

Oppdatert tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand



Hovedkontor

Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Sør

Jon Lilletuns vei 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Innlandet

Sandvikaveien 59
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Vest

Thormøhlensgate 53 D
5006 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Danmark

Njalsgade 76, 4. sal
2300 København S, Danmark
Telefon (45) 39 17 97 33

Internett: www.niva.no

Tittel Oppdatert tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand	Løpenummer 7573-2021	Dato 29.01.2021
Forfatter(e) Kristoffer Næs, Marianne Olsen, Ian Allen, Violette Raffard, Malcolm Reid, Gøril Aasen Slinde (NGI) og Bente Sundby Håland (Elkem Carbon)	Fagområde Miljøgifter - marin	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Agder	Sider 31 + Vedlegg

Oppdragsgiver(e) Elkem Carbon	Oppdragsreferanse Bente Sundby Håland
	Utgitt av NIVA Prosjektnummer 17272

Sammendrag

Denne rapporten er en oppdatering av NIVA-rapport 7276-2018 «Tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand» (Olsen og medarb. 2018). Basert på nye analyser og modellering er det presentert utforming av erosjonsbeskyttelse som del av tildekkingslag og angitt nødvendig tykkelse av dette laget i ulike soner i Elkembukta for hindre spredning som følge av skipsoppvirvling i Elkembukta. Tildekkingslaget og det erosjonsbeskyttende laget må prosjekteres i tråd med gjeldende regelverk og standarder. I den sammenheng bør også geotekniske beregninger gjennomføres for å kontrollere stabilitet og bæreevne i området. I Fiskåbukta, hvor risikoen fra PAH er relativt liten og tilstanden for sedimentlevende dyr god, er det i tiltaksplanen anbefalt overvåket naturlig restitusjon for å følge effekten av utslippsreduksjoner på sedimentkonsentrasjoner og økologisk risiko knyttet til PAH. Anbefalingen endres ikke som følge av denne oppdateringen. Elkem Carbon har i de senere årene hatt fokus på kildekontroll for å redusere utslippene. Det har medført at tilførsler til sjø av PAH med prosessvann i dag er i størrelsesorden 5-10 PAH₁₆ pr. år. Elkem Carbon er i prosess for å redusere PAH med overflatevann. Per i dag er estimerte utslipp av overflatevann i størrelsesorden 25 kg PAH₁₆ pr. år. Det arbeides med ytterligere tiltak for å redusere dette. Dette arbeidet er viktig for å minimalisere rekontaminering av et tildekkingslag og det anbefales at dette arbeidet prioriteres.

Fire emneord	Four keywords
1. Elkem Carbon, Kristiansand	1. Elkem Carbon, Kristiansand
2. Forurensete sedimenter	2. Contaminated sediments
3. PAH	3. PAH
4. Tiltaksplan	4. Remedial action plan

Denne rapporten er kvalitetssikret iht. NIVAs kvalitetssystem og godkjent av:

Kristoffer Næs
Hovedforfatter

Marianne Olsen
Forskningsleder

ISBN 978-82-577-7308-3
NIVA-rapport ISSN 1894-7948

© Norsk institutt for vannforskning. Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse.

**Oppdatert tiltaksplan for forurenset sjøbunn
utenfor Elkem Carbon, Kristiansand**

Forord

Denne rapporten er en oppdatering av opprinnelig tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon i Kristiansand (Olsen og medarb. 2018, NIVA-rapport 7276/2018) i henhold til Miljødirektoratets krav framsatt i Tillatelse til virksomhet etter forurensningsloven (Tillatelse nr. 2018.0141.T, endret 10.01.2020).

Rapporten bygger på opprinnelig tiltaksplan, som her er supplert med modellering og design av erosjonshindrende lag. Dette er gjort av NGI som underleverandør til NIVA med Gøril Aasen Slinde som hovedansvarlig. Det er også gjort innsamling og analyse av kornfordeling av overflatesediment i det aktuelle tiltaksområdet. Feltarbeidet ble gjennomført av Jarle Håvardstun og Sigurd Øxnevad. I rapporten er det også inkludert resultater for eksperimenter med tilsetning av aktivt kull og antrasitt med formål å redusere porevannskonsentrasjoner av PAH. Dette arbeidet er gjennomført av Ian Allen, Violette Raffard, Malcolm Reid og Kristoffer Næs. Rapporten inneholder et kapittel om kildekontroll ved Elkem Carbon. Dette er beskrevet av Bente Sundby Håland, Elkem Carbon. Prosjektleder har vært Marianne Olsen. Oppfølgingen av prosjektets aktiviteter og løpende kontakt med oppdragsgiver er ivaretatt av Kristoffer Næs som også har vært hovedforfatter for rapporten.

Kontaktpersoner hos Elkem har vært Bente Sundby Håland og Jens Christian Fjelldal.

Alle takkes for innsatsen!

Oslo, 29.01.2021

Marianne Olsen
(prosjektleder)

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon.....	8
1.1	Bakgrunn.....	8
1.2	Krav fra Miljødirektoratet.....	10
2	Hovedfunn og hovedkonklusjoner fra tiltaksplanen.....	12
2.1	Konsentrasjoner i sedimenter og porevann.....	12
2.2	Risikobildet.....	13
2.3	Avgrensning av tiltaksområdet.....	14
2.4	Rekontamineringsfare.....	14
2.5	Anbefalinger gitt i tiltaksplanen.....	17
3	Undersøkelser og utredninger gjennomført som grunnlag for oppdatert tiltaksplan.....	18
3.1	Effekt av tilsetning av aktivt karbon.....	18
3.2	Sedimenttekstur.....	19
3.3	Design av erosjonshindrende lag.....	21
3.3.1	Metode.....	21
3.3.2	Representative skipsanløp.....	22
3.3.3	Designforslag.....	24
4	Kildekontroll.....	26
4.1	Bakgrunn.....	26
4.2	Prosessvann.....	26
4.2.1	Normal drift.....	26
4.2.2	Episodiske hendelser.....	27
4.2.3	Avbøtende tiltak.....	27
4.3	Overflatevann.....	27
4.3.1	Normal drift.....	27
4.3.2	Episodiske hendelser.....	28
4.3.3	Avbøtende tiltak.....	29
5	Konklusjon og anbefalinger.....	30
6	Referanser.....	31

Vedlegg A. Testing of activated carbon and anthracite as remediation material for PAH contaminated sediment

Vedlegg B. Utforming av tildekkingslag for forurenset sjøbunn

Vedlegg C. Utslipp og kildekontroll ved Elkem Carbon

Sammendrag

Denne rapporten er en oppdatering av NIVA-rapport 7276-2018 «Tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand» (Olsen og medarb. 2018) i henhold til krav framsatt av Miljødirektoratet i Tillatelse til virksomhet etter forurensningsloven (Tillatelse nr. 2018.0141.T, endret 10.01.2020), punkt 13.4. Foreliggende rapport bygger på den opprinnelige tiltaksplanen, med oppdateringer for å svare på Miljødirektoratets kommentarer til tiltaksplanen av 13.11.2020, og kravene gitt i tillatelsens punkt 13.4. Gjennomførte aktiviteter inkluderer nye analyser for å beskrive tekturen av sedimentene i Elkembukta, effekt på porevannskonsentrasjon av PAH ved tilsetning av aktivt kull og antrasitt, opplysninger om utslippskontroll av PAH til sjø ved Elkem Carbon samt modellering for utforming av erosjonsbeskyttelse som del av tildekkingslag for de forurensete sedimentene i Elkembukta.

Elkem Carbon har utslipp av PAH fra både prosessvann og overflatevann, sistnevnte inkluderer også søl fra kai. Utslippene representerer både normal drift og eventuelle episodiske hendelser. Bedriften har i de senere årene hatt fokus på kildekontroll for å redusere utslippene. Det har medført at tilførsler til sjø av PAH med prosessvann er i dag i størrelsesorden 5-10 PAH₁₆ pr. år. Elkem Carbon er i prosess for å redusere PAH med overflatevann. Per i dag er estimerte utslipp i størrelsesorden 25 kg PAH₁₆ pr. år. Det arbeides med ytterligere tiltak for å redusere utslippene.

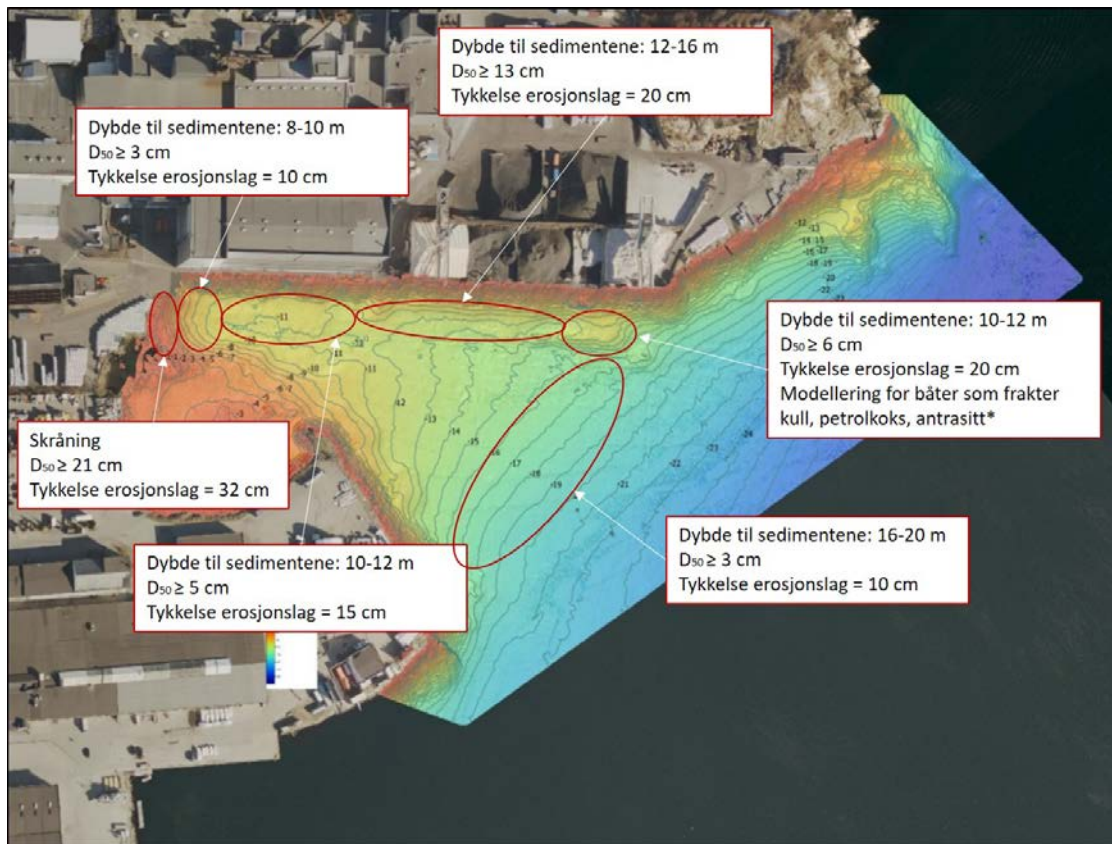
I den opprinnelige tiltaksplanen (Olsen og medarb. 2018) ble det understreket at kartlegging av aktive kilder for PAH med påfølgende utslippsbegrensede tiltak må gjennomføres før sedimenttiltak kan iverksettes. Elkembukta ned til 20-25 m vanddyb ble identifisert som Elkems primære tiltaksområde. Etter at utslippsreducerende tiltak er gjennomført og verifisert, ble det anbefalt å gjøre tildekking i Elkembukta med sikte på å hindre erosjon og spredning av forurenset sediment ut av bukta. Tildekkingen ble anbefalt å gjøres i kombinasjon med aktivt kull-behandling for å redusere porevannskonsentrasjonen av PAH i sedimentet og dermed redusere økologisk risiko. Effekten av aktivt kull på PAH måtte imidlertid avklares.

Fiskåbukta er påvirket til dels av utslipp fra Elkem Carbon, men også i stor grad av andre tilførsler og risikobildet skiller seg fra Elkembukta. Fiskåbukta har dyp som tilsier at det ikke foreligger noen påvirkning fra propellerrosjon og hvor spredningsrisikoen fra PAH er relativt liten (med unntak av antracen) og tilstanden for sedimentlevende dyr er god. I Fiskåbukta er det derfor anbefalt overvåket naturlig restitusjon for å følge effekten av utslippsreduksjoner på sedimentkonsentrasjoner og økologisk risiko knyttet til PAH, spesielt de to komponentene fluoranten og benzo(a)pyren. Utredningene i denne oppdateringen til tiltaksplanen endrer ikke konklusjonen for Fiskåbukta. Behov for spredningshindrende tiltak i områder påvirket av skipsanløp til Elkem Carbon er ivarettatt ved modellering av behov for erosjonsbeskyttelse i Elkembukta ned til 20 m.

De nye eksperimentene med tilsetning av aktivt kull og antrasitt til overflatesedimentene (øvre 10cm) viste ved begge tilsetninger en sterk reduksjon i konsentrasjonen av PAH i porevannet og mange PAHer kunne ikke detekteres i porevannet etter behandlingen.

Modellering av erosjonsbeskyttelse som del av tildekkingslag for sedimentene i Elkembukta, har tatt utgangspunkt i vanddyb, data for skip som trafikkerer kaiene (motoreffekt, propelldiameter og dypgang), samt bevegelsesmønster til og fra kai. Modelleringene har lagt til grunn ett lag for å hindre erosjon av selve tildekkingslaget under. Dette laget vil erfaringsmessig trenge en tykkelse på 30-50

cm (se også opprinnelig tiltaksplan: Olsen og medarb. 2018). En oppsummering av modelleringene og anbefalinger for design av et erosjonsbeskyttende lag er gitt i figuren under.



Det må gjennomføres en prosjekteringsfase før en tildekking starter som blant annet vurderer bæreevnen til de stedlige sedimentene. Basert på topografi og sonarmålinger, ser det ut til at det ikke forekommer bratte skråninger i det foreslåtte tiltaksområdet, eventuelt bortsett de som er forbundet med kaikonstruksjonene. Det antas dermed at utlegging av et tildekkingslag med erosjonsbeskyttelse vil være relativt uproblematisk i områdene med slak helning.

Summary

Title: Updated remediation action plan for contaminated sediments outside Elkem Carbon, Kristiansand.

Year: 2021

Author(s): Kristoffer Næs, Marianne Olsen, Ian Allen, Violette Raffard, Malcolm Reid, Gøril Aasen Slinde (NGI) og Bente Sundby-Håland (Elkem Carbon)

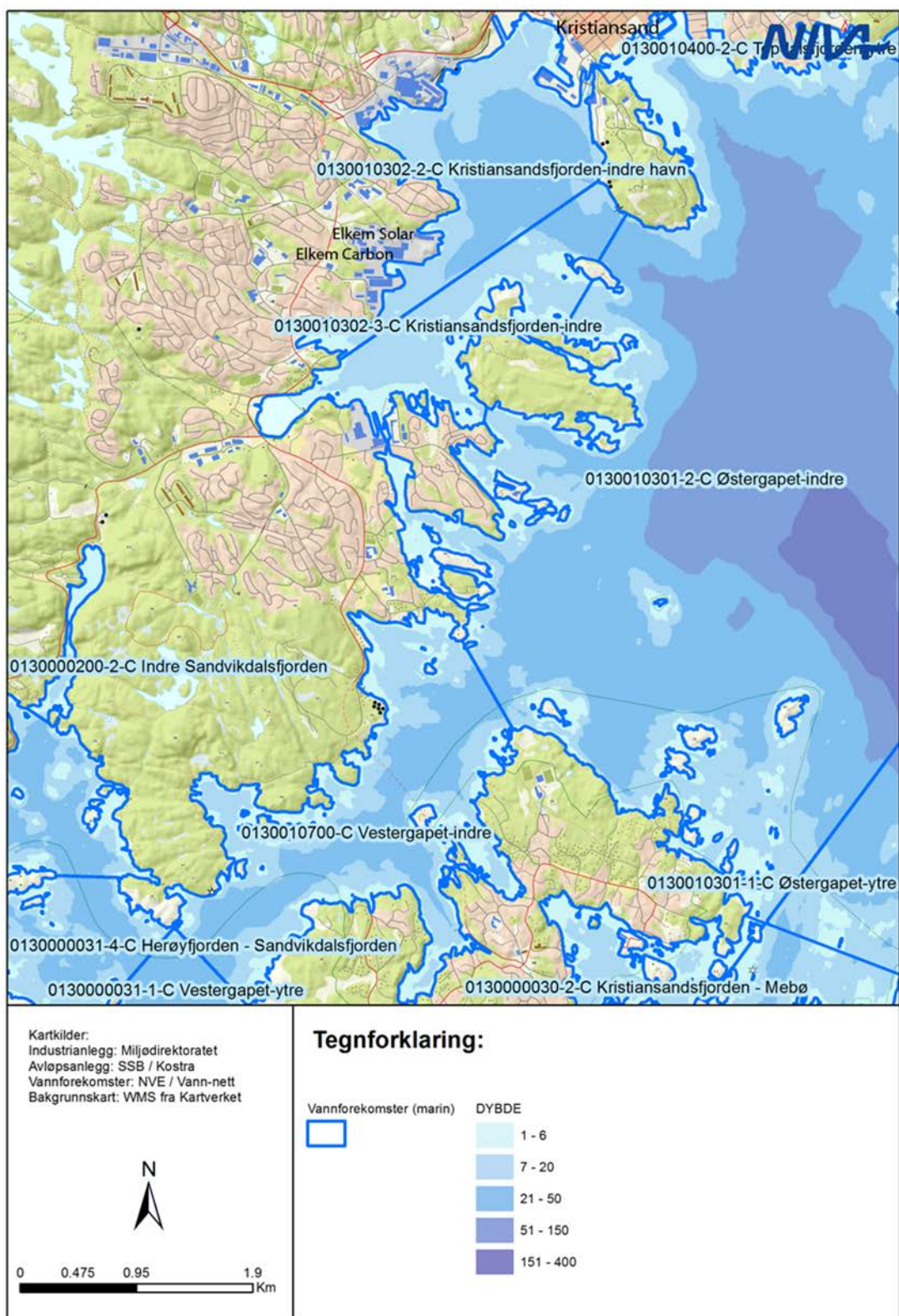
Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN 978-82-577-7308-3

This report is an update to NIVA report 7276-2018 "Tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand" (Olsen and medarb. 2018). Based on new analyses and modelling, the design of erosion protection has been presented as part of capping layers of the contaminated sediments in Elkembukta. The erosion protection will prevent resuspension from ship maneuvering. The capping layer and the erosion protection layer must be designed in accordance with applicable regulations and standards. In this context, geotechnical calculations should also be carried out to control stability and carrying capacity in the area. In Fiskåbukta, where the risk from PAH is relatively small and the condition of sediment-living animals is good, it is in the remediation action plan recommended monitored natural recovery to monitor the effect of emission reductions on sediment concentrations and ecological risk associated with PAH. The recommendation does not change as a result of this update. In recent years, Elkem Carbon has focused on source control to reduce emissions. This has meant that inflows to sea of PAH with process water today are in the range of 5-10 PAH₁₆ per year. Elkem Carbon is in the process of reducing PAH with surface water. As of today, estimated discharges of surface water are in the range of 25 kg of PAH₁₆ per year. Further measures are being taken to reduce this. This work is important for minimizing the recontamination of the capping layers and it is recommended that this work be given priority.

1 Introduksjon

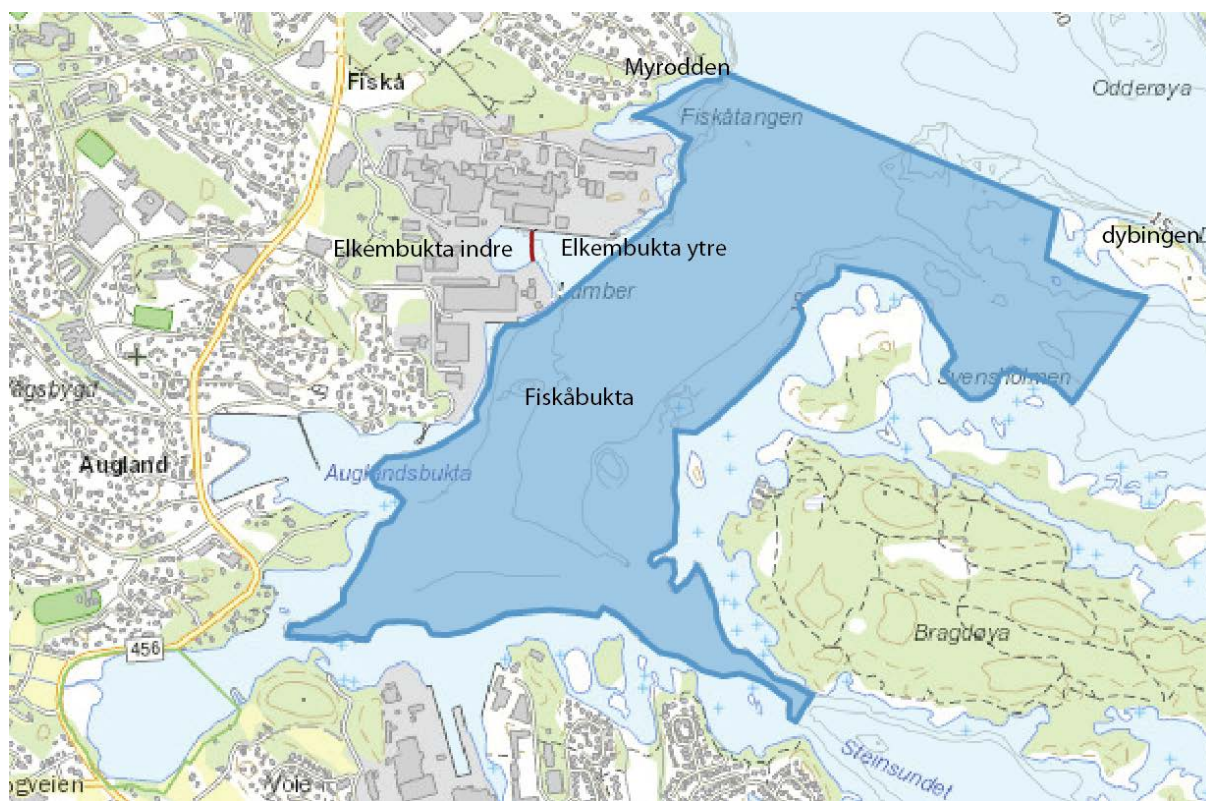
1.1 Bakgrunn

Elkembukta, Elkem Carbon sin primære resipient, er del av indre Kristiansandsfjord og spenner et areal på ca. 50 000m², Figur 1 og Figur 2. Området har vært overvåket siden 80-tallet og betydelig forurensning er påvist. For Elkem Carbon sin del gjelder dette utslipp av PAH. I de senere årene har bedriften gjennomført store utslippsreducerende tiltak. I dag er fokus på ytterligere utslippsreduksjoner og på tiltak mot de forurensede sedimentene.



Figur 1. Oversiktskart som viser vannforekomstene i Kristiansandsfjorden slik de er definert i Vann-nett, avgrenset av blå heltrukne linjer. Plasseringen til Elkem Carbon og søsterbedriften REC

Solar er vist i kartet. Resipient for direkte utslipp fra Elkem Carbon er vannforekomsten 'Kristiansandsfjorden-indre havn' (0130010302-2-C).



Figur 2. Avgrensning av Elkembukta (indre og ytre) og Fiskåbukta (mørk skravering angir 10 m kote).

Miljødirektoratet påla i brev datert 16.08.2017 Elkem Carbon å utarbeide en tiltaksplan for opprydding i forurenset sjøbunn utenfor bedriften i Kristiansand. Elkem Carbon engasjerte NIVA til dette. Gjennom undersøkelser og utredninger utformet NIVA en rapport av 28.05.2018 (Olsen og medarb. 2018) som svar på pålegget. Den 13.11.2019 kom Miljødirektoratet med tilbakemeldinger på tiltaksplanen og også varsel om pålegg om utredning av omlegging av utslippspunktet (Miljødirektoratet ref. 2019/332). Dette ble fulgt opp i Miljødirektoratets tillatelse til Elkem Carbon, hvor også krav om en oppdatering av tiltaksplanen og pålegg om å utrede omlegging av utslippspunkt inngikk (Tillatelse nr. 2018.0141.T, endret 10.01.2020).

Foreliggende rapport svarer på kravet om oppdatering av tiltaksplanen, jfr, tillatelsens punkt 13.4. Rapporten henviser til den opprinnelige tiltaksplanen, men for å forenkle lesbarheten har vi valgt å ta med korte utdrag av sentrale kapitler i den opprinnelige tiltaksplanen. Dette er gjort i kapittel 2. I kapittel 3 er undersøkelser og utredninger gjennomført som grunnlag for oppdatering av tiltaksplanen, beskrevet. Kapittel 4, som beskriver kildekontroll, er basert på informasjon fra Elkem Carbon.

1.2 Krav fra Miljødirektoratet

I kravet fra Miljødirektoratet til Elkem Carbon, gitt i tillatelsens punkt 13.4 (Tillatelse nr. 2018.0141.T, endret 10.01.2020), heter det:

Elkem Carbon skal svare på Miljødirektoratets kommentarer til tiltaksplan for opprydding i forurenset sjøbunn av 13.november 2019.

Elkem Carbon skal oppdatere tiltaksplanen med følgende opplysninger:

Spredning av forurensning

- *Tiltaksplanen må redegjøre mer i detalj for hvordan tiltaket skal motvirke spredning av forurensning, særlig fra skipsoppvirvling, i de berørte vannforekomstene.*
- *Dagens og fremtidig skipsoppvirvling (prognose) må ligge til grunn for tiltaksvurdering ved valg av robust og varig tiltaksløsning*

Kildekontroll

- *Hva er årsaken til denne økte registrerte forurensningen ved episodiske hendelser, og hvordan kan slike hendelser motvirkes med konkrete tiltak?*
- *I planen er søl fra kaiene forklart som årsak til noe av dagens tilførsel av PAH til sjø og sjøbunn. Hvor mye søl er det snakk om? Hvilke avbøtende tiltak av varig karakter kan iverksettes straks for å motvirke slik spredning av forurensning?*

Miljødirektoratets kommentar av 13.november 2019 er ikke gjengitt her i sin helhet, men om valg av tiltaksløsning er kommentaren som følger:

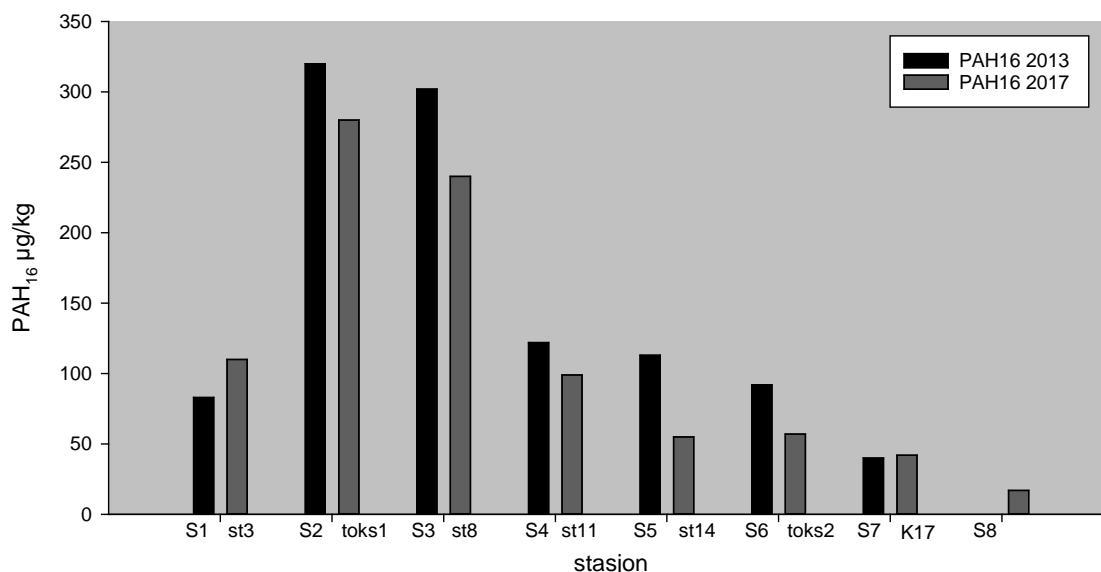
Miljødirektoratet mener at anbefalt tiltaksmetode ikke vil gi et tilstrekkelig godt og varig resultat. Det vil neppe hindre oppvirvling av forurenset sediment i det virksomheten definerer som tiltaksområde. Vår vurdering er begrunnet ut fra resultater som fremkommer ved bruk av risikovurderingsverktøyet for forurenset sediment. Risikovurderingen dokumenterer at årsaken til spredning av de tyngre PAH-forbindelsene i stor grad skyldes propelloppvirvling. Propelloppvirvling skjer gjerne i vannvolum fra 0-20 meters dybde i områder som trafikkeres av sjøgående fartøy. For å motvirke at propelloppvirvling av forurenset sediment skjer, er det nødvendig å gjennomføre robuste tiltak for å motvirke dette. Vi kan ikke se at konsulentens utredning tar høyde for dette. Varig tiltak for å motvirke spredning av forurensning fra sediment i Fiskåbukta må ytterligere utredes og dokumenteres før vi kan anse tiltaksplanen som endelig svar på pålegget.

Kommentarene fra Miljødirektoratet er sammenfallende med kravene gitt i tillatelsens punkt 13.4. Det siste punktet om ytterligere utredning av varige tiltak for å motvirke spredning av forurensning fra sediment i Fiskåbukta er imidlertid ikke gitt som et konkret krav i tillatelsens punkt 13.4.

2 Hovedfunn og hovedkonklusjoner fra tiltaksplanen

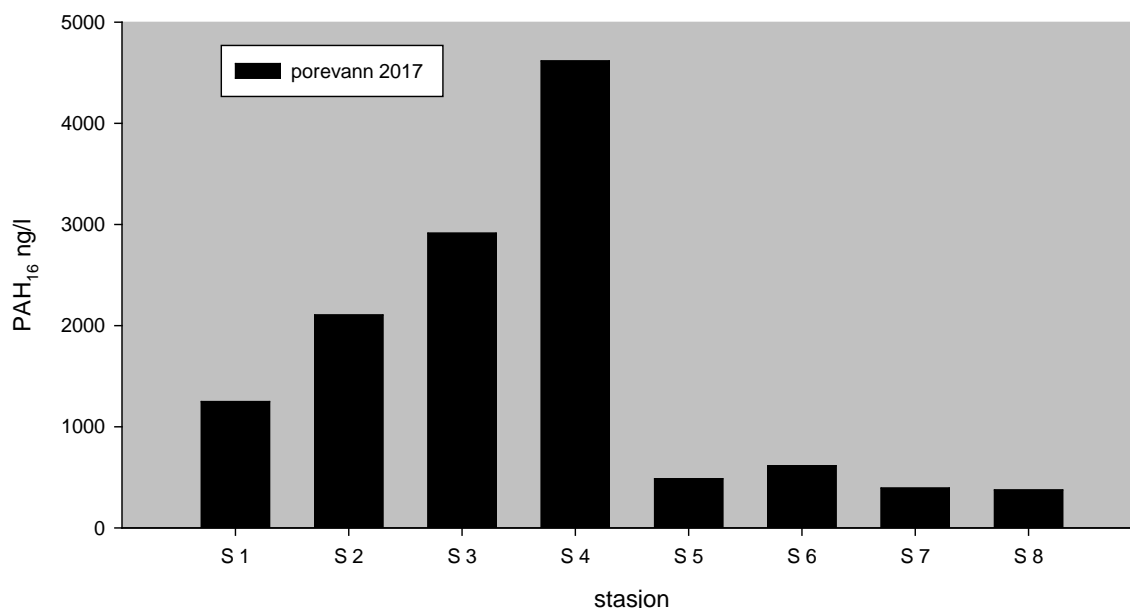
2.1 Konsentrasjoner i sedimenter og porevann

Sedimentprøvene fra Elkembukta hadde generelt høye konsentrasjoner av PAH-forbindelser. Nesten alle stasjonene var i tilstandsklasse V, «svært dårlig» for PAH-forbindelsene i henhold til Miljødirektoratets veileder M-608. De fleste sedimentprøvene hadde høye konsentrasjoner av kobber; disse var i klasse IV og klasse V. Det var også enkelte med stasjoner med høye konsentrasjoner av bly (klasse IV) samt mange med høye konsentrasjoner av nikkel (klasse IV), særlig i ytre del av Elkembukta mot Fiskåbukta. TBT var i hovedsak i klasse IV og klasse V. PAH₁₆ i sedimentprøver fra 2017 og tilnærmet sammenfallende stasjoner i 2013 er vist i Figur 3. Figuren kan indikere noe lavere konsentrasjoner i 2017 enn i 2013 bortsett fra innerst i Elkembukta (S1/st3) og i Fiskåbukta (S7/K17). Man skal imidlertid være forsiktig med denne sammenligningen idet 0-2 cm snittet ble analysert i 2013, mens 0-10 cm snittet ble analysert i 2017. Det kan dog bety at reduksjonen er reell.



