

Spredningsmodellering finstoff Sørfjorden

E16/Vossebanen Arna-Stanghelle



Dokumentinformasjon

Oppdragsgiver:	Statens vegvesen
Tittel på rapport:	Spredningsmodellering finstoff Sørfjorden
Oppdragsnavn:	2021-01 Spredningsmodellering E16 Arna-Stanghelle
Oppdragsnummer:	623771-02
Utarbeidet av:	Gerard Dam
Oppdragsleder:	Olav Turøy
Tilgjengelighet:	Åpen

Kort sammendrag

I forbindelse med ny E16 og jernbane på strekningen Arna – Stanghelle, vil det skapes store mengder overskuddsmasser. Deponering av omtrent 10 millioner m³ overskuddsmasser i sjø er under vurdering.

I denne rapporten presenteres resultater fra 3D-modellering av finstoffutslipp i Veia/Sørfjorden for å simulere deponering av tunnelstein for ny E16/Vossobanen.

Basert på modellresultatene kan vi dra disse konklusjonene:

- Fint sediment (leire og silt) fra de tre utslippspunktene på 50m dybde når ikke overflatelaget i Veafjorden og Sørfjorden. Ferskvannslaget er en barriere for fint sediment og blir suspendert under ferskvannslaget.
- Konsentrasjon av suspenderte leirpartikler (mindre enn 6 µm) øker over tid fordi sedimentasjonen av leirepartikler foregår så sent og fordi den horisontale strømmen er ikke sterk nok til å føre partikler ut av området.

Ver	Dato	Beskrivelse	Utarb. av	KS
04	21 juni 2022	Versjon 4, endelig	GD	IH
03	21.april 2022	Versjon 3	GD	IH
02	01.mars.2022	Versjon 2	GD	
01	11. jan. 2022	Kommentarversjon	GD	-

Etter 16 dager modellkjøring var det ikke oppstått likevekt i konsentrasjon.

- Konsentrasjon av siltpartikler (mellom 6-63 μm) når i hovedsak likevekt etter noen dager. Sedimentasjon av siltpartikler er stor nok for å unngå videre oppkonsentrering i vannmassene.
- Et bunnområde på flere kilometer rundt utslippspunktene blir berørt av sedimentasjon av siltpartikler. Sedimentering av leirepartikler skjer i modellen, men i mindre grad enn siltpartikler.
- Leirpartikler blir lengre i suspensjon enn siltpartikler. Dette medfører at disse partiklene blir transportert lengre vekk fra utslippspunktet enn siltpartikler.
- Det er lite forskjell i sedimentkonsentrasjon ved modellering med gjennomsnittlig ferskvannsavrenning (Scenario 1) og 3x gjennomsnittlig ferskvannsavrenning (Scenario 2) når utslippet skjer på 50m dybde.
- Et utslipp av leire på 2m dyp (i ferskvannslaget) istedenfor 50m dyp gir store forskjeller i spredningen (Scenario 3). Leire forblir stort sett i overflatelaget og sprer seg videre nedstrøms mot sjø.
- Et utslipp av leire på 10m dyp (Scenario 4) gir et annerledes spredningsbilde enn utslipp på 2m (Scenario 3). Utslipp av leire på 2m forblir stort sett i overflatelaget og sprer seg videre nedstrøms mot sjø, imens utslipp på 10m sprer seg med returstrømmingen oppstrøms og synker også videre til dypere lag.
- Utslipp av silt på 2m (Scenario 3) eller 10m (Scenario 4) gir det samme bildet av sedimenteringen ved utslippslokalitetene.
- Et scenario med kontinuerlig utslipp (Scenario 1) versus et dropp-utslipp-scenario (Scenario 5) gir forskjell i konsentrasjon rundt utslippspunkt (near-field), men over lang avstand (far-field) ser vi like resultater som for kontinuerlig utslipp (Scenario 1).
- Utfyllingen i sjø på 10 millioner m^3 påvirker strømforholdene bare lokalt og i mindre grad (Scenario 6) og kan dermed ikke påvirke spredningen av finstoffet i stor grad.

Forord

Denne rapporten er utarbeidet under Rammeavtalen for innsamling, simulering og analysering av meteorologiske og oseanografiske data mellom Statens Vegvesen og Asplan Viak. Hovedarbeidet er utført av Gerard Dam. Ingrid Hjorth og Rune Lunde sto for kvalitetssikring.

