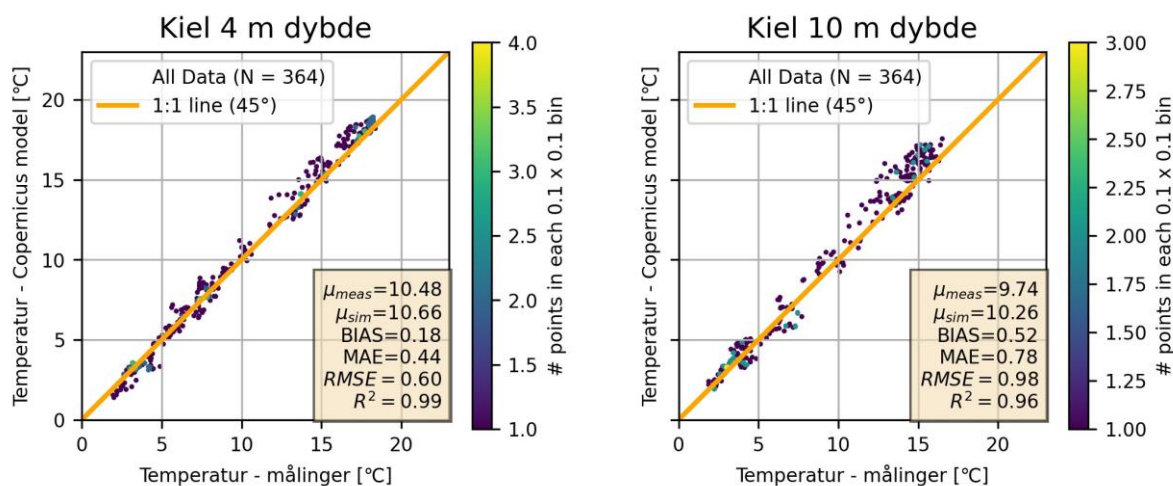
Overfladetemperatur

Sammenligning af overfladetemperaturen mellem (CMEMS) Baltic Sea Physics Reanalysis-produktet (ref. /4/), der blev brugt til at generere randbetingelserne, og målingerne ved Kiel stationen præsenteres i Figur 4-17 og Figur 4-18.

Confidential



Figur 4-17. Tidsserie sammenligning af overfladetemperatur ved Kiel målestation (se Figur 4-1 for placering).



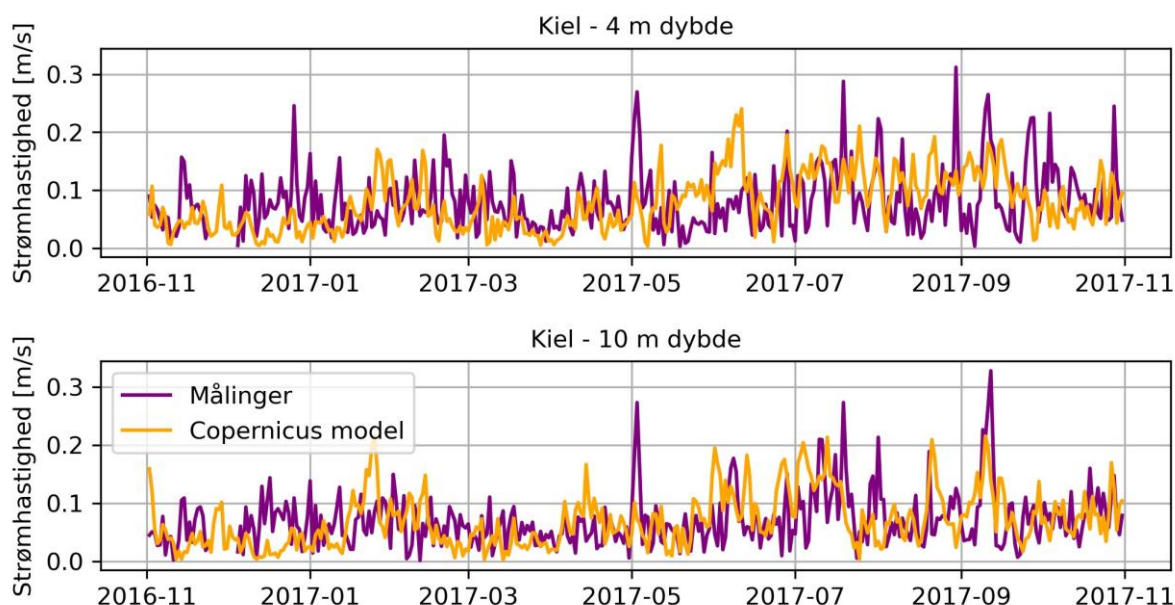
Figur 4-18. Densitetsscatterplot af overfladetemperatur ved Kiel målestation (se Figur 4-1 for placering). RMSE står for Root Mean Square Error og MAE for Mean Absolut Error. Data for perioden vist i Figur 4-15 er inkluderet i disse plots.

Strømhastigheder

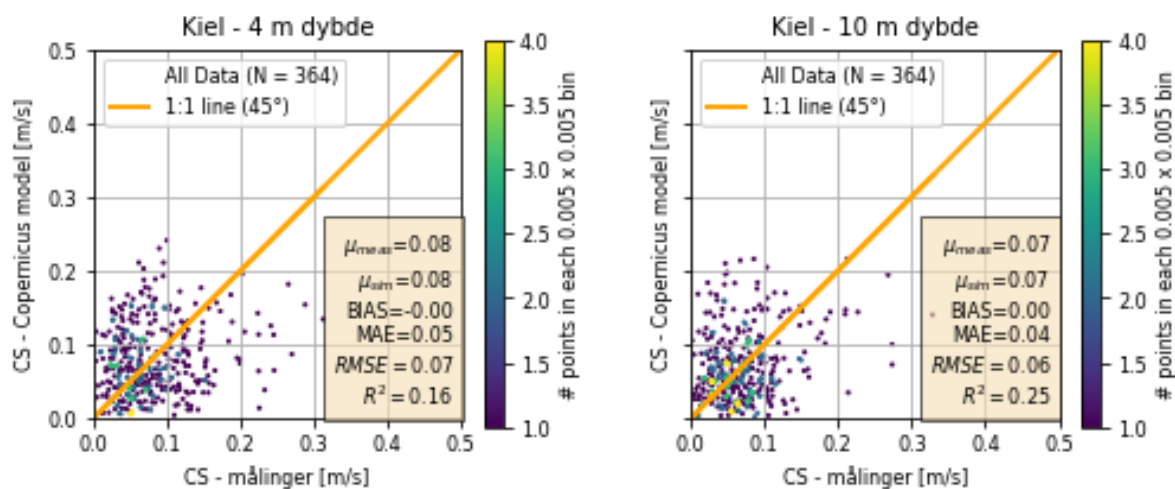
Sammenligning af strømhastighederne mellem (CMEMS) Baltic Sea Physics Reanalysis-produktet (ref. /4/), der blev brugt til at generere randbetingelserne, og målingerne ved Kiel stationen er præsenteret i Figur 4-19, Figur 4-20 og Figur 4-21. De gennemsnitlige strømhastigheder stemmer relativt godt overens med målingerne, dog med lidt forskudte peaks. Yderligere, kan en vis afvigelse ses i strømretningerne (Figur 4-21), hvor den primære strømretning skifter fra cirka 270° (målinger) til 300°-330° (model). Denne afvigelse skyldes (formentlig) den grove rumlige opløsning af CMEMS-modellen (4 km), der ikke opløser den detaljerede batymetri i området, og at målestationen ligger tæt på land. Dette resulterer i, at strømmene tvinges til at gå mere mod nord på grund af landgrænserne. De nævnte diskrepanser vil påvirke de kortvarige modelresultater, dog fordi de gennemsnitlige strømhastigheder er godt indfanget, og de endelige resultater præsenteres for et hydrodynamisk repræsentativt år (der viser et gennemsnit over flere måneder), er kvaliteten på randbetingelserne vurderet til at være acceptabelt til rapportens

Confidential

formål. For at kunne opnå bedre resultater er in-situ målinger tæt på tunnelrenden og gravearbejdet for broen nødvendige.

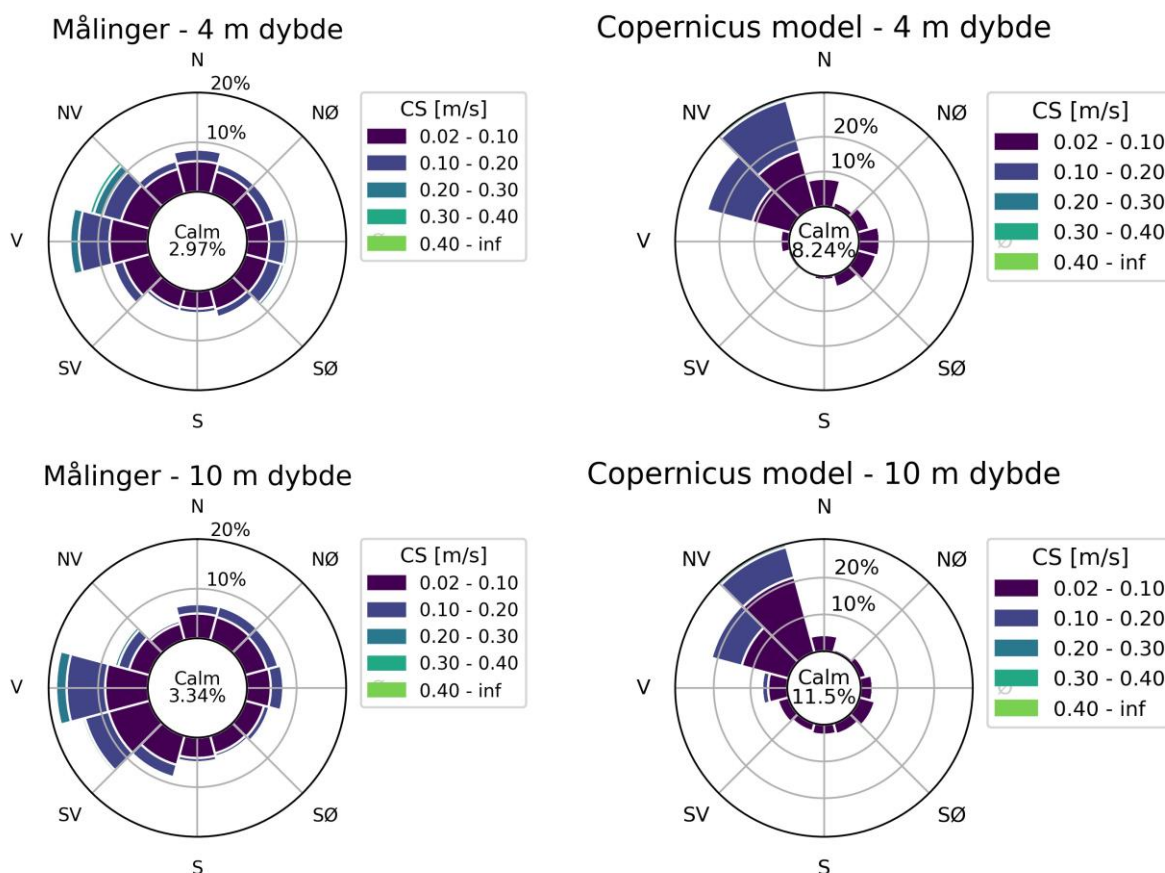


Figur 4-19. Tidsserie sammenligning af strømhastigheder ved Kiel målestation (se Figur 4-1 for placering).



Figur 4-20. Densitetsscatterplot af strømhastigheder ved Kiel målestation (se Figur 4-1 for placering). RMSE står for Root Mean Square Error og MAE for Mean Absolut Error. Data for perioden vist i Figur 4-19 er inkluderet i disse plots. Med CS betegnes strømhastighed.

Confidential



Figur 4-21. Strømrøse sammenligning ved Kiel målestation (se Figur 4-1 for placering). Med CS betegnes strømhastighed.

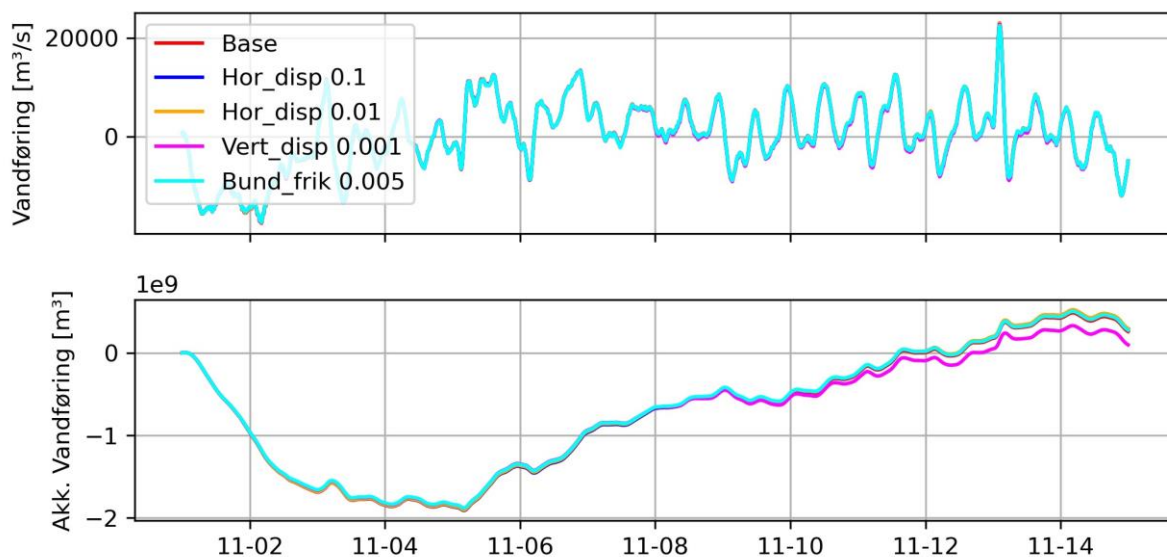
4.2.3 Modelfølsomhed

En egentlig detaljeret kalibrering af HD-modellen har det ikke været muligt at udføre på grund af manglende in-situ data omkring projektområdet mht. strømhastigheder og lagdeling. I stedet blev der anvendt nogle input-parametre, baseret på Rambølls erfaring og andre modelleringsrapporter. I dette afsnit præsenteres følsomhedsanalyser for at undersøge, om HD-modellens resultater er signifikant påvirket af at variere disse input-parametre. De testede input-parametre er: den horisontale og vertikale dispersionskoefficient og bundfriktionen.

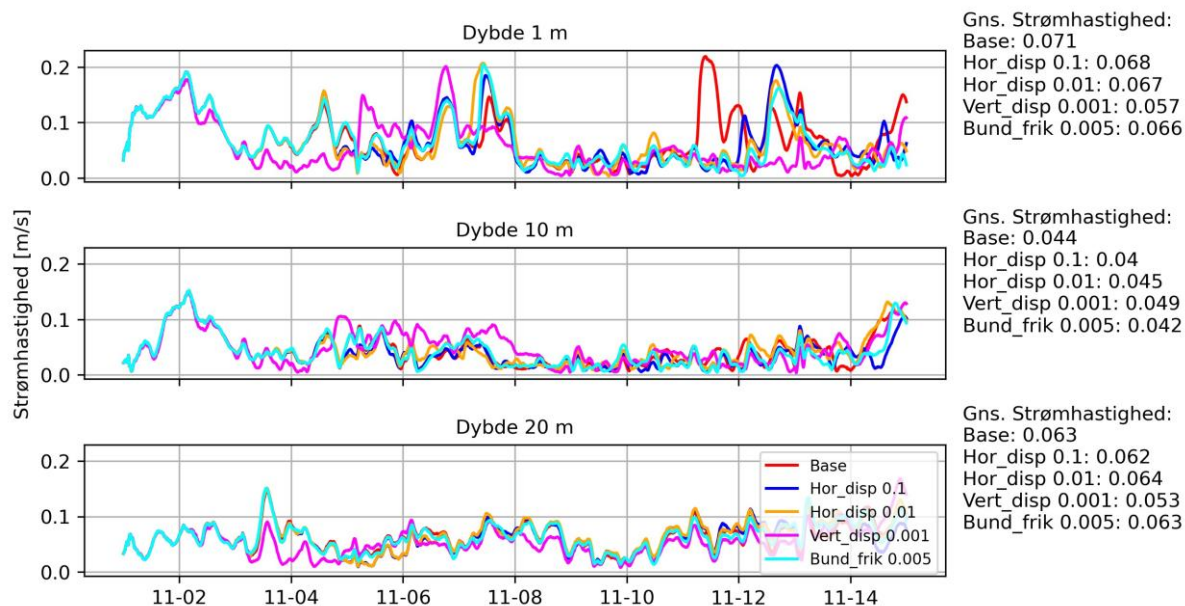
Grid-dependence testen præsenteret i Afsnit 4.1.2, blev udført over en to-ugers simuleringsperiode. Værdierne sat for "base"-casen er delvist baseret på Rambølls erfaring fra Østersø området og modelopsætningen rapporteret i forbindelse med miljøundersøgelsen (VVM) af Femernbælt-krydsningen (ref. /13/).

I Figur 4-22 ses vandføringen og akkumuleret vandføring over simuleringsperioden beregnet med forskellige parametre. Af figuren ses det, at både vandføringen og akkumuleret vandføring er forholdsvis upåvirkede. Testen blev også udført for strømhastighederne i forskellige dybder, og resultaterne er præsenteret i Figur 4-23. De samme resultater blev fundet for salinitet, overfladetemperatur og strømrøserne (ikke vist her). Baseret på disse resultater konkluderes det, at værdierne, der anvendes for 'base case', er acceptable.

Confidential



Figur 4-22. Sammenligning af vandføring og akkumulert vandføring ved forskellige horisontale og vertikale dispersion-koefficienter og bundfriktion. "Base" har følgende parameter: horisontal dispersions-koefficient på 1, vertikal dispersions-koefficient på 0.01 og bundfriktion på 0.005 m (se også Tabel 4-1).

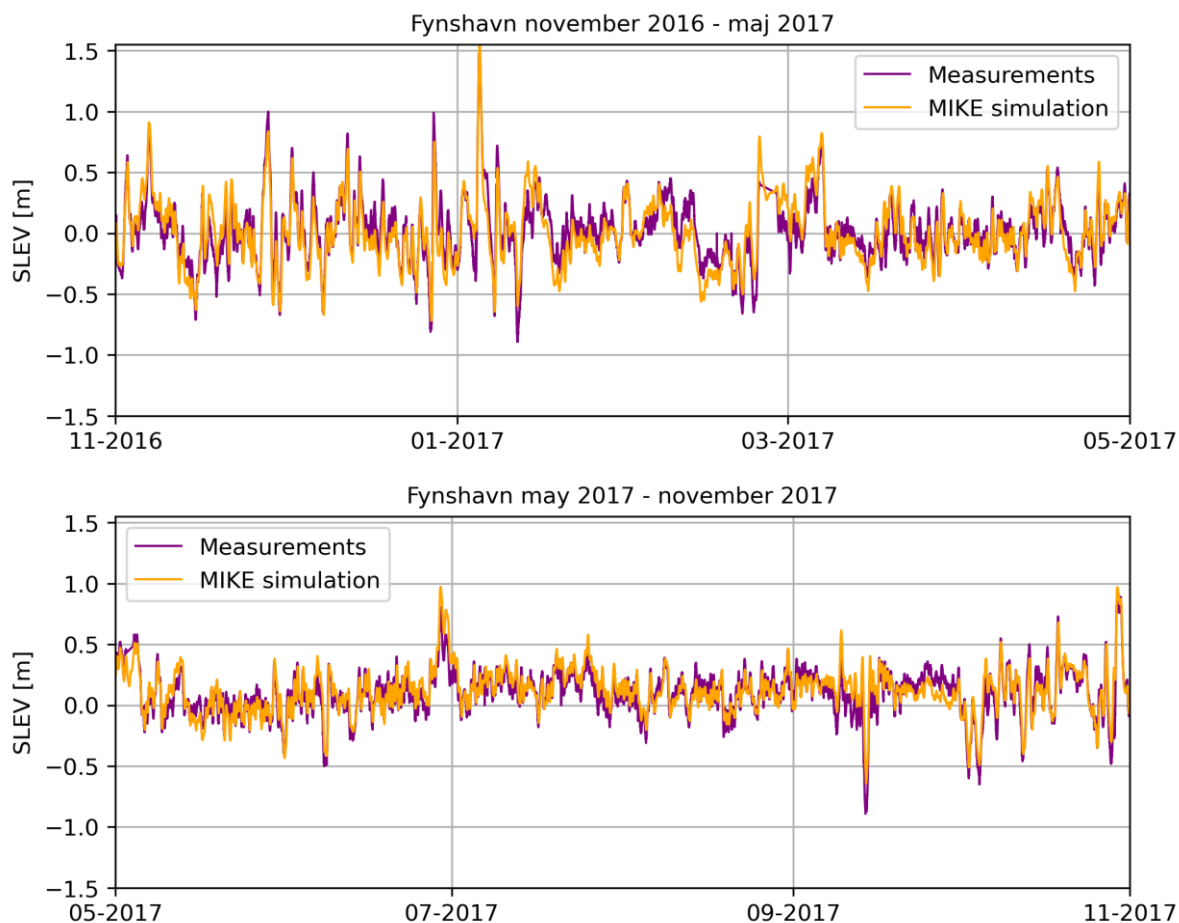


Figur 4-23. Sammenligning af strømhastigheden ved forskellige horisontale og vertikale dispersion-koefficienter og bundfriktion. "Base" har følgende parameter: horisontal dispersions-koefficient på 1, vertikal dispersions-koefficient på 0.01 og bundfriktion på 0.005 m (se også Tabel 4-1).