Figur 3. Innholdet av PAH₁₆ i sedimentprøver fra Elkembukta i 2013 og 2017.

Løste konsentrasjoner i porevann er en essensiell parameter i risikosammenheng. Disse konsentrasjonene kan enten bestemmes fra de partikulære sedimentkonsentrasjonene via en generisk fordelingskoeffisient (Trinn 2 i Risikoveilederen) eller, slik det ble gjort for Elkembukta, via direkte kvantifisering av den stedsspesifikke verdien basert på målinger (Trinn 3 i Risikoveilederen), Figur 4. Figuren viser en betydelig nedgang i konsentrasjoner fra stasjon 4 til stasjon 5. Dette tilsvarer overgangen fra Elkembukta til Fiskåbukta ved ca 20-meters dybdekote.



Figur 4. Innholdet av PAH₁₆ i porevannsprøvene fra Elkembukta i 2017.

2.2 Risikobildet

I Elkembukta var det overskridelser i forhold til Trinn 1 grenseverdier for samtlige PAH-forbindelser, metallene kobber, nikkel og sink, i tillegg til PCB₇ og TBT. Beregnet spredning fra sedimentene oversteg også «grenseverdien» for trinn 1 for de samme forbindelsene, med unntak av PCB hvor det ikke er oppgitt grenseverdi. Totalspredningen av PAH₁₆ fra sedimentene ble beregnet til 1,27 kg/år. I 2014 ble utlekkingen estimert til 3,3 kg/år. Spredningen av Cu og Ni ble beregnet til å utgjøre hhv 1,6 og 5 kg/år og spredning av TBT ble beregnet til 0,8 kg/år. Spredningen av TBT er ca. tre ganger høyere enn beregningene i 2014.

Faren for effekter på økosystemet vurderes ut fra overskridelser av PNEC-verdier. For bunnlevende organismer er det i Elkembukta overskridelser for metallene As, Cu og Ni og seks PAH-forbindelser. Størst overskridelse er det for TBT. For vannlevende organismer er det overskridelser for to PAH-forbindelser i tillegg til TBT.

Grenseverdiene for human risiko ble overskredet for PCB₇ og TBT, og i noe mindre grad nikkel. Denne risikoen skyldes hovedsakelig transport i næringskjeden fra bunndyr til lokal sjømat. Beregningen av risiko for skade på human helse forutsetter i praksis at næringskjedetransporten skjer innenfor risikoområdet som innebærer at sjømaten tar all sin næring i området. For stedbundne organismer som f. eks blåskjell vil risikoen være reell, men for fisk som er mobil vil risikoen sannsynligvis være overestimert ettersom fisken vil kunne vandre og beite på andre områder også.

Risikovurderingen som ble gjennomført i forbindelse med utarbeidelse av tiltaksplanen viser at risiko for spredning i Fiskåbukta generelt er lav og betydelig lavere enn i Elkembukta. Det er imidlertid også her PAH-forbindelsene antracen og pyren som har størst overskridelse. For metallene er det større overskridelser i Fiskåbukta enn i Elkembukta og det er overskridelser for metallene arsen kobber og nikkel. Det er også overskridelser for TBT i begge områdene, med størst overskridelse i Fiskåbukta.

Det tilføyes her at det i beregningsverktøyet generelt er lagt til grunn at det ikke er fare for spredning som følge av propelloppvirvling på dyp større enn 20 m. Fiskåbukta er i hovedsak dypere enn dette. Likevel viser beregningene av spredning basert på regneverktøyet for Trinn 2 Risiko for spredning at skipsoppvirvling for enkelte metaller og PAHer gir et vesentlig relativt bidrag til spredningsrisikoen i Fiskåbukta (se Tabell 25 og Figur 19 i tiltaksplanen i Olsen og medarb. 2018). Dette risikobidraget vil da nødvendigvis være knyttet til områder grunnere enn 20 m.

2.3 Avgrensing av tiltaksområdet

I den opprinnelige tiltaksplanen ble området topografi, tilførsler, konsentrasjoner i sediment, porevann og biota, sedimentasjon, sedimentenes egenskaper, tilstanden for bløtbunnsfauna og risikobildet i Elkembukta og Fiskåbukta belyst og diskutert. Resultatene viser at det er en vesentlig endring i miljøforholdene i sedimentene innenfor og utenfor 20-25 meters dyp i Elkembukta. I Fiskåbukta er risikoen for human helse og økologiske effekter fra PAH relativt lav selv om det foreligger en spredningsrisiko, og den økologiske tilstanden representert ved bløtbunnsfaunaen er god. På grunnlag av dette forelås Elkembukta som Elkems primære tiltaksområde, avgrenset av 20-25 m dybdekote. Ved tiltaksgjennomføring er det relevant å vurdere inndeling i mindre delområder innenfor Elkembukta på bakgrunn av dyp og sedimentegenskaper.

Fiskåbukta er påvirket av utslipp fra Elkem Carbon, men er også resipient for flere andre virksomheter og er utsatt for et større mangfold av påvirkninger fra flere ulike kilder. Dette sammen med annen tilstand og et annet risikobilde enn i Elkembukta gjør det relevant å betrakte Fiskåbukta som et eget tiltaksområde.

Det presiseres her at avgrensningen av Elkembukta mot Fiskåbukta ved 20-25 m dybdekote innebærer at påvirkning på sedimentet av skipsanløp til og fra Elkem Carbon, og tilhørende risiko for spredning som følge av propell-erosjon, ivaretas innenfor Elkembukta som tiltaksområde.

2.4 Rekontamineringsfare

Kildekontroll og rekontamineringsfare er en sentral problemstilling ved sedimenttiltak. Dette gjelder både de ordinære utslippene knyttet til produksjonen, men også påvirkning fra episodiske hendelser og avrenning fra tette flater (se kapittel 4 for ytterligere beskrivelser). I tiltaksplanen ble det gjort modelleringer av hva som måtte til av utslippsreduksjoner for å oppnå varige gode miljøforhold. Det kan synes vanskelig å redusere kildene til PAH-forurensingen i tiltaksområdet tilstrekkelig til å oppnå målet om varig tilstand klasse III eller bedre i sedimentene, uavhengig av tiltaksløsning. Ifølge risikoveilederen er imidlertid økologisk risiko knyttet til konsentrasjonene i porevannet, og den såkalte Predicted No Effect Concentration (PNEC) er fastsatt for å beskytte økosystemet. Dersom det antas proporsjonalitet mellom utslippsmengder og konsentrasjonene i porevannet (C_{pw}) kan det enkelt beregnes hvor mye de fremtidige utslippene (U) må endres i forhold til dagens nivå (U_0) for å oppnå konsentrasjoner i porevannet tilsvarende PNEC for vann ($PNEC_w$), dvs EQS for kystvann (TA2803/2011), uttrykt som en *Utslippsreduksjonsfaktor* eller *Endringsfaktor* (f):

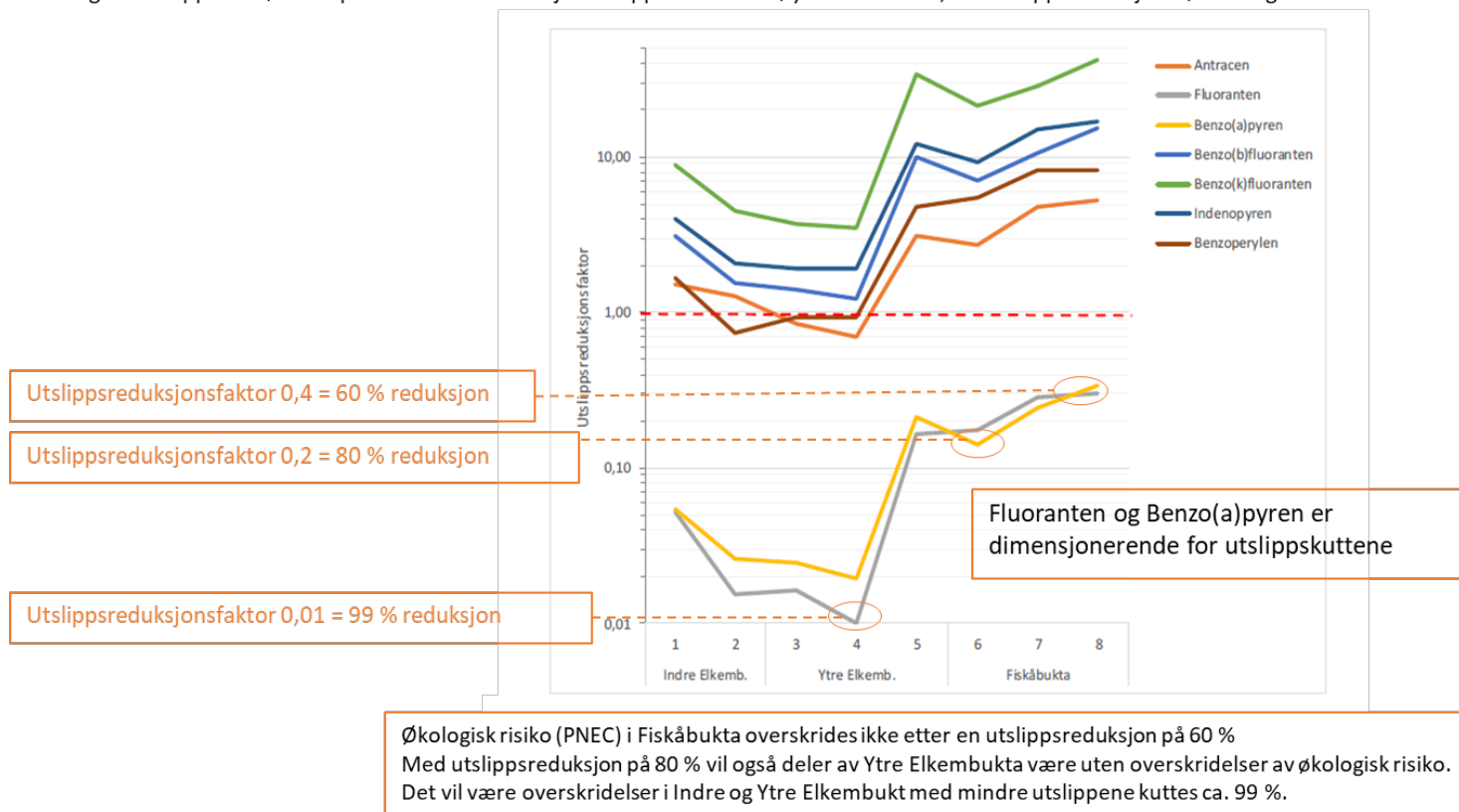
$$\text{Ligning 1: } U = U_0 * f$$

der *Utslippsreduksjonsfaktoren* f er:

$$\text{Ligning 2: } f = PNEC_w / C_{pw}$$

Hvis $f > 1$, gir dagens utslipp en porevannskonsentrasjon på et akseptabelt nivå og medfører ingen økologisk risiko i porevannet siden konsentrasjonene er lavere enn $PNEC_w$. Hvis $f < 1$, må utslippene reduseres for å oppnå en konsentrasjon i porevannet $\leq PNEC_w$. Resultatene for beregnede utslippsfaktorer for et utvalg av PAH-forbindelser er vist i Figur 5.

- 1: dagens utslipp medfører porevannskonsentrasjon=PNEC for vann
 >1: dagens utslipp medfører at porevannskonsentrasjonen er lavere enn PNEC, dvs utslippet kan være høyere uten at PNEC overskrides
 <1: dagens utslipp medfører at porevannskonsentrasjonen opprettholdes høyere enn PNEC, dvs utslippsreduksjon nødvendig



Figur 5. Faktor som angir hva dagens utslipp må endres med for at porevannskonsentrasjoner av utvalgte PAH-forbindelser i porevannet skal tilfredsstille PNEC-verdier for vann, dvs. grenseverdi for økologisk risiko. Hvis kurvene ligger under faktor 1 (stiplet rød linje), må porevannskonsentrasjonene og dermed dagens utslippsnivå reduseres for å tilfredsstille EQS-krav. Er faktoren større enn 1, tilfredsstiller konsentrasjonen i porevannet i dag grenseverdien.

2.5 Anbefalinger gitt i tiltaksplanen

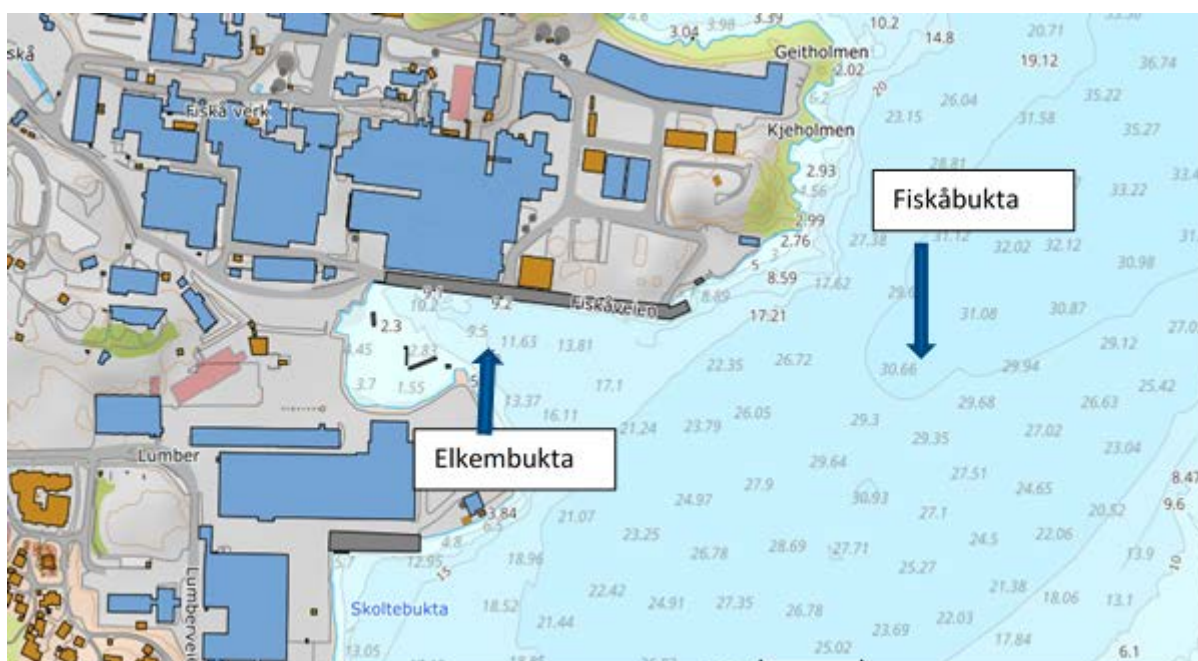
Basert på vurderingen gjort i arbeidet med tiltaksplanen, ble følgende anbefalinger gitt i rapport 7276/2018: Gjennomføring av sedimenttiltak forutsetter at aktive kilder er under kontroll. Tiltak rettet mot forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon forutsetter kontroll på kilder og utslippsreduksjon er derfor det primære tiltaket for Elkem Carbon. Etter at utslippsreducerende tiltak er gjennomført og verifisert, anbefales det å gjøre tildekking i Elkembukta med sikte på å hindre erosjon og spredning av forurenset sediment ut av bukta. Det anbefales å gjøre tildekkingen i kombinasjon med aktivt kull-behandling for å redusere porevannskonsentrasjonen av PAH i sedimentet og dermed redusere økologisk risiko.

I Fiskåbukta, hvor risikoen fra PAH er relativt liten og tilstanden for sedimentlevende dyr god, anbefales det overvåket naturlig restitusjon for å følge effekten av utslippsreduksjoner på sedimentkonsentrasjoner og økologisk risiko knyttet til PAH, spesielt de to komponentene fluoranten og benzo(a)pyren.

3 Undersøkelser og utredninger gjennomført som grunnlag for oppdatert tiltaksplan

3.1 Effekt av tilsetning av aktivt karbon

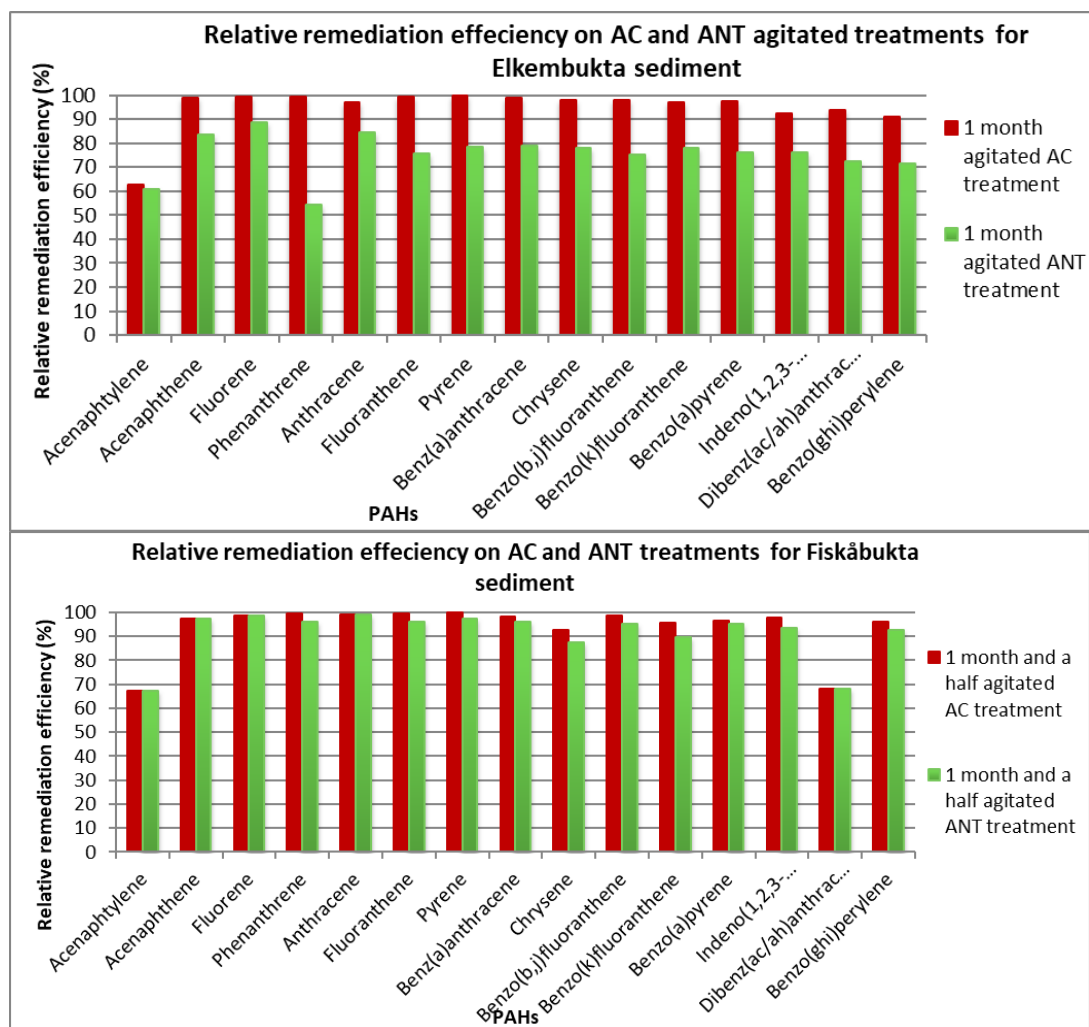
I den opprinnelige tiltaksplanen ble det anbefalt tildekking i kombinasjon med tilsetning av aktivt kull. Det ble imidlertid påpekt at effekten av aktivt kull på porevannskonsentrasjoner av PAH i de aktuelle sedimentene burde testes. Dette er gjort ved å samle inn overflatesedimenter fra to lokaliteter, en i Elkembukta og en i Fiskåbukta, se Figur 6 og Vedlegg A. Sedimentene ble tilsatt aktivt kull og også kalsinert antrasitt fra Elkem Carbon og ristet i 4-6 uker ved romtemperatur. Konsentrasjoner av PAH i porevannet før og etter behandling ble målt ved hjelp av SPME-fibre (solid phase microextraction).



Figur 6. Lokaliteter for innsamling av sedimenter for testing av tilsetning av aktivt kull og antrasitt.

Tilsetningen av både aktivt kull og antrasitt medførte en sterk reduksjon i konsentrasjonen av PAH i porevannet og mange PAHer kunne ikke detekteres i porevannet etter behandlingen. Størst reduksjon i porevanns-PAH ble, som forventet, observert i sedimentene som ble tilsatt aktivt kull (Figur 7). Effektiviteten av behandlingen kan beregnes etter:

$$\%Eff = (C_{fibre}(\text{control}) - C_{fibre}(\text{treatment})) / C_{fibre}(\text{control}) * 100$$

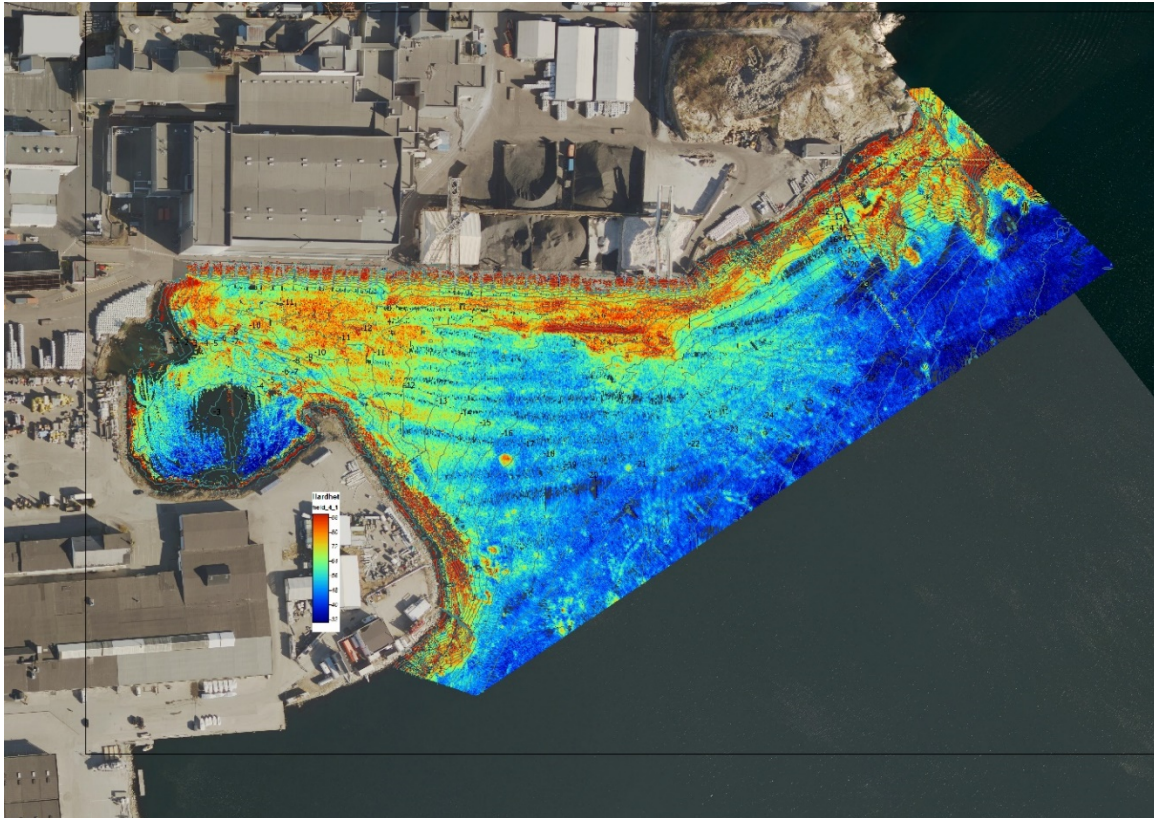


Figur 7. Effekt på konsentrasjon av PAH i porevann ved tilsetning av aktivert karbon (AC) og antrasitt (ANT) til sedimenter fra Elkembukta og Fiskåbukta etter 1 og 1,5 måneders behandling i romtemperatur.

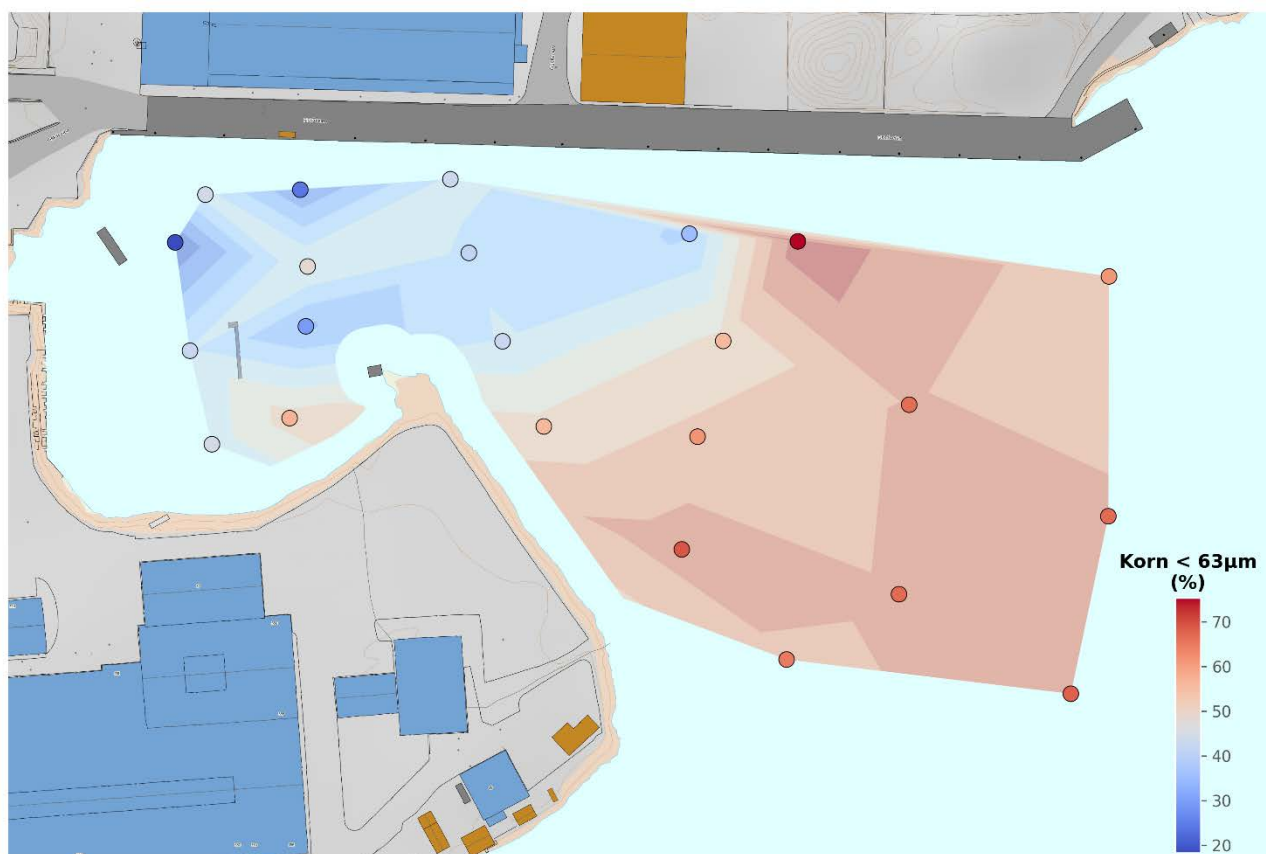
Resultatene viser at aktivt kull er svært effektivt i å redusere porevannskonsentrasjonene av PAH i sedimenter både fra Elkembukta og fra Fiskåbukta.

3.2 Sedimenttekstur

I den opprinnelige tiltaksplanen ble det gjennomført en side-scan sonar-undersøkelse av bunnforholdene, Figur 8. I den reviderte tiltaksplanen er det i tillegg gjort kornfordelingsanalyser av sedimentene, Figur 9. De to undersøkelsene er rimelig overensstemmende. Kornfordelingsanalysene viser at det er en betydelig andel finstoff i sedimentene, bortsett eventuelt fra de helt kai-nære områdene hvor vi ikke har prøver fra. Det viser at det ikke er en erosjon av sedimentene i hele Elkembukta.



Figur 8. Side-scan sonar-bilde av sedimentene i Elkembukta: Hardhet (%) av sedimentene i Elkembukta. Mørk rød angir harde sedimenter hvor 100 % representerer grus. Blå farge angir løse sedimenter, jo mørkere blå, jo løsere sedimenter.



Figur 9. Kornfordeling % D_{63} i sedimentene i Elkembukta. Merk at fargene er motsatt fra figur 8.

3.3 Design av erosjonshindrende lag

Norges Geotekniske Institutt (NGI) ble engasjert av NIVA til å gjøre modelleringer for å designe et lag som skal hindre erosjon fra skipspropeller av selve tildekkingslaget. NGIs rapport er i helhet gitt i Vedlegg B. Tekst fra denne rapporten er hentet til de tre delkapitlene under.

3.3.1 Metode

Erosjonen fra propeller blir vurdert ut ifra økt strømningshastighet over sjøbunnen som følge av manøvrering til og fra kai med de aktuelle fartøytypene. Overslagsberegningene av strøm langs sjøbunnen generert av propellstrøm, er utført med en modell utviklet av NGI (2002). Det blir gjort beregninger ut fra motoreffekten som legges inn i modellen.

Videre blir den økte vannhastigheten ved sjøbunnen generert av propellen benyttet for å si noe om hvilken kornstørrelse som kan motstå erosjon ved den aktuelle vannhastigheten. I modellen som NGI har utviklet benyttes kjente metodikker for erosjon som utgangspunkt for å finne erosjonsbestandig kornstørrelse. Resultatet av beregningen oppgis parameteren D_{50} som angir den steinstørrelsen i det mineralske materialet som 50 % av prøven er mindre enn, regnet etter vekt.

Videre benyttes D_{50} for å regne ut anbefalt tykkelse av laget for erosjonssikring. Faktoren som legges inn er for at sikre at erosjonslaget blir tykkere enn diameteren til materialet som legges ut. Ved strømhastigheter under 2 m/s beregnes tykkelse av erosjonslag som:

Tykkelse erosjonslag = $d_{50} \cdot 3$

For beregnede strømhastigheter over 2 m/s beregnes tykkelse av erosjonslag som:

Tykkelse erosjonslag = $d_{50} \cdot 1,5$

Forskjellen på utregningen av tykkelsen kommer av at de finere massene må legges ut i et tykkere lag relatert til kornstørrelsen enn det vil være behov for med de grove massene. Det er fordi det vil være større relativ usikkerhet i utleggingen av tynnere lag, og at en derfor trenger et noe tykkere lag for å være sikker på at laget blir erosjonsbestandig. Med tanke på utleggingstekniske forhold er det også behov for en noe større sikkerhetsfaktor når det legges ut tynne lag.

Tykkelsen av det endelig beregnede erosjonsslaget blir rundet opp til nærmeste 5 cm.

For å kjøre modelleringene må en ha en del inngangsparametere:

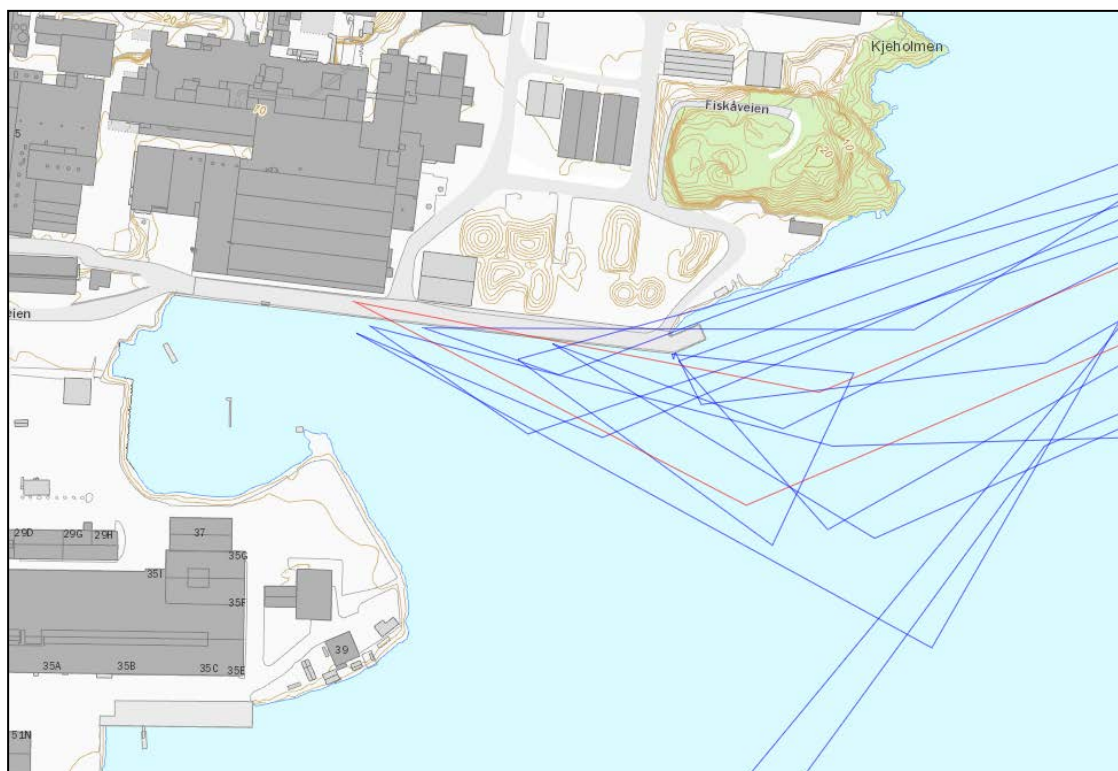
- ↗ Bevegelsesmønster for fartøy som manøvrerer i området
- ↗ Vanddyp i tiltaksområdet
- ↗ Propelldiameter for fartøy som manøvrerer i området
- ↗ Fartøyenes motoreffekt (i kW), og hvilken effekt som benyttet ved manøvrering til og fra kai

Resultatet av modelleringen vil være kornstørrelse og tykkelse som er anbefalt for erosjonsbeskyttelseslaget for å motstå oppvirvling med beskrevet skipstrafikk. Inngangsparameterne til modellen oppsummeres i følgende kapitler.

