

# Forprosjekt Ren Frier



Løpenummer: 7937-2024

ISBN 978-82-577-7673-2  
NIVA-rapport  
ISSN 1894-7948

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

Henrik Jonsson  
Prosjektleder

Anders Ruus  
Kvalitetssikrer

Morten Jartun  
Forskningsleder

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

[www.niva.no](http://www.niva.no)

# Rapport

## Norsk institutt for vannforskning

### Tittel norsk/engelsk

Forprosjekt Ren Frier  
Pre-project Ren Frier

### Sider

53 + vedlegg

### Dato

09.02.2024

### Forfattere

Henrik Jonsson (NIVA)  
André Staalstrøm (NIVA)  
Espen Eek (NGI)  
Magnus Norling (NIVA)  
Anders Ruus (NIVA)  
Benno Dillinger (NIVA)

### Fagområde

Miljøgifter - marin

### Distribusjon

Åpen

### Oppdragsgiver

Grenlandsrådet

### Kontaktperson hos oppdragsgiver

Finn Roar Bruun, Bamble kommune

### Utgitt av NIVA

230118

### Sammendrag

Rapporten benytter simuleringer til å utrede bidraget som f.eks. skipstrafikk inkl. oppankringsaktivitet, har på spredning av dioksinforbindelser fra sjøbunnen i Frierfjorden, samt effekten av tiltak i havne- og oppankringsområder. Et av de viktigste funnene i prosjektet er at skipsaktivitet i Frierfjorden fører til fire ganger høyere partikkelkonsentrasjon i vannsøylen utenfor Herøya havn enn hva som er normalt bakgrunnsnivå i fjorden. Et forandret sjøtrafikkbilde er simulert ved å endre partiklenes resuspensjonsrate inkl. konsentrasjonen av organiske partikler (POC) i vannsøylen. Simuleringene viser at oppvirvlet sediment fordeles over et stort område og derfor har begrenset virkning på sedimentene i andre delområder av Frierfjorden. Skipstrafikk gir derimot en signifikant økning i mengden oppvirvlede dioksinforbindelser i vannmassene, noe som utgjør en økt risiko for eksponering og opptak i marine organismer. Simulering av tiltak (tildekking eller mudring) viser begrenset effekt på konsentrasjoner i sedimentene, men betydelig effekt på mengden resuspenderte partikler i vannmassene. Tiltak i Herøya havn er identifisert å gi størst virkning på mengden resuspenderte partikler i vannmassene utenfor selve tiltaksområdet.

**Emneord:** Dioksiner, SedFlex, forurenset sjøbunn, sedimentoppvirvling, skipstrafikk

**Keywords:** Dioxins, SedFlex, contaminated seafloor, sediment resuspension, shipping

# Innholdsfortegnelse

Forord	4
Sammendrag	5
Summary	6
<b>1 Introduksjon</b>	<b>7</b>
1.1 Formål og avgrensninger	7
1.2 Fjordsystemet Grenlandsfjordene	7
1.3 Dioksinforbindelser i Frierfjorden	11
<b>2 SedFlex-modellen</b>	<b>13</b>
2.1 Beskrivelse av SedFlex-modellen	13
2.2 Modelloppsett for Grenlandsfjordene	13
2.3 Sirkulasjon i Grenlandsfjordene og bevaring av volum	15
2.4 Sedimentkonsentrasjoner	18
<b>3 Strøm- og turbiditetsmålinger</b>	<b>20</b>
<b>4 Data om skipstrafikk</b>	<b>23</b>
4.1 Skipsdata	23
4.2 Oppvirvling fra skipspropeller	25
4.3 Oppvirvling fra ankring	26
<b>5 Aktuelle tiltak for å redusere spredning av miljøgifter fra sedimentene</b>	<b>29</b>
5.1 Mudring og deponering	29
5.2 Tildekking	30
5.3 Null-alternativet: Naturlig restitusjon	31
<b>6 Resultater</b>	<b>32</b>
6.1 Historisk utvikling av dioksinforbindelser i sedimentene	32
6.2 Spredning uten skipstrafikk	33
6.3 Effekt av spredning fra skipstrafikk på mengden dioksinforbindelser i vannmassene	38
6.4 Modellert spredning fra ankring	41
6.5 Effekt av tiltak	43
<b>7 Konkluderende sammendrag</b>	<b>51</b>
<b>8 Referanser</b>	<b>52</b>
Vedlegg A Inngangsparametere til SedFlex	54

# Forord

Prosjektet har opphav i en begrenset tilbudsrunde i november-desember 2022 hvor NIVA fikk tilslag. Grenlandsrådet har vært betalende kunde i prosjektet.

André Staalstrøm har gjennomført strøm- og turbiditetsmålinger i Frierfjorden i juli-august 2023 og etablert nye bokser i SedFlex basert på disse. Han har også modellert alle scenarier i SedFlex, med støtte fra Magnus Norling.

Henrik Jonsson har, i samarbeid med relevante aktører, etablert tidsserier for skipstrafikk og ankring i Frierfjorden. Han har også parameterisert oppvirvling fra skipspropeller og oppankring brukt i SedFlex.

Espen Eek (NGI) har skrevet kapitlene om spredning av dioksinforbindelser til vannmassene og mulige tiltaksløsninger. Han har bidratt med kommentarer til øvrige kapitler.

Benno Dillinger har produsert kart og vurdert korrelasjonen mellom turbiditet målt utenfor Herøya industripark og skipstrafikk i den samme perioden.

Anders Ruus har hatt en konsulterende rolle i prosjektet og stått for faglig kvalitetssikring av rapporten.

Morten Jartun har kvalitetssikret og godkjent rapporten.

Finn Roar Bruun i Bamble kommune har vært NIVAs kontaktperson på kundesiden.

Følgende eksterne ressurser har gitt viktige bidrag knyttet til historisk skipstrafikk i Frierfjorden:

- Rune Christoffersen, Jørn Øyvind Wenaas, Tore Kojedahl, og Kristin Hermanrud Hagen (Ineos/Inovyn)
- Arne Oksvik og Dan Sverkmo (Yara)
- Roger Svensen (Eramet)
- Ove Gunleksen (Skien havneterminal)
- Per Einar Johnsen (Kystverket)
- Kim Preststulen (Buksér og Berging AS)

Alle takkes for innsatsen!

Oslo, 9.februar 2024

Henrik Jonsson (prosjektleder)

## Sammendrag

Denne rapporten benytter simuleringer til å utrede bidraget som bl.a. skipstrafikk inkl. oppankringsaktivitet, har på spredning av dioksinforbindelser fra sjøbunnen i Frierfjorden, samt effekten av tiltak i havne- og oppankringsområder. Prosjektet har fokusert på polyklorerte dibenzo-p-dioksiner og -furaner (dioksinforbindelser), da disse er dimensjonerende både når det gjelder forurensingsnivået på sjøbunnen, og for oppkonsentrering (bioakkumulering) i organismer inkl. spiselige organismer. Mattilsynet advarer mot konsum av fisk og skalldyr fanget i Grenlandsfjordene.

Produksjonen i Hydros magnesiumfabrikk mellom 1951-2002 førte til utilsiktet dannelse av klorerte organiske forbindelser inkl. dioksinforbindelser. De samlede utslippene av dioksinforbindelser er beregnet til i underkant av 160 kg. Det er anslått at 90% av utslippene gikk til sjø i overflatelaget like ved kaiområdene på Herøya, mens 10% gikk ut i Gunnekleivfjorden.

NIVAs modellverktøy SedFlex er benyttet for å simulere spredning av dioksinforbindelser mellom delområder av Frierfjorden. I modellen er Grenlandsfjordene delt inn i syv delområder, med to til tre dybdelag. Til sammen er hele fjordsystemet delt inn i 17 bokser.

Etter kalibrering av SedFlex opp mot observerte nivåer i sedimentprøver fra Frierfjorden og Skienselva er det valgt å bruke enkeltforbindelsen oktaklor-dibenzofuran (OCDF) som markørstoff for dioksinforbindelser i modellen. OCDF observeres i høye konsentrasjoner i sedimentprøver fra Frierfjorden og har et bedre datagrunnlag enn mange andre enkeltforbindelser.

Oppvirvling av sedimentpartikler fra sjøbunnen er sentral for spredning av miljøgifter. Et av de viktigste funnene i prosjektet er at skipsaktivitet i Frierfjorden fører til at gjennomsnittlig partikkelkonsentrasjon i vannsøylen utenfor Herøya havn er fire ganger høyere enn normalt bakgrunnsnivå i fjorden. Et forandret sjøtrafikkbilde, inkl. et nullscenario helt uten skipstrafikk i Frierfjorden, er simulert ved å endre partiklenes resuspensjonsrate inkl. konsentrasjonen av organiske partikler (POC) i vannsøylen.

Simuleringene viser at sedimentpartikler som virvles opp langs kaianleggene fordeles over et stort område og derfor har begrenset virkning på sedimentene i andre delområder av Frierfjorden. Et tilsvarende bilde observeres for oppvirvling fra ankringsaktivitet på Frierflaket.

Oppvirvling fra skipstrafikk fører imidlertid til en konstant økning av mengden suspenderte partikler i vannmassene. Simulert konsentrasjon av dioksinforbindelser i vannmassene øker med mellom 47-185% i Frierfjorden, og med 7% utenfor Brevik, sammenlignet med et nullscenario uten skipstrafikk. Størst er effekten i Herøya havn, hvor skipstrafikk fører til nesten en tredobling av mengden dioksinforbindelser som oppvirvles i vannmassene. Økt konsentrasjon av dioksinforbindelser på suspenderte partikler i vannmassene utgjør en økt risiko for eksponering og opptak i pelagiske organismer og trolig også for bentiske organismer som lever av suspendert materiale.

Simulering av tiltak i fire områder (Skienselva, Herøya havn, Frierflaket og Rafnes havn) er i SedFlex gjort ved å sette konsentrasjonen av dioksinforbindelser lik null ved starten av simuleringen. Simulerte tiltak har i alle områdene en begrenset effekt på konsentrasjoner i sedimentene, men betydelig effekt på mengden resuspenderte dioksinforbindelser i vannmassene. Tiltak i Herøya havn er identifisert å gi størst virkning på mengden resuspenderte dioksinforbindelser i vannmassene utenfor selve tiltaksområdet, med 77% reduksjon på Frierflaket, 27% reduksjon i øvrige deler av Frierfjorden, og 5% reduksjon i fjordområdet utenfor Brevik.

## Summary

This report examines the contribution of shipping and anchoring activity on resuspension and spreading of polluted sediments in the Frierfjord. Furthermore, the report examines the effect of capping/dredging measures in harbour and anchoring areas. The project has focused on polychlorinated dibenzo-p-dioxins and -furans (dioxin compounds), as these are dimensioning in the area both in terms of pollution of the sediments, and for bioaccumulation in marine organisms including edible organisms. The Norwegian Food Safety Authority has issued a warning against consuming fish and shellfish from the area related to their high content of dioxin compounds.

Production in Hydro's magnesium factory 1951-2002 led to the unintended formation of chlorinated organic compounds including dioxin compounds. The total emissions of dioxin compounds 1951-2002 are estimated at around 160 kg, of which 90% were discharged to surface water along the quay facilities of Herøya, while 10% was discharged into the Gunnekleiv Fjord.

NIVA's modelling tool SedFlex has been used to simulate the distribution of dioxin compounds between defined sub-areas. In the model, the Greenland fjord system was split into seven sub-areas, each with two to three depth layers. Altogether, the entire fjord system is divided into 17 boxes.

After calibrating SedFlex against observed levels in sediment samples from Frierfjorden and Skienselva, it was decided to use octachloro-dibenzofuran (OCDF) to represent all dioxin compounds in the model. OCDF is represented by more data points than most dioxin compounds and is usually observed in high concentrations in sediment samples from the Frierfjord.

Resuspension of sediment particles from the seabed is essential for spreading of contaminants embedded in the seafloor. One of the most important findings in the project has been that shipping activity in the Frierfjord leads to an average four times higher particle concentration in the water column outside Herøya compared to the normal background level in the fjord. Changes in shipping activity, including a baseline scenario with zero shipping in the Frierfjord, was simulated by altering the resuspension rate of particles as well as the concentration of organic particles (POC) in the water column.

The simulations show that sediment particles that become resuspended along the quay facilities are distributed over a large area and therefore have a limited effect on the sediments in other parts of the fjord. A similar picture is seen for resuspension of particles from anchoring activity on Frierflaket.

Shipping-induced resuspension, however, leads to a constant increase of resuspended, contaminated particles in the water column. Simulated concentrations of dioxin compounds in the water column increase between 47-185% in Frierfjorden, and by 7% outside Brevik, compared to a baseline scenario without ship traffic. The greatest effect is seen at Herøya, where shipping leads to almost a tripling of the amount of resuspended dioxin compounds. This increased concentration poses an increased risk of exposure and absorption of dioxin compounds in pelagic organisms and probably also in benthic organisms that feed on suspended material.

Simulation of physical measures (either capping or dredging, or a combination of the two) in four sub-areas (Skienselva, Herøya harbour, Frierflaket and Rafnes harbour) was made by setting sediment concentrations to zero at the start of the simulation. Simulations reveal that capping/dredging have a limited effect on sediment concentrations in all areas, but a significant effect on the amount of resuspended dioxin compounds in the water column. Capping/dredging at Herøya harbour was identified as having the greatest impact on the concentration of resuspended dioxins in the water bodies outside the treated area, with a 77% reduction on Frierflaket, a 27% reduction in other parts of the Frierfjord, and a 5% reduction in the fjord area outside Brevik.

# 1 Introduksjon

## 1.1 Formål og avgrensninger

Prosjektets formål har vært å utrede påvirkningen som skipstrafikk inkl. oppankring har på spredning av forurensing fra sjøbunnen til vannmassene og videre til fjordbunnen i tilstøtende områder. Basert på tidligere undersøkelser er det er valgt å bruke dioksinforbindelser som dimensjonerende stoffer for forurenset sjøbunn i Frierfjorden. Ved hjelp av modelleringer er det videre sett på effekten av konkrete tiltak i havn- og oppankringsområder.

Prosjektet har noen viktige avgrensninger. Modellen som er brukt i prosjektet (SedFlex) gir en oversikt over hvilke områder tiltak vil gi størst miljøgevinst. SedFlex har derimot ikke tilstrekkelig romlig oppløsning for å kunne planlegge et konkret tiltak i et spesifikt område. Dette vil være en naturlig del i planleggingen av et konkret tiltak hvis det blir aktuelt på et senere tidspunkt. Prosjektet har heller ikke sett på kostnader knyttet til tiltak i forskjellige delområder av Frierfjorden.

Samlet har målsetningen med prosjektet vært å identifisere miljøgevinsten av tiltak i forskjellige deler av Frierfjorden. Det er derfor en forhåpning at prosjektet vil kunne bidra til en mer forutsigbar prosess for framtidige reguleringsplaner.

## 1.2 Fjordsystemet Grenlandsfjordene

Grenlandsfjordene er samlenavn for et fjordsystem som består av flere delfjorder (Figur 1). Frierfjorden (vannforekomst ID 0110010701-C) lengst inn i systemet er en utpreget terskelfjord med terskeldybde ca. 23 meter ved Brevik. Kanalen gjennom Breviksundet har på en bredde på ca. 280 meter på det smaleste.

Vannkvaliteten i Frierfjorden har vært overvåket i mange år. Det gjøres målinger seks til syv ganger i året på stasjonen BC-1 i regi av Fagrådet for Ytre Oslofjord<sup>1</sup>. Den økologiske tilstanden til Frierfjorden er blant annet beskrevet i årsrapporten for overvåkingen til Porsgrunn og Bamble kommune (Trannum et al., 2023). Basert på denne overvåkingen fikk vannforekomst Frierfjorden «*moderat*» økologisk tilstand, Eidangerfjorden «*god*» økologisk tilstand, og Langesundsfjorden «*moderat*» økologisk tilstand. Kjemisk tilstand i Frierfjorden var i den siste overvåkingsrunden 2022 «*ikke god*». Frierfjorden var den eneste av vannforekomstene som også ble undersøkt for miljøgifter i 2022, kjemisk tilstand definert i Tabell 1 for øvrige delfjorder baseres på tidligere undersøkelser.

Det er gjeldende advarsel for Grenlandsfjordene som sist ble vurdert i 2013: «*Ikke spis fisk og skalldyr fra Frierfjorden og Voldsfjorden ut til Brevikbroen. Spis heller ikke sjørret fisket i Skiensvassdraget, Herrevassdraget og andre mindre vassdrag som munner ut i disse eller i Frierfjorden. Ikke spis reker fangstet i Eidangerfjorden. Spis heller ikke krabbe fangstet mellom Brevikbroen (inkludert Eidangerfjorden) og en ytre avgrensning gitt av en rett linje fra Mølen (nord for Nevlunghavn), til Såsteins søndre odde, og videre via Mejulen, Kråka og Kårsholmen til fastlandet.*»<sup>2</sup>

De forurensende stoffene som gir disse kostholdsradene, er klorerte organiske forbindelser og da spesielt dioksinforbindelser. Likevel er ikke dioksinforbindelser med i vurderingen som det blir referert til i Trannum et al. (2023), hvor det er metaller og PAH-forbindelser som er målt.

---

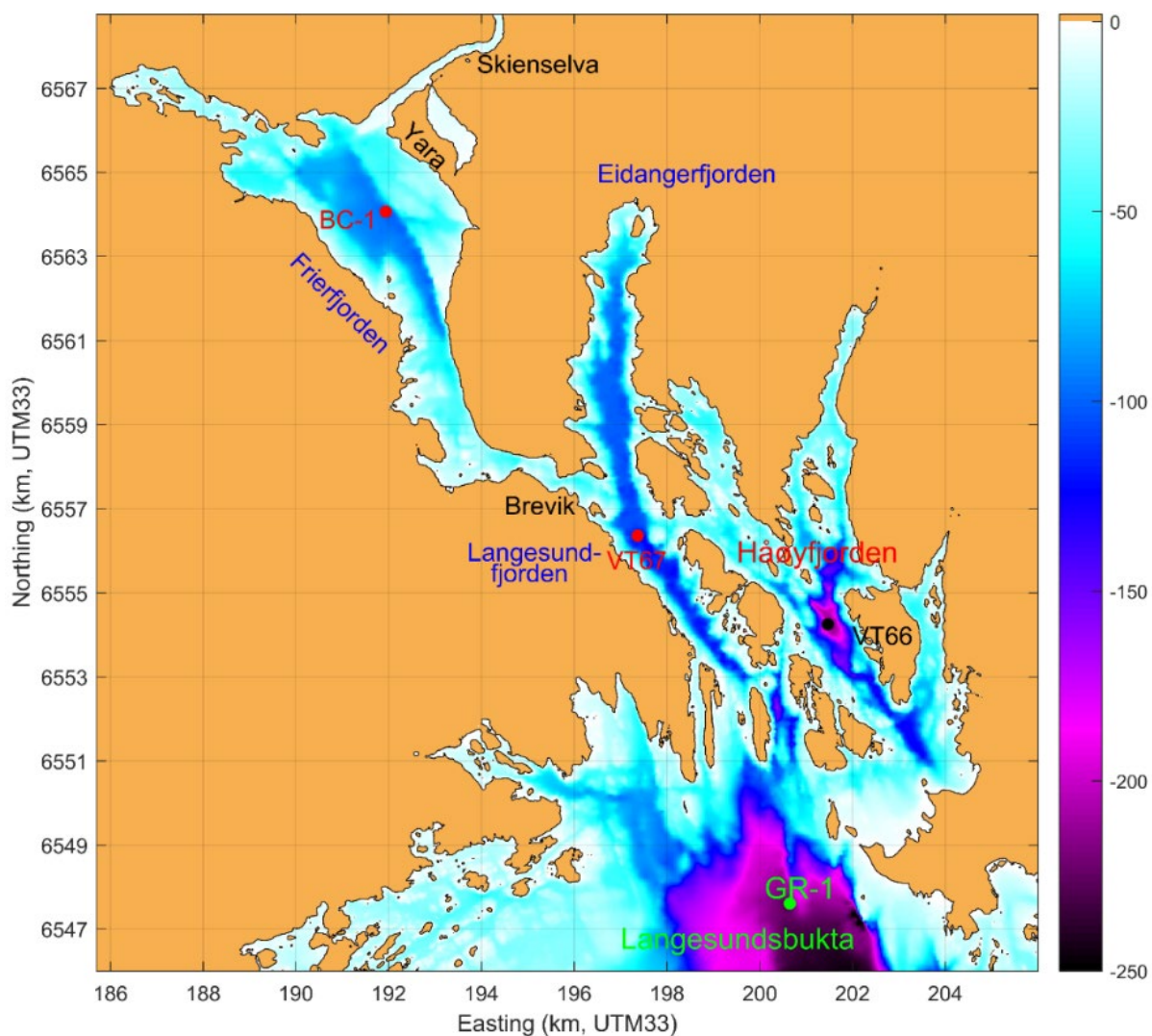
<sup>1</sup> <https://www.ytre-oslofjord.no/>

<sup>2</sup> <https://www.mattilsynet.no/mat-og-drikke/forbrukere/unnga-fisk-og-skalldyr-fra-forurensede-havner-fjorder-og-innsjoer>

Utenfor Brevik ligger et fjordbasseng med en maksimal dybde på ca. 110 meter. Dette bassenget består av Langesundsfjorden og Eidangerfjorden i nord. Et bånd av relativt store øyer skiller dette bassenget fra Håøyfjorden, som har en maksimal dybde på ca. 200 meter. Vannkvaliteten overvåkes månedlig på de to stasjonene VT67 og VT66 i overvåkningsprogrammet Økokyst<sup>3</sup>. Begge bassengene er knyttet til den åpne bukten Langesundsbukta. Porsgrunn og Bamble kommune har også et pågående overvåkningsprogram i fjordsystemet (Trannum m.fl., 2023).

**Tabell 1.** Hovedfjorder tilhørende Grenlandsfjordene, med vannforekomst ID og aktuell (januar 2024) økologisk og kjemisk tilstand registrert i vann-nett.

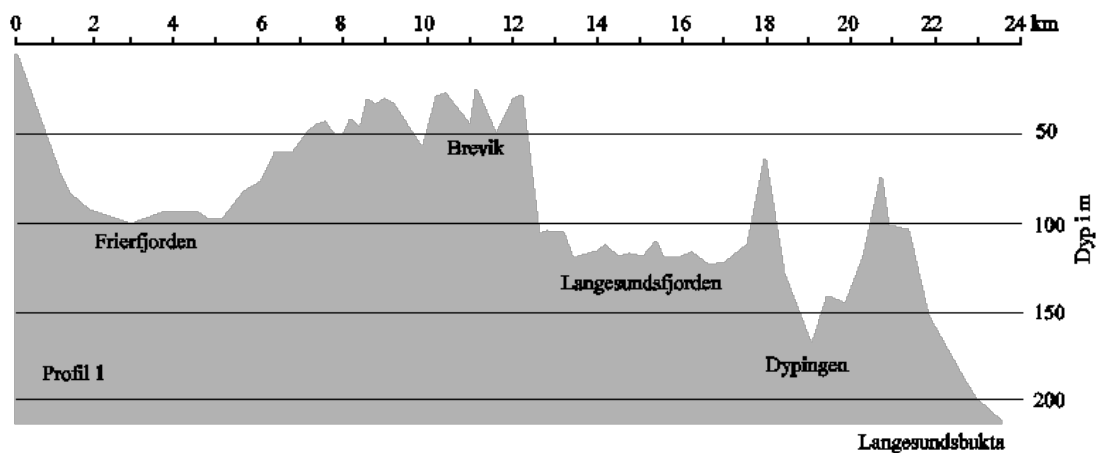
Vannforekomst	Vannforekomst ID	Økologisk tilstand	Kjemisk tilstand
Frierfjorden	0110010701-C	Moderat	Ikke god
Eidangerfjorden	0110010600-C	Moderat	Ikke god
Langesundsfjorden	0110010801-C	Moderat	Ikke god
Håøyfjorden	0110010300-C	Dårlig	Ikke god



**Figur 1.** Oversiktskart over Grenlandsfjordene.

<sup>3</sup> <https://www.miljodirektoratet.no/publikasjoner/2023/oktober-2023/okokyst--delprogram-skagerrakarsrapport-2023/>

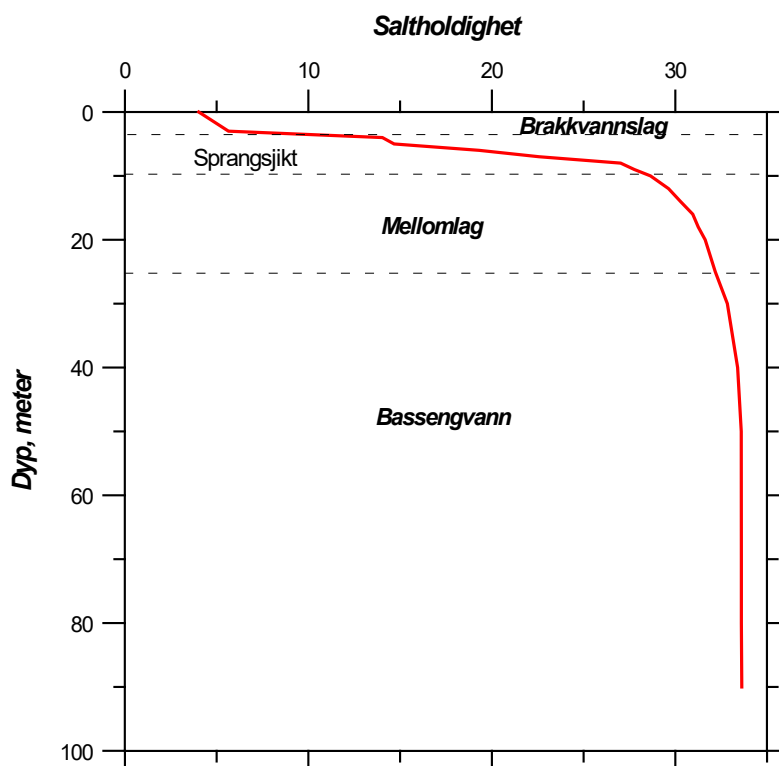




**Figur 2.** Langsgående bunnprofil fra Frierfjorden og til Langesundsbukta hentet fra Bakke, m.fl. 2009.

Vannmassene i Frierfjorden er preget av to forhold. Det første er at terskelen ved Brevik fører til at bassengvannet under 23 m dyp er avskåret fra vannmassene i Langesundsfjorden (Figur 2). Det andre er at Skienselva tilfører fjorden store mengder ferskvann med 230-250 m<sup>3</sup>/s som typisk årsgjennomsnitt, og opptil 1000 m<sup>3</sup>/s i vårfloppen. Den store ferskvannstilførselen og fjordterskelen gjør det naturlig å skjelne mellom tre hovedvannmasser i Frierfjorden (Figur 3):

- brakkvannslaget, som preges av ferskvannstilførselen,
- mellomlaget som strekker seg ned til omkring terskeldypet, og
- bassengvannet under terskeldypet.