Confidential

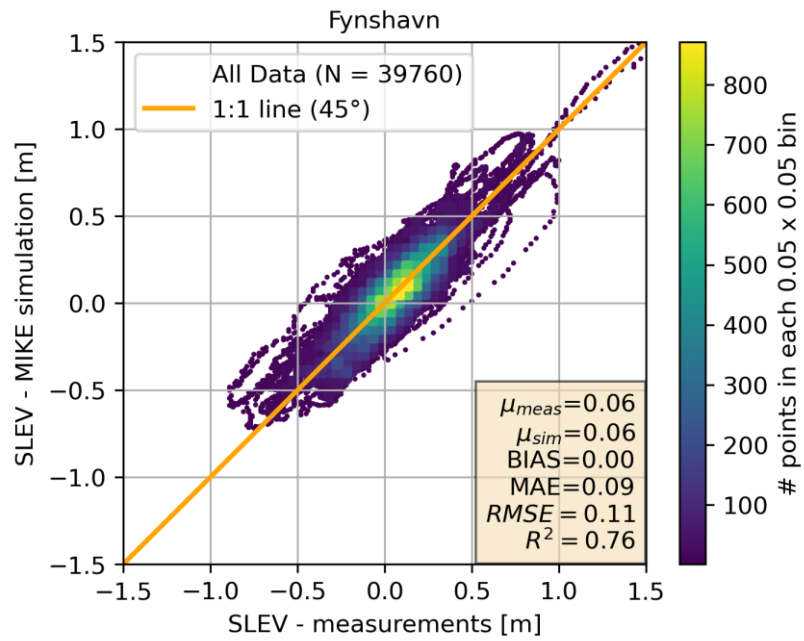
4.2.4 Validering af vandstandsniveauet

Det modellerede vandstandsniveau er, efter undersøgelse af modelfølsomheden rapporteret ovenfor, blevet valideret mod Fynshavn tidevandsstationen. Sammenligningen præsenteres Figur 4-24 og Figur 4-25 som tidsserier og densitetssscatterplot, henholdsvis. Model simuleringen stemmer godt overens med målingerne, med en mean absolute error på 0,09 m.



Figur 4-24. Tidsserie sammenligning af vandstandsniveau ved Fynshavn målestation (se Figur 4-1 for placering). Øverste panel viser den første halvdel af tidsserien, fra november 2016 til maj 2017 og nederste panel viser den anden halvdel af tidsserien fra maj 2017 til november 2017.

Confidential

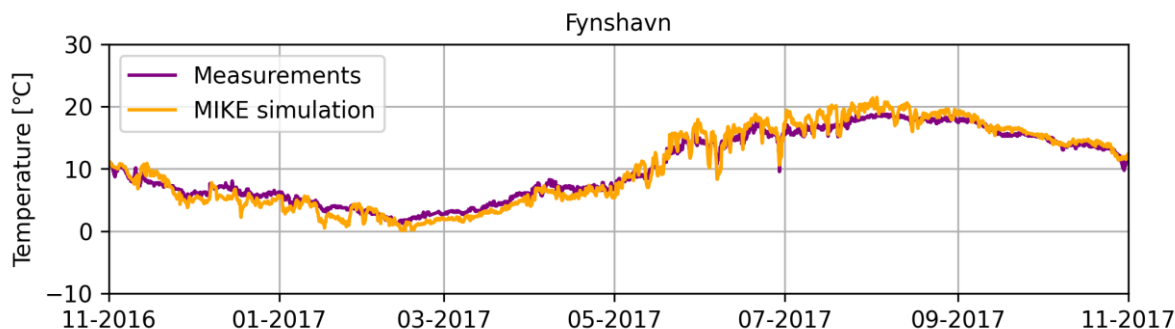


Figur 4-25. Densitetsscatterplot af vandstandsniveau ved Fynshavn målestation (se Figur 4-1 for placering). RMSE står for Root Mean Square Error og MAE for Mean Absolut Error. Data for perioden mellem 01-11-2016 og 01-11-2017 vises i plottet.

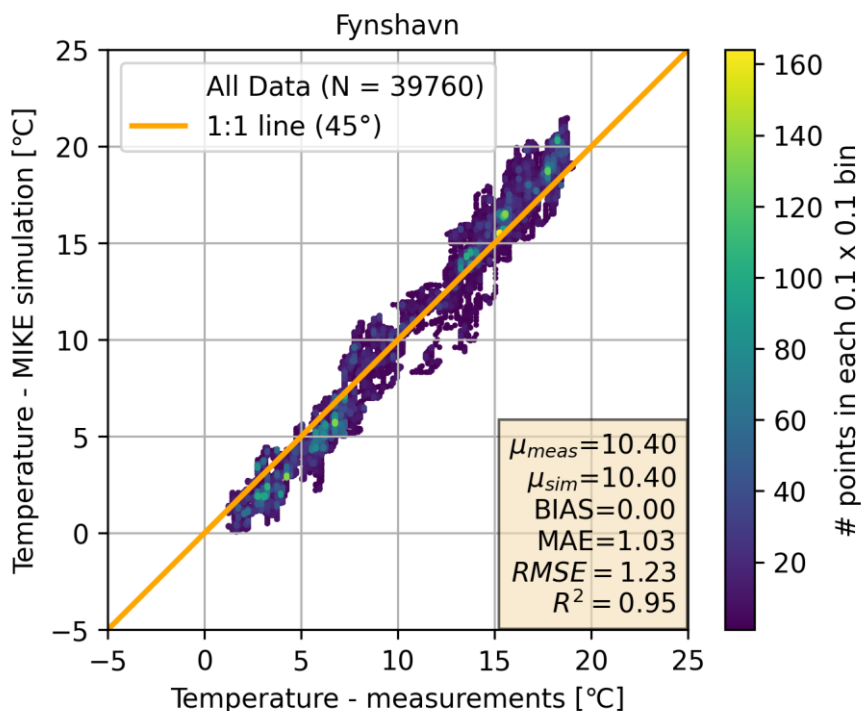
Confidential

4.2.5 Validering af overfladetemperatur

Valideringen af overfladetemperaturen på baggrund af temperaturdata ved Fynshavn præsenteres i Figur 4-26 og Figur 4-27. Ved to yderligere punkter i modeldomænet (markeret som satellitpunkter i Figur 4-1), valideres overfladetemperaturen mod satellitmålinger af havoverfladetemperaturen (SST). Dette præsenteres i Figur 4-28. Det er tydeligt, at HD-modellen fanger overfladetemperaturens variationer godt.

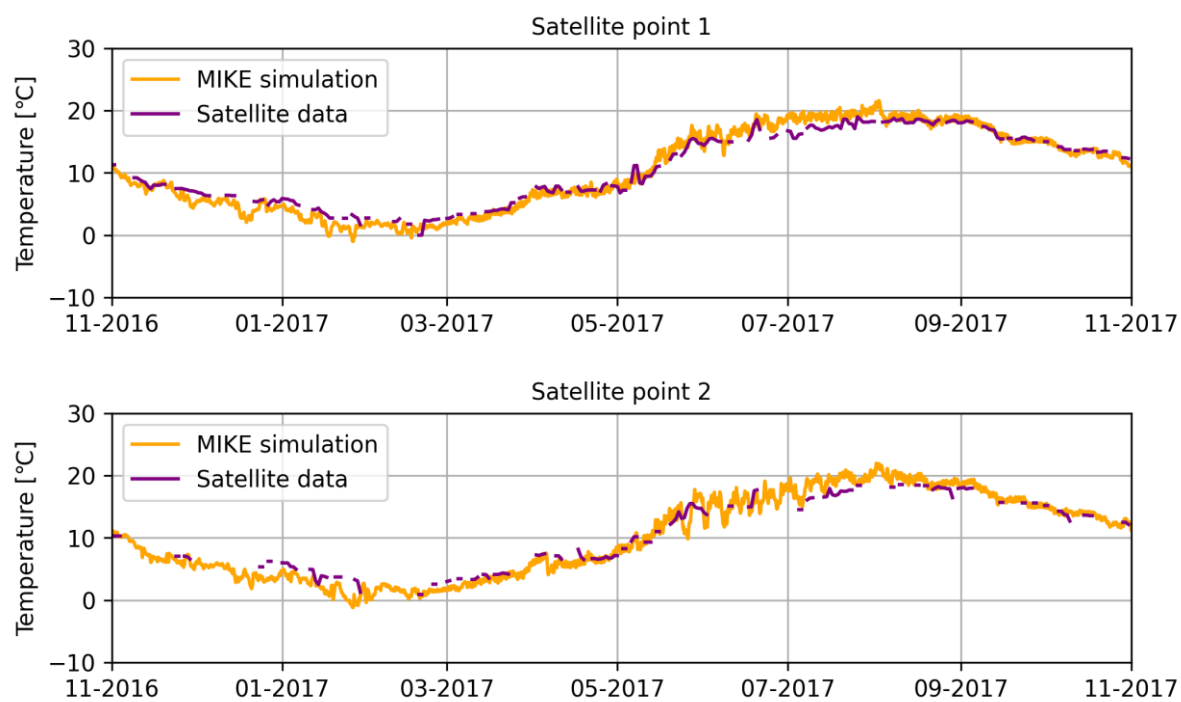


Figur 4-26. Tidsserie sammenligning af overfladetemperatur ved Fynshavn målestation (se Figur 4-1 for placering).



Figur 4-27. Densitetsscatterplot af overfladetemperatur ved Fynshavn målestation (se Figur 4-1 for placering). RMSE står for Root Mean Square Error og MAE for Mean Absolut Error. Data for perioden mellem 01-11-2016 og 01-11-2017 vises i plottet.

Confidential



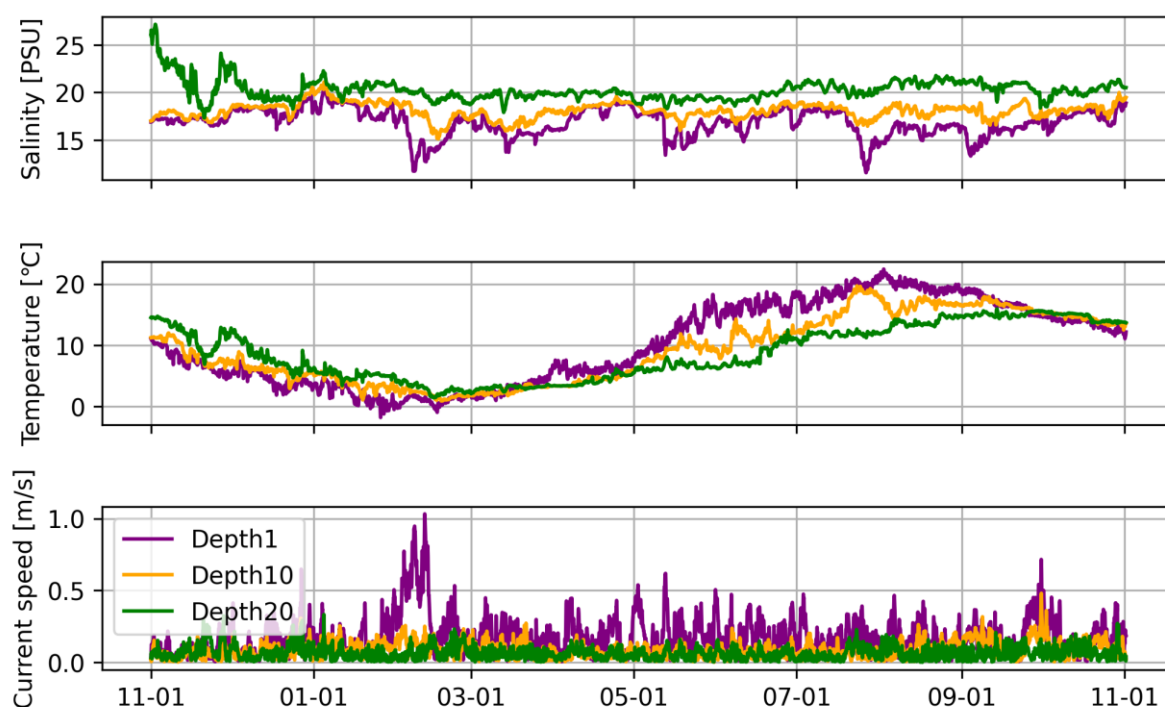
Figur 4-28. Tidsseriemammenligning af vandstandsniveau ved to punkter og satellit observationer (se Figur 4-1 for placeringer). Bemærk at satellitdataene ikke er kontinuerlige over tidsperioden pga. satellitdækningen.

Confidential

4.3 Generelle forhold i projektområdet

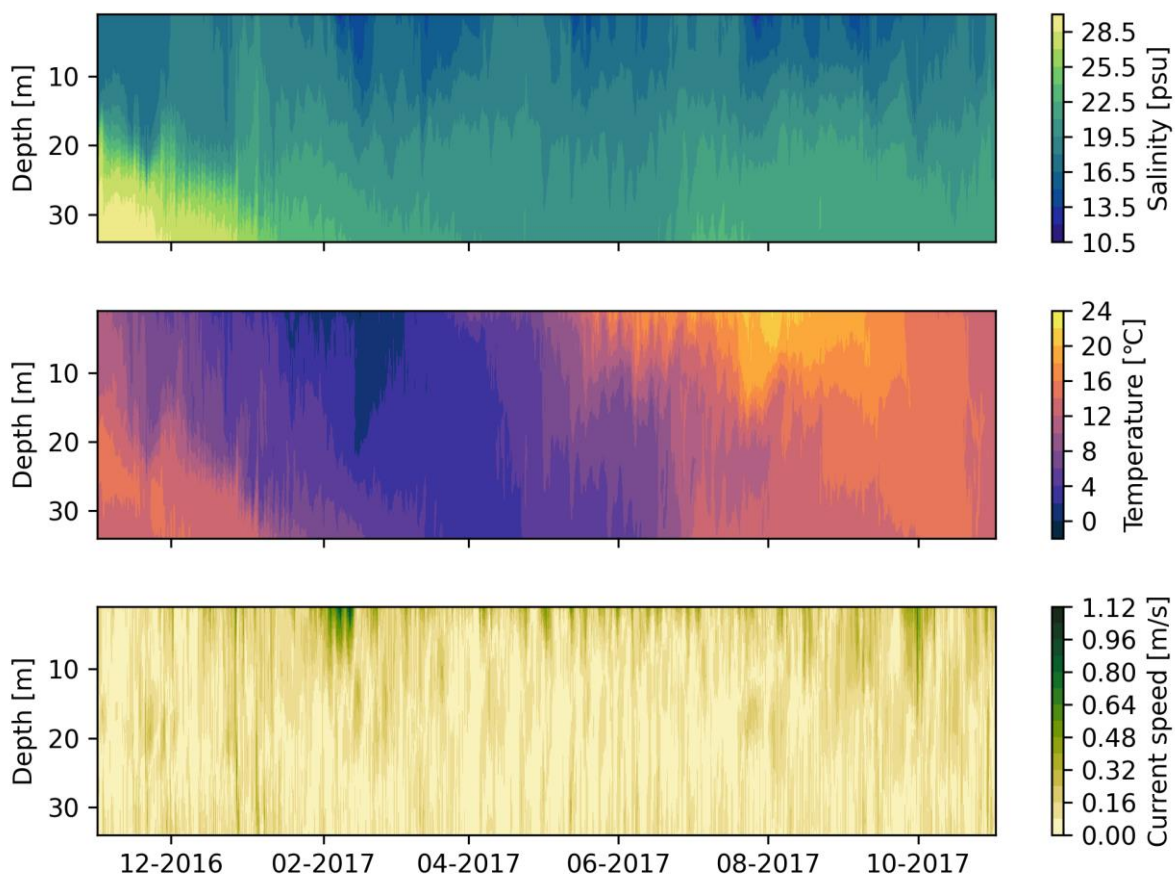
Resultaterne fra HD-modellen for ét års simulering præsenteres kort i dette afsnit. Udviklingen af salinitet, overfladetemperatur og strømshastighed over året for flere dybder præsenteres i Figur 4-29. Tidsudviklingen for et vertikalt profil inden for projektområdet præsenteres i Figur 4-30. Endeligt vises strømroserne i Figur 4-31.

Af figuren kan det ses, at den høje salinitet i begyndelsen af simulationen er omkring 25 PSU, hvilket ikke nås over resten af simulationsperioden. En lignende tendens findes når man ser på Copernicus Baltic Sea Physics Reanalysis-produktet (ref. /5/), som bruges til initial- og randbetingelserne. Saliniteten fra dette datasæt når op til ca. 22 PSU i august 2017 og er omkring 20 PSU i november 2017. Disse værdier er lignende i den lokale model, der bruges her. Derfor kan den høje salinitet i modellen, som ikke ses i resten af simuleringen, delvis tilskrives den årlige naturlige variation. En anden potentiel årsag kan være den relativt grov repræsentation af pyknoklinen i Copernicus-modellen, som har en vertikal opløsning på cirka 3 meter ved en dybde på 20 meter.

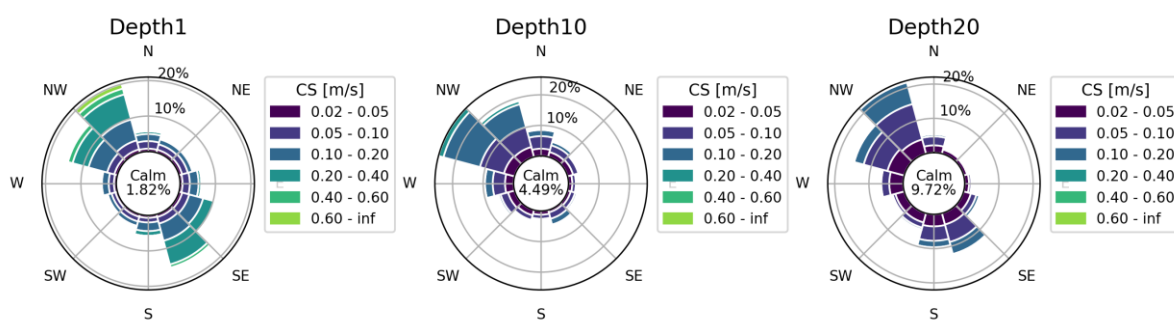


Figur 4-29. Tidsserie af salinitet, overfladetemperatur og strømshastighed ved forskellige dybder i projektområdet.

Confidential



Figur 4-30. Simulerede vertikale profiler af salinitet, overfladetemperatur og strømshastighed for en location i projektområdet.



Figur 4-31. Strømroser i projektområdet for det fulde 1-års HD-model simulation.

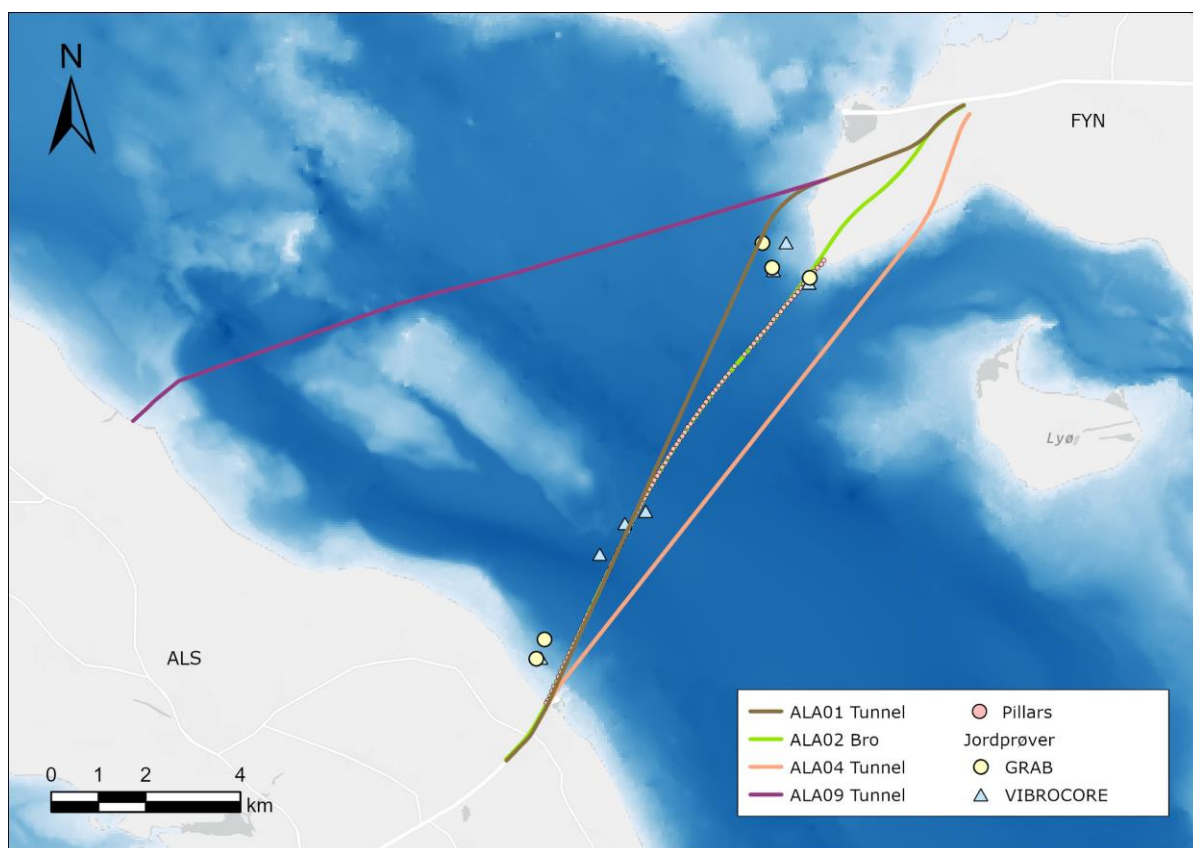
Confidential

5. Sedimentspredningsmodel

Dette afsnit beskriver antagelserne, der anvendes til opsætningen af sedimentspildmodellen for tunnel- og bro-linjeføringerne, samt installationsmetoderne, der er nødvendige for modelleringsformålene.

I Afsnit 5.1 præsenteres jordbundsforholdene og sedimentklasserne, der er fundet langs de to linjeføring, samt de relevante parametre for de forskellige sedimenttyper. Opsætningen af sedimentspildmodellen, herunder udgravningsmængder og sedimentlag, samt tidsserie og parametre brugt i selve modellen, præsenteres i Afsnit 5.2 for tunnelløsningen og Afsnit 5.3 for bro-løsningen.

Linjeføringerne for tunnel- og bro-løsningerne samt placeringen af jordprøverne kan ses i Figur 5-1.



Figur 5-1. Linjeføring for tunnelloesningerne og bro-løsningen med brofundamenter. Placering af jordprøver markeret med trekantede for vibrocores og cirkler for grab-samples.

5.1 Jordbundsforhold

Jordbundsforholdene langs tunnel- og bro-linjeføringen er baseret på:

- Anlægstekniske rapport leveret af Sund & Bælt (ref. /11/)
- Kornstørrelsesfordeling fra jordprøver (ref. /12/)
- Geologisk længdesnit (ref. /15/)
- Sedimentspildsmængder leveret af Sund & Bælt (ref. /17/, /18/ og /19/)

Jordbundsforholdene fortolkes fra sedimentspildsmængderne (ref. /17/, /18/ og /19/) samt den geologiske længdesnit (ref. /15/). For hver jordbundstype findes den tilsvarende fordeling af sedimentfraktioner ud fra kornstørrelsesfordelingen af den mest repræsentative jordprøve. Bemærk at sedimentfraktionerne ikke inkluderer kornstørrelser grovere end medium sand (>250 µm), derfor er den samlede procent af fraktionerne ikke 100%.