3.3.2 Representative skipsanløp

Som omtalt over, er fartøyspesifikke data inngangsparameterne i modelleringen. Som grunnlag for beregningene, har Elkem gitt en liste over alle anløp i 2019. Dette er et representativt år og båtenes bevegelsesmønstre samt hvor de fortøyer ved kai, er gitt i tekst under og i Figur 10. Likeledes har Elkem gjort en vurdering om eventuelle planlagte endringer i dette fram i tid. Elkem konkluderer at de båter som er valgt og deres bevegelsesmønster, også er representative for situasjonen i overskuelig fremtid.

Som utgangspunkt for å si noe om bevegelsesmønster for fartøy innenfor tiltaksområdet, er det hentet ut åpne AIS-data (AIS = automatic identification system) fra Kystverket. Dataen som kan hentes ut stammer fra anløp til kaia utenfor Elkem Carbon i løpet av mai 2019. Det antas at bevegelsesmønsteret for fartøyene er representativt for anløpene til og fra kai i området, både nå og i framtiden.

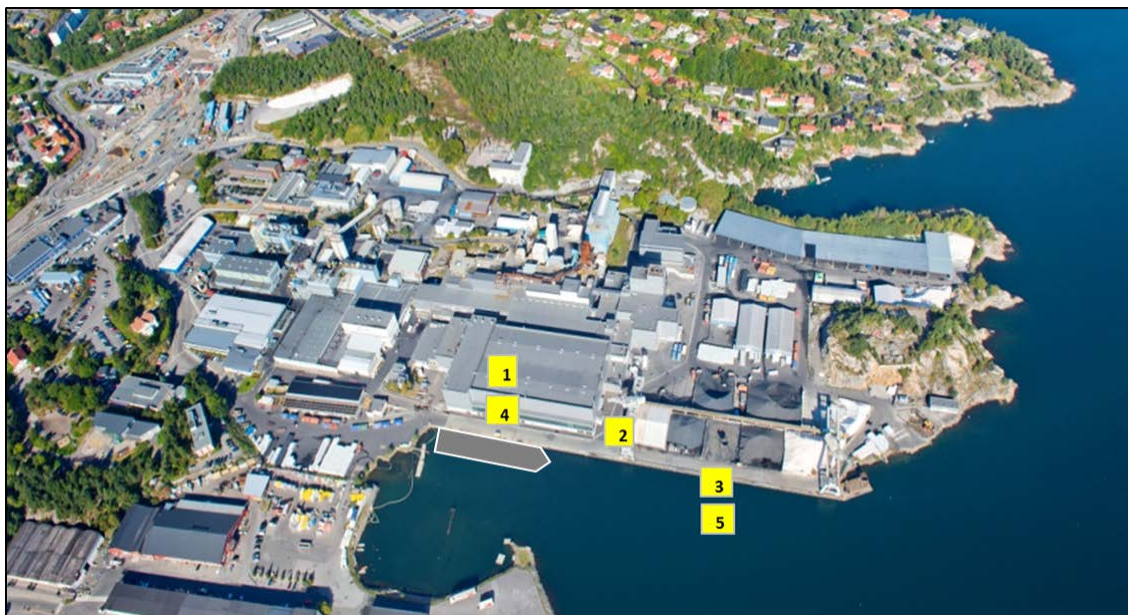


Figur 10. AIS-data for stykkgodstrafikk (blå linjer) og båter med bindemiddel (rød linje) for manøvrering til og fra kai ved Elkem Carbon. Dataen er fra mai 2019 (hentet fra: <https://kart.kystverket.no//share/9220e0e277e4>, hentet dato: 2020-08-07).

Ut ifra hvilket råstoff eller produkt som skipene ankommer med, vil posisjonen som skipene legger til ved kaien variere:

1. Elektrodemasse Kystruta – bakker til kai pga. tilgang via luke på båten. Denne ruta utføres av Karmsund som er 90 m lang
2. Elektrodemasse til Finnfjord – kjører med baugen inn mot bukta. Denne ruta utføres av Kristian With som er 90 m lang
3. Antrasitt, petrolkoks, kull – båtene kjører med baugen inn mot bukta. Det er mange ulike fartøyer som utfører denne ruta og de er typiske 90-120 m lange
4. Bindemiddel – båtene kjører stort sett med baugen inn mot bukta. Det er flere ulike fartøyer som utfører denne ruta og de er typisk 80-100 m lange. NGI har fått opplyst av fartøyet Lindo bakker til kai, og det utføres egen modellering for dette skipet
5. Kvarts – båtene bakker til kai og er typisk 120 - 150 m lange

Kaia utenfor Elkem Carbon er nesten 280 m lang. Anløpsmønsteret til de ulike båtene viser at hele lengden av kaien er i bruk, og at en må ta med dette i beregningen når en ser hvilke dybder en vil forvente å være påvirket av skipsoppvirvling, Figur 11.



Figur 11. Oversiktsbilde av kaiområdet (ortofoto). Tall angir posisjon av senter av skip innenfor kategorier som anløper jevnlig (se liste over). Omriss av skip er vist for skalering av et omtrentlig skip som bakker inn i posisjon 1.

Det modelleres med at skipene benytter 40 % av motoreffekten sin ved manøvrering til og fra kai. Dette er basert på erfaringer fra de som utfører manøvrering i området (eposter fra Ulvan Rederi, videresendt fra Elkem Carbon), og vil være representativt for en dag der det ikke er utfordrende værforhold.

3.3.3 Designforslag

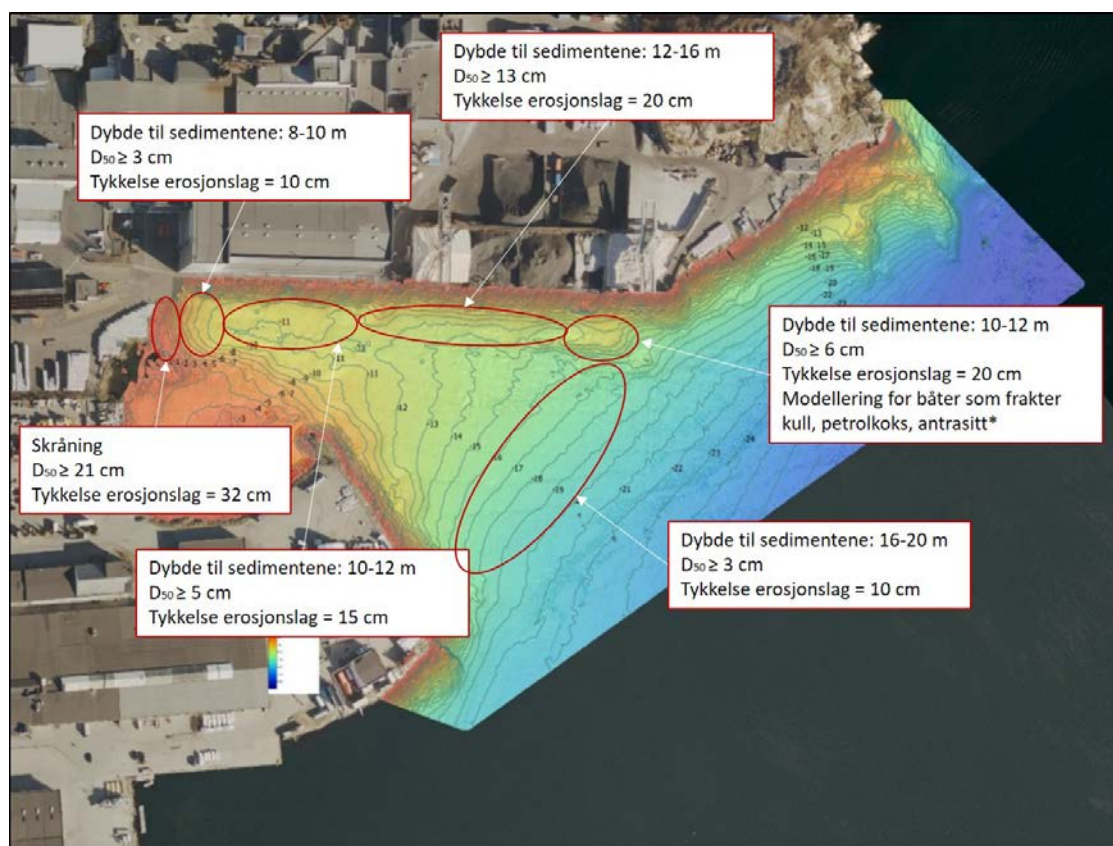
Med utgangspunkt i forutsetningene som er beskrevet tidligere, er en oppsummering av modelleringene gitt i Tabell 1 og Figur 12 under. Avvik for forutsetningene ved at det kommer inn skip som anvender større motorkraft eller har større dypgang, kan dette skade erosjonslaget.

Tabell 1. Oppsummering av resultater for modellering for 40 % motoreffekt.

Dybde til sedimentene	$D_{50} \geq$ (cm)	Tykkelse erosjonslag (cm)	Dimensjonerende skip eller varegruppe
8 – 10 m	3	10	Bindemiddel
Skråning	21	32	Elektrodemasse
10 – 12 m	5	15	Bindemiddel
10 – 12 m, øst	6	20	Kull, petrolkoks, antrasitt*
12 – 16 m	13	20	Kvarts
> 16 m	3	10	Kvarts

* Kvartsbåter vil også kunne trafikkere i dette området, men om disse skal være dimensjonerende må det vurderes andre former for erosjonsbeskyttelse enn mineralske masser.

Resultatene oppsummeres også grafisk i figuren under. Merk at det også her er merknad at modelleringen som er utført for det østlige området med sedimentdyp på 10-12 m ikke er gjeldende for kvartsbåter.



Figur 12. Grafisk oppsummering av resultatene fra modelleringen. * Kvartsbåter vil også kunne trafikkere i dette området, men om disse skal være dimensjonerende må det vurderes andre former for erosjonsbeskyttelse enn mineralske masser.

Modelleringene i kapitlene over gjelder et lag for å hindre erosjon av selve tildekkingslaget under. Dette laget vil erfaringsmessig trenge en tykkelse på 30-50 cm (se også opprinnelig tiltaksplan: Olsen og medarb. 2018). Det må gjennomføres en prosjekteringsfase før en tildekking starter som blant annet vurderer bæreevnen til de stedlige sedimentene. Basert på topografi og sonarmålinger, ser det ut til at det ikke forekommer bratte skrånninger i det foreslåtte tiltaksområdet, eventuelt bortsett de som er forbundet med kaikonstruksjonene. Det antas dermed at utlegging av et tildekkingslag med erosjonsbeskyttelse vil være relativt uproblematisk i områdene med slak helning.

4 Kildekontroll

4.1 Bakgrunn

Følgende tekst er forfattet av Elkem Carbon ved Bente Sundby Håland.

I pålegget fra Miljødirektoratet om kildekontroll etterspørres det informasjon om episodiske hendelser og søl fra kaier og tiltak for å motvirke dette. Vi definerer episodiske hendelser som avvik fra det generelle utslippsbildet fra prosessvann, overflatevann og fra håndtering av råvarer og produkter ved kaiene.

Prosessene ved Elkem Carbon består av elektrokalsinering (varmebehandling) av antrasitt og petrolkoks, transport av kalsinert materiale, sikte- og knuseprosesser og blande prosess for elektrodemasser og kaldstampemasser. Bindemiddelet for elektrodemassen er kultjærebeak som inneholder PAH-stoffer. Kilder til PAH-utslipp fra Elkem Carbon kommer fra prosessvannet og også via overflatevann. Figur 13 gir en oversikt over utslippspunktene.



Figur 13. Oversikt over utslippspunkter ved Elkem Carbon. Rene tall angir overflatevann (OVP), mens prosessvann er angitt PVP1. Fiskåbekken er markert med FB.

4.2 Prosessvann

4.2.1 Normal drift

Fra 2005 har utslipp av PAH via prosessvannet vært regulert av Miljødirektoratet gjennom Elkem Carbons tillatelse til virksomhet etter forurensningsloven. I perioden 2006-2008 gjennomførte

bedriften mange tiltak (Sørlandskonsult, 2008) for å redusere PAH-utslippene til vann. Dette medførte blant annet at PAH-utslipp med prosessvann ble redusert fra 185 kg/år til 5-10 kg/år som er dagens utslippsnivå. Dette tilsvarer en reduksjon på over 90 prosent for PAH-utslipp via prosessvannet.

Etter arbeidet med tiltaksplanen for forurenset sjøbunn (Olsen og medarb. 2018) ble det satt et mål om at Elkem Carbon skal redusere utslipp av PAH til sjø med minst 80% med hensyn på benzo(a)pyren for å nå miljømål for fjorden. Det ble laget en tiltaksplan for alle utslippspunkter, både prosessvann og overflatevannspunkter.

4.2.2 Episodiske hendelser

Avvik fra generell drift og utslipp med prosessvann vil potensielt være overfylling av settletank (slamutskiller) for rensing av prosessvannet (designet for 17 m³/t). Dette kan skje ved bruk av for store mengder kjølevann.

4.2.3 Avbøtende tiltak

De viktigste avbøtende tiltakene er kontroll på vannmengden som brukes. Vannet som brukes til kjøling av briketter resirkuleres og kjøles gjennom en varmeveksler. Vannforbruket i produksjonshallen og vannutslipp via settletank logges kontinuerlig. Dersom vannmengden har vært større enn intern grense (som er 75% av kapasitet på settletanken) blir dette avviksbehandlet. Det er også lagt inn fysiske begrensinger på hvor mye vann som kan brukes. De siste årene har det ikke vært noen overskridelser av kapasiteten for settletanken.

Søl fra aktiviteter med elektrodemasse har resultert i mindre utslipp av PAH fra produksjonshallen. For å redusere dette kjøres det nå hyppigere rengjøring av gulvflater i produksjonshall og i nærliggende område utenfor hvor søl kan oppstå. Vann fra denne rengjøringen ledes til prosessvannet og rensing i settletank. Regnvann i et område som tidligere gikk ut via overflatevannet er også rutet via prosessvannet.

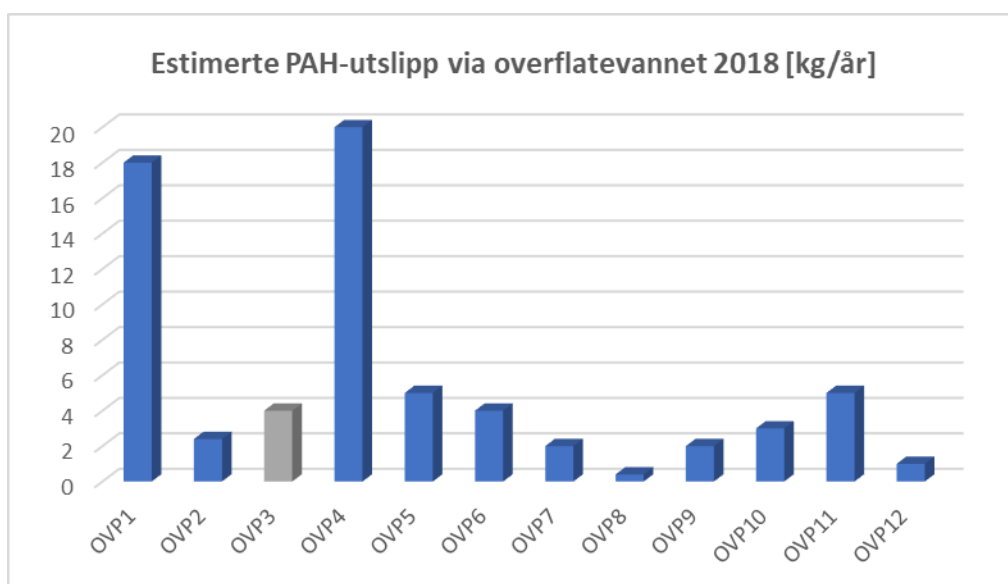
4.3 Overflatevann

4.3.1 Normal drift

Utslipp av PAH via overflatevannet ble regulert av Miljødirektoratet i 2018 knyttet til revidert tillatelse til virksomhet etter forurensningsloven. Elkem Carbon gjennomførte en kartlegging av diffuse kilder for overflatevann i mars–september 2018 (Cowi, 2018). Hele bedriftsområdet ble gjennomgått og det ble kartlagt hvilke aktiviteter som kunne føre til PAH-utslipp til vann. Kartleggingen avdekket at det var fare for PAH-utslipp ved områder der det lagres ferdigvarer, ved trafikkområder, ved lossestasjon for bindemiddel og ved vaskeplass for kjøretøy. Med utgangspunkt i kartleggingen ble representative arealer beregnet og stikkprøver av overflatevannet analysert for å estimere PAH-tilførsler fra hvert delområde, Figur 14, Figur 15 og Vedlegg C



Figur 14. Oversikt over utslippspunkter som ble kartlagt i 2018 og som kan medføre PAH-utslipp til vann. Rene tall angir overflatevann (OVP), mens prosessvann er angitt PVP1. Fiskåbekken er markert med FB.



Figur 15. Estimerte utslipp av PAH via delområder for overvann i 2018.

4.3.2 Episodiske hendelser

Episodiske hendelser knyttet overflatevann vil i hovedsak være søl av elektrodemasse som knuses ned f. eks ved kjøretøy og at partikler går til sjø ved nedbør. Det har også tidligere vært hendelser hvor feiebil har samlet opp søl av elektrodemasse og tømt på feil plass.

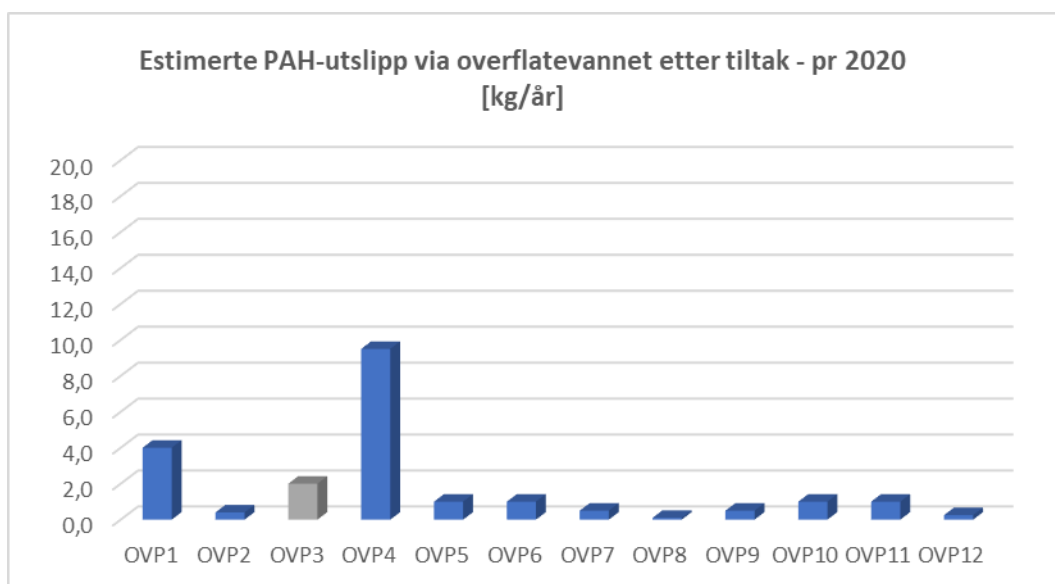
Lossing av bindemiddel eller hull på emballasje i forbindelse med håndtering av ferdigvarer kan medføre søl fra kaiene.

4.3.3 Avbøtende tiltak

Elkem Carbon er i prosess med å gjøre tiltak for å redusere utslipp av PAH via overflatevann. De viktigste tiltakene identifisert og omfatter følgende:

- 1 Nulltoleranse for søl av PAH-holdige råvarer, ferdigvarer og avfall på lager- og trafikkområder. Umiddelbar stopp i arbeidet og opprydding dersom det oppstår hull i emballasje under håndtering av varer. Ved lossing av bindemiddel er fangdam med sand under tilkoblingspunkt utvidet. Eventuelt søl fjernes og det blir lagt på ren sand. Dersom det observeres hull i emballasje for elektrodemasse, f.eks brikettsekker, blir disse tatt ut, satt under tak og pakket om.
- 2 Optimalisering av rutiner for rengjøring og feiing.
- 3 Gjennomgang og forbedring av rutiner for lagring av ferdigvarer. Utrede muligheten for å øke innendørs lagring av ferdigvarer.
- 4 Rent overflatevann skal i størst mulig grad avskjæres og bortledes.
- 5 PAH-forurenset prosess- og overflatevann skal renses.

Status for avbøtende tiltak ut fra punktene over følges jevnlig opp og det gjøres estimat på reduserte utslipp på grunnlag av gjennomført tiltak, Vedlegg C. Samtidig tas det stikkprøver fra utslippspunkter for å beregne utslipp pr. delområde, Figur 16.



Figur 16. Estimerte utslipp av PAH via delområder for overvann i 2020.

5 Konklusjon og anbefalinger

Denne rapporten er en oppdatering av NIVA-rapport 7276-2018 «Tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand» (Olsen og medarb. 2018). Basert på nye analyser og modellering er det presentert utforming av erosjonsbeskyttelse som del av tildekkingslag og angitt nødvendig tykkelse av dette laget i ulike soner i Elkembukta for hindre spredning som følge av skipsoppvirvling i Elkembukta, ned til 20 m. Tildekkingslaget og det erosjonsbeskyttende laget må prosjekteres i tråd med gjeldende regelverk og standarder. I den sammenheng bør også geotekniske beregninger gjennomføres for å kontrollere stabilitet og bæreevne i området.

Resultater fra nye undersøkelser viser at tilsetning av aktive masser (aktivt kull) vil kunne bidra til redusert biotilgjengelighet av PAH.

Elkem Carbon har utslipp av PAH fra både prosessvann og overflatevann, sistnevnte inkluderer også søl fra kaiene. Bedriften har her gjort rede for forurensning knyttet til normal drift og til episodiske hendelser, definert som avvik fra det generelle utslippsbildet for prosessvann, overflatevann og fra håndtering av råvarer og produkter ved kaiene. De har videre beskrevet iverksatte og fremtidige avbøtende tiltak. Bedriften har i de senere årene hatt fokus på kildekontroll for å redusere utslippene. Det har medført at tilførsler til sjø av PAH med prosessvann er i dag i størrelsesorden 5-10 PAH₁₆ pr. år. Elkem Carbon er i prosess for å redusere PAH med overflatevann, som per i dag er estimerte til å være i størrelsesorden 25 kg PAH₁₆ pr. år. Det arbeides med ytterligere tiltak for å redusere dette til under 10 kg PAH₁₆ pr. år.

Det anbefales at det gjøres ytterligere utslippsreducerende tiltak ved Elkem Carbon for å redusere tilførsler av PAH til Elkembukta. Etter at dette er gjennomført og verifisert, anbefales det at de forurensete sedimentene i Elkembukta tildekkes, gjerne i kombinasjon med aktivt kull-behandling for å redusere porevannskonsentrasjonen av PAH i sedimentet og dermed redusere økologisk risiko. Videre anbefales det at det etableres et erosjonsbeskyttende lag med tykkelse og korngredning i henhold til modellert påvirkning. Dette laget vil beskytte tildekkingslaget, særlig mot påvirkning fra skipspropeller.

I Fiskåbukta, hvor risikoen fra PAH er relativt liten og lavere enn i Elkembukta, og tilstanden for sedimentlevende dyr god, er det anbefalt overvåket naturlig restitusjon for å følge effekten av utslippsreduksjoner på sedimentkonsentrasjoner og økologisk risiko knyttet til PAH, spesielt de to komponentene fluoranten og benzo(a)pyren. Utredningene i denne oppdateringen til tiltaksplanen endrer ikke konklusjonen for Fiskåbukta.

6 Referanser

Olsen, M., K. Næs, M. Schaanning, S. Øxnevad, J. Håvardstun, S. Sayfritz og Karina Pettersen, 2018. Tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand. NIVA-rapport 7276-2018, 113s.

Vatland, A., 2008. Kartlegging og reduksjon av PAH-utslipp til sjø – statusrapport, 2008, Sørlandskonsult (oppdragsnr 2680.409).

Vatland, A., 2018. Elkem Carbon – tiltaksplan for reduserte PAH-utslipp til vann. COWI-rapport, Prosjektnr A111061, RAP001.

Vedlegg A. Testing of activated carbon and anthracite as remediation material for PAH contaminated sediment



31.10.2019

Recipient(s)	Elkem Carbon, att.: Bente Sundby-Håland
Prepared by:	Ian Allen, Violette Raffard, Malcolm Reid, and Kristoffer Næs
Copy:	Marianne Olsen
Reference number:	0583/19
Project number:	17272

Subject: Testing of activated carbon and anthracite as remediation material for PAH contaminated sediment

Background

As a response to order from the Norwegian Environmental Agency to Elkem Carbon, NIVA produced a remedial action plan (RAP) for the contaminated fjord sediments in the near vicinity of Elkem Carbon in Kristiansand (Olsen et al. 2018). The RAP recommended capping of the sediments with material to minimise erosion and dispersal of contaminated sediments. A capping mass containing activated carbon was recommended as a measure to reduce porewater PAH-concentrations. The RAP also recommended testing the efficiency of activated carbon prior to using it *in situ*.

Sampling and Treatments

Approximately 20 L of surface sediments (0-10 cm) were collected using a Van Veen-grab (on April 12, 2019) from Elkembukta and Fiskåbukta, see Figure 1 and Table 1. The sediment samples were kept cold prior to transport to NIVA's laboratory. Upon reception, sediment batches were homogenised with a drill mixer and then 700 mL sub-samples was transferred to 1 L glass jars.

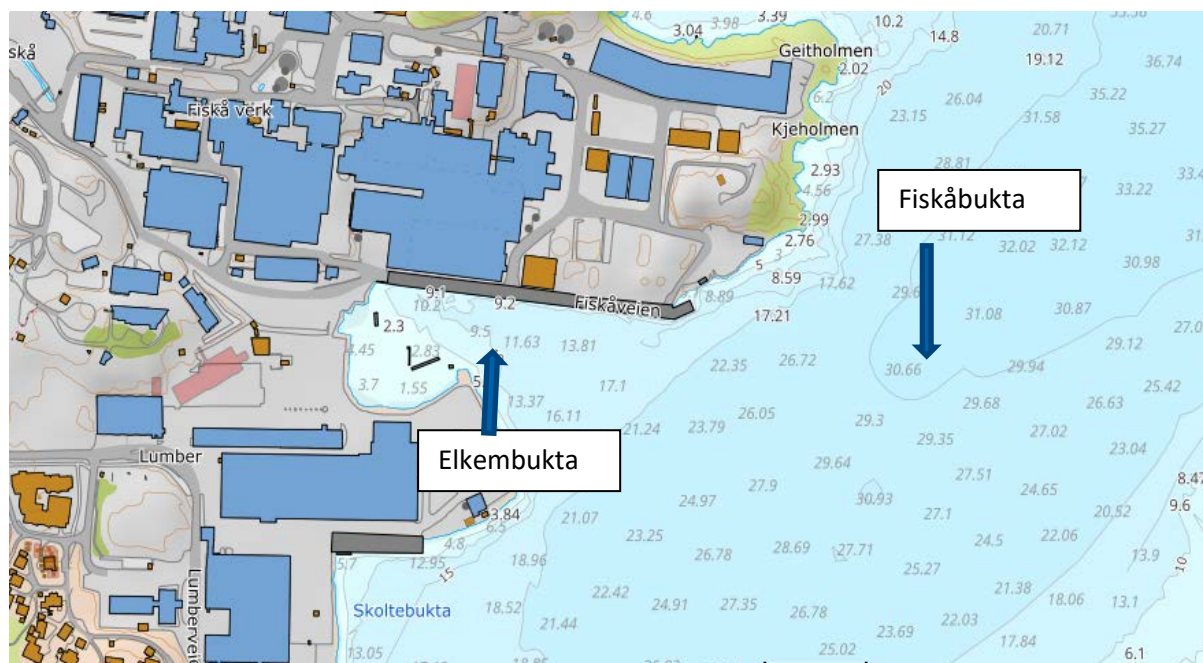


Figure 1. Sampling locations

Table 1. Sample characteristics.

	Elkembukta	Fiskåbukta
Coordinates	58° 07,53' N, 007° 58,43' E	58° 07,55' N, 007° 58,77' E
Water depth, m	13	31
% <2 µm	3,7	4,5
% <63 µm	63,4	87,2
TOC, mg/g	4,5	5,0
Dry matter, %	47,7	35,1

The proportion of remediation material to be tested was 20 g L⁻¹ of sediment. Two types of carbon additions were used: The powdered carbon AquaSorb CP1 from Jacobi (kindly provided by Geir Markussen, Sparks AS) and filter dust from Elkem Carbon. Anthracite powder or activated carbon were therefore added in adequate proportions in replicates jars (6 jars per sediment) for each sediment batch. Control jars with no remediation treatment added were also prepared.

Remediated and non-remediated jars were left to stir for on an orbital shaker for 4-6 weeks at room temperature in order to study the treatments to their maximum efficiency.

Total PAH concentrations in Elkembukta and Fiskåbukta

Total PAH concentrations were measured in subsamples of the two sediments collected during the procedure described above. Sediment batches were sent to Eurofins for analysis. Supporting parameters included total organic carbon content and particle size distribution.

Evaluation of PAH availability in sediments with SPME fibres

The evaluation of PAH availability was done using solid-phase microextraction fibres (SPME fibres) immersed directly in the sediment. The sediment from each jar was sub-sampled into a GC vial for SPME fibre exposure (Figure 1). The fibres used were from Supelco (Sigma-Aldrich Co) and were 1 cm long with a 30 µm thick polydimethylsiloxane (PDMS) coating. All measurements were made in triplicate with a 5 day-long immersion in sediment under static conditions. The 5 day long exposure was chosen as a compromise between the expected linear accumulation of the chemicals into the fibre and accumulating sufficient amount of chemicals in the fibre. The fibres were then retrieved and cleaned with a lint free tissue, and subsequently inspected with a magnifying glass to ensure that no particles remained on the surface of the fibre. Samples were then analysed by direct introduction of the SPME fibre into the injector of the GC/MS in an essentially solventless sample preparation and analysis.

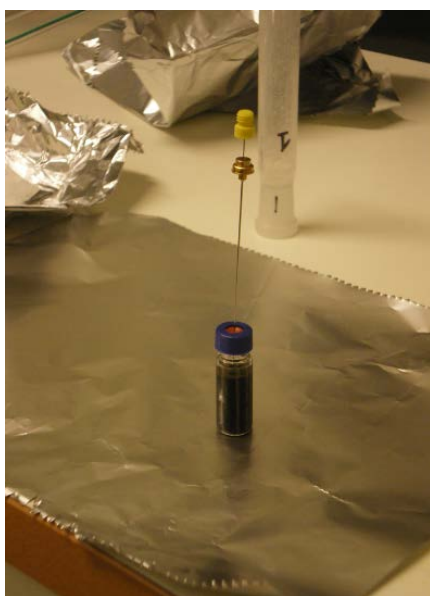


Figure 1. Static exposure of an SPME fibre to sediment in a GC vial.

Results

Total PAH concentrations in sediments

As shown on Figure 2, organic carbon-normalised PAH concentrations in Elkembukta and Fiskåbukta sediments (2019) are in a very similar range to those measured in sediment batches collected at neighbouring locations in a previous study (2017).