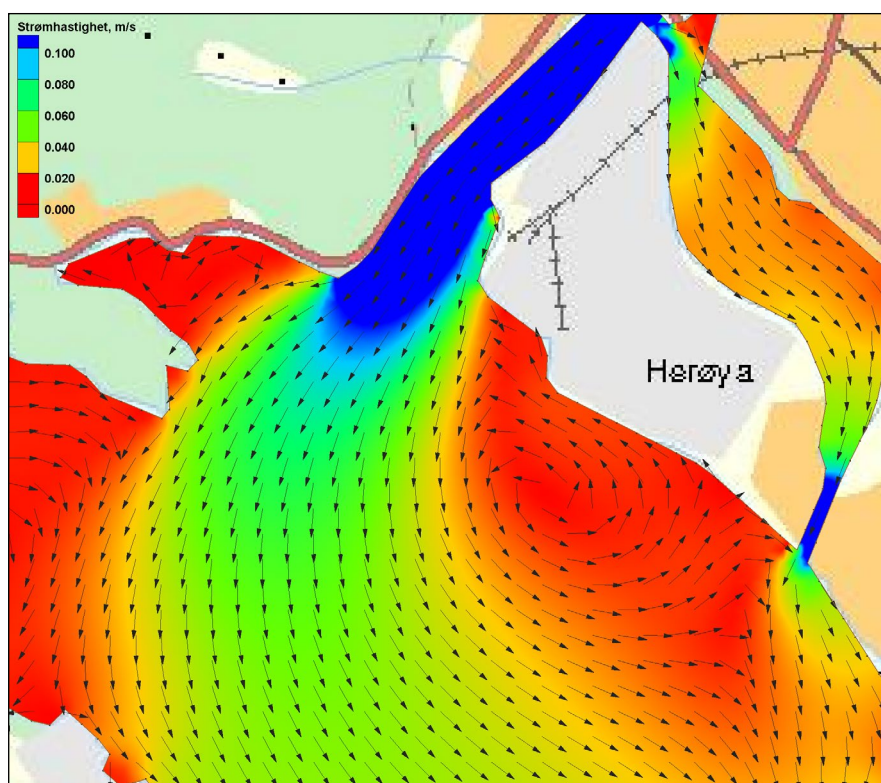
**Figur 3.** Generell vertikal inndeling av Frierfjordens vannmasser.

Tykkelsen av brakkvannslaget varierer mellom 2-8 meter, avhengig av ferskvannstilførsel og vindforhold. Overgangen fra brakkvannslag til mellomlaget er markert ved en sterk økning i saltholdighet, og omtales ofte som et sprangsjikt.

De tre vannmassene i Frierfjorden er preget av forskjellige utskiftningsmekanismer. Brakkvannet strømmer raskt ut gjennom fjordområdet, med bakevjer mot Volls fjorden og på Frierfjordens østside (se Figur 1). Den øvre delen av mellomlaget er preget av en inngående sjøvannsstrøm som erstatter sjøvannet som transporteres ut av fjorden med brakkvannsstrømmen. Mellomlaget er også sterkt påvirket av tidevann, og av inn- og utstrømninger pga. variasjoner i vannmassenes egenvekt utenfor Brevik. Bassengvannet har en mer sporadisk vannfornyelse hvor større fornyelser ofte foregår med flere års mellomrom (opptil 5 års intervall er registrert).

I periodene mellom de kortvarige og store dypvannsfornyelsene er dypvannet i Frierfjorden preget av langsomme variasjoner hvor tettheten i dypvannet gradvis blir redusert på grunn av at lettere vann nærmere overflata blandes ned i dypet. Samtidig blir oksygenet i dypvannet brukt opp ved nedbrytning av organisk materiale. Hvor fort denne prosessen går, er avhengig av tilførselen av organisk materiale som krever oksygen for å brytes ned. Betydelig økt tilførsel av næringsalter til de øvre lagene av fjorden gir økt nedsynkning av organisk materiale til bassengvannet fra økt planteplanktonproduksjon i øvre vannlag, som derfor kan føre til en forverring av oksygenforholdene over tid. Også sedimenterende organisk materiale fra elva og fra kloakkutslipp vil bidra til oksygenforbruket i bassengvannet.

Strømforholdene i overflatelaget er tidligere simulert ved bruk av modellen *Surface Modeling System* (SMS, Bakke, m.fl. 2009). Figur 4 viser sirkulasjonen ved vannføring 200 m<sup>3</sup>/s i Skienselva og 4 meter tykt brakkvannslag. Figuren illustrerer tydelig hvordan utstrømmende elvevann setter opp en bakevje på østsiden av elvemunningen opp mot Herøya. I Gunnekleivfjorden strømmer vannet inn fra Skienselva i nord og ut til Frierfjorden gjennom en trang kanal (Sundfjordetkanalen) i sør.



**Figur 4.** Simulering av sirkulasjonen i brakkvannslaget utenfor Herøya.

## 1.3 Dioksinforbindelser i Frierfjorden

Sjøbunnen av Frierfjorden bærer fortsatt preg av gamle dagers industriaktivitet på Herøya. Fjordbunnen er forurensset med mange giftstoffer inkl. tungmetaller, hydrokarboner, TBT og ulike klororganiske forbindelser. Det er ikke lov å omsette fisk og skalldyr når innholdet av miljøgifter overskrider gjeldende grenseverdier, og for flere av giftstoffene er forurensningen såpass høy at det gir begrensninger av fiske og fangst. De mest kritiske nivåene i fisk og skalldyr gjelder imidlertid dioksinforbindelser, som er dimensjonerende for Mattilsynets advarsler om inntak av fisk og skalldyr.

Dioksinforbindelser dannes i forbrenningsprosesser innenfor temperaturspenn ca. 450-850°C i en atmosfære som inneholder klor og karbon samtidig (Shibamoto m.fl., 2007). Gruppen dioksinforbindelser består av polyklorerte dibenzo-*p*-dioksiner og -furaner. Disse skiller seg kjemisk ved at dioksingruppen sentralt i molekylet inneholder to oksygenatomer (Figur 5), mens furangruppen bare inneholder et oksygenatom. Det finnes totalt 75 mulige dioksiner, og 135 mulige furaner<sup>4</sup>.

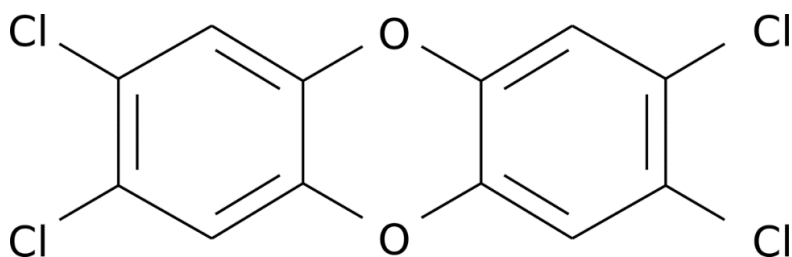
Dioksinforbindelser kombinerer høyt bioakkumuleringspotensial med lang nedbrytningstid i naturen. 17 stoffer, 7 dioksiner og 10 furaner, inngår i den norske prioritetslista<sup>5</sup> og er altså identifisert som spesielt bekymringsverdige. Stoffegenskaper avhenger både av antallet kloratomer, og plasseringene av disse internt i molekylet. Relativ giftighet av dioksinforbindelser uttrykkes som toksisk ekvivalensfaktor (TEF), hvor det mest giftige stoffet 2,3,7,8-TCDD (Figur 5) har referansetoksitet lik 1, mens toksitet av øvrige dioksinforbindelser er <1 (Tabell 2). I miljøprøver blir samlet konsentrasjon av dioksinforbindelser typisk oppgitt i toksisk ekvivalens (TEQ), det vil si at analysert stoffkonsentrasjon i prøven multipliseres med stoffets TEF-verdi slik at TEQ enkelt kan summeres opp.

**Tabell 2.** Relativ giftighet (toksisk ekvivalensfaktor, TEF) av 17 spesielt helsefarlige dioksinforbindelser TEF iht. WHO 2022 (De Vito m.fl. 2024).

#	Kortnavn	CAS	Antall kloratomer	TEF
D48	2378-TCDD	1746-01-6	4	1,0
D54	12378-PeCDD	40321-76-4	5	0,4
D66	123478-HxCDD	39227-28-6	6	0,09
D67	123678-HxCDD	57653-85-7	6	0,07
D70	123789-HxCDD	19408-74-3	6	0,05
D73	1234678-HpCDD	35822-46-9	7	0,05
D75	OCDD	3268-87-9	8	0,001
F83	2378-TCDF	51207-31-9	4	0,07
F94	12378/12348-PeCDF	57117-41-6	5	0,01
F114	23478-PeCDF	57117-31-4	5	0,1
F118	123478/123479-HxCDF	70648-26-9, 91538-84-0	6	0,3
F121	123678-HxCDF	57117-44-9	6	0,09
F124	123789-HxCDF	72918-21-9	6	0,2
F130	234678-HxCDF	60851-34-5	6	0,1
F131	1234678-HpCDF	67562-39-4	7	0,02
F134	1234789-HpCDF	55673-89-7	7	0,1
F135	OCDF	39001-02-0	8	0,002

<sup>4</sup> <https://snl.no/dioksiner>

<sup>5</sup> <https://www.miljodirektoratet.no/ansvarsomrader/kjemikalier/prioritetslista/>



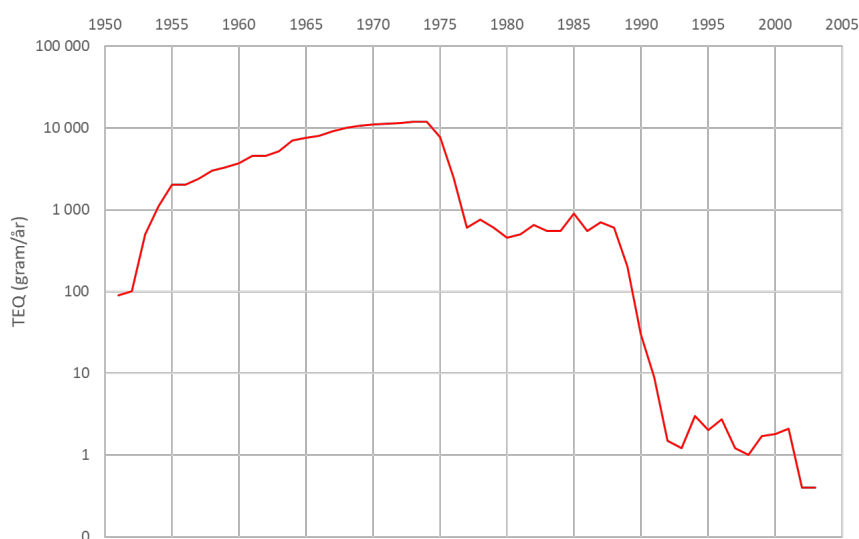
**Figur 5.** Strukturen til 2,3,7,8-tetraklordibenzo-p-dioksin (2378-TCDD), også kalt dioksin-48 (D48).

Produksjonen i Hydros magnesiumfabrikk 1951-2002 førte til utilsiktet dannelse av klorerte organiske forbindelser inkl. dioksinforbindelser. Fram til 1975 brukte Hydro kull med høyt tjæreinnhold i produksjonen, noe som førte til dannelsen av store mengder klororganiske forbindelser. I 1975 gikk Hydro over til koks med lavere tjæreinnhold, noe som reduserte utslippene med omtrent 90 prosent.

Det var imidlertid først i 1986 som utviklingen av analysemetoder kommet så langt, at det kunne påvises dioksinforbindelser. Stoffet OCDF, som i dette prosjektet er brukt som markørstoff for dioksinforurensing i Frierfjorden, tilhører de hyppigst analyserte dioksinforbindelsene og måles typisk i høyest konsentrasjoner av alle enkeltforbindelser i sedimentprøver fra Frierfjorden (se Tabell 6 og Tabell 7).

De samlede utslippene av dioksinforbindelser i hele magnesiumfabrikkens driftstid er beregnet til i underkant av 160 kg. Det er anslått at 90% av utslippene gikk til sjø i overflatelaget like ved kaiområdene i Frierfjorden, mens 10% gikk ut i Gunnekleivfjorden (Olsen m.fl. 2021).

Figur 6 viser hele utslippsserien (uttrykt i TEQ) slik den er lagt inn i SedFlex. Det understrekes at utslippstallene fram til 1986, når relevante analyseprotokoller ble tilgjengelige for første gang, er basert på beregninger med utgangspunkt i forholdet mellom dioksinforbindelser og andre kjente utslippskomponenter. Figuren tydeliggjør de to store utslippsreduksjonene hhv. i 1975 og i 1990. I 2002 ble magnesiumfabrikken på Herøya nedlagt, og det er derfor ingen utslipp herfra fra dette tidspunktet. Det kan imidlertid være tilførsel av dioksiner til Frierfjorden fra forurenset sediment i Gunnekleivfjorden, og forurenset grunn på Herøya (Olsen m.fl. 2015).



**Figur 6.** Utslipp av dioksinforbindelser fra Hydros magnesiumfabrikk uttrykt i toksisk ekvivalens (TEQ). NB! Logaritmisk skala på y-aksen. Utslippstallene fram til 1986 er basert på beregninger.

## 2 SedFlex-modellen

### 2.1 Beskrivelse av SedFlex-modellen

SedFlex<sup>6</sup> er en dynamisk multi-media boks-modell for spredning, lagring og nedbryting av miljøgifter i fjorder og fjordsedimenter. At den er multi-media betyr at den regner ut konsentrasjoner av miljøgiftene i tre forskjellige media: i vann, suspenderte partikler og i sedimentene. At den er dynamisk betyr at den regner ut endringer over tid, hvor konsentrasjoner av miljøgifter ikke umiddelbart blir borte selv om man fjerner utslippskildene.

SedFlex regner ut gjennomsnittlige konsentrasjoner over større områder enn det man gjør i en full 3D-modell, noe som gjør at den er lettere å sette opp, kjører mye raskere og er derfor godt egnet til å utforske scenarier. Modellen beregner ikke transporten mellom boksene, alle transporter må derfor spesifiseres. Dette kan gjøres ved egne strømmålinger eller å benytte strømndata fra andre modeller (Figur 4).

SedFlex ble utviklet med formålet å modellere spredning av miljøgifter i norske fjorder. Modellkonseptet er beskrevet av Saloranta m.fl. (2006). Armitage m.fl. (2005) brukte SedFlex for å modellere spredning av PAH-forbindelser i Sundalsfjorden, mens Barton (2008) og Næs m.fl. (2009) tidligere har brukt SedFlex for å modellere spredning av dioksinforbindelser i Grenlandsfjordene.

En styrke med SedFlex er at modellen beregner spredning av dioksinforbindelser på grunnlag av steds spesifikke fordelingskoeffisienter (Kd-verdier) bestemt fra analyser henholdsvis i porevann og tørt sediment (se Næs m.fl. 2004 for et sammendrag). Kd beregnes fra stoffets empiriske fordeling mellom organisk karbon og vann (Koc), og fraksjonen organisk karbon i sedimentene (foc). De steds spesifikke Kd-verdiene er betraktelig høyere enn hva målt karbonkonsentrasjon på sjøbunnen skulle tilsi. Dette forklares med store utslipp av tungt nedbrytbare sotpartikler parallelt med dioksinforbindelsene i sin tid, noe som fører til at dioksinforbindelsene binder spesielt hardt til sotpartikler i sedimentene. Kd-verdier etablert for enkeltforbindelser for ca. 20 år siden er videreført til dette prosjektet, det vil si at sotpartikler på sjøbunnen fortsatt antas å spille en avgjørende rolle for hvordan dioksinforbindelsene fordeles mellom sediment og vann.

### 2.2 Modelloppsett for Grenlandsfjordene

I SedFlex er Grenlandsfjordene delt inn i syv delområder (se Figur 7). Det første delområdet har vi kalt «Skienelva» og den har to lag, et for 0-5 meter og et for 5 meter til bunn. Ferskvannstilførsel fra Skienelva går inn i det øverste laget (Tabell 3).

Frierfjorden er delt inn i to hovedområder: «Frierflaket» og «Frierfjorden», som hver har tre lag, 0-5 meter, 5-25 meter og 25 meter til bunn. I tillegg er det to mindre delområder som representerer Herøya havn og Rafnes havn. Disse havneboksene har to lag, 0-5 meter og fra 5 meter til bunn (Tabell 3).

Området utenfor Brevik kalles i modellen «Ytre Grenland» og har tre lag, 0-5 meter, 5-25 meter og fra 25 meter til bunn. Lengst ut ligger delområdet «Langesundsbukta» som har to lag, 0-25 meter og fra 25 meter til bunn. Til sammen er hele fjordsystemet delt inn i 17 bokser (Tabell 3).

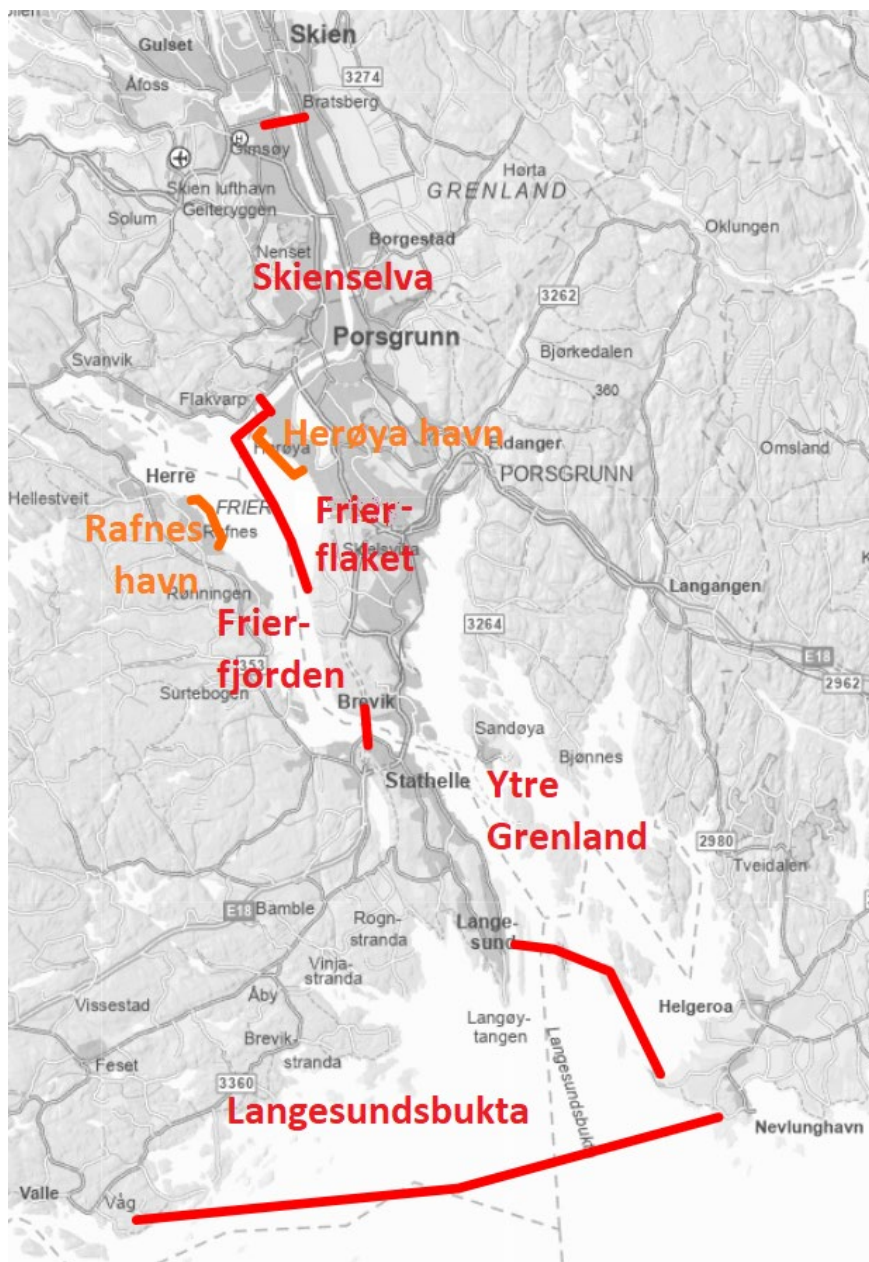
I SedFlex modelleres ikke endringer i innhold av organisk karbon, dette må spesifiseres for hver boks. I Tabell 3 vises hvilke konsentrasjoner av løst og partikulært organisk karbon (DOC og POC) som er lagt inn

---

<sup>6</sup> <https://github.com/NIVANorge/Mobius/tree/master/Applications/SedFlex>

i modellen. Det er benyttet måledata fra overvåkningsstasjoner i elv og fjord for å estimere data i de boksene som mangler måledata. Det er spesielt verdt å merke seg de høye POC-konsentrasjonene i de dype delene av de to havneboksene (hhv. Herøya og Rafnes). POC-konsentrasjonene er her estimert fra turbiditetsmålingene i juli-august 2023, som viste snaue fire ganger høyere turbiditet utenfor Herøya enn på stasjon BC-1 sentralt i Frierfjorden. POC-konsentrasjonen i delområde Herøya havn er derfor multiplisert med denne faktoren. Vi har ingen data vi kan bruke til å anslå POC-konsentrasjonen ved Rafnes, men det er rimelig å anta at POC også der vil være høy på grunn av skipstrafikk. Siden Rafnes har færre skipsanløp enn Herøya havn så er det lagt inn en POC-konsentrasjon med et noe lavere nivå.

Tabell 4 viser parametere som er lagt inn i SedFlex basert på tidligere kalibrering av modellen. Alle inngangsparametere som er brukt i SedFlex er listet opp i Vedlegg A.



**Figur 7.** Oversiktskart som viser Grenlandsmodellen slik den er satt opp i SedFlex. Delområder i oransje farge er definert i dette prosjektet.

**Tabell 3.** Konsentrasjon av løst (DOC) og partikulært organisk karbon (POC) som er lagt inn i enkeltbokser i SedFlex. **Blå tall** er basert på data fra målepunktet angitt i andre kolonne. Legg merke til de høye verdiene for POC i de dype delene av de to havneboksene (**røde tall**).

Boks	Målepunkt	Turbiditet (FNU)	DOC (µg/l)	POC (µg/l)
Skienselva 0-5m	RID Skien	1.12	2761	196
Skienselva +5m			2359	1014
Herøya havn 0-5m			2359	244
Herøya havn +5m	RCM	5.82	1500	1014
Frierflaket 0-5m			2359	244
Frierflaket 5-25m			1500	133
Frierflaket +25m			1100	100
Frierfjorden 0-5m	BC-1	1.40	2359	244
Frierfjorden 5-25m	BC-1	0.50	1500	133
Frierfjorden +25m	BC-1	0.59	1100	98
Rafnes 0-5m			2359	244
Rafnes +5m			1500	900
Ytre Grenland 0-5m	VT67	1.15	2020	244
Ytre Grenland 5-25m	VT67	0.78	1100	133
Ytre Grenland +25m	VT67	0.80	810	98
Langesundbukta 0-25m	VT68	0.45	1100	130
Langesundbukta +25m			810	130

## 2.3 Sirkulasjon i Grenlandsfjordene og bevaring av volum

Tabell 5 gir den fulle oversikten over transport mellom de forskjellige boksene i SedFlex. Hvordan tabellen skal leses og forstås blir beskrevet i det følgende.

Ved å se på målt saltholdighet ved stasjon BC-1 i Frierfjorden, og stasjon VT67 i det ytre området, kan andelen vann som trekkes inn ved estuarin sirkulasjon beregnes. Skienselva har sitt utløp i Frierfjorden. I modellen legges dette inn som en tilførsel på 320 m<sup>3</sup>/s til boksen «Skienselva 0-5m». Det er lagt inn en transport på 16 m<sup>3</sup>/s som går fra fjorden og oppover langs bunn i elva med returstrømmen som settes opp av den estuarine sirkulasjonen. Denne volumstrømmen går opp til overflatelaget i elveboksen. Elveboksen transporterer vann både til Frierflaket og Frierfjorden. Den estuarine sirkulasjonen er beregnet fra målt saltholdighet i overflatelaget, som er et resultat av blanding mellom elvevannet og saltere vann fra underliggende lag som trekkes inn av den estuarine sirkulasjonen.

I tillegg til den estuarine sirkulasjonen vil det gå store mengder vann fram og tilbake horisontalt mellom boksene. Dette er beregnet basert på typiske strømstyrker og tverrsnittareal. I overflatelaget i Frierfjorden er det lagt inn en gjennomsnittlig sirkulasjon basert på simulert strøm vist i Figur 4.

En av de viktigste ligningene innenfor oseanografi er kontinuitetsligningen, som er en ligning for konservering av volum. Det betyr at det i hver boks i SedFlex skal være like mye vann som går inn og ut av boksen. Unntaket er de boksene som står i direkte forbindelse med ytre områder. I dette oppsettet går Skienselva inn i boksen «Skienselva 0-5m», som kompenseres med en tilsvarende netto transport ut av boksen «Langesundbukta 0-25m».

**Tabell 4.** Parametere som er lagt inn i SedFlex, basert på tidligere kalibrering av modellen. De fire nye boksene (grå markering) har blitt tildelt verdier som er av samme størrelsesorden som naboboksene.