Confidential

Der er identificeret to sedimentklasser, der danner jordtyperne langs linjeføringerne: et gytje-lag (øverst) og et leret lag (nederst) (ref. /17/, /18/ og /19/). Sedimentfraktionerne for de to jordbundstyper kan ses i Tabel 5-1. For bestemmelse af sedimentfraktionerne er de tre vibrocores der ligger mellem stationering 11.300 og 13.600 (se placering i Figur 5-1) brugt. Af Figur 5-1 kan det ses, at jordprøverne ligger spredte og ikke dækker hele linjeføringerne. Yderligere, er jordprøverne kun taget ned til en dybde af 2,30 m hvilket ikke dækker hele dybden der skal udgraves for tunnelen eller bropillerne. Derfor er der en stor usikkerhed involveret med bestemmelse af sedimentfraktionerne.

Tabel 5-1. Sedimentfraktioner for ler og gytje. Procentdelene er læst fra kornstørrelsesfordelingen for de jordprøver der er vurderet mest repræsentative for jordbundstyperne. Bemærk at den resterende sedimentfraktion op til 100% svarer til partikler med en diameter > 250 µm (grovere end medium sand).

Sediment-klasser	Ler [%]	Finsilt [%]	Medium silt [%]	Finsand [%]	Medium sand [%]	Tør densitet [kg/m ³]
Ler	38	29	23	7	1	1190
Gytje	37	8	6	11	12	1910

Bundfaldshastigheden (w_s) er beregnet ud fra Stokes lov (ref. /3/) for finsilt, medium silt, finsand og medium sand på baggrund af kornstørrelsen og sedimentdensiteten med følgende formel:

$$w_s = \frac{(\rho_s - \rho)gd^2}{18 - \nu},$$

hvor:

- ρ_s : sedimentdensitet [kg/m³]
- ρ : vandets densitet [kg/m³]
- g : tyngdeacceleration [m/s²]
- d : partiklens diameter [m]
- ν : vandets dynamiske viskositet [m²/s]

For ler fraktionen anvendes en bundfaldshastighed baseret på Femernbælt forbindelsens miljøundersøgelser (ref. /13/). Bundfaldshastighederne, samt gennemsnitsdiametere, kan ses i Tabel 5-2.

Tabel 5-2. Sedimentfraktioner og bundfaldshastigheder brugt i sedimentspredningsmodellen. Værdierne er beregnet ud fra Stokes lov (ref. /3/), undtagen for ler klassen der er baseret på miljøundersøgelser for Femernbælt forbindelsen (ref. /13/).

Sedimenttype	Diameter [µm]	Interval [µm]	Bundfaldshastighed [mm/s]
Medium sand	187,5	125-250	31,6
Finsand	94	63-125	7,9
Medium Silt	50	35-63	2,2
Finsilt	21	7-35	0,4
Ler	7	<7	0,1

Udgravningsvolumen findes i projektbeskrivelsen (ref. /11/). De specifikke volumener for tunnel- og broløsningen beskrives i nedenstående kapitler.

Confidential

5.2 Tunnelløsning

Sedimentspildet i forbindelse med udgravning af tunnelrenden for sænketunnelen, beregnes for linjeføringerne ALA01, ALA04 og ALA09 (se Figur 5-1). For tunnelloøsningerne antages det at der udgraves ved tre lokationer samtidigt der starter fra hhv. Fyn, Als og i midten af linjeføringen og at der graves lige meget i hvert af de tre arbejdsområder.

Udgravningshastigheden er sat til 13.408 m³/dag (ref. /18/) for alle tre scenarier, hvor der udgraves ved tre lokationer samtidig (ref. /18/). Spildprocenten er sat til 3,5% og det antages at sedimenterne frigives ved overfalden (ref. /16/). Parametrene, herunder den totale udgravningsmængde for hver linjeføring, i der bruges til modelopsætningen præsenteres i Tabel 5-3.

Tabel 5-3. Parametre til modelopsætning (ref. /16/). Bemærk at udgravningshastigheden er fordelt på to lokaliteter.

Parameter	Værdi
Total længde af udgravning	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 12.200 m ALA04: 12.400 m ALA09: 15.613 m
Total udgravningsmængde	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 14.400.000 m³ ALA04: 17.200.000 m³ ALA09: 21.600.000 m³
Udgravningshastighed	13.408 m ³ /dag pr arbejdsområde
Spildprocent	3,5%
Sedimentspild i vandsøjlen	Ved overflade
Arbejdstider	Kontinuerligt 7 døgn hver uge, 24 timer i døgnet

5.2.1 Sedimenttyper tunnelloøsning

På baggrund af de geologiske undersøgelser (ref. /17/, /18/og /19/) er der bestemt tykkelse af de to jordtyper langs linjeføringerne. I Tabel 5-4 præsenteres udgravningsmængderne, udgravningsdybden samt start og slut af de undersøgte linjeføring (se placering på Figur 5-1).

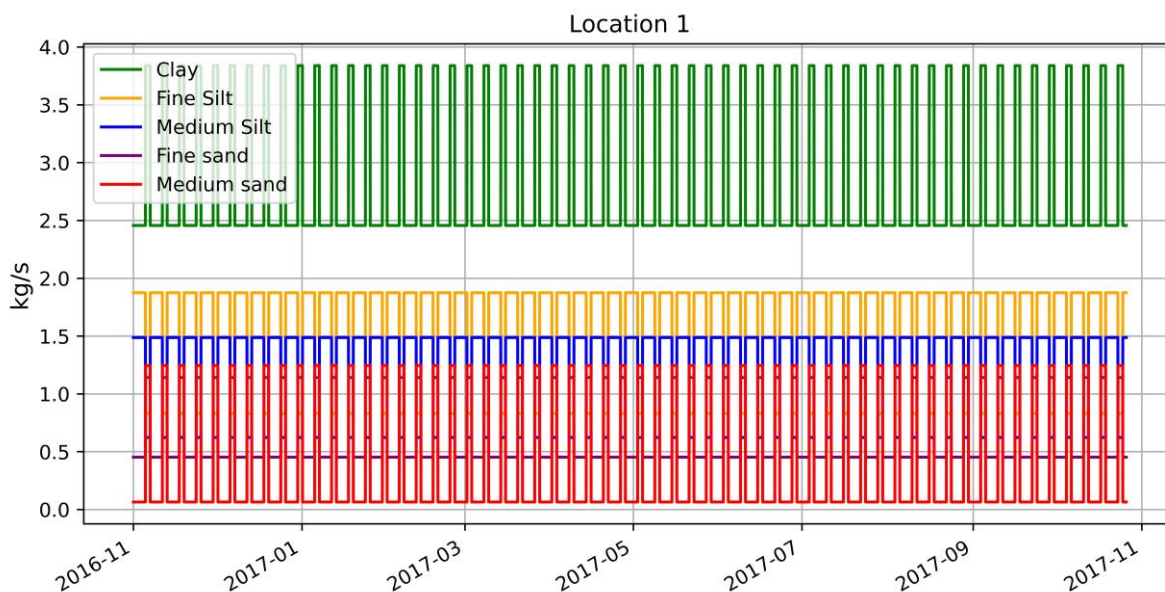
Tabel 5-4. Afgravningsmængder for linjeføring ALA01, ALA04 og ALA09 (se placering på Figur 5-1). Geologi og geometri bestemt på baggrund af tegninger (ref. /17/, /18/og /19/).

Linjeføring	Stationering		Længde [m]	Udgravning, tykkelse [m]			Udgravning			
	Start	Slut		Gytje	Ler	Total	Total [m ³ /m]	Total [m ³]	Gytje [m ³]	Ler [m ³]
ALA01	4.400	16.600	12.200	8,1	5,4	13,5	1.155	14.400.000	10.300.000	4.100.000
ALA04	3.400	15.800	12.400	8,9	5,9	14,8	1.321	17.200.000	12.600.000	4.700.000
ALA09	4.447	20.060	15.613	9,3	6,0	15	1.370	21.600.000	15.549.800	6.050.300

5.2.2 Sedimentspredning tidsserier for tunnelloøsningen

På baggrund af ovenstående og med udgangspunkt i udgravningsmængden og udgravningshastigheden er der udarbejdet en tidsserie for sedimentspildet for hver linjeføring. EN repræsentativ tidsserie for de tre linjeføring er vist i Figur 5-2. Tidsserierne rækker over perioden uger hvor der frigives sediment i modellen, svarende til 52 uger for ALA01, 62 uger for ALA04 og 77 uger for ALA09. Af figurerne kan der ses mængden af ler, finsilt, medium silt, finsand og medium sand i der frigives per arbejdsområde for hver linjeføring. Bemærk at der i kun vises tidsserien for én lokation pr. linjeføring. Som nævnt i Afsnit 5.2, antages det at der graves lige meget for hvert arbejdsområde og at den samme jordtype findes langs hele linjeføringen (se Tabel 5-4), derfor er de tre tidsserien ens for hver lokation indenfor samme linjeføring.

Confidential



Figur 5-2. Sedimentspildtidsserie. Tidsserien for lokation 2 og 3 er den samme da det antages at der graves lige meget for hvor arbejdsområde og at den samme jordtype findes langs hele linjeføringen.

Tabel 5-5 giver en opsummering af tidsserierne med den samlet varighed for sedimentudslippet og den samlet masse af sediment (opdelt i sedimenttyper) der udslippes i modellen for hver linjeføring. Det er antaget at der udgraves kontinuerligt for de tre undersøgte linjeføringer.

Tabel 5-5. Oversigt over sedimentspildtidsserien.

Parametre	Værdi
Varighed af sedimentudslip [timer]	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 8.627 ALA04: 10.416 ALA09: 12.936
Samlet ler masse frigivet i modellen [kg]	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 265.083.924 ALA04: 316.160.330 ALA09: 397.464.242
Samlet finsilt masse frigivet i modellen [kg]	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 147.242.124 ALA04: 177.068.958 ALA09: 220.743.604
Samlet medium silt masse frigivet i modellen [kg]	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 115.840.057 ALA04: 139.339.867 ALA09: 173.665.310
Samlet finsand masse frigivet i modellen [kg]	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 60.215.311 ALA04: 71.516.518 ALA09: 90.292.409
Samlet medium sand masse frigivet i modellen [kg]	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 36.975.402 ALA04: 43.306.396 ALA09: 55.456.791
Samlet sedimentmasse frigivet i modellen [kg]	<ul style="list-style-type: none"> ALA01: 625.356.818 ALA04: 747.392.070 ALA09: 937.622.355

Confidential

5.3 Broløsning

Sedimentspildet i forbindelse med udgravningen for placering af bropillerne, beregnes for linjeføringen ALA02 (se Figur 5-1).

Udgravningshastigheden er beregnet ud fra antagelserne at der kan udgraves sediment til én pæl på 5 timer og at der kan udgraves 2000 m³ per døgn til direkte fundering for vanddybder <5 m og 1000 m³ for vanddybder >5 m (ref. /17/). Spildprocenten er sat til 5% for udgravning af sediment til direkte funderingstyper og 3,5% for hver pæl (ref. /17/). Det antages yderligt at sedimenterne frigives ved overfalden. Parametrene der bruges til modelopsætningen præsenteres i Tabel 5-6.

Tabel 5-6. Parametre til model opsætning (ref. /17/).

Parameter	Værdi
Udgravningshastighed pæl	5 time/pæl
Udgravningshastighed direkte funderingstype, <5 m vanddybde	2000 m ³ /døgn
Udgravningshastighed direkte funderingstype, >5 m vanddybde	1000 m ³ /døgn
Spildprocent pæle	3,5%
Spildprocent direkte fundering	5%
Sedimentspild i vandsøjlen	Ved overflade
Arbejdstider	Kontinuerligt 7 døgn hver uge, 24 timer i døgnet

5.3.1 Sedimenttyper broløsning

For hver bropille (se placeringer på Figur 5-1) er der beregnet spilmængde for hhv. ler og gytje jordbundstyperne. En oversigt af bropillerne og sedimentspildsmængderne kan ses i Tabel 5-7.

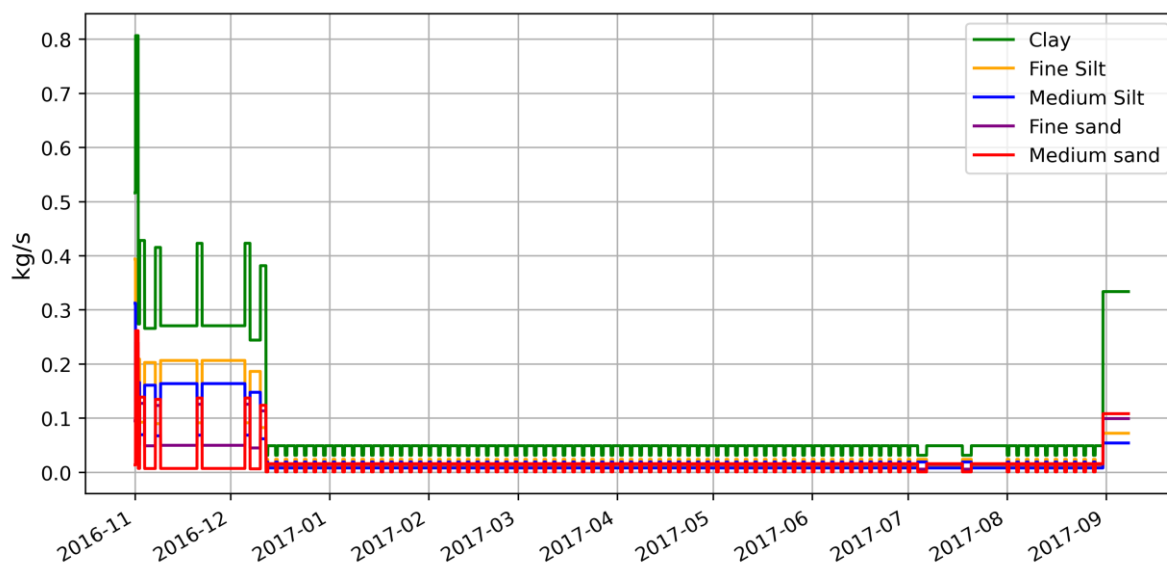
Tabel 5-7. Oversigt over bropiller med tilsvarende sedimentspildmængde for ler og gytje samt den beregnet udgravningstid (ref. /17/). Bemærk at bropillerne mellem nr. 10 -75 og 78-86 er af typen "Højt pæleværk" og har derfor samme sedimentspildmængde og udgravningstid som de andre bropiller med "Højt pæleværk" fundering.

Nr.	Funderingstype	Stationering [m]	Sedimentspildmængde [m ³]		Udgravningstid [døgn]
			Ler	Gytje	
1	Endevederlag	5467	-	-	-
2	Direkte	5547	81.6	17.0	1.0
3	Direkte	5657	81.6	23.1	2.0
4	Direkte	5767	81.6	172.3	5.0
5	Direkte	5877	81.6	590.7	13.0
6	Direkte	5987	81.6	694.4	15.0
7	Direkte	6097	81.6	151.7	5.0
8	Højt pæleværk	6207	14.4	3.6	3.0
9	Højt pæleværk	6317	14.4	3.6	3.0
10-75	Højt pæleværk	-	14.4	3.6	3.0
76	Højt pæleværk (Pylon)	13742	67.2	16.8	14.0
77	Højt pæleværk (Pylon)	14292	67.2	16.8	14.0
78-86	Højt pæleværk	14542	14.4	3.6	3.0
87	Højt pæleværk	15447	14.4	3.6	3.0
88	Direkte	15557	81.6	0.0	2.0
89	Direkte	15667	81.6	0.0	2.0
90	Direkte	15777	81.6	0.0	2.0
91	Direkte	15887	81.6	0.0	2.0
92	Endevederlag	15954	-	-	-

5.3.2 Sedimentspredning tidsserie broløsning

På baggrund af ovenstående og med udgangspunkt i udgravningsmængderne og udgravningshastigheden er der udarbejdet en tidsserie for sedimentspildet (Figur 5-3) og rækker over de 44 uger hvor der frigives sediment i modellen. Af figuren kan der ses mængden af ler, finsilt, medium silt, finsand og medium sand der spildes ved udgravning til bropillerne.

Confidential



Figur 5-3. Sedimentspildtidsserie.

Tabel 5-9 giver en opsummering af tidsserien med den samlede varighed for sedimentspildet og den samlede masse af sediment (opdelt i sedimenttyper) der udslippes i modellen. Det er antaget, at der udgraves kontinuerligt, hvilket resulterer i en samlet udgravningstid på 7.464 timer. En samlet masse på 5.223.399 kg sediment spildes i modellen i denne periode.

Tabel 5-8. Oversigt over sedimentspildtidsserien.

Parametre	Værdi
Varighed af sedimentudslip [timer]	7.464
Samlet ler masse frigivet i modellen [kg]	2.355.847
Samlet finsilt masse frigivet i modellen [kg]	992.789
Samlet medium silt masse frigivet i modellen [kg]	773.666
Samlet finsand masse frigivet i modellen [kg]	600.435
Samlet medium sand masse frigivet i modellen [kg]	500.662
Samlet masse frigivet i modellen [kg]	5.223.399

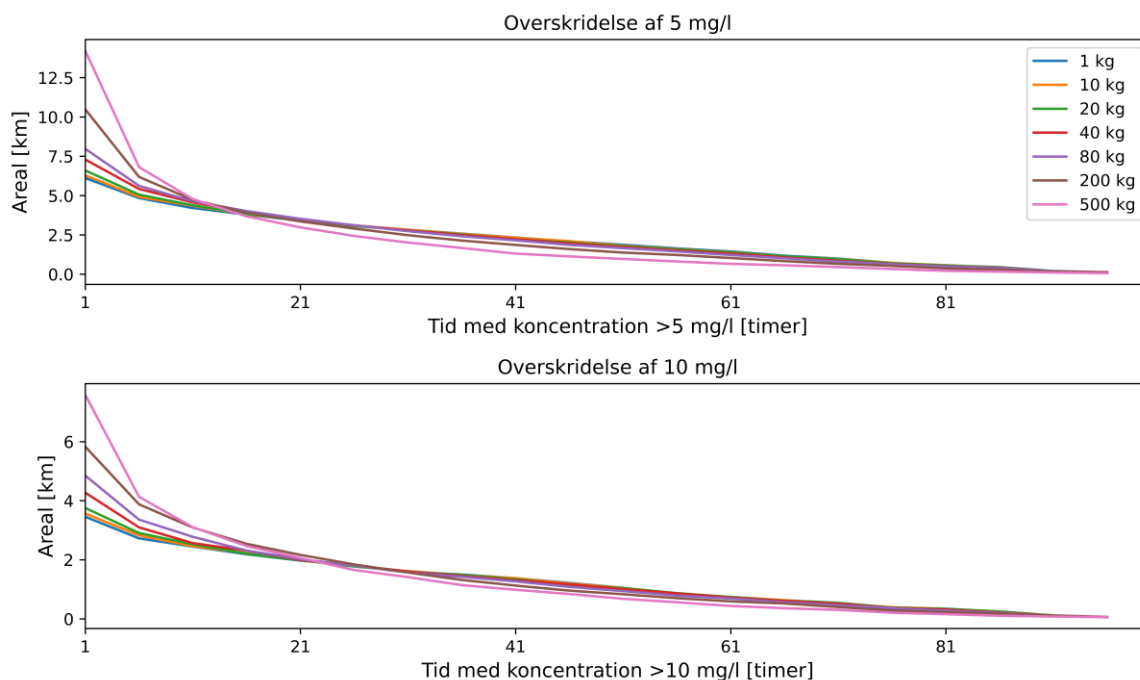
Confidential

5.4 Opsætning af MIKE partikelsporingsmodul

5.4.1 Følsomhedsanalyse for partikelopløsning

En følsomhedsanalyse er blevet udført for at teste effekten af partikelopløsningen på resultaterne for overskridelsesvarigheden af bestemte partikelkoncentrationer i vandsøjlen. Alle modeller er sat op med samme beregningsnet og parametre (undtagen for partikelopløsningen), og køres over én uge. Der er blevet testet 7 scenarier med en partikelopløsning på hhv. 1, 10, 20, 40, 80, 200 og 500 kg.

En lavere partikelopløsning resulterer i højere præcision i modelleringen af sedimentspildet men medfører også længere tid til at køre modellen. I Figur 5-4 præsenteres resultaterne overskridelsen af en koncentration på 5 og 10 mg/l partikler i vandsøjlen for tunnelloøsningen.



Figur 5-4. Resultater for arealstørrelse hvor der overskrides med 5 og 10 mg/l partikler i vandsøjlen for tunnelloøsningen.

Resultaterne for følsomhedsanalysen viser at overskridelsestiden er påvirket af partikelopløsningen ned til en opløsning på 20 kg. Dette kan tydeligt ses for en overskridelsestid på 1 time for begge koncentrationer. En partikelopløsning finere end 20 kg vil ikke påvirke resultaterne yderligt, dog vil denne opløsning kræve lang modelleringstid. En partikelopløsning på 80 kg har kun en mindre påvirkning på resultaterne der er vurderet acceptable for rapportens formål, derfor er denne valgt som opløsning i modellen.

Confidential

5.4.2 Modelopsætning

De antagelser der anvendes til opsætning af sedimentspildsmodellen for både tunnel- og broløsningen præsenteres i Tabel 5-9. Det horisontale mesh er 4 gange finere end det der bruges i den hydrodynamiske model for at øge præcisionen i resultaterne. Dette opnås ved at bruge "bisection metoden" der deler de eksisterende celler uden at ændre kvaliteten af det originale mesh.

Tabel 5-9. Oversigt over inputparametre til opsætning af sedimentspildsmodellen.