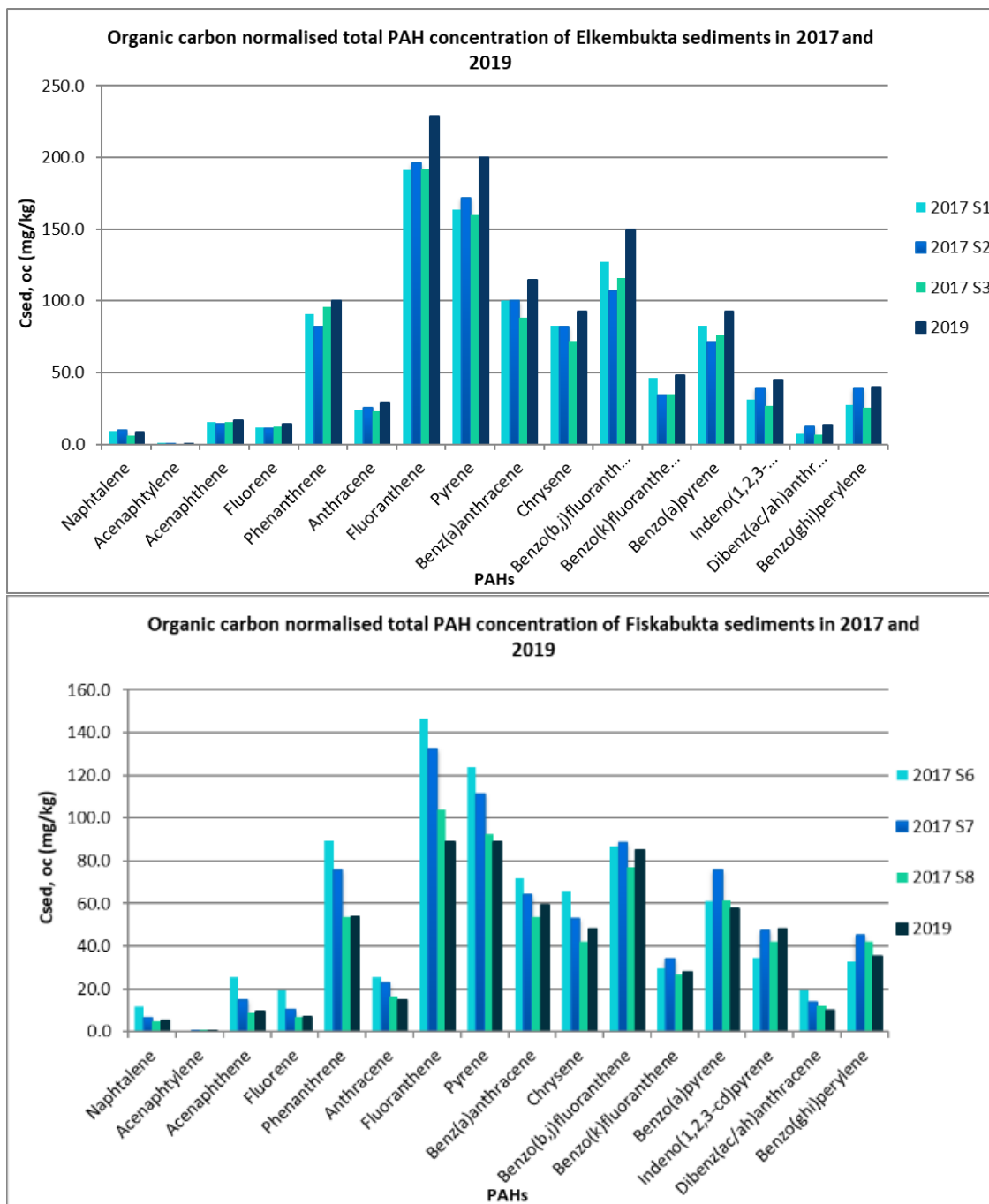


Figure 2. Organic carbon-normalised PAH concentrations in sediments from Elkembukta and Fiskabukta used in this study (2019) and comparison with data from samples collected in 2017 at sampling locations in the vicinity of the sampling sites chosen for this study.

Remediation efficiency in the 'constant agitation at room temperature' treatment
 The amounts of PAHs absorbed into the SPME fibres over the 5-day exposure to non-remediated and remediated sediments from Elkembukta and Fiskåbukta in the experiment with 1 or 1.5 month agitation of the sediment at room temperature are shown on Figure 3.

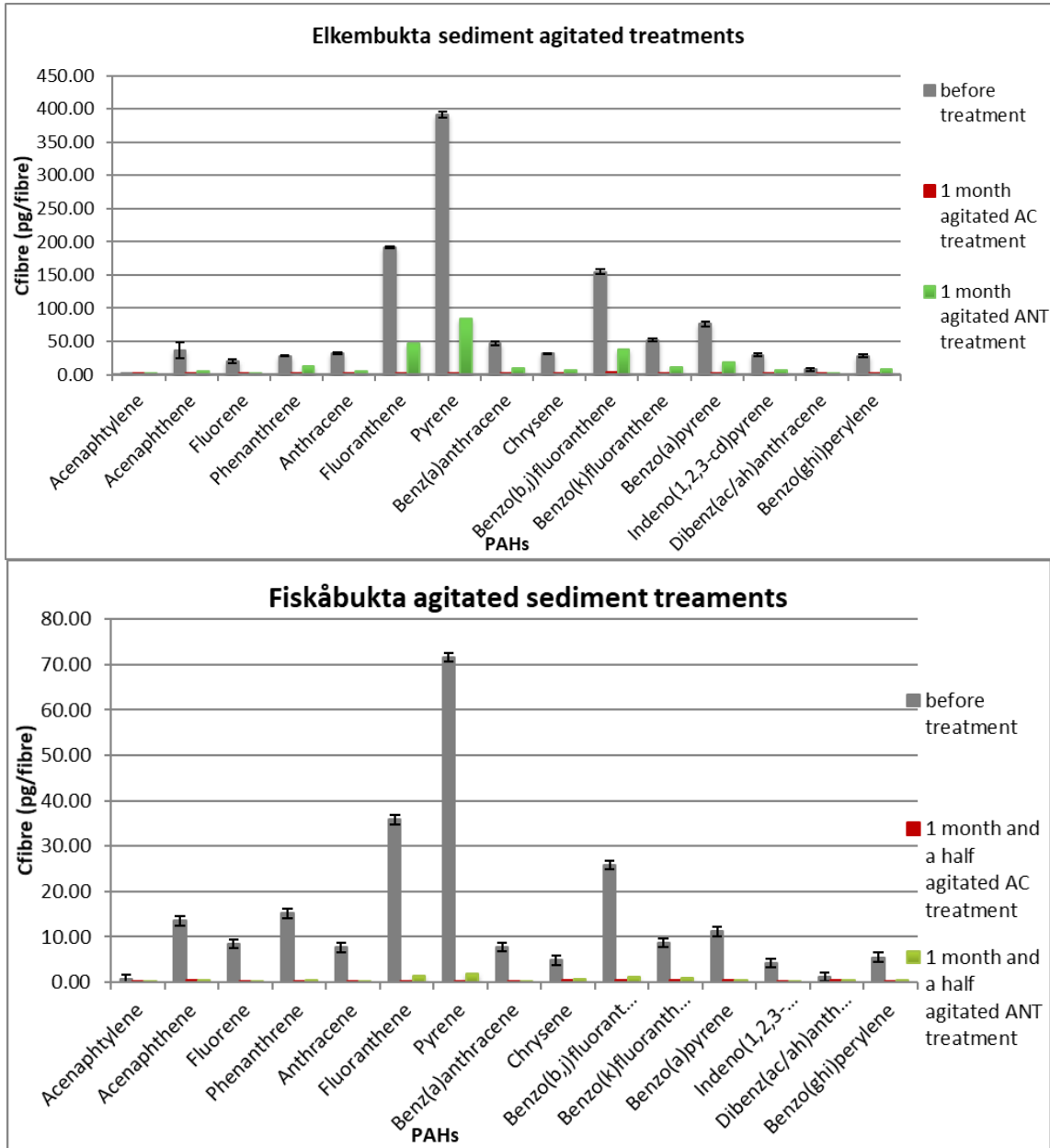


Figure 3. Concentrations of individual PAHs in SPME fibres (pg fibre⁻¹) exposed to sediment (i) prior to remediation, (ii) after addition of activated carbon (AC) and Anthracite (ANT) and agitation for 1 an 1.5 months at room temperature for Elkembukta sediment and Fiskåbukta sediment.

Both AC and anthracite treatments demonstrated substantial reduction in PAHs. Many PAHs could not be detected in the remediated sediment. In general, the highest reduction in PAH availability can, as expected, be observed with the AC

treatment. The efficiency of the remediation treatment was calculated from the initial:

$$\%Eff = (C_{fibre}(\text{control}) - C_{fibre}(\text{treatment})) / C_{fibre}(\text{control}) * 100$$

The efficiencies of the AC and ANT treatments are presented in Figure 4.

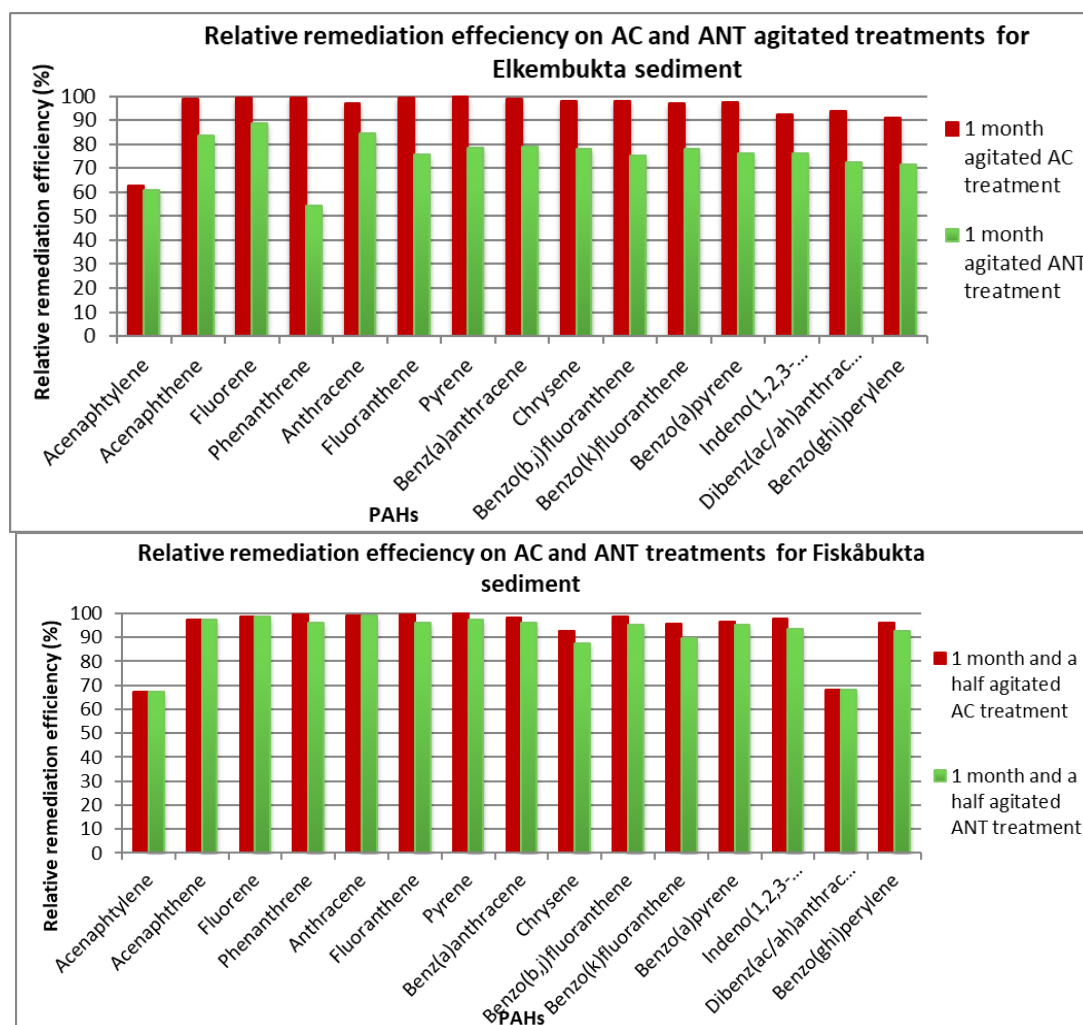


Figure 4. Relative remediation efficiency of the activated carbon (AC) and anthracite (ANT) treatments applied to Elkembukta and Fiskåbukta sediments with 1 and 1.5 month agitation at room temperature.

Conclusions

These results lead to the following conclusions:

- Activated carbon (AC) is very efficient at reducing the availability of PAHs in sediments both from the Elkembukta and the Fiskåbukta.
- Anthracite (ANT) also demonstrated efficient reduction in the availability of PAHs in both sediments, but it was not as efficient as AC.
- The activated carbon and the anthracite powder have potential to be used as remediation material in this context. However, further evaluation would be necessary to test if they fulfil the general guidelines for such a use.

Reference

Olsen, M., K. Næs, M. Schanning, S. Øxnevad, J. Håvardstun, S. Sayfritz og K. Petersen, 2018. Tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon, Kristiansand. NIVA-rapport 7276-2018.



Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Tel: 02348 / (+47) 22 18 51 00
E-post: niva@niva.no

ANALYSERAPPORT

RapportID: 11484

Kunde: Marianne Olsen
Prosjektnummer: O 17272;8 RAP Elkem Carb - Tiltaksplan for opprydding i forurenset sjøbunn ved Elkem Carbon,

Kvartalsand	Analyseoppdrag:	924-7396
	Versjon:	1
	Dato:	28.07.2019

11.07.2019 KBL: Fra Eurofinas kommentar at PAH i prøve NR-2019-07252 utgår
grunnet kompleks matris; verdi for tørstoff er 99,8%.

Provenr.: NR-2019-07250 Prøvemerkning: Elkembukta
Prøvetype: SEDIMENT
Prøvetakningsdato: 01.04.2019
Prøve mottatt dato: 10.05.2019
Analyseperiode: 22.05.2019 - 24.05.2019

Kommentar:

Analysevariabel	Standard (NIVA metodekode)	Resultat	Enhet	MU	LOQ	Underlev.
Totalt organisk karbon	Intern metode (EKSTERN_EF)	14	% TS			Eurofin
Aceftalen	ISO 18287, mod.: 2006-05	2,3	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Aceftalylen	ISO 18287, mod.: 2006-05	0,069	mg/kg TS TS	40%	0,01	Eurofin
Antracen	ISO 18287, mod.: 2006-05	4,1	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Benzo[a]antracen	ISO 18287, mod.: 2006-05	16	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Benzo[a]pyren	ISO 18287, mod.: 2006-05	13	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Benzo[b]fluoranten	ISO 18287, mod.: 2006-05	21	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Benzo[g,h,i]perylene	ISO 18287, mod.: 2006-05	5,6	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Benzo[k]fluoranten	ISO 18287, mod.: 2006-05	6,7	mg/kg TS TS	30%	0,01	Eurofin
Dibenzo[a,h]antracen	ISO 18287, mod.: 2006-05	1,9	mg/kg TS TS	30%	0,01	Eurofin
Fenantren	ISO 18287, mod.: 2006-05	14	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Fluoranten	ISO 18287, mod.: 2006-05	32	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Fluoren	ISO 18287, mod.: 2006-05	2,0	mg/kg TS TS	30%	0,01	Eurofin
Indeno[1,2,3-cd]pyren	ISO 18287, mod.: 2006-05	6,3	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Krysen+Trifenylen	ISO 18287, mod.: 2006-05	13	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Naftalen	ISO 18287, mod.: 2006-05	1,2	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Pyren	ISO 18287, mod.: 2006-05	28	mg/kg TS TS	25%	0,01	Eurofin
Sum PAH 16	ISO 18287, mod.: 2006-05	170	mg/kg TS TS			Eurofin
Tørstoff %	EN 12880: 2001-02	47,7	%	5%	0,1	Eurofin

Provenr.: NR-2019-07251 Prøvemerkning: Fiskabukta/K17
Prøvetype: SEDIMENT
Prøvetakningsdato: 01.04.2019
Prøve mottatt dato: 10.05.2019
Analyseperiode: 23.05.2019 - 27.05.2019

Kommentar:

Analysevariabel	Standard (NIVA metodekode)	Resultat	Enhet	MU	LOQ	Underlev.
Totalt organisk karbon	Intern metode (EKSTERN_EF)	5,4	% TS			Eurofin

Tegneforklaring:

* : Ikke omfattet av akkrediteringen

Side 1 av 2

<: Mindre enn, >: Store enn, MU: Måleusikkerhet (dekningsfaktor k=2), LOQ: Kvantifiseringsgrense

Met: Intern metode basert på angitt standard. Ytterligere informasjon om benyttet metode eller utførende laboratorie kan fås ved henvendelse til laboratoriet

Analyserapporten må kun gjengis i sin helhet og uten noen form for endringer. Analyseresultatet gjelder kun for den prøven som er testet.

For biota og sediment: Dersom enhet er uten spesifikk basisangivelse, er resultatet oppgitt som våtvekt.

Provenr.: NR-2019-07251 **Prøvemerkning:** Fiskåbuita/K17
 Provetype: SEDIMENT
 Prøvetakningsdato: 01.04.2019
 Prøve mottatt dato: 10.05.2019
 Analyseperiode: 23.05.2019 - 27.05.2019

Kommentar:

Analysevariabel	Standard (NIVA metodekode)	Resultat	Enhet	MU	LOQ	Underslev.
Acenafte	ISO 18287, mod.: 2006-05	0,52	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Acenafylen	ISO 18287, mod.: 2006-05	0,023	mg/kg T5 T5	40%	0,01	Eurofin
Antraeen	ISO 18287, mod.: 2006-05	0,78	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Benzo[a]antraeen	ISO 18287, mod.: 2006-05	3,2	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Benzo[a]pyren	ISO 18287, mod.: 2006-05	3,1	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Benzo[b]fluoranten	ISO 18287, mod.: 2006-05	4,6	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Benzo[g,h,i]perylen	ISO 18287, mod.: 2006-05	1,9	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Benzo[k]fluoranten	ISO 18287, mod.: 2006-05	1,5	mg/kg T5 T5	30%	0,01	Eurofin
Dibenzo[a,h]antraeen	ISO 18287, mod.: 2006-05	0,54	mg/kg T5 T5	30%	0,01	Eurofin
Fenantren	ISO 18287, mod.: 2006-05	2,9	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Fluoranten	ISO 18287, mod.: 2006-05	4,8	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Fluoren	ISO 18287, mod.: 2006-05	0,38	mg/kg T5 T5	30%	0,01	Eurofin
Indeno[1,2,3-cd]pyren	ISO 18287, mod.: 2006-05	2,6	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Krysen+Trifenylen	ISO 18287, mod.: 2006-05	2,6	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Naftalen	ISO 18287, mod.: 2006-05	0,27	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Pyren	ISO 18287, mod.: 2006-05	4,8	mg/kg T5 T5	25%	0,01	Eurofin
Sum PAH 16	ISO 18287, mod.: 2006-05	35	mg/kg T5 T5			Eurofin
Tørrstoff %	EN 12880: 2001-02	35,1	%	5%	0,1	Eurofin



Norsk institutt for vannforskning
Veronica Eftenvåg

Overingeniør

Rapporten er elektronisk signert

Vedlegg B. Utforming av tildekkingslag for forurenset sjøbunn



RAPPORT

Elkem Carbon AS - Utforming av tildekkingslag for forurenset sjøbunn

MODELLERING AV EROSIJONSBESKYTTELSE SOM
DEL AV TILDEKKINGSLAG

DOK.NR. 20200242-01-R
REV.NR. 0 / 2020-11-04

Ved elektronisk overføring kan ikke konfidensialiteten eller autentisiteten av dette dokumentet garanteres. Adressaten bør vurdere denne risikoen og ta fullt ansvar for bruk av dette dokumentet.

Dokumentet skal ikke benyttes i utdrag eller til andre formål enn det dokumentet omhandler. Dokumentet må ikke reproduseres eller leveres til tredjemann uten eiers samtykke. Dokumentet må ikke endres uten samtykke fra NGI.

Neither the confidentiality nor the integrity of this document can be guaranteed following electronic transmission. The addressee should consider this risk and take full responsibility for use of this document.

This document shall not be used in parts, or for other purposes than the document was prepared for. The document shall not be copied, in parts or in whole, or be given to a third party without the owner's consent. No changes to the document shall be made without consent from NGI.



Prosjekt

Prosjekttittel: Elkem Carbon AS - Utforming av tildekkingslag for forurenset sjøbunn
Dokumenttittel: Modellering av erosjonsbeskyttelse som del av tildekkingslag
Dokumentnr.: 20200242-01-R
Dato: 2020-11-04
Rev.nr. / Rev.dato: 0 /

Oppdragsgiver

Oppdragsgiver: NIVA
Kontaktperson: Marianne Olsen
Kontraktreferanse: Oppdragsbekreftelse signert 2020-05-27

for NGI

Prosjektleder: Gøril Aasen Slinde
Utarbeidet av: Gøril Aasen Slinde
Kontrollert av: Espen Eek og Siamak Feizi

Sammendrag

Elkem Carbon har fått pålegg fra Miljødirektoratet om å utføre tiltak for forurenset sediment i sjøen utenfor deres fabrikkanlegg ved Fiskå i Kristiansand. Norsk Institutt for Vannforskning (NIVA) er ansvarlig for å utarbeide tiltaksplan for arbeidene. På oppdrag fra NIVA har Norges Geotekniske Institutt (NGI) utført modellering for å vurdere beskyttelse mot erosjon som følge av skipstrafikk over tildekkingslaget. Modelleringen er utført med et NGI-utviklet verktøy som benytter modellert økning i vannhastighet som følge av skipstrafikk for å se på potensiale for erosjon av tildekkingslaget over sedimentet. Resultatet av modelleringen er en steinstørrelse som kan forventes å motstå den økte vannhastigheten, samt en anbefalt tykkelse for utlegging av erosjonssikringen.

Inngangsparameterne for modelleringen er dybden til sedimentene i området, data for skipene som trafikkerer kaia (motoreffekt, propelldiameter og dypgang), samt antatt bevegelsesmønster til og fra kai. Modelleringen og anbefalingen om erosjonsbeskyttelse tar utgangspunkt i at dataene som er framskaffet for arbeidet med denne rapporten også vil være representativ for framtidig skipstrafikk til og fra kaianlegget på Fiskå.

Dimensjoneringen av erosjonssikring er beregnet ut fra forventet båttrafikk og seilingsmønster som er antatt ut i fra posisjon som de ligger til kai. Hvis det kommer inn skip med større motorkraft, skip som stikker dypere enn de som er benyttet i modellering, det brukes kraftigere motoreffekt eller endret kjøremønster enn det som er brukt i beregningene eller andre forhold som gjør at effekten av erosjonen blir sterkere, kan dette skade tildekkingslaget. Skade på tildekkingslaget kan være både hull i tildekking som kan gi eksponering av forurenset sjøbunn under eller at tildekkingslaget samles i hauger som kan gi lokalt redusert seilingsdyp. Det anbefales at tildekkingslaget følges opp jevnlig med tanke på skader som kan komme av erosjon fra båttrafikk.

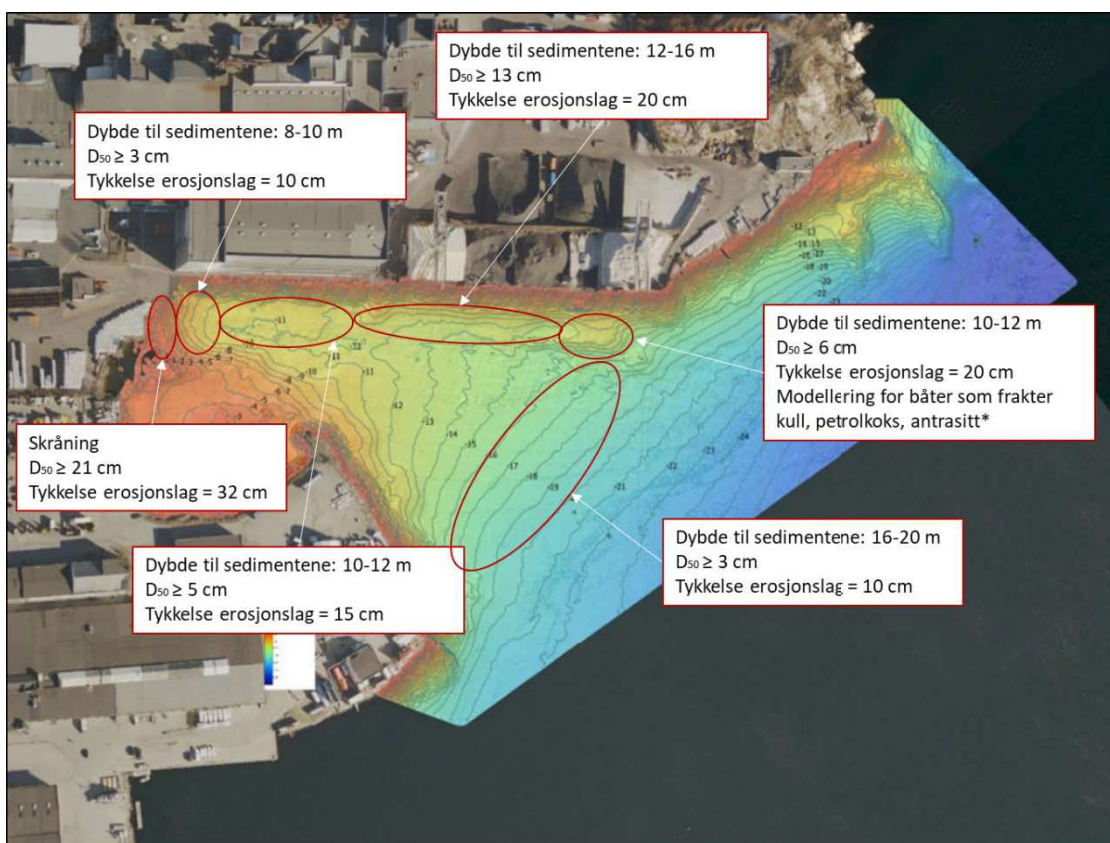
Erosjonsbeskyttelsen som er modellert her er kun for å beskytte tildekkingslaget og sedimentene under. Effekten av propellstrøm på kai-konstruksjoner eller nærliggende grunne sørvest for kaia er ikke vurdert.

Tabellen under viser resultatene fra de ulike områdene samlet for den båten eller varegruppa (ulik varer leveres med ulike fartøy og på ulike anløpsplasser) som er dimensjonerende for de ulike områdene av Fiskåbukta. Modelleringsresultatene er når det aktuelle fartøyet benytter 40 % av full motoreffekt.

Dybde til sedimentene	D ₅₀ ≥ (cm)	Tykkelse erosjonslag (cm)	Dimensjonerende varegruppe
8 – 10 m	3	10	Bindemiddel
Skråning	21	32	Elektrodemasse
10 – 12 m	5	15	Bindemiddel
10 – 12 m, øst	6	20	Kull, petrolkoks, antrasitt*
12 – 16 m	13	20	Kvarts
> 16 m	3	10	Kvarts

* Kvartsbåter vil også kunne trafikkere i dette området, men om disse skal være dimensjonerende må det vurderes andre former for erosjonsbeskyttelse enn mineralske masser.

Resultatene oppsummeres også grafisk i figuren under. Merk at det også her er merknad at modelleringen som er utført for det østlige området med sedimentdyp på 10-12 m ikke er gjeldende for kvartsbåter.



Det er også gjort en modellering basert på noe høyere motoreffekt (75 % av full effekt). Dersom erosjonssikringen skal dimensjoneres for høyere motoreffekt, vil en måtte gå opp noe på steinstørrelse og tykkelse av erosjonssikringen.

Hvis ønskelig, kan en nærmere vurdering av seilingsmønsteret i havna gi større detaljgrad for modelleringen. Vurderingen kan også benyttes i etterkant av utlegging av

tildekking med erosjonsbeskyttelse, for å gi retningslinjer for hvor ulike skip kan manøvrere i bukta.

NGI har ikke kjennskap til at det er utført geotekniske boringer i området. Generelt bør tildekking utføres ved at arbeidet starter ytterst ved størst dyp og bygges innover mot land. Dette for å redusere usikkerheten med tanke på stabilitet. I prosjekteringsfasen bør det gjøres tester for å bestemme bæreevne for de stedlige sedimentene. For eventuelle skråninger der det skal gjøres tildekking, må en se på stabiliteten, og det må vurderes om det er behov for å lage til støttefyllinger for å hindre utglidninger. Prosjekteringen skal gjennomføres i tråd med gjeldende regelverk og standarder.

Innhold

1	Innledning	8
2	Områdebeskrivelse	8
3	Metode for beregning og vurdering	9
4	Modelleringsforutsetninger	10
4.1	Bevegelsesmønster for fartøy	10
4.2	Dybde til sedimentene	12
4.3	Skiptrafikk til kai	16
4.4	Oppsummering skipstrafikk og dybder	22
5	Modelleringsresultater	23
5.1	Dybde 8 m	23
5.2	Dybde 10 m	26
5.3	Dybde 12 m	29
5.4	Dybde > 16 m	30
6	Konklusjoner og vurderinger	31
7	Referanser	34

Vedlegg

Vedlegg A	Data for skip som anløp Fiskå i 2019
Vedlegg B	Modelleringsresultater

Kontroll- og referanseside

1 Innledning

Elkem Carbon AS har fått krav om å oppdatere tiltaksplanen som er utarbeidet som tildekking av forurenset sjøbunn utenfor fabrikkområdet på Fiskå i Kristiansand (NIVA, 2018). Kravet er satt i den oppdaterte tillatelsen gitt av Miljødirektoratet (tillatelse nummer 2018.0141.T, sist endret: 2020-01-10). Blant annet skal tiltaksplanen oppdateres med tiltak for å motvirke spredning av forurensing fra forurenset sjøbunn, særlig fra skipoppvirvling.

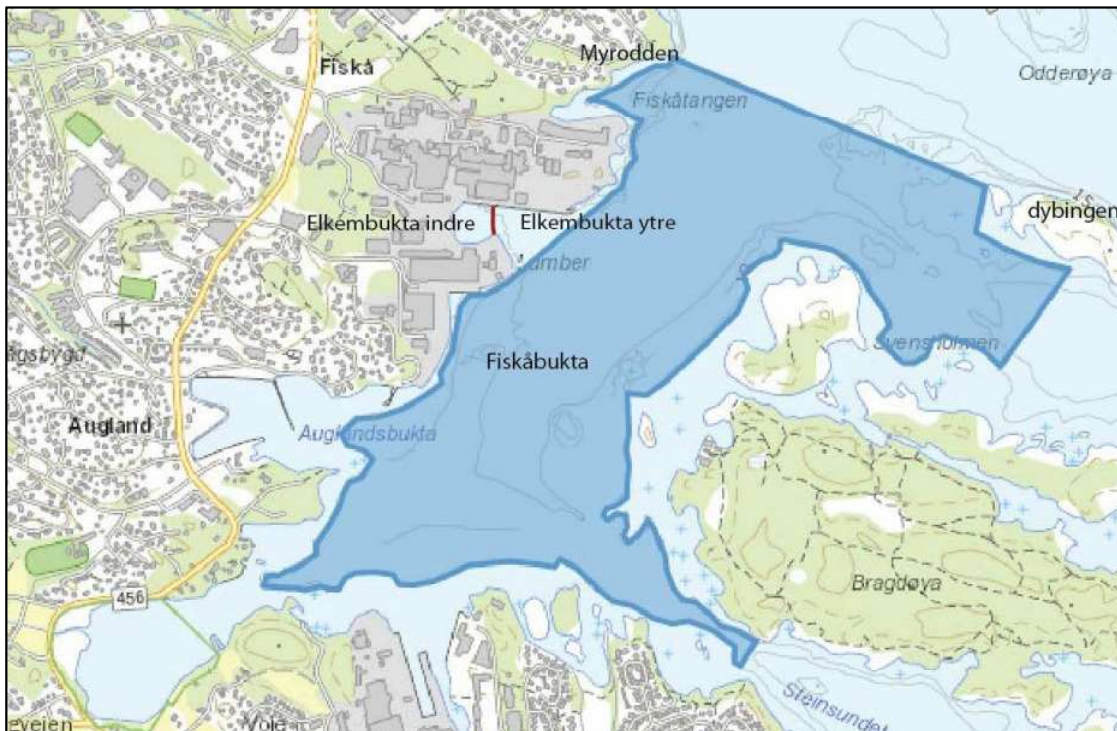
På oppdrag fra Norsk Institutt for Vannforskning (NIVA) skal Norges Geotekniske Institutt (NGI) utføre modellering for å vurdere av erosjon som følge av skipstrafikk over tildekkingslaget. Ifølge tillatelsen skal dagens og fremtidig skipoppvirvling (prognose) ligge til grunn for tiltaksvurdering ved valg av en robust og varig tiltaksløsning. Denne rapporten oppsummerer resultatene av modelleringen som er utført.

2 Områdebeskrivelse

Sedimentene utenfor Elkem Carbon AS er forurenset etter 100 år med industriell aktivitet på området, spesielt med PAH-forbindelser. Bedriften har gjennomført jevnlig overvåkning i fjorden siden 1983, og resultatene viser at utslippene til sjø er betydelig redusert (mer enn 90 %) siden oppstart av overvåkingen. Det har således blitt observert en gjennomgående forbedring av miljøtilstanden i fjorden. Imidlertid er sedimentene fremdeles forurenset av PAH, og NIVA har blitt engasjert for å anbefale tiltak med mål om å nå god kjemisk og økologisk tilstand i fjorden innen 2027.

NIVA har utarbeidet tiltaksplan for området, og har også fått jobben med å gjøre endringene som Miljødirektoratet har satt krav om. I tiltaksplanen anbefales det at Elkembukta tildekkes med sikte på å hindre erosjon og spredning av forurenset sediment ut av bukta. Det anbefales å gjøre tildekkingen i kombinasjon med aktivt-kull behandling for å redusere porevannskonsentrasjonen av PAH i sedimentet, og dermed redusere økologisk risiko. I Fiskåbukta anbefales det overvåket naturlig restitusjon (NIVA, 2018).