Boks	POC sedimenterings- hastighet (m/døgn)	Effektiv sediment- tykkelse (m)	Begravelses- hastighet (m/døgn)	Resuspensjons- hastighet (m/døgn)	Sediment porøsitet	Sediment volumfraksjon POC
Skienselva 0-5m	0.525	0.03	3.29E-07	2.09E-06	0.86	0.083
Skienselva +5m	0	0.03	3.29E-07	3.00E-06	0.86	0.083
Herøya havn 0-5	1.157	0.05	5.00E-07	3.00E-06	0.86	0.083
Herøya havn +5m	0	0.05	5.00E-07	3.00E-06	0.86	0.083
Frierflaket 0-5m	1.157	0.05	7.12E-07	3.09E-06	0.86	0.065
Frierflaket 5-25m	8.467	0.06	1.64E-06	3.89E-06	0.80	0.092
Frierflaket +25m	0	0.02	1.97E-06	3.40E-07	0.86	0.092
Frierfjorden 0-5m	1.157	0.05	7.12E-07	3.09E-06	0.86	0.065
Frierfjorden 5-25m	5.095	0.05	1.64E-06	1.28E-06	0.86	0.065
Frierfjorden +25m	0	0.005	1.97E-06	3.24E-07	0.86	0.110
Rafnes 0-5m	1.157	0.05	5.00E-07	3.00E-06	0.86	0.083
Rafnes +5m	0	0.05	5.00E-07	3.00E-06	0.80	0.083
Ytre Grenland 0-5m	0.466	0.05	7.12E-07	3.70E-06	0.86	0.050
Ytre Grenland 5-25m	0.466	0.05	1.10E-06	1.22E-06	0.86	0.050
Ytre Grenland +25m	0	0.02	1.32E-06	2.92E-07	0.86	0.080
Langesundbukta 0-25m	0.466	0.05	1.10E-06	1.22E-06	0.86	0.050
Langesundbukta +25m	0	0.02	1.32E-06	2.92E-07	0.86	0.080

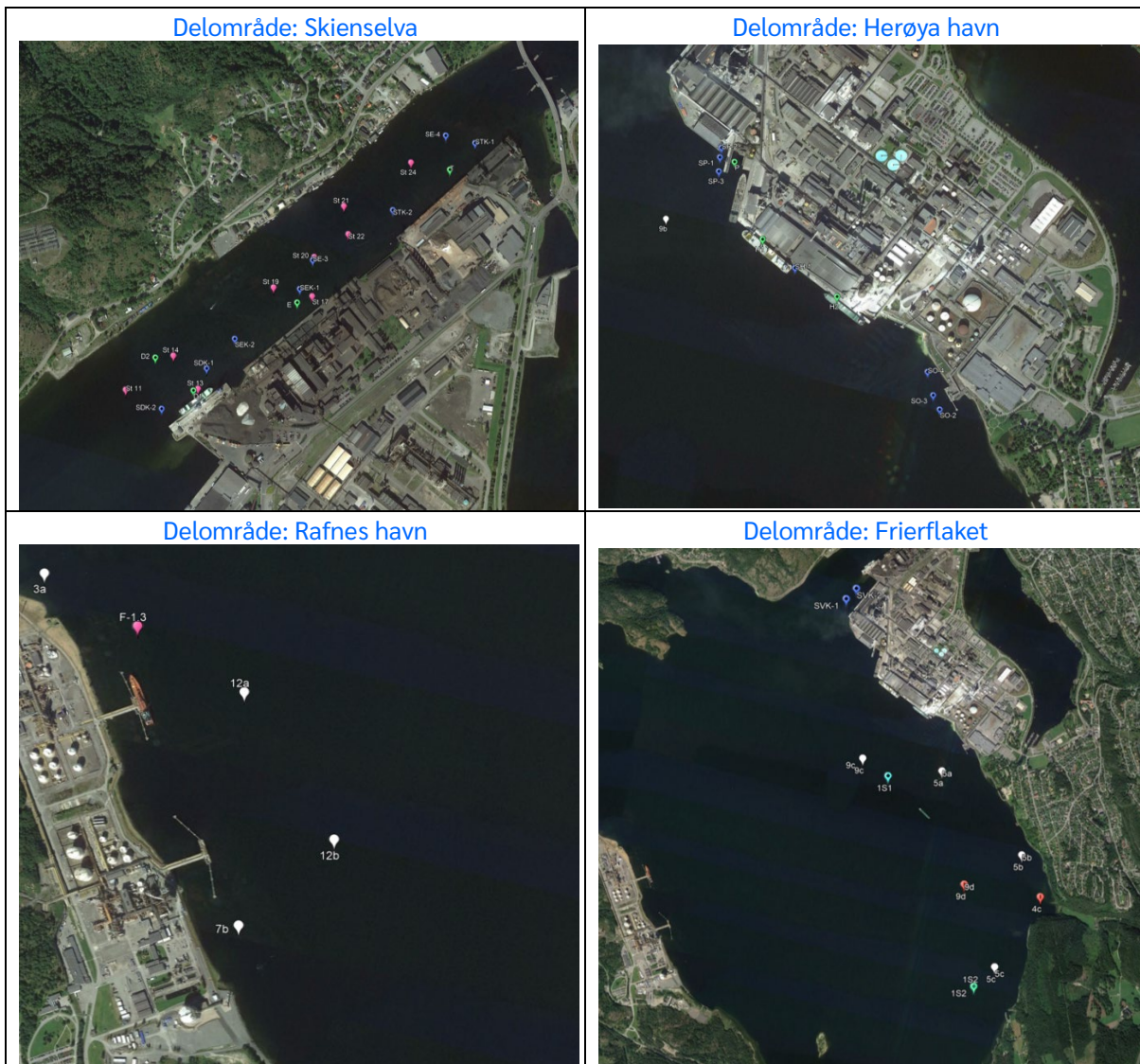


**Tabell 5.** Transport i m<sup>3</sup>/s som er lagt inn i SedFlex. Som et eksempel er transporten fra Skienselva 0-5m til Frierfjorden 0-5 m 302 m<sup>3</sup>/s, mens transport motsatt vei er 0 m<sup>3</sup>/s. For hver boks skal summen av transport inn og ut være null. Unntaket er de to boksene som står i direkte forbindelse med de ytre områdene, hhv. Skienselva med en transport 320 m<sup>3</sup>/s inn i boksen *Skienselva 0-5m*, og i modellens utkant hvor netto transport ut av boksen *Langesundbukta 0-25m* også er 320 m<sup>3</sup>/s for å kompensere for dette. Der det er volumtransport er det markert med blått. Transporten mellom boksene *Frierfjorden +25m* og *Ytre Grenland +25m* er også merket, selv om den er null. Dette er gjort for å markere at det ikke er transport gjennom Breviksterskelen i modellen.

	Skiens- elva 0-5m	Skiens- elva +5m	Herøya havn 0-5m	Herøya havn +5m	Frier- flaket 0-5m	Frier- flaket 5-25m	Frier- flaket +25m	Frier- fjorden 0-5m	Frier- fjorden 5-25m	Frier- fjorden +25m	Rafnes 0-5m	Rafnes +5m	Ytre G-land 0-5m	Ytre G-land 5-25m	Ytre G-land +25m	Langesund- bukta 0-25m	Langesund- bukta +25m
Skienselva 0-5m	0	0	0	0	34	0	0	302	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Skienselva +5m	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frierflaket 0-5m	0	0	48	0	0	0	0	54	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Frierflaket 5-25m	0	16	0	2	18	0	3	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0
Frierflaket +25m	0	0	0	0	0	3	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0
Frierfjorden 0-5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	200	0	543	0	0	0	0
Frierfjorden 5-25m	0	0	0	0	0	86	0	185	0	5	0	2	0	50	0	0	0
Frierfjorden +25m	0	0	0	0	0	0	20	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0
Ytre Grenland 0-5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1033	0
Ytre Grenland 5-25m	0	0	0	0	0	0	0	0	273	0	0	0	490	0	5	100	0
Ytre Grenland +25m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0	0	700
Langesundbukta 0-25m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	813	0	0	5
Langesundbukta +25m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	700	5	0
Herøya havn 0-5m	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Herøya havn +5m	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rafnes 0-5m	0	0	0	0	0	0	0	202	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Rafnes +5m	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0
<b>Sum Inn</b>	<b>16</b>	<b>16</b>	<b>50</b>	<b>2</b>	<b>102</b>	<b>89</b>	<b>23</b>	<b>743</b>	<b>328</b>	<b>25</b>	<b>202</b>	<b>2</b>	<b>1033</b>	<b>868</b>	<b>705</b>	<b>1138</b>	<b>705</b>
<b>Sum Ut</b>	<b>336</b>	<b>16</b>	<b>50</b>	<b>2</b>	<b>102</b>	<b>89</b>	<b>23</b>	<b>743</b>	<b>328</b>	<b>25</b>	<b>202</b>	<b>2</b>	<b>1033</b>	<b>868</b>	<b>705</b>	<b>818</b>	<b>705</b>
<b>Differanse</b>	<b>320</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>0</b>	<b>-320</b>	<b>0</b>

## 2.4 Sedimentkonsentrasjoner

Som nevnt i kapittel 1.3 ble dioksinforbindelser i utslippet fra magnesiumfabrikken analysert for første gang i 1986. De første analysene i sedimentprøver går tilbake til 1989 (Næs og Oug 1991), omfattende analysekampanjer er også gjennomført henholdsvis i 1997 (Næs 1999), 2002 og 2010 (Håvardstun og Bakke 2010). Produksjon og utslipp fra Herøya har altså foregått i 38 år (1951-1989) før vi får noen referansepunkter å forholde oss til i sedimentene. Figur 8 viser beliggenheter av feltstasjoner hvor dioksinforbindelser er analysert i sedimentprøver siden 1989,



**Figur 8.** Lokalisering av feltstasjoner for analyser av dioksinforbindelser i sedimentprøver, fordelt på de delområdene i SedFlex modellen som er mest påvirket av skipstrafikk. Fargekode i henhold til analyse-år, hhv. 1989, 1997, 2002-06, 2010, 2014-15 og 2021.

Tabell 6 gir en oversikt over sedimentanalyser registrert i Vanmiljø pr januar 2024, fordelt på de 4 delområdene Skienelva, Herøya havn, Frierflaket og Rafnes havn. Oversikten viser på et stort spenn i

målte konsentrasjoner. I gjennomsnitt er det for alle analyserte enkeltforbindelser målt høyest konsentrasjoner i delområde Frierflaket, og lavest konsentrasjoner i delområde Skienselva.

Samlet giftighet av dioksinforbindelser målt i sedimentprøver fra Frierfjorden og Skienselva varierer fra 0,2 til 14,9 µg TEQ pr kg TS. Til sammenligning er EQS for dioksinforbindelser i sediment 0,00086 µg TEQ pr kg TS<sup>7</sup> (Tabell 2).

Tabell 7 viser resultater av kalibrering av SedFlex for tre av enkeltforbindelsene i Tabell 2; to furaner og et dioksinstoff. Furanene er valgt ut siden stoffene gjennomgående analyseres i relativt høyere konsentrasjoner i sedimentprøver fra Frierfjorden og Skienselva, mens dioksinstoffet er valgt ut basert på et bedre datagrunnlag sammenlignet med øvrige dioksinstoffer. I forbindelse med kalibrering av modellen er det valgt å justere på de to parameterne *effektiv sedimenttykkelse* og *sedimentporøsitet* (se Tabell 4), mens øvrige parametere har blitt arvet fra tidligere kalibreringer av modellen.

Kalibreringen viser at modellen overestimerer dioksinstoffet, men samsvarer bra med de to furanene og spesielt med forbindelsen OCDF. I resultatkapitlet er det valgt å vise frem modelleringer med OCDF, alle 17 enkeltforbindelser i Tabell 2 gir derimot samsvarende variasjonsmønster over tid.

**Tabell 6.** Dioksinforbindelser analysert i sedimentprøver fra Frierfjorden og Skienselva 1989-2021, uttrykt i µg TEQ pr kg tørrstoff, og fordelt på delområder i SedFlex. Blå tall indikerer enkeltforbindelse med størst bidrag til samlet giftighet innenfor hvert delområde. Blå bakgrunn indikerer delområde med høyest gjennomsnittskonsentrasjon for enkeltforbindelser. Kursivt tall indikerer enkeltanalyse. i.a. – ikke analysert. Data fra Vannmiljø.

#	Kortnavn	Skienselva	Herøya havn	Frierflaket	Rafnes havn
D48	2378-TCDD	0,004-0,014	0,002-0,510	0,065-0,580	0,019-0,066
D54	12378-PeCDD	0,021-0,071	0,286-0,472	0,300-0,770	i.a.
D66	123478-HxCDD	0,002-0,006	0,001-0,087	0,005-0,164	0,009-0,042
D67	123678-HxCDD	0,003-0,010	0,001-0,101	0,008-0,121	0,020-0,071
D70	123789-HxCDD	0,003-0,011	0,001-0,160	0,007-0,229	0,015-0,107
D73	1234678-HpCDD	0,002-0,005	0,020-0,133	0,021-0,200	i.a.
D75	OCDD	9E-05-4E-04	7E-05-0,008	3E-07-0,011	0,001-0,003
F83	2378-TCDF	0,017-0,049	0,010-0,493	0,033-0,655	0,120-0,212
F94	12378/12348-PeCDF	0,009-0,027	0,004-0,560	0,102-0,565	i.a.
F114	23478-PeCDF	0,029-0,080	0,012-1,131	0,278-1,998	0,243-0,278
F118	123478/123479-HxCDF	0,050-0,154	0,580-0,941	0,964-2,370	1,311
F121	123678-HxCDF	0,029-0,094	0,379-2,160	0,542-3,150	i.a.
F124	123789-HxCDF	0,017-0,062	0,229-0,540	0,168-0,780	i.a.
F130	234678-HxCDF	0,005-0,021	0,078-0,400	0,088-0,560	i.a.
F131	1234678-HpCDF	0,012-0,036	0,158-1,473	0,206-1,820	i.a.
F134	1234789-HpCDF	0,005-0,018	0,066-0,415	0,113-0,723	i.a.
F135	OCDF	2E-07-0,004	0,001-0,117	4E-06-0,173	0,010-0,081
<b>SUM TEQ</b>		<b>0,207-0,660</b>	<b>1,827-9,702</b>	<b>2,899-14,870</b>	<b>1,747-2,172</b>

<sup>7</sup> <https://www.vannportalen.no/veiledere/klassifiseringsveileder/>

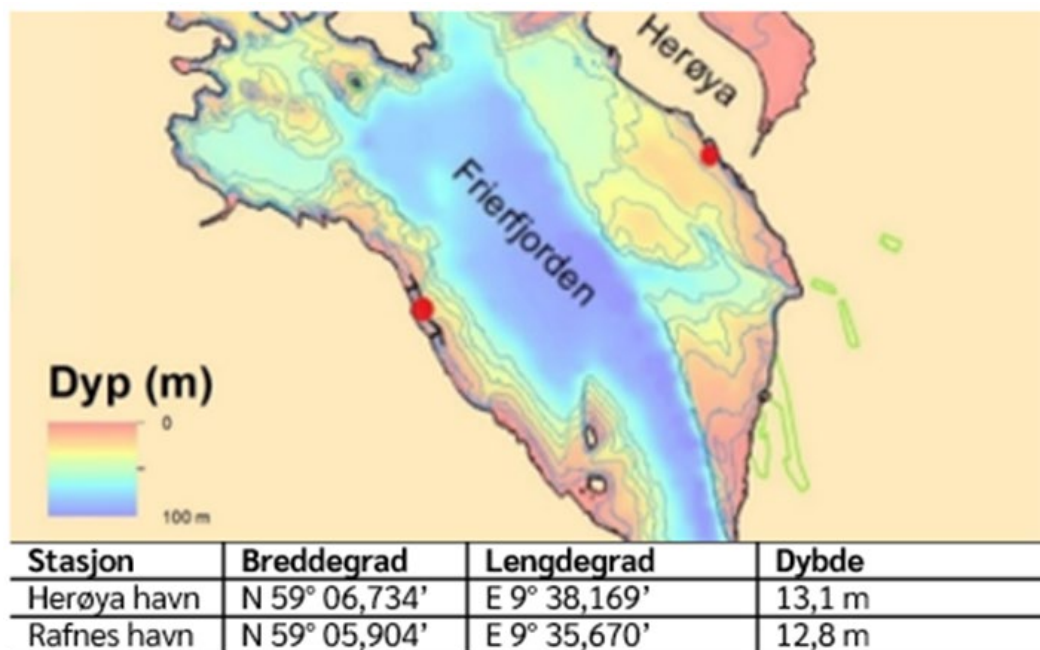
**Tabell 7.** Resultater av kalibrering av SedFlex for tre enkeltforbindelser. Sammenligning av målte sedimentkonsentrasjoner i 2010, og modellerte sedimentkonsentrasjoner med SedFlex. I resultatkapitlet er det valgt å vise frem modelleringer med OCDF (markert i grått).

Delområde	123478/123479-HxCDF (F118) µg/kg TS		OCDF (F135) µg/kg		OCDD (D75) µg/kg TS	
	OBS.	MODELL	OBS.	MODELL	OBS.	MODELL
Skienselva	1,1	0,3	9,6	8,4	0,6	1,8
Herøya havn	7,6	11,6	83,8	306,1	6,3	65,6
Frierflaket	12,8	4,3	143,8	136,8	6,0	29,2
Frierfjorden	1,2	1,7	13,5	53,4	0,9	11,3
Rafnes havn	1,5	2,8	114,2	78,1	4,4	16,7

### 3 Strøm- og turbiditetsmålinger

Sensorer for måling av strømhastighet har vært utplassert henholdsvis i utkant av Herøya havn, og på innsiden av jetty-kaiene ved Rafnes havn. Hensikten har vært å dokumentere strømforholdene i disse havneområdene for å etablere to nye bokser i SedFlex.

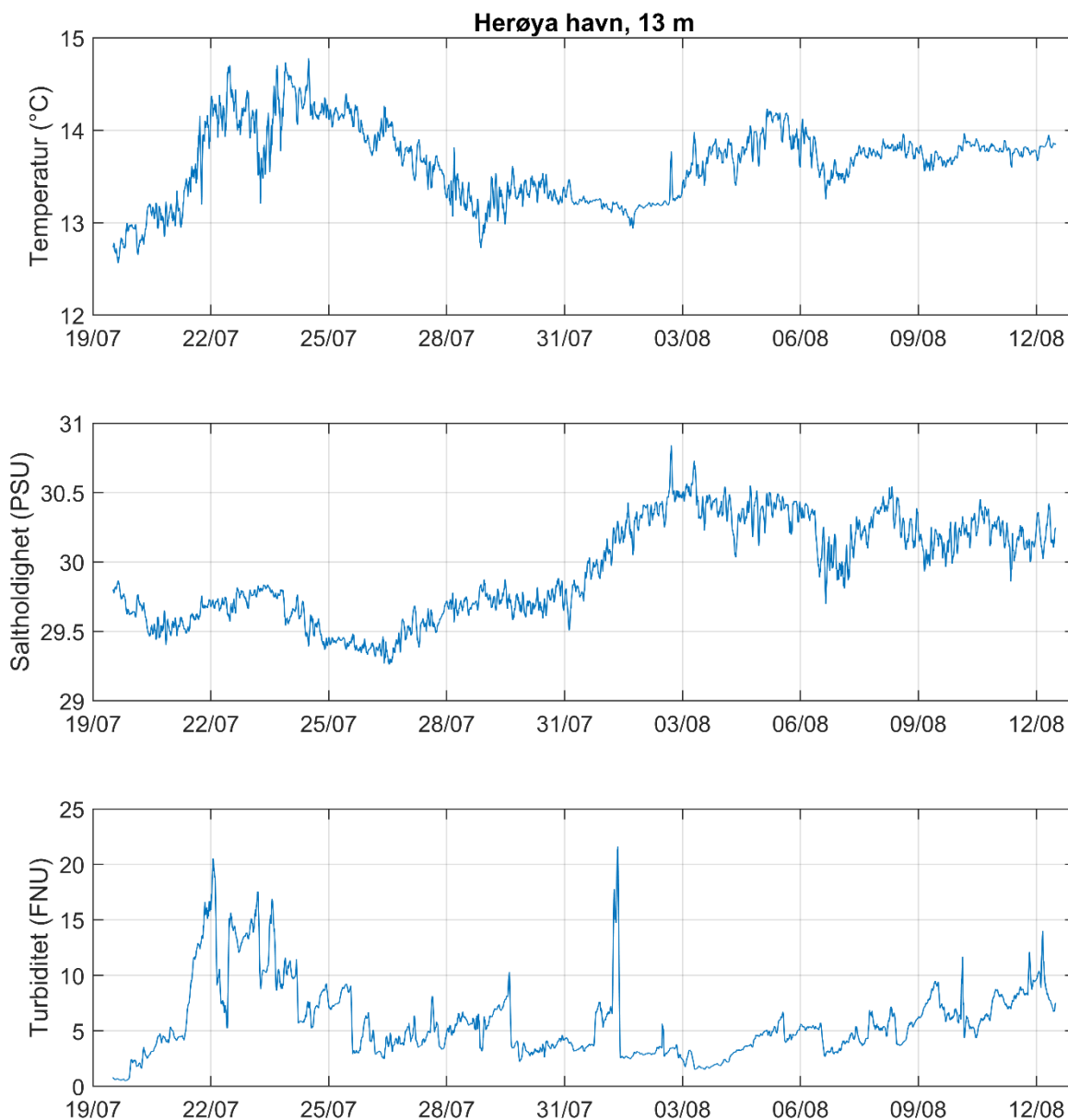
Utenfor Herøya var det utplassert en RCM Seaguard. Denne måleren målte vannstrøm og turbiditet på ca. 13 m dyp. Utenfor Rafnes var det utplassert en profilerende strømmåler (Aquadopp ADCP) som måler vannstrømmen i hele vannsøylen. Denne måleren ble dessverre plassert i en skråning som gjør at måleserien herfra har veldig mye støy. Til etablering av de nye boksene har vi derfor vektlagt målingene utenfor Herøya havn. Plassering av målepunktene er vist i Figur 9.



**Figur 9.** Posisjoner (røde punkter) hvor det var utplassert strømmålere i juli-august 2023, med detaljert bunntopografi i Frierfjorden. Dybden angir gjennomsnittlig dybde til trykksensor i målerne.

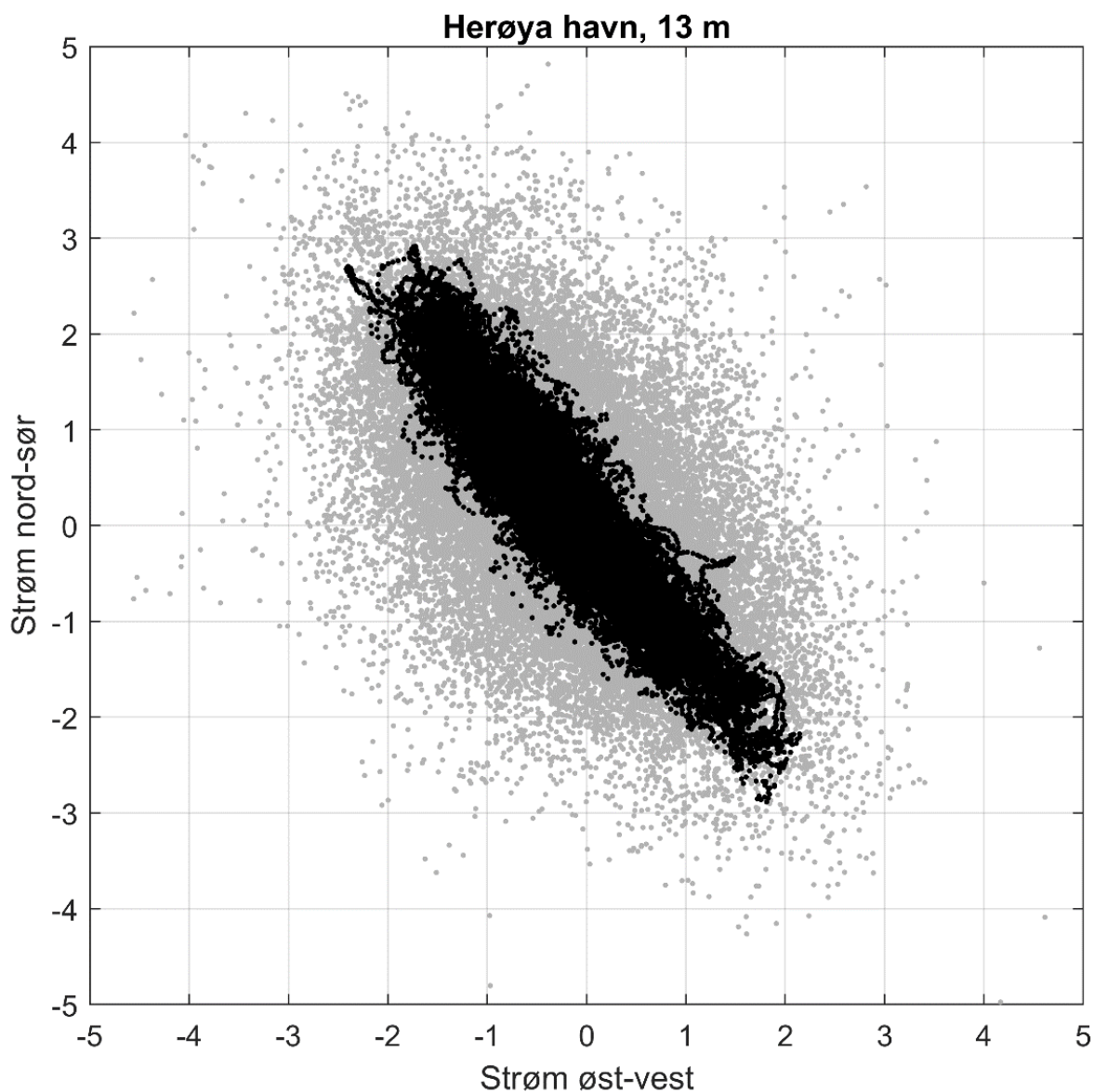
Figur 10 viser resultater fra målingene i utkant av Herøya. Det var flom i Skienselva i starten av august 2023, men dette ga ikke utslag på målingene. Sammen med den stabilt høye saltholdigheten viser dette tydelig at forholdene i dette dypet i svært liten grad er påvirket av ferskvannslaget.

Gjennomsnittlig turbiditet på målepunktet ved Herøya var 5,82 FNU, som er svært høyt over en så lang tidsperiode. Dette viser på en jevnlig oppvirvling av sedimenter fra sjøbunnen fra skipspropell og ankringsaktivitet i nærområdet.



**Figur 10.** Målinger fra 19. juli til 12. august 2023 på 13 m dyp i utkant av Herøya.

Figur 11 viser resultater fra strømmålingene i utkant av Herøya, med strøm i nord-sør retning plottet på y-aksen, og strøm i øst-vest retning plottet på x-aksen. Strømmålinger er registrert hvert minutt gjennom hele måleperioden. De grå punktene i Figur 11 er midlet over 10 minutter, mens de svarte punktene er midlet over 1 time. Plottet viser at strømmens hovedretning utenfor Herøya beveger seg frem og tilbake langs kystlinjen. Det er ingen middelstrøm i noen retning, som igjen viser at forholdene i det aktuelle måledypet (13 meter) ikke er påvirket av Skienselva (se Figur 4). Typisk strømstyrke i vandyp 13 meter er 1-3 cm/s.