Bergen, 21.06.2022

Olav Turøy

Oppdragsleder

Ingrid Hjorth/Rune Lunde

Kvalitetssikrer

Innholdsfortegnelse

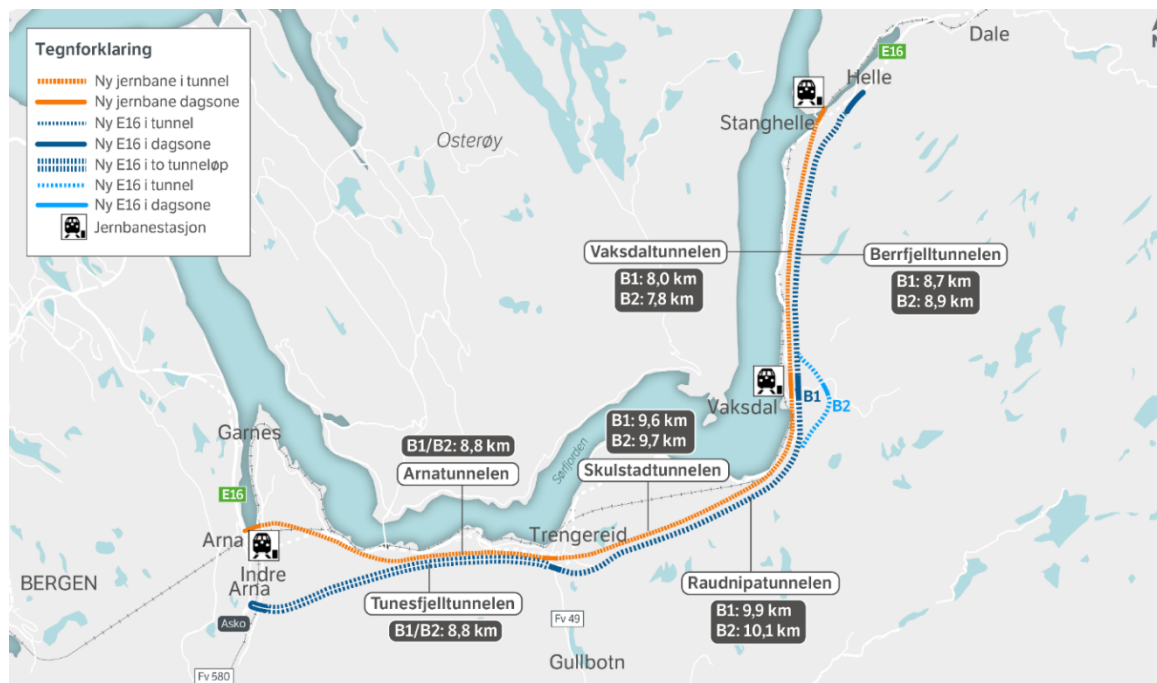
1.	Innledning	5
	1.1. Om prosjektet	5
	1.2. Strømforhold og stratifisering	8
2.	3D modellen	11
	2.1. Innledning	11
	2.2. Beregningsnett og dybde	11
	2.3. Sedimenttransportmodul	16
	2.4. Andre forutsetninger	17
	2.5. Strømningsbilde	17
3.	Kalibrering	20
	3.1. Vertikal oppløsning	20
	3.2. Strømning	20
4.	Scenarier	25
	4.1. Innledning	25
	4.2. Resultater Scenario 1 og Scenario 2	26
	4.3. Resultater Scenario 3 og Scenario 4	36
	4.4. Resultater Scenario 5	41
	4.5. Resultater Scenario 6	42
5.	Usikkerheten i modelleringen	44
	5.1. Stratifisering	44
	5.2. Flokkulering	44
	5.3. Strømning	44
6.	Konklusjon	46

1. Innledning

1.1. Om prosjektet

Statens vegvesen (SVV), Bane NOR og Jernbanedirektoratet jobber med planlegging av ny E16 og jernbane på strekningen Arna - Stanghelle. Et særtrekk ved ny E16 og Vossebanen er at ny vei og tospors jernbane vil gå i flere lange tunneler (Figur 1-1). Dette vil skape store mengder med overskuddsmasser (steinmasser). Omtrent 10 millioner m³ er planlagt deponert i sjø.

