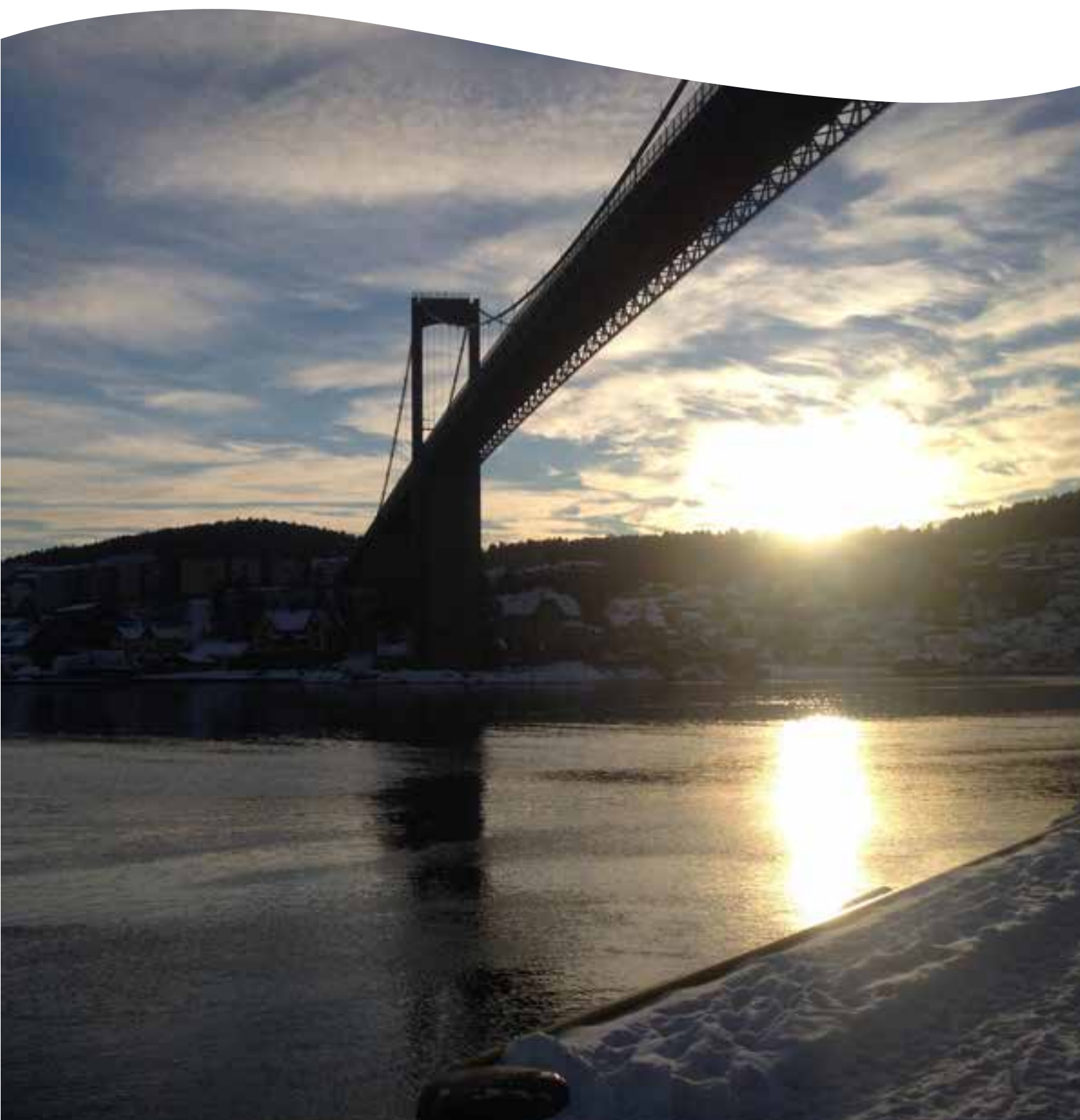


Spredning av finkornet suspendert materiale fra et utslippspunkt innerst i Frierfjorden



RAPPORT

Hovedkontor

Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 22 18 52 00
Internett: www.niva.no

NIVA Region Sør

Jon Lilletuns vei 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 37 04 45 13

NIVA Region Innlandet

Sandvikaveien 59
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 62 57 66 53

NIVA Region Vest

Thormøhlensgate 53 D
5006 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 55 31 22 14

Tittel Spredning av finkornet suspendert materiale fra et utslippspunkt innerst i Frierfjorden.	Løpnr. (for bestilling) 6985-2016	Dato 15.02.2016
	Prosjektnr. Udemnr. 16065	Sider Pris 27
Forfatter(e) André Staalstrøm Magdalena Kempa	Fagområde Oseanografi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Grenland	Trykket NIVA
Oppdragsgiver(e) Elkem Solar AS		Oppdragsreferanse Bård Tobiassen

Sammendrag

Denne rapporten vurderer spredning av et planlagt utslipp fra Elkem Solar AS til Frierfjorden av suspenderte partikler fra diamantskjæring av super-rent silisium. Partiklene oppgis å være $<3\mu\text{m}$ store og slippes ut på 24 m dyp innerst i Frierfjorden. Spredningen ble modellert for et utslipp på 550 kg/døgn av partikler med størrelse 2 μm . Beregningene viste at av disse vil ca. 10 kg sedimentere i Frierfjorden innenfor Brevik, ca. 200 kg/døgn vil transporteres ut over Breviksterskelen, mens resterende partikler vil akkumulere i fjordens dypere vannlag. Konsentrasjonen i dypvannet og sedimentasjonen vil øke frem til neste dypvannsfornyelse inntreffer etterfulgt av en kortvarig økning av transporten av partikler til det ytre fjordområdet. På lang sikt vil eksporten til ytre fjordområde i tilknytning til korte og uregelmessige episoder med dypvannsfornyelse være hovedfaktoren som balanserer tilførslene. I 40 m hvor vannmassene i lengre perioder kan være stillestående, kan konsentrasjonene av silisiumpartikler komme opp i omtrent 0,22 mg/L. Bakgrunnskonsentrasjonen av partikler i dette dypet er omtrent 0,4 mg/L, og utslippet kan altså føre til en 50-60 % øket partikkelkonsentrasjon i dette dybdeintervallet. Dette må anses som en relativt stor økning. Silisiumpartiklene antas ikke toksiske i vanlig forstand og den største miljøkonsekvensen antas å være eventuelle effekter på organismer p.g.a. partiklenes fysiske egenskaper (form, størrelse). Siden eventuelle skadeeffekter av så finkornet materiale ikke er kjent, anbefales det å gjennomføre en giftighetstest hvor effekten av forskjellige partikkelkonsentrasjoner på relevante arter for Frierfjorden blir testet ut.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Partikkelspredning	1. Particle dispersion
2. Numerisk modellering	2. Numerical modelling
3. Estuarin sirkulasjon	3. Estuarine circulation
4. Fjorddynamikk	4. Fjord dynamic



André Staalstrøm

Prosjektleder



Kai Sørensen

Forskningsleder

**Spredning av finkornet suspendert materiale fra et
utslippspunkt innerst i Frierfjorden.**

Forord

Elkem Solar AS tok kontakt med NIVA i desember 2015 med en forespørsel om utredning av miljøkonsekvenser ved utslipp av suspendert materiale i Frierfjorden. Elkem Solar AS godkjente NIVA sitt programforslag i begynnelsen av januar 2016.

Undertegnede har vært prosjektleder for prosjektet. Magdalena Kempa har vært ansvarlig for modelleringsarbeidet. Morten Schaanning har på vegne av forskningsleder Kai Sørensen bidratt til kvalitetsikring av manuskriptet. Bård Tobiassen har vært vår kontaktperson hos Elkem Solar AS.

Oslo, 10. februar 2016

André Staalstrøm

Innhold

	1
Sammendrag	5
Summary	6
1. Innledning	7
2. Samlet vurdering	22
3. Modelling av Grenlandsfjordene	7
3.1 Generell beskrivelse av GEMSS	7
3.2 Beskrivelse av utslippet	11
4. Validering av modellen	12
4.1 Sirkulasjonsmønsteret i overflatelaget	12
4.2 Blandingsforholdene i Frierfjorden	14
4.3 Strømforhold i Brevikstrømmen	18
5. Resultater	20
5.1 Partikler i de frie vannmassene i Frierfjorden	20
5.2 Transport ut av Frierfjorden	21
5.3 Sedimentering	22
Referanser	25

Sammen drag

Denne rapporten vurderer spredning av et planlagt utslipp fra Elkem Solar AS til Frierfjorden av suspenderte partikler fra diamantskjæring av super-rent silisium. Partiklene oppgis å være $<3\mu\text{m}$ store og slippes ut på 24 m dyp innerst i Frierfjorden. Spredningen ble modellert for et utslipp på 550 kg/døgn av partikler med størrelse $2\mu\text{m}$. I rapporten har vi kvantifisert hvordan utslippet vil påvirke tre nøkkelparametere:

1. Konsentrasjon av suspendert materiale i vannmassene i Frierfjorden.
2. Sedimenterings hastigheten i Frierfjorden.
3. Transport av partikler ut av Frierfjorden gjennom Brevikstrømmen.

Beregningene viste at av disse vil ca. 10 kg sedimentere i Frierfjorden innenfor Brevik, ca. 200 kg/døgn vil transporteres ut over Breviksterskelen, mens resterende partikler vil akkumulere i fjordens dypere vannlag.

Konsentrasjonen i dypvannet og sedimentasjonen vil øke frem til neste dypvannsfornyelse inntreffer etterfulgt av en kortvarig økning av transporten av partikler til det ytre fjordområdet. I modellsimuleringen er fluksen av silisiumpartikler 800 kg/døgn på det meste når partikler blandes opp i overflatelaget, og omtrent 200 kg/døgn når vannmassene er stillestående. På lang sikt vil eksporten til ytre fjordområde i tilknytning til korte og uregelmessige episoder med dypvannsfornyelse være hovedfaktoren som balanserer tilførselene.

Partikkelkonsentrasjonen i selve utslippet vil være 0,8 mg/L. Modellsimuleringen viser at konsentrasjonen i 15-20 m dyp nær utslippet vil være opp mot 0,4 mg/L, og at denne ikke øker med tiden. Målinger av temperatur, saltholdighet og oksygen viser at vannmassene ned til omtrent 40 m skiftes ut minst en gang i året. Under omtrent 40 m kan vannmassene bli stående i lengre perioder enn et år og det er i disse dypene at partikkelkonsentrasjonen kan bygges opp til de høyeste verdiene. I 40 m og dypere kan konsentrasjonene av silisiumpartikler komme opp i omtrent 0,22 mg/L. Bakgrunnskonsentrasjonen av partikler i dette dypet er omtrent 0,4 mg/L, og utslippet kan altså føre til en 50-60 % øket partikkelkonsentrasjon i dette dybdeintervallet. Dette må anses som en relativt stor økning, selv om den totale partikkelkonsentrasjonen ikke blir større enn 0,62 mg/L. I beregningene ble det ikke tatt hensyn til mulig øket sedimentasjon pga. flokkulering eller andre mekanismer (f.eks. ko-presipitering, bio-filtrering) som kan redusere konsentrasjonen av suspendert materiale.