Input parametre	Værdi
Tidsperiode	<ul style="list-style-type: none"> • 01-11-2016 til 26-10-2017 (ALA01) • 01-11-2016 til 05-01-2018 (ALA04) • 01-11-2016 til 23-04-2018 (ALA09) • 01-11-2016 til 07-10-2017 (broløsning)
Horisontalt mesh	4 gange finere opløsning ift. HD-modellen (se Tabel 4-1). Dette opnås ved "bisection" metoden.
Vertikalt mesh	Det samme som HD-modellen
Sedimenttyper	<ul style="list-style-type: none"> • Ler • Finsilt • Medium • Finsand • Medium sand
Dispersionskoefficient [m^2/s]	<ul style="list-style-type: none"> • Horisontal dispersionskoefficient: 1 • Vertikal dispersionskoefficient: 0,001
Forskydning stress for erosion [N/m^2]	Ingen erosion/resuspension
Hydrodynamisk opsætning og driftprofil	Data fra HD-modellen simulationer

Confidential

6. Sedimentspredningsmodel resultater

I følgende afsnit præsenteres resultaterne af sedimentspildsmodellen for suspenderet sediment i vandsøjlen og sedimenteret sediment, som følge af mulig etablering af Als-Fyn forbindelsen. Resultaterne præsenteres for tunnel- og bro-løsningen. Følgende resultater analyseres:

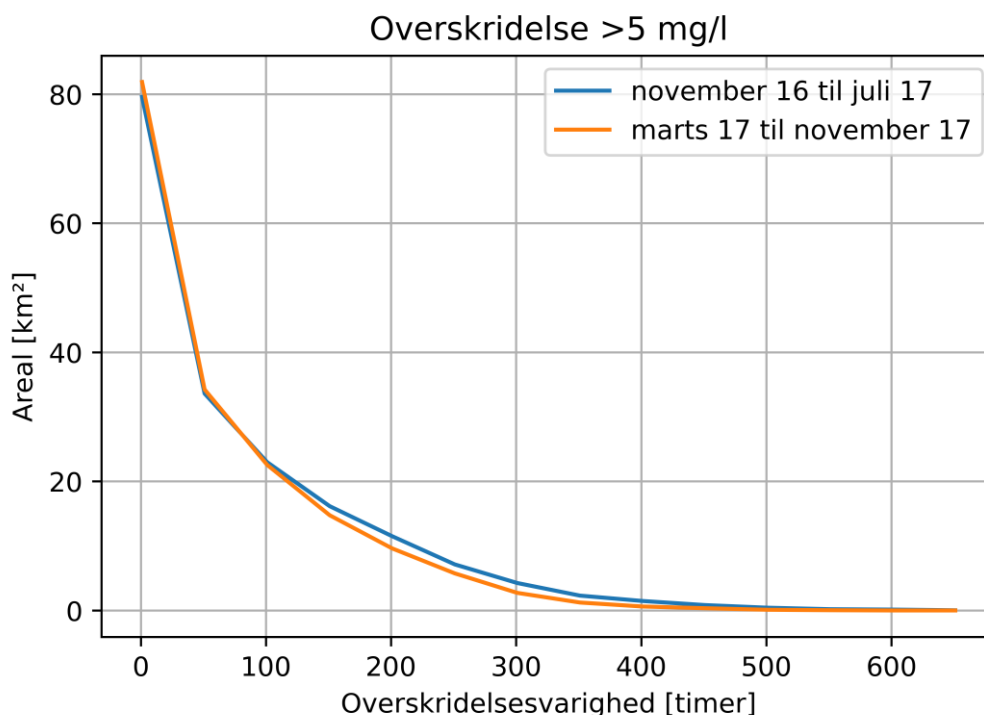
- Overskridelsesvarighed af 5 mg/l og 10 mg/l koncentrationer
- Maksimale koncentrationer
- Samlet sedimentation for hele simulationsperioden

Resultaterne for suspenderet sediment er en gennemsnit beregnet for hele vandsøjlen da det antages at sediment spildes ved overfladen (se Tabel 5-3 og Tabel 5-6).

Desuden er det undersøgt, hvor meget sedimentmasse der forlader modellens domæne. For alle scenarier er det kun en lille procentdel af ler der forlader modeldomænet ved de åbne grænser. Procentdelen af ler-massen, der går tabt (procenten taget fra den mængde, der indsættes i modellen), er 0,16% for tunnel-scenariet og 0,14% for bro-scenariet. Det er vurderet at en så lille procentdel ikke påvirker de endelige resultater.

6.1 Følsomhedsanalyse for simulationsperiode

Det er antaget at den samlede arbejdstid (gravearbejdet) for tunnelloøsningen på 30 uger og at sedimenterne udledes i modellen fra november 2016 til juli 2017. Det er undersøgt hvorvidt valget af perioden ville have en påvirkning på resultaterne ved at gentage simuleringerne over perioden marts 2017 til november 2017. Ved sammenligning af resultaterne er det konkluderet, at forskellene er minimale. Sammenligningen af overskridelsen af en koncentration på 5 mg/l vises i Figur 6-1.



Figur 6-1. Resultater for arealstørrelse hvor der overskrides med 5 mg/l partikler i vandsøjlen for de to simuleringstidspunkter.

Confidential

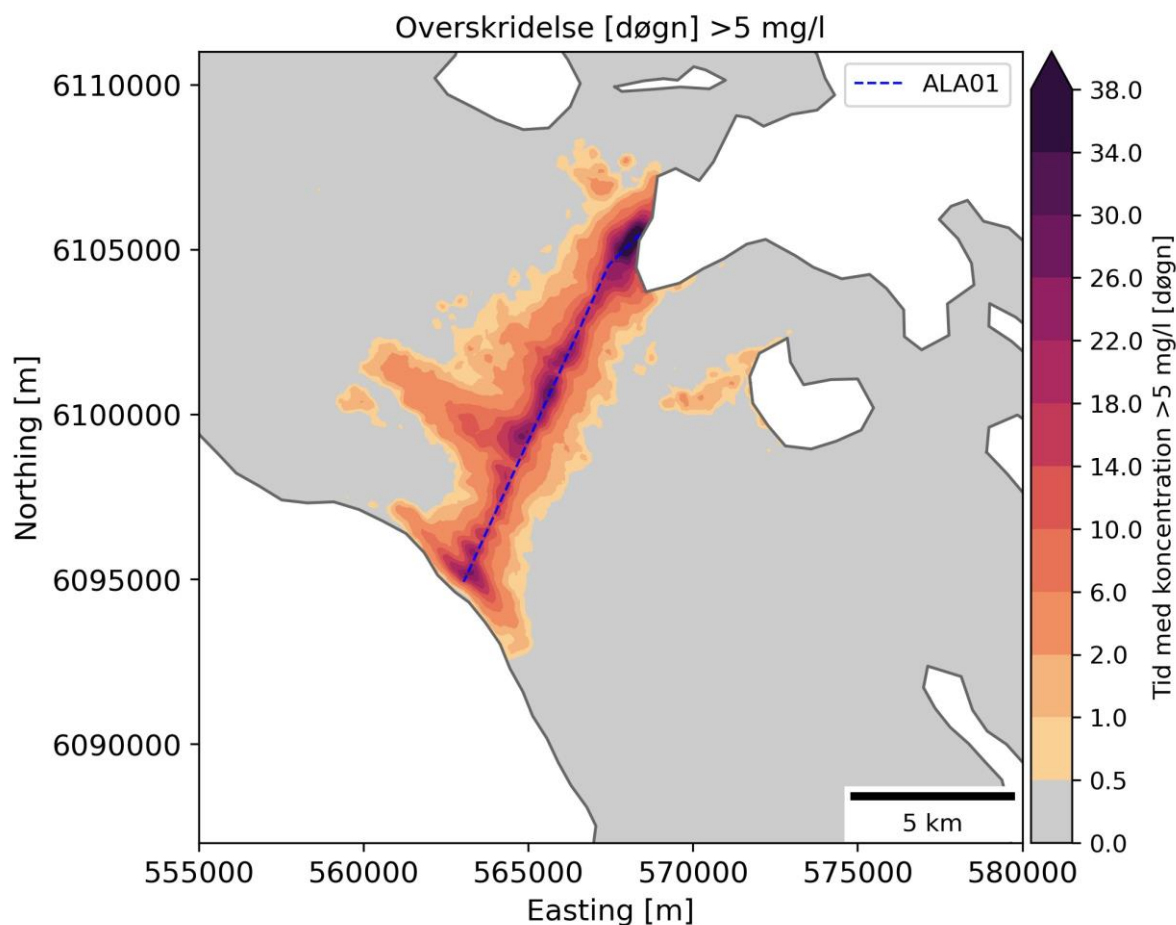
6.2 Tunnelløsning

6.2.1 Linjeføring ALA01

Overskridelsesvarighed

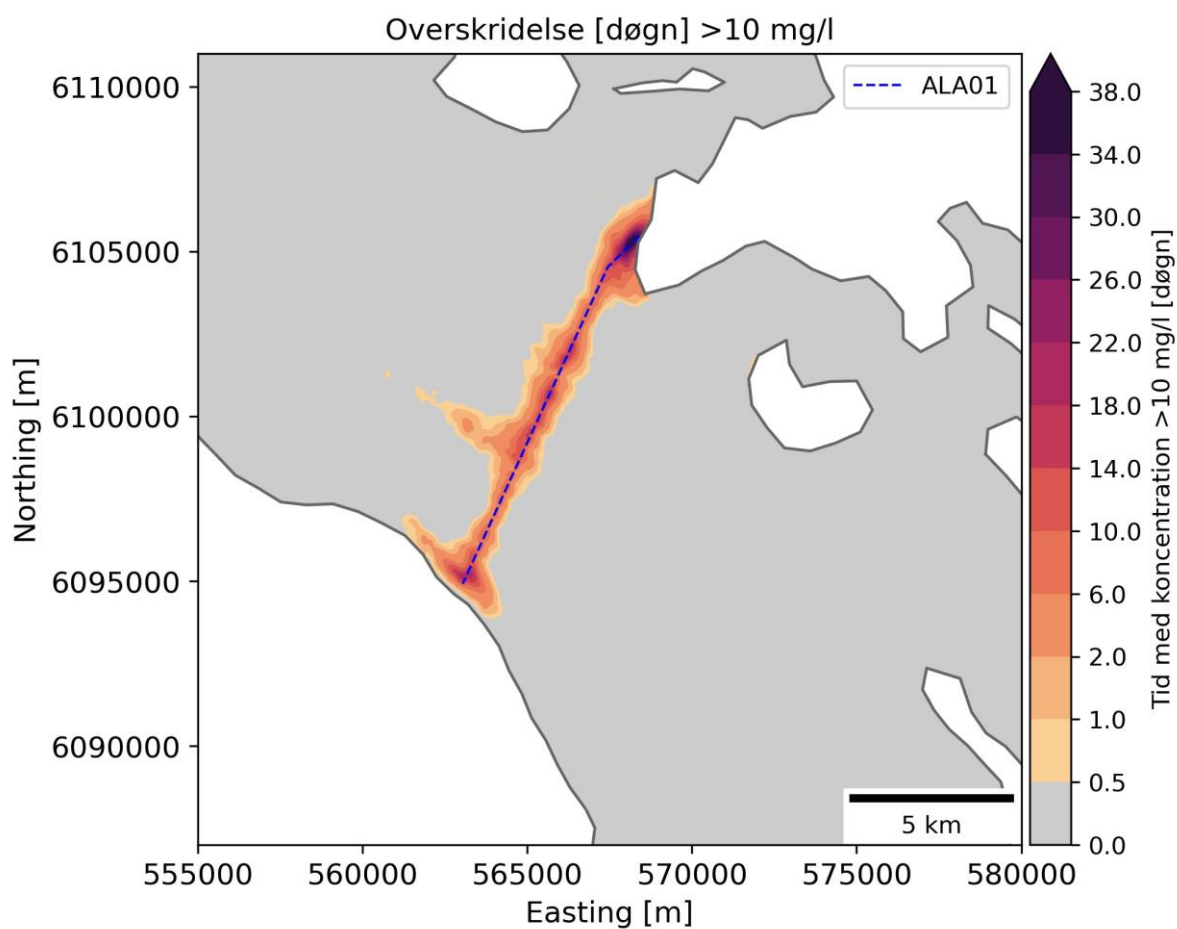
Resultaterne for overskridelsesvarigheden af koncentrationer over 5 mg/l og 10 mg/l i vandsøjlen præsenteres i hhv. Figur 6-2 og Figur 6-3. Figuren præsenterer overskridelsestiden for den samlede arbejdstid for hvert tunnelscenarie. I Tabel 6-1 opsummeres det samlede areal hvor der overskrides de ovennævnte koncentrationer som funktion af varighed i døgn. De gennemsnitlige afstande fra tunnelrenden ved forskellige koncentrationer opsummeres i Tabel 6-2. I Figur 6-4 ses et eksempel på et "øjebliksbillede" for den samlede koncentration over 1 time for et givet tidspunkt.

Den maksimale overskridelsesvarighed for en koncentration over 5 mg/l er det 55 døgn og for 10 mg/l er det 43 døgn. Det skal noteres, at disse varigheder kun påvirker et begrænset areal af en enkel beregningscelle, som har et areal på 6445 m² (svarende til en celle med en størrelse på ca. 80 x 80 m i et kvadratisk net), se Afsnit 4.1.2. Dette betyder at den maksimale overskridelsesvarighed kun påvirker en lille del af en enkel celle i modeldomænet. Arealet der påvirkes af sedimentspildet med en koncentration over 5 mg/l og 10 mg/l har en gennemsnitlig afstand fra tunnelrenden svarende til hhv. 820 m og 370 m (se Tabel 6-2) på begge sider af tunnelrenden.



Figur 6-2. Overskridelsesvarighed af 5 mg/l koncentration partikler i vandsøjlen.

Confidential



Figur 6-3. Overskridelsesvarighed af 10 mg/l koncentration partikler i vandsøjlen.

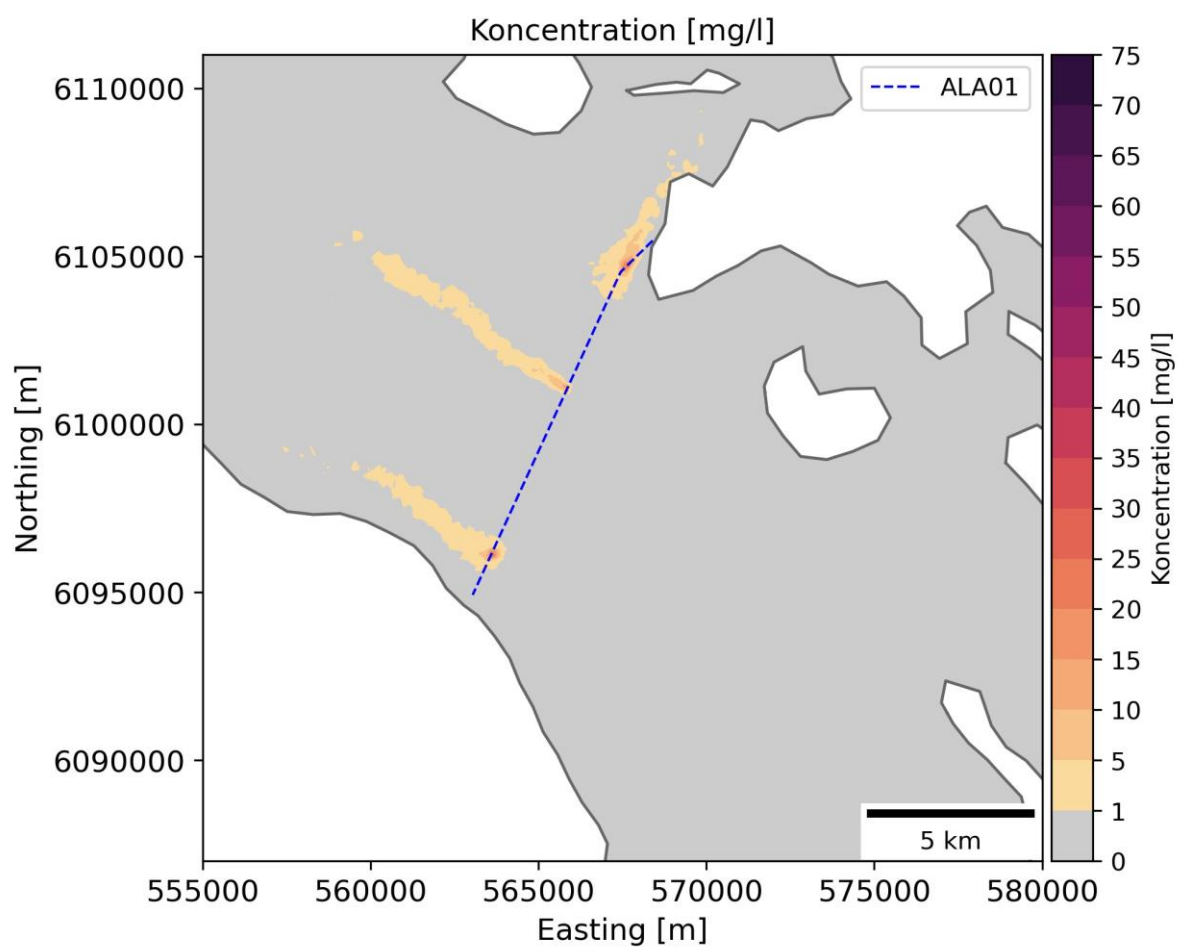
Tabel 6-1. Areal med en partikelkoncentration over de bestemte koncentrationer som funktion af tid.

Areal med konc. [km ²]	Varighed [døgn]											
	0,5	1	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
> 5 mg/l	59,4	46,0	34,2	18,8	12,2	7,8	4,7	2,6	1,2	0,6	0,4	0,2
> 10 mg/l	19,7	15,3	11,1	5,6	3,0	1,5	0,7	0,4	0,2	0,2	0,1	0,0

Tabel 6-2. Gennemsnitlig afstand fra tunnelrenden for overskridelse af de bestemte koncentrationer.

Koncentration [mg/l]	Gennemsnitlig afstand fra tunnelrende [m]
5	820
10	370

Confidential

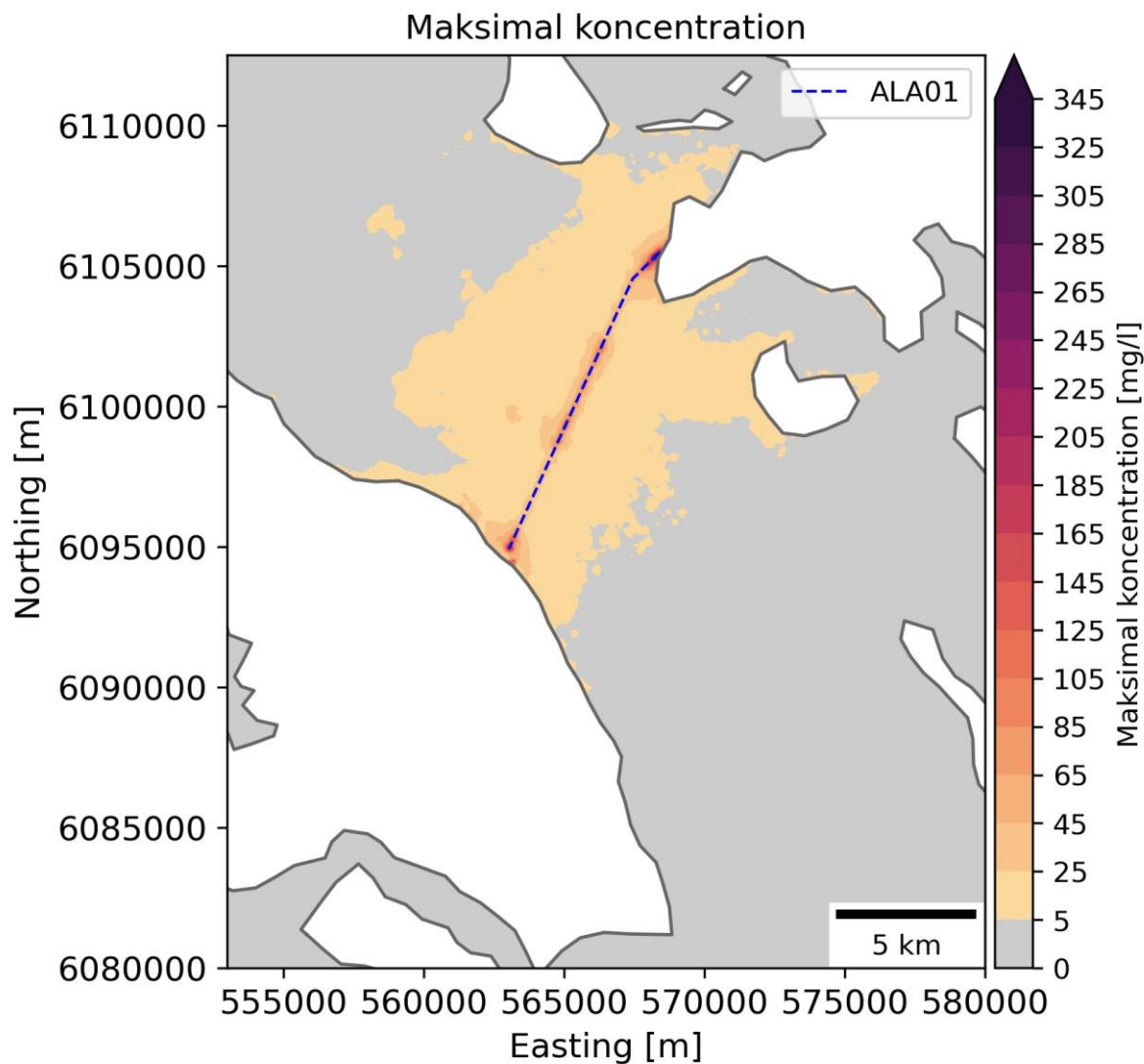


Figur 6-4. Øjeblikskoncentration hvis gravearbejdet havde foregået d. 01-03-2017.

Confidential

Maksimal koncentration

Resultater for den maksimale koncentration målt i løbet af simulationsperioden præsenteres nedenfor (Figur 6-5). Den maksimale koncentration svarer til en kortvarig (under 1 time) peak koncentration der måles under simulationsperioden. Bemærk at figuren viser den maksimale koncentration beregnet for hver enkel celle i beregningsnettet. Det vil sige at figuren viser den højeste koncentration der er målt i løbet af simulationen for hver beregningscelle og at disse værdier er sammenlagt og vist i nedenstående figur.