Vei- og bane-traséen går langs Veafjorden og Sørfjorden, og det er her det vurderes å deponere overskuddsmasser i sjø. Det er i all hovedsak planlagt deponering direkte i sjø fra lekter gjennom et fallrør. Massene skal deponeres til vanddyb over 100 m. Syv områder i sjø er vurdert for mulig deponering av overskuddsmasser, disse er Fossmark, Gamle Fossen, Linnebakkane, Svabakken, Boge, Langhelleneset og Romslo (Figur 1-2). Det er ikke behov for å benytte alle de syv lokalitetene. I denne rapporten er det utarbeidet simuleringer av deponering på den mest sannsynlige lokaliteten per delstrekning, det vil si Linnebakkene, Langhelleneset og Romslo.

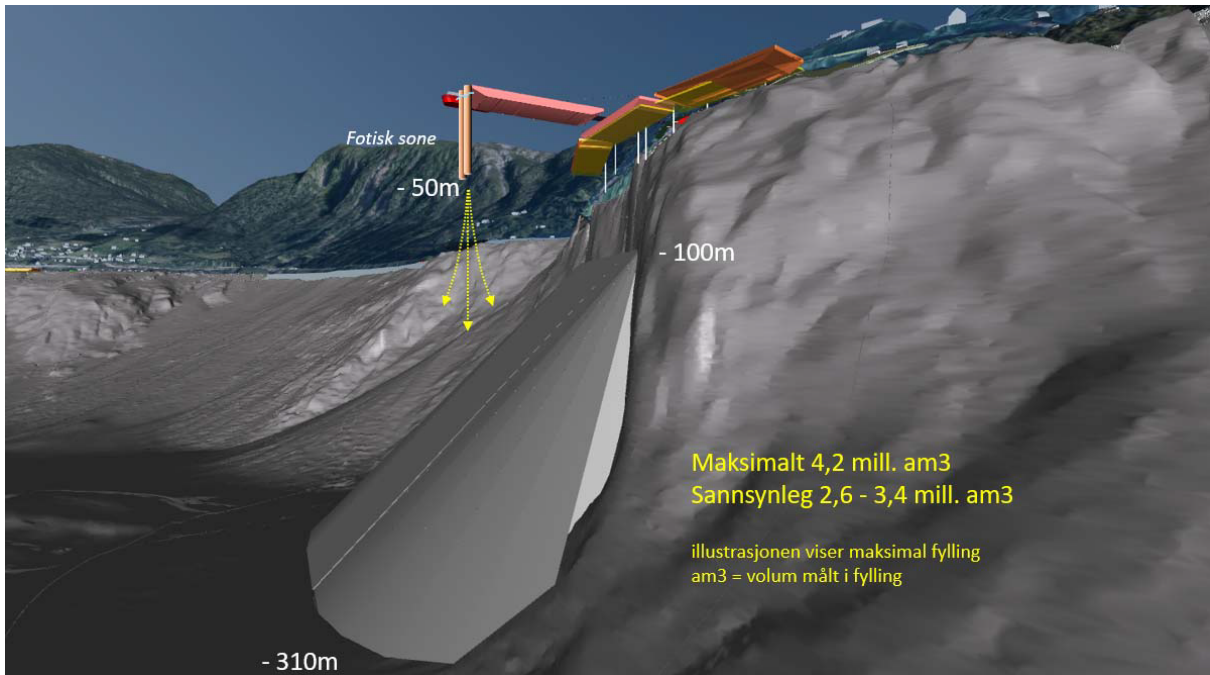


Figur 1-1: Oversikt planlagte tunneler jernbane og E16 mellom Indre Arna og Stanghelle. Kilde: Statens Vegvesen.