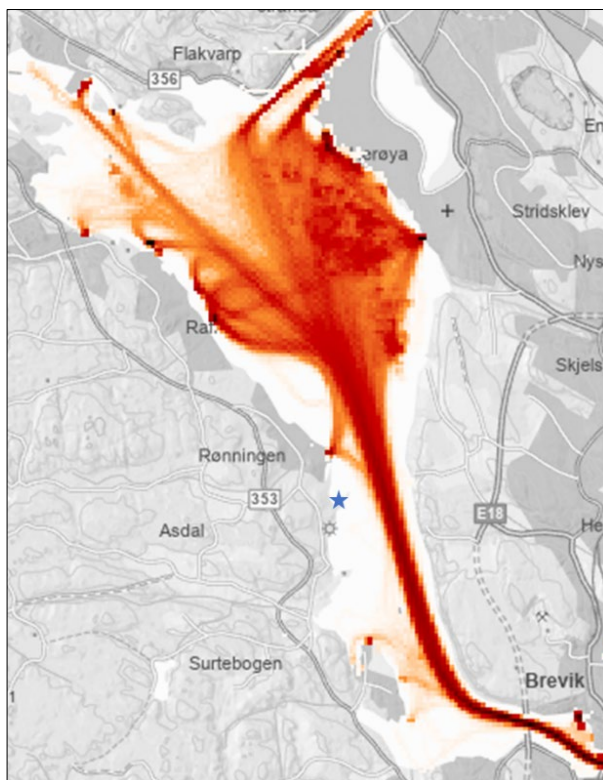


**Figur 11.** Strømmålinger fra 19. juli til 12. august 2023 på 13 m dyp i utkant av Herøya. De grå prikkene er strømmålinger midlet til hvert 10. minutt. De svarte prikkene er strømmålinger midlet til hver time.

## 4 Data om skipstrafikk

### 4.1 Skipsdata

Figur 12 viser et representativt tetthetsplot for dagens trafikksituasjon i Frierfjorden. Siden 2010 anløper årlig 2200-2800 fartøy Frierfjorden, omtrent halvparten av disse anløper Herøya industripark.



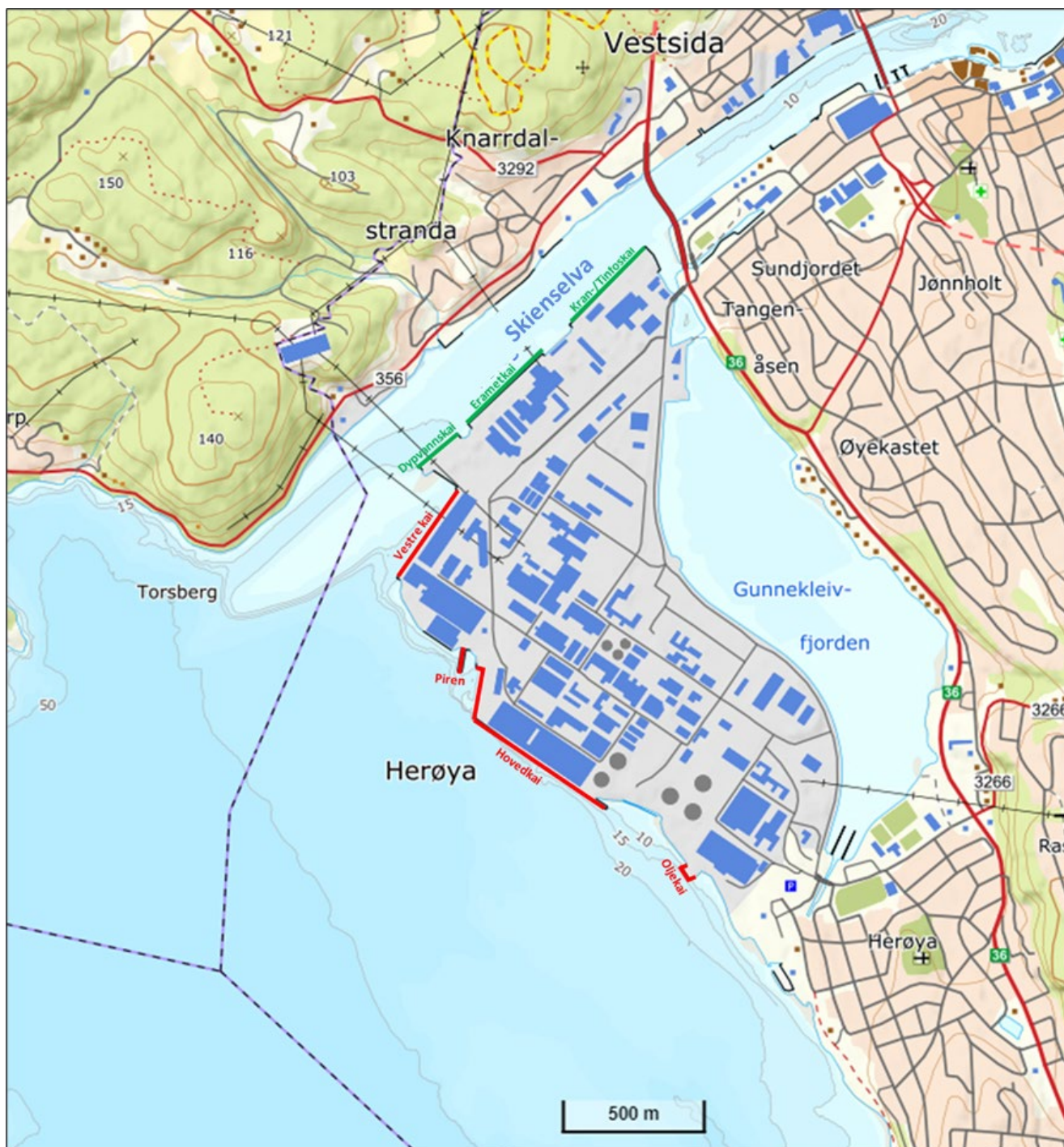
**Figur 12.** Tetthetsplot med skipstrafikk i Frierfjorden i 2016 for skip >15 meter. Blå stjerne indikerer hvor nytt havneanlegg Frier Vest blir etablert, med forventet oppstart i 2025. Fra Kystinfo.no.

Detaljerte skipsdata for perioden etter 2010 er hentet fra Kystdatahuset<sup>8</sup>. Anløp til Herøya industripark er i Kystdatahuset registrert enten under «Porsgrunn» eller «Herøya». Figur 13 gir en oversikt over hvilke kaiområder som sorterer under hvilken destinasjon.

Dioksinutslippet fra den gamle magnesiumfabrikken på Herøya begynte allerede tidlig på 1950-tallet (Figur 6). Det har derimot vist seg vanskelig å finne skipsdata så langt tilbake i tid, det er derfor valgt å begrense modelleringene til den tidsperioden som vi finner tilforlidelige data for.

For perioden før 2010 er antall skipsanløp estimert i samråd med berørte industrier rundt Frierfjorden. Yara Porsgrunn har delt bedriftens egne anløpsdata tilbake til år 2003. Lengre tilbake i tid er årlige anløp til Yara estimert av NIVA, liksom anløp til Eramet frem til 2010. Ineos/Inovyn, som er brukere av kaianleggene på Rafnes, har estimert skipsanløp helt tilbake til oppstarten i 1978 (0).

<sup>8</sup> <https://kystdatahuset.no/>



**Figur 13.** Oversikt over kaiområder i anslutning til Herøya industripark. Skipsanløp til kaianlegg i grønt registreres under Porsgrunn havn som i SedFlex sorteres under delområde *Skienselva*, mens anløp til kaianlegg i rødt registreres under Herøya havn i Kystdatahuset. Kart fra Norgeskart.



**Tabell 8.** Tidsserier for månedlige anløp til Frierfjorden fordelt på delområder i SedFlex. Grå tall indikerer estimerte anløp.

År	Skienselva	Herøya havn	Rafnes havn
1978-2002	35,3	72,6	58,0 <sup>a</sup>
2003	35,3	75,9	64,5
2004	35,3	72,6	64,5
2005	35,3	69,8	64,5
2006	35,3	72,6	52,6
2007	35,3	74,3	56,3
2008	35,3	72,6	52,5
2009	35,3	54,0	46,3
2010	36,3	73,8	63,1
2011	35,6	68,3	54,3
2012	37,3	68,3	50,8
2013	35,6	66,8	50,3
2014	31,3	68,4	48,7
2015	26,3	79,7	56,3
2016	23,6	71,3	52,8
2017	24,8	79,7	54,5
2018	24,9	79,8	53,6
2019	20,3	75,6	50,3
2020	17,5	76,8	51,3
2021	15,9	84,5	51,3
2022	18,8	74,5	35,3
Fra 2023	21,5	72,6	48,0

<sup>a</sup> Gjennomsnitt for hele perioden 1978-2002.

## 4.2 Oppvirvling fra skipspropeller

Oppvirvling fra skipspropeller i forbindelse med anløp til noen av kaianleggene i Frierfjorden er hentet fra NIVAs tidligere undersøkelser i området (Håvardstun og Bakke 2010; Håvardstun m.fl. 2012, Bakke og Håvardstun 2012). Oppvirvlet mengde sediment pr skipsanløp (ankomst + avgang) er beregnet for total trasélengde med vanddyb <20 meter som fartøyene tilbakelegger på vei til og fra kai. Det er derfor en god korrelasjon mellom trasélengde og oppvirvlet mengde sjøsediment (Figur 14).

Størst trasélengde ses for anløp til Skienselva (1416 meter), som derfor gir større mengde oppvirvlet sediment (11 283 kg TS pr anløp) sammenlignet med anløp til Herøya og Rafnes (0). Derimot ses en større mengde oppvirvlet sediment for anløp til Rafnes enn til Herøya, til tross for at trasélengden til Rafnes er snau halvparten så lang. Beregnet mengde oppvirvlet sediment er basert på turbiditetsmålinger i havneområdene og gjenspeiler trolig anløp av større skip til Rafnes, med større behov for slepebåter. Trasélengder og oppvirvlet sedimentmengde oppgitt i Tabell 9 er vektet, dvs. at de er beregnet fra antall registrerte anløp til enkeltkaier som sorterer under henholdsvis Skienselva, Herøya havn (Figur 13) og Rafnes havn.

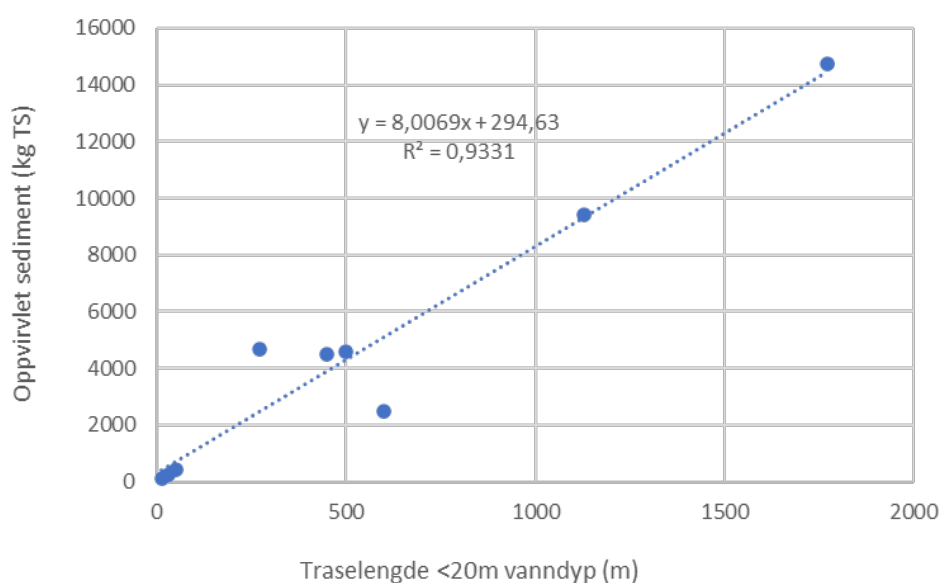
**Tabell 9.** Beregnet mengde oppvirvlet sediment fra skipspropeller i forbindelse med anløp til kaianlegg i Frierfjorden. Data er hentet fra Håvardstun og Bakke 2010; Håvardstun m.fl. 2012, Bakke og Håvardstun 2012.

Delområde	Trasélengde <20m vanddyp (vektet)	Oppvirvlet sediment (vektet)
Skienselva	1416 meter <sup>a</sup>	11 283 kg TS/anløp
Herøya havn	810 meter <sup>b</sup>	3 257 kg TS/anløp
Rafnes havn	428 meter <sup>c</sup>	4 562 kg TS/anløp

<sup>a</sup> Vektet trasélengde beregnet fra skipstrafikk hhv. til Erametkai og Tinfos-/krankai.

<sup>b</sup> Vektet trasélengde beregnet fra skipstrafikk hhv. til oljekai, hovedkai, piren, vestre kai og dypvannskai.

<sup>c</sup> Vektet trasélengde beregnet fra skipstrafikk hhv. til kai 1, 2 og 3 på Rafnes.



**Figur 14.** Sammenheng mellom tilbakelagt trasélengde med vanddyp mindre enn 20 meter, og oppvirvlet mengde sediment fra skipspropeller. Data fra Håvardstun og Bakke 2010; Håvardstun m.fl. 2012, Bakke og Håvardstun 2012.

### 4.3 Oppvirvling fra ankring

Frierfjorden har ankringsfelt på Herreflaket utenfor Herre/Rafnes, og på Frierflaket utenfor Herøya (Figur 16). I Kystdatahuset registreres alle oppankringer i Frierfjorden med en felles destinasjon (NOZFR), nøyaktig fordeling mellom de to oppankringsområdene er derimot ikke transparent. Vi har i dette prosjektet valgt å beregne sedimentoppvirvling med utgangspunkt i at alle oppankringer i Frierfjorden skjer på Frierflaket.

Basert på turbiditetsmålinger i utkant av Herøya i juli-august 2023 er det gjort forsøk på å matche turbiditet i vannsøylen observert med sensoren på RCM Seaguard, med skipsdata i den samme perioden (Figur 15). Det har imidlertid vist seg vanskelig å tallfeste en kvantitativ sammenheng mellom fartøyenes posisjon og/eller størrelse, og målt turbiditet i vannsøylen. Oppvirvling fra ankring er isteden beregnet på grunnlag av gjennomsnittlig vanddyp i oppankringsområde Frierflaket.

Skip som ligger oppankret på Frierflaket driver med tidevannsstrømmene og gir over tid en sirkelformet bevegelse når fartøyets posisjon plottes i kart (Figur 17). Midlet drivhastighet for skip som ligger oppankret i Frierfjorden er beregnet til 4,6 cm/s fra sporingsdata i Kystdatahuset. Det er til enhver tid skip oppankret i området, dermed er det også en kontinuerlig oppvirvling av sediment fra sjøbunnen som skyldes at anker og ankerkjetting slepes langs bunnen. Utgangspunkt for beregningene er at lengden av ankerkjettingen som ligger på sjøbunnen tilsvarer 1/3 av gjennomsnittlig vanddyb 38,3 meter i oppankringsområdet. Dvs. at i SedFlex slepes 12,8 meter ankerkjetting langs sjøbunnen fra hvert skip som er registrert som oppankret i Frierfjorden.

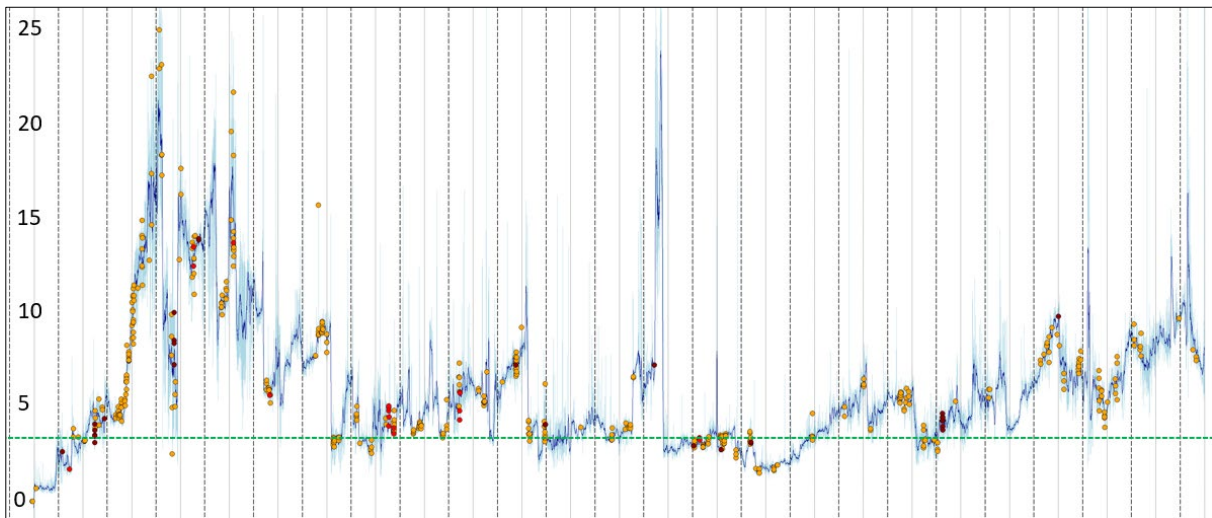
Oppvirvlingsberegninger tar utgangspunkt i 0,3 m<sup>3</sup> oppvirvlet sjøsediment pr ankringstime, basert på forventet 20 cm påvirket bredde, og 10 cm påvirket dybde på sjøbunnen (Tabell 10). Oppvirvling i forbindelse med nedsenking og oppheising av anker er hentet fra en tidligere NIVA-studie i Kristiansandsfjorden (Molvær og Bjerkeng 2003). Basert på beregningsgrunnlaget i Tabell 10 er oppvirvling fra ankring i Frierfjorden tallfestet til 607 349 kg TS pr måned.

Bulkskipet «Full City» grunnstøtte på Såstein utenfor Langesund natt til 31. juli 2009 og medførte at Såsteinflaket ble tatt ut som ankringsfelt. Nye retningslinjer etter Full City har medført en økning i antallet oppankringer i Frierfjorden, i SedFlex er det antatt 20% økning i antallet oppankringer i Frierfjorden med start 1.januar 2010. Basert på det samme beregningsgrunnlaget gir det oppvirvling av totalt 759 186 kg TS pr måned, det vil si at det mengden oppvirvlet sediment øker med ca. 25% etter Full City-uhellet.

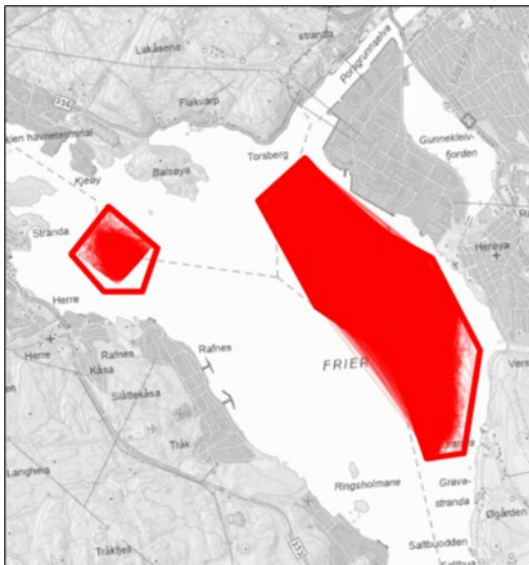
**Tabell 10.** Beregningsgrunnlag for estimering av sedimentoppvirvling fra oppankringer i Frierfjorden.

Parameter	Beregningsgrunnlag	Kommentar
Gjennomsnittlig vanddyb i oppankringsområdet	38,3 m	
Gjennomsnittlig lengde av ankerkjetting på sjøbunnen	12,8 m	1/3 av vanddyppet
Gjennomsnittlig drivhastighet for oppankrete skip	4,6 cm/s	Kystdatahuset
Estimert oppvirvlet sedimentvolum pr skip	0,30 m <sup>3</sup> /h	
Andel tørrstoff i oppvirvlet sediment	0,46	Vannmiljø
Densitet tørrstoff	2800 kg/m <sup>3</sup>	Sikringshandboka <sup>9</sup>
Oppvirvlet sedimentmengde pr skip	384 kg TS/h	
Oppvirvlet sedimentmengde pr ankernedsenking	0,2 kg TS	Molvær og Bjerkeng 2003
Løsrevet sedimentmengde pr ankeroppheising	3,3 kg TS	
Oppankringstimer til 2010	1582 h/måned	
Oppankringstimer etter 2010	1977 h/måned	Kystdatahuset

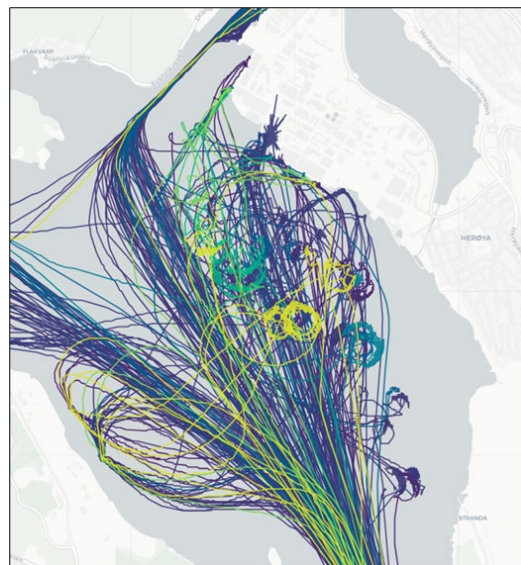
<sup>9</sup> <https://sikringshandboka.nve.no/moduler/modul-g2-001-omregning-av-volum-av-masser/>



**Figur 15.** Målt turbiditet (FNU, y-akse) i utkant av Herøya overlappet med skipstrafikk (oransje/røde ringer) innenfor 750 meter fra måleinstrumentet. Grønn stiplet linje (ca. 3 FNU) indikerer baseline i måleserien. Oransje ringer markerer slepebåter, mens røde ringer markerer tankskip. Skipsregistreringer fra Kystdatahuset er plottet i henhold til aktuelt tidspunkt på x-aksen og har ingen direkte sammenheng med avstanden mellom skip og målt turbiditet på y-aksen.



**Figur 16.** Oppankringsfelt i Frierfjorden med sporingsdata som viser registrerte oppankringer i perioden 2015-2022. Data fra Kystdatahuset.



**Figur 17.** Sporingsdata i Frierfjorden i juli-august 2023, med karakteristiske, sirkelformete drivspor fra oppankringer på Frierflaket. Data fra Kystdatahuset.

## 5 Aktuelle tiltak for å redusere spredning av miljøgifter fra sedimentene

SedFlex brukes i denne studien til å modellere effekten av tiltak for å rydde opp i forurenset sjøbunn i ulike delområder av Frierfjorden. Effekten av tiltakene vurderes ved å se på konsentrasjonen av dioksinforbindelser i sedimentet og i vannmassene i resten av Frierfjorden. I modelleringene er det antatt at tiltaket som gjøres er 100% effektivt med tanke på å fjerne forurensingen i overflatesedimentet i det området der tiltaket gjøres, men at sedimentet i dette området over tid kan påvirkes av sedimentasjon av partikler fra områder der det ikke er gjort tiltak.

Her er de mest relevante tiltakene for å rydde opp i forurensete sedimenter beskrevet, og erfaringer med effektiviteten av slike tiltak er beskrevet sammen med andre utfordringer knyttet til gjennomføring og bærekraftsmessige effekter av tiltakene.

Tiltak i forurensete sedimenter gjennomføres som regel med målsetning om å redusere eksponeringen til lokal bunnfauna, eller for å redusere spredning av forurensingen til omkringliggende områder. Det er tre grunnleggende tilnærminger for å oppnå dette:

- Flytte de forurensete sedimentene for å så isolere dem et annet sted (mudring og deponering).
- Isolere de forurensete sedimentene der de ligger (tildekking).
- Vente til de forurensete sedimentene naturlig dekkes til av renere sedimenter (naturlig restitusjon).

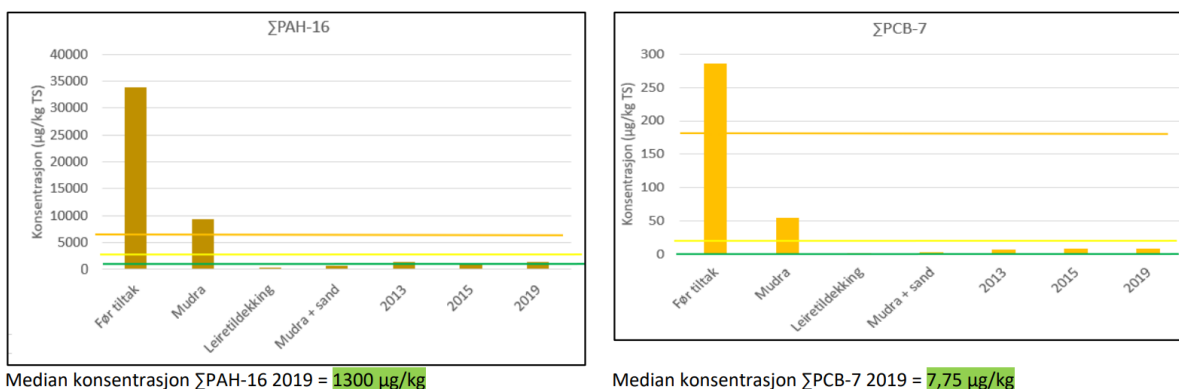
### 5.1 Mudring og deponering

Mudring kan gjøres for å fjerne forurensete sedimenter. De mudrede forurensete massene må deretter transporteres til et deponi som gir tilfredsstillende isolasjon av de forurensete massene.

Mudring som metode for opprydding i forurensete sedimenter har to viktige utfordringer:

- Forflytning og deponering av store volumer forurensete masser.  
➔ *Medfører høye kostnader og ressursbruk (energi til graving og areal til deponering).*
- Vanskelig å mudre slik at sedimentoverflaten etter mudring blir ren (se eksempel i Figur 18).  
➔ *Medfører mudring av store volum, inkludert overmudring av rene masser under forurenset masse, og at det ofte er nødvendig å dekke til sjøbunnen for å ende opp med ren sjøbunn.*

Mudring alene kan ikke forventes å gi 100% effektivitet og er derfor mest aktuelt i havneområder der krav til seilingsdyp gjør at det er behov for å fjerne masse før en eventuell tildekking.



**Figur 18.** Eksempel på effekt av mudring og tildekking fra gjennomførte tiltak i Oslo havn (Bjørvika og Lohavn). Fra NGI 2020.

## 5.2 Tildekking

Tildekking av forurenset sjøbunn med rene masser gjøres for å isolere de forurensete sedimentene fra bunnfauna som lever i den øverste delen av sedimentet i overgangen mellom sediment og vann, eller for å hindre spredning fra de forurensete sedimentene.