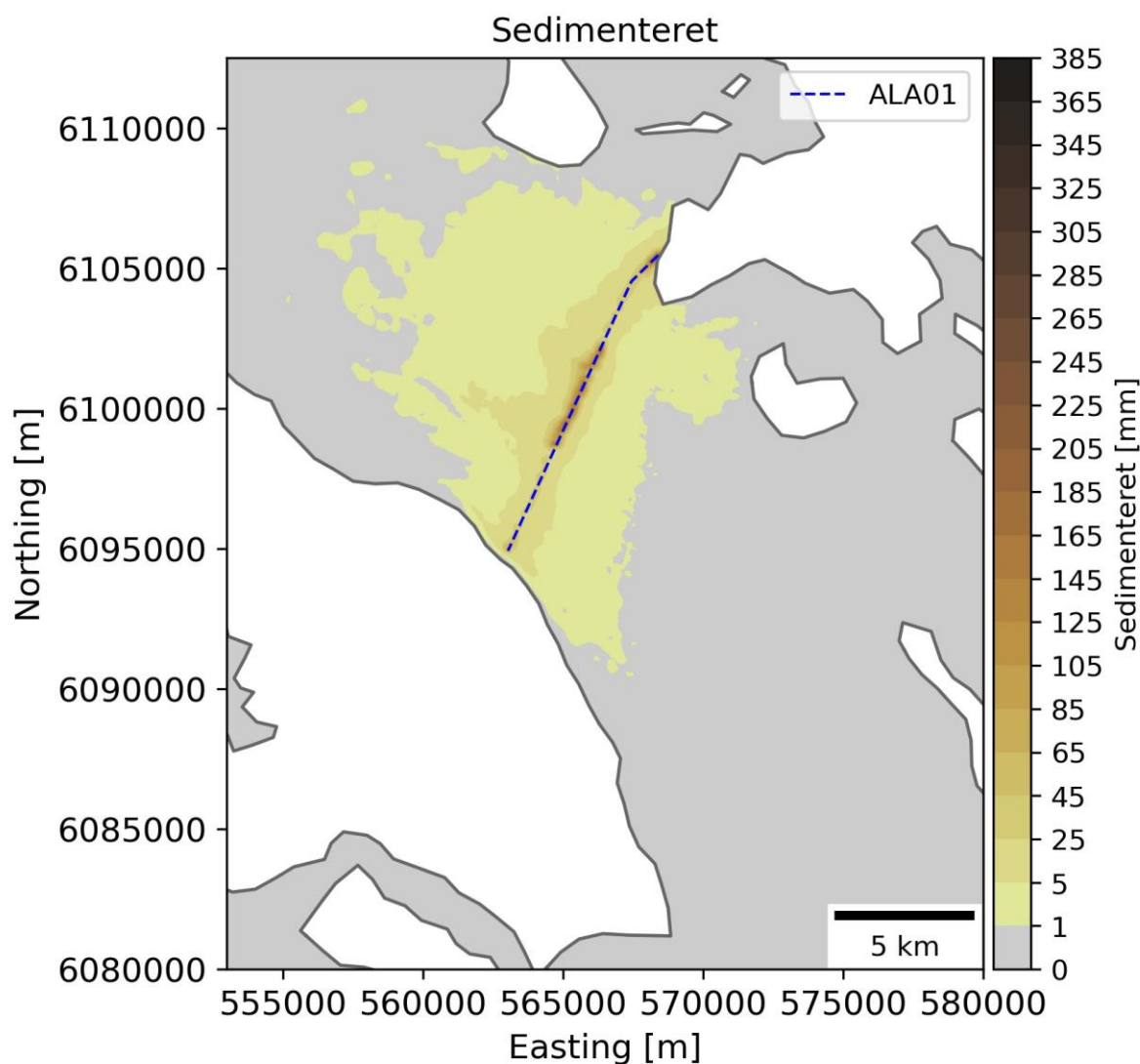
Figur 6-5. Maksimal koncentration målt under simulationsperioden beregnet for hver individuel beregningscelle.

Confidential

Sedimentation

Den samlede sedimentation beregnet i løbet af simulationsperioden præsenteres nedenfor som g/m^2 sedimentation. Densiteten af de sedimenterede partikler kendes ikke men er nødvendig for at beregne tykkelsen af det sedimenterede lag. For at konvertere sedimentkoncentrationen til en tykkelse, kan det konservativt antages, at sedimenterne har en densitet på 1000 kg/m^3 , hvilket konverteres til $1000 \text{ g/m}^2 = 1 \text{ mm}$.

I Figur 6-6 præsenteres den maksimale sedimentation for tunnelloøsningen. Den maksimale sedimentation er 230 g/m^2 svarende til ca. 230 mm. Det skal bemærkes, at denne sedimentation er begrænset til et areal tæt på tunnelrenden. De gennemsnitlige afstande fra tunnelrenden med forskellige sedimentationstykkelse præsenteres i Tabel 6-3. Tabel 6-4 opsummerer det samlede areal med en sedimentation større end de angivne grænseværdier og i Figur 6-7 vises relationen mellem sedimentationen og distancen fra tunnelrenden.

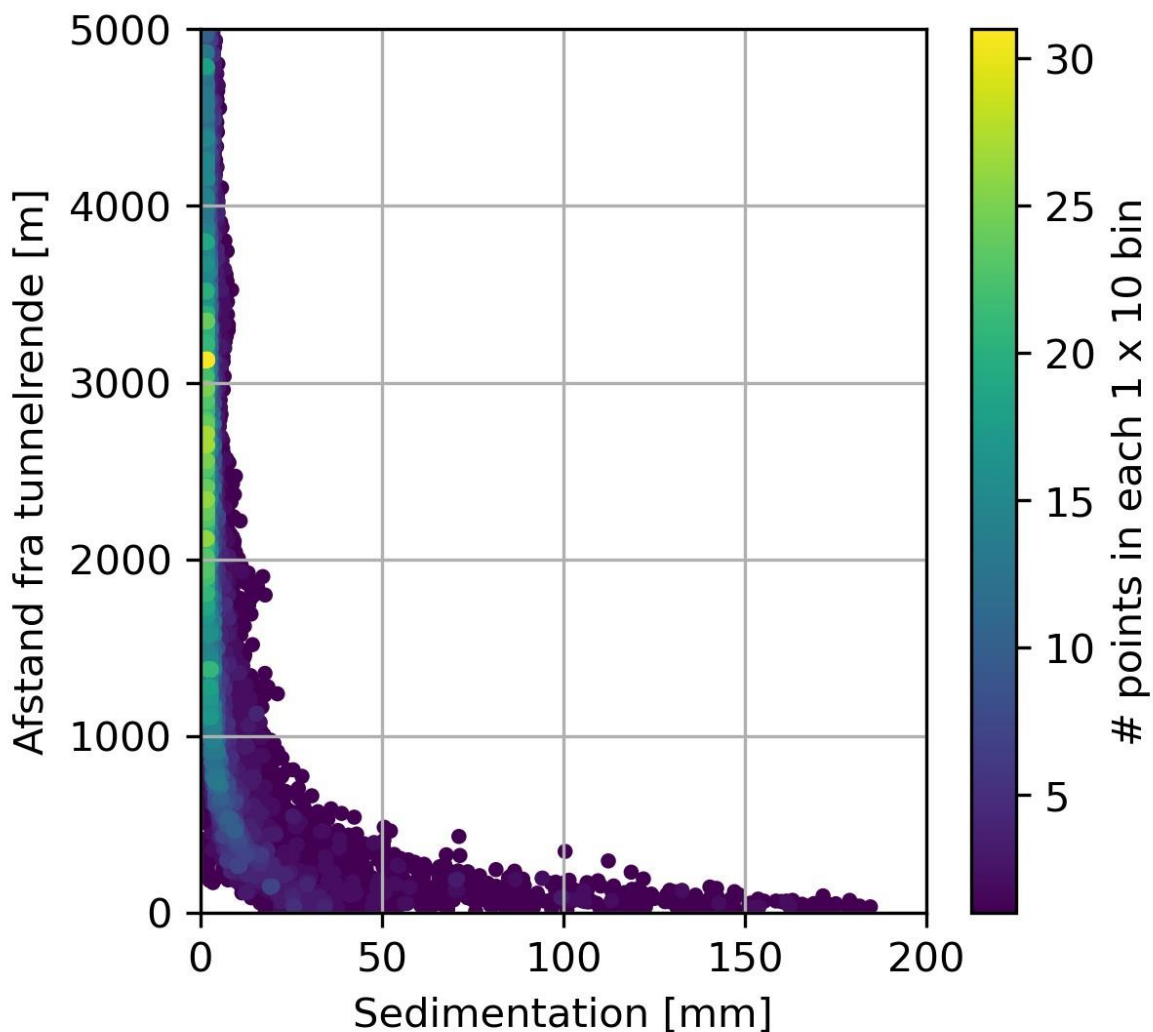


Figur 6-6. Maksimal sedimentation.

Confidential

Tabel 6-3. Gennemsnitsafstand fra tunnelrenden (på begge sider) for sedimenteret materiale. Bemærk at det antages at 1000 g/m² svarer til ca. 1 mm.

Sedimentation								
[g/m ²]	>1000	>5000	>10000	>15000	>20000	>30000	>100000	>250000
[mm]	>1	>5	>10	>15	>20	>30	>100	>250
Afstand [m]	1900	1250	580	390	280	210	10	1



Figur 6-7. Densitetsscatterplot af sedimenteret partikler vs. afstand fra tunnelrenden.

Tabel 6-4. Opsummering af areal påvirket af sediment ved forskellige grænseværdier. Bemærk at det antages at 1000 g/m² svarer til ca. 1 mm.

Sedimentation							
[g/m ²]	>1000	>5000	>8000	>10000	>15000	>18000	>20000
[mm]	>1	>5	>8	>10	>15	>18	>20
Areal [km ²]	125	26	16	13	9	7	6

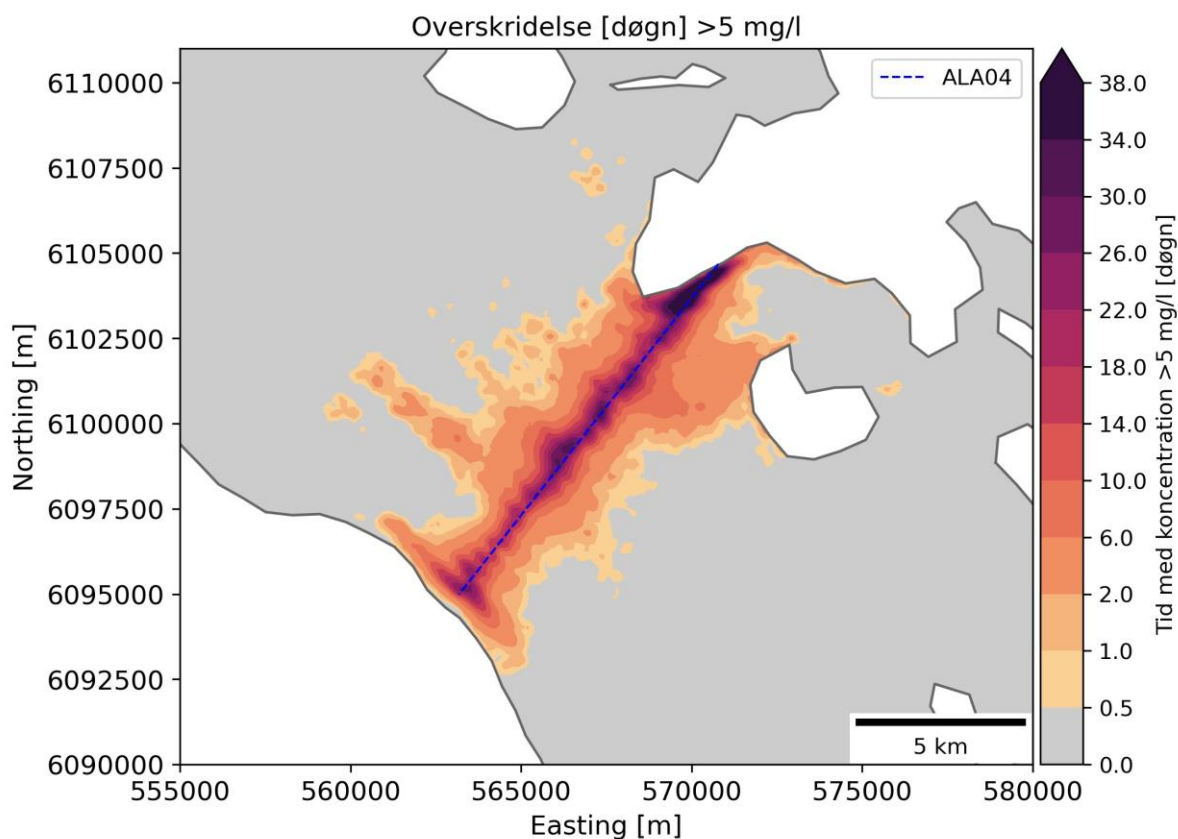
Confidential

6.2.2 Linjeføring ALA04

Overskridelsesvarighed

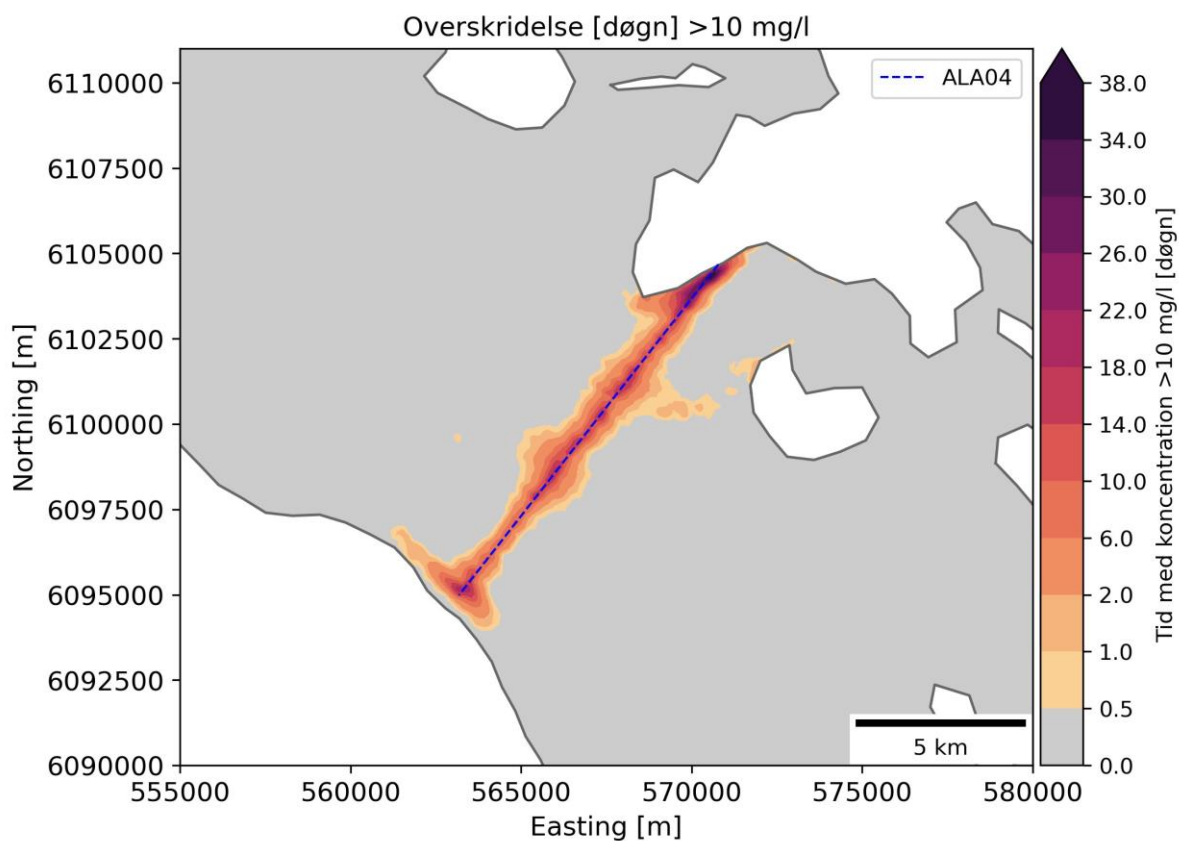
Resultaterne for overskridelsesvarigheden af koncentrationer over 5 mg/l og 10 mg/l i vandsøjlen præsenteres i hhv. Figur 6-8 og Figur 6-9. Figuren præsenterer overskridelsestiden for den samlede arbejdstid for hvert tunnelscenarie. I Tabel 6-1 opsummeres det samlede areal hvor der overskrides de ovennævnte koncentrationer som funktion af varighed i døgn. De gennemsnitlige afstande fra tunnelrenden ved forskellige koncentrationer opsummeres i Tabel 6-5. I Figur 6-10 ses et eksempel på et "øjebliksbillede" for den samlede koncentration over 1 time for et givet tidspunkt.

Den maksimale overskridelsesvarighed for en koncentration over 5 mg/l er det 53 døgn og for 10 mg/l er det 44 døgn. Det skal noteres, at disse varigheder kun påvirker et begrænset areal af en enkel beregningscelle, som har et areal på 6445 m² (svarende til en celle med en størrelse på ca. 80x80 m i et kvadratisk net), se Afsnit 4.1.2. Dette betyder at den maksimale overskridelsesvarighed kun påvirker en lille del af en enkel celle i modelområdet. Arealet der påvirkes af sedimentspildet med en koncentration over 5 mg/l og 10 mg/l har en gennemsnitlig afstand fra tunnelrenden svarende til hhv. 785 m og 330 m (se Tabel 6-6) på begge sider af tunnelrenden.



Figur 6-8. Overskridelsesvarighed af 5 mg/l koncentration partikler i vandsøjlen.

Confidential



Figur 6-9. Overskridelsesvarighed af 10 mg/l koncentration partikler i vandsøjlen.

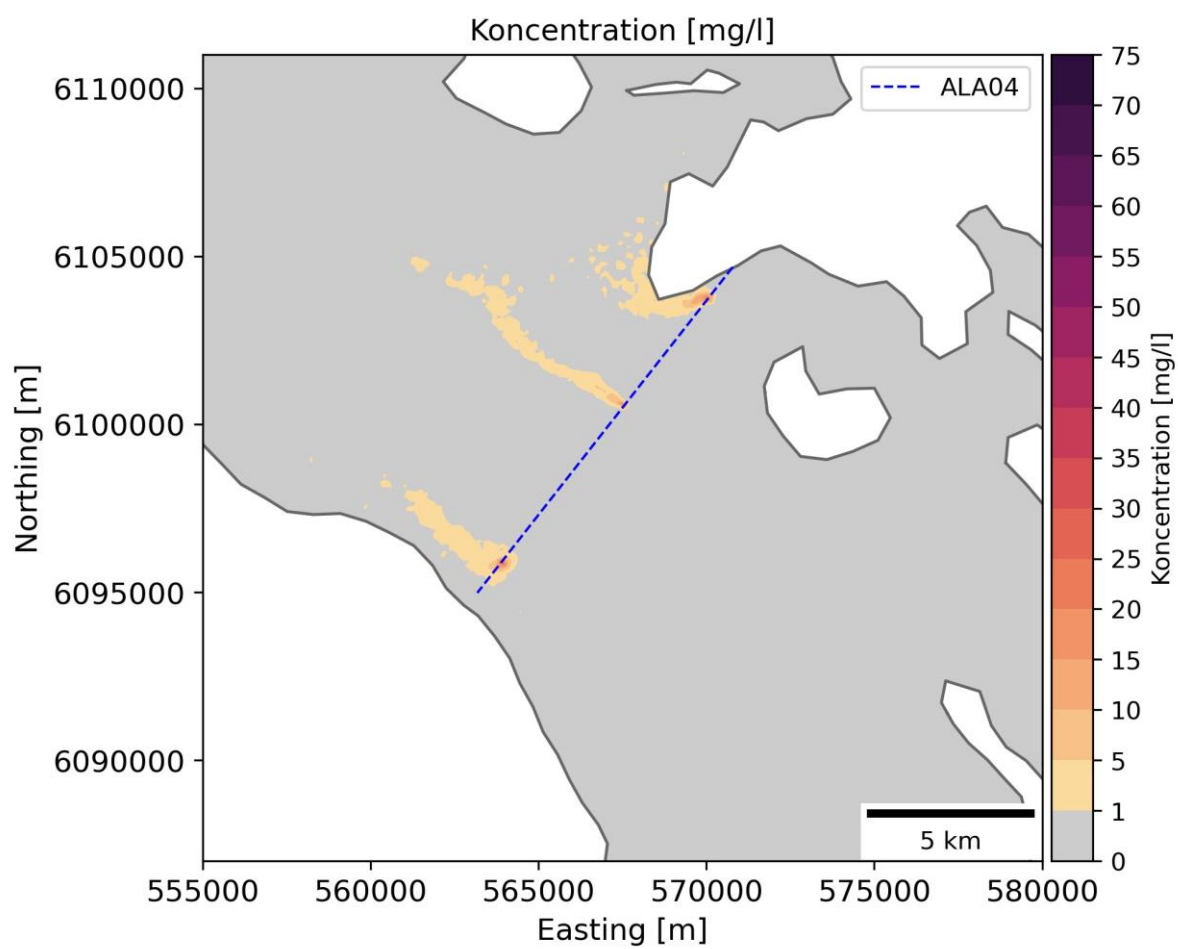
Tabel 6-5. Areal med en partikelkoncentration over de bestemte koncentrationer som funktion af tid.

Areal med konc. [km ²]	Varighed [døgn]											
	0.5	1	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
> 5 mg/l	68,0	54,1	40,8	21,0	13,7	9,6	6,6	4,2	2,5	1,3	0,7	0,5
> 10 mg/l	21,2	15,9	11,6	6,3	3,9	2,0	1,0	0,5	0,3	0,1	0,1	0,0

Tabel 6-6. Gennemsnitlig afstand fra tunnelrenden for overskridelse af de bestemte koncentrationer.