Silisiumpartiklene antas ikke toksiske i vanlig forstand og den største miljøkonsekvensen antas å være eventuelle effekter på organismer pga. partiklenes fysiske egenskaper (form, størrelse). Siden eventuelle skadeeffekter av så finkornet materiale ikke er kjent, anbefales det å gjennomføre en giftighetstest hvor effekten av forskjellige partikkelkonsentrasjoner på relevante arter for Frierfjorden blir testet ut.

Summary

Title: Assessment of the environmental impact of discharges of suspended solids in Frierfjord

Year: 2016

Author: André Staalstrøm and Magdalena Kempa

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 978-82-577-6720-4

This report assesses the dispersion of a planned discharge of suspended particles from diamond cutting of super-pure silicon. The particles are stated to be $<3 \mu\text{m}$ large and discharged at 24 m depth at in the Frierfjord. The dispersion was modeled for a discharge of 550 kg/day of particles of $2 \mu\text{m}$. In this report we quantified how the spill will affect three key parameters:

1. Concentration of suspended solids in the water column in the Frierfjord.
2. Sedimentation at the bottom in the Frierfjord.
3. Flux of particles out of the Frierfjord.

The calculations showed that, of these, about 10 kg sediment in Frierfjord within Brevik, ca. 200 kg/day will be transported out of the Frierfjord in the fresh water layer, while the remaining particles will accumulate in deeper water masses of the fjord.

The concentration in the deep water and sedimentation will increase until the next deep water renewal occurs followed by a short-term increase of the transport of particles to the outer fjord area. In the model simulations the flux of silicon particles is 800 kg/day at the most when particles are mixed up into the fresh water layer, and about 200 kg/day when the water masses are stagnant. In the long term, export of particles to the outer fjord area adjacent to the Frierfjord after episodes of deep water renewal will be the major factor that balances the discharge.

The particle concentration in the discharge will be 0.8 mg/L. Model simulations show that the concentration of 15 to 20 m depth near the discharge will be up to 0.4 mg/L, and that this does not increase with time. Measurements of temperature, salinity and oxygen show that water masses down to about 40 m are renewed at least once a year. Below about 40 m can water masses typically remain for longer than a year and it is in these depths that the particle concentration can be built up to the highest values. In 40 m and deeper the concentrations of silicon particles can reach approximately 0.22 mg/L. The background concentration of particles in this depth is about 0.4 mg/L, and the discharge can thus lead to a 50-60 % increase in particle concentration in this depth interval. This must be regarded as a relatively large increase, although the total particle concentration is ca. 0.62 mg/L. In the calculations it was not taken into account possible increased sedimentation due flocculation or other mechanisms (eg. co-precipitation, bio-filtration) which can reduce the concentration of suspended solids.

Silicon particles are not considered toxic in the usual sense and the greatest environmental impact is assumed to be any effects on organisms due to the physical characteristics (shape, size) of the particles. Since any harmful effects of so fine-grained material are not known, it is recommended to conduct a toxicity test where the effects of different particle concentrations at relevant species for the Frierfjord are tested.

1. Innledning

Det tas her utgangspunkt i at det skal slippes ut vann med en viss konsentrasjon av svært finkornet silisium, hvor kornstørrelsen er mindre enn 3 μm . Utslippet vil gå gjennom et rør, ut på 24 m dyp i Frierfjorden. Utslippet består av ingen eller svært liten andel oksygenforbrukende materiale. I denne rapporten vurderes miljøkonsekvensene for Frierfjorden ved forskjellige utslippsmengder. I hovedscenariet slippes det ut 550 kg silisiumpartikler per døgn. Et alternativ til å slippe ut alt materialet i Frierfjorden, er å felle ut opptil 90 % av det suspenderte. Det resterende materialet, omtrent 50 kg/døgn, slippes ut i Frierfjorden. Dette alternativet innebærer bruk av fellingskemikalier og transport av 1500 kg/døgn utfelt materiale til egnet deponi. I denne rapporten vurderes spredningen av utslippet av 550 kg/døgn.

Vi har fått opplyst at utslippet vil bestå av superrent silisium som er slipt ned med en diamanttråd. Det antas at eventuelt giftighet til materialet er knyttet til mekaniske effekter hvis partiklene kommer i berøring med følsomme organer for eksempel gjellene til fisk. Det tas forbehold om at det ikke er kjent om støvet inneholder fraksjoner som er så små at de kan passere biologiske membraner og tas opp gjennom f.eks. tarm eller gjeller. Eventuelle effekter av så finkornet materiale er ikke testet på representative arter i Frierfjorden.

Vi vil benytte modellen GEMSS for å modellere hydrofysikken i Frierfjorden (**Figur 1**), og spredning av det suspenderte materialet som slippes ut samt sedimentering på bunnen. Nøkkelparametere som vil beregnes av modellen vil være:

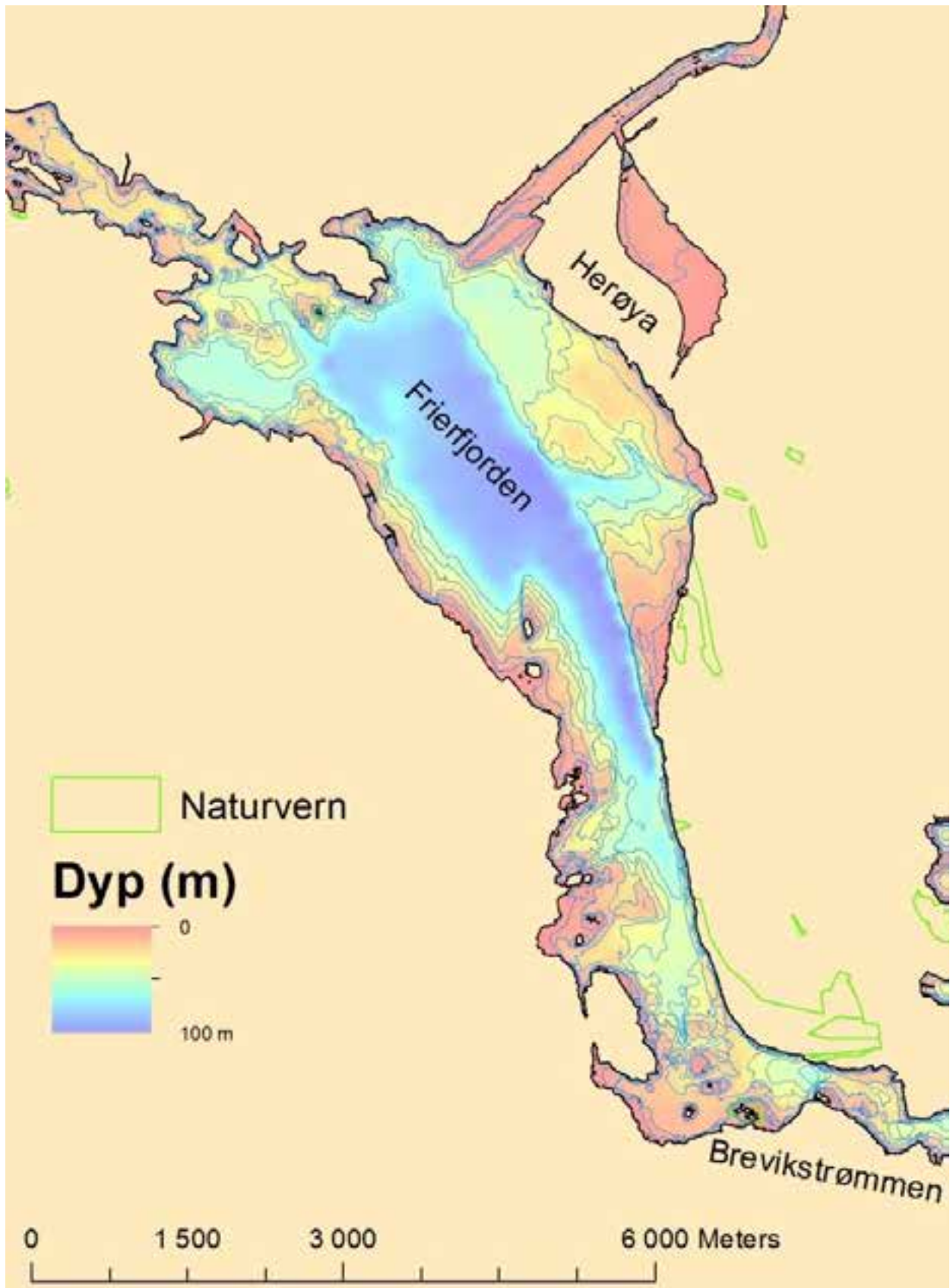
1. Konsentrasjon av suspendert materiale i vannmassene i Frierfjorden.
2. Sedimenteringshastigheten på bunn i Frierfjorden.
3. Fluks av partikler ut av Frierfjorden gjennom Brevikstrømmen.

Disse nøkkelparametere vil deretter brukes for å vurdere miljøkonsekvensene for resipienten.

2. Modellering av Grenlandsfjordene

2.1 Generell beskrivelse av GEMSS

Den 3-dimensjonale modellen beregner strøm, temperatur, konsentrasjon av stoffer med ulike egenskaper, inkludert sedimenttransport. Modellen beregner hva som skjer i fjorden ut fra kjent klima, vannføring, vanntemperatur og stoffkonsentrasjon i tilløp samt vannstand og stoffkonsentrasjoner ved de åpne endene av modellområdet. Modellområdet blir delt inn i beregningsceller. For hver celle blir resultatene beregnet skrittvis fremover i tid. Modellen/modellpakken er utviklet av ERM's Surfacewater Modeling Group i Exton, Pennsylvania, USA. Modellen og eksempler på bruk av modellen kan studeres nærmere på hjemmesiden <http://gemss.com/index.html>. GEMSS har tidligere blitt brukt i en rekke prosjekter hvor lignende problemstillinger har blitt belyst, senest i Ranfjorden (Staalstrøm & Kempa, 2015).