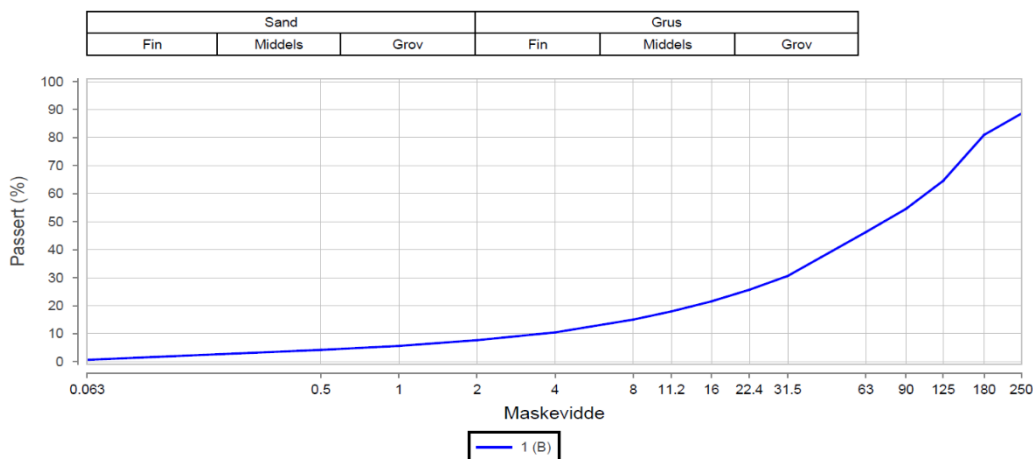
Figur 1-2: Oversikt foreslåtte dumplokasjoner der Romslo, Langshelleneset og Fossmark er brukt i simuleringene. Kilde: Statens Vegvesen.

Det planlegges å benytte et fallrør med forventet vertikal lengde på 50m (Figur 1-3) og horisontal rørdiameter på 2-5m på lokalitetene for deponering. Ved utslipp på 50m dybde, er man et godt stykke under sprangsjiktet i fjorden. Dermed forventes at spredning av finstoff ikke kommer opp til overflaten fordi Veafjorden og Sørfjorden er sterk stratifisert med sprangsjiktet på 5-10m dybde. Dette vektlegges særlig på grunn av mulig påvirkning på eksisterende oppdrettsanlegg i Sørfjorden og laksevandring (Sørfjorden er en nasjonal laksefjord). Om finstoff kommes til overflaten undersøkes nærmere i denne rapporten.



Figur 1-3: Prinsippetskisse dumplokasjoner. Kilde: Statens Vegvesen.

Figur 1-4 viser en kornstørrelsesfordeling av sprengt fjell. Prøven er av fjellarten monzonitt/kvartsittmonsonitt/augegranitt. Når en driver en tunell, vil en gå gjennom mange forskjellige bergarter. Kornstørrelsesfordelingen vil variere fra bergart til bergart, men vi regner denne fordelingen som representativ for bergartene i området. Her vises at 0,7% av massene inneholder partikler med en kornstørrelse mindre enn 0,063mm. Det er særlig disse massene som defineres som finstoff og som potensielt sprer seg med strømmen i fjordene.



Figur 1-4: Eksempel på kornstørrelsesfordeling for sprengt tunnelstein. Fordelingen vil variere avhengig av steinart. Kilde: Statens Vegvesen.