Koncentration [mg/l]	Gennemsnitlig afstand fra tunnelrende [m]
5	785
10	330

Confidential

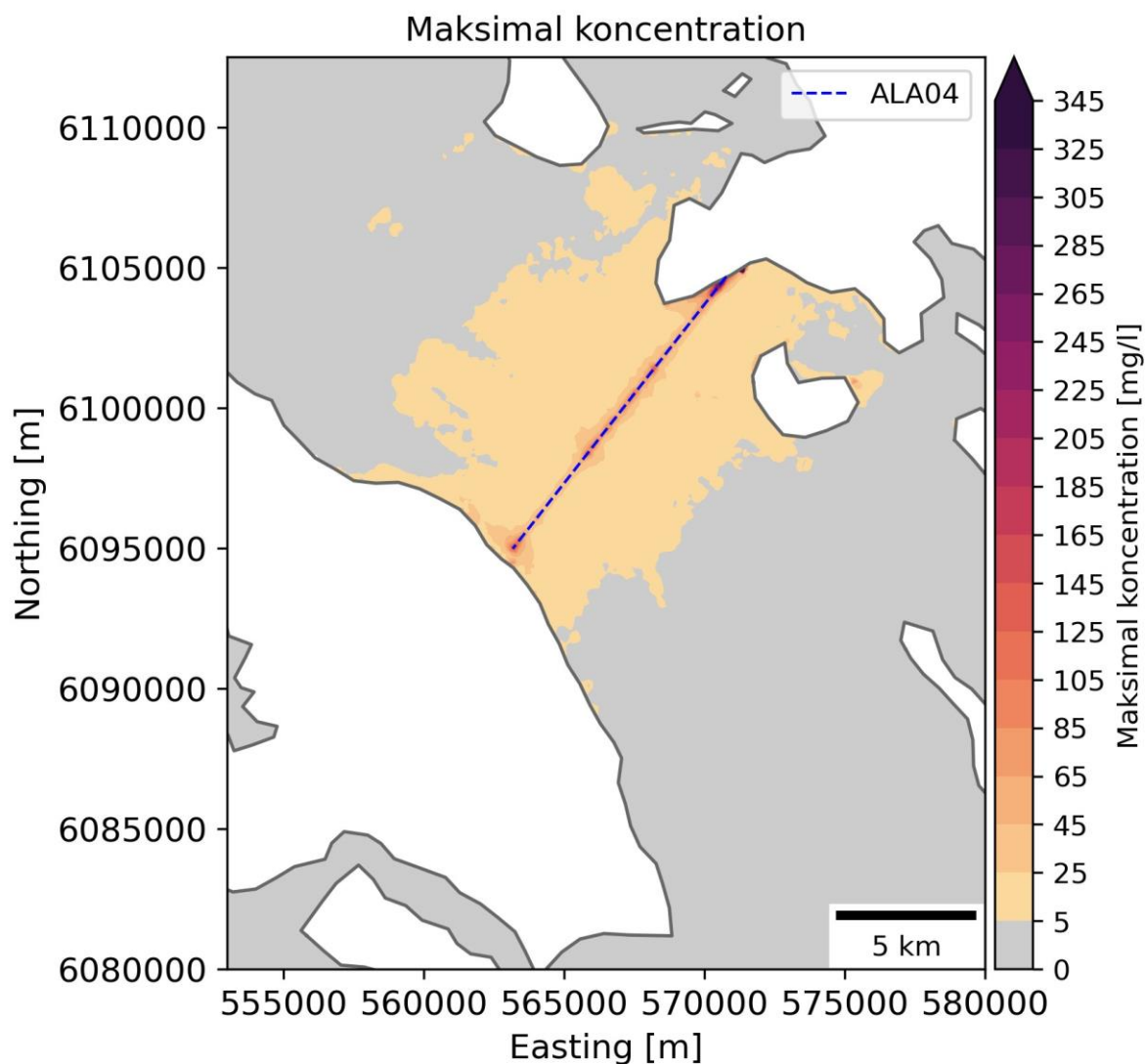


Figur 6-10. Øjeblikskoncentration hvis gravearbejdet havde foregået d. 01-03-2017.

Confidential

Maksimal koncentration

Resultater for den maksimale koncentration målt i løbet af simulationsperioden præsenteres nedenfor (Figur 6-11). Den maksimale koncentration svarer til en kortvarig (under 1 time) peak koncentration der måles under simulationsperioden. Bemærk at figuren viser den maksimale koncentration beregnet for hver enkel celle i beregningsnettet. Det vil sige at figuren viser den højeste koncentration der er målt i løbet af simulationen for hver beregningscelle og at disse værdier er sammenlagt og vist i nedenstående figur.



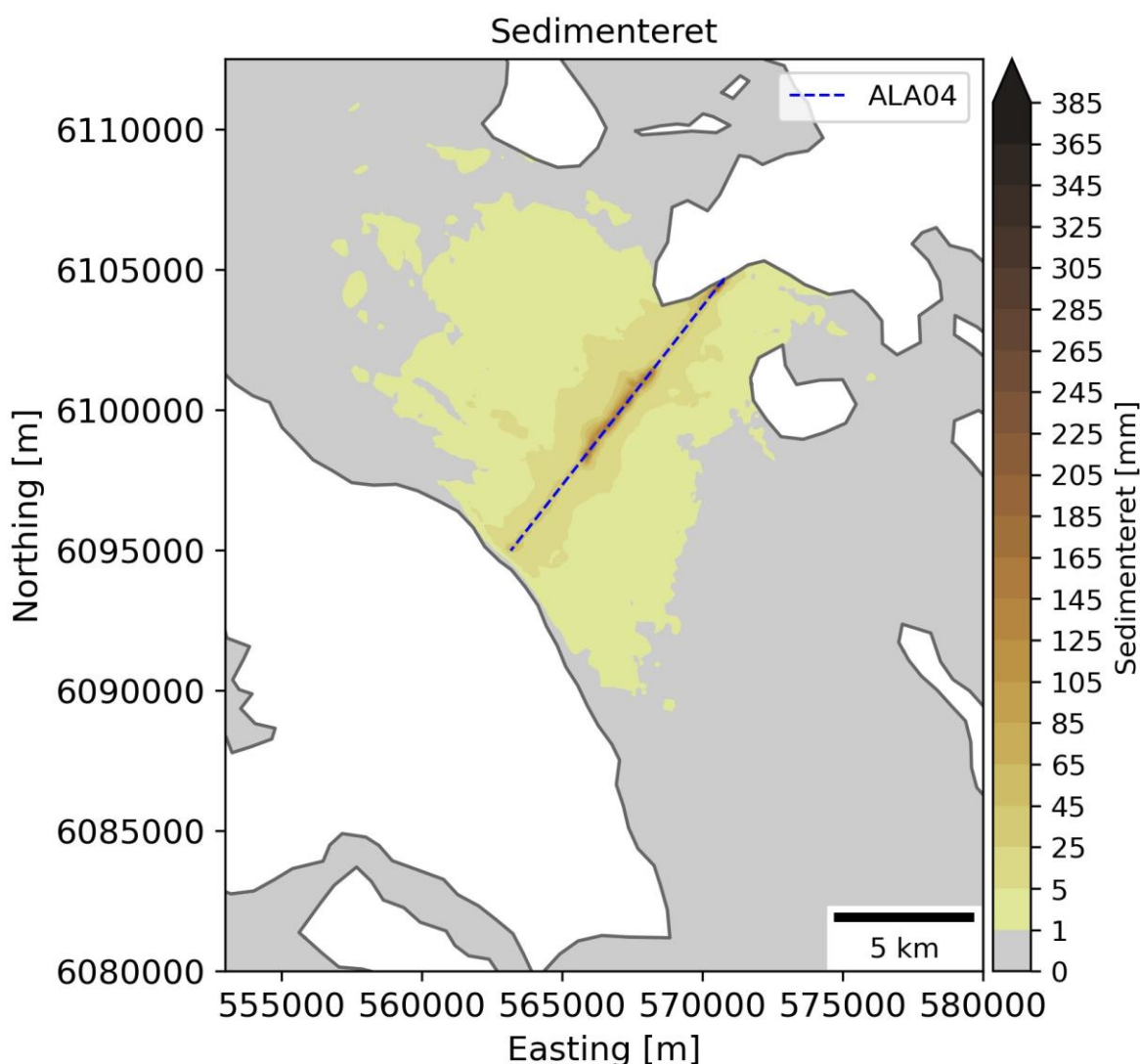
Figur 6-11. Maksimal koncentration målt under simulationsperioden beregnet for hver individuel beregningscelle.

Confidential

Sedimentation

Den samlede sedimentation beregnet i løbet af simulationsperioden præsenteres nedenfor som g/m^2 sedimentation. Densiteten af de sedimenterede partikler kendes ikke men er nødvendig for at beregne tykkelsen af det sedimenterede lag. For at konvertere sedimentkoncentrationen til en tykkelse, kan det konservativt antages, at sedimenterne har en densitet på 1000 kg/m^3 , hvilket konverteres til $1000 \text{ g/m}^2 = 1 \text{ mm}$.

I Figur 6-12 præsenteres den maksimale sedimentation for tunnelloøsningen. Den maksimale sedimentation er 1368 g/m^2 svarende til ca. 1370 mm. Det skal bemærkes, at denne sedimentation er begrænset til et areal tæt på tunnelrenden, mere specifikt tæt på kysterne hvor vanddybden er forholdsvis lav, hvilket medfører at sedimentet sedimenterer hurtigere og derfor ikke spredes så langt. De gennemsnitlige afstande fra tunnelrenden med forskellige sedimentationstykkelse præsenteres i Tabel 6-7. Tabel 6-8 opsummerer det samlede areal med en sedimentation større end de angivne grænseværdier og Figur 6-13 vises relationen mellem sedimentationen og distancen fra tunnelrenden.

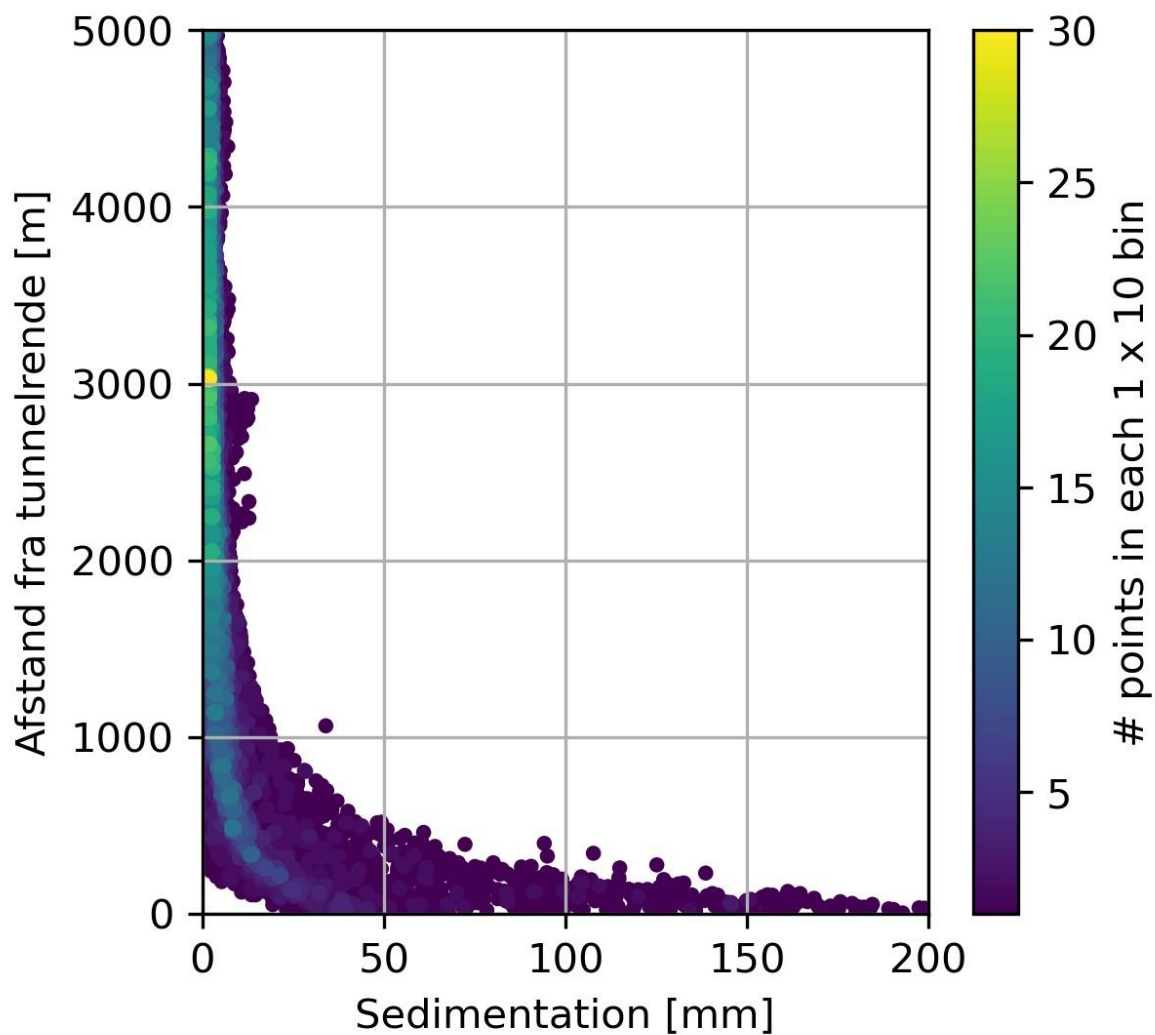


Figur 6-12. Maksimal sedimentation.

Confidential

Tabel 6-7. Gennemsnitsafstand fra tunnelrenden (på begge sider) for sedimenteret materiale. Bemærk at det antages at 1000 g/m² svarer til ca. 1 mm.

Sedimentation								
[g/m ²]	>1000	>5000	>10000	>15000	>20000	>30000	>100000	>250000
[mm]	>1	>5	>10	>15	>20	>30	>100	>250
Afstand [m]	2000	1000	550	410	300	170	30	1



Figur 6-13. Densitetsscatterplot af sedimenteret partikler vs. afstand fra tunnelrenden.

Tabel 6-8. Opsummering af areal påvirket af sediment ved forskellige grænseværdier. Bemærk at det antages at 1000 g/m² svarer til ca. 1 mm.

Sedimentation							
[g/m ²]	>1000	>5000	>8000	>10000	>15000	>18000	>20000
[mm]	>1	>5	>8	>10	>15	>18	>20
Areal [km ²]	142	31	19	15	10	8,4	7,6

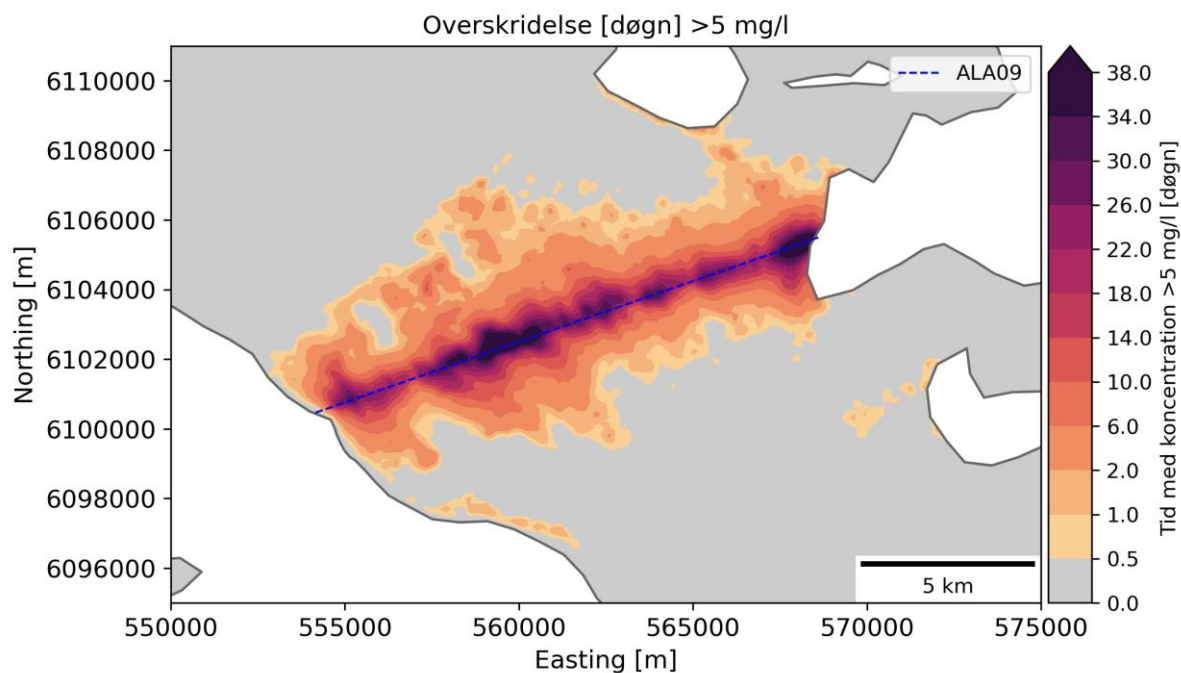
Confidential

6.2.3 Linjeføring ALA09

Overskridelsesvarighed

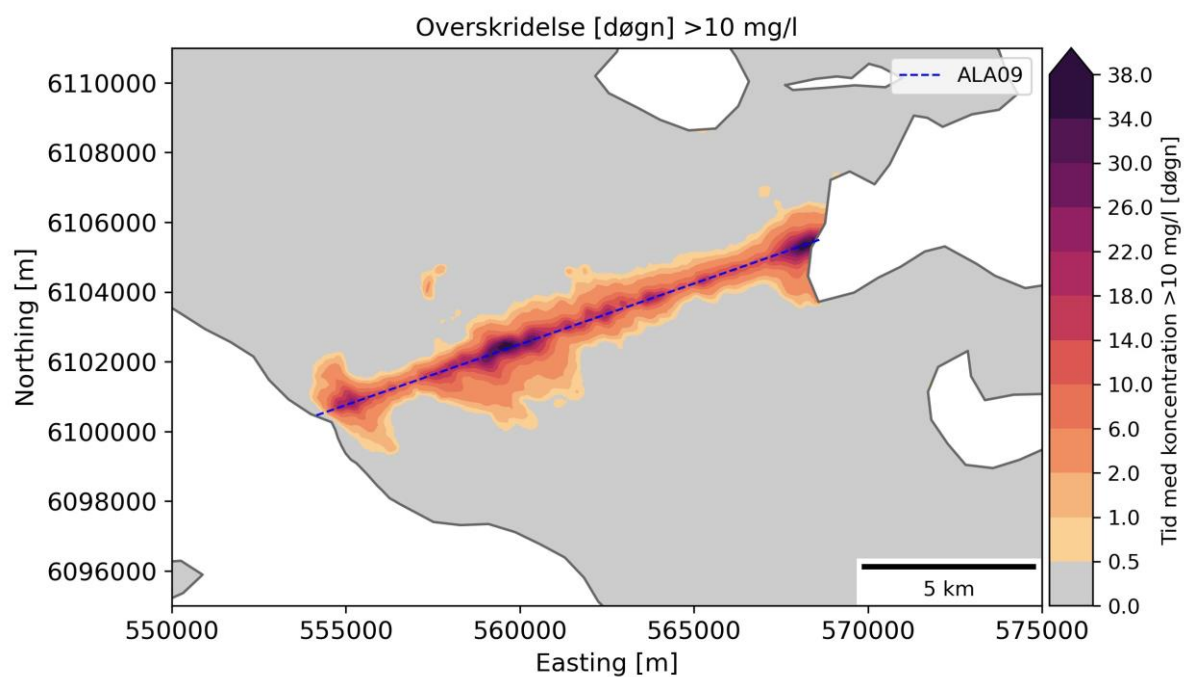
Resultaterne for overskridelsesvarigheden af koncentrationer over 5 mg/l og 10 mg/l i vandsøjlen præsenteres i hhv. Figur 6-14 og Figur 6-15. Figuren præsenterer overskridelsestiden for den samlede arbejdstid for hvert tunnelscenarie. I Tabel 6-9 opsummeres det samlede areal hvor der overskrides de ovennævnte koncentrationer som funktion af varighed i døgn. De gennemsnitlige afstande fra tunnelrenden ved forskellige koncentrationer opsummeres i Tabel 6-10. I Figur 6-16 ses et eksempel på et "øjebliksbillede" for den samlede koncentration over 1 time for et givet tidspunkt.

Den maksimale overskridelsesvarighed for en koncentration over 5 mg/l er det 58 døgn og for 10 mg/l er det 41 døgn. Det skal noteres, at disse varigheder kun påvirker et begrænset areal af en enkel beregningscelle, som har et areal på 6445 m² (svarende til en celle med en størrelse på ca. 80x80 m i et kvadratisk net), se Afsnit 4.1.2. Dette betyder at den maksimale overskridelsesvarighed kun påvirker en lille del af en enkel celle i modelområdet. Arealet der påvirkes af sedimentspildet med en koncentration over 5 mg/l og 10 mg/l har en gennemsnitlig afstand fra tunnelrenden svarende til hhv. 750 m og 355 m (se Tabel 6-2) på begge sider af tunnelrenden.



Figur 6-14. Overskridelsesvarighed af 5 mg/l koncentration partikler i vandsøjlen.

Confidential



Figur 6-15. Overskridelsesvarighed af 10 mg/l koncentration partikler i vandsøjlen.

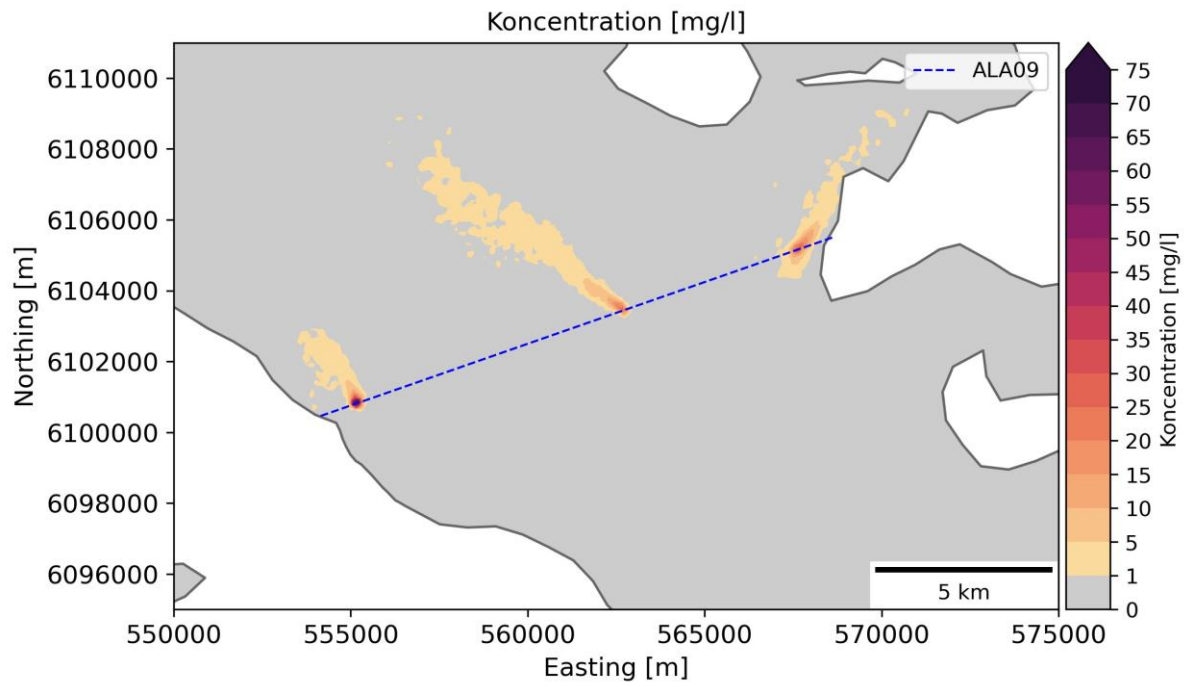
Tabel 6-9. Areal med en partikelkoncentration over de bestemte koncentrationer som funktion af tid.