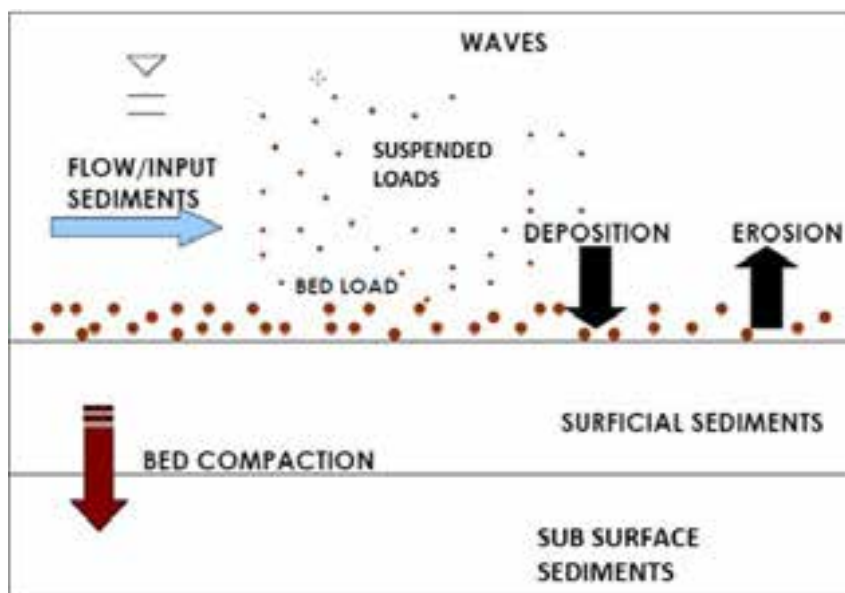


Figur 1. Kart over Frierfjorden. Virksomheten vil ligge på Herøya og ha utslipp til Frierfjorden på 24 m dyp. Fargeskalaen angir vanddybden.

Modelleringen består av to typer modelleksperimenter. Først gjøres et valideringseksperiment hvor fysikken i fjordsystemet modelleres. Modellen vil da benytte inngangsdata som vil være vannføring i elvene, meteorologiske observasjoner, tidevann og profiler av saltholdighet og temperatur. Resultatene fra dette valideringseksperimentet vil sammenlignes med måledata i fjordsystemet, og man ville kunne si hvor godt modellen beskriver det reelle sirkulasjonsmønsteret. Etter at denne oppgaven er gjennomført vil man ha et verktøy som kan brukes for å gjøre videre modelleksperimenter.

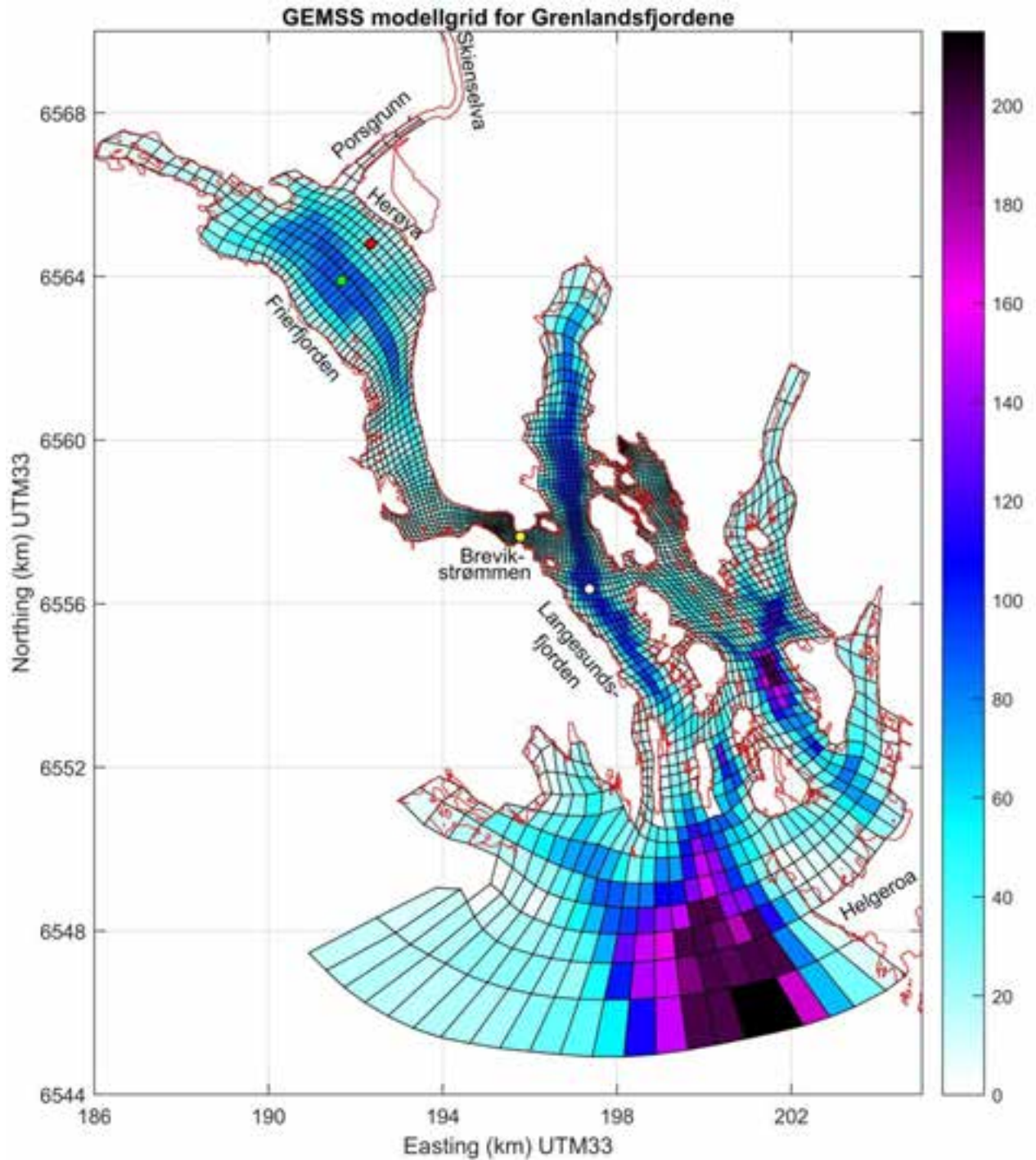
Etter at modellen er validert kjøres eksperimenter med utslipp av partikler med forskjellig kornstørrelse og lar modellen beregne spredningen av partiklene.

For å modellere partikkeltransport har vi benyttet en modul som kalles STM (Sediment Transport Module). Denne modulen (Fig.2) beregner konsentrasjon av partikler med forskjellige kornstørrelse i hver beregningscelle i modellområdet. I modellen kan partiklene enten flyte fritt i vannmassene (suspenderte partikler, *suspended load*) eller ligge på bunn (sedimenterte partikler, *bed load*). Partikler som havner på bunn kan re-suspenderes. **Figur 2** viser et vindu i GEMSS modellen hvor de forskjellige partikkeltypene spesifiseres. **Figur 2** illustrerer noen av de prosessene som er parameterisert i STM-modulen.



Figur 2. Illustrasjon av prosesser i forbindelse med partikkeltransport i GEMSS-STM.

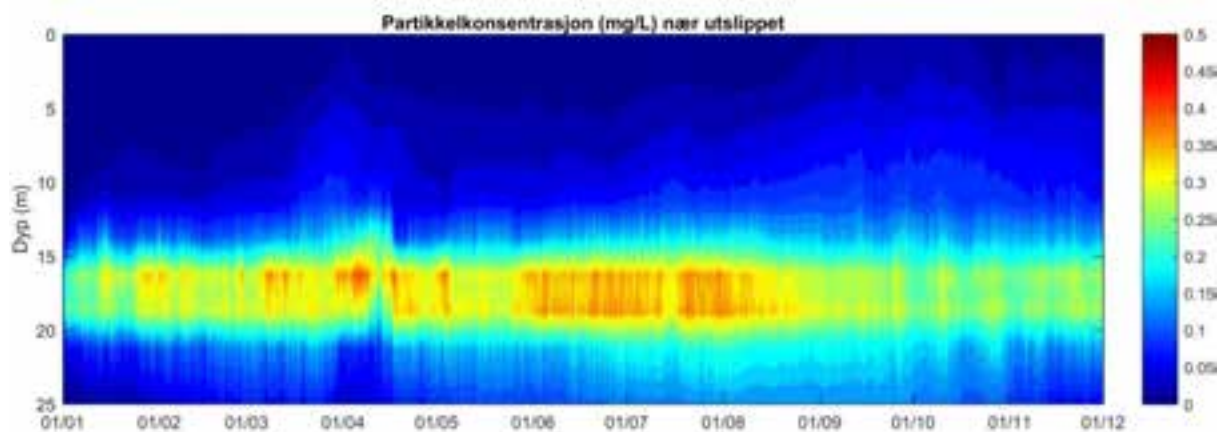
For å modellere sirkulasjonsmønsteret i modellområdet har vi benyttet GEMSS modulen HDM som er en modell som beregner strøm og hydrografi. Deretter er sedimenttransportmodulen STM benyttet (**Figur 2**). De vertikale lagene i modellen er horisontale (z-lag). GEMSS bruker et fleksibelt rutenett når modellområdet skal deles opp i bokser **Figur 3**. I hver boks, det vil si hver av de svarte rutene i **Figur 3**, beregnes strøm, saltholdighet, temperatur og konsentrasjon av partikler. Modellgriddet er kurvilineært slik at den horisontale oppløsningen kan varieres. Områder langt ute i Grenlandsfjordene vil ha en grov horisontal oppløsning, mens oppløsningen vil være fin nær i Frierfjorden og spesielt i Brevikstrømmen.



Figur 3. Kart som viser modellgriddet. Utslippspunktet er markert med en rød prikk. Stasjon BC-1 i Frierfjorden er markert med en grønn prikk, mens en stasjon i Brevikstrømmen er markert med en gul prikk.

2.2 Beskrivelse av utslippet

I modellen legges det inn et utslipp som fordeler seg i dybdeintervallet 20-15 m i et punkt som er vist i som en rød prikk i **Figur 3**. Det er oppgitt at fabrikkens ønsker å slippe ut omtrent 550 kg partikler per døgn i en volumstrøm på 700 m³ per døgn, som tilsvarer en konsentrasjon på 0,8 mg/l. **Figur 4** viser konsentrasjonen nær utslippet i løpet av modellsimuleringen. Utslipet er kontinuerlig.