Elkembukta er området som ligger rett utenfor Elkem Carbon AS, og vil være det som er tiltaksområdet for modellering av skipserosjon av tildekkingsmasser, i og med at det er dette området som NIVA (2018) anbefaler at tildekkes med rene masser. Elkembukta er en del av Fiskåbukta/Vesterhavnområdet (figur 1) som igjen er en del av Kristiansandsfjorden.



Figur 1. Avgrensing av Elkembukta (indre og ytre) og Fiskåbukta (omriss viser -10 m kote) (NIVA, 2018).

3 Metode for beregning og vurdering

Erosjonen fra propeller blir vurdert ut ifra økt strømningshastighet over sjøbunnen som følge av manøvrering til og fra kai med de aktuelle fartøytypene. Overslagsberegningene av strøm langs sjøbunnen generert av propellstrøm, er utført med en modell utviklet av NGI (2002). Det blir gjort beregninger ut fra motoreffekten som legges inn i modellen.

Videre blir den økte vannhastigheten ved sjøbunnen generert av propellen benyttet for å si noe om hvilken kornstørrelse som kan motstå erosjon ved den aktuelle vannhastigheten. I modellen som NGI har utviklet benyttes kjente metodikker for erosjon som utgangspunkt for å finne erosjonsbestandig kornstørrelse. Resultatet av beregningen oppgis parameteren D_{50} som angir den steinstørrelsen i det mineralske materialet som 50 % av prøven er mindre enn, regnet etter vekt.

Videre benyttes D_{50} for å regne ut anbefalt tykkelse av laget for erosjonssikring. Faktoren som legges inn er for at sikre at erosjonslaget blir tykkere enn diameteren til materialet som legges ut. Ved strømhastigheter under 2 m/s beregnes tykkelse av erosjonslag som:

$$\text{Tykkelse erosjonslag} = d_{50} \cdot 3$$

For beregnede strømhastigheter over 2 m/s beregnes tykkelse av erosjonslag som:

$$\text{Tykkelse erosjonslag} = d_{50} \cdot 1,5$$

Forskjellen på utregningen av tykkelsen kommer av at de finere massene må legges ut i et tykkere lag relatert til kornstørrelsen enn det vil være behov for med de grove massene. Det er fordi det vil være større relativ usikkerhet i utleggingen av tynnere lag, og at en derfor trenger et noe tykkere lag for å være sikker på at laget blir erosjonsbestandig. Med tanke på utleggingstekniske forhold er det også behov for en noe større sikkerhetsfaktor når det legges ut tynne lag.

Tykkelsen av det endelig beregnede erosjonslaget blir rundet opp til nærmeste 5 cm.

4 Modelleringsforutsetninger

For å kjøre modelleringene må en ha en del inngangsparametere:

- ↗ Bevegelsesmønster for fartøy som manøvrerer i området
- ↗ Vanndyp i tiltaksområdet
- ↗ Propelldiameter for fartøy som manøvrerer i området
- ↗ Fartøyenes motoreffekt (i kW), og hvilken effekt som benyttet ved manøvrering til og fra kai

Resultatet av modelleringen vil være kornstørrelse og tykkelse som er anbefalt for erosjonsbeskyttelseslaget for å motstå oppvirvling med beskrevet skipstrafikk. Inngangsparametere til modellen oppsummeres i følgende kapitler.

4.1 Bevegelsesmønster for fartøy

Som utgangspunkt for å si noe om bevegelsesmønster for fartøy innenfor tiltaksområdet, er det hentet ut åpne AIS-data (AIS = automatic identification system) fra Kystverket. Dataen som kan hentes ut stammer fra anløp til kaia utenfor Elkem Carbon AS i løpet av mai 2019. Det antas at bevegelsesmønsteret for fartøyene er representativt for anløpene til og fra kai i området, både nå og i framtiden.

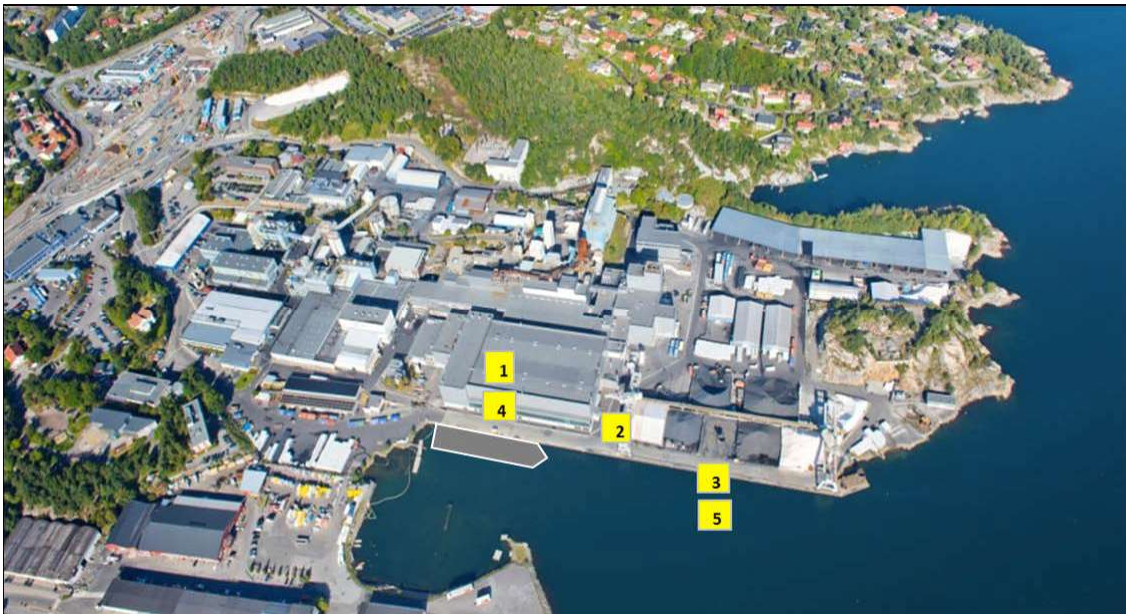


Figur 2. AIS-data for stykkgodstrafikk (blå linjer) og kjemikalie- /produkttanker (rød linje) for manøvrering til og fra kai ved Elkem Carbon AS. Dataen er fra mai 2019 (hentet fra: <https://kart.kystverket.no//share/9220e0e277e4>, hentet dato: 2020-08-07).

Ut ifra hvilket råstoff eller produkt som skipene ankommer med, vil posisjonen som skipene legger til ved kaien varierer. Posisjonene er gitt som tall i figur 3, og her er:

1. Elektrodemasse Kystruta – bakker til kai pga. tilgang via luke på båten. Denne ruta utføres av Karmsund som er 90 m lang
2. Elektrodemasse til Finnfjord – kjører med baugen inn mot bukta. Denne ruta utføres av Kristian With som er 90 m lang
3. Antrasitt, petrolkoks, kull – båtene kjører med baugen inn mot bukta. Det er mange ulike fartøyer som utfører denne ruta og de er typiske 90-120 m lange
4. Bindemiddel – båtene kjører stort sett med baugen inn mot bukta. Det er flere ulike fartøyer som utfører denne ruta og de er typisk 80-100 m lange. NGI har fått opplyst av fartøyet Lindo bakker til kai, og det utføres egen modellering for dette skipet
5. Kvarts – båtene bakker til kai og er typisk 120 - 150 m lange

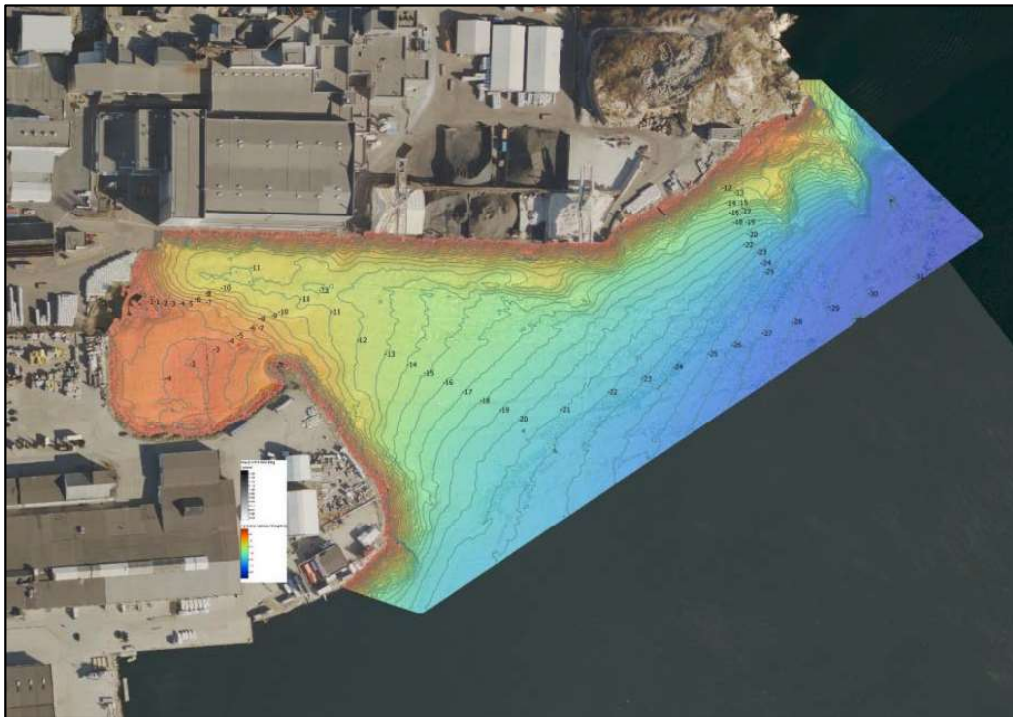
Kaia utenfor Elkem Carbon er nesten 280 m lang. Anløpsmønsteret til de ulike båtene viser at hele lengden av kaien er i bruk, og at en må ta med dette i beregningen når en ser hvilke dybder en vil forvente å være påvirket av skipsoppvirvling.



Figur 3. Ortofoto av kaiområdet. Tall angir posisjon av senter av skip innenfor kategorier som anløper jevnlig (se liste over). Omriss av skip er vist for skalering av et omtrentlig skip som bakker inn i posisjon 1.

4.2 Dybde til sedimentene

Dybdeforhold og sedimentenes hardhet ble kartlagt ved bruk av sonar i februar 2018. Arbeidet ble utført av Agder Marine (NIVA, 2018). Resultatene fra dybdemålingen viser at innerst i bukta er det noen få meter dypt, og så blir det jevnt dypere med økende avstand til land (figur 2). I overgangen til Fiskåbukta er det 20-25 m dypt. Innerst ved kaiene ser det ut til at dybden er ca. 8 m på det grunneste (se også figur 5).

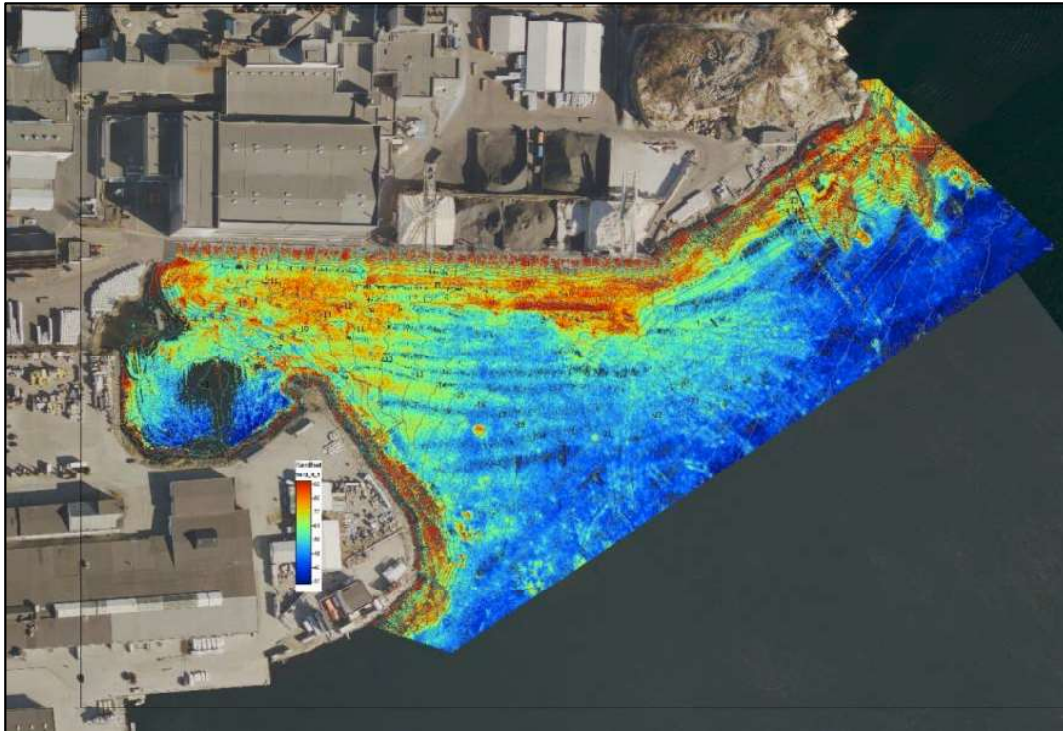


Figur 4. Resultat av dybdemåling med sonar (NIVA, 2018). Blå farge utgjør de dype områdene. Tiltaksområdet utgjøres av dybder mindre enn 20 m (merket med turkis, grønn, gul og rødt), med unntak av kaikonstruksjoner og grunne til venstre i figuren.



Figur 5. Sjøkart fra området (hentet fra www.kartverket.no).

Sedimentene langs kaiene til Elkem Carbon er harde, bestående av grus og stein. Dette tyder på at finstoffet blir erodert bort av skipsoppvirvling, noe som underbygges av at en har målt høye strømhastigheter (15-40 cm/s) i forbindelse med manøvrering til og fra kai (NIVA, 2018).



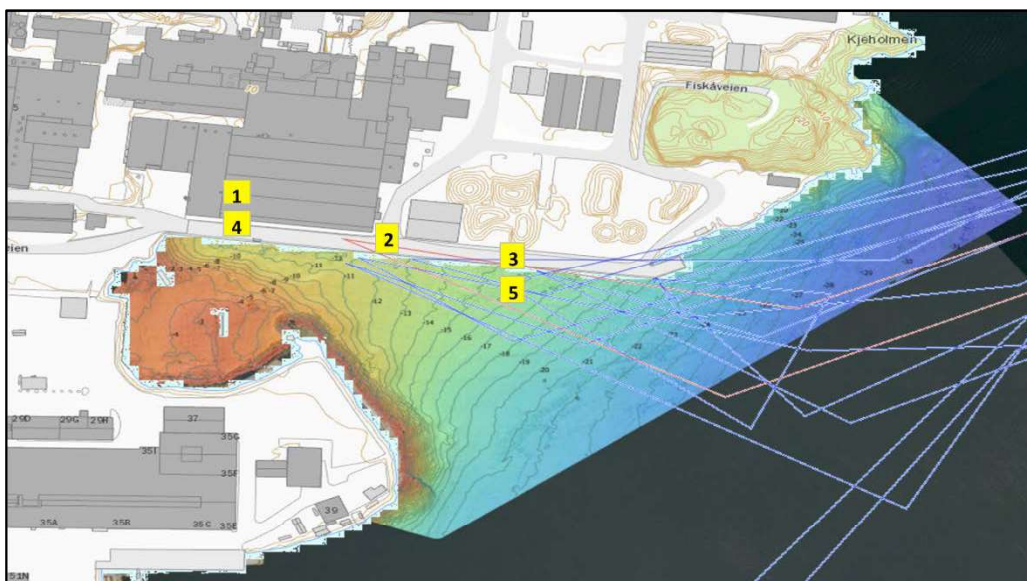
Figur 6. Hardhet av sedimentene i Elkembukta. Blå områder angir forekomst av løse sedimenter, mens røde områder er harde sedimenter. 100 % (mest rødt) representerer forekomst av grus (NIVA, 2018).

NIVA har gjort ytterligere prøvetaking av sedimentene for å gjøre analyse av kornfordeling i de stedlige sedimentene i området. Resultatene fra analysen er vist grafisk i figur 7. I figuren er andel sedimenter på $<63 \mu\text{m}$ (i %) vist. Dette tilsvarer silt og mindre kornstørrelser. Som ventet er andelen silt økende med økende vanddyb. Andelen silt er minst i områder som er grunne og som ligger nærme kai, mens andelen silt øker i dypere områder som er mindre påvirket av propellersosjon. Dette stemmer godt overens med de beregninger av propellstrømhastighet som er gjort i denne rapporten.



Figur 7. Andel korn som er silt eller mindre ($<63 \mu\text{m}$) i sedimentene. Punktene utgjør stasjoner for prøvetaking av sedimenter, mens farge mellom punktene har opphav i interpolasjon mellom punktene.

Dersom en ser dybdekartene for tiltaksområdet (figur 4 og figur 5) i sammenheng med AIS-data for manøvrering av fartøyene (figur 2), kan en si noe om forventet dybde ned til sedimentene som skal tildekkes. Figurene er lagt oppå hverandre for visualisering (figur 6), og her er også posisjonene for skipene som anløper lagt inn i samme figur.



Figur 8. Dybdekart kombinert med AIS-data og angivelser av posisjoner langs kai. Blå farge utgjør de dype områdene. Tiltaksområdet utgjøres av dybder mindre enn 20 m (merket med turkis, grønn, gul og rødt), med unntak av kaikonstruksjoner og grunne til venstre i figuren.

4.3 Skipstrafikk til kai

Det gjøres modellering for skipstrafikk inn til de ulike posisjonene til kaiene. Båtene som ankom de ulike posisjonene i løpet av 2019 benyttes som grunnlag for modelleringene. For modelleringen trengs det opplysninger om motoreffekt (i kW), propelldiameter og dypgang for skipene som manøvrerer i tiltaksområdet. NGI har fått disse opplysninger om skipene som anløp området i løpet av 2019 tilsendt fra Elkem Carbon, som igjen har innhentet dataene fra de ulike rederiene som har fartøy som trafikkerer i området. For detaljer for alle skipene, se vedlegg A.

Det modelleres med at skipene benytter 40 % av motoreffekten sin ved manøvrering til og fra kai. Elkem Carbon har innhentet informasjon på dette fra de rederier som trafikkerer i området, og det er noe ulik praksis mellom de som utfører manøvrering i området. Et rederi opplyser at en vil benytte ca. 50 % motorkraft et stykke fra kai, og deretter redusere ned til 10 % tett på kaien. Et annet rederi opplyser at omtrent 40 % motoreffekt vil være representativt for en dag der det ikke er utfordrende værforhold. NGI har valgt å benytte 40 % motoreffekt. Dersom en hadde valgt en lavere motoreffekt, ville dette også gitt resultat i at en hadde trengt mindre kornstørrelse for erosjonsbeskyttelse i mindre tykkelse. For hver posisjon gjøres det også en modellering av en manøvrering med mer motorkraft (75 %), som vil kunne være representativ for manøvrering i mye vind.

Økt propellhastighet bak skipet vil være avhengig av om skipet allerede er i fart, eller om det starter opp fra kai. Størst økning i strømningshastighet får en når båten starter fra stilleliggende. Innerst ved kai og i manøvreringsområdet rett ved kaia antas det at

skipene starter fra 0 m/s, mens det i det dypere manøvreringsområdet (> 16 m) modelleres med at skipene har en hastighet på 1,6 m/s (tilsvarende 3 knop).

Det gjøres ikke vurdering av propellstrømmens påvirkning av selve kaikonstruksjonen (antas her å være dybder mindre enn 8 m langs kaia). Den antas å være dimensjonert for den foreliggende trafikken. Det gjøres heller ikke vurdering av det grunne området sørvest i bukta, fordi området ikke ansees som en del av manøvreringsområdet. Dette området og eventuelle steinfyllinger i forbindelse med området kan være påvirket av erosjon fra propellstrøm ved at propellstrøm står inn i området ved manøvrering. Det gjøres en vurdering av områder innerst i bukta, der denne effekten antas å være størst. Det modelleres her med at båter manøvrerer med en omtrentlig avstand på 15 m til fyllingen.

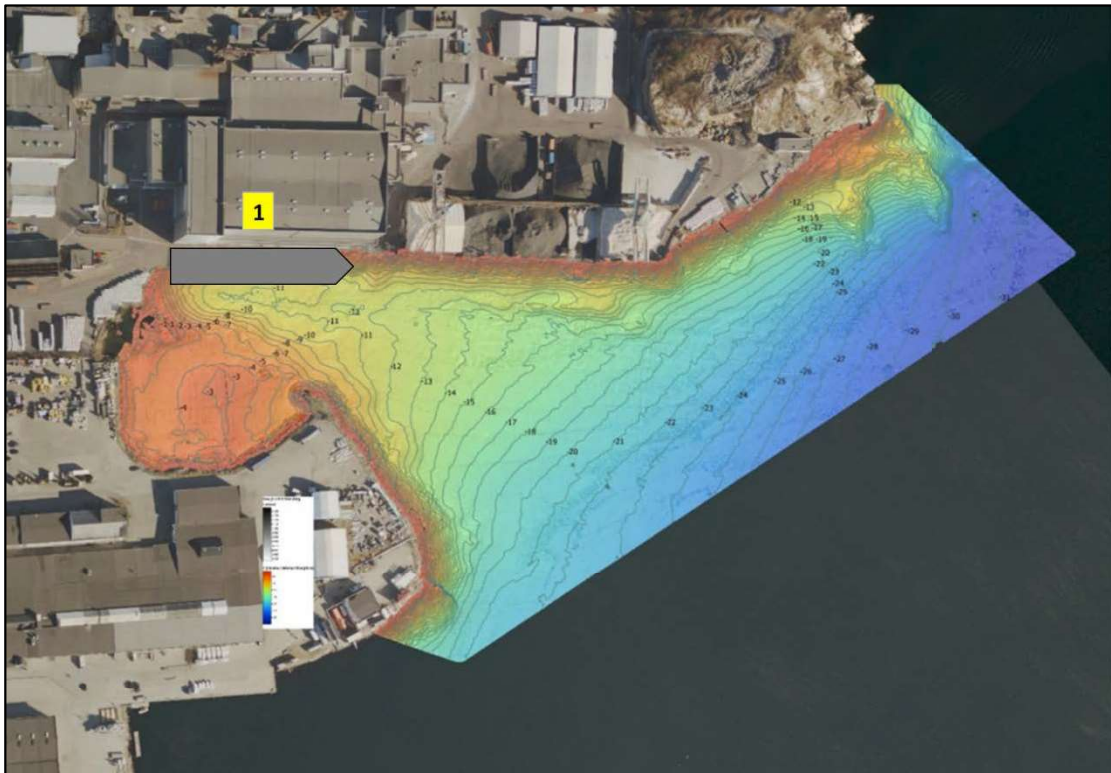
4.3.1 Posisjon 1

I posisjon 1 tas det om bord elektrodemasse på Skipet Karmsund. Dette skjer månedlig. Karmsund bakker til kai grunnet tilgang til lasteluke. Følgende data benyttes for modellering med Karmsund:

- ↗ Motoreffekt: 1720 kW
- ↗ Propelldiameter: 2,7 m
- ↗ Dyptgående: 4,4 m

Det modelleres for at Karmsund påvirker sedimenter på følgende dybder:

- ↗ 8 m – antatt dybde ved kai
- ↗ 10 m – Dybde i manøvreringsområdet rett ved kai



Figur 9. Omtrentlig plassering av Karmsund til kai. Blå farge utgjør de dype områdene. Tiltaksområdet utgjøres av dybder mindre enn 20 m (merket med turkis, grønn, gul og rødt), med unntak av kaikonstruksjoner og grunne til venstre i figuren.

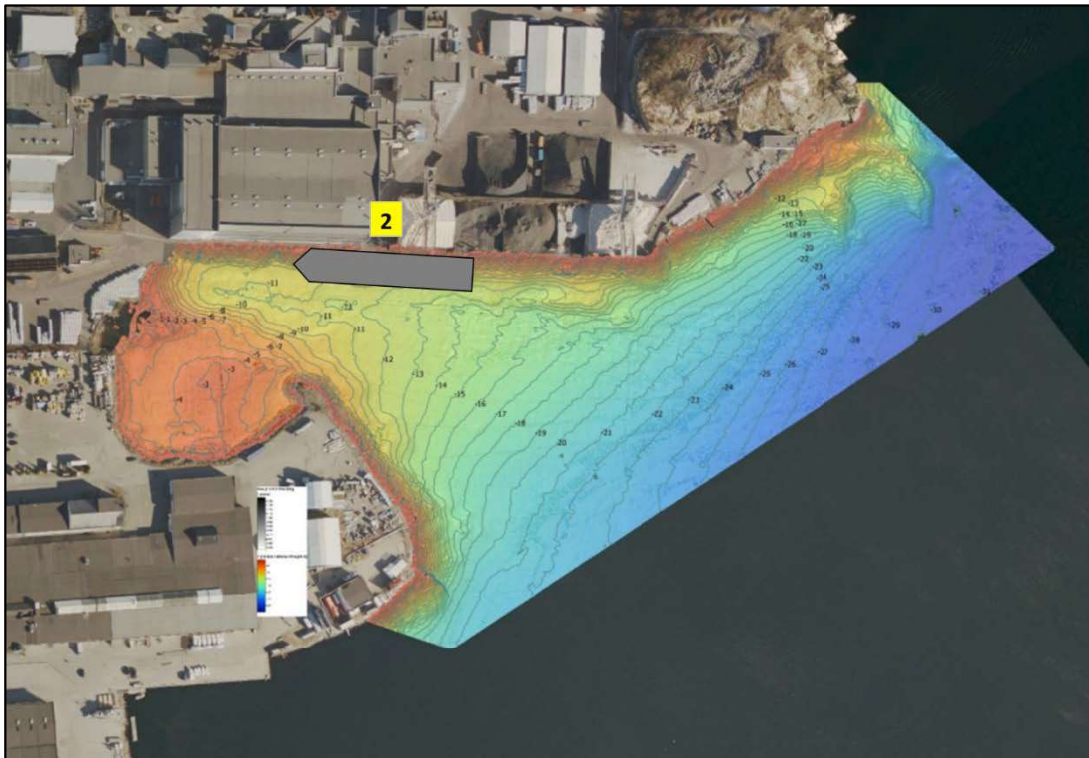
4.3.2 Posisjon 2

I posisjon 1 tas det om bord elektrodemasse på skipet Kristian With. Dette skjer månedlig. Følgende data benyttes for modellering med Kristian With:

- ↗ Motoreffekt: 1980 kW
- ↗ Propelldiameter: 2,6 m
- ↗ Dyptgående: 5,5 m

Det modelleres for at Kristian With påvirker sedimenter på følgende dybder:

- ↗ 10 m – antatt dybde ved kai
- ↗ 12 m – Dybde i manøvreringsområdet rett ved kai



Figur 10. Omtrentlig plassering av Kristian With til kai. Blå farge utgjør de dype områdene. Tiltaksområdet utgjøres av dybder mindre enn 20 m (merket med turkis, grønn, gul og rødt), med unntak av kaikonstruksjoner og grunne til venstre i figuren.

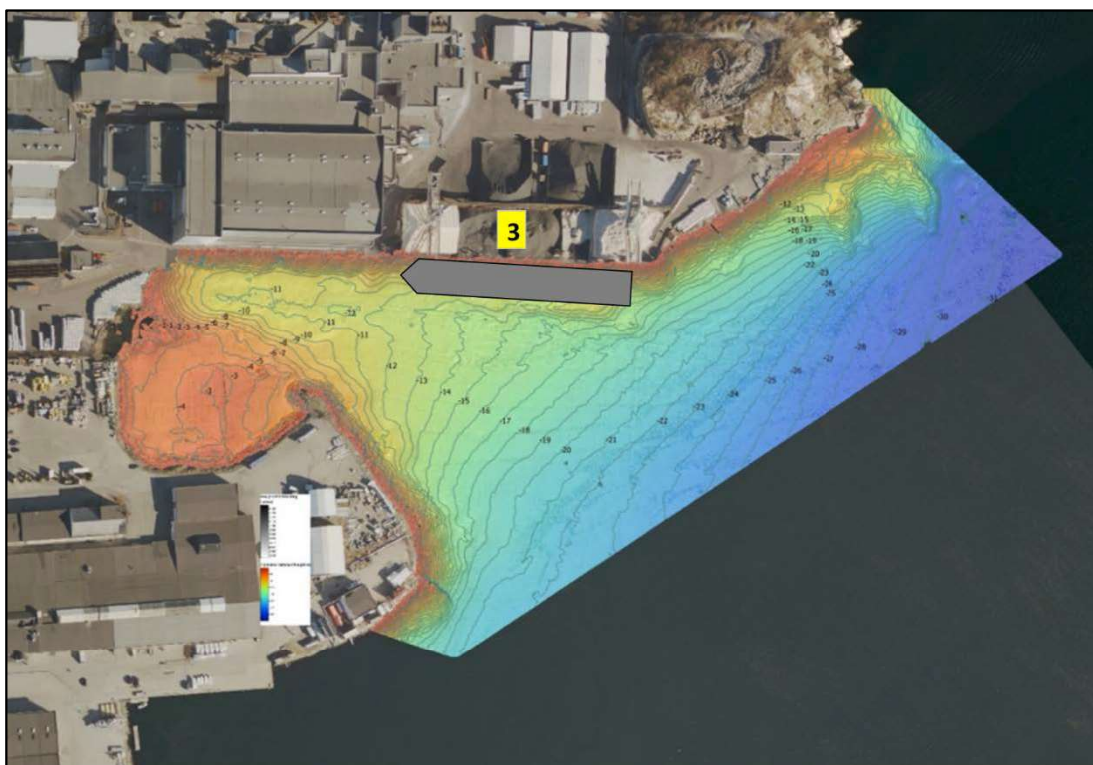
4.3.3 Posisjon 3

Posisjon 3 er den mest benyttede posisjonen på kaien. Her losses det antrasitt, kull og petrolkoks, og det er mange båter som er delaktige i transporten. I løpet av 2019 var det 35 anløp til denne posisjonen på kaien. For modellering benyttes det statistisk største skipet som ankommer, fordi dette skipet vil være det som utgjør worst-case for erosjon av tildekkingslaget. Skipene legger til med baugen innover mot bukta. Følgende data benyttes for modellering av skip i posisjon 3:

- ↗ Motoreffekt: 2640 kW
- ↗ Propelldiameter: 3,5 m
- ↗ Dyptgående: 6,6 m

Det modelleres for at skipene påvirker sedimenter på følgende dybder:

- ↗ 12 m – antatt dybde ved kai
- ↗ 14 m – Dybde i manøvreringsområdet rett ved kai



Figur 11. Omtrentlig plassering av båter som lossere eller laster i posisjon 3. Båten på figuren er omtrent 120 m lang. Blå farge utgjør de dype områdene. Tiltaksområdet utgjøres av dybder mindre enn 20 m (merket med turkis, grønn, gul og rødt), med unntak av kaikonstruksjoner og grunne til venstre i figuren.

4.3.4 Posisjon 4

I posisjon 4 lastes det bindemiddel. Båtene kjører stort sett med baugen inn mot bukta, men noen båter bakker også til kai. Det modelleres derfor for dette ene fartøyet (Lindo) i 8 m dybde, som er helt inne ved kaien. I løpet av 2019 var det fire anløp med bindemiddel. Data for det største skipet benyttes for modellering av skip i posisjon 4:

- ↗ Motoreffekt: 2880 kW
- ↗ Propelldiameter: 3,5 m
- ↗ Dyptgående: 6,2 m

Det modelleres for at skipene påvirker sedimenter på følgende dybder:

- ↗ 8 m – antatt minste dybde ved kai for båter som bakker til kai. Det modelleres for den båten som NGI har fått opplyst at bakker til kai (Lindo). De øvrige skipene i denne posisjonen vil trolig ikke påvirke sedimenter på 8 m vanddyb
- ↗ 10 m – antatt dybde ved kai for båter som kjører med baugen inn mot bukta
- ↗ 12 m – dybde i manøvreringsområdet rett ved kai



Figur 12. Omtrentlig plassering av båter som lossere eller laster i posisjon 4. Båten på figuren er omtrent 100 m lang. Noen av båtene i posisjonen bakker til kai, og det modelleres for to scenarier ved oppstart fra kai. Blå farge utgjør de dype områdene. Tiltaksområdet utgjøres av dybder mindre enn 20 m (merket med turkis, grønn, gul og rødt), med unntak av kaikonstruksjoner og grunne til venstre i figuren.