Tildekking vil som regel gi tilnærmet 100 % tiltakseffektivitet like etter gjennomføringen (se eksempel i Figur 18). Over tid vil konsentrasjonen i sedimentet på sjøbunnen igjen øke, men som regel mot en lavere verdi enn konsentrasjonen før tildekkingen. Denne økningen skyldes tilførsel av nye sedimenter som inneholder restforurensning fra gjenværende kilder på land, eller som tilføres det tildekkede området fra tilstøtende områder som ikke er dekket til. Det er gjennom en rekke studier dokumentert at transport av forurensning gjennom en tildekking er lav (Eek et al., 2010; Eek et al., 2008; Quadrini et al., 2003), og at det derfor er rekontaminering fra kilder utenfor tiltaksområdet som vil ha betydning for en eventuell rekontaminering.

Tildekking av forurenset sjøbunn er også kostbare tiltak da rene masser må produseres, fraktes til området som skal tildekkes, og legges ut på en kontrollert måte slik at massene danner et jevnt isolasjonslag over de forurensete massene. Produksjon av rene masser vil ofte bety naturinngrep, og vil sammen med de andre prosessene innebære betydelig energibruk. Dersom rene overskuddsmasser fra kilder i nærheten kan brukes som tildekkingsmasse vil dette innebære betydelig økonomiske og miljømessige besparelser.

Avhengig av hvilke masser som brukes så vil sjøbunnen etter en tildekking ofte ha en annerledes fysisk beskaffenhet enn før tiltaket. Dette betyr at sjøbunnen vil ha andre egenskaper som substrat for bunnlevende organismer, som fører til langsommere reetablering av bunnfaunaen, eller at andre arter vil etablere seg før naturlig sedimentert sediment etter hvert vil dominere igjen.

Tildekking av forurenset sjøbunn kan prosjekteres slik at den tar hensyn til, og minimerer mekanismer som kan gi transport av miljøgifter fra sjøbunnen og ut i vannmassene over, eller som reduserer effekten av tildekkingen (Figur 19).



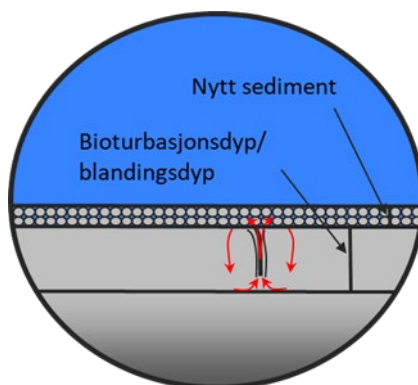
**Figur 19.** Konseptuell oppbygging av tildekking på forurenset sjøbunn.

### 5.3 Null-alternativet: Naturlig restitusjon

Naturlig restitusjon representerer null-alternativet ved vurdering av tiltak. I tilfeller hvor modelleringer viser at man kan oppnå gode nok resultater innen rimelig tid ved at nytt og renere sediment tilføres naturlig så vil det være det beste alternativet. Nytt partikulært materiale vil hele tiden tilføres en vannforekomst slik som Frierfjorden og kontinuerlig danne nytt sediment på sjøbunnen. Hvis det nye sedimentet er renere enn det eksisterende sedimentet vil det forurensete sedimentet gradvis dekket til og sjøbunnen blir renere av seg selv (naturlig restitusjon).

Bunnsfauna vil blande det nye materialet ned til et dyp på typisk 2–5 cm (bioturbasjonsdyp, se Figur 20), slik at forurenset sediment vil blandes med det nye sedimentet. I områder med stor tilførsel av nytt sediment vil naturlig restitusjon av forurenset sjøbunn gå raskere og det vil i slike tilfeller som regel ikke være aktuelt med tiltak for å rydde opp i forurenset sjøbunn. Også i områder med moderat sedimentasjon slik som i Frierfjorden er det viktig å vurdere om naturlig restitusjon gir forbedring av tilstanden i en vannforekomst raskt nok, eller om kostnadene (økonomisk og miljømessig) svarer til verdien av en raskere restitusjon sammenlignet med naturlig restitusjon.

Basert på diskusjonen over forventes det at mudring vil være aktuelt i farledsområder der det er liten margin i forhold til ønsket seilingsdyp. Dersom det derimot skal gjøres aktive tiltak for å redusere spredning og tilgjengelighet av miljøgifter på sjøbunnen vil det sannsynlig være nødvendig med tildekking både i farledsområder og utenfor disse.



**Figur 20.** Blanding av nytt sediment i eksisterende sediment.

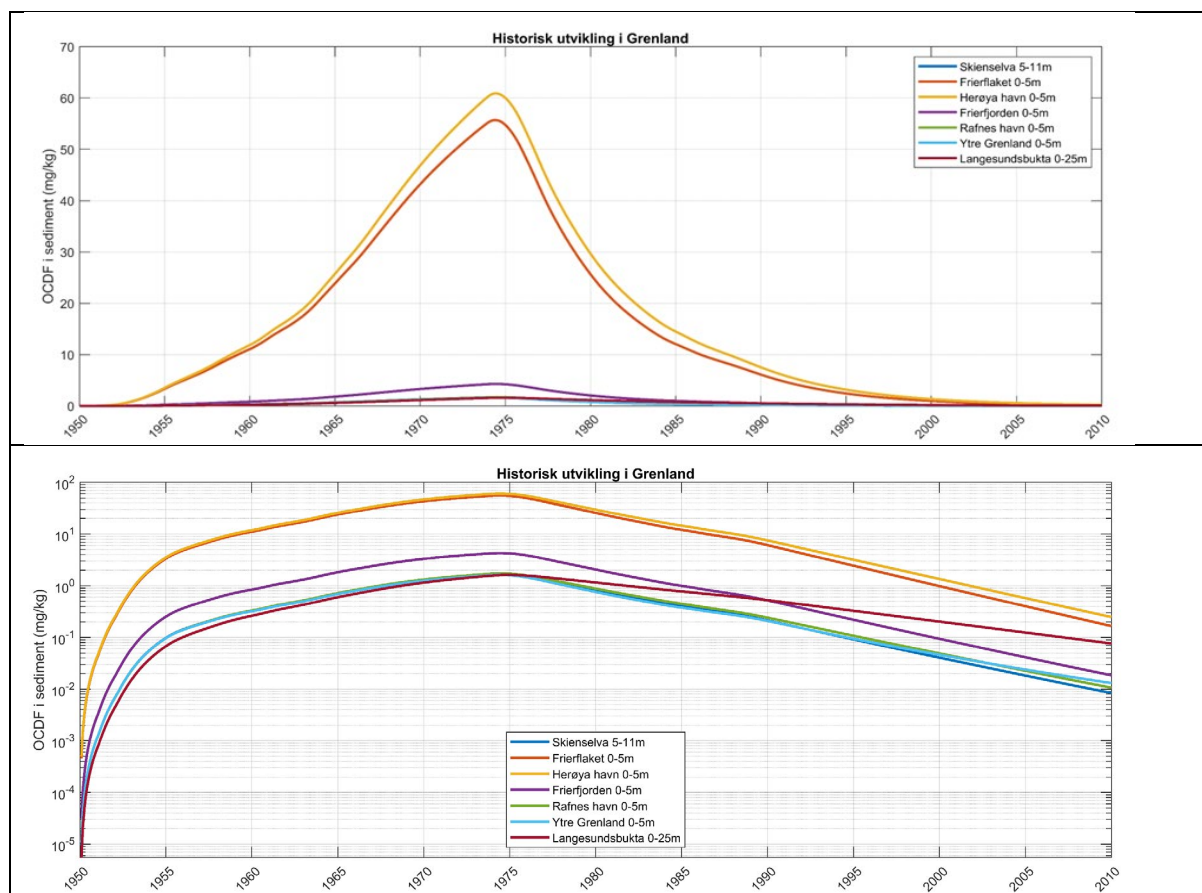
## 6 Resultater

### 6.1 Historisk utvikling av dioksinforbindelser i sedimentene

I alle fremviste simuleringer er det valgt å bruke enkeltforbindelsen OCDF som markørstoff for dioksinforbindelser i henholdsvis i sediment og vannsøyle. Det er mange observasjoner av OCDF i sedimentprøver fra Frierfjorden, i de fleste tilfeller oppviser OCDF også de høyeste måleverdiene og gjenspeiler derfor på en god måte utslippet fra magnesiumfabrikken.

I Figur 21 ser vi på den historiske utviklingen av OCDF i sedimenter fra de forskjellige delområdene slik det er modellert med SedFlex. Det er valgt å sammenligne overflatelaget (0-5 m) i hver boks, bortsett fra i Skienselva hvor vi ser på bunnlaget (5-11 m). Overflatelaget har de høyeste sedimentkonsentrasjonene bortsett fra i Skienselva, hvor bunnlaget er nedstrøms resten av fjordsystemet på grunn av estuarin sirkulasjon. Det vil si at vann fra fjorden dras opp i saltvannskilen i Skienselva.

Under kalibrering estimerte modellen innledningsvis svært høye sedimentkonsentrasjoner i elva. Siden de faktiske observasjonene i elva er relativt lavere enn i andre delområder, konkluderte vi med at dioksinene som dras opp i saltkilen (*kompensasjonsstrøm av sjøvann under, og med motsatt retning av elvevannet*) i elva spres ut i Frierfjorden under flomepisoder og oppvirvling fra skipstrafikk. For å simulere skipstrafikk i elva, ble POC og resuspensjon satt lik det den er utenfor Herøya havn, dette resulterte i bedre samsvar med observasjonene (se Tabell 7).



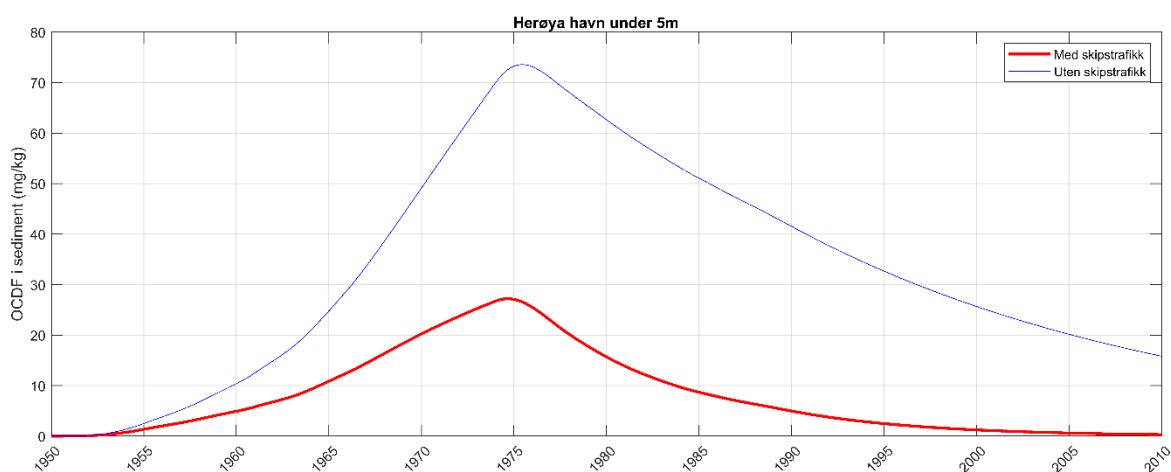
**Figur 21.** Simulert, historisk utvikling av OCDF i sedimentene i Grenland. Øvre figur: lineær y-akse, undre figur: logaritmisk y-akse.



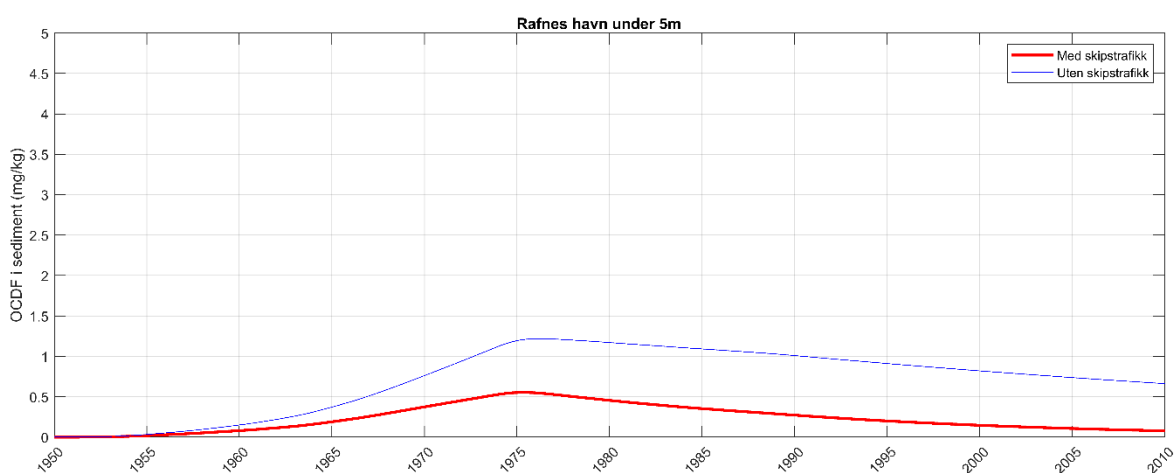
## 6.2 Spredning uten skipstrafikk

Figur 22-Figur 24 viser modellert historisk utvikling av sedimentkonsentrasjoner av markørstoffet OCDF henholdsvis med og uten oppvirvling fra skip for de tre delområdene Herøya havn dyplag (Figur 22), Rafnes havn dyplag (Figur 23) og overflatelaget ved Herøya havn (Figur 24). POC-konsentrasjonen ved Herøya havn er fire ganger høyere enn på stasjon BC-1 sentralt i Frierfjorden (se Tabell 3), dette har vi vurdert at skyldes skipsaktivitet i Frierfjorden. For å simulere situasjonene uten skipstrafikk har POC-konsentrasjonen i havneområdene blitt satt lik målt verdi på BC-1, tilsvarende en fjerdedel av målt turbiditet i utkant av Herøya. Sedimentenes resuspensjonshastighet uten bidrag fra skipstrafikk er derfor også redusert til en fjerdedel.

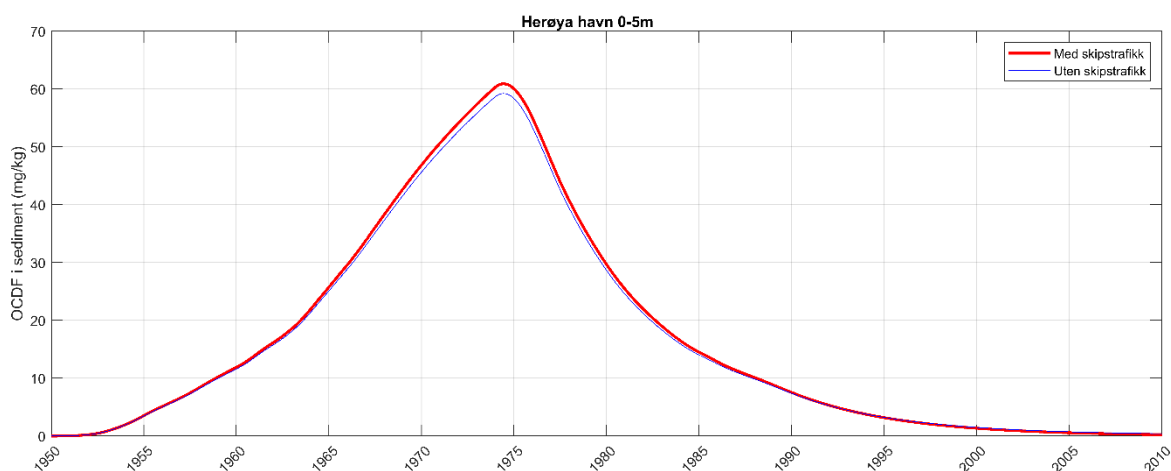
En tenkt situasjon helt uten skipstrafikk gir betydelig redusert spredning av dioksinforbindelser mellom delområder i SedFlex. I slutten av modelleringsperioden er sedimentkonsentrasjoner i havneområdene ca. to størrelsesordener høyere enn i en normalsituasjon med skipstrafikk. Skipstrafikken virvler altså opp forurenset sediment, som blir fraktet ut av havneområdene til andre delområder i Frierfjorden.



**Figur 22.** Historisk utvikling av OCDF i sediment (dyplag) ved Herøya havn med og uten skipstrafikk.



**Figur 23.** Historisk utvikling av OCDF i sediment (dyplag) ved Rafnes havn med og uten skipstrafikk.



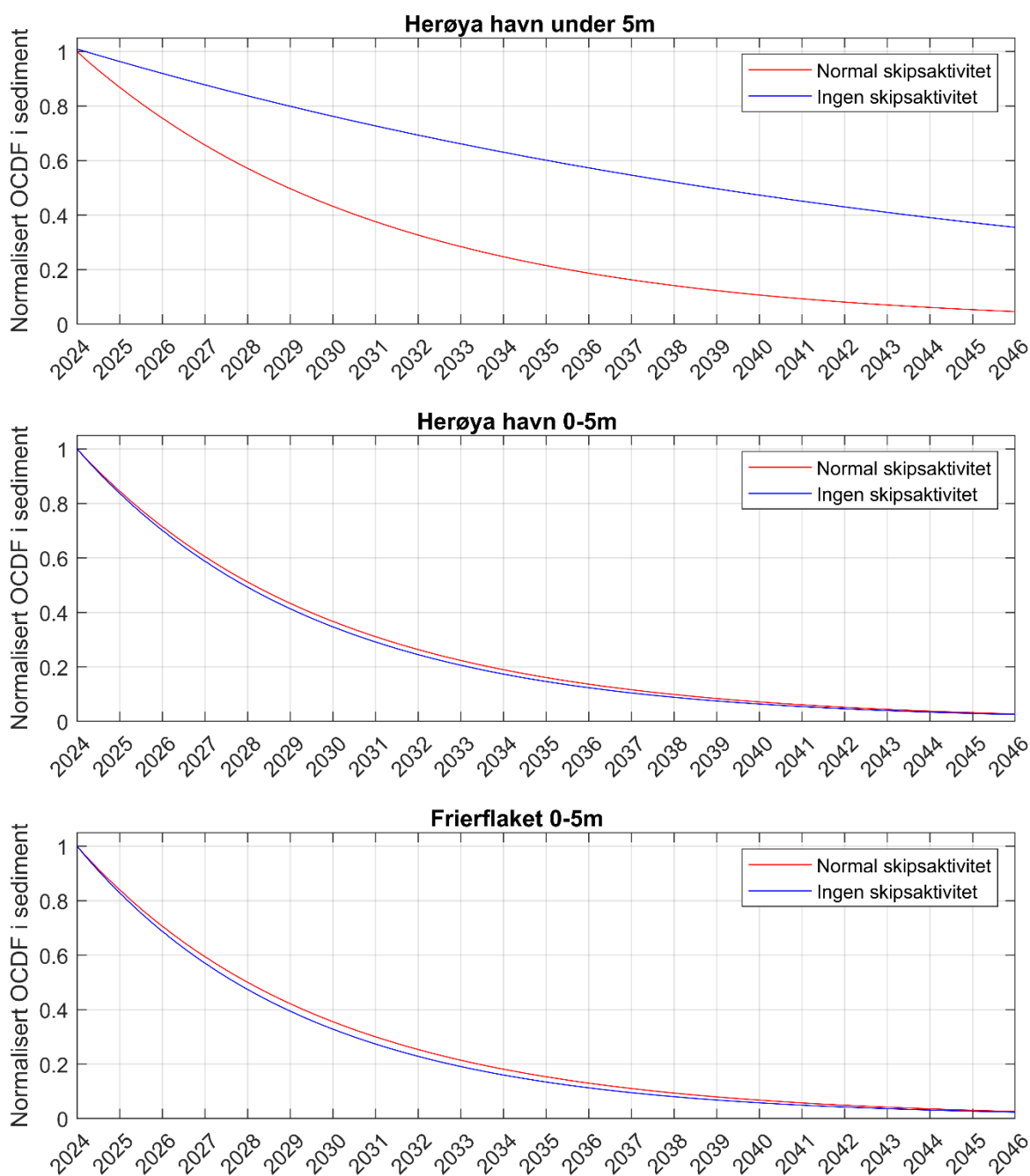
**Figur 24.** Historisk utvikling av OCDF i sediment (overflatelag) ved Herøya havn med og uten skipstrafikk.

Miljøgifter adsorbent på partikler som virvles opp av skipstrafikken vil spres rundt og føre til en økning av sedimentkonsentrasjonene i andre delområder av fjordsystemet. Størst effekt vil det ha i overflatelaget ved Herøya havn (se Figur 24).

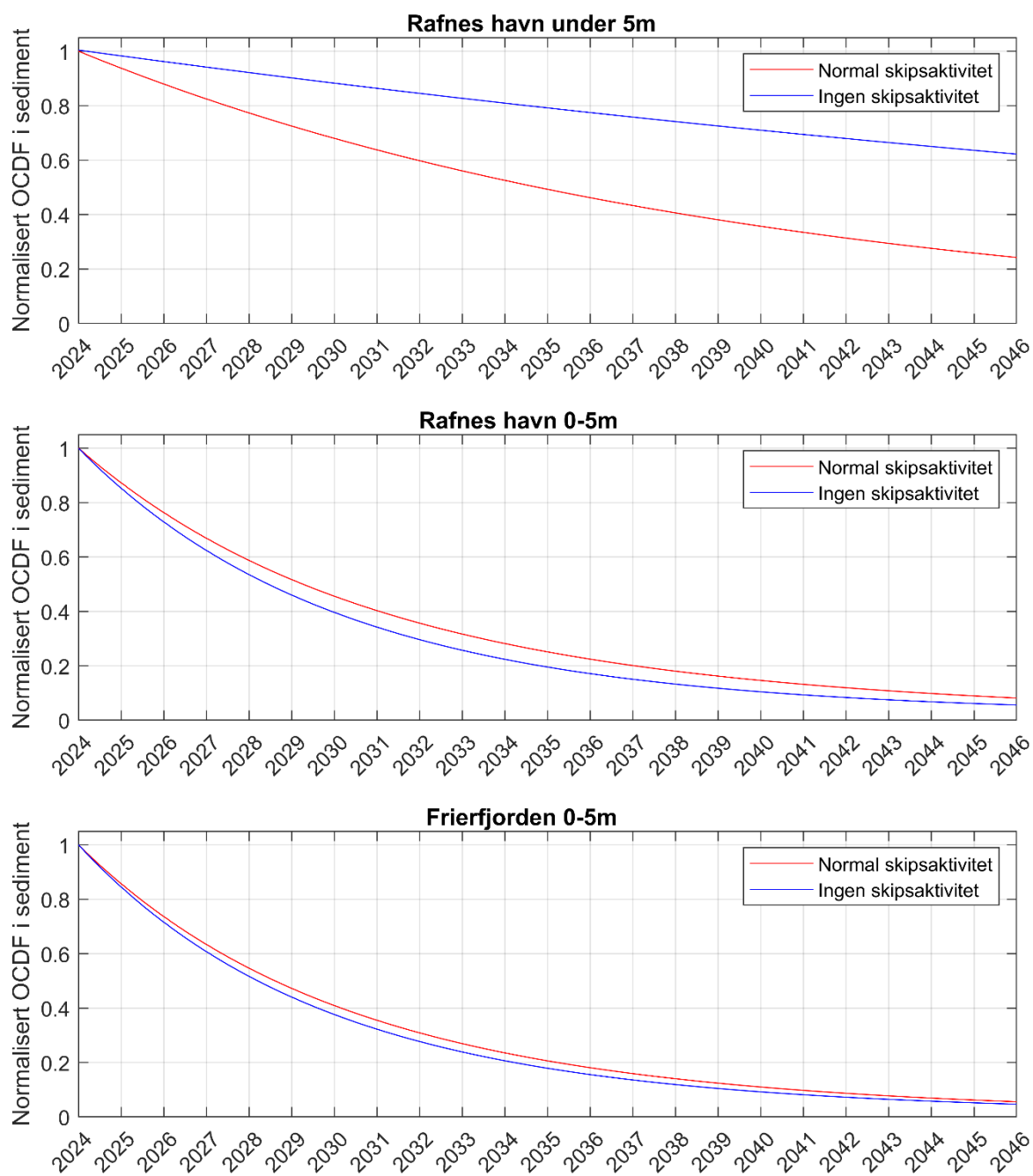
Anledningen til at sedimentkonsentrasjonene i liten grad påvirkes er at oppvirvlet mengde dioksinforbindelser spres over et stort areal. Effekten er derimot større når en ser på mengden dioksinforbindelser oppvirvlet i vannmassene (se delkapittel 6.3).

Figur 25-Figur 27 viser modellerte sedimentkonsentrasjoner av markørstoffet OCDF fremover i tid, henholdsvis med og uten oppvirvling fra skipstrafikk for de tre delområdene Herøya havn (Figur 25), Rafnes havn (Figur 26) og Frierflaket (Figur 27).