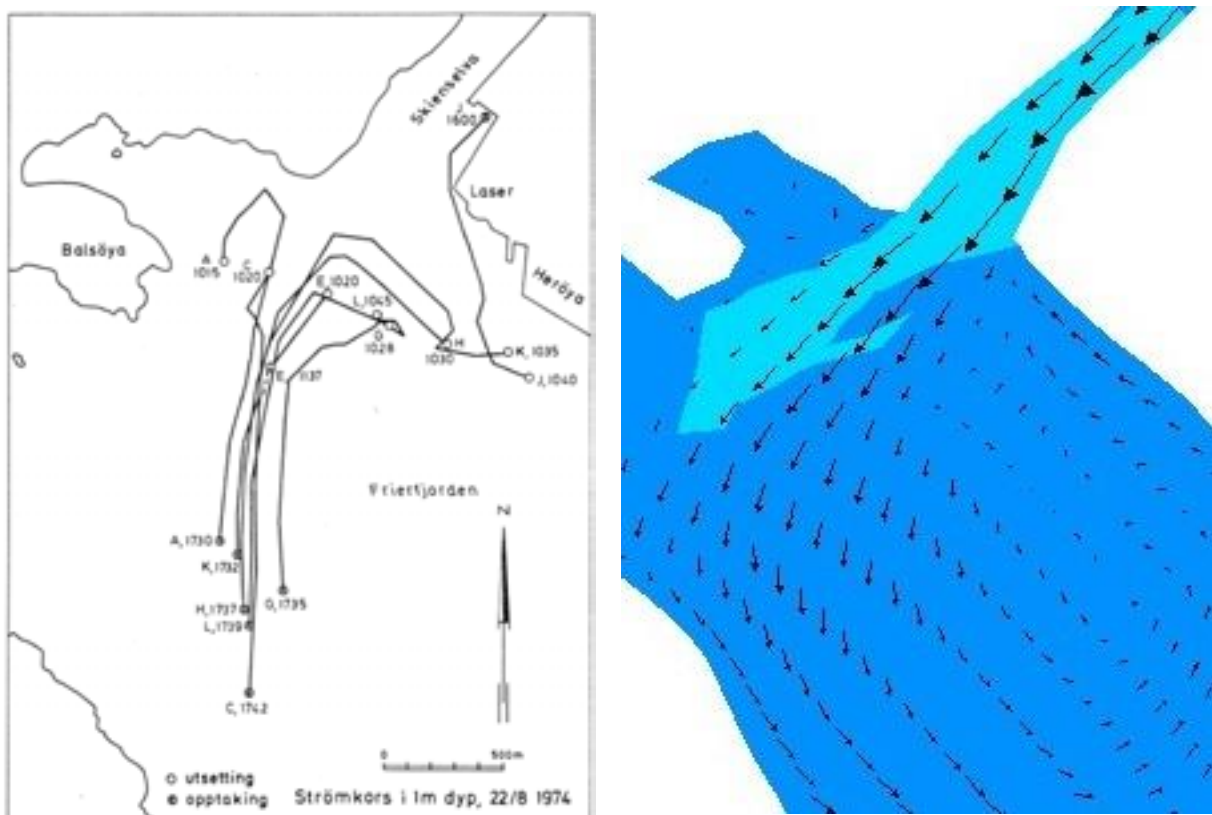
Figur 4. Konsentrasjon av partikler nær utslippet i løpet av modellsimuleringen.

3. Validering av modellen

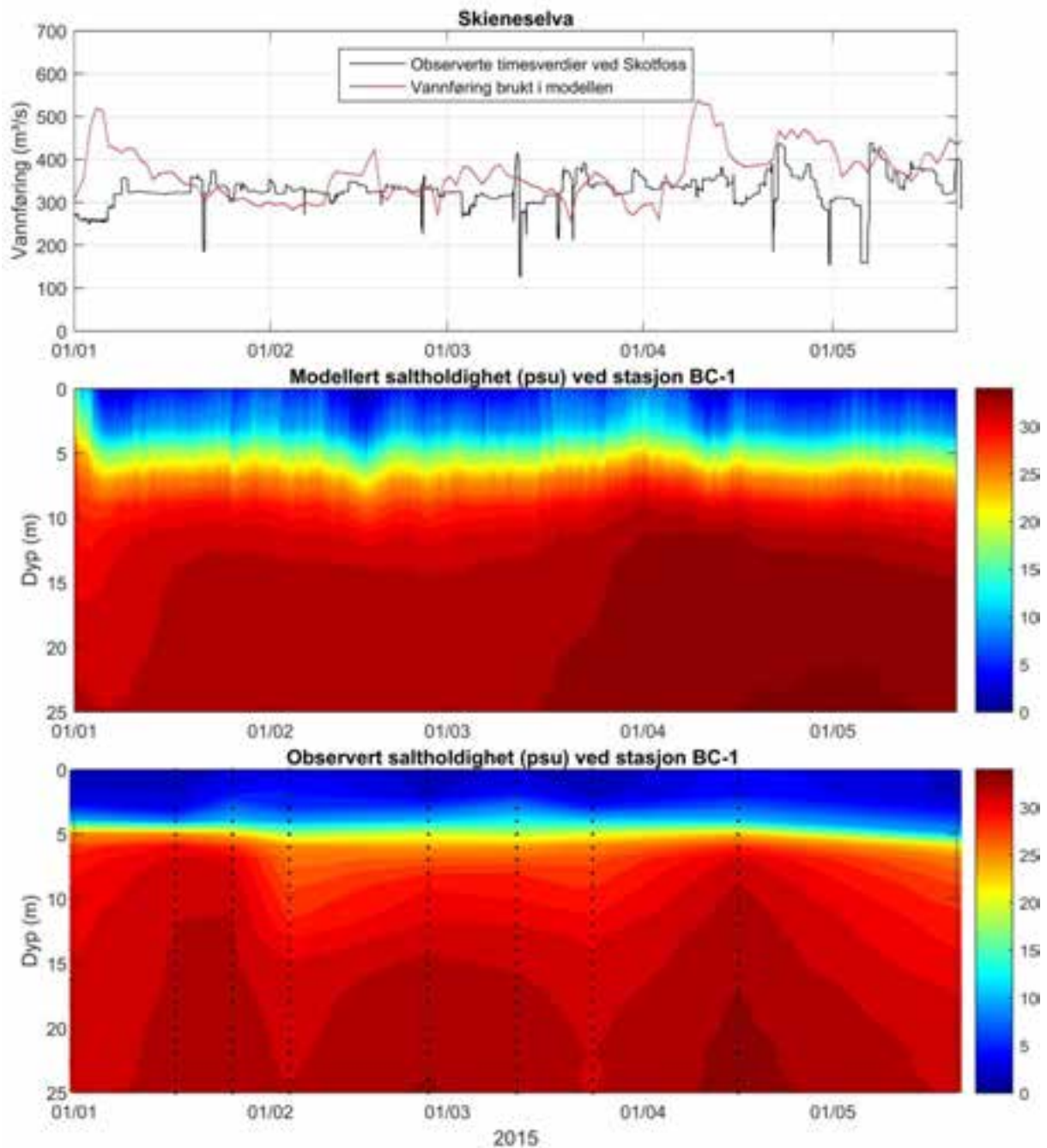
3.1 Sirkulasjonsmønsteret i overflatelaget

Skienselva er en av landets mest vannrike elver, med en årlig middel vannføring på 230-250 m³/s, med opptil 1000 m³/s i vårfloppen og minimum 50-100 m³/s i juli-august. Frierfjorden har derfor en utpreget estuarin sirkulasjon, med et ferskvannslag med tykkelse som varierer mellom 2-8 m, som strømmer raskt utover mot Brevikstrømmen. Ferskvannslaget river også med seg vann fra det saltene laget under, som fører til at det oppstår en kompensasjonsstrøm innover i Frierfjorden. Partiklene som fraktes ut av Frierfjorden må først spres fra utslippspunktet på 24 m ved Herøya og opp i ferskvannslaget før det når ut til Brevikstrømmen. Her vil vi se på hvordan modellen beskriver sirkulasjonsmønsteret i overflatelaget.

Det ble foretatt omfattende undersøkelser i fjordsystemet i 1974-1977, med blant annet en undersøkelse hvor strømkors ble sluppet ut i overflata i en rekke posisjoner på tvers av Skienselvas utløp. Resultater fra denne strømkorsundersøkelsen er vist sammen med strømmønsteret i overflatelaget beregnet med GEMSS modellen (**Figur 5**). Ferskvannet fra elva beskriver en bue som rettes mot terskelområdet. I utkanten av ferskvannsstrømmen oppstår det virvler, som gjør at noen av strømkorsene blir fraktet tilbake mot elvemunningen, før de fanges inn av ferskvannsstrømmen som tar dem utover i fjorden igjen. Strømhastigheten midt i ferskvannsstrømmen var 6-7 cm/s. I dette tilfellet var vannføringen i Skienselva 90 m³/s dagen før undersøkelsen den (21/8-74) og 48 m³/s den 22/8-74, og tykkelsen av brakkvannslaget var omtrent 1-2 m. Det samme bildet sees i modellresultatene når vannføringen i Skienselva er omtrent lik, og det kan konkluderes med at modellen gjenskaper strømbildet i overflaten på en tilfredsstillende måte.



Figur 5. Sirkulasjon i overflatelaget i Frierfjorden utenfor Skienselvas utløp, basert på strømkorsundersøkelser i 1974 (til venstre) og GEMSS modellen (til høyre).



Figur 6. Vannføring i Skieneselva og saltholdighet i de øverste 25 meterne ved stasjon BC-1 midt i Frierfjorden. Øverst vises vannføring målt ved Skotfoss i Skieneselva og den vannføringen som er brukt i modellen. I midten vises modellert saltholdighet og nederst vises observert saltholdighet. De svarte prikkene i den nederste figuren viser hvor det er observasjoner.

3.2 Blandingsforholdene i Frierfjorden

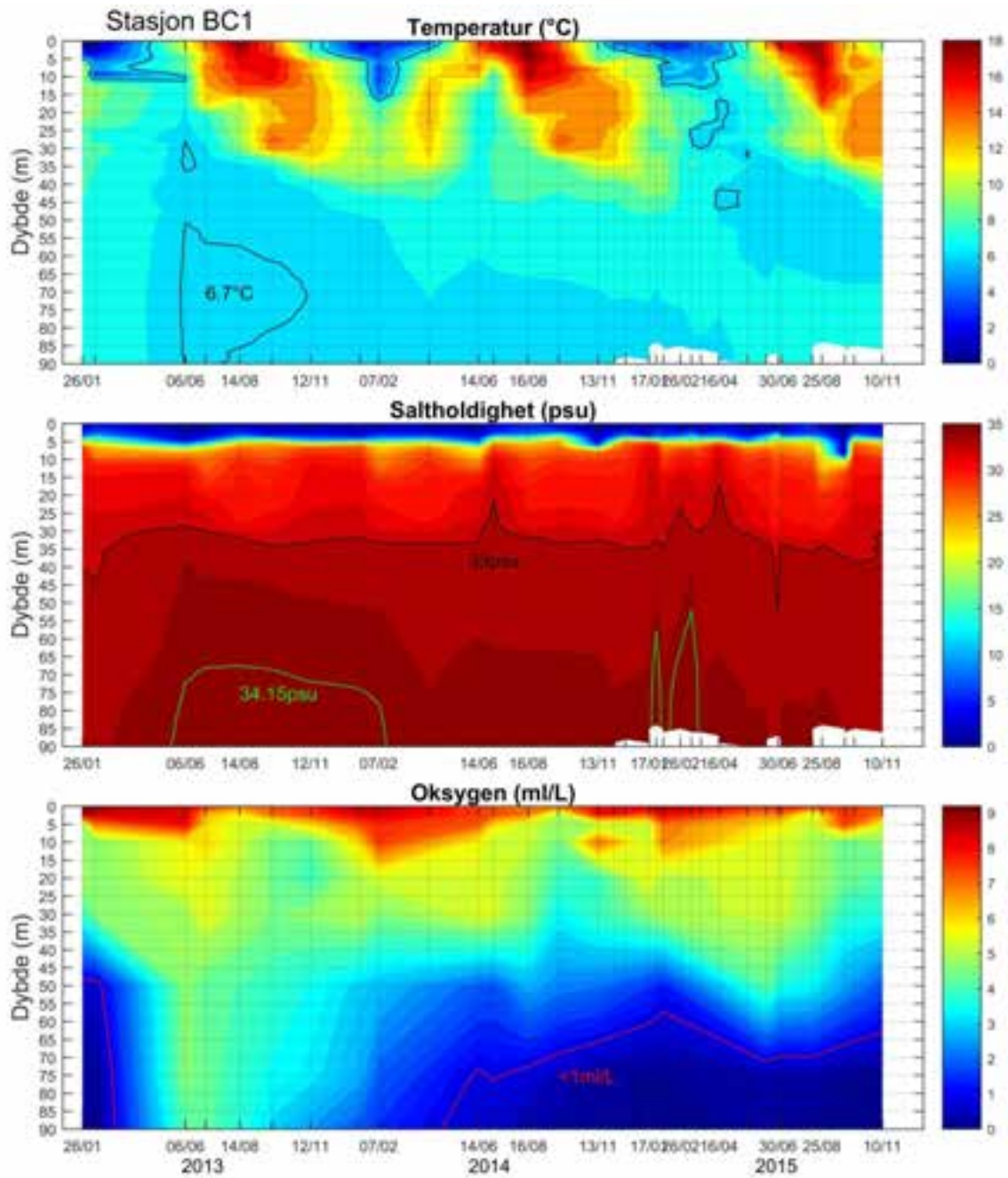
Frierfjorden er en terskelfjord og forholdene bærer preg av dette. Dypvannet på innsiden av terskelen byttes ut når tungt og oksygenrikt vann strømmer inn over terskelen og synker ned til bunn. Dette kalles dypvannsfornyelser. I Frierfjorden kan det gå flere år mellom hver gang dette skjer, siden det tunge bunnvannet etter en dypvannsfornyelse blandes sakte opp i vannmassen mens vannet er stagnant. Det er denne blandingsprosessen som tilfører den nødvendige energien som skal til for å løfte bunnvannet oppover i vannsøylen, og ved å se hvor rask saltholdigheten reduseres i forskjellige dyp i stagnasjonsperioder i så kan man si noe om hvor fort vannet skiftes ut i dette dypet.