4.3.5 Posisjon 5

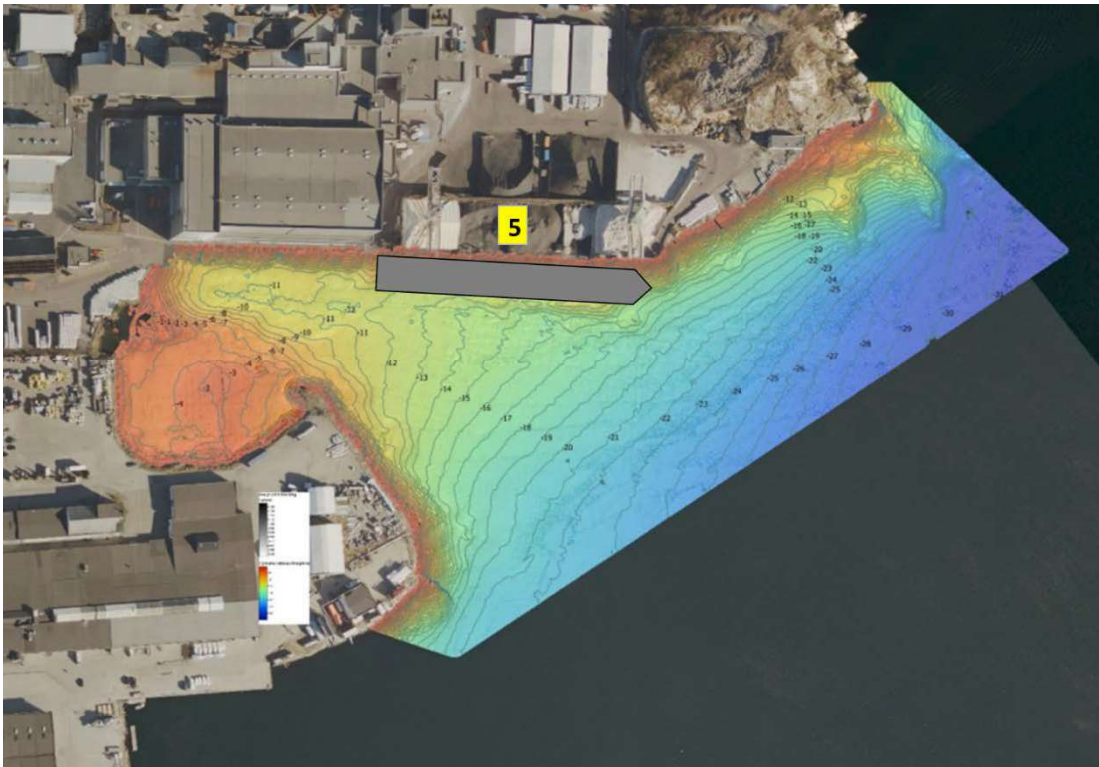
I posisjon 5 losses det kvarts. Båtene kjører stort sett med akterenden inn mot bukta. I 2019 anløp det tre skip med kvarts. Data for det største skipet (Oslo Fjord 1, heretter OF1) benyttes for modellering av skip i posisjon 4. NGI har imidlertid ikke data for dypgang på dette skipet, og dypgang er estimert fra sammenheng mellom dypgang og propelldiameter for de andre skipene i datasettet:

$$Dypgang (OF1) = Prop.diamter (OF1) \cdot \frac{\bar{x}, dypgang (alle skip)}{\bar{x}, prop.diameter (alle skip)}$$

- ↗ Motoreffekt: 5400 kW
- ↗ Propelldiameter: 4,9 m
- ↗ Dyptgående: 8,5 m

Det modelleres for at skipene påvirker sedimenter på følgende dybder:

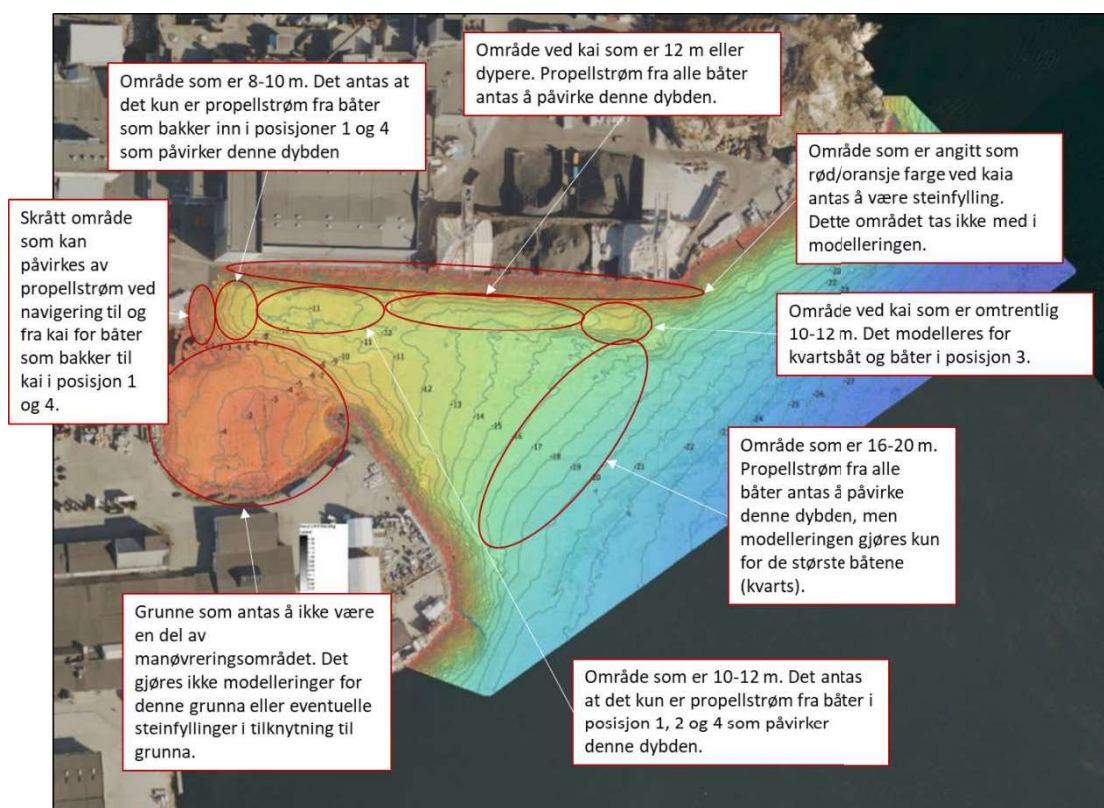
- ↷ 10 m – Grunnere område øst på kaiområdet
- ↷ 12 m – Dybde i manøvreringsområdet rett ved kai
- ↷ 16 m – Dybde i dypere manøvreringsområdet, et stykke ut i bukta



Figur 13. Omtrentlig plassering av båter som lossere eller laster i posisjon 4. Båten på figuren er omtrent 120 m lang. Blå farge utgjør de dype områdene. Tiltaksområdet utgjøres av dybder mindre enn 20 m (merket med turkis, grønn, gul og rødt), med unntak av kaikonstruksjoner og grunne til venstre i figuren.

4.4 Oppsummering skipstrafikk og dybder

Oppsummering av informasjon om manøvrering og dybder i de foregående kapitler er vist i figur 13.



Figur 14. Oppsummering av hvilke båter som påvirker hvilke områder av manøvreringsområdet ved Fiskå-kaia.

Vurderingen er kun utført på de fartøyene som er omhandlet i de foregående kapitler. Elkem opplyser at taubåter ikke anvendes, og det har derfor ikke blitt gjort vurderinger manøvrering av denne båttypen. Taubåter benytter ofte høyere motoreffekt når de hjelper skip til og fra kai.

5 Modelleringsresultater

I de følgende avsnitt oppsummeres resultatene fra de utførte modelleringen for de utvalgte dybdene utenfor kaia på Fiskå. Vedlegg B viser modelleringsresultatene direkte i modellen.

5.1 Dybde 8 m

Bukta er 8 m dyp innerst i bukta. Det modelleres for denne dybden for Karmsund som laster elektrodemasse (posisjon 1), samt for Lindo som kjører bindemiddel (posisjon 4). Det opplyses fra Elkem Carbon at Lindo er den av båtene med bindemiddel som bakker til kai. Øvrige båter antas å ikke trafikkere over områder med dybde 8 m. Resultatene fra modelleringene med Karmsund og Lindo med 40 % motoreffekt er i tabell 1.

Tabell 1. Inngangsparametere og modelleringsresultater for Karmsund og Lindo med 40 % motoreffekt på 8 m vanddyp.

Parameter	Enhet	Karmsund	Lindo
Inngangsparametere			
Propelldiameter	m	2,7	2,3
Effekt, hovedmotor	kW	1720	1497
% effekt		40 %	40 %
Effekt i modell	kW	688	599
Båthastighet	m/s	0	0
Vanddyp	m	8	8
Dyptgående	m	4,4	4,7
Dybde under propell	m	3,6	3,3
Modelleringsresultater			
Økt vannhastighet	m/s	1,2	1,2
D ₅₀	cm	2,9	2,9
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 3)	cm	8,8	8,6

Resultatene av modelleringen viser at det anbefales et lag med **erosjonsbeskyttelse med D₅₀ ≥ 3 cm, og en tykkelse på 10 cm** i områder der det er 8-10 m i bukta. Denne kornstørrelsen og tykkelsen er basert på en motoreffekt ved manøvrering på 40 %.

Det er en risiko for at benyttelse av en høyere motoreffekt, f.eks. ved dårlig vær, vil kunne føre til erosjon av tildekkingslaget. Det er gjort en modellering av erosjonsbeskyttelse som er dimensjonert for å tole en motoreffekt på 75 % (tabell 2). For å tole økt strømhastighet med denne motoreffekten må erosjonslaget anlegges med D₅₀ ≥ 5 cm, og en tykkelse på 15 cm.

Tabell 2. Inngangsparametere og modelleringsresultater for Karmsund og Lindo med 75 % motoreffekt på 8 m vanddyb.

Parameter	Enhet	Karmsund	Lindo
Inngangsparametere			
Propelldiameter	m	2,7	2,3
Effekt, hovedmotor	kW	1720	1497
% effekt		75 %	75 %
Effekt i modell	kW	1290	1123
Båthastighet	m/s	0	0
Vanddyb	m	8	8
Dyptgående	m	4,4	4,7
Dybde under propell	m	3,6	3,3
Modelleringsresultater			
Økt vannhastighet	m/s	1,5	1,5
D ₅₀	cm	5,0	4,8
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 3)	cm	15	14,4

Dybdekartene for området viser at det er et relativt bratt område rett sør for manøvreringsområdet med antatte dybder 8-10 m. Her vil propellstrømmen fra båter som navigerer til og fra kai trolig stå rett på, og det vil kunne forekomme erosjon grunnet økt strømhastighet fra manøvrering. Dersom dette er en steinfylling antas det at den er dimensjonert for de økte strømhastigheter som forekommer ved navigering. Det er likevel gjort en modellering av hvilken D₅₀ som må benyttes, i tilfelle dette er et område som omfattes av tiltaksområdet for tildekkingen. Her modelleres det for Karmsund, fordi dette fartøyet vil kunne har størst effekt på skråningen fordi den har større motoreffekt enn Lindo. Her gjøres modelleringen ut i fra den forventede økte vannhastigheten i senterlinjen bak propellen, og vanddyb og dypgang er således ikke relevant for modelleringen.

Resultatene fra modelleringen er vist i tabell 3, og en ser at dersom Karmsund manøvrerer med 40 % motoreffekt inn mot det skrå området estimeres det at det trengs **erosjonsbeskyttelse med D₅₀ ≥ 21 cm og tykkelse på 35 cm** for å motstå erosjon grunnet den økte strømhastigheten fra fartøyet. Dersom motoreffekten er høyere, trengs det større stein i større tykkelse for å stå imot erosjon.

Tabell 3. Inngangsparametere og modelleringsresultater for Karmsund dersom fartøyet manøvrerer slik at propellstrømmen står rett imot skrått område på 8-10 m, her er (1) 40 % motoreffekt ved manøvrering og (2) 75 % motoreffekt ved manøvrering.

Parameter	Enhet	Karmsund (1)	Karmsund (2)
Inngangsparametere			
Propelldiameter	m	2,7	2,7
Effekt, hovedmotor	kW	1720	1720
% effekt		40 %	75 %
Effekt i modell	kW	688	1290
Båthastighet	m/s	0	0
Vanddyp	m	8	8
Modelleringsresultater			
Økt vannhastighet	m/s	2,7	3,4
D ₅₀	cm	21	36
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 1,5)	cm	32	54

5.2 Dybde 10 m

Innerst i bukta er det mellom 10 og 12 m dypt. På denne dybden modelleres det for Karmsund (posisjon 1), Kristian With som også laster elektrodemasse (posisjon 2), samt alle båter som transporterer bindemiddel (posisjon 4).

Tabell 4. Inngangsparametere og modelleringsresultater for Karmsund, Kristian With og båter som frakter bindemiddel med 40 % motoreffekt på 10 m vanddyp.

Parameter	Enhet	Karmsund	Kristian With	Bindemiddel
Inngangsparametere				
Propelldiameter	m	2,7	2,6	3,5
Effekt, hovedmotor	kW	1720	1980	2880
% effekt		40 %	40 %	40 %
Effekt i modell	kW	688	792	1152
Båthastighet	m/s	0	0	0
Vanddyp	m	10	10	10
Dyptgående	m	4,4	5,5	6,2
Dybde under propell	m	5,6	4,5	3,8
Modelleringsresultater				
Økt vannhastighet	m/s	0,8	1,0	1,5
D ₅₀	cm	0,97	1,8	4,9
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 3)	cm	2,9	5,4	14,6

Resultatene av modelleringen viser at båtene som frakter bindemiddel er styrende for modelleringen. **Det anbefales at tildekkingen beskyttes med et lag med masser med $D_{50} \geq 5$ cm, og en tykkelse på 15 cm** i områder der det er 8-10 m dypt i bukta. Denne kornstørrelsen og tykkelsen er basert på en motoreffekt ved manøvrering på 40 %.

Det er en risiko for at benyttelse av en høyere motoreffekt, f.eks. ved dårlig vær, vil kunne føre til erosjon av tildekkingslaget. Det er gjort en modellering av erosjonsbeskyttelse som er dimensjonert for å tole en motoreffekt på 75 % (tabell 4). For å tole økt strømhastighet med denne motoreffekten må erosjonslaget anlegges med $D_{50} \geq 8$ cm, og en tykkelse på 25 cm.

Tabell 5. Inngangsparametere og modelleringsresultater for Karmsund, Kristian With og båter som frakter bindemiddel med 75 % motoreffekt på 10 m vanddyb.

Parameter	Enhet	Karmsund	Kristian With	Bindemiddel
Inngangsparametere				
Propelldiameter	m	2,7	2,6	3,5
Effekt, hovedmotor	kW	1720	1980	2880
% effekt		75 %	75 %	75 %
Effekt i modell	kW	1290	1485	2160
Båthastighet	m/s	0	0	0
Vanddyb	m	10	10	10
Dyptgående	m	4,4	5,5	6,2
Dybde under propell	m	5,6	4,5	3,8
Modelleringsresultater				
Økt vannhastighet	m/s	1,0	1,3	1,9
D_{50}	cm	1,6	3,1	8,3
Tykkelse erosjonslag ($D_{50} \cdot 3$)	cm	4,9	9,2	24,8

Det er også et område øst på kaia som er mellom 10 og 12 m (se figur 13). Dette området kan påvirkes av kvartsbåter, samt kull, petrolkoks antrasitt-båter i posisjon 3, og det gjøres derfor en modellering for disse båttypene på 10 m vanddyb. Resultatet av modelleringen er vist i tabell 5.

Tabell 6. Inngangsparametere og modelleringsresultater for kull, petrolkoks og antrasitt- båter (Kull etc.), hvor (1) 40 % motoreffekt ved manøvrering og (2) 75 % motoreffekt ved manøvrering. Tabellen viser også manøvrering med den største kvartsbåten med 40 % motoreffekt. Alle resultater er for 10 m vanddyp.

Parameter	Enhet	Kull etc. (1)	Kull etc. (1)	Kvarts
Inngangsparametere				
Propelldiameter	m	3,5	3,5	4,9
Effekt, hovedmotor	kW	2640	2640	5400
% effekt		40 %	75 %	40 %
Effekt i modell	kW	1056	1980	2160
Båthastighet	m/s	0	0	0
Vanddyp	m	10	10	10
Dyptgående	m	6,6	6,6	8,5
Dybde under propell	m	3,4	3,4	1,5
Modelleringsresultater				
Økt vannhastighet	m/s	1,7	2,1	7,6
D ₅₀	cm	6,0	10,2	273
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 3 / D ₅₀ · 1,5)*	cm	18,1	15,2	409

* Utregning av tykkelse er avhengig av modelleringsresultat for økt vannhastighet, se avsnitt 3

Resultatene av modelleringen viser at dersom tildekkingen skal dimensjoneres etter båtene som frakter kull, petrolkoks og antrasitt så **anbefales at tildekkingen beskyttes med et lag med masser med D₅₀ ≥ 6 cm, og en tykkelse på 20 cm.** Denne kornstørrelsen og tykkelsen er basert på en motoreffekt ved manøvrering på 40 %.

Modelleringen viser at kvartsbåten trolig vil gi svært høy økt vannhastighet over bunnen (modell estimerer 7,6 m/s økt vannhastighet), og at det ikke vil være hensiktsmessig med erosjonsbeskyttelse bestående av mineralske masser dersom dette området skal beskyttes mot erosjon fra den største kvartsbåten. Dersom erosjonsbeskyttelsen i dette området skal dimensjoneres ved de økte vannhastighetene som kan forekomme med denne båten, anbefales det å se på andre metoder for erosjonssikring, f.eks.:

- Gabioner: Konstruksjon av stein og ståltråd som bygge spå land og plasseres på sjøbunnen
- Betongmatt: Støpte betongelementer som plasseres på sjøbunnen

Denne typen erosjonssikring er ikke vurdert i dette notatet.

Det bemerkes at kvartsbåtene har få anløp til Fiskå i løpet av et år, og det kan også være et alternativ å følge opp anløp med inspeksjon av erosjonsbeskyttelsen. Det minnes også

om at NGI ikke har faktiske data for dypgang for båten som er benyttet i modelleringen, og at dypgang er basert på et estimat.

5.3 Dybde 12 m

Omtrent midt i bukta er det ca. 12 m ved kaia. På dette dypet modelleres det for båter med kull, antrasitt og petrolkoks (posisjon 3), bindemiddel (posisjon 4) og kvarts (posisjon 5). Båtene som trafikkerer til og fra posisjon 1 og 2 vil også kunne gi påvirkning her, men disse båtene er mindre og vil derfor gi mindre erosjon enn de båtene det modelleres for i posisjoner 3, 4 og 5. Det modelleres for de største båtene som ankommer Fiskå innenfor hver av kategoriene.

Tabell 7. Inngangsparametere og modelleringsresultater for båter som frakter kull, antrasitt og petrolkoks (Kull etc.), båter som frakter bindemiddel og båter som frakter kvarts med 40 % motoreffekt på 12 m vanddyb.

Parameter	Enhet	Kull etc.	Bindemiddel	Kvarts
Inngangsparametere				
Propelldiameter	m	3,5	3,5	4,9
Effekt, hovedmotor	kW	2640	2880	5400
% effekt		40 %	40 %	40 %
Effekt i modell	kW	1056	1152	2160
Båthastighet	m/s	0	1,6	0
Vanddyb	m	12	12	12
Dyptgående	m	6,6	6,2	8,5
Dybde under propell	m	5,4	4,8	3,5
Modelleringsresultater				
Økt vannhastighet	m/s	1,0	1,2	2,3
D ₅₀	cm	1,9	2,7	13,3
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 3 / D ₅₀ · 1,5)*	cm	5,6	8,2	19,9

* Utregning av tykkelse er avhengig av modelleringsresultat for økt vannhastighet, se avsnitt 3

Resultatene av modelleringen viser at båtene som frakter kvarts er styrende for modelleringen. **Det anbefales at tildekkingen beskyttes med et lag med masser med D₅₀ ≥ 13 cm, og en tykkelse på 20 cm** i områder der det er 12-16 m i bukta. Denne kornstørrelsen og tykkelsen er basert på en motoreffekt ved manøvrering på 40 %.

Det er en risiko for at benyttelse av en høyere motoreffekt, f.eks. ved dårlig vær, vil kunne føre til erosjon av tildekkingslaget. Det er gjort en modellering av erosjonsbeskyttelse som er dimensjonert for å tole en motoreffekt på 75 % (tabell 6). For å tole økt strømhastighet med denne motoreffekten må erosjonsbeskyttelsen anlegges med D₅₀ ≥ 22 cm, og en tykkelse på 35 cm.

Tabell 8. Inngangsparametere og modelleringsresultater for båter som frakter kull, antrasitt og petrolkoks (Kull etc.), båter som frakter bindemiddel og båter som frakter kvarts med 75 % motoreffekt på 12 m vanddyb.

Parameter	Enhet	Kull etc.	Bindemiddel	Kvarts
Inngangsparametere				
Propelldiameter	m	3,5	3,5	4,9
Effekt, hovedmotor	kW	2640	2880	5400
% effekt		75 %	75 %	75 %
Effekt i modell	kW	1980	2160	4050
Båthastighet	m/s	0	0	0
Vanddyb	m	12	12	12
Dyptgående	m	6,6	6,2	8,5
Dybde under propell	m	5,4	4,8	3,5
Modelleringsresultater				
Økt vannhastighet	m/s	1,3	1,5	2,8
D ₅₀	cm	3,2	4,6	22,4
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 3 / D ₅₀ · 1,5)*	cm	9,6	13,8	33,6

* Utregning av tykkelse er avhengig av modelleringsresultat for økt vannhastighet, se avsnitt 3

5.4 Dybde 16 m

Et stykke fra kaiområdet, og videre ut i manøvreringsområdet, vil dybden være omtrent 16 m eller dypere. Tiltaksområdet for tildekking med erosjonsbeskyttelse går ned til 20 m, da dette er så dypt som det antas at propellersosjon vil kunne ha effekt på sedimentene (Miljødirektoratet, 2015). For dette dypet vises modellering for båtene som frakter kvarts, da disse båtene fra tidligere modelleringer har vist å være styrende for dimensjonering av erosjonsbeskyttelsen. Modelleringen vises både for manøvrering fra 0 knop, men også hva D₅₀ og tykkelse på erosjonsbeskyttelsen vil bli om dette området vurderes kun å være et område der fartøyene har oppnådd en viss hastighet (3 knop).

Resultatene av modelleringen viser at en **erosjonsbeskyttelse anlagt med D₅₀ ≥ 3 cm, og en tykkelse på 10 cm** vil kunne tole økt strømhastighet selv når de største båtene benytter 75 % motoreffekt og starter fra 0 knop (Kvarts (3) i tabell 7).

Tabell 9. Inngangsparametere og modelleringsresultater for båter som frakter kvarts på 16 m vanddyb. Her er (1) at båten ligger i ro ved oppstart modellering og har motoreffekt på 40 %; (2) er at det modelleres for at båten er i 3 knop fart og benytter motoreffekt på 40 %; (3) er at båten ligger i ro ved oppstart modellering og benytter motoreffekt på 75 %; (4) er at det modelleres for at båten er i 3 knop fart og benytter motoreffekt på 75 %.

Parameter	Enhet	Kvarts (1)	Kvarts (2)	Kvarts (3)	Kvarts (4)
Inngangsparametere					
Propelldiameter	m	4,9	4,9	4,9	4,9
Effekt, hovedmotor	kW	5400	5400	5400	5400
% effekt		40 %	40 %	75 %	75 %
Effekt i modell	kW	2160	2160	4050	4050
Båthastighet	m/s	0	1,6	0	1,6
Vanddyb	m	16	16	16	16
Dyptgående	m	8,5	8,5	8,5	8,5
Dybde under propell	m	7,5	7,5	7,5	7,5
Modelleringsresultater					
Økt vannhastighet	m/s	1,1	0,8	1,3	1
D ₅₀	cm	2,0	0,95	3,4	1,9
Tykkelse erosjonslag (D ₅₀ · 3)	cm	6,0	2,9	10,1	5,6

Det minnes om at NGI ikke har faktiske data for dypgang for båten som er benyttet i modelleringen, og at dypgang er basert på et estimat.

6 Konklusjoner og vurderinger

Dimensjoneringen av erosjonssikring er beregnet ut fra forventet båttrafikk, seilingsmønster og fortøyning slik som tilfellet er i dag. Hvis det kommer inn skip med større motorkraft, skip som stikker dypere enn de som er benyttet i modellering eller det brukes kraftigere motoreffekt enn det som er brukt i beregningene, kan dette skade erosjonslaget. Skade på tildekkingslaget kan være både hull i tildekking som kan gi eksponering av forurenset sjøbunn under eller at tildekkingslaget samles i hauger, som kan gi lokalt redusert seilingsdyb. Det anbefales at tildekkingslaget følges opp jevnlig mtp. skader som kan komme av erosjon fra båttrafikk, spesielt dersom det har forekommet nød-manøvrering.

Erosjonsbeskyttelsen som er modellert her er kun for å beskytte tildekkingslaget og sedimentene under. Effekten av propellstrøm på kaikonstruksjoner eller nærliggende grunne sørvest for kaia er ikke vurdert.

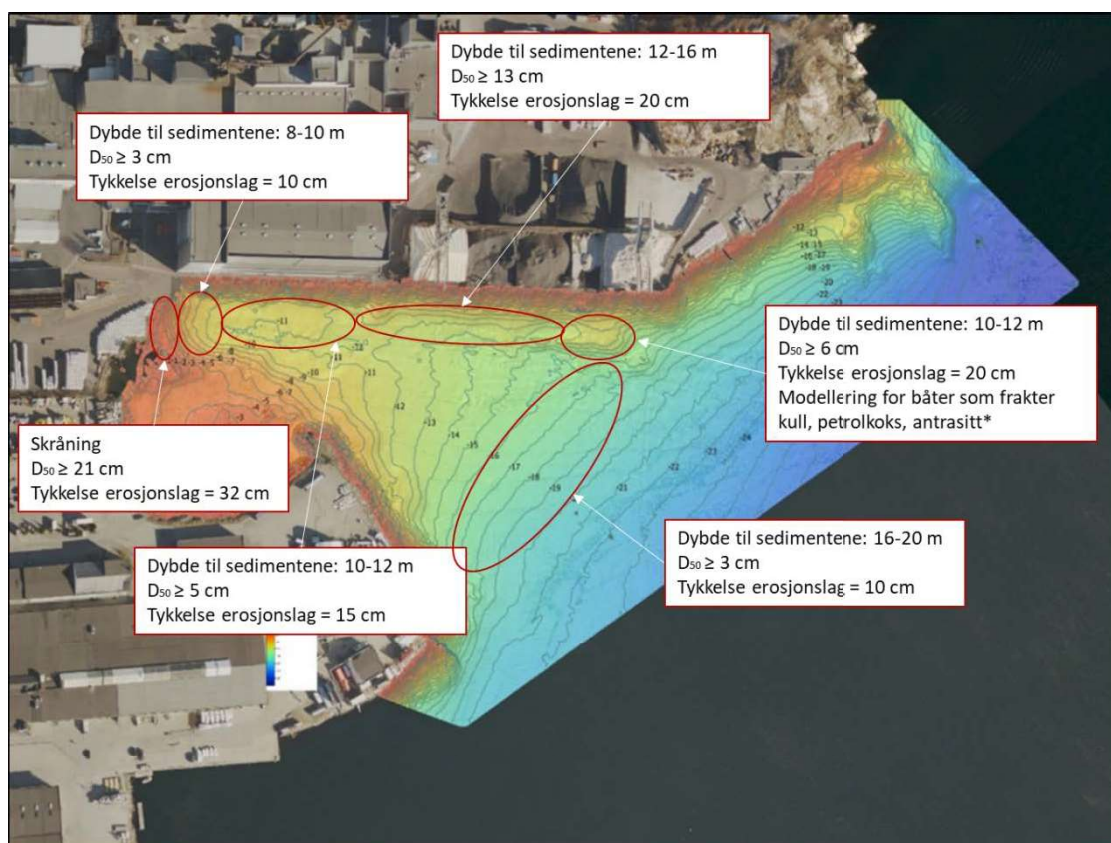
Tabell 8 viser resultatene fra de ulike områdene samlet for den båten eller varegruppa (ulik varer leveres med ulike fartøy og på ulike anløpsplasser) som er dimensjonerende for de ulike områdene av Fiskåbukta.

Tabell 10. Oppsummering av resultater for modellering for 40 % motoreffekt.

Dybde til sedimentene	$D_{50} \geq$ (cm)	Tykkelse erosjonslag (cm)	Dimensjonerende skip eller varegruppe
8 – 10 m	3	10	Bindemiddel
Skråning	21	32	Elektrodemasse
10 – 12 m	5	15	Bindemiddel
10 – 12 m, øst	6	20	Kull, petrolkoks, antrasitt*
12 – 16 m	13	20	Kvarts
16 – 20 m	3	10	Kvarts

* Kvartsbåter vil også kunne trafikkere i dette området, men om disse skal være dimensjonerende må det vurderes andre former for erosjonsbeskyttelse enn mineralske masser.

Resultatene fra modelleringen oppsummert grafisk i figur 15.



Figur 15. Grafisk oppsummering av resultatene fra modelleringen. * Kvartsbåter vil også kunne trafikkere i dette området, men om disse skal være dimensjonerende må det vurderes andre former for erosjonsbeskyttelse enn mineralske masser.

Det er også gjort en modellering basert på noe høyere motoreffekt (75 % av full effekt). Dersom erosjonssikringen skal dimensjoneres for høyere motoreffekt, vil en måtte gå opp noe på steinstørrelse og tykkelse av erosjonssikringen.

Hvis ønskelig, kan en nærmere vurdering av seilingsmønsteret i havna gi større detaljgrad for modelleringen. Vurderingen kan også benyttes i etterkant av utlegging av tildekking med erosjonsbeskyttelse, for å gi retningslinjer for hvor ulike skip kan manøvrere i bukta.

Erfaringsmessig vil det være behov for et tildekkingslag med tykkelse mellom 30 og 50 cm over de stedlige, forurensede sedimentene. Erfaringene gjelder for områder der det ikke foregår hyppig ankring av fartøyer. Dersom det er et ankringsområde, må det vurderes særskilt. Det må gjøres en detaljert vurdering av funksjonen av tildekkingslaget og oppbygning av dette for å sikre at tildekkingen hindrer spredning fra de forurensede sedimentene under, og at det samtidig legges ut på geoteknisk stabil måte.

Erosjonsbeskyttelsen er primært tilstede for å hindre at tildekkingsmassene som blir lagt ut ikke skal eroderes bort og som ville ført til at forurenset sjøbunn igjen eksponeres. Laget med erosjonsbeskyttelse er grovere enn det en ellers ville ha brukt som tildekkingsmasser, men vil på samme måte som tildekkingsand hindre partikkelspredning fra de forurensede sedimentene så lenge filterkriteriene overholdes.

Filterkriteriene er en sammenheng mellom kornstørrelsen på det underliggende, forurensede sedimentet, og tildekkingslaget. Ved å overholde filterkriteriene reduseres risiko for utvasking av finstoff, samtidig som det ikke vil bygge seg opp et overtrykk i sedimentet (Miljødirektoratet, 2016). Dersom filterkriteriene ikke overholdes, f.eks. hvis det legges grove tildekkingsmasser rett på finkornede stedlige sedimenter, er det større sannsynlighet for at de stedlige sedimentene går opp i tildekkingslaget over.

Filterkriteriene kan regnes ut fra formelen:

$$2 \cdot d_{15}(\text{sediment}) < d_{15}(\text{filter}) < 5 \cdot d_{85}(\text{sediment})$$

$$2 \cdot d_{15}(\text{filter}) < d_{15}(\text{erosjon}) < 5 \cdot d_{85}(\text{filter})$$

Dette kriteriet må oppfylles både i overgangen sediment til tildekkingsmasse og i overgangen mellom tildekkingen som skal hindre forurensningsspredning ($d_{x(\text{filter})}$) og laget som skal beskytte mot erosjon ($d_{x(\text{erosjon})}$). Dersom erosjonsbeskyttelsen skal benyttes som en del av tildekkingstykkelsen, må en derfor designe tildekkingen slik at filterkriteriene overholdes.

NGI har ikke kjennskap til at det er utført geotekniske borer i området. For å bestemme lagdeling (spesielt i de øvre 5 m), bør det gjøres en grunnundersøkelse og laboratorietesting av innsamlede prøver. Dette er viktig for stabilitetsberegningene, og grunnundersøkelsen bør gjennomføres før laboratorieanalysene.

Generelt bør tildekking utføres ved at arbeidet starter ytterst ved størst dyp og bygges innover mot land. Dette er for å redusere usikkerheten med tanke på stabilitet. Det vil være størst utfordringer knyttet til områder der det forekommer bløt leire (leire med høyt vanninnhold), samt om det forekommer bratte skråninger som skal tildekkes.

Fra undersøkelser gjort på sedimentene tidligere i prosjektet, kan det se ut som sedimentene blir mer finkorna med større dyp innenfor tiltaksområdet. Det er i områder der helningen antas å være relativt slak, basert på de gjennomførte undersøkelsene med sonar. Fra sonar ser det ut til at det ikke forekommer bratte skråninger innenfor tiltaksområdet, foruten de skråninger som er forbundet med kaikonstruksjoner. Det antas at utlegging av et tildekkingslag med erosjonsbeskyttelse vil være relativt uproblematisk i områder med slak helning, men det må likevel gjøres en vurdering av dette i en detaljprosjekteringsfase.