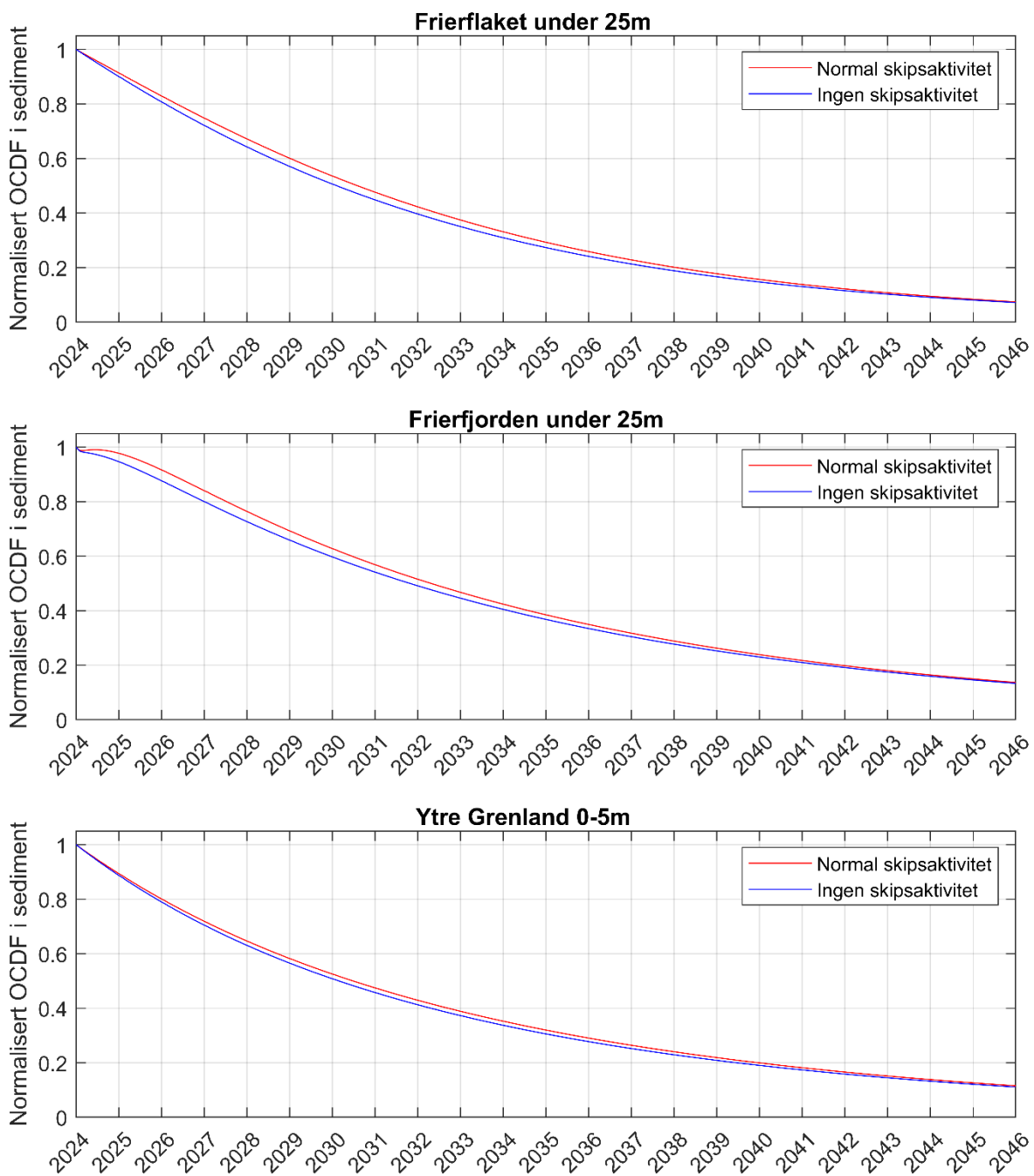
Figur 25 viser at oppvirvling av sedimentet i delområdet Herøya havn fører til at sedimentene gradvis tømmeres for forurensede partikler. Disse oppvirvlede sedimentene spres derimot ut av området og fører til en liten økning i OCDF-konsentrasjonen i sedimentene i delområdene utenfor Herøya havn. En tilsvarende effekt kan ses for Rafnes havn (Figur 26). For delområdet Frierflaket (Figur 27) viser modelleringene at oppvirvling fra skipspropeller har begrenset effekt på spredning av forurensede partikler.



**Figur 25.** Effekt av skipstrafikk på konsentrasjonen OCDF i sjøbunnsediment for delområdene Herøya havn og Frierflaket 0-5 meter.



**Figur 26.** Effekt av skipstrafikk på konsentrasjonen OCDF i sjøbunnsediment for delområdene Rafnes havn og Frierfjorden 0-5 meter.



**Figur 27.** Effekt av skipstrafikk på konsentrasjonen OCDF i sjøbunnsediment for delområdene Frierflaket under 25 meter, Frierfjorden under 25 meter, og Ytre Grenland 0-5 meter.

## 6.3 Effekt av spredning fra skipstrafikk på mengden dioksinforbindelser i vannmassene

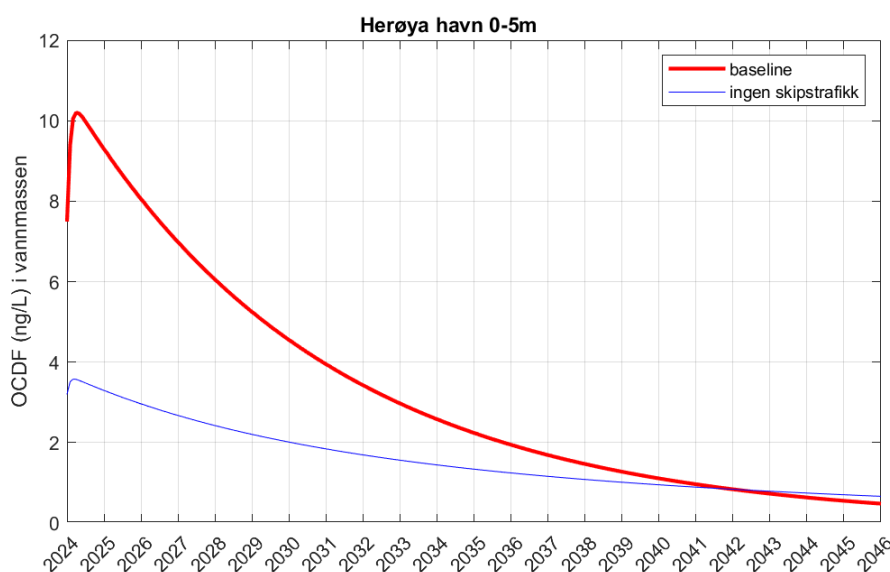
Tabell 11 viser effekten av skipstrafikk i Frierfjorden på forurensede partikler i vannmassen (overflatelaget 0-5 meter), basert på markørstoffet OCDF. Beregningene viser at skipstrafikk til Herøya havn gir en forventet økning av oppvirket OCDF i vannmassen med hele 185%. Økt konsentrasjon OCDF i vannmassen er < 47% i delområde Frierfjorden, og ca. 7% i delområde Ytre Grenland. Økt konsentrasjon av dioksinforbindelser på suspenderte partikler i vannmassene utgjør en økt risiko for eksponering og opptak i pelagiske organismer og trolig også for bentiske organismer som lever av suspendert materiale.

**Tabell 11.** OCDF på suspenderte partikler i vannmassen (overflatelag 0-5 meter) i de ulike delområdene, og forskjell mellom scenario med og uten skipstrafikk.

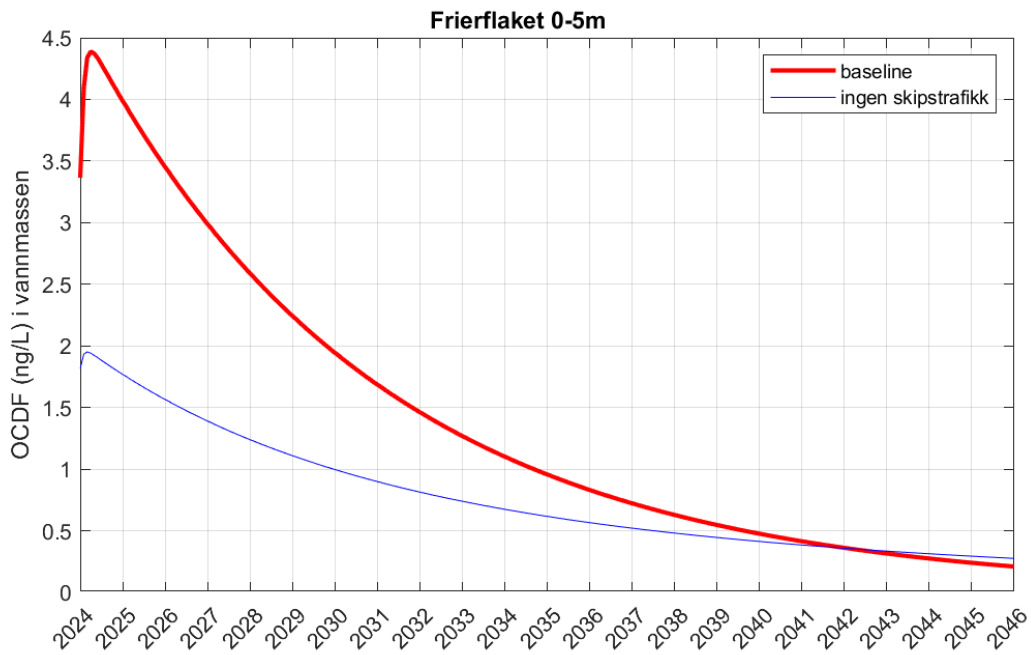
Boks	Areal (km <sup>2</sup> )	Max OCDF med skipstrafikk (ng/L)	Max OCDF uten skipstrafikk (ng/L)	Økning pga. skipstrafikk
Herøya havn	0,340	10,20	3,58	185 %
Frierflaket	2,620	4,38	1,95	125 %
Rafnes havn	0,238	1,43	0,73	96 %
Frierfjorden	17,762	0,91	0,62	47 %
Ytre Grenland	41,900	1,95	1,83	7 %

Tidsutviklingen av OCDF-konsentrasjonen i vannmassene (overflatelaget 0-5 meter) med og uten skipstrafikk er vist i Figur 27 til Figur 32. I disse modelleringene er det igjen estimert at POC ved Rafnes og Herøya havn uten skipstrafikk ville vært som i resten av Frierfjorden. Resuspensjonsraten uten skipstrafikk er derfor satt til en fjerdedel.

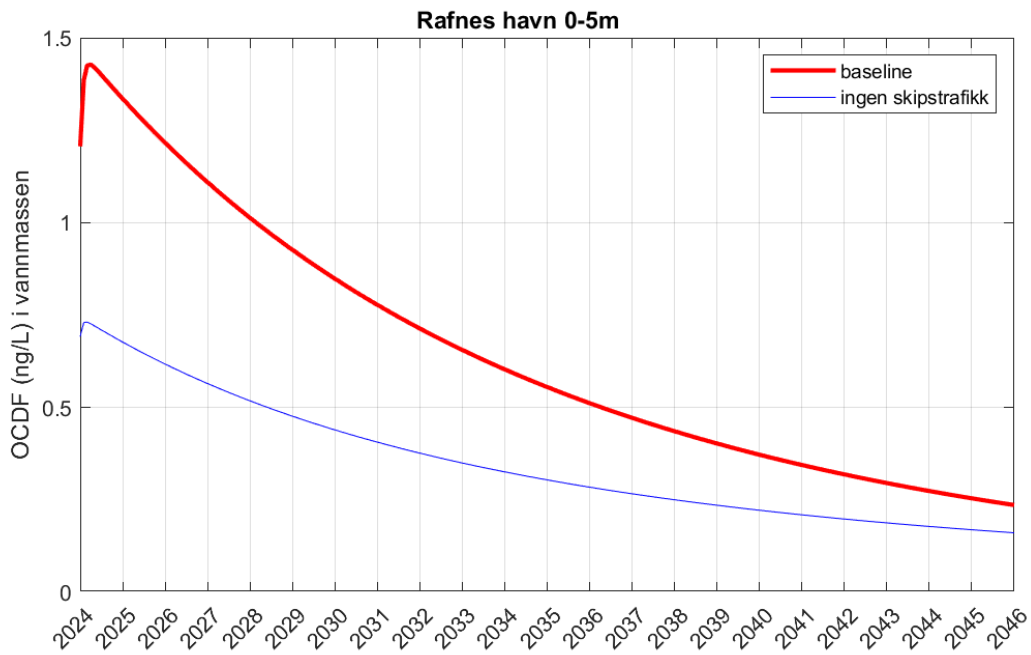
I motsetning til sedimentene, hvor konsentrasjonene endrer seg over lang tid, er effekten på dioksinforbindelser i vannmassene mye raskere. Hvis skipstrafikken endres vil en se størst effekt i vannmassene med en gang, og mindre effekt over tid.



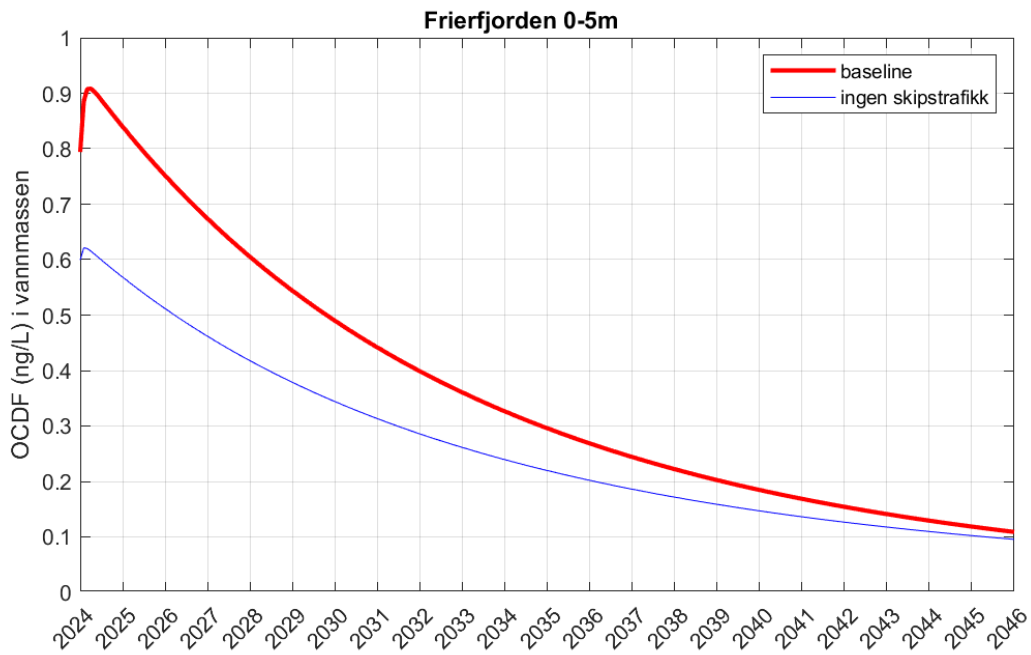
**Figur 28.** Effekt av skipstrafikk på OCDF i vannmassen utenfor Herøya havn.



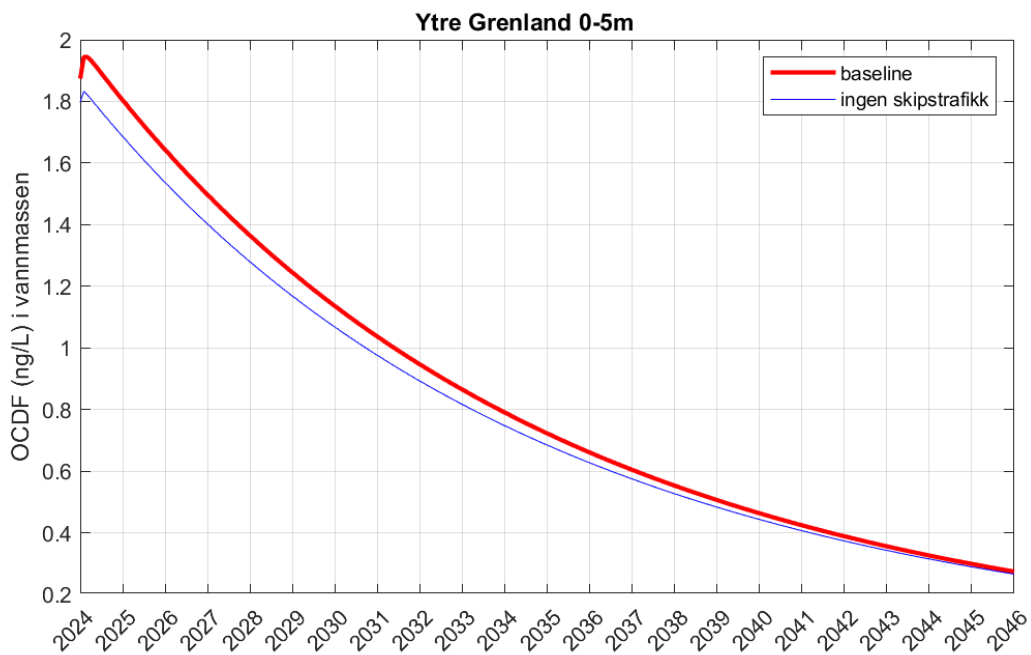
**Figur 29.** Effekt av skipstrafikk på OCDF i vannmassene (overflatelaget 0-5 meter) på Frierflaket.



**Figur 30.** Effekt av skipstrafikk på OCDF i vannmassene (overflatelaget 0-5 meter) utenfor Rafnes havn.



**Figur 31.** Effekt av skipstrafikk på OCDF i vannmassene (overflatelaget 0-5 meter) i Frierfjorden.

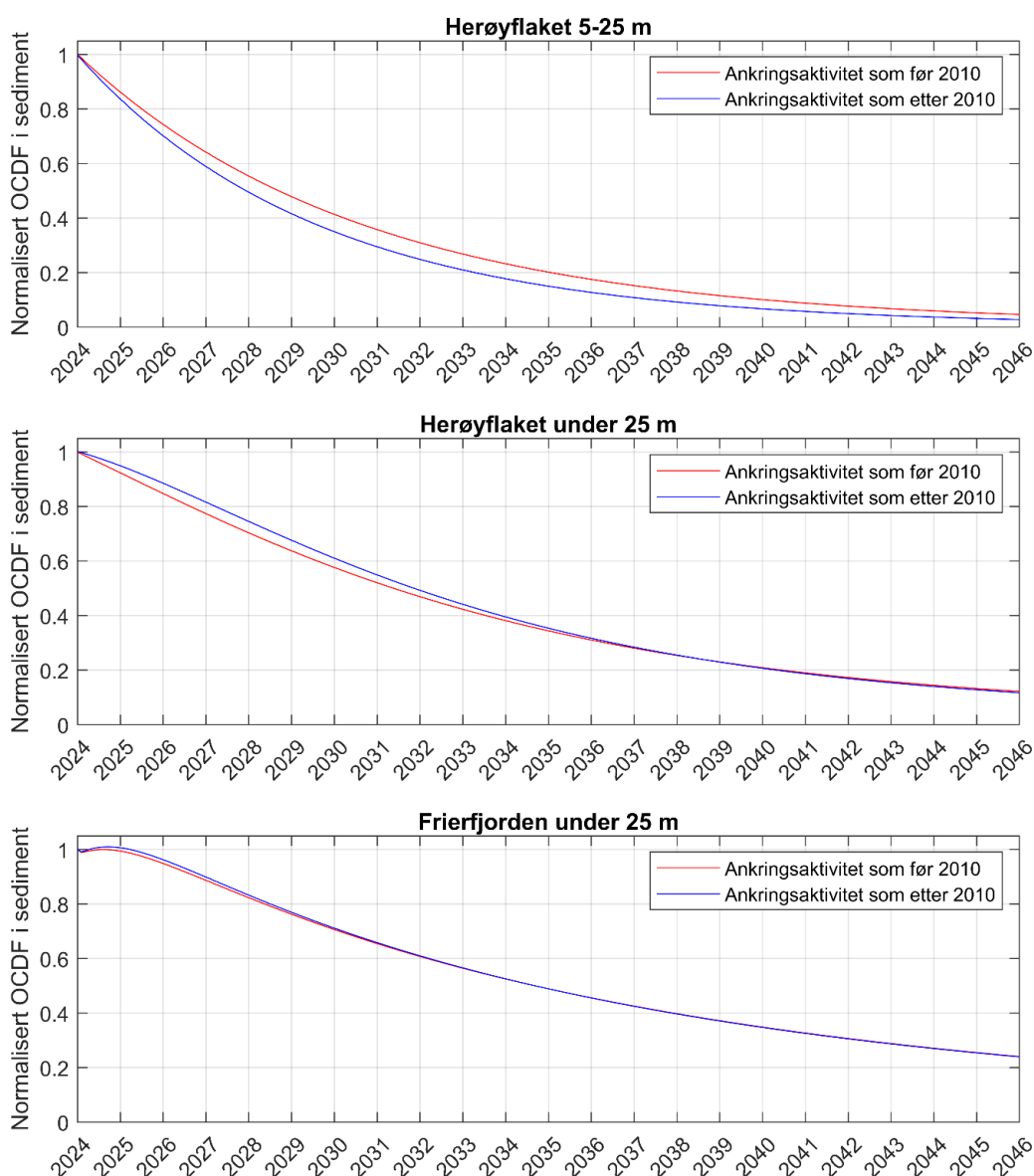


**Figur 32.** Effekt av skipstrafikk på OCDF i vannmassene (overflatelaget 0-5 meter) utenfor Brevik.



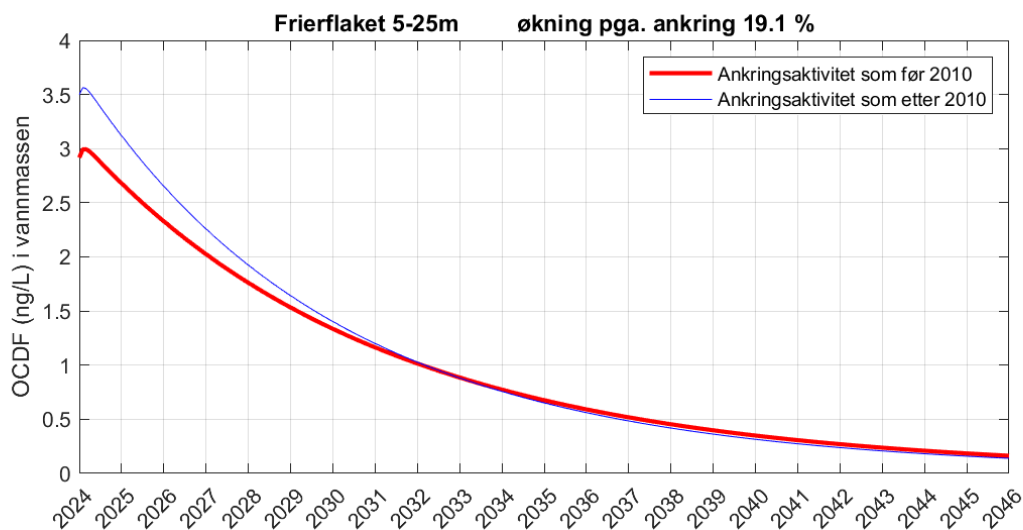
## 6.4 Modellert spredning fra ankring

I Figur 33 er effekt av økt oppankringsaktivitet etter 2010 modellert. POC-konsentrasjonen i vannmassen over oppankringsområdet samt resuspensjonsraten er her estimert å øke med 25% som følge av økt oppankringsaktivitet i Frierfjorden. Estimert endring i mengden oppvirvlet sediment pga. oppankring med tallgrunnlag fra Tabell 10, er lagt til grunn for dette valget. Dette fører til en økt spredning av dioksinforbindelser fra oppankringsområdet (Frierflaket), og at sedimentkonsentrasjonene derfor blir lavere i dette området som følge av økt ankringsaktivitet. Økt spredning bort fra Frierflaket fører naturlig nok til økte sedimentkonsentrasjoner i andre områder, men økningen er liten siden dioksinforbindelsene fordeler seg over store områder.



**Figur 33.** Effekt av økt oppankringsaktivitet etter Full City. Det er antatt at økt oppankring fører til en 25% økning i POC og resuspensjon. I de andre boksene i modellen var det ingen effekt i sedimentkonsentrasjon.

I vannmassene har den økte ankringsaktiviteten etter 2010 ført til høyere konsentrasjoner av dioksinforbindelser. Ifølge modellen har mengden OCDF i vannmassen rett over bunnen i oppankringsfeltet (Frierflaket) økt med 19 % (Figur 34). I resten av Frierfjorden har mengden OCDF i vannmassene økt med 1-2 %, mens økningen utenfor Brevik i delområde Ytre Grenland er nær null.



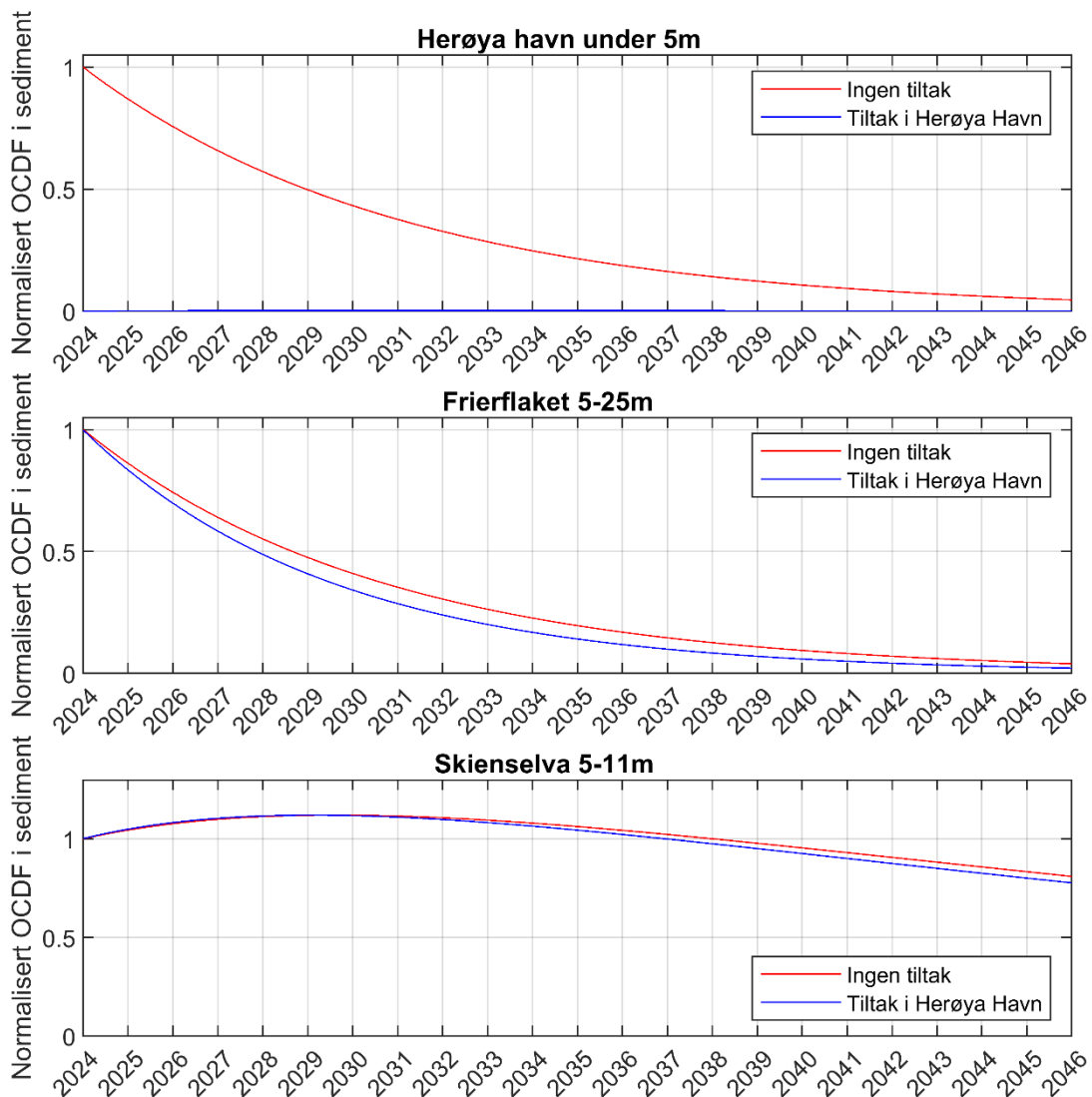
**Figur 34.** Effekt av økt ankringsaktivitet etter 2010 på OCDF i vannmassene.