Oksygenkonsentrasjonen er også en viktig indikator, siden det hele tiden reduseres av oksygenforbrukende stoffer i fjorden mellom dypvannsfornyelser. **Figur 7** viser forholdene i Frierfjorden i de tre siste årene. Det forekom en dypvannsfornyelse en gang mellom 26. januar og 6. juni 2013, hvor vann med temperatur 6,7 °C, saltholdighet 34,15 psu og oksygenkonsentrasjon på omtrent 5 ml/L strømmet inn i Frierfjorden. Etter denne dypvannsforynelsen har vannet stort sett vært stagnant, bortsett fra en mindre dypvannsfornyelse i begynnelsen av 2015.

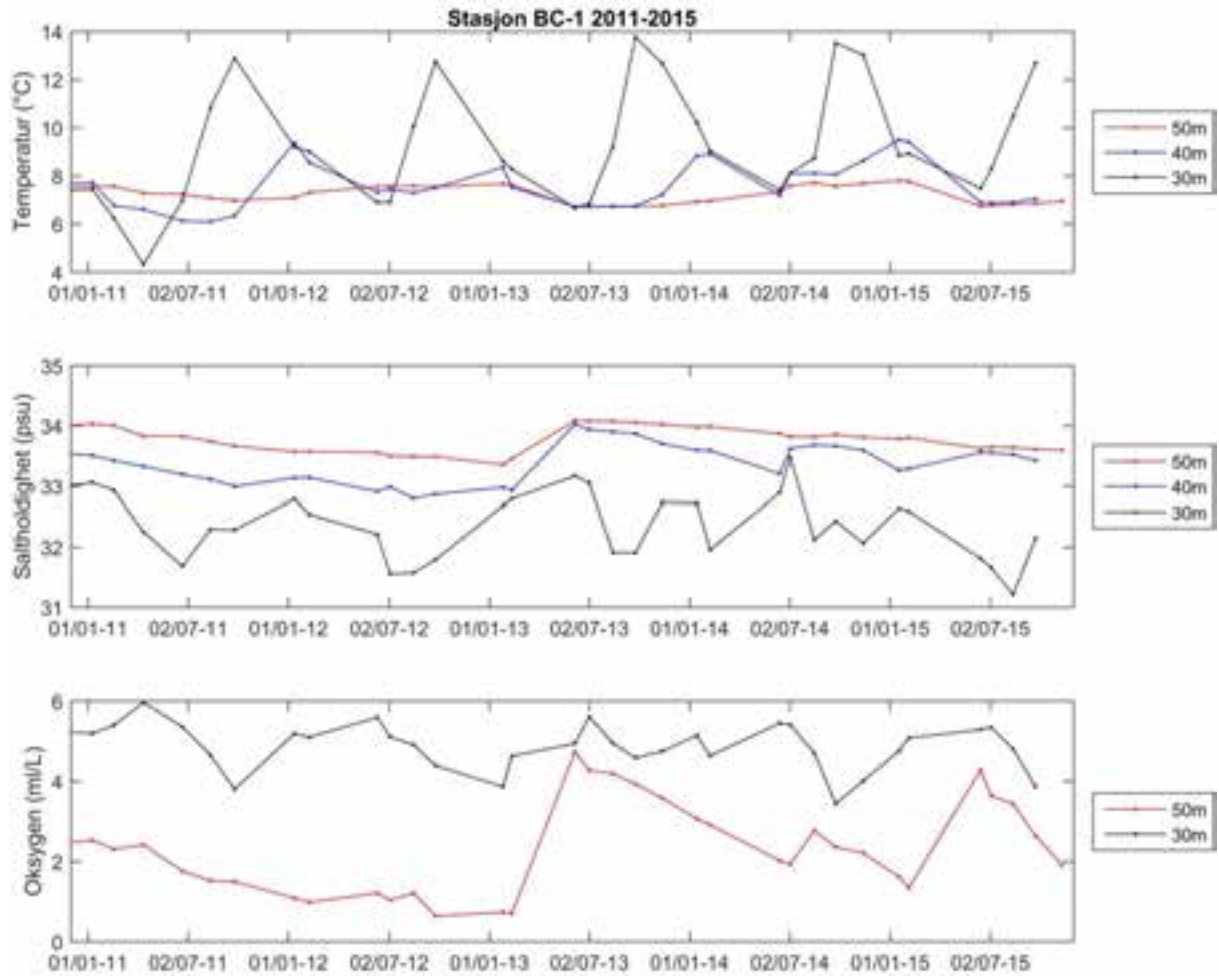
Figur 8 viser hvordan forholdene på mellomdyp varierte over et noe lengre tidsrom. Det er tydelig at vannet i 30 m skiftes ut hvert år, og det samme gjør vannet i 40 m, men i mindre grad. På 50 m var det en dypvannsutskiftning i starten av 2013 og en i starten av 2015.

I 3D numeriske modeller er det en utfordring å simulere slike forhold, når vannmassene står nærmest i ro. Dette skyldes uønsket numerisk blanding, som gjør at man får dypvannsfornyelser for ofte. **Figur 9** viser resultater fra vår simulering med GEMSS modellen som gikk fra 1. januar til 1. desember 2015. I modellen var det en dypvannsfornyelse i løpet av april, hvor vann med temperatur 7,5 °C og saltholdighet 34,5 psu strømmet inn i fjorden. Modellen bruker data fra stasjon FG-1 i Langesundsfjorden som inngangsdata. Stasjon FG-1 er vist som en hvit prikk i **Figur 3**. På stasjon FG-1 utenfor Breviksterskelen var det en dypvannsfornyelse i dette tidsrommet (se Fagerli et al., 2016), så det er ikke uventet at dette forplanter seg innover i modellområdet, og denne dypvannsforynelsen anses som realistisk, selv om det ikke forekom en like kraftig dypvannsfornyelse i virkeligheten.

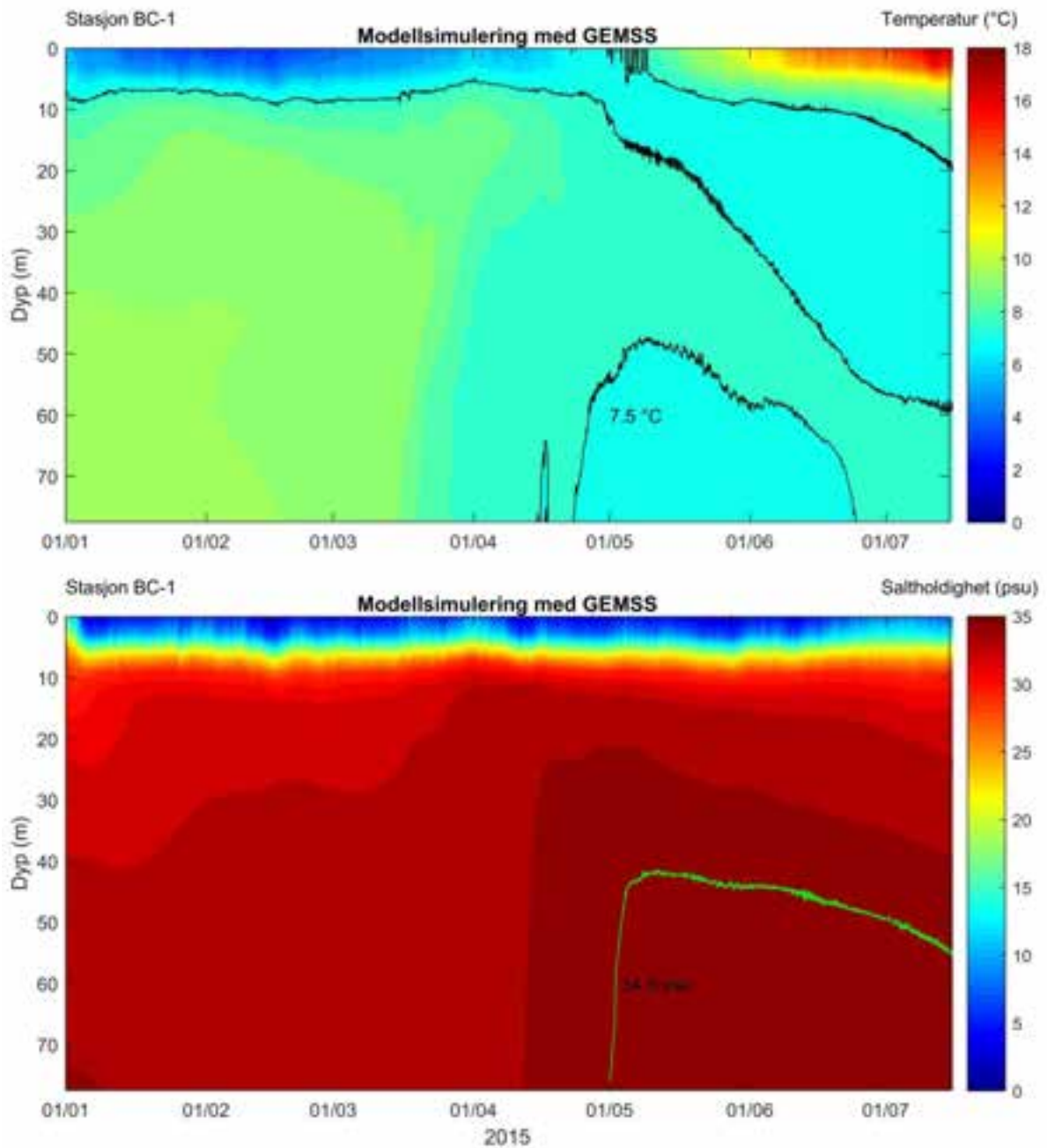
Etter omtrent 1. august 2015 ser det ut til at uønsket høy vertikal blanding gjør seg gjeldende, og saltholdighetsflater som befant seg på omkring 10 m blandes omtrent ned til bunn. Disse blandingsforholdene er ikke realistiske, og vil i stor grad påvirke også simulert partikkelkonsentrasjon i fjorden. I modelleringen av partikkelspredningen vil derfor ikke resultatene fra etter 1. august benyttes.