I prosjekteringsfasen bør det gjøres tester for å bestemme bæreevne for de stedlige sedimentene. Dette er for å se på hvordan lasten av tildekkingslaget vil påvirke de stedlige sedimentene. For eventuelle skråninger må en se på stabiliteten i skråninger, og om det er behov for å lage til støttefyllinger for å hindre utglidninger. For tildekkingslaget vil f.eks. en helning på 1:1,5 trolig være uproblematisk. Prosjekteringen skal gjennomføres i tråd med gjeldende regelverk og standarder.

7 Referanser

NGI (1992)

Geoteknisk dimensjonering i forbindelse med kaibyggning, Intern veiledning nr.03. Rapportnr.: 520130-03, datert: 1992-01-01

NGI (2002)

Propellindustert strømningshastighet. Prosjektnr.: 20021244. Datert: 2002-12-11

NIVA (2018)

Tiltaksplan for forurenset sjøbunn utenfor Elkem Carbon AS, Kristiansand. Rapportløpenummer: 7276-2018, datert: 2018-05-28

Miljødirektoratet (2015)

Veileder for risikovurdering av forurenset sediment. Veileder M-409

Miljødirektoratet (2016)

Testprogram for tildekkingsmasser. Veileder M-411

Vedlegg A

DATA FOR SKIP SOM ANLØP FISKÅ I 2019

Fartøy	Kaiposisjon	Propelldiameter (m)	Motoreffekt (kW)	Dypgang(m)
Kwintebank	5	4.2	3840	4
Arklow Villa	3	3.2	1740	6.6
Douwe-S	3	3.2	2010	5.6
Wilson Corinth	3	2.5	2550	5.8
Pluto	3	2.9	1180	4.3
Wilson Mistral	3	2.8	1800	4.2
Titran	3	3.25	1800	4.1
Wilson Gijon	3	2.5	1470	5.5
Wilson Lahn	3	2.9	1500	5
Hagland Boss	5	2.5	1500	5.6
Fiducia	3	3.2	2010	
Arklow Faith	3	3.4	1980	6.5
Froan	3	2.5	1240	5.8
Ferro	3	2.9	1180	3.2
Wilson Fedje	3	3.4	2040	5.1
Brufjell	3	3.2	1800	4
Oslo Fjord 1	5	4.9	5400	
Naos	3	3.2	1800	4.6
Delia	3	2.6	2640	3.5
Wilson Bilbao	3	2.5	1500	3.5
Wilson Mosel	3	2.4	600	3.3
Eems Exe	3	2.6	1520	5.5
Arklow Rainbow	3	3	1499	3.2
Wilson Leith	3	2.5	1500	5
Wilson Heron	3	3.2	2080	6
Plato	3	2.9	1180	3.7
Wilson Main	3	2.4	600	4.3
Wilson Rotterdam	3	2.022	1326	4
Arklow Future	3	3.4	1980	
Wilson Husum	3	3.5	2080	5.6
Lindo	4	2.3	1497	4.7
Wilson Luga	3	2.4	1500	3.4
Wilson Mersey	3	2.6	1500	4.5
Torpo	3	2.9	1180	
Buvik	3	2.4	1520	3.3
Wilson Odra	3	2.6	1500	4.7
Arklow Rover	3	3	1499	6
Fluvius Kenn	3	2.6	1845	3.5
Frakt Fjord	3	3.4	1860	4
MT Stella Virgo	4	3.5	2880	6.2
MT Unitar	4	2	1950	6.1
MT Viscaria	4	1.9	993	4.6
Kristian with	2	2.6	1980	5.5
Karmsund	1	2.7	1720	4.4

Vedlegg B

MODELLERINGSRESULTATER

Innhold

- B1: Modelleringsresultater for 8 m dybde, Karmsund, 40 % motoreffekt
- B2: Modelleringsresultater for 8 m dybde, Lindo, 40 % motoreffekt
- B3: Modelleringsresultater for 8 m dybde, Karmsund, 75 % motoreffekt
- B4: Modelleringsresultater for 8 m dybde, Lindo, 75 % motoreffekt
- B5: Modelleringsresultater for steinfylling, Karmsund, 40 % motoreffekt
- B6: Modelleringsresultater for steinfylling, Karmsund, 75 % motoreffekt
- B7: Modelleringsresultater for 10 m dybde, Karmsund, 40 % motoreffekt
- B8: Modelleringsresultater for 10 m dybde, Kristian With, 40 % motoreffekt
- B9: Modelleringsresultater for 10 m dybde, bindemiddel, 40 % motoreffekt
- B10: Modelleringsresultater for 10 m dybde, Karmsund, 75 % motoreffekt
- B11: Modelleringsresultater for 10 m dybde, Kristian With, 75 % motoreffekt
- B12: Modelleringsresultater for 10 m dybde, bindemiddel, 75 % motoreffekt
- B13: Modelleringsresultater for 10 m dybde øst, kull etc., 40 % motoreffekt
- B14: Modelleringsresultater for 10 m dybde øst, kull etc., 75 % motoreffekt
- B15: Modelleringsresultater for 10 m dybde øst, kvarts, 40 % motoreffekt
- B16: Modelleringsresultater for 12 m dybde, kull etc., 40 % motoreffekt
- B17: Modelleringsresultater for 12 m dybde, bindemiddel, 40 % motoreffekt
- B18: Modelleringsresultater for 12 m dybde, kvarts, 40 % motoreffekt
- B19: Modelleringsresultater for 12 m dybde, kull etc., 75 % motoreffekt
- B20: Modelleringsresultater for 12 m dybde, bindemiddel, 75 % motoreffekt
- B21: Modelleringsresultater for 12 m dybde, kvarts, 75 % motoreffekt
- B22: Modelleringsresultater for >16 m dybde, kvarts, 40 % motoreffekt
- B23: Modelleringsresultater for >16 m dybde, kvarts, 40 % motoreffekt, 3 knop
- B24: Modelleringsresultater for >16 m dybde, kvarts, 75 % motoreffekt
- B25: Modelleringsresultater for >16 m dybde, kvarts, 75 % motoreffekt, 3 knop

Inngangsdata		Dypgående/ Propelldyp
Dybde under propell	3.6 m	8 4.4 m
Avstand bak propell	20.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"

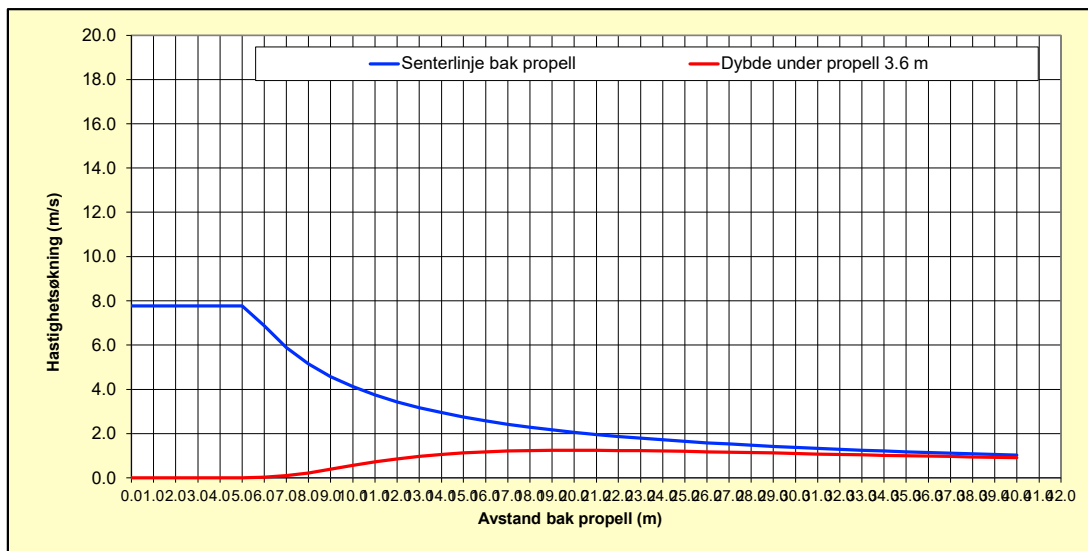
Resultat	
Økt vannhastighet	1.2 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	40 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	29.4 mm



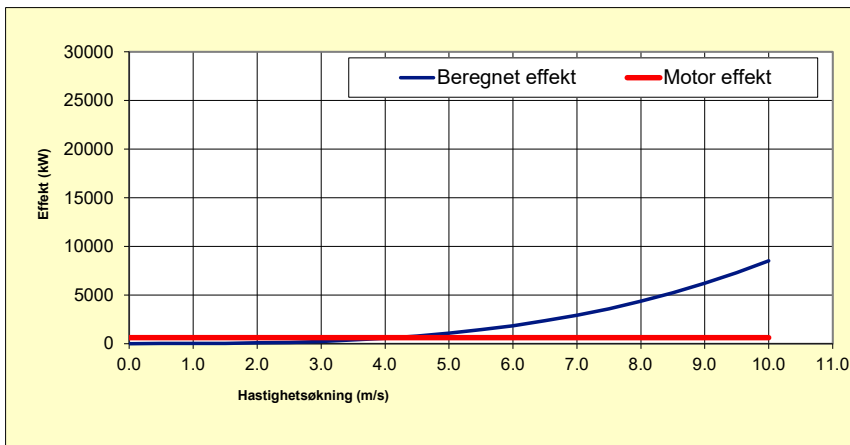
Inngangsdata	
Effekt W	599 kW
Propell diameter	2.3 m
Båthastighet	0.0 m/s

Lik 0 før båten forflytter seg

Inngangsdata effekt W	
Power use	40 %
Hovedmotor	1497 kW

Resultat	
Økt vannhastighet bak propell	4.1 m/s

Grafisk kontroll	
Min hastighetsøkning	0 m/s
størst hastighetsøkning	10 m/s



Inngangsdata		Dyppgående/ Vann dyp Propell dyp	
Dybde under propell	3.6 m	8	4.4 m
Avstand bak propell	18.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

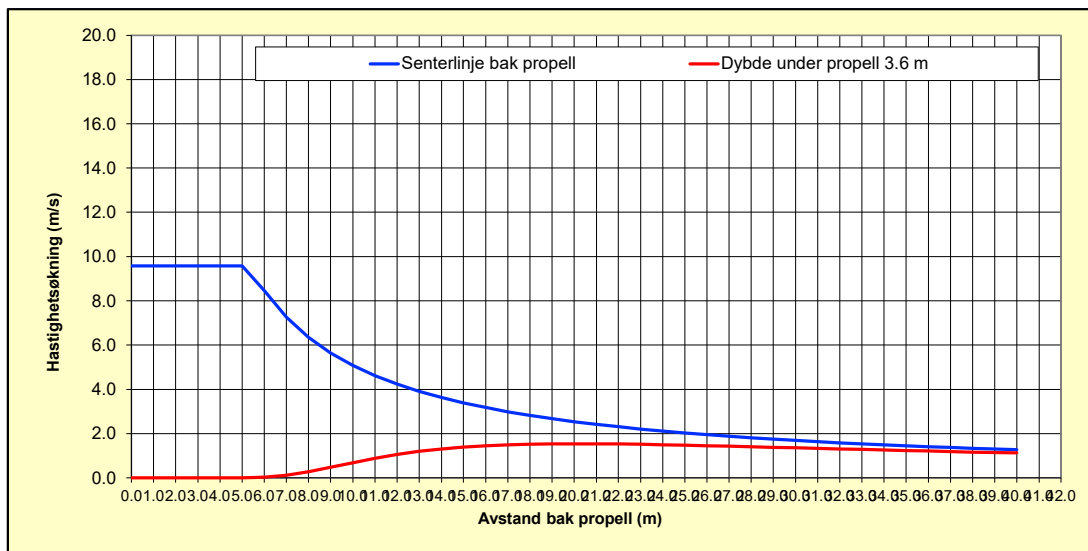
Resultat	
Økt vannhastighet	1.5 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	40 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	48.2 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	3.3 m	8	4.7 m
Avstand bak propell	18.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

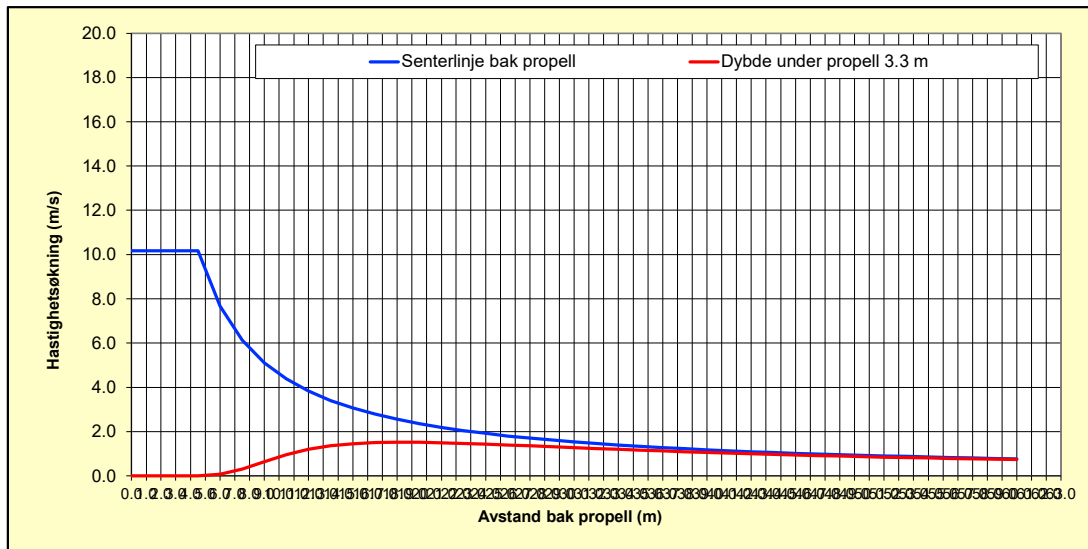
Resultat	
Økt vannhastighet	1.5 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	48.1 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	0.0 m	8	8 m
Avstand bak propell	15.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

Resultat	
Økt vannhastighet	2.7 m/s

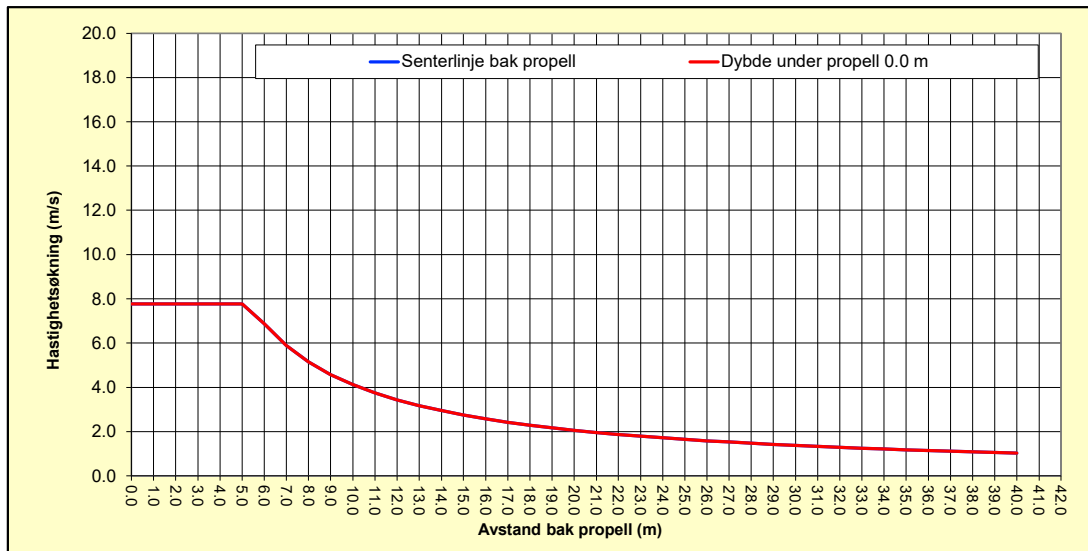
Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	40 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	210.8 mm

316.152029



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp / Propell dyp	
Dybde under propell	0.0 m	8	8 m
Avstand bak propell	15.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

Resultat	
Økt vannhastighet	3.4 m/s

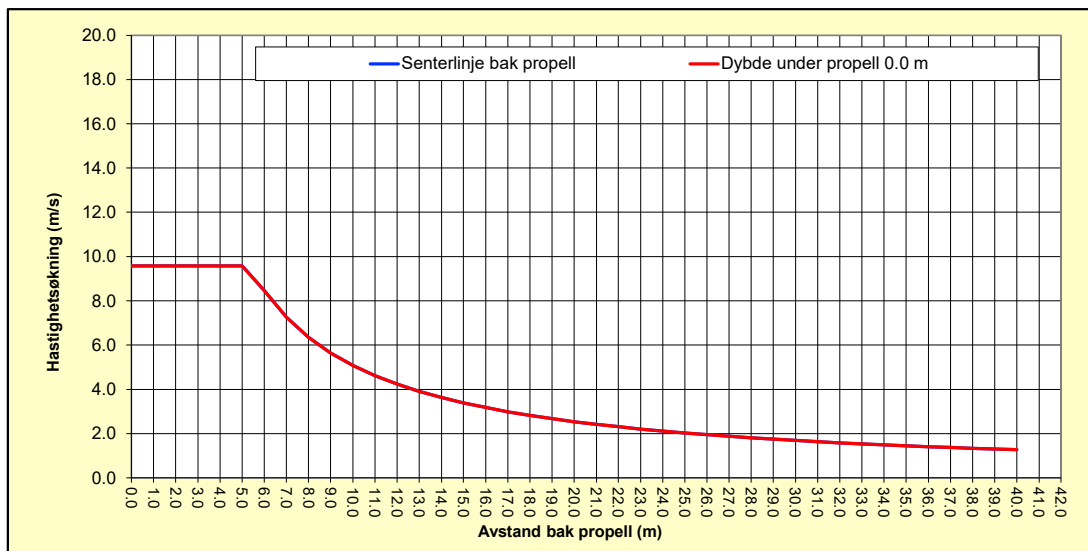
Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	40 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	355.9 mm

533.822695



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	5.6 m	10	4.4 m
Avstand bak propell	30.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

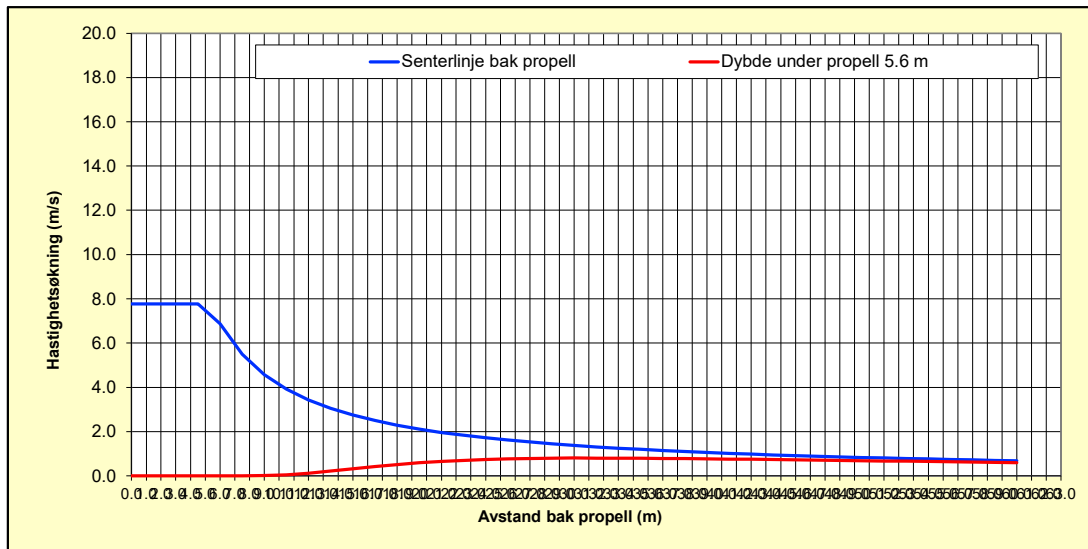
Resultat	
Økt vannhastighet	0.8 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	9.7 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	4.5 m	10	5.5 m
Avstand bak propell	27.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

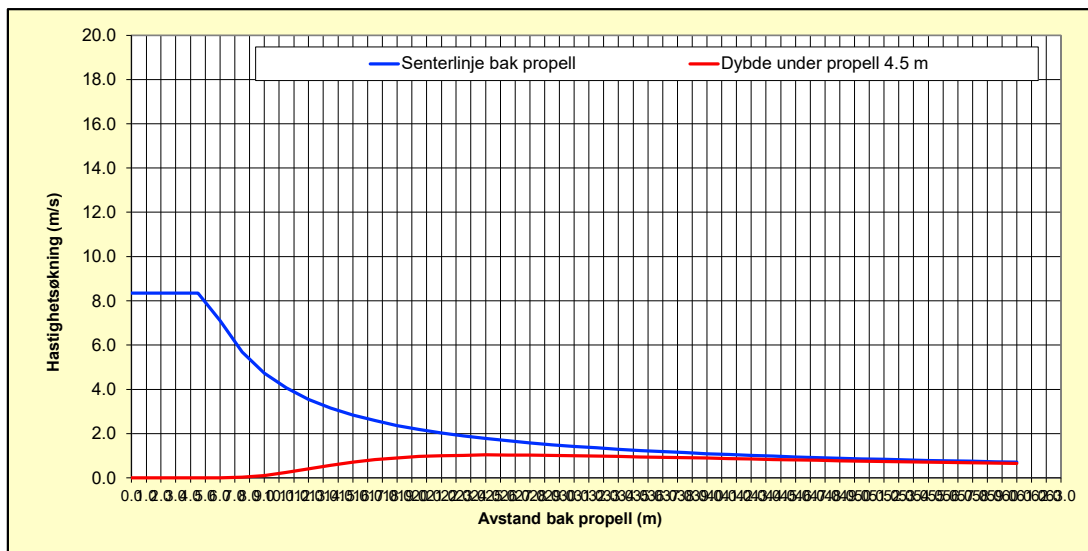
Resultat	
Økt vannhastighet	1.0 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	18.1 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	3.8 m	10	6.2 m
Avstand bak propell	21.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

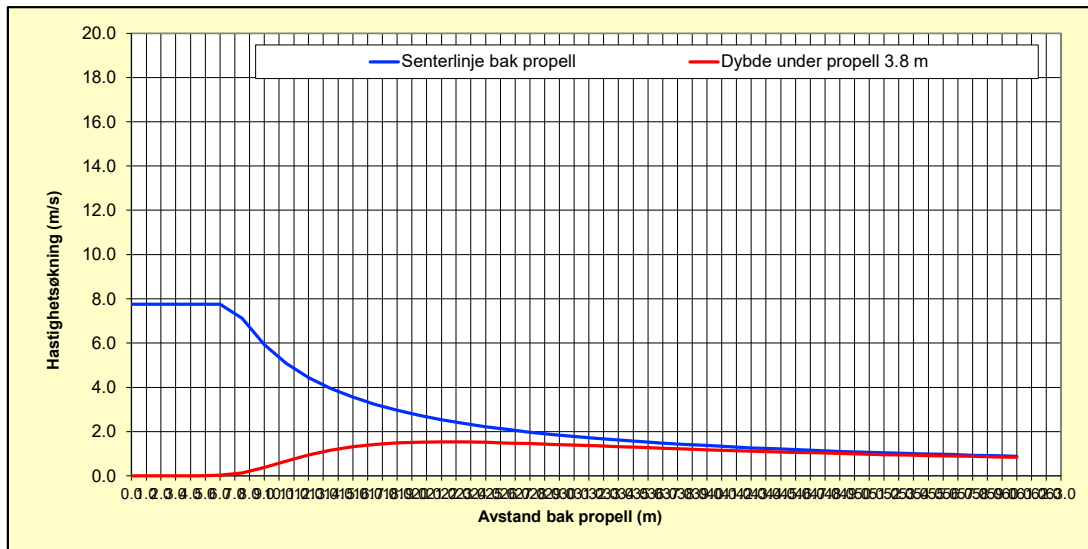
Resultat	
Økt vannhastighet	1.5 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	49.0 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	5.6 m	10	4.4 m
Avstand bak propell	30.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

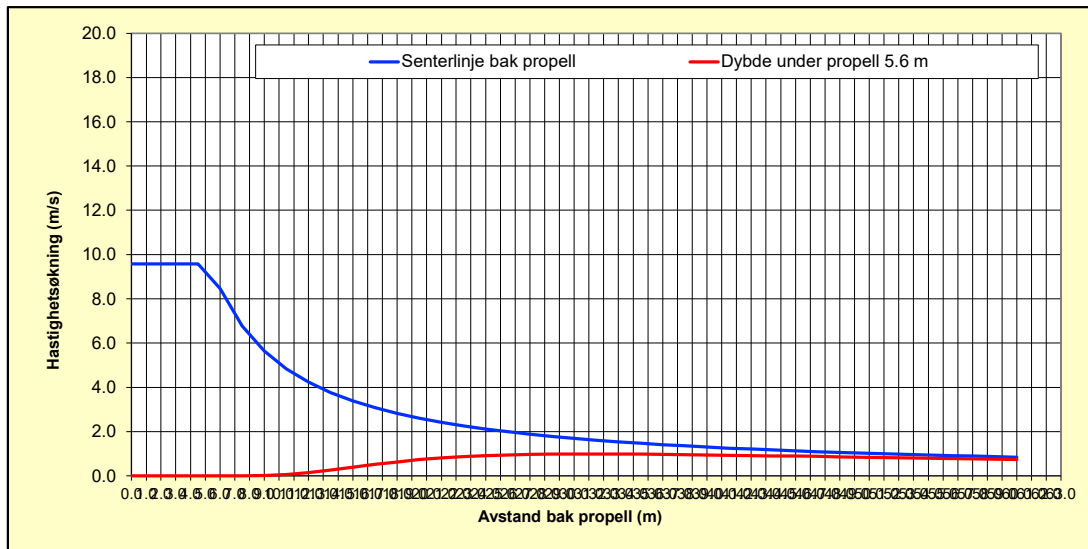
Resultat	
Økt vannhastighet	1.0 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	16.4 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vanndyp	Propelldyp
Dybde under propell	4.5 m	10	5.5 m
Avstand bak propell	27.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

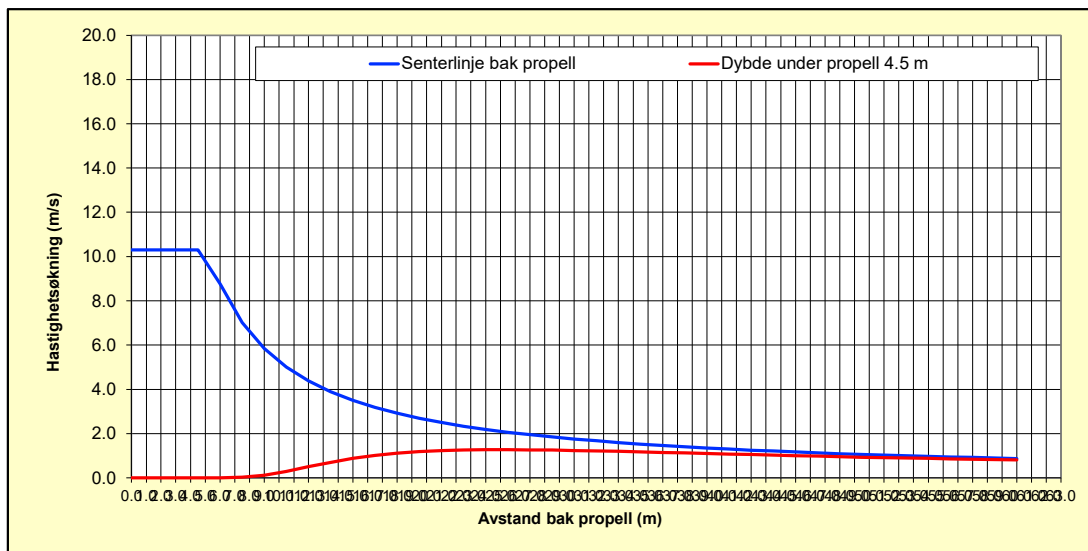
Resultat	
Økt vannhastighet	1.3 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	30.5 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	3.8 m	10	6.2 m
Avstand bak propell	21.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

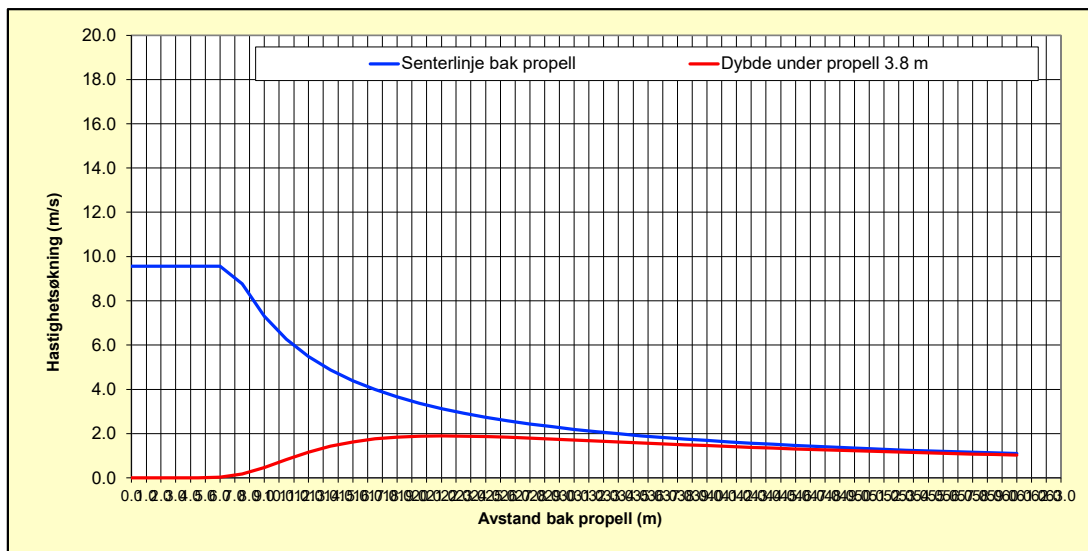
Resultat	
Økt vannhastighet	1.9 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	82.8 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	3.4 m	10	6.6 m
Avstand bak propell	20.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

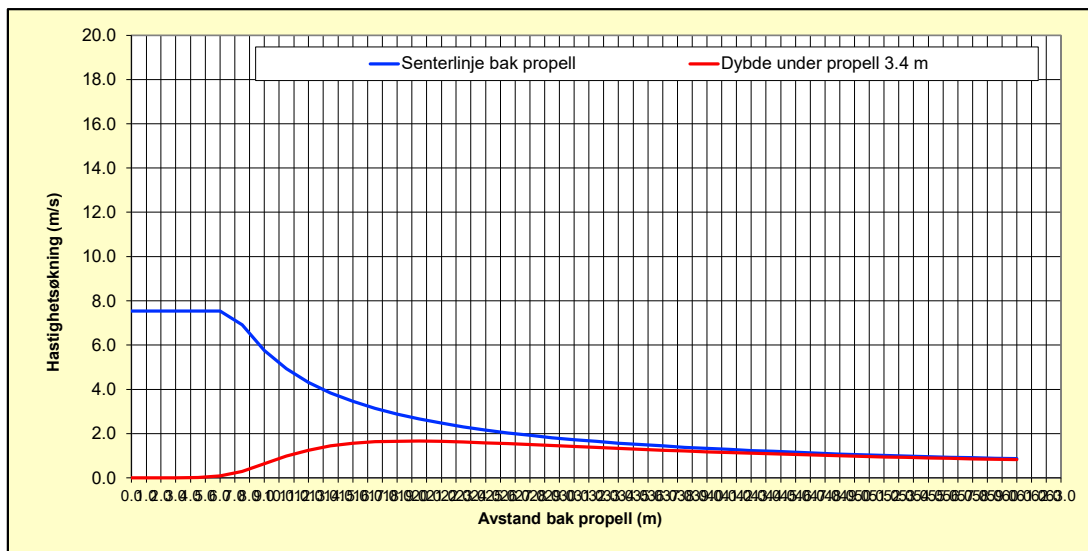
Resultat	
Økt vannhastighet	1.7 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	59.7 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	3.4 m	10	6.6 m
Avstand bak propell	18.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

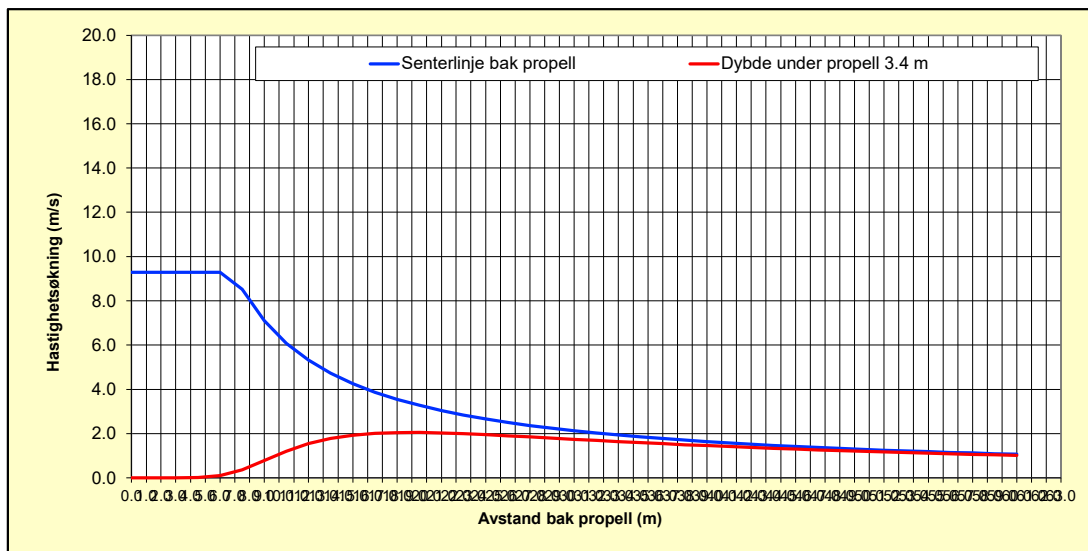
Resultat	
Økt vannhastighet	2.0 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	101.0 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	1.5 m	10	8.5 m
Avstand bak propell	0.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