## 6.5 Effekt av tiltak

### Tiltak i Herøya havn

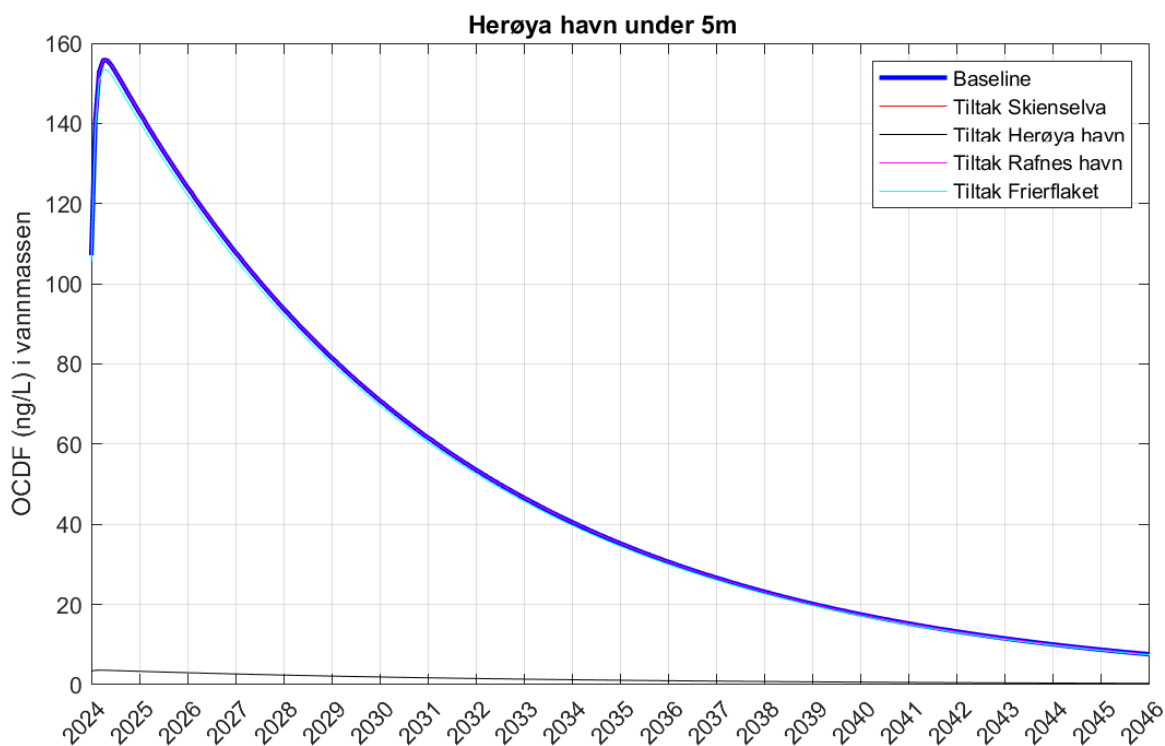
Her er sedimentkonsentrasjonen av OCDF i delområdet Herøya havn satt til null for å simulere tiltak i området (se blå kurve i øverste plott i Figur 35).

Et tiltak i Herøya havn gir begrenset endring i sedimentkonsentrasjoner av OCDF sedimentene i andre delområder. En viss forbedring kan dog ses på Frierflaket og i Skienselva (Figur 35).



**Figur 35.** Effekt av tiltak i Herøya havn. Startkonsentrasjonen for OCDF i tiltaksområdet er satt til null (blå kurve) og sammenlignet med baseline (rød kurve).

Størst konsentrasjon av dioksinforbindelser er det i vannmassen over bunnen i delområde Herøya havn. Hvis det gjøres tiltak her så vil dette ha umiddelbar effekt på konsentrasjonen av dioksinforbindelser i vannmassene (Figur 36).

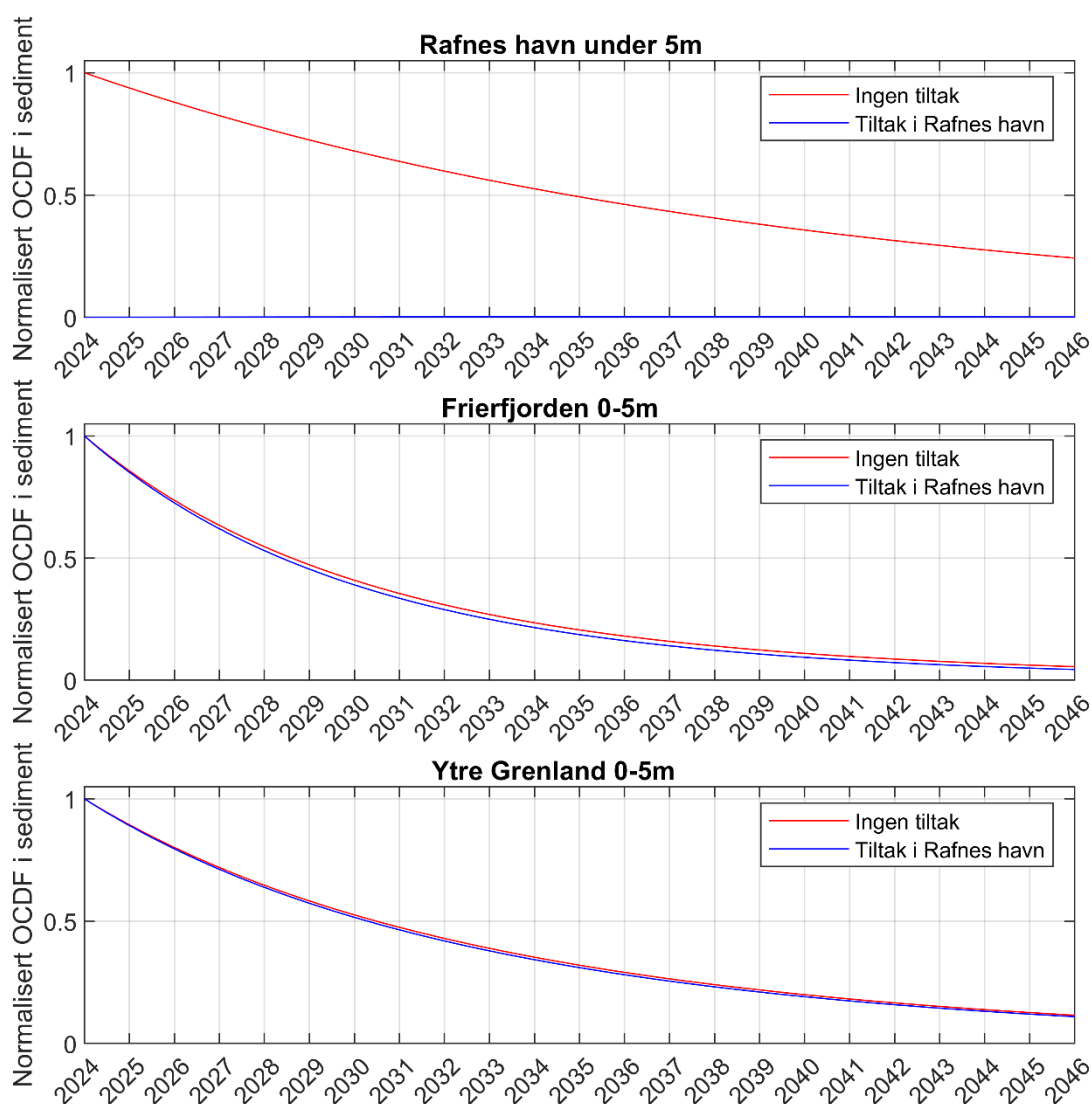


**Figur 36.** Effekt av tiltak i Herøya havn på mengden oppvirvlet OCDF i vannsøylen. Ved tiltak i Herøya havn blir mengden dioksinforbindelser over bunnen svært mye lavere (sort kurve i figur).

## Tiltak i Rafnes havn

Her er sedimentkonsentrasjonen av OCDF i delområdet Rafnes havn satt til null for å simulere tiltak i området (se blå kurve i øverste plott i Figur 37).

Også et tiltak i Rafnes havn gir begrenset endring i sedimentkonsentrasjoner av OCDF i andre delområder. På slutten av simuleringsperioden som er vist i Figur 37 er det 21% lavere sedimentkonsentrasjon av OCDF i grunne områder av Frierfjorden (0-5 meter), og 5% lavere konsentrasjon i grunne områder utenfor Brevik (Ytre Grenland 0-5 meter). Tiltaket vil også gi en reduksjon av dioksinforbindelser i vannmassene (se Tabell 12).



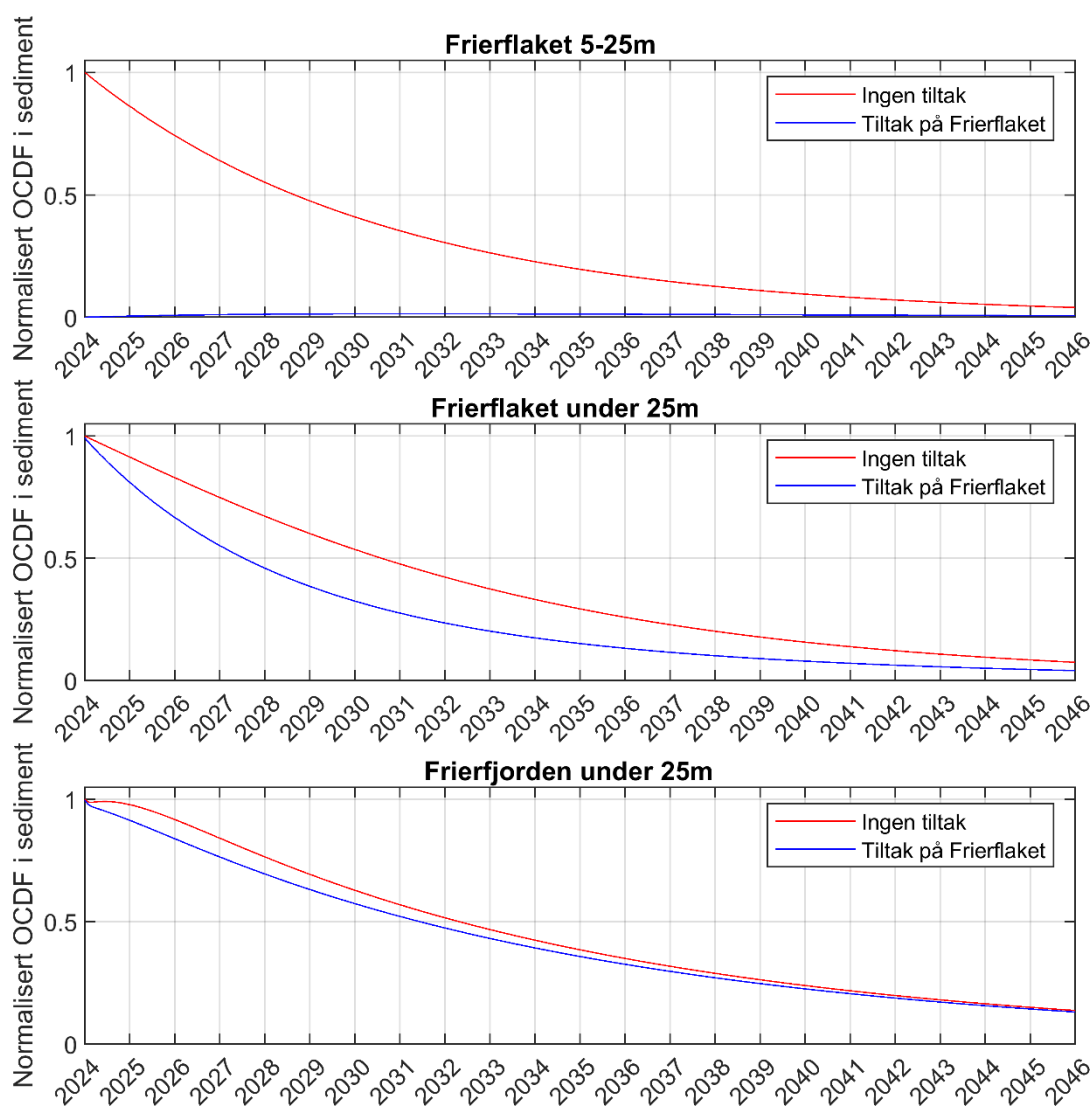
**Figur 37.** Effekt av økt av tiltak i Rafnes havn. Startkonsentrasjonen for OCDF i tiltaksområdet er satt til null (blå kurve) og sammenlignet med baseline (rød kurve).

## Tiltak i oppankringsområder

Her er sedimentkonsentrasjonen av OCDF i delområde Frierflaket 5-25 meter satt til null for å simulere tiltak i området (se blå kurve i øverste plott i Figur 38).

Også et tiltak på Frierflaket gir begrenset endring i sedimentkonsentrasjoner av OCDF i andre delområder. Størst forbedring ses i dypere lag (under 25 meter) i samme delområde, noe forbedring ses også i dypere lag av øvrige Frierfjorden (Figur 38).

Et tiltak på Frierflaket gir nær null (0,2%) reduksjon i sedimentkonsentrasjonen utenfor Brevik i delområde Ytre Grenland (Figur 40 og Tabell 12).



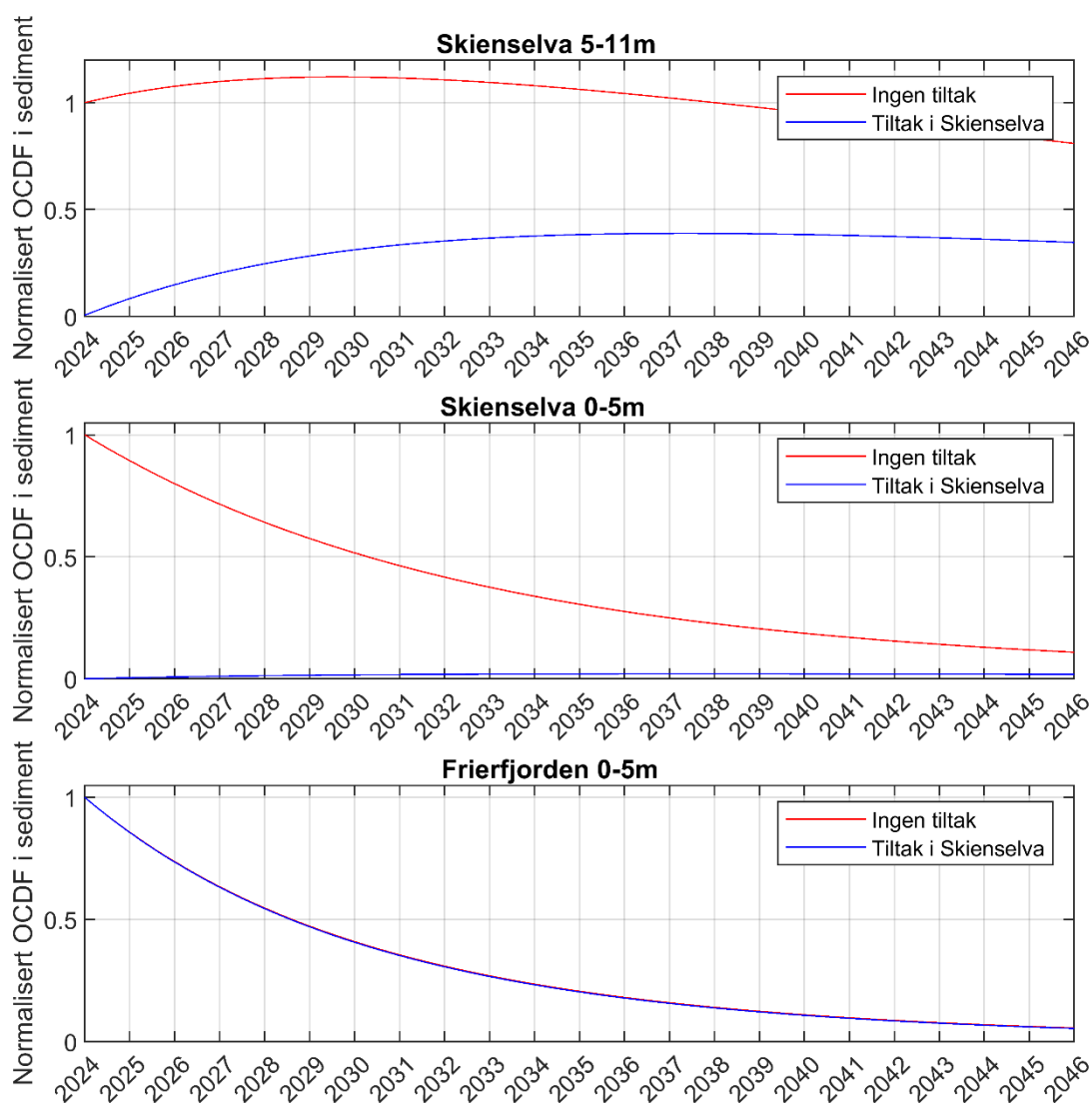
**Figur 38.** Effekt av tiltak på Frierflaket. Startkonsentrasjonen for OCDF i tiltaksområdet er satt til null (blå kurve) og sammenlignet med baseline (rød kurve).

## Tiltak i Skienselva

Her er sedimentkonsentrasjonen av OCDF i begge boksene som dekker delområdet Skienselva satt til null for å simulere tiltak i området (se blå kurve i øverste og midterste plott i Figur 39).

Simuleringene viser at Skienselva rekontamineres i høyere grad enn øvrige delområder. Forurensede sedimenter transporteres oppstrøms elva sammen med fjordvann som dras opp i saltvannskilen.

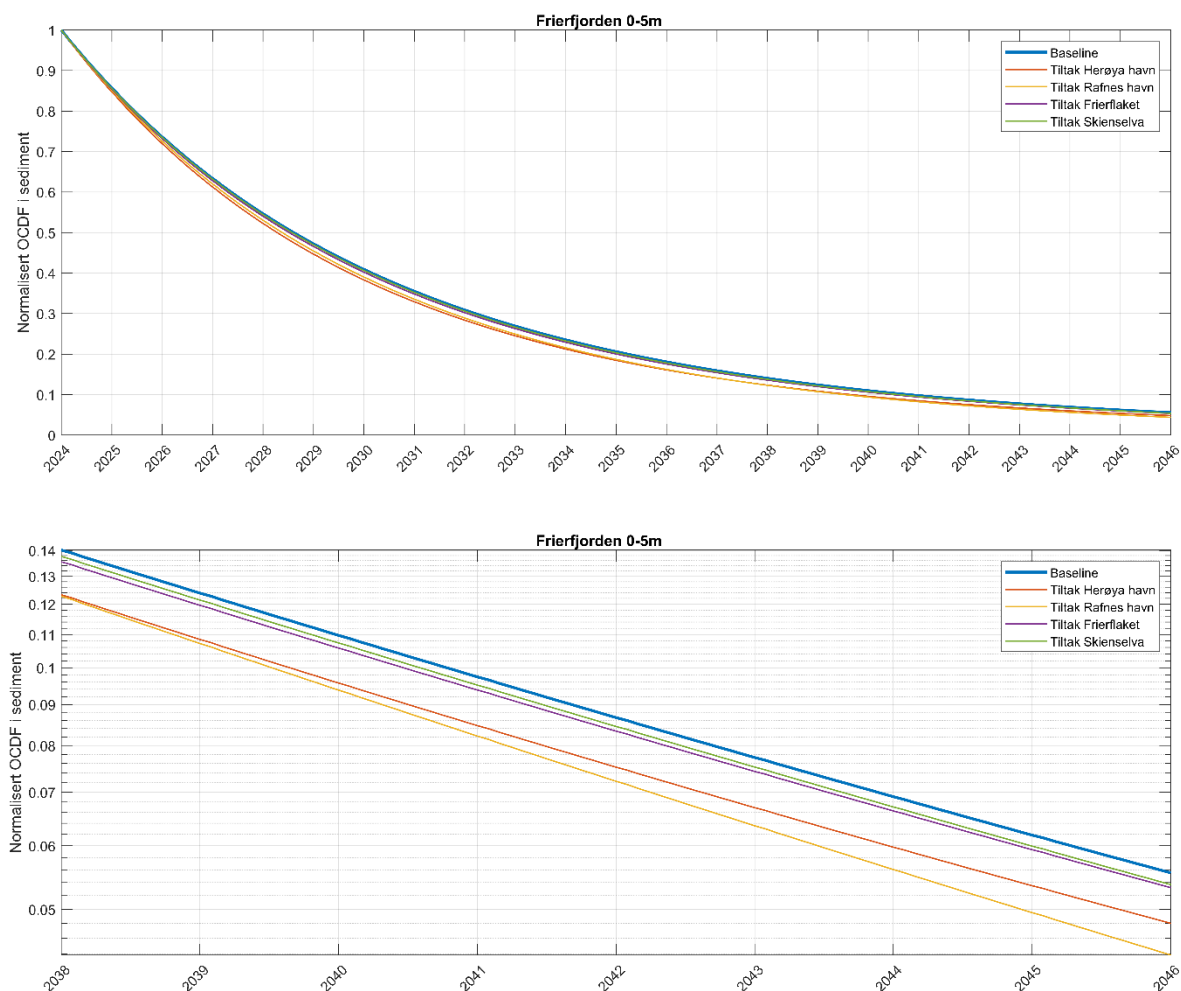
Tilsvarende tiltak i delområdene Herøya havn, Rafnes havn og Frierflaket gir et tiltak i Skienselva begrenset endring i sedimentkonsentrasjonene i andre delområder, Figur 39 viser for eksempel at effekten i overflatelaget (0-5 meter) av Frierfjorden er nær null.



**Figur 39.** Effekt av økt av tiltak i Skienselva. Startkonsentrasjonen for OCDF i tiltaksområdet er satt til null (blå kurve) og sammenlignet med baseline (rød kurve).

## Sammenligning av tiltak i ulike delområder

Figur 40 viser modellert OCDF-konsentrasjon i sedimentene i grunne deler av Frierfjorden, hvor effekten av forskjellige tiltak er sammenlignet med dagens situasjon (baseline). Tiltakene som testes ut er å tildekke/mudre i havneområdene ved Herøya og Rafnes, ankringsområdet på Frierflaket og i Skienselva. Effekten av tiltakene på sedimentene er liten. Størst effekt har det å gjøre tiltak i havneområdene.



**Figur 40.** Effekt av tiltak. Sedimentkonsentrasjon for OCDF i grunne områder er sammenlignet ved ulike tiltak. Øverst vises hele den modellerte perioden fra i dag og 22 år frem i tid. Nederst er det fokusert på de siste årene, og y-aksen er vist med en logaritmisk skala.

Simuleringene viser at tiltak henholdsvis i Herøya havn, Rafnes havn, Frierflaket og i Skienselva har stor effekt på sedimentkonsentrasjoner av dioksinforbindelser i selve tiltaksområdene. I tråd med beskrivelsen av disse tiltakene i kapittel 5.2 viser simuleringene også at sedimentkonsentrasjonen vil øke forsiktig i etterkant av et tiltak og typisk stabiliseres på et nivå 80–90 % lavere enn før tiltaket. Resultatene viser imidlertid også at virkningen på sedimentkonsentrasjoner i øvrige delområder av fjorden er svært begrenset.



Det er også viktig å sammenligne effekten av ethvert tiltak med nullalternativet (naturlig restitusjon). Figur 38 viser for eksempel at naturlig restitusjon forventes å redusere sedimentkonsentrasjonene i delområde Frierflaket 0-5 meter med 86% i slutten av simuleringsperioden (år 2046). Et tiltak i Rafnes havn vil her føre til ytterligere forbedring slik at konsentrasjonen reduseres med totalt 88%.

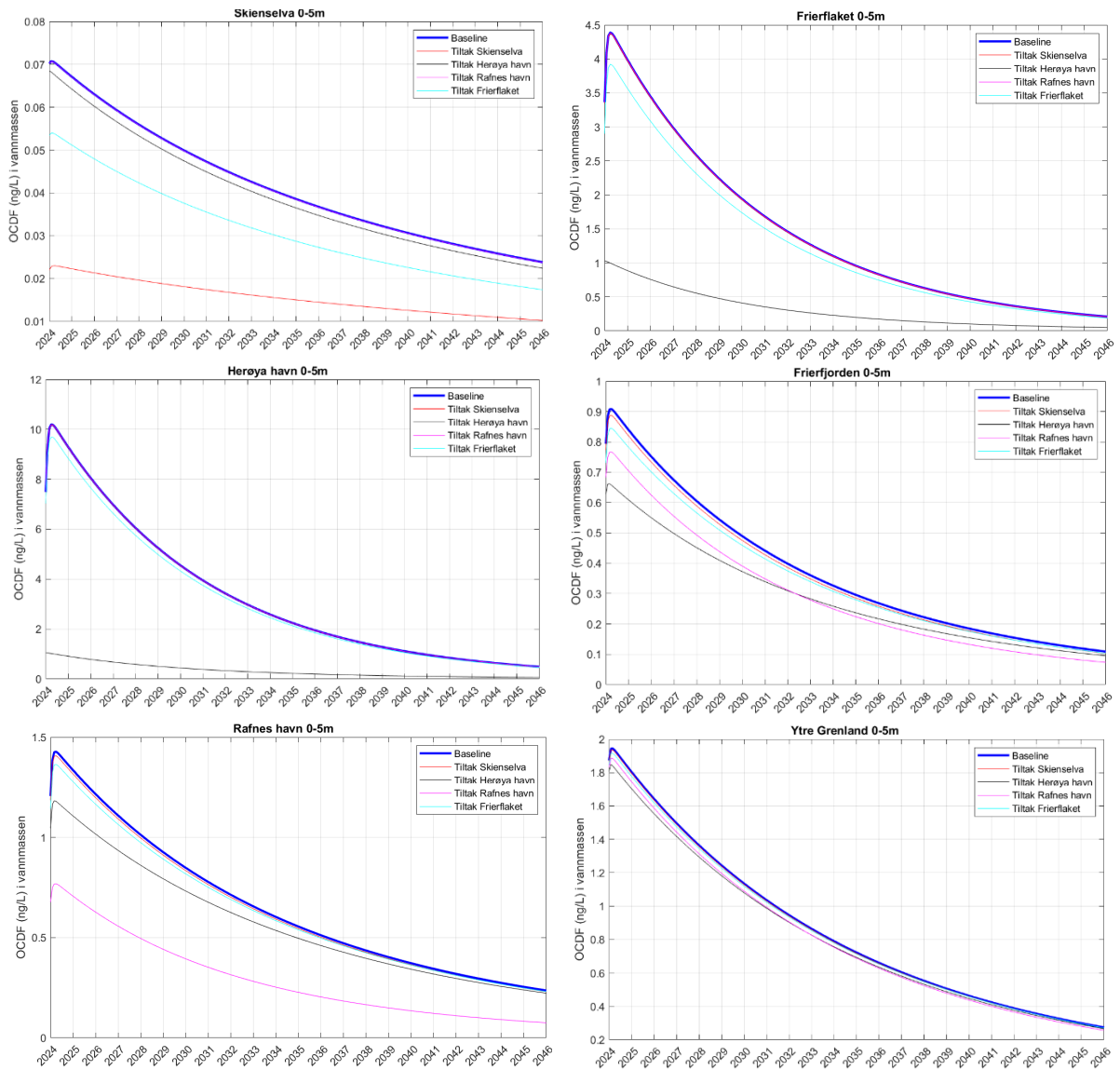
Tiltak i de mest forurensede områdene av Frierfjorden fører til redusert spredning av forurensede partikler, og dermed noe mindre tilførsel til sedimentene i øvrige delområder av fjorden. Effekten er derimot liten sammenlignet med usikkerheten knyttet til å simulere sedimentkonsentrasjoner så langt frem i tid.