Figur 7. Målinger av temperatur (øverst), saltholdighet (i midten) og oksygenkonsentrasjon (nederst) på stasjon BC-1 midt i Frierfjorden fra 2013-2015. Figuren er hentet fra Fagerli et al. (2016).



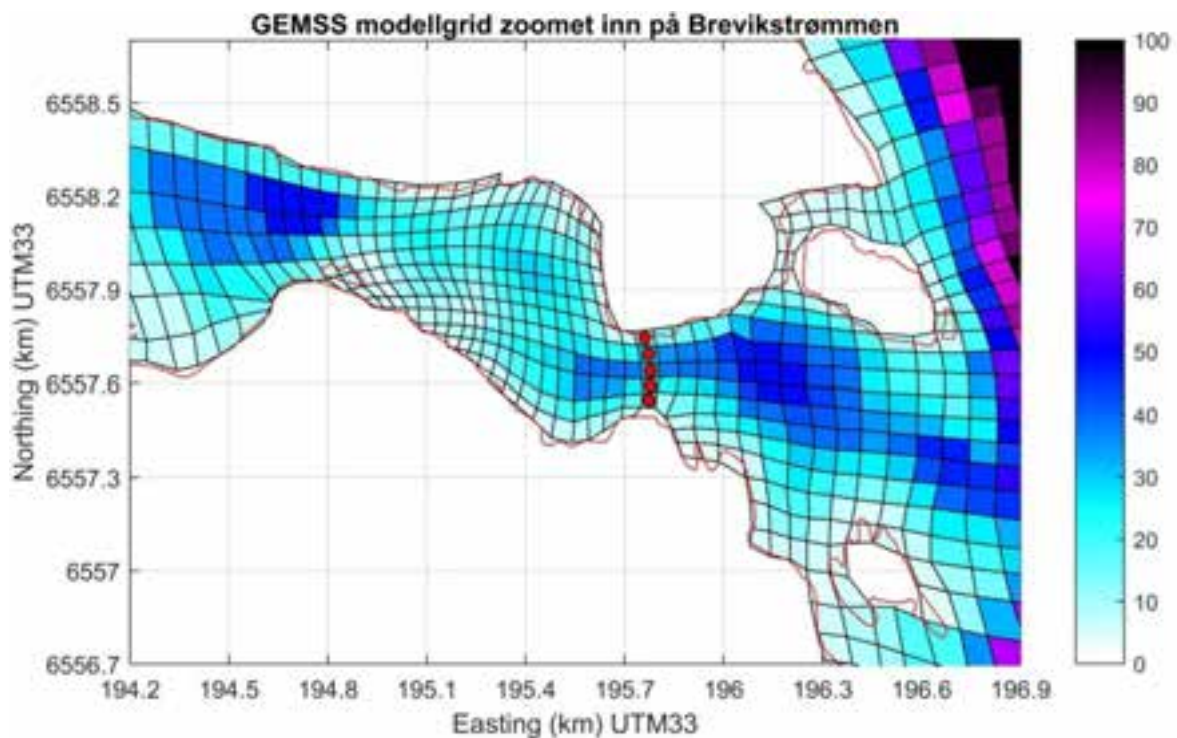
Figur 8. Målinger av temperatur (øverst), saltholdighet (i midten) og oksygenkonsentrasjon (nederst) på mellomdyp (30-50 m) på stasjon BC-1 midt i Frierfjorden fra 2011-2015.



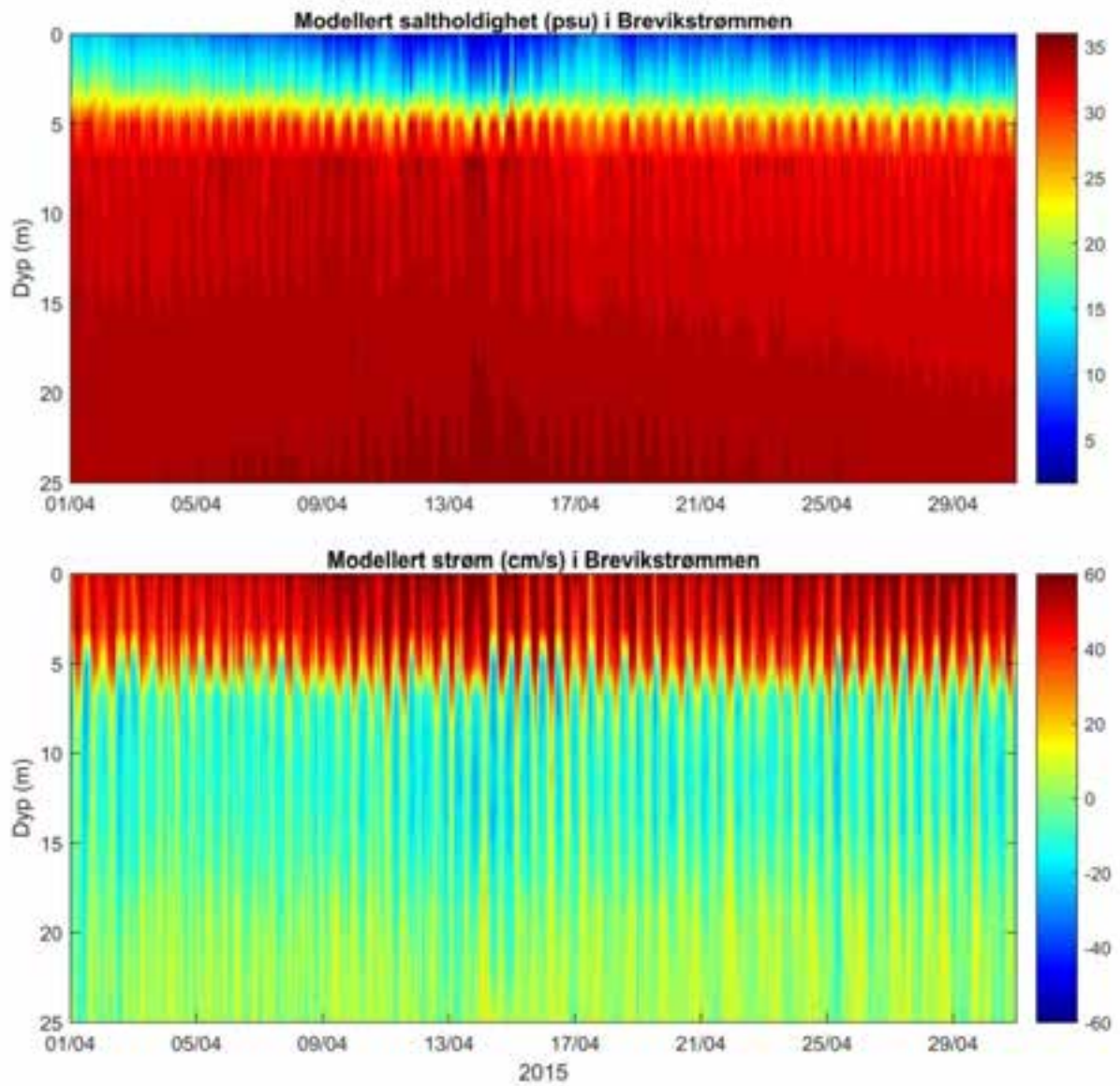
Figur 9. Resultater fra simulering av forholdene på stasjon BC-1 med GEMSS modellen. Øverst vises temperaturen og nederst saltholdigheten. Modellsimuleringen startet 1. januar og gikk til 1. desember 2015.

3.3 Strømforhold i Brevikstrømmen

Brevikstrømmen har et overflatelag som i gjennomsnitt strømmer utover. Under dette er det et lag hvor det strømmer inn og ut i takt med tidevannvariasjonene. **Figur 10** viser modellens bunntopografi i Svelvikstrømmen. Magnusson & Molvær (1997) rapporterte strømmålinger langs bunn i Brevikstrømmen i en posisjon omtrent 800 m lenger vest i forhold til de stasjonene markert med røde prikker i **Figur 10**. Strømstyrken var omtrent 0,4 m/s på det sterkeste. I modellen er tidevannsstrømmen langs bunn noe svakere, men viser det samme variasjonsmønsteret. I målingene fra 1997 er det utstrømmende ferskvannslaget 2-3 m tykt og vannføringen i Skienelva var omtrent 130 m³/s. I modellkjøringen var vannføringen i snitt omtrent 300 m³/s, og ferskvannslaget var omtrent 4-5 m tykt. Dette virker rimelig. **Figur 11** viser saltholdighet og strøm i Brevikstrømmen



Figur 10. Modellens bunntopografi i Brevikstrømmen. Fargeskalaen angir vanndybden i hver gridcelle i modellen (svarte ruter).