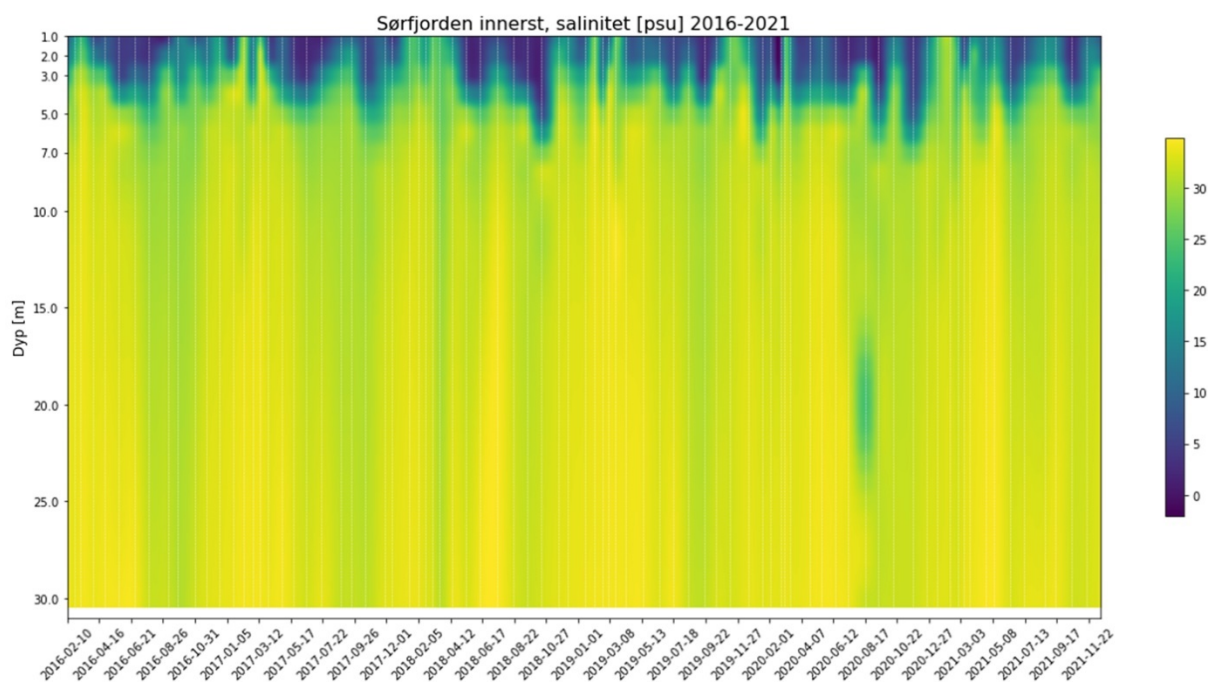
1.2. Strømforhold og stratifisering

Strømforholdet i fjordsystemet styres av tidevannsvariasjoner, tetthetsforskjeller, ferskvannstilførsel fra land og meteorologiske forhold (vind, lufttrykk). Sørfjorden har et gjennomsnittlig tidevann på 123 cm (Kartverket, Sehavnivå.no). Det er et stort vannvolum som skal fylles/tømmes i fjordsystemet under en tidevannssyklus på 12,5 timer, og det medfører tidevannstrømning inn og ut av fjordsystemet. Strømningsmålinger fra 2020 og 2021 i dette fjordsystemet viser at tidevannsstrømning er en av de dominerende prosessene for strømning (se også kapittel 3). Tidevannstrømning pågår alltid, uavhengig av værforhold eller ferskvannsavrenning.

Strømningen som drives av tetthetsforskjeller kan også spille en svært viktig rolle for hydrodynamikken i fjorden (Dam Engineering, 2017). Det er periodevis relativt høy tilførsel av ferskvann til fjordsystemet som medfører mer eller mindre permanent lagdeling i fjorden (Figur 1-5). Tykkelsen på ferskvannslaget varierer avhengig av tilførselen. Figur 1-5 viser at det til tider er et veldig tynt/grunt ferskvannslag. Fjordsystemet rundt Osterøy har en årlig ferskvannsavrenning på gjennomsnittlig 10 km^3 (tilsvarende ca. $317 \text{ m}^3/\text{s}$). Generelt er tilførselen høyest i mai / juni med gjennomsnittlig på $800 \text{ m}^3/\text{s}$ grunnet snøsmeltingen. I tillegg er det vanlig med høy vannføring rundt oktober på omtrent $400 \text{ m}^3/\text{s}$ (Johannessen et al., 2010). Den største elven i fjordsystemet er Vosso, med middelvannføring på rundt $104 \text{ m}^3/\text{s}$. Tykkelsen på ferskvannslaget er generelt størst i nordligste delen av Veafjorden, og blir gradvis lavere sørover. Ferskvannslaget har en medrivende effekt på underliggende vannlag og gir en brakkvannstrøm i overflaten. Dette skaper igjen en kompensasjonsstrøm under brakkvannslaget med tyngre vann i motsatt retning. Prosessen kalles også estuarinsirkulasjonen. I overflatelag kan også variasjoner i vindhastighet og -retning være avgjørende for strømningene.