Areal med konc. [km ²]	Varighed [døgn]											
	0.5	1	2	6	10	14	18	22	26	30	34	38
> 5 mg/l	84,3	68,5	51,4	29,9	21,1	15,1	10,9	7,3	4,6	2,8	1,5	0,9
> 10 mg/l	30,5	24,7	18,9	10,4	6,5	4,0	2,2	1,2	0,7	0,5	0,2	0,1

Tabel 6-10. Gennemsnitlig afstand fra tunnelrenden for overskridelse af de bestemte koncentrationer.

Koncentration [mg/l]	Gennemsnitlig afstand fra tunnelrende [m]
5	750
10	355

Confidential

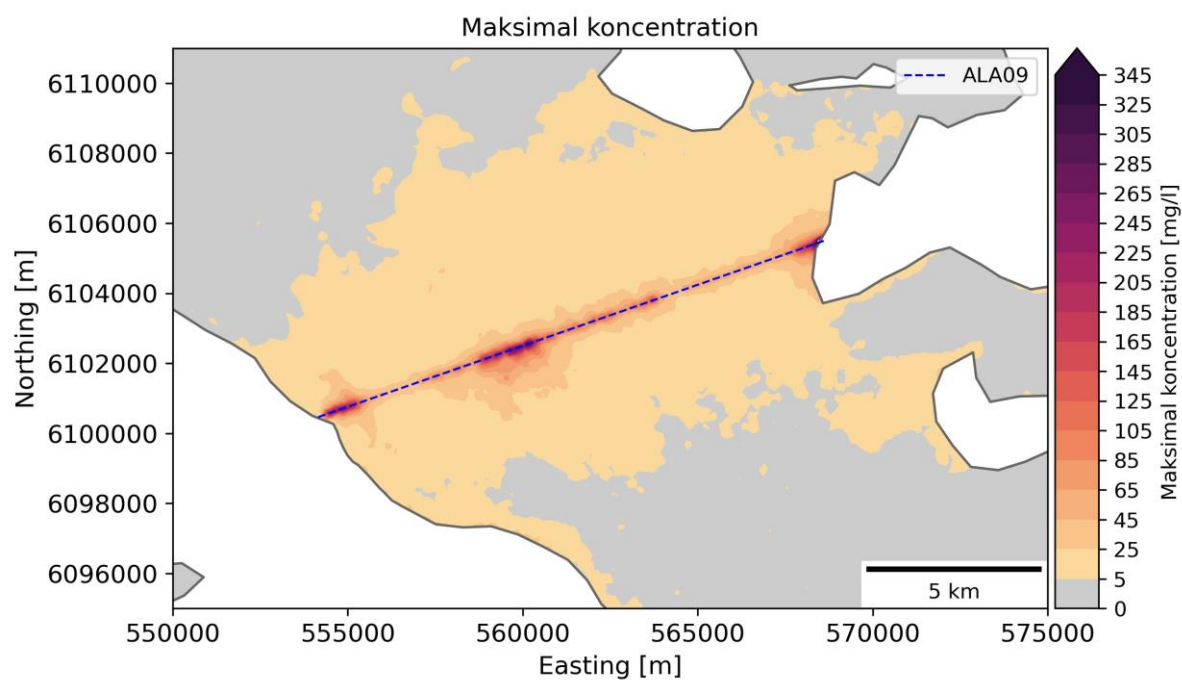


Figur 6-16. Øjeblikskoncentration hvis gravearbejdet havde foregået d. 01-03-2017.

Confidential

Maksimal koncentration

Resultater for den maksimale koncentration målt i løbet af simulationsperioden præsenteres nedenfor (Figur 6-5). Den maksimale koncentration svarer til en kortvarig (under 1 time) peak koncentration der måles under simulationsperioden. Bemærk at figuren viser den maksimale koncentration beregnet for hver enkel celle i beregningsnettet. Det vil sige at figuren viser den højeste koncentration der er målt i løbet af simulationen for hver beregningscelle og at disse værdier er sammenlagt og vist i nedenstående figur.



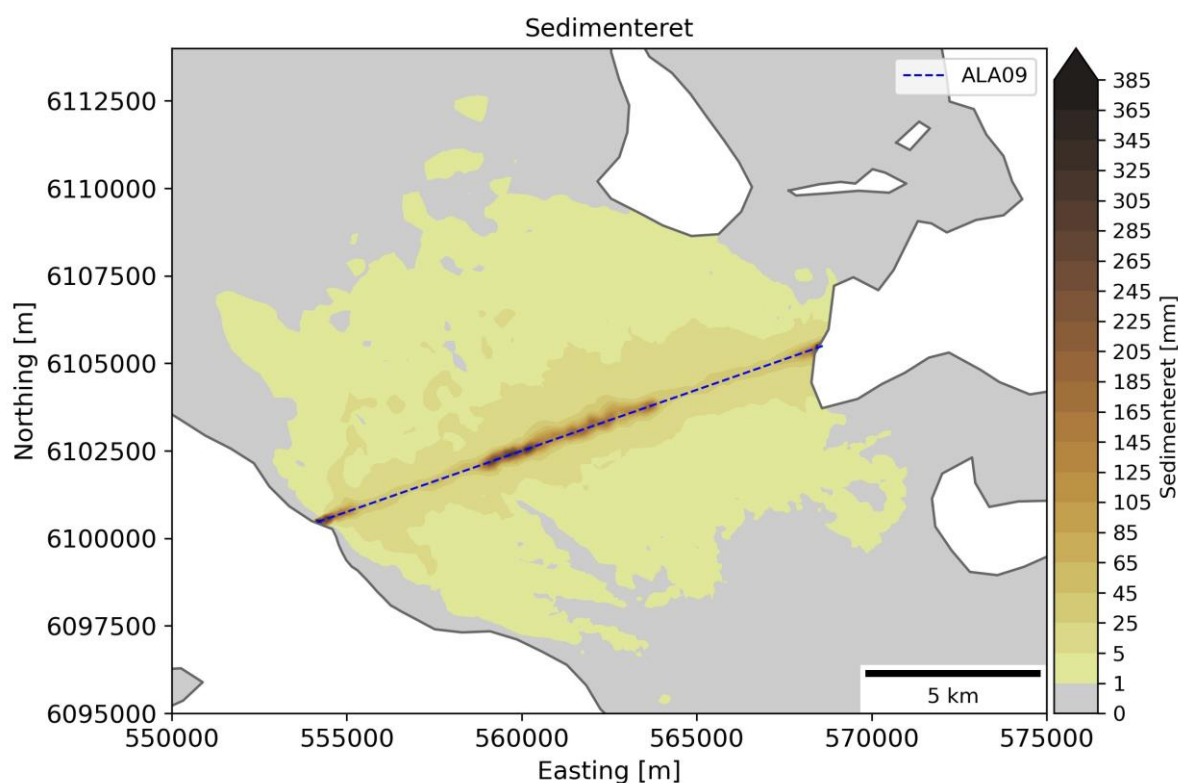
Figur 6-17. Maksimal koncentration målt under simulationsperioden beregnet for hver individuel beregningscelle.

Confidential

Sedimentation

Den samlede sedimentation beregnet i løbet af simulationsperioden præsenteres nedenfor som g/m^2 sedimentation. Densiteten af de sedimenterede partikler kendes ikke men er nødvendig for at beregne tykkelsen af det sedimenterede lag. For at konvertere sedimentkoncentrationen til en tykkelse, kan det konservativt antages, at sedimenterne har en densitet på 1000 kg/m^3 , hvilket konverteres til $1000 \text{ g/m}^2 = 1 \text{ mm}$.

I Figur 6-18 præsenteres den maksimale sedimentation for tunnelloøsningen. Den maksimale sedimentation er 1479 g/m^2 svarende til ca. 1480 mm. Det skal bemærkes, at denne sedimentation er begrænset til et areal tæt på tunnelrenden, mere specifikt tæt på kysterne hvor vanddybden er forholdsvis lav, hvilket medfører at sedimentet sedimenterer hurtigere og derfor ikke spredes så langt. De gennemsnitlige afstande fra tunnelrenden med forskellige sedimentationstykkelse præsenteres i Tabel 6-11. Tabel 6-12 opsummerer det samlede areal med en sedimentation større end de angivne grænseværdier og i Figur 6-19 vises relationen mellem sedimentationen og distancen fra tunnelrenden.

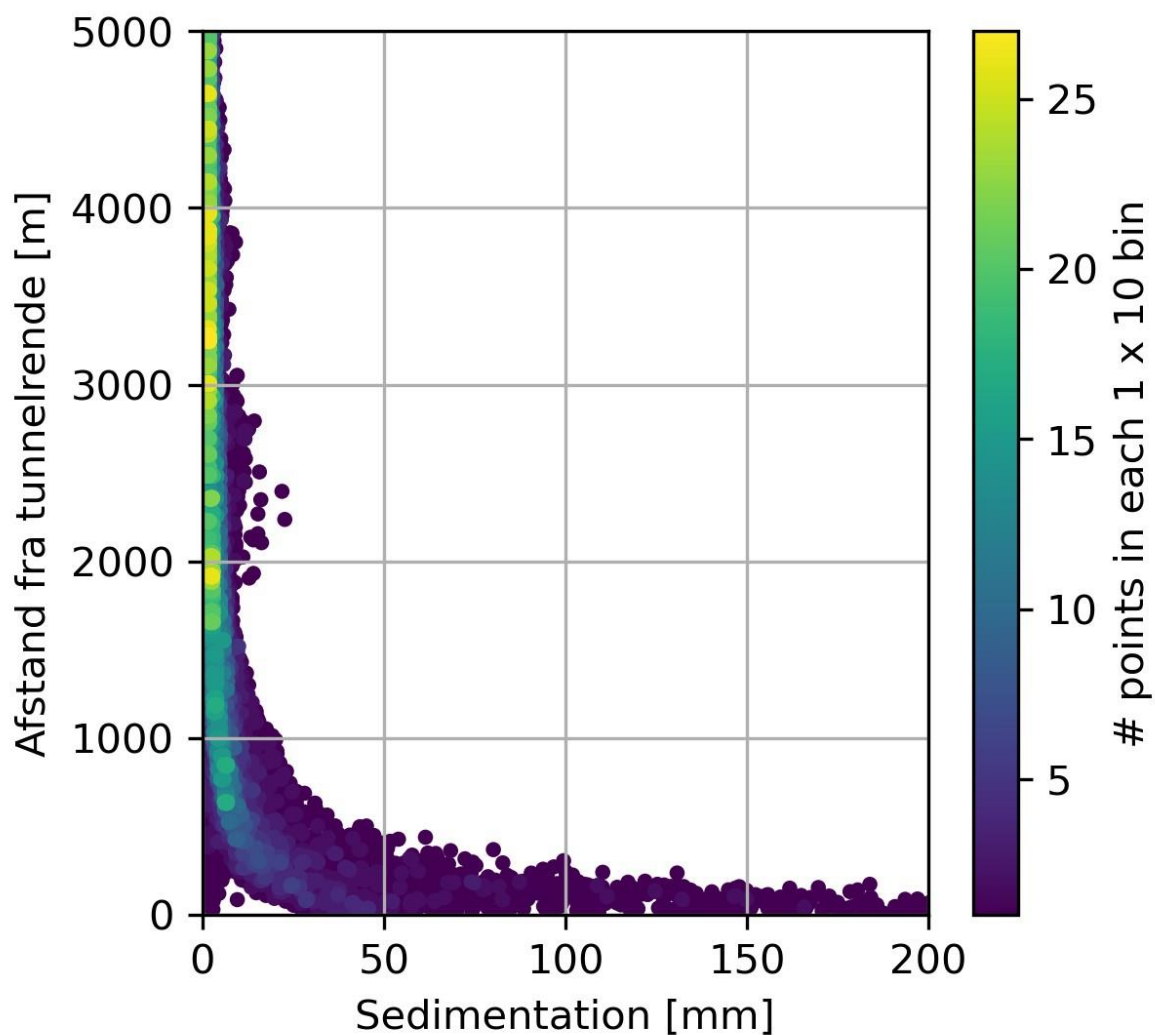


Figur 6-18. Maksimal sedimentation.

Tabel 6-11. Gennemsnitsafstand fra tunnelrenden (på begge sider) for sedimenteret materiale. Bemærk at det antages at 1000 g/m^2 svarer til ca. 1 mm.

Sedimentation								
[g/m^2]	>1000	>5000	>10000	>15000	>20000	>30000	>100000	>250000
[mm]	>1	>5	>10	>15	>20	>30	>100	>250
Afstand [m]	2000	1200	600	420	370	250	70	5

Confidential



Figur 6-19. Densitetsscatterplot af sedimenteret partikler vs. afstand fra tunnelrenden.

Tabel 6-12. Opsummering af areal påvirket af sediment ved forskellige grænseværdier. Bemærk at det antages at 1000 g/m² svarer til ca. 1 mm.

	Sedimentation						
[g/m ²]	>1000	>5000	>8000	>10000	>15000	>18000	>20000
[mm]	>1	>5	>8	>10	>15	>18	>20
Areal [km ²]	151	38	23	18	12	10	9

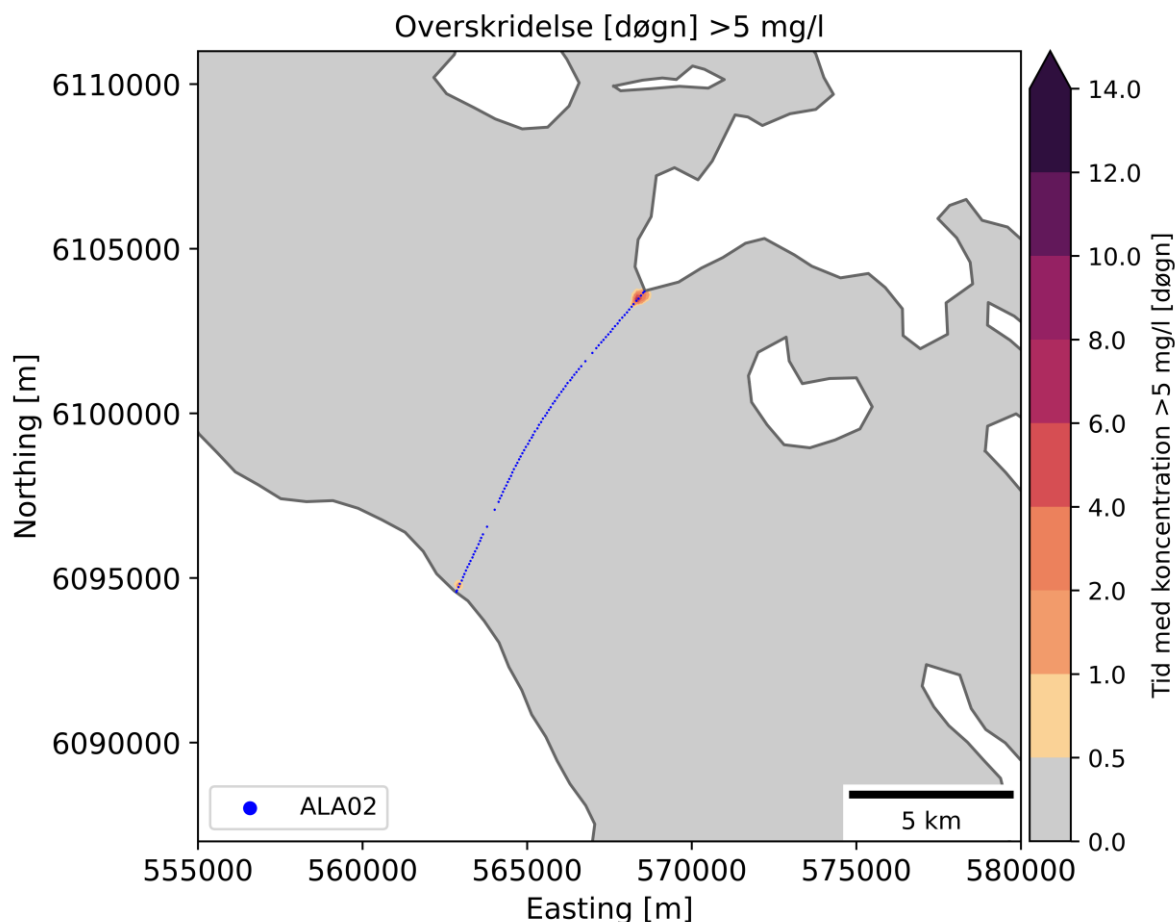
Confidential

6.3 Broløsning

6.3.1 Overskridelsesvarighed

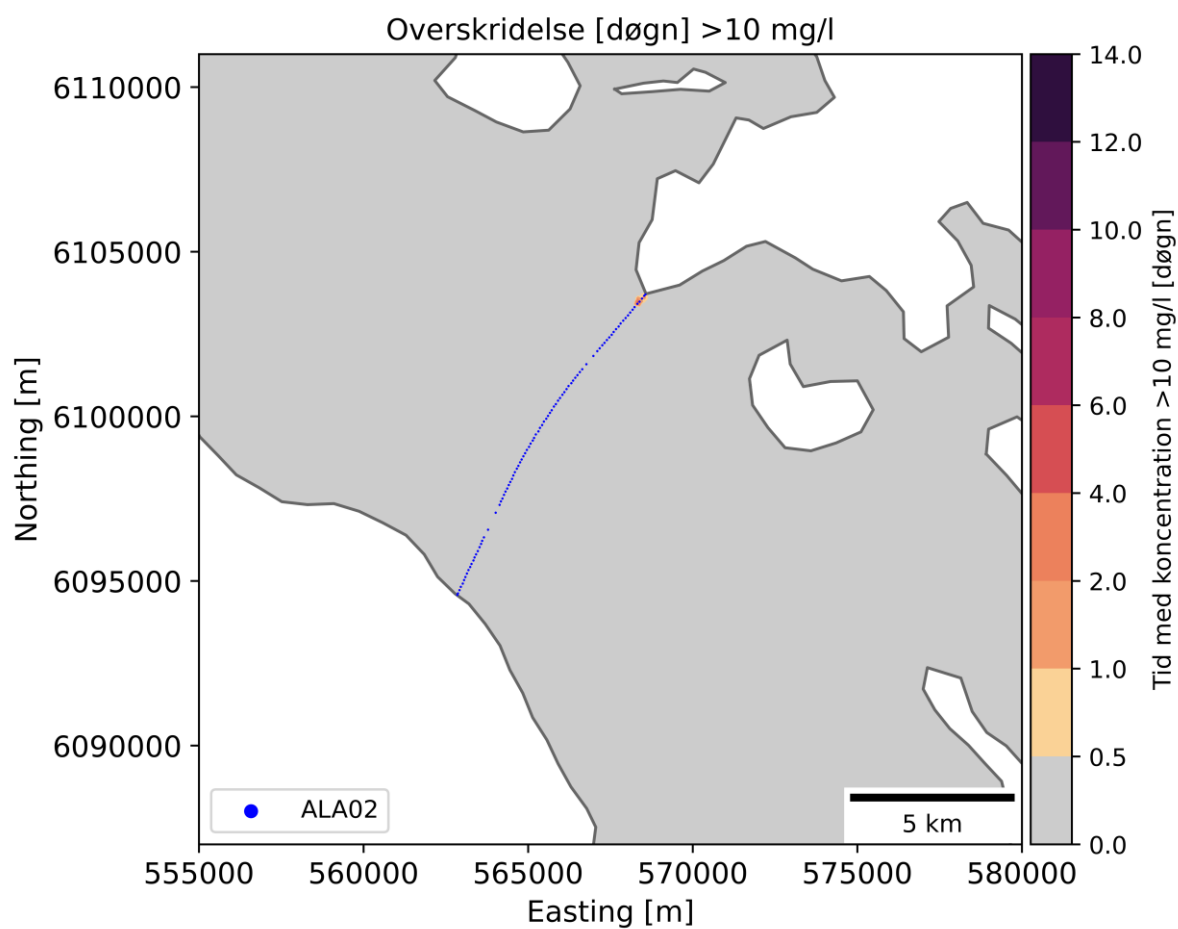
Resultaterne for overskridelsesvarigheden af koncentrationer på 5 mg/l og 10 mg/l præsenteres i hhv. Figur 6-20 og Figur 6-21. Figuren præsenterer overskridelsestiden for den samlede arbejdstid på 44 uger. I Tabel 6-13 opsummeres det samlede areal hvor der overskrides de ovennævnte koncentrationer som funktion af tid. De gennemsnitlige afstande fra gravearbejdet ved de forskellige koncentrationer opsummeres i Tabel 6-13. I Figur 6-22 ses et eksempel på et "øjebliksbillede" for den samlede koncentration over 1 time for et givet tidspunkt.

Den maksimale overskridelsesvarighed for en koncentration på for 5 mg/l er 17 døgn og for 10 mg/l er det 13 døgn. Det skal bemærkes, at disse varigheder kun påvirker et begrænset areal af en enkel beregningscelle, som har et areal på 6445 m² (svarende til en celle med en størrelse på ca. 80x80 m i et kvadratisk net), se Afsnit 4.1.2. Arealet der påvirkes af sedimentspildet med en koncentration over 5 mg/l, har en gennemsnitlig afstand fra gravearbejdet svarende til 75 m. For koncentrationer over 10 mg/l, er den gennemsnitlige afstand på 35 m.



Figur 6-20. Overskridelsesvarighed af 5 mg/l koncentration af partikler i vandsøjlen.

Confidential



Figur 6-21. Overskridelsesvarighed af 10 mg/l koncentration af partikler i vandsøjlen.