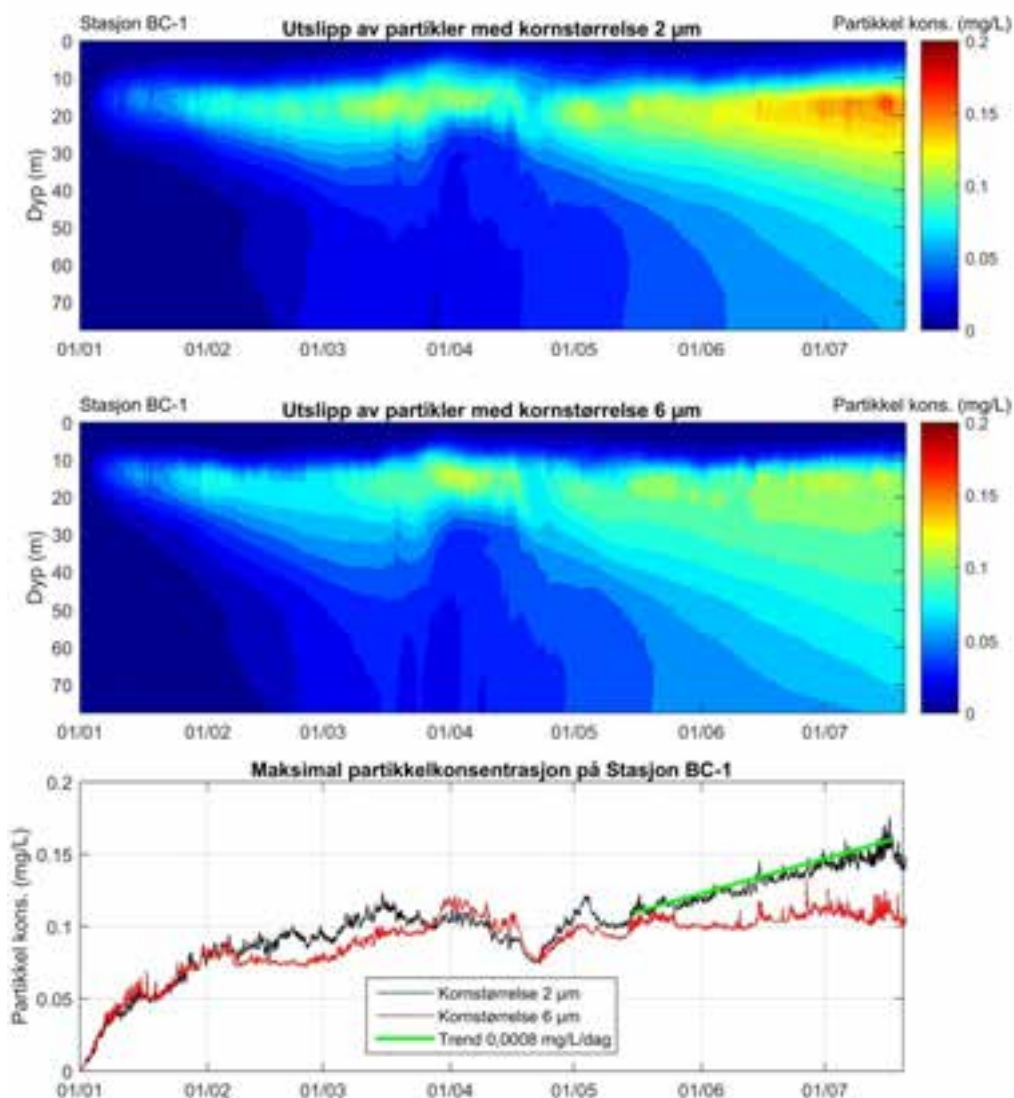


Figur 11. Saltholdighet og øst-vest komponenten av strømmen i Brevik, fra modellsimuleringene. Data for en måned er vist.

4. Resultater

4.1 Partikler i de frie vannmassene i Frierfjorden

Figur 12 viser modellert partikkelkonsentrasjon på stasjon BC-1 midt i Frierfjorden. I utslippet er det prøvd to forskjellige kornstørrelser, 2 μm og 6 μm . Konsentrasjonen blir størst i vannsøylen med de minste partiklene, siden disse synker ut svært sakte. Konsentrasjonen er størst i utslippsdypet, men over tid bygger konsentrasjonen seg opp også lenger ned i vannsøylen. Omtrent i begynnelsen av august så begynner den uønsket høye vertikale blandingen i modellen å gjøre seg gjeldene, og konsentrasjonen i vannsøylen synker igjen. Målinger av temperatur, saltholdighet og oksygen ved stasjon BC-1 viser at fra omtrent 40 m og dypere, så kan vannet være stagnant i perioder lengre enn et år. Hvis trenden i maksimal konsentrasjon fra juni-juli i modellsimuleringene, vist med en grønn linje nederst i **Figur 12**, så ville den maksimale konsentrasjonen kunne blitt opp mot 0,4 mg/L, omtrent 17 måneder etter at simuleringen startet.

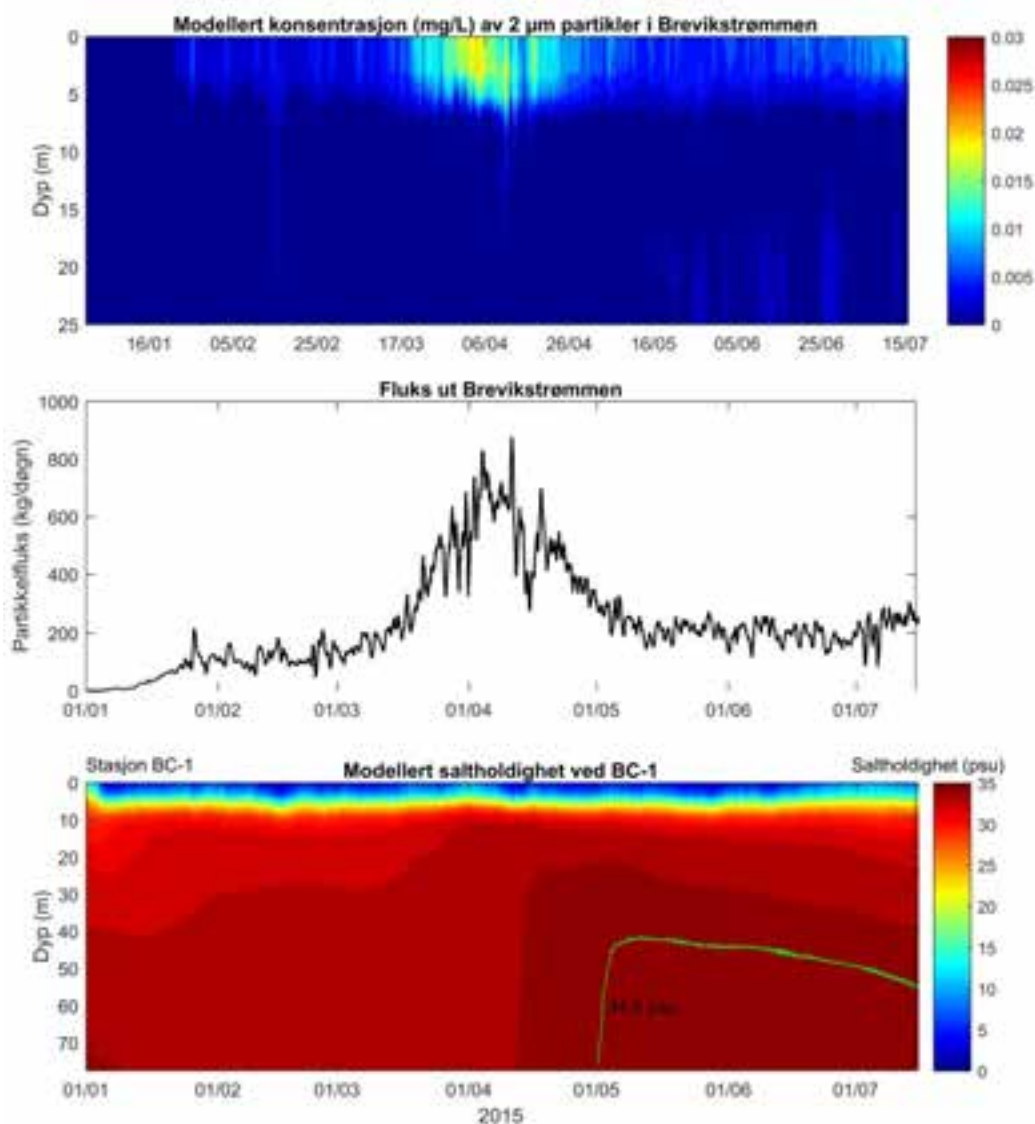


Figur 12. Partikkelkonsentrasjon midt i Frierfjorden. Øverst vises utslipp av partikler med kornstørrelse 2 μm og i midten med partikkelstørrelse 6 μm . Nederst vises høyeste konsentrasjon i vannsøylen.

4.2 Transport ut av Frierfjorden

Figur 13 viser partikkelkonsentrasjon i Brevikstrømmen i et punkt i sundet (se **Figur 10**) sammen med saltholdigheten midt i Frierfjorden. Det er her antatt at utslippet har kornstørrelse $2\ \mu\text{m}$. Konsentrasjonen er $0,02\ \text{mg/L}$ på det høyeste, og denne toppen er knyttet til en episode som sammenfaller med dypvannsfornyelse i Frierfjorden. Partikkelfluksen er altså størst når partikler blandes opp i ferskvannslaget. Partikkelfluks ut av Frierfjorden er beregnet ved å benyttet modelldata fra de fem stasjonene som er vist **Figur 10**. Når partiklene blandes opp i ferskvannslaget blir partikkelfluksen ca. $800\ \text{kg/døgn}$ på det høyeste. Transporten ut over Breviksterskelen kan altså i kortere perioder være større enn utslippet ved Herøya. Utenom slike episoder så er partikkelfluksen på omtrent $200\ \text{kg/døgn}$.

Konsentrasjonen i Brevikstrømmen blir ikke høyere enn $0,02\ \text{mg/L}$, og vil i mesteparten av tiden være lavere enn dette. Derfor vil en økning i partikkelkonsentrasjon utenfor Brevikstrømmen være ubetydelig.



Figur 13. Modellert partikkelkonsentrasjon i Brevikstrømmen når det antas utslipp av partikler med størrelse $2\ \mu\text{m}$ (øverst), beregnet partikkelfluks ut av Frierfjorden (i midten) og modellert saltholdighet i Frierfjorden (nederst).

4.3 Sedimentering

Ved kornstørrelse på 2 μm vil bare omtrent 1500 kg av partiklene ha sedimentert på bunn etter seks måneder (180 dager). På den samme tiden så vil det ha vært sluppet ut 99 000 kg partikler. Altså vil ikke mer enn 1-2 % av materialet sedimentere i Frierfjorden. Partikkelstørrelsen er oppgitt å være < enn 3 μm . 1-2 % sedimentasjon vil altså være i overkant av forventet sedimentasjon, et slags best case. Arealet til Frierfjorden innenfor Breviksterskelen er oppgitt til 17,5 km² (Magnusson & Mølvær, 1997). Hvis alle partiklene i utslippet (550 kg/dag) skulle sedimentert på bunn i Frierfjorden, så ville dette gitt en sedimenteringshastighet på 0,004 mm/år fordelt over hele fjorden. Sammenlignet med normal sedimenttilvekst på ca. 1 mm/år er det liten risiko for at et slikt tilskudd fra silisiumpartiklene vil kunne gi skader på bunndyr som følge av økt sedimentasjon. Smit et al. (2008) har anslått at bunnfaunaen ikke påvirkes av sedimentasjon ≤ 6 mm/år, så i dette henseendet er partikkelutslippet ubetydelig.

Det kan konkluderes med at lite materiale sedimenterer på bunn i Frierfjorden, og at sedimenteringshastigheten uansett ville bli ubetydelig. I **Tabell 1** er skjebnen til partiklene fra utslippet sammenstilt. Fra tabellen så er det tydelig at det mest problematiske aspektet er knyttet til en økning av partikkelkonsentrasjonene i de frie vannmassene.