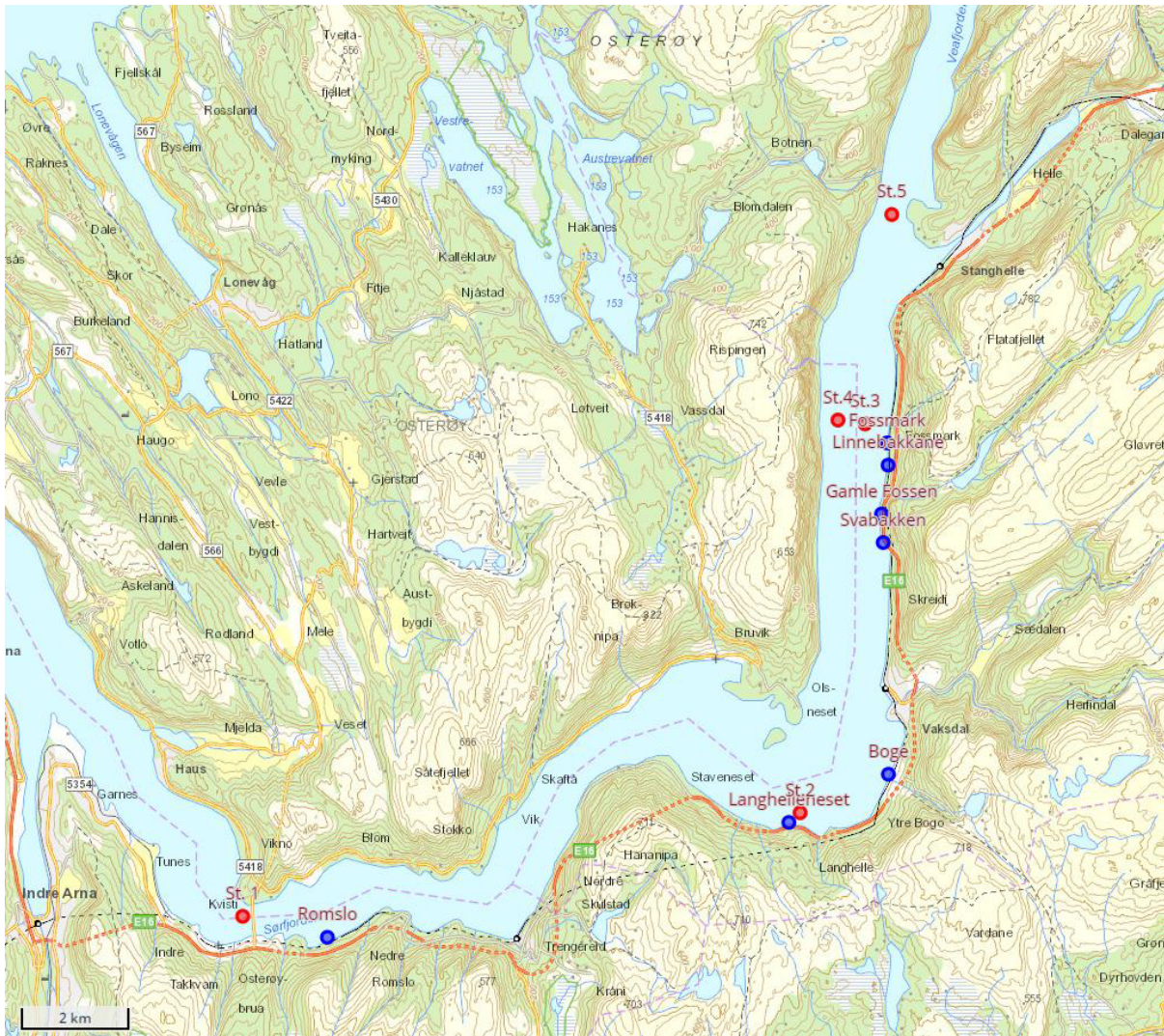
Sørfjorden og Veafjorden er koblet til åpent hav gjennom Kvernafjorden og Salhusfjorden. Tersklene i de utenforliggende sjøområder styrer vannutskifting særlig i dypvannet i fjordsystemet. For fjordsystemet rundt Osterøy er grunneste terskel mot Nordsjøen på 120 meter. Terskelen ligger i Hjeltefjorden, vest for fjordsystemet. Med regelmessige intervall strømmer tyngre vann fra Norskehavet inn og under det relativt saltfattige kystvannet i fjordene. Det er tydelige årstidsvariasjoner i kyststrømmens egenskaper og utbredelse. Den såkalte "kystvannskilen" med lavere saltholdighet er vanligvis bred og grunn om sommeren og smal og dyp om vinteren (Havforskningsinstituttet, 2015). Dette vil si at det atlantiske vannet med høy saltholdighet ligger høyere om sommeren og det er derfor i sommermånedene at vi vanligvis får innstrømning til fjordbasseng med dype terskler som

for eksempel fjordsystemet rundt Osterøya. I øvre lag er vannet tyngst om vinteren grunnet lavere temperaturer og høyere saltholdigheter og innstrømning av kystvann til fjordbasseng med grunne terskler skjer derfor oftest på denne årstiden. (Havforskningsinstituttet, 2015).