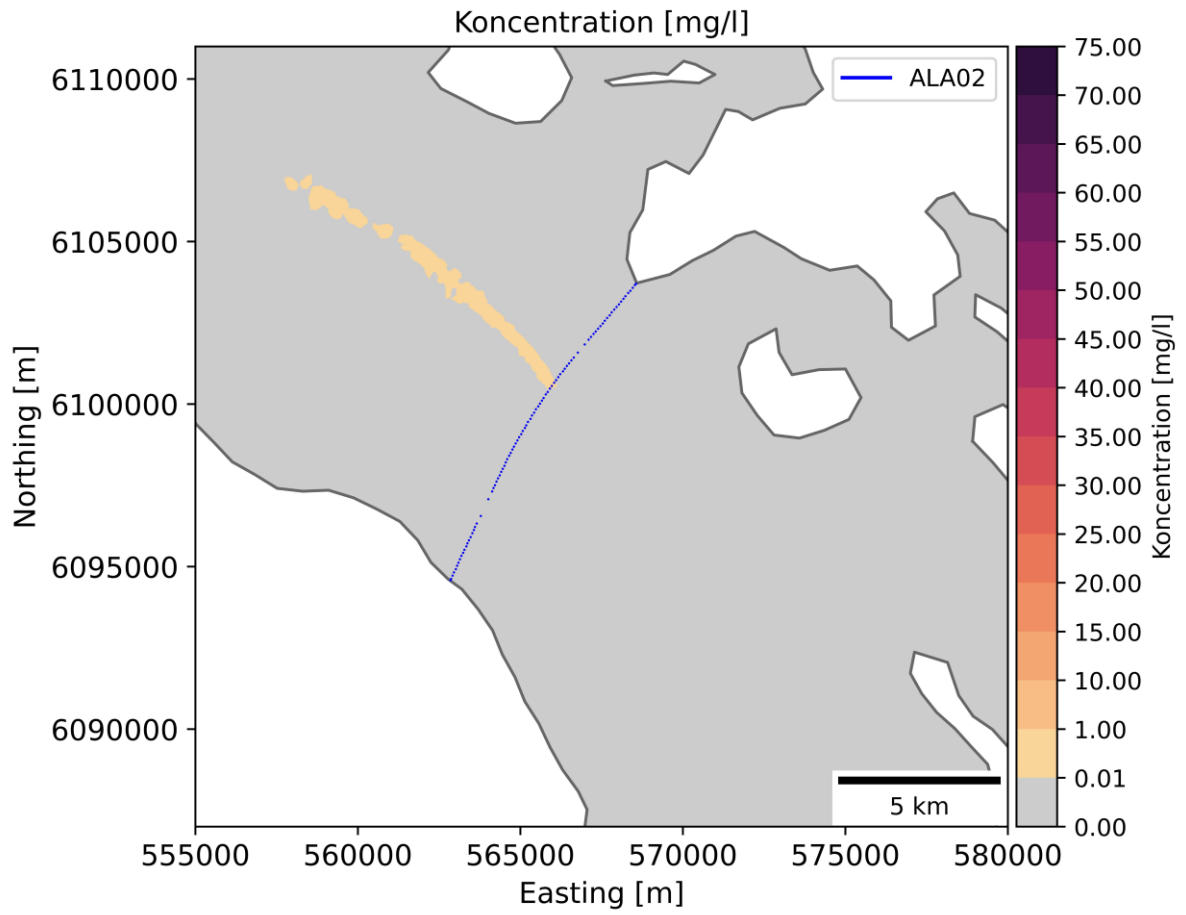
Tabel 6-13. Areal med en partikelkoncentration over de bestemte koncentrationer som funktion af tid.

Areal med konc. [km ²]	Varighed [døgn]								
	0,5	1	2	4	6	8	10	12	14
> 5 mg/l	0,3	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
> 10 mg/l	0,2	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tabel 6-14. Gennemsnitlig afstand fra gravearbejdet for de bestemte koncentrationer.

Koncentration [mg/l]	Gennemsnitlig afstand fra gravearbejdet [m]
5	75
10	35

Confidential

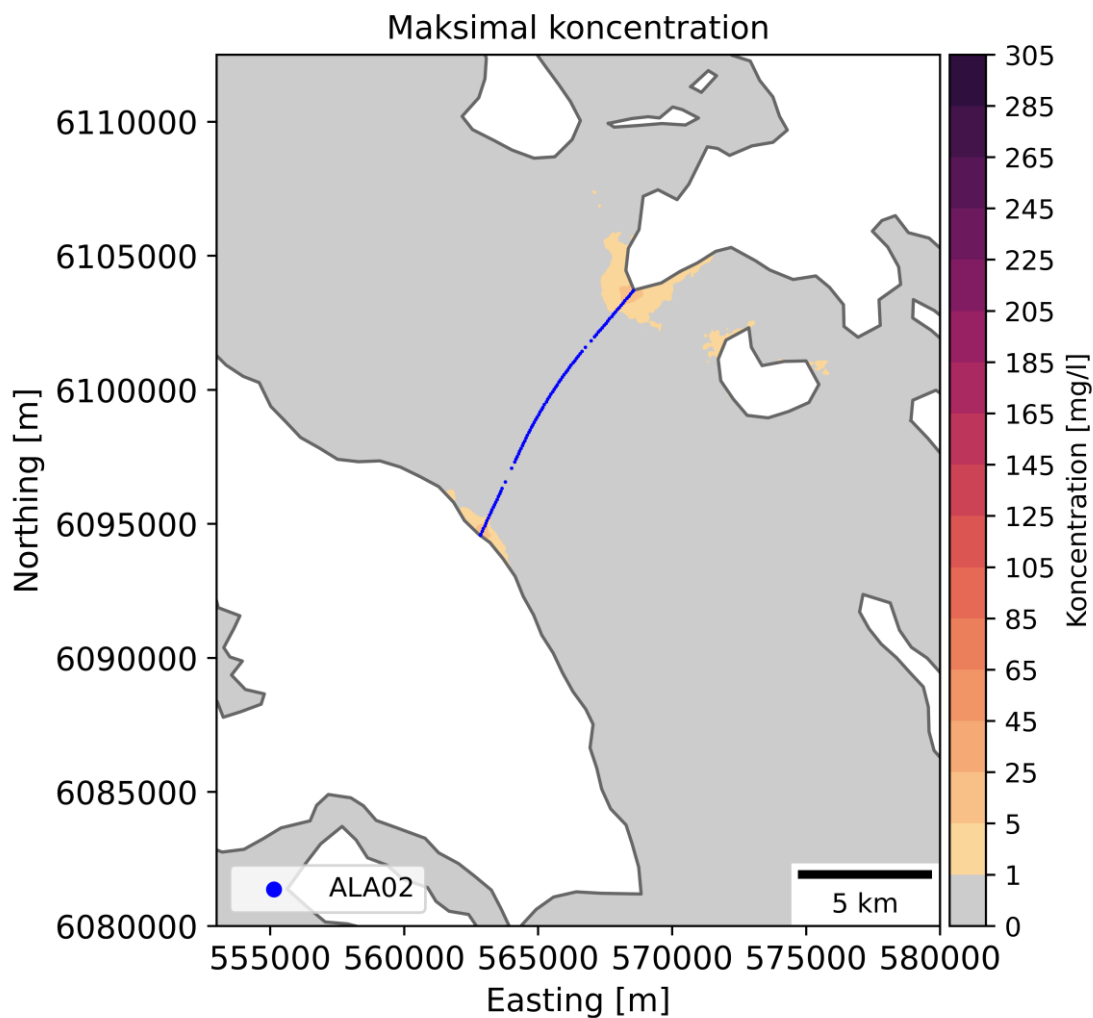


Figur 6-22. Øjeblikskoncentration d. 06-03-2017. Bemærk de meget lave koncentrationer (<1 mg/l).

Confidential

6.3.2 Maksimal koncentration

Resultater for den maksimale koncentration i løbet af simulationsperioden præsenteres nedenfor (Figur 6-23). Den maksimale koncentration svarer til en kortvarig (under 1 time) peak koncentration der måles under simulationsperioden. Bemærk at figuren viser den maksimale koncentration der beregnes for hver beregningscelle individuelt. Det vil sige at figuren viser den højeste koncentration for hver enkelt celle og at det ikke nødvendigvis svarer til et bestemt tidspunkt.



Figur 6-23. Maksimal koncentration målt under simulationsperioden beregnet for hver individuel beregningscelle.

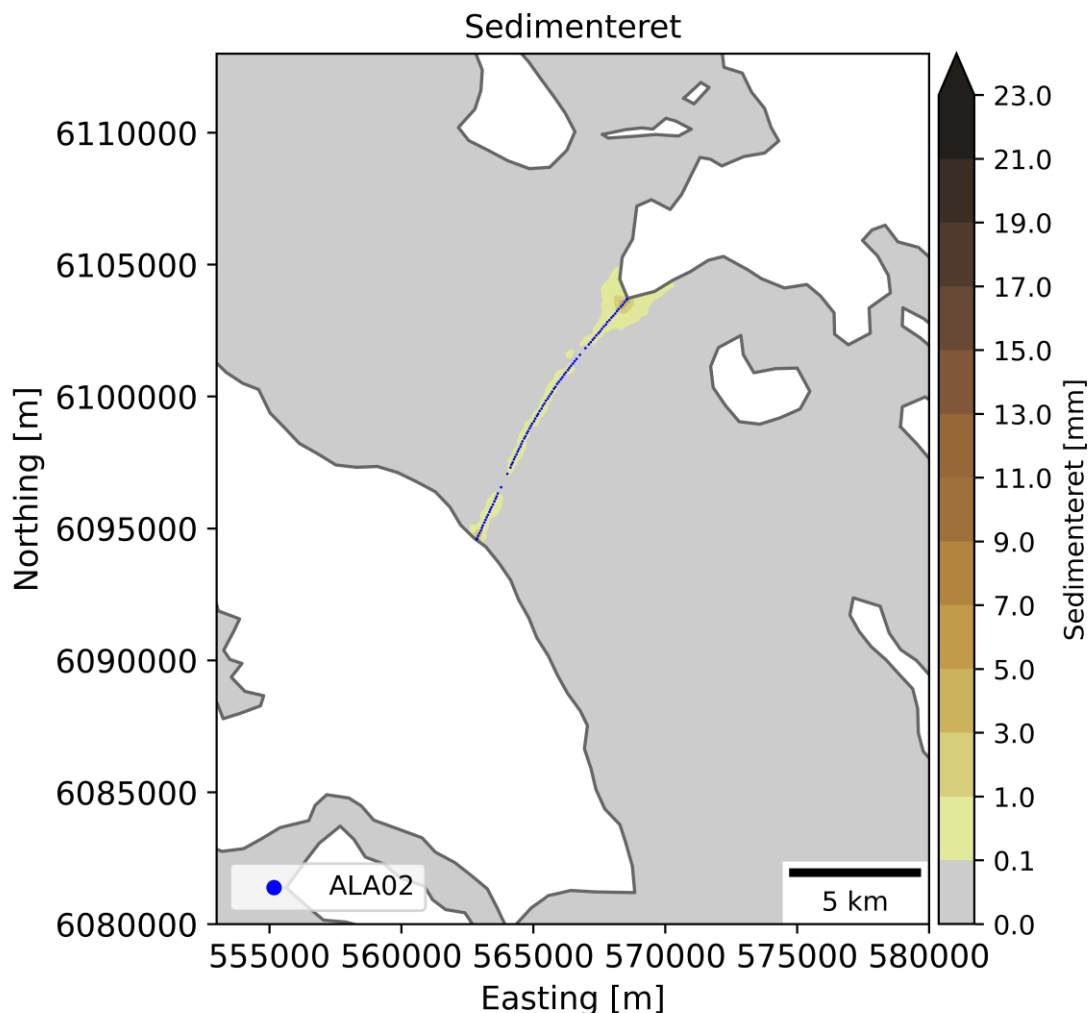
Confidential

6.3.3 Sedimentation

Den samlede sedimentation beregnet i løbet af simulationsperiode præsenteres nedenfor som g/m^2 sedimentation. Densiteten af de sedimenterede partikler kendes ikke men er nødvendig for at beregne tykkelsen af det sedimenterede lag. For at konvertere sedimentkoncentrationen til en tykkelse, kan det konservativt antages at sedimenterne har en densitet på 1000 kg/m^3 , hvilket kan konverteres til ca. $1000 \text{ g/m}^2 \approx 1 \text{ mm}$.

I Figur 6-24 præsenteres sedimentationen for broløsningen. Den maksimale sedimentation er 27 kg/m^2 svarende til ca. 27 mm. Det skal bemærkes, at denne koncentration er begrænset til et areal tæt på gravearbejdet, mere specifikt tæt på kysterne hvor der er forholdsvis lav vandet. Tykkelsen af det sedimenterede materiale for broløsningen er meget lavere end for tunnelloøsningen, derfor den forskellige skala.

De gennemsnitlige afstande fra gravearbejdet med forskellige sedimentationstykkelser præsenteres i Tabel 6-15. Tabel 6-16 opsummerer det samlede areal med sedimentation større end de angivne grænseværdier og i Figur 6-25 vises relationen mellem sedimentationen ($>0,1 \text{ mm}$) og afstanden fra gravearbejdet.

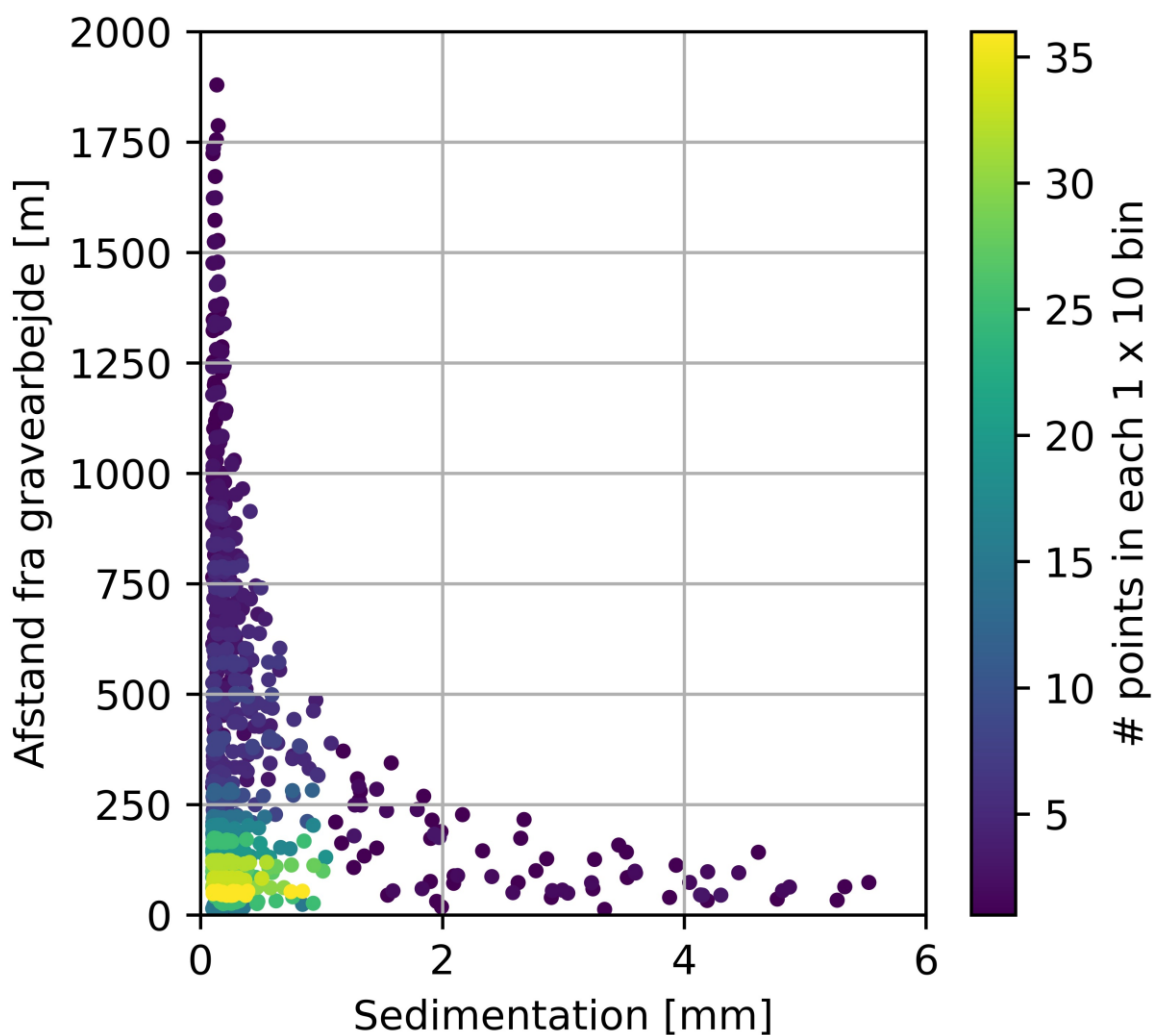


Figur 6-24. Maksimal sedimentation. Bemærk at skalaen anvendt er forskellige end for tunnelloøsningen pga. de signifikant mindre spildmængder ved broløsningen.

Confidential

Tabel 6-15. Gennemsnitsafstand fra gravearbejdet (på begge sider) for sedimenteret materiale. Bemærk at det antages at 1000 g/m² svarer til ca. 1 mm.

Sedimentation					
[g/m ²]	>1000	>5000	>10000	>15000	>20000
[mm]	>1	>5	>10	>15	>20
Afstand [m]	100	45	40	38	37



Figur 6-25. Densitetsscatterplot af sedimenteret partikler vs. afstand fra gravearbejdet.

Tabel 6-16. Opsummering af areal påvirket af sediment ved forskellige grænseværdier. Bemærk at det antages at 1000 g/m² svarer til ca. 1 cm.

Sedimentation						
[g/m ²]	>1000	>5000	>8000	>10000	>15000	>18000
[mm]	1	5	8	10	15	18
Areal [km ²]	0,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Confidential

7. Konklusion

Sedimentspildsmodellen er sat op til at beregne mængde af sediment der spildes i vandsøjlen i forbindelse med etablering af en Als-Fyn forbindelse. Fire løsninger er blevet undersøgt: tre tunnellsninger og en broløsning. Resultaterne præsenteres i form af overskridelsesvarighed for tærskler på 5 og 10 mg/l, den maksimale koncentration målt under simulationsperioden og sedimentation. De maksimale resultater mellem de undersøgte tunnellsninger, samt resultaterne for broløsningen er som følger (se Afsnit 6 for alle resultater både for tunnel- og broløsningen):

- Området, der overskrider tærsklen på 5 mg/l i mindst 1 døgn har et areal på maksimalt 84 km² (for tunnellsningen) og på 0,2 km² (for broløsningen). For 10 mg/l er det maksimale areal på 30 km² for tunnellsningen og 0,1 km² for broløsningen.
- Den gennemsnitlige afstand fra tunnelrenden, med en koncentration over 5 mg/l er maksimalt 820 m og for 10 mg/l er den gennemsnitlige afstand maksimalt 370 m fra tunnelrenden. For broløsningen, er den gennemsnitlige afstand på 75 m og 35 m for en koncentration over hhv. 5 mg/l og 10 mg/l.
- Arealet hvor der aflejres mere end 10 mm er på maksimalt 18 km² for tunnellsningen og <0,1 km² for broløsningen. Den tilsvarende gennemsnitlige afstand med en sedimentation op til 10 mm er på 600 m og 40 m for hhv. tunnel- og broløsningen. For en sedimentationstykkelse større end 20 mm er arealet på 9 km² og >0,1 km² med en gennemsnitlig afstand på 370 m og 37 m for hhv. tunnel- og broløsningen.

Confidential

8. Referencer

- /1/ DHI, 2017. MIKE 3 Flow Model – User Manual. DHI, Hørsholm, Denmark
- /2/ DHI, 2017. MIKE 3 Flow Model – Scientific Documentation. DHI, Hørsholm, Denmark
- /3/ DHI, 2017. MIKE 21/3 Particle Tracking Model – User Guide. DHI, Hørsholm, Denmark
- /4/ Copernicus Climate Change Service (C3S). (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyses of the global climate. From: Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS), 17-02-2023, <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>
- /5/ CMEMS, 2021. BALTIC SEA PHYSICS REANALYSIS product. Product Identifier: BALTICSEA_REANALYSIS_PHY_003_011. E.U. Copernicus Marine Service Information
- /6/ Danish Geodata Agency. Denmark's Depth Model, 50 m resolution. Data retrieved: 15-01-2023.
- /7/ CMEMS. (2021). *BALTIC SEA- IN SITU NEAR REAL TIME OBSERVATIONS*. Product Identifier: INSITU_BAL_NRT_OBSERVATIONS_013_032. E.U. Copernicus Marine Service Information
- /8/ Copernicus Marine In Situ Tac Data Management Team. (2020). *Product User Manual for multiparameter Copernicus In Situ TAC (PUM)*. From: <https://doi.org/10.13155/43494>
- /9/ CMEMS. (2021). *Quality Information Document*. Issue: 2.0. Ref.: CMEMS-INS-QUID-013-030-036
- /10/ CMEMS, 2022. Baltic Sea - L3S Sea Surface Temperature Reprocessed. Product Identifier: SST_BAL_PHY_L3S_MY_010_040. E.U. Copernicus Marine Service Information
- /11/ Ramboll, Als-Fyn forbindelsen projekthinformationsnotat til miljøundersøgelser. Version 3. Report no. RDK2022N00489-RAM-RP-00002
- /12/ Geo, 2014. Jylland-Fyn Cable Routes, Geophysical and Geotechnical Investigations. Report 2, Revision 1. Energinet.dk Project No.: 14/18501.
- /13/ FEMA consortium / co DHI, 2013. FEHMARNBELT FIXED LINK HYDROGRAPHIC SERVICES (FEHY) - Marine Soil - Impact Assessment - Sediment Spill during Construction of the Fehmarnbelt Fixed Link. E1TR0059 - Volume II. ISBN 978-87-92416-36-0
- /14/ Ramboll, Als-Fyn Udgravningsmængder ALA-04 (Foreløbig vurdering). 09/2023.
- /15/ Ramboll, Alf-Fyn Forundersøgelse, Geologisk længdesnit ALA04 (Foreløbig vurdering). Report ID: AF-A-TG-ALA04-001 a. 06/2023
- /16/ Personlig kommunikation med Sund & Bælt, 20. juni 2023 "Construction time/dredging period". E-mail.
- /17/ Personlig kommunikation med Sund & Bælt, 29. juni 2023 " VS: Fyn-Als: Sedimentspildmængder for ALA02". E-mail.
- /18/ Personlig kommunikation med Sund & Bælt, 24. oktober 2023 " VS: Als-Fyn - data til modellering af ALA01 og ALA04". E-mail.
- /19/ Personlig kommunikation med Sund & Bælt, 9. januar 2024 " SV: Udgravningsmængder for ALA09 - Sænketunnel". E-mail.

Confidential