Tabell 1. Budsjett for partiklene fra utslippet i løpet av en periode på 180 dager.

Sedimentering	Maksimalt 10 kg/dag
Partikkeltransport ut av Frierfjorden	Ca. 200 kg/dag
Økning i de frie vannmassene	Ca. 340 kg/dag
Total	550 kg/dag

5. Samlet vurdering

I denne rapporten har vi kvantifisert hvordan utslippet vil påvirke tre nøkkelparametere:

1. Konsentrasjon av suspendert materiale i vannmassene i Frierfjorden.
2. Sedimenteringshastigheten på bunn i Frierfjorden.
3. Fluks av partikler ut av Frierfjorden gjennom Brevikstrømmen.

Sedimentering på bunn på grunn av utslippet vil være ubetydelig. En økning i partikkelkonsentrasjonen utenfor Frierfjorden på grunn av utslippet vil også være ubetydelig, siden konsentrasjonen av silisiumpartikler i overflatelaget i Brevikstrømmen ikke ville blitt større enn 0,02 mg/L. Fluks av partikler gjennom Brevikstrømmen vil foregå i episoder knyttet til dypvannsfornyelser innenfor terskelen. I modellsimuleringen er fluksen av silisiumpartikler 800 kg/døgn på det meste når partikler blandes opp i overflatelaget, og omtrent 200 kg/døgn når vannmassene er stagnante. Når vannmassene er stagnante så vil omtrent 340 av de 550 kg som slippes ut per døgn, bidra til å øke partikkelkonsentrasjonen i de frie vannmassene (**Tabell 1**).

Den største miljøkonsekvensen knyttet til utslipp av svært finkornet materiale i Frierfjorden, er eventuelle effekter på organismer av økt konsentrasjon av svært små partikler i vannmassene under terskeldyp. Slike

mulige konsekvenser er ikke vurdert i denne rapporten som begrenser seg til modellering av hvordan partiklene spres og fordeles i Frierfjorden, hvor mye som sedimenterer og hvor mye som transporteres til fjorden utenfor.

Partikkelkonsentrasjonen i selve utslippet vil være 0,8 mg/L. Modellsimuleringen viser at konsentrasjonen i 15-20 m dyp nær utslippet vil være opp mot 0,4 mg/L, og at denne ikke øker med tiden.

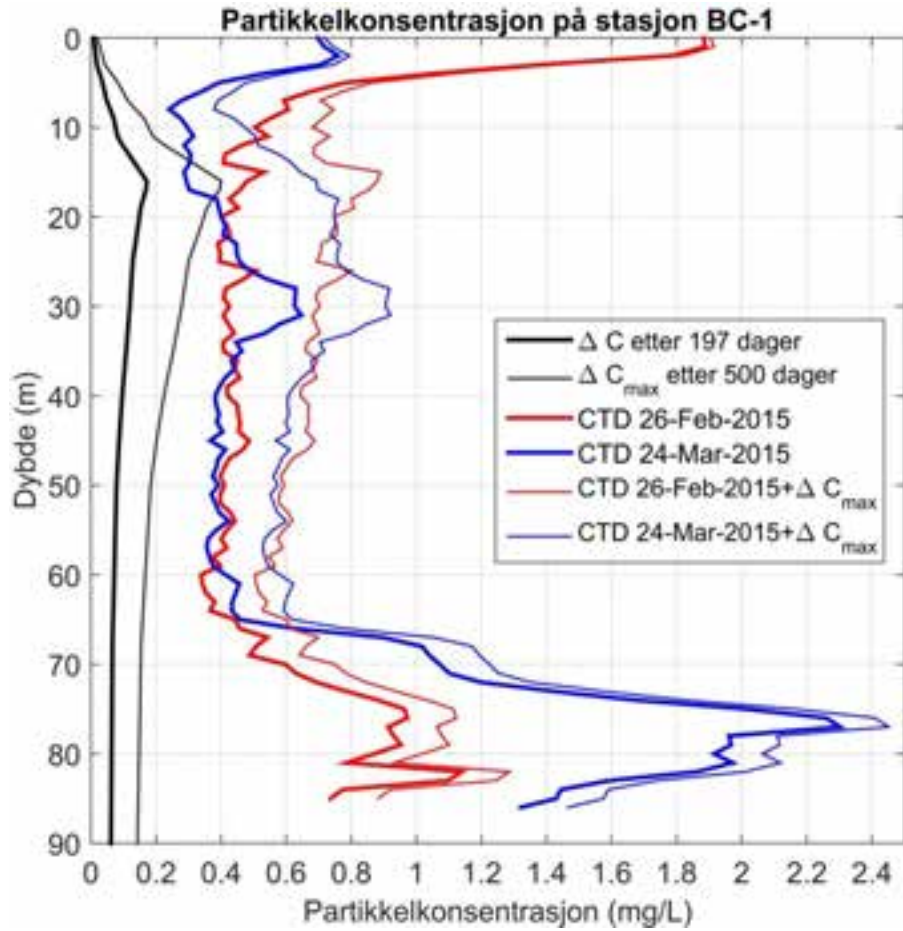
Midt i Frierfjorden vil konsentrasjonen gradvis bygge seg opp helt til episoder med dypvannsfornyelse fører til at partiklene blir blandet opp i det utstrømmende brakkvannslaget og raskt fraktes ut av fjorden. Målinger av temperatur, saltholdighet og oksygen viser at vannmassene ned til omtrent 40 m skiftes ut minst en gang i året. Under omtrent 40 m kan vannmassene bli stående i lengre perioder enn et år og det er i disse dypene at partikkelkonsentrasjonen kan bygges opp til de høyeste verdiene.

I modellsimuleringen for stasjon BC1 midt i Frierfjorden for perioden 1. jan.-15. juli 2015 ble den høyeste konsentrasjonen på 0,17 mg/L oppnådd mot slutten av perioden. Konsentrasjonene økte da med omtrent 0,0008 mg/L/dag. Hvis denne trenden fremskrives til neste dypvannsutskifting vil den maksimale konsentrasjonen komme opp i 0,4 mg/L omtrent 17 måneder etter at modellsimuleringen startet.

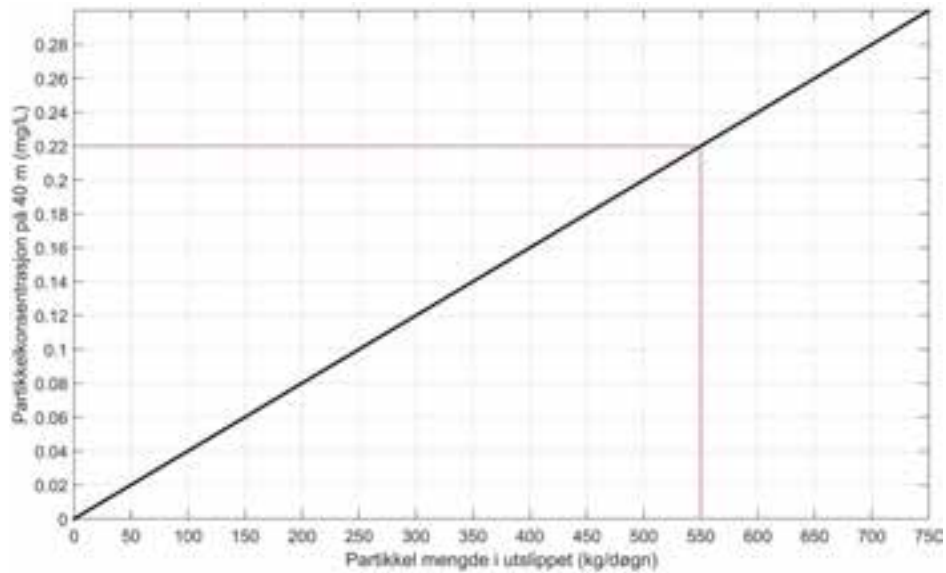
De høyeste partikkelkonsentrasjonene opptrer i 16-17 m dyp, hvor vannmassene skiftes ut relativt ofte, og det er liten sannsynlighet for at konsentrasjonen skal bygge seg opp. I 40 m hvor vannmassene i lengre perioder kan være stagnante, kan konsentrasjonene komme opp i 0,22 mg/L. Målinger av turbiditet ved tidedninger ved BC-1 i 2015, tyder på at bakgrunnskonsentrasjonen i dybdeintervallet 40-65 m er 0,4 FNU, som tilsvarer omtrent 0,4 mg/L. Utslippet kan altså føre til en 50-60 % økning i partikkelkonsentrasjon i dette dybdeintervallet. Dette må anses som en relativt stor økning, selv om den totale partikkelkonsentrasjonen ikke blir større enn 0,62 mg/L. Det må også påpekes at dette kun vil oppetre etter at vannet har vært stagnant i omtrent 17 måneder, og at konsentrasjonen igjen vil bli lavere etter en dypvannsfornyelse.

Det vil være en lineær sammenheng mellom hvor høy konsentrasjonen i vannmassene i Frierfjorden kan bli og mengden med partikler som slippes ut. **Figur 15** viser denne sammenhengen, og for eksempel ved utslipp av 750 kg med finkornet materiale per døgn, så vil dette kunne gi en 75 % økning i partikkelkonsentrasjonen på 40 m dyp.

Siden skadeeffekten av så finkornet materiale ikke er kjent så anbefales det å gjennomføre en giftighetstest, hvor effekten av forskjellige partikkelkonsentrasjonen på relevante arter for Frierfjorden blir testet ut.



Figur 14. Modellert partikkelkonsentrasjon på stasjon BC-1.



Figur 15. Maksimal partikkelkonsentrasjon på 40 m dyp som funksjon av partikkelmengde i utslippet.

Referanser

Fagerli, C. W., Ruus, A., Borgersen, G., Staalstrøm, A., Green, N., & Hjermmann, D. Ø. (2016). Tiltaksrettet overvåkning av Grenlandsfjordene i henhold til vannforskriften. Overvåkning for konsortium av 11 bedrifter i Grenland. NIVA-rapport (under publisering).

Magnuson, J., & Molvær, J. (1999). Transfjo, Hydrographic observations in the Frierfjord, the Drammensfjord and the Iddefjord July-December 1997. NIVA-rapport 3951-1998.

Molvær, J., Berge, J. A., Magnusson, J., & Schaanning, M. T. (1976). Resipientundersøkelse av nedre Skienselva, Frierfjorden og tiliggende fjordområder. Rapport 4. Fremdriftrapport fra undersøkelser av vannutskiftningen i fjordområdet mars 1974-desember 1975. NIVA-rapport 729-1976.

Smit, M. G., Holthaus, K. I., Trannum, H. C., Neff, J. M., Kjeilen-Eilertsen, G., Jak, R. G., . . . Hendriks, A. J. (2008). Species sensitivity distributions for suspended clays, sediment burial, and grain size change in the marine environment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 27(4), 1006-1012.

NIVA: Norges ledende kompetansesenter på vannmiljø

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



Norsk institutt for vannforskning

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