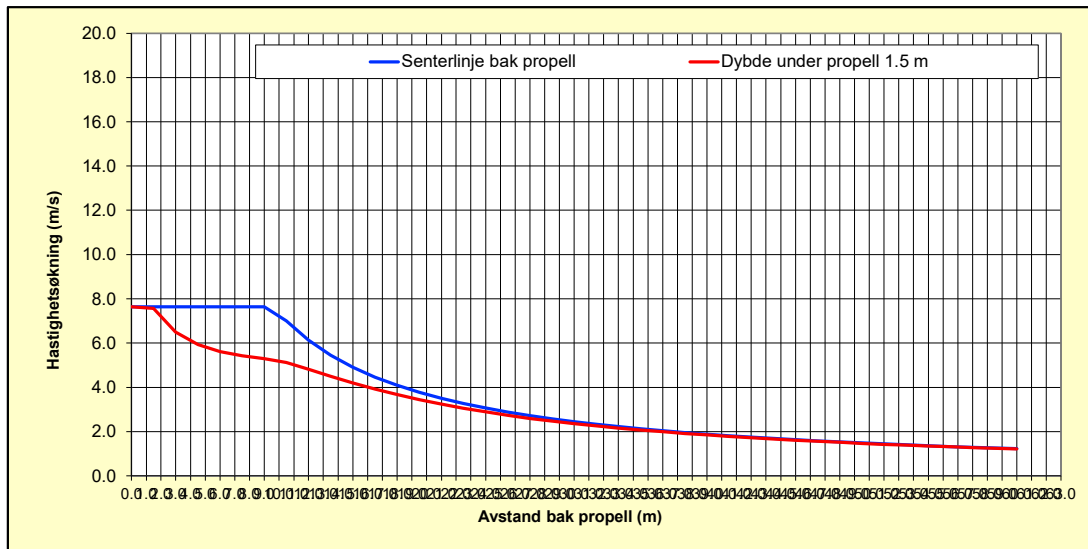
Resultat	
Økt vannhastighet	7.6 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	2 724.8 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	5.4 m	12	6.6 m
Avstand bak propell	33.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

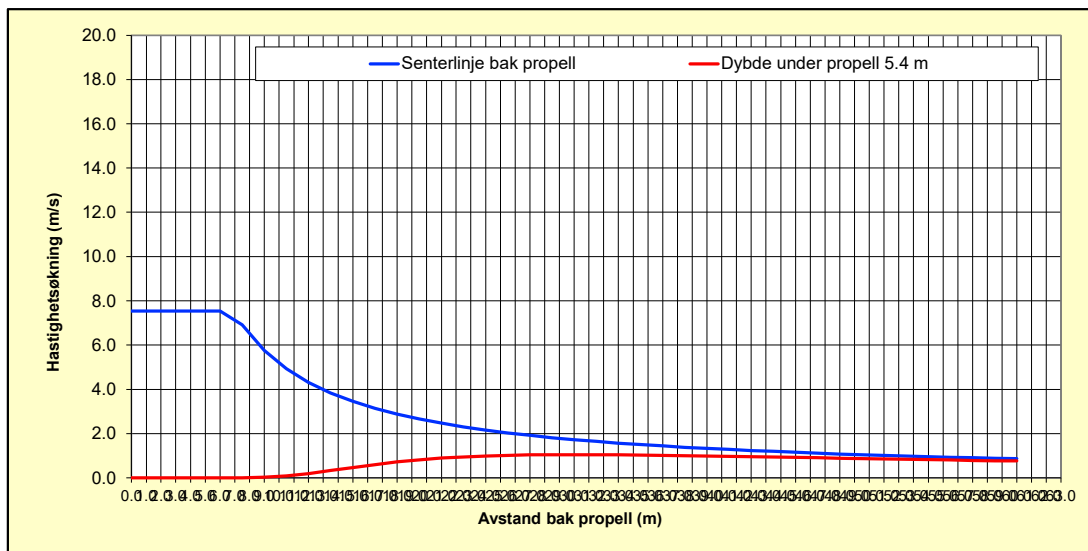
Resultat	
Økt vannhastighet	1.0 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	18.5 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	4.8 m	11	6.2 m
Avstand bak propell	27.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

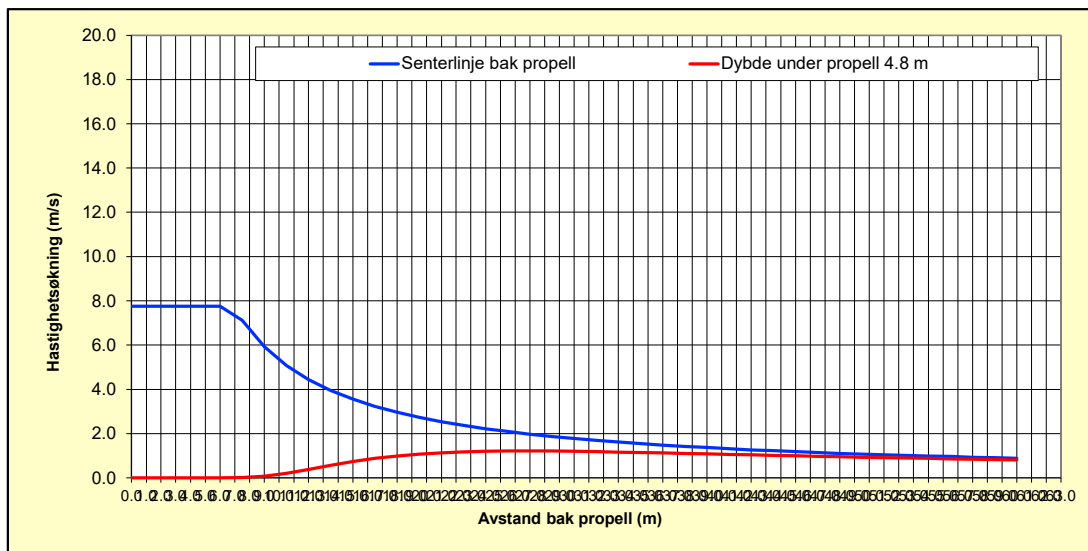
Resultat	
Økt vannhastighet	1.2 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	27.3 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	3.5 m	12	8.5 m
Avstand bak propell	21.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

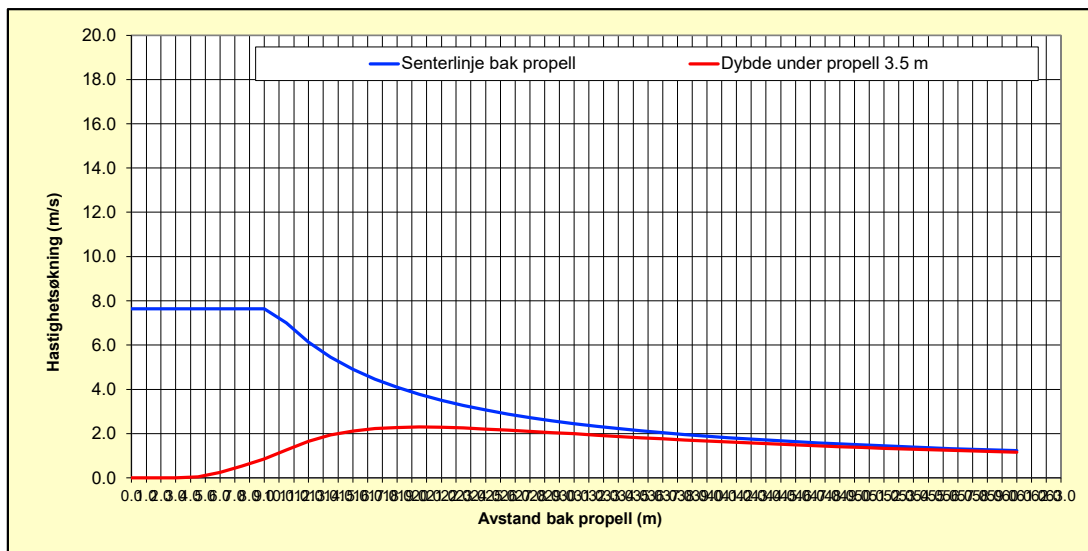
Resultat	
Økt vannhastighet	2.3 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	132.7 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	5.4 m	12	6.6 m
Avstand bak propell	31.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

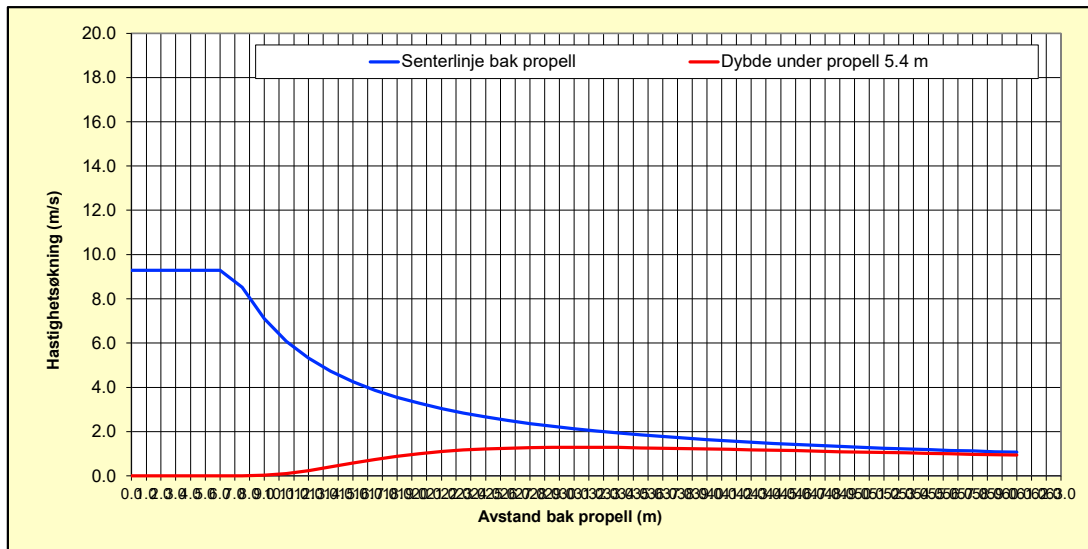
Resultat	
Økt vannhastighet	1.3 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	31.9 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	4.8 m	11	6.2 m
Avstand bak propell	27.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

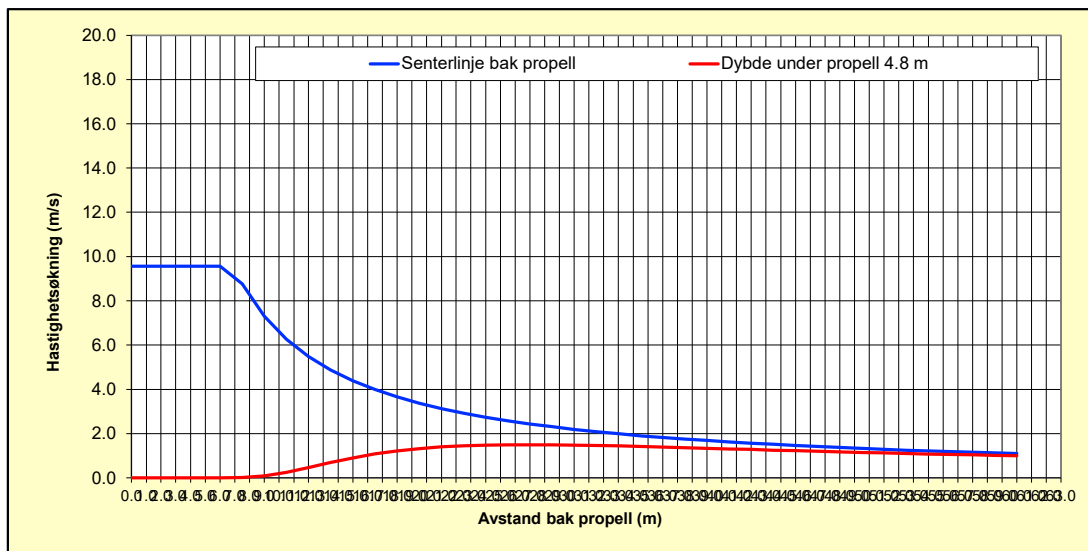
Resultat	
Økt vannhastighet	1.5 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	46.1 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	3.5 m	12	8.5 m
Avstand bak propell	21.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

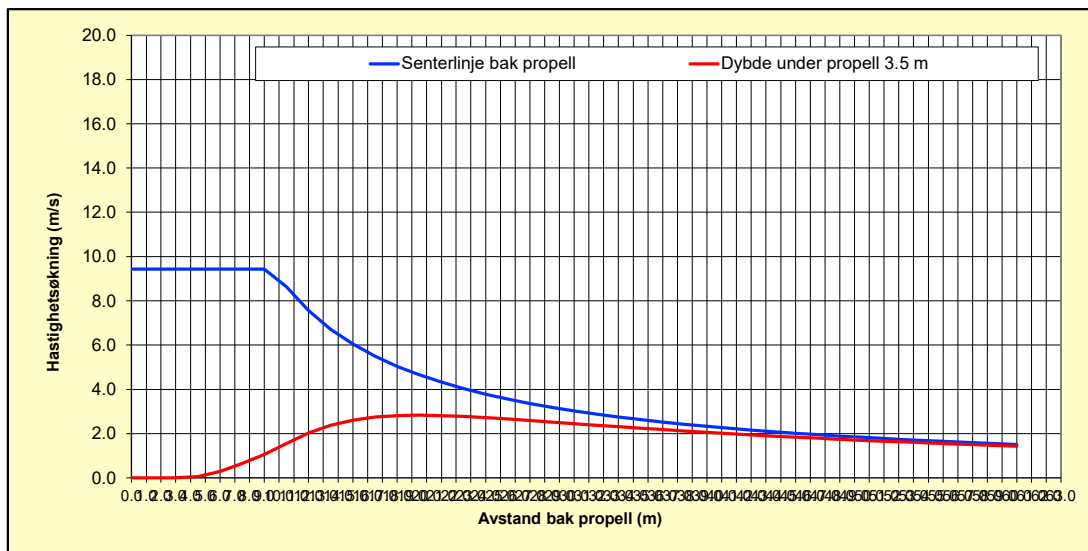
Resultat	
Økt vannhastighet	2.8 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	224.0 mm



Inngangsdata			Dyppgående/ Vann dyp	Propell dyp
Dybde under propell	7.5 m		16	8.5 m
Avstand bak propell	40.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"		

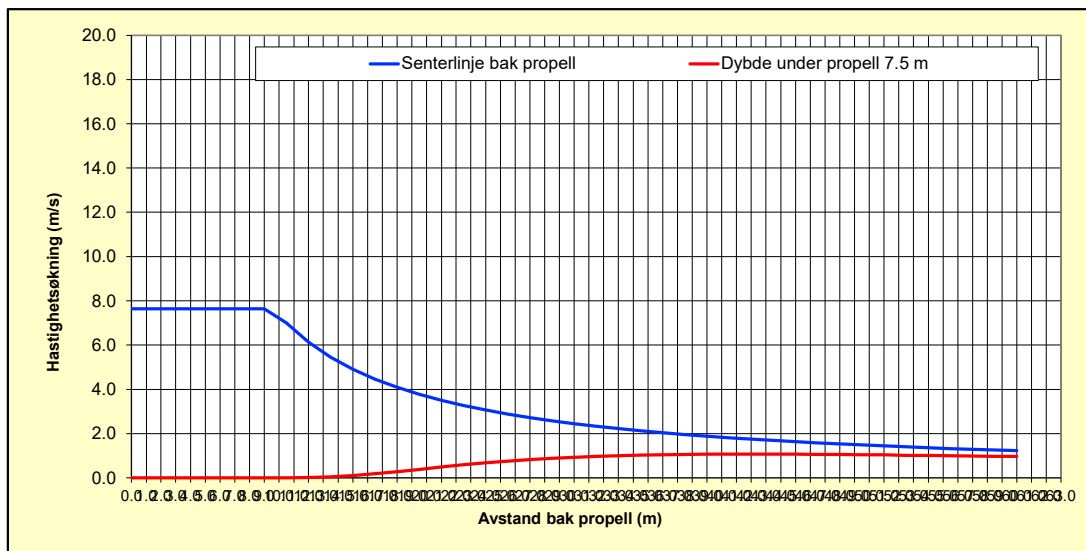
Resultat	
Økt vannhastighet	1.1 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	60 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	19.9 mm



Inngangsdata		Dypgående/ Vann dyp / Propell dyp	
Dybde under propell	10.4 m	16	5.6 m
Avstand bak propell	54.0 m	Toppunkt på kurve "Dybde under propell"	

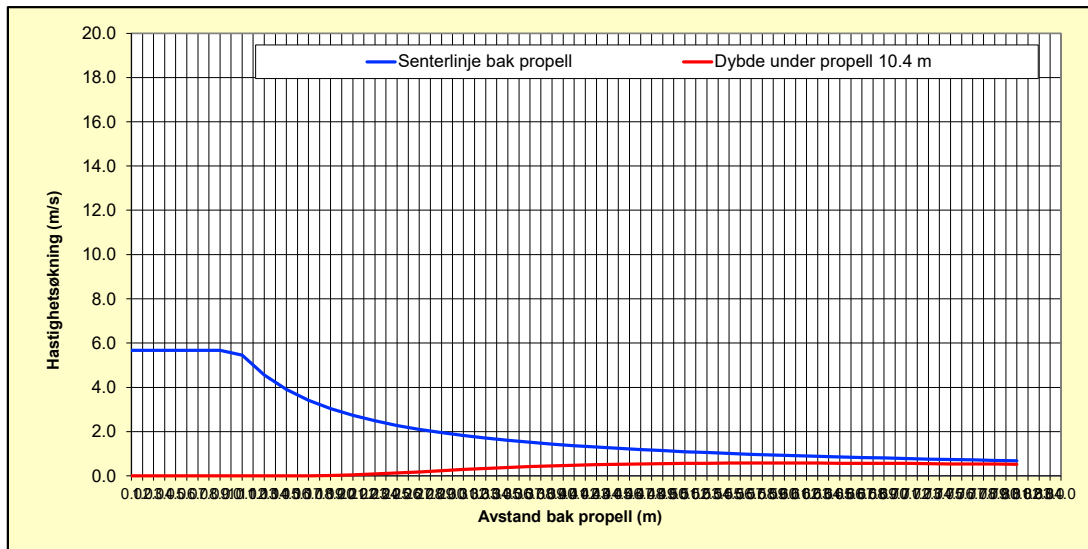
Resultat	
Økt vannhastighet	0.6 m/s

Dimensjonerende strømtall hvis avstand bak propell valgt til maks (fra graf)

Grafisk kontroll	
Avstand fra propell	80 m

Endrer x-akse

D50	
Beregnet fra vannhastighet	4.1 mm



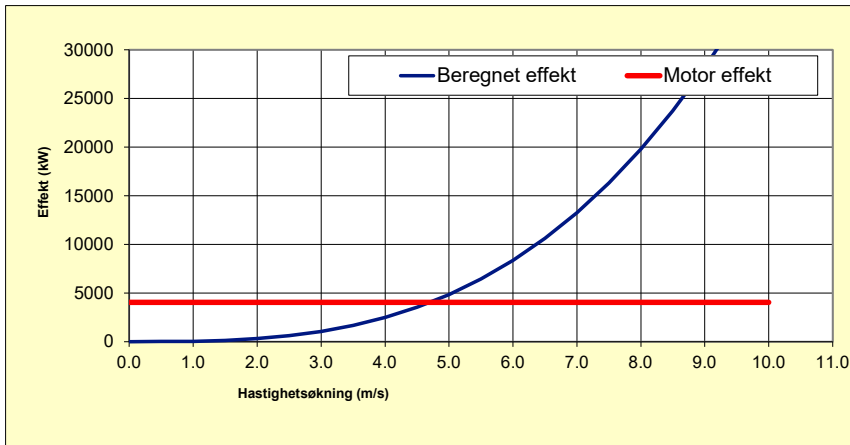
Inngangsdata	
Effekt W	4050 kW
Propell diameter	4.9 m
Båthastighet	0.0 m/s

Lik 0 før båten forflytter seg

Inngangsdata effekt W	
Power use	75 %
Hovedmotor	5400 kW

Resultat	
Økt vannhastighet bak propell	4.7 m/s

Grafisk kontroll	
Min hastighetsøkning	0 m/s
størst hastighetsøkning	10 m/s



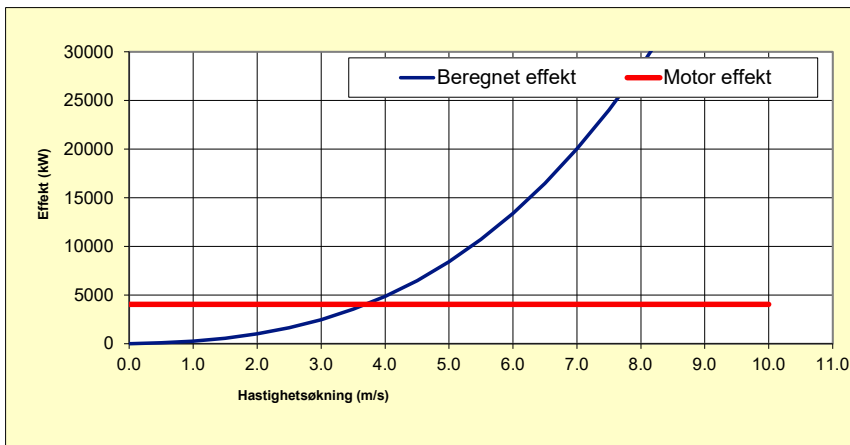
Inngangsdata	
Effekt W	4050 kW
Propell diameter	4.9 m
Båthastighet	1.6 m/s

Lik 0 før båten forflytter seg

Inngangsdata effekt W	
Power use	75 %
Hovedmotor	5400 kW

Resultat	
Økt vannhastighet bak propell	3.7 m/s

Grafisk kontroll	
Min hastighetsøkning	0 m/s
størst hastighetsøkning	10 m/s



Dokumentinformasjon/Document information		
Dokumenttittel/Document title Modellering av erosjonsbeskyttelse som del av tildekkingslag		Dokumentnr./Document no. 20200242-01-R
Dokumenttype/Type of document Rapport / Report	Oppdragsgiver/Client NIVA	Dato/Date 2020-11-04
Rettigheter til dokumentet iht kontrakt/ Proprietary rights to the document according to contract NGI		Rev.nr.&dato/Rev.no.&date 0 /
Distribusjon/Distribution BEGRENSET: Distribueres til oppdragsgiver og er tilgjengelig for NGIs ansatte / LIMITED: Distributed to client and available for NGI employees		
Emneord/Keywords Forurenset sjøbunn, erosjonsbeskyttelse, propellersjon		

Stedfesting/Geographical information	
Land, fylke/Country Norge, Agder	Havområde/Offshore area
Kommune/Municipality Kristiansand	Felt navn/Field name
Sted/Location Elkem Carbon	Sted/Location
Kartblad/Map	Felt, blokknr./Field, Block No.
UTM-koordinater/UTM-coordinates Sone: Øst: Nord:	Koordinater/Coordinates Projeksjon, datum: Øst: Nord:

Dokumentkontroll/Document control					
Kvalitetssikring i henhold til/Quality assurance according to NS-EN ISO9001					
Rev/Rev.	Revisjonsgrunnlag/Reason for revision	Egenkontroll av/Self review by:	Sidemanns-kontroll av/Colleague review by:	Uavhengig kontroll av/Independent review by:	Tverrfaglig kontroll av/Inter-disciplinary review by:
0	Originaldokument	2020-11-02 Gøril Aasen Slinde	2020-11-02 Espen Eek		2020-11-02 Siamak Feizi

Dokument godkjent for utsendelse/Document approved for release	Dato/Date 5. november 2020	Prosjektleder/Project Manager Gøril Aasen Slinde
---	--------------------------------------	--

NGI (Norges Geotekniske Institutt) er et internasjonalt ledende senter for forskning og rådgivning innen ingeniørrelaterte geofag. Vi tilbyr ekspertise om jord, berg og snø og deres påvirkning på miljøet, konstruksjoner og anlegg, og hvordan jord og berg kan benyttes som byggegrunn og byggemateriale.

Vi arbeider i følgende markeder: Offshore energi – Bygg, anlegg og samferdsel – Naturfare – Miljøteknologi.

NGI er en privat næringsdrivende stiftelse med kontor og laboratorier i Oslo, avdelingskontor i Trondheim og datterselskaper i Houston, Texas, USA og i Perth, Western Australia.

www.ngi.no

NGI (Norwegian Geotechnical Institute) is a leading international centre for research and consulting within the geosciences. NGI develops optimum solutions for society and offers expertise on the behaviour of soil, rock and snow and their interaction with the natural and built environment.

NGI works within the following sectors: Offshore energy – Building, Construction and Transportation – Natural Hazards – Environmental Engineering.

NGI is a private foundation with office and laboratories in Oslo, a branch office in Trondheim and daughter companies in Houston, Texas, USA and in Perth, Western Australia

www.ngi.no

Vedlegg C. Utslipp og kildekontroll ved Elkem Carbon

Tabell 1. Oversikt over arealer og estimerte utslipp for alle delområder som ble kartlagt i 2018 (kg/år?)

Delområde	Est. Utslipp	Brukt som 2018-verdi	Areal [m2]	Bidrag utslipp
PVP1	2 - 10	5,8		Søl fra nedlegging og spretting av sylindere i hallen Utslipp fra feiebil, søl og overflatevann på bekplanet
OVP1	10,4 - 21	18	8700	Overflatevann fra takarealer, trafikk og andre nærområder nord og øst for Massefabrikken
OVP2	1,2 - 2,4	2,4	2000	Overflatevann fra takflater og trafikkområder sør for Massefabrikken
OVP3	Går til OVP4	(4)	8000	Overflatevann fra takflater og trafikkområder nord og vest for Massefabrikken
OVP4	15 (10 - 20)	20		Overflatevann fra OVP3 + vann fra forsøksstasjon og kanaler
OVP5	0,6 - 5	5	10000	Overflatevann fra veier og ferdigvarelager på Strandveien
OVP6	0,9 - 4	4	1500	Overflatevann fra området utenfor Skipningskontor
OVP7	1 - 2	2		Lossestasjon for bindemiddel
OVP8	0,1 - 0,4	0,4	1500	Overflatevann langs hovedkai - trafikk og lagring av ferdigvarer
OVP9	0,1 - 2	2	2000	Overflatevann fra ferdigvarelager og trafikkområde på kaia Overflatevann fra lagring av ferdigvarer ved sjøvannsstasjon, ved vaskeplass
OVP10	0,8 - 3	3	1300	
OVP11	1 - 5	5	800	Vaskeplass ved sjøvannsstasjon
OVP12	0,1 - 1	1	1000	Overflatevann fra lagring av ferdigvarer på kaia
Sum overflatevannutslipp		62,8		

Tabell 2 Status på tiltak for å redusere PAH-utslipp til sjø per delområde

Delområde	Est. Utslipp	Bidrag utslipp	Id nr	Tiltak	Realisert PAH red	Kommentar
PVP1	2 - 10	Søl fra spretting av sylindere	PVP-01	Bytte ut dårlige former og krakker, lage rutine for planmessig utskifting	0,4	Oppdatere rutine og følge opp
		Søl fra aktivitet i hallen + kjøring	PVP-02	Rensing (høytrykkspyling) av gulv - prøveperiode	0,6	Evaluering av test -> fast, daglig feiing med høytrykksfeiebil
		Utslipp fra feiebil på bekplanet		Rute om vann fra bekplan - settling i brikketkum	-0,5	Vann rutet om i uke 46
OVP1	18	Utrede renseløsning		Test med Skild mai-juni 19	2	Pilottest vellykket - satt på vent pga omfang
		Observert tjære i fjellsprekk	OVP1-01	Onlinemåler - susp.stoff + nedbørsmåling	3	Logging pågår i nov og des.
		Gamle rester i "bakgård"	OVP1-03	Støpe oppsamling for tjære fra fjellsprekk	1	Lekkasje er stoppet - må følge med videre
		Unngå søl fra bekplan og hall til overvannet	OVP1-06	Rydd søl mellom bekplan og massefabrikk	2	Opprydding/fjerning av søppel gjennomført
		Støv og partikler pga transport	OVP1-07	Føre vann fra bekplan via brikettgrop til prosessvann	6	Vann rutet om
			OVP1-07	Feiing med høytrykks feiebil	2	Test gjennomført, bra resultat
			OVP1-08	Kartlegge bidrag fra takvann- oppsamling - forsøk NIVA/Innoventus Sør		Forsøk med Innoventus Sør/NIVA
			OVP2-03	Kartlegge takvann (prøve) og lede bort vann		Unngå rent vann i forurenset område
OVP2	2,4	Nedbør via tak	OVP2-04	Feiing med høytrykks feiebil	0,5	Test gjennomført, bra resultat, fast rutine
		Støv og partikler pga transport		Grovrensing i overvannskum - test av partikkelfanger	1,5	Innmat i kum, funker bra, følges opp av infrastruktur Rulle ut på flere kummer.
OVP3	Går til OVP4	Støv og partikler pga transport	OVP3-04	Feiing med høytrykks feiebil	2	Test gjennomført, bra resultat
OVP4	20	Tjæreklumper i kanal	OVP3-03	Oppsamling av vann i basseng m/overrenning	7,5	Test, behov for varig løsning, inkl. rutine for tømning
		Nedbør via tak	OVP3-05	Rensing av overflatevann fra OVP3	1	Ideer, Cowi/Aquateam er involvert
		Tømming av liten fangdam, fast fr	OVP3-	Rensing av overflatevann fra OVP3	2	Fast rutine for tømning
OVP5	5	Søl fra lagring av ferdigvarer	OVP5-03	Grovrensing i overvannskum - test av partikkelfanger	4	Innmat i kum, funker bra, følges opp av infrastruktur Rulle ut på flere kummer.
		Partikler fra transport og søl av produkter	OVP6-03	Etablere 3 kummer i serier for oppsamling av vann og hindre direkte avrenning til sjø	3	Etablering av kum med rister, for å fange opp overflatevannet, støpt kant mot sjø for å unngå PAH-sjø
OVP6	4					Gjennomgang med operatører, rutine for oppsamling av søl, nye plugg til fangdam
OVP7	2	Søl av bindemiddel ved lossing	OVP7-01	Overvåke lossing, oppfølging av prosedyrer	1,5	
OVP8	0,4	Søl fra lagring av ferdigvarer + transport	OVP8-02	Feiing med liten feiebil	0,3	Test gjennomført, bra resultat
OVP9	2	Søl fra lagring av ferdigvarer	OVP9-02	Feiing med liten feiebil	1,5	Test gjennomført, bra resultat
OVP10	3	Lagring av uemballert masse	OVP9-02	Fjerne produkter, standard for lagring		All uemballert masse lagres innendørs- avklare med Solar ang dekkmassebeinge
		Søl fra lagring av produkter	OVP10-03	Avvikle område for lagring av elektrodemasse	2,0	Daglig feiing av uteområder og veier
OVP11	5	Partikler/søl fra feiebil	OVP11-03	Lage mur mot sjøkant - hindre avrenning til sjø	3	Tømming av feiebil på bekplanet
		Aktivitet på vaskeplass	OVP11-04	Rutine for bruk av vaskeplass	1	Rutine for tømning og vdl + kontroll
OVP12	1	Søl fra lagring av ferdigvarer	OVP12-01	Rutine for tømning og vdl + kontroll		
			OVP12-2	prøvet vannet	0,75	Daglig feiing av uteområder og veier
						Avgrense vann + bedre feierutiner
	62,8				48,1	

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

NIVA gir offentlig vannforvaltning, næringsliv og allmennheten grunnlag for god vannforvaltning gjennom oppdragsbasert forsknings-, utrednings- og utviklingsarbeid. NIVA kjennetegnes ved stor faglig bredde og godt kontaktnett til fagmiljøer i inn- og utland. Faglig tyngde, tverrfaglig arbeidsform og en helhetlig tilnæringsmåte er vårt grunnlag for å være en god rådgiver for forvaltning og samfunnsliv.



Norsk institutt for vannforskning

Gaustadalléen 21 • 0349 Oslo
Telefon: 02348 • Faks: 22 18 52 00
www.niva.no • post@niva.no