I Figur 41 tiltak i ulike delområder sammenlignet med hensyn til konsentrasjonen av OCDF i overflatelaget av vannsøylen. Resultatene er oppsummert i Tabell 12 og viser at et tiltak i Herøya havn har størst virkning på mengden dioksinforbindelser i de grunne vannmassene.

Samlet viser resultatene at simulerte tiltak har begrenset effekt på sedimentene utenfor tiltaksområdet, men betydelig effekt på konsentrasjonen av dioksinforbindelser i vannmassene også utenfor tiltaksområdene. Spesielt er effekten positiv ved tiltak i delområde Herøya havn. En redusert konsentrasjon av dioksinforbindelser i vannmassene betyr at risiko for eksponering og opptak i marine organismer vil reduseres. Det er imidlertid viktig å påpeke at akkumulering av dioksinforbindelser i organismer i stor grad skjer via opptak gjennom næringskjeden, slik at forurensede sedimenter representerer en kilde for opptak av dioksinforbindelser i fisk og andre organismer, som beiter på bentiske organismer sterkt tilknyttet sedimentet.

**Tabell 12.** Sammenligning av effekt ved alternative tiltak. Total konsentrasjon av OCDF i vannmassene i overflatelaget er sammenlignet med og uten tiltak. Prosentvis reduksjon er beregnet ved å sammenligne baseline modellsimulering med simulering av tiltak i de fire tiltaksområdene.

Tiltaksområde	Reduksjon i overflatelaget på Frierflaket	Reduksjon i overflatelaget i Frierfjorden	Reduksjon i overflatelaget utenfor Brevik
Herøya havn	76,6%	27,1%	4,9%
Rafnes havn	0,0%	15,5%	3,0%
Frierflaket 5-25m	10,7%	7,0%	1,5%
Skienselva	0,4%	2,3%	0,5%



**Figur 41.** Effekt av tiltak på oppvirket OCDF-konsentrasjon i overflatelaget i ulike delområder.

## 7 Konkluderende sammendrag

I dette prosjektet har vi sett på spredning av dioksinforbindelser i forurenset sjøbunn som følge av skipstrafikk og ankringsaktivitet i Frierfjorden. Spredning er simulert med modellverktøyet SedFlex og en sentral forutsetning i prosjektet har vært et lineært forhold mellom antall skipsanløp til Frierfjorden, og mengden oppvirvlet sediment i vannmassene.

Oppvirvling av sedimenter som følge av skipstrafikk har liten effekt på sedimentkonsentrasjoner utenfor området der oppvirvlingen skjer. Forurensete partikler fordeler seg utover et stort område og sedimentkonsentrasjoner påvirkes derfor forholdsvis lite.

Oppvirvlingen fører imidlertid til en økt mengde forurensete sedimentpartikler i vannmassene. Økt mengde giftstoffer som dioksinforbindelser i vannmassene utgjør en økt risiko for opptak i vannsøyleorganismer og trolig også bunnfauna som lever av suspendert materiale. Modellerte konsentrasjoner av dioksinforbindelser i vannmassene øker med mellom 47-185% i ulike delområder av Frierfjorden som følge av oppvirvling fra skip. Størst økning ses i vannmassene utenfor Herøya havn, tiltak som fjerner/hindrer oppvirvling av forurensete partikler utenfor Herøya havn vil derfor kunne redusere mengden dioksinforbindelser i vannmassene med opptil 185%.

Simulering av tiltak, enten mudring, tildekking eller i kombinasjon, er i SedFlex gjort ved å sette konsentrasjonen av dioksinforbindelser i sedimentene lik null ved starten av simuleringen. Effekten av tiltak i fire delområder av Frierfjorden er sammenlignet med hensyn til mengden dioksinforbindelser i vannmassene. Simuleringene viser at tiltak har stor effekt på sedimentkonsentrasjoner der tiltaket gjøres, men begrenset effekt på sedimentene utenfor tiltaksområdet.

Effekten av et tiltak er imidlertid større på mengden oppvirvlet sediment, og dermed på mengden dioksinforbindelser i vannmassene. Tiltak i Herøya havn vil ha størst effekt i tilstøtende områder, ved at det gir lavere dioksinkonsentrasjoner i de grunne vannmassene. For tiltak som fjerner 100% av alle dioksinforbindelser på sjøbunnen av delområde Herøya havn er det simulert 77% reduksjon av dioksinforbindelser i vannmassene som tilhører delområde Frierflaket, 27% reduksjon i øvrige deler av Frierfjorden, og 5% reduksjon i vannmassene utenfor Brevik.

Som konklusjon vil den største nytten av et tiltak i Frierfjorden ligge i en betydelig redusert mengde forurensete partikler i vannmassene, mens effekten på selve sjøbunnen vil være mer lokal. Dioksinforbindelser er dimensjonerende for gjeldende advarsel fra Mattilsynet mot inntak av fisk og skalldyr fra Grenlandsfjordene inkl. Frierfjorden. Oppvirvling av forurenset sjøbunn vil gjøre dioksinforbindelser mer tilgjengelige for organismer inkl. organismer som i dag er koblet til advarsler. Det påpekes imidlertid at akkumulering av dioksiner i organismer i stor grad skjer via opptak gjennom næringskjeden, slik at forurensete sedimenter representerer også en kilde for dioksiner i fisk og andre organismer, som beiter på bentiske organismer sterkt tilknyttet sedimentet.

Detaljert planlegging av tiltak i Frierfjorden ligger utenfor rammene til dette prosjektet, men vil være en naturlig del i neste fase. I den videre planleggingen vil kost-nyttevurderinger av forskjellige tiltaksløsninger være helt sentrale spørsmål, ethvert fysisk tiltak bør sammenlignes med nullalternativet (naturlig restitusjon) med hensyn til forventet miljøgevinst.

## 8 Referanser

- Armitage, J., Saloranta, T. & Abelsen, R. (2005) Simulating the Fate of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in the Sunndalsfjord. NIVA rapport 5113-2005. 35 sider. <http://hdl.handle.net/11250/212999>.
- Bakke, T.; Håvardstun, J. (2012). Revidert risikovurdering av propelloppvirvling av sedimenter ved Herøya industripark. NIVA-rapport 6280-2012, 48 sider + vedlegg. <http://hdl.handle.net/11250/215749>.
- Bakke, T., Molvær, J., Saloranta, T., Tønnesen, D., Sandbakken, M. og Brooks, S. (2009). Konsekvensutredning for produksjonsanlegg for silika og magnesium på Herøya, Porsgrunn. NIVA-rapport nr. 5873, 108 sider.
- Barton, D. (2008). SedFlex – uncertainty analysis of remediation cost for contaminated marine sediments. NIVA rapport 5320-2008. 41 sider. <http://hdl.handle.net/11250/213432>.
- DeVito, M., m.fl. (2024). The 2022 world health organization reevaluation of human and mammalian toxic equivalency factors for polychlorinated dioxins, dibenzofurans and biphenyls. Regulatory Toxicology and Pharmacology 146, 105525. <https://doi.org/10.1016/j.yrtph.2023.105525>.
- Eek, E., Cornelissen, G., & Breedveld, G. D. (2010). Field measurement of diffusional mass transfer of HOCs at the sediment-water interface. Environ Sci Technol, 44(17), 6752-6759. <https://doi.org/10.1021/es100818w>
- Eek, E., Cornelissen, G., Kibsgaard, A., & Breedveld, G. D. (2008). Diffusion of PAH and PCB from contaminated sediments with and without mineral capping; measurement and modelling. Chemosphere, 71(9), 1629-1638. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.01.051>
- Green, N. W., Schøyen, M., Hjermann, D. Ø., Øxnevad, S., Ruus, A., Grung, M., Beylich, B., Lund, E., Tveiten, L., Jenssen, M. T. S., Håvardstun, J., Ribeiro, A. L., Doyer, I. & Bæk, K. (2022). Contaminants in coastal waters of Norway 2019. NIVA-rapport 7741-2022. M-1894. 198 sider + vedlegg. <https://hdl.handle.net/11250/2997095>
- Håvardstun, J.; Bakke, T. (2010). Risikovurdering av propelloppvirvling av sedimenter ved Herøya industripark. NIVA-rapport 6000-2010, 27 sider + vedlegg. <http://hdl.handle.net/11250/215044>.
- Håvardstun, J.; Bakke, T., Næs, K. (2012). Risikovurdering av propelloppvirvling av sedimenter ved Rafnes industriområde. NIVA-rapport 5924-2010, 34 sider. <http://hdl.handle.net/11250/214852>.
- Molvær, J., Bjerkgeng, B. (2003). Pilotprosjekt Kristiansandsfjorden. Risiko for spredning av miljøgifter ved oppankring av skip over forurensede bunnsedimenter. NIVA-rapport 4643-2003, 37 sider + vedlegg. <http://hdl.handle.net/11250/212007>.
- Molvær, J. (2010) Vefsnfjorden. Beskrivelse av hydrofysiske forhold i fjordens indre del. NIVA rapport 5939-2010. 23 sider. <http://hdl.handle.net/11250/214891>.
- Næs, K., Oug, E. (1991). Sedimentenes betydning for forurensningstilstanden i Frierfjorden og tilgrensede områder. Rapport 1: Konsentrasjon og mengder av klororganiske forbindelser, polysykliske aromatiske hydrokarboner, kvikksølv og pyrolyserolje. NIVA-rapport 2570-1991, 87 sider + vedlegg. <http://hdl.handle.net/11250/206360>.

- Næs, K. (1999). Overvåking av miljøgifter i sedimentene i Grenlandsfjordene 1997. NIVA-rapport 4066-1999, 37 sider + vedlegg. <http://hdl.handle.net/11250/210439>.
- Næs, K., Persson, J., Saloranta, T., Andersen, T., Berge, J.A., Hylland, K., Ruus, A., Tobiesen, A., Bergstad, O.A., Knuten, J.A. (2004). Dioksiner i Grenlandsfjordene – DIG. Oppsummering av forskningsprosjektet. NIVA-rapport 4876-2004, 94 sider. <http://hdl.handle.net/11250/212529>.
- Næs, K., Saloranta, T., Nilsson, H., Cornelissen, G. & Broman, D. (2005). Undersøkelser for å styrke modeller knyttet til beslutningsstøtte for tiltak mot forurensede sedimenter i Grenlandsfjordene. NIVA rapport 5737-2009. 122 sider. <http://hdl.handle.net/11250/214375>.
- NGI (2020). Overvåking 2019 i vannforekomsten Oslo havn og by: Tiltaksområder og dypvannsdeponiet etter Ren Oslofjord prosjektet. NGI-rapport 20190266-01-R. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/m1700/m1700.pdf>.
- Olsen, M., Schaanning, M., Eek, E., Næs, K. (2015). Beslutningsgrunnlag og tiltaksplan for forurensede sedimenter i Gunneklevfjorden. NIVA-rapport 6922-2015, 108 sider + vedlegg. <http://hdl.handle.net/11250/2364422>.
- Olsen, M., Ruus, A., Øxnevad, S., Selvik, J.R., Borge, R., Green, N. (2021). Miljøet i fjordene i Grenland. NIVA-rapport 7665-2021, 31 sider (konfidensiell).
- Pettersen, R. (2016). Veileder. Grenseverdier for klassifisering av vann, sediment og biota. M-608. 13 sider. <https://www.miljodirektoratet.no/globalassets/publikasjoner/M608/M608.pdf>.
- Saloranta, T., Armitage, J., Næs, K., Cousins, I., & Barton, D. (2006). SF-tool multimedia model package: Model code description and application examples from the Grenland fjords. NIVA rapport 5216-2006. 44 sider. <http://hdl.handle.net/11250/213237>.
- Shibamoto, T., Yasuhara, A., Katami, T. (2007). Dioxin formation from waste incineration. Rev Environ Contam Toxicol 190:1-41. doi: 10.1007/978-0-387-36903-7\_1.
- Staalstrøm, A., Mengeot, C., & Øxnevad, S. (2020). Vurdering av utslipp av krom og nikkel i indre del av Vefsnfjorden. NIVA-rapport 7546-2020, 17 sider. <https://hdl.handle.net/11250/2711597>.
- Strohmeier, T. & Strand, Ø. (2021). Tema: Blåskjell. De nasjonale forskningsetiske komiteene. <https://www.etikkom.no/FBIB/Temaer/Redelighet-og-kollegialitet/Fusk-og-plagiering>.
- Trannum, H. C., Staalstrøm, A., Kile, M. R., & Næss, R. (2023). Resipientundersøkelse for Porsgrunn og Bamble kommune i 2022 i forbindelse med utslipp av kommunalt avløpsvann. NIVA-rapport 7827-2023. 54 sider + vedlegg. <https://hdl.handle.net/11250/3053952>.
- Quadrini, J. D., VanDewalker, H. M., Mihm, J. E., & McShea, L. J. (2003). Pilot-scale demonstration of in situ capping of PCB-containing sediments in the lower Grasse River. Remediation Journal, 14(1), 33-53. <https://doi.org/10.1002/rem.10093>
- Øxnevad, S., & Hjermann, D. Ø. (2020). Tiltaksorientert overvåking av Vefsnfjorden i 2019. Overvåking for Alcoa Mosjøen. NIVA-rapport 7462-2020 (<http://hdl.handle.net/11250/2646265>).
- Øxnevad, S., & Hjermann, D. Ø. (2022). Tiltaksorientert overvåking av Vefsnfjorden i 2022. Overvåking for Alcoa Mosjøen. NIVA-rapport 7714-2022, 33 sider+vedlegg. <https://hdl.handle.net/11250/2982344>.

## Vedlegg A Inngangsparametere til SedFlex

Her vises parameterfilen for SedFlex modellen. Filen leses og editeres av programmet MobiView.

```
# Parameter file generated for model SedFlex, containing modules (SedFlex
abiotic V0.2) at 2024-01-05 14:36:24

index_sets:

"Compartment" : {"River_surf" "River_comp_curr" "Heroya_surf" "Heroya_imd"
"Heroya_deep" "Frier_surf" "Frier_imd" "Frier_deep" "Outer_surf"
"Outer_imd" "Outer_deep" "Skager_surf" "Skager_deep" "Havn_surf" "Havn_imd"
"Rafnes_surf" "Rafnes_imd"}

"Boundary compartment" : {"Skienselva" "Skagerrak"}

"Chemical" : {"OCDD" "123478/123479-HxCDF" "OCDF"}

parameters:

# System (no index sets) #

"Start date":      # [1000-01-01, 3000-01-01] The start date is inclusive
1950-01-01

"End date":        # [1000-01-01, 3000-01-01] The end date is inclusive
2010-01-01

{ module "SedFlex abiotic" version "0.2"

  # Atmosphere (no index sets) #

  "Air-side mass transfer coefficient" :      # (m/day) [0, 1000]
100

  "Water-side mass transfer coefficient" :      # (m/day) [0, 10]
1

  "Scavenging ratio" :      #(dimensionless) [0, 2000000] The ratio
between a raindrop's volume to the volume of air it sweeps through when
falling
200000

  "Volume fraction of aerosols" :      #(dimensionless) [0, 1e-10]
4e-12
```

"Particle dry deposition rate": # (m/day) [0, 200]  
25

"Residence time of the atmospheric compartment": # (day) [0.1, 10]  
0.5

"Volume of the atmospheric compartment": # (m3) [100000,  
1000000000000]  
12000000000

# Water compartment ("Compartment") #

"Water surface area": # (m2) [0, 361900000000000] Surface area  
covered by water compartment  
2810000 2190000 2620000 2564000 2080000 17762000 17092000 12350000  
41900000 38000000 13300000 22400000 9700000 340000 306000 238000 208000

"Water effective height": # (m) [0, 10984] Vertical thickness of  
water compartment  
5 6 5 20 15 5 20 65 5 20 75 25 75 5 20 50 20

"POC concentration": # (mg/m3) [0, 1000] Particulate organic  
carbon concentration  
196 133 244 133 100 244 133 98 244 133 98 130 130 244 1014 244 900

"DOC concentration" : # (mg/m3) [0, 10000] Dissolved organic  
carbon concentration  
2761 1500 2359 1500 2370 2359 1500 1100 2020 1100 810 1100 810 2359  
1500 2359 1500

"BC concentration" : # (mg/m3) [0, 100] Black carbon (soot)  
concentration  
10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10 10

"Inorganic concentration" : # (mg/m3) [0, 1000] Particulate  
inorganic concentration  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

"Density of suspended inorganic" : # (kg/L) [0, 10] Mass density  
of dry material  
2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6

"POC settling velocity" : # (m/day) [0, 20] Also applies to BC and  
mineral particles

0.525 0 1.157 8.467 0 1.157 5.095 0 0.466 0.466 0 0.466 0 1.157 0  
1.157 0

"Degradation in water" : # Whether or not chemicals can  
react/degrade in this water compartment

true true true false false true false false true false false true  
false true true true true

"Is below" : #(dimensionless) [0, 9999] The numerical index of  
the other water compartment that this water compartment is below. If this  
is a surface layer, set the number to 10000

10000 0 10000 2 3 10000 5 6 10000 8 9 10000 10 10000 13 10000 15

# Sediment compartment ("Compartment") #

"Sediment surface area" : #(m2) [0, 361900000000000] Surface area  
covered by the sediments of this compartment

620000 2190000 56000 484000 2080000 670000 4742000 12350000 3900000  
24700000 13300000 12700000 9700000 34000 306000 30000 208000

"Sediment effective height" : #(m) [0, 10] Thickness of the  
sediment layer

0.03 0.05 0.05 0.06 0.02 0.05 0.05 0.005 0.05 0.05 0.02 0.05 0.02  
0.05 0.05 0.05 0.08

"Sediment porosity" : #(dimensionless) [0, 1]

0.86 0.86 0.86 0.8 0.86 0.86 0.86 0.86 0.86 0.86 0.86 0.86 0.86 0.86  
0.86 0.86 0.8

"Sediment inorganic density" : #(kg/L) [0, 10] Mass density of  
dry inorganic material

2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6 2.6

"Sediment POC volume fraction" : #(dimensionless) [0, 0.2]  
Fraction of solid sediments that is particulate organic carbon

0.0825 0.0825 0.065 0.09175 0.09175 0.065 0.06525 0.10975 0.05 0.05  
0.07975 0.05 0.07975 0.0825 0.0825 0.0825 0.0825

"Sediment BC volume fraction" : #(dimensionless) [0, 0.1]  
Fraction of solid sediments that is black carbon (soot)

0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01 0.01  
0.01 0.01 0.01

"Sediment DOC concentration" : #(mg/m3) [0, 1000000]  
Concentration in pore water



```

78000 78000 78000 78000 78000 78000 78000 78000 78000 78000 78000 78000
78000 78000 78000 78000 78000 78000

"POC mineralization half-life" :      #(day) [0, 100000]

32613 32613 25695 36270 3187 25695 25794 3654 19766 19766 10619 19766
10619 32613 32613 32613 32613

"Burial velocity" :      #(m/day) [0, 5e-06]

3.29e-07 3.29e-07 7.12e-07 1.64e-06 1.97e-06 7.12e-07 1.64e-06 1.97e-
06 7.12e-07 1.1e-06 1.32e-06 1.1e-06 1.32e-06 5e-07 5e-07 5e-07 5e-07

"Resuspension velocity" :      #(m/day) [0, 3e-05]

2.087e-06 2.087e-06 3.091e-06 3.893e-06 3.4e-07 3.091e-06 1.279e-06
3.24e-07 3.698e-06 1.223e-06 2.92e-07 1.223e-06 2.92e-07 3e-06 3e-06 3e-06
3e-06

"Sediment-water mass transfer coefficient" :      #(m/day) [0, 0.05]
Also applies to DOC

0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024
0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024 0.0024

"Degradation in sediment" :      # Whether or not chemicals can
react/degrade in this sediment compartment

false false false false false false false false false false false
false false true true true true

# Chemicals ("Chemical") #

"(log10) Octanol-water partitioning coefficient" :
#(dimensionless) [-3, 10] Reference value at 25°C

8.75 7.53 8.6

"(log10) Octanol-air partitioning coefficient" :      #(dimensionless)
[-3, 14] Reference value at 25°C

13 11.98 12.84

"(-log10) Henry's law constant" :      #(-log10(kPa m3/mol)) [-5, 10]
Reference value at 25°C

3.29 2.88 3.11

"(log10) POC-water partitioning coefficient in water" :
#(log10(L/kg(OC))) [-3, 12]

10.6 9.5 11.01

"(log10) POC-water partitioning coefficient in sediments":
#(log10(L/kg(OC))) [-3, 12]

```

```

10.6 9.5 11.01

"(log10) inorganic-water partitioning coefficient (Kd) in water":
#(log10(L/kg(min)) [-3, 12]

-100 -100 -100

"(log10) inorganic-water partitioning coefficient (Kd) in sediments":
#(log10(L/kg(min)) [-3, 12]

-100 -100 -100

"Estimate the POC-water partitioning coefficient in water":      # If
true, ignore the above value, and estimate  $K_{POC} = b \cdot K_{OW}^a$ , where a and b
are given in the KOC approximation parameter group

false false false

"Estimate the POC-water partitioning coefficient in sediments":    #
If true, ignore the above value, and estimate  $K_{POC} = b \cdot K_{OW}^a$ , where a and
b are given in the KOC approximation parameter group

false false false

"Estimate the DOC-water partitioning coefficient":

true true true

"Molecular weight" :      #(g/mol) [0, 10000]

306 374.9 443.8

"Degradation half-life in water" :      #(day) [1, 100000] Reference
value at 25°C

267 1170 8000

"Degradation half-life in sediments" :      #(day) [1, 10000000000]
Reference value at 25°C

417000000 417000000 417000000

"Internal energy change of the OA phase" :      #(kJ/mol) [-300, 300]
Often equivalent to enthalpy of phase change

-85.1 -98.7 -85.1

"Internal energy change of the OW phase" :      #(kJ/mol) [-300, 300]
Often equivalent to enthalpy of phase change

30 3 30

"Internal energy change of the AW phase" :      #(kJ/mol) [-300, 300]
Often equivalent to enthalpy of phase change

```

```

115.1 101.73 115.1

"Toxic equivalent factor" :      #(dimensionless) [0, 50]

0.0001 0.1 0.0001

# KOC approximation (no index sets) #

"K_POC a parameter" :      #(dimensionless) [0.1, 10] From the
approximation  $K_{POC} = b \cdot K_{OW}^a$  if used

1

"K_POC b parameter" :      #(dimensionless) [0, 10] From the
approximation  $K_{POC} = b \cdot K_{OW}^a$  if used

0.35

"K_DOC a parameter" :      #(dimensionless) [0.1, 10] From the
approximation  $K_{DOC} = b \cdot K_{OW}^a$ 

1

"K_DOC b parameter" :      #(dimensionless) [0, 10] From the
approximation  $K_{DOC} = b \cdot K_{OW}^a$ 

0.08

"K_BC a parameter" :      #(dimensionless) [0.1, 10] From the
approximation  $K_{BC} = b \cdot K_{OW}^a$ 

1.6

"K_BC b parameter" :      #(dimensionless) [0, 10] From the
approximation  $K_{BC} = b \cdot K_{OW}^a$ 

0.0398

"K_aerosol a parameter" :      #(dimensionless) [0.1, 10] From the
approximation  $K_{aerosol} = b \cdot K_{OA}^a$ 

1

"K_aerosol b parameter" :      #(dimensionless) [0, 10] From the
approximation  $K_{aerosol} = b \cdot K_{OA}^a$ 

3.8

# Atmospheric background ("Chemical") #

"Background atmospheric concentration":      #(g/m3) [0, 100000000]

0 0 0

# Boundary background ("Chemical" "Boundary compartment") #

"Background concentration in boundary":      #(g/m3) [0, 100000000]

```

```

0 0

0 0

0 0

# Initial concentrations ("Chemical" "Compartment") #

"Initial concentration in water" :      #(g/m3) [0, 100000000]

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

"Initial concentration in sediments" :    #((variable)) [0,
1000000000]

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

"Unit of initial sediment concentration" :    # [g_per_m3_wet,
g_per_kg_dry, g_per_g_toc]

g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet

g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet

g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet g_per_m3_wet
g_per_m3_wet g_per_m3_wet

# Flow rates ("Compartment" "Compartment") #

"Flow rate":      #(m3/s) [0, 10000]

0 0 34 0 0 302 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

16 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0

0 0 0 0 0 54 0 0 0 0 0 0 0 48 0 0 0 0

0 16 18 0 3 0 50 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0

```

```

0 0 0 3 0 0 0 20 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 543 0 0 0 0 0 0 200 0
0 0 0 86 0 185 0 5 0 50 0 0 0 0 0 0 2
0 0 0 0 20 0 5 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 1033 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 273 0 490 0 5 100 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 5 0 0 700 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 813 0 0 5 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 700 5 0 0 0 0 0
0 0 50 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0 0 0
0 0 0 0 0 202 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 2 0

# Boundary flows ("Compartment" "Boundary compartment") #
"Flow to boundary":      #(m3/s) [0, 10000]
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 150
0 0
0 0
0 1033
0 700
0 0

```

```
0 0
0 0
0 0
"Flow from boundary":      #(m3/s) [0, 10000]
320 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 0
0 713
0 700
0 0
0 0
0 0
0 0
} # end of module "SedFlex abiotic"
```



### **Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø**

Norsk institutt for vannforskning (NIVA) er Norges viktigste miljøforskningsinstitutt for vannfaglige spørsmål, og vi arbeider innenfor et bredt spekter av miljø, klima- og ressurs spørsmål. Vår forskerkompetanse kjennetegnes av en solid faglig bredde, og spisskompetanse innen mange viktige områder. Vi kombinerer forskning, overvåkning, utredning, problemløsning og rådgivning, og arbeider på tvers av fagområder.