Figur 1-5: Salinitet Sørfjorden innerst fra mai 2016-november 2019. Kilde: Statens Vegvesen.

Gjennom et år ble det gjennomført strømningsmålinger på 5 lokasjoner (st.1-st.5), se Figur 1-6. Disse strømningsmålinger blir brukt til å kalibrere 3D modellen.



Figur 1-6: Oversikt strømningsmålinger (rød) og mulige dumplokasjoner (blå). Kilde: Rambøll/SWECO, 2022.

2. 3D modellen

2.1. Innledning

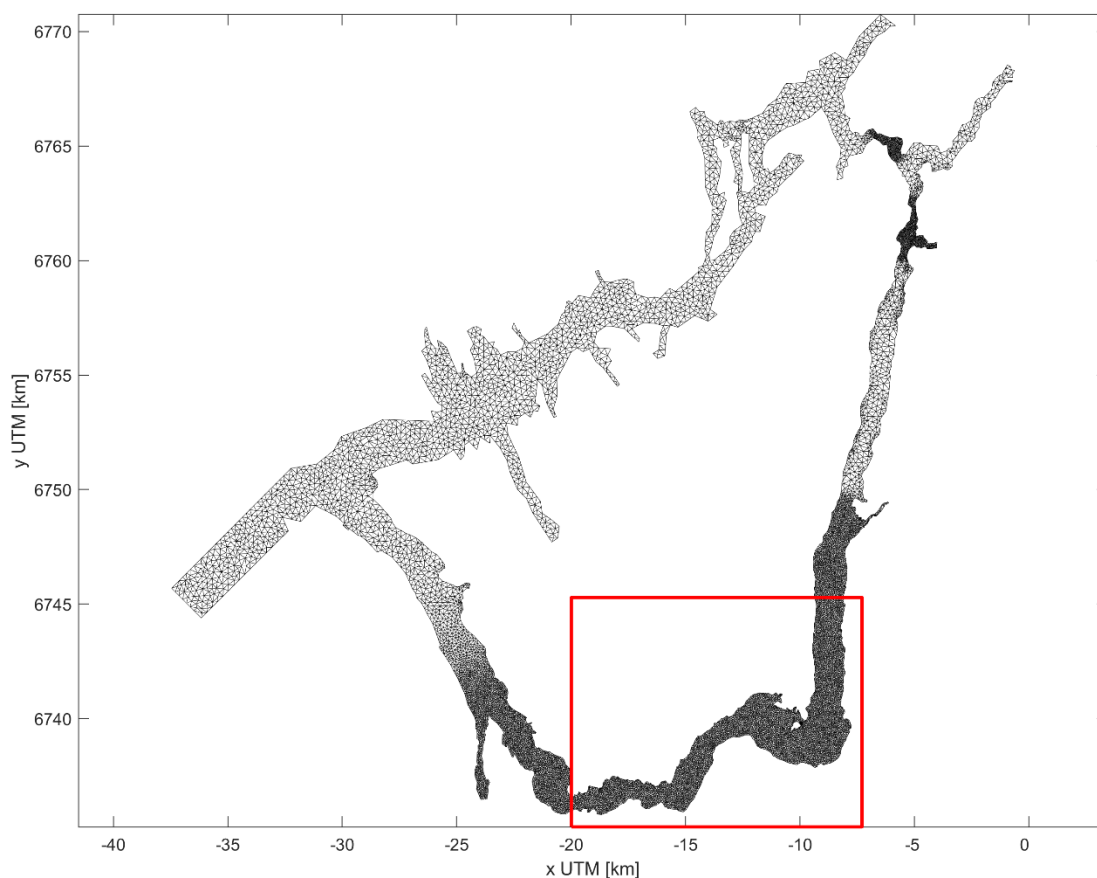
Det er laget en 3D-strømningsmodell av fjordsystemet rundt Osterøy. Modellen er en oppdatering av modellen brukt i Dam Engineering (2017). Modellen beregner strømningsbilde og sedimentkonsentrasjon i 3D. Vannføringsdata fra NVE og tidevannsinformasjon er benyttet.

Modellen som er brukt for 3D-simulering av strømforhold er FINEL3D-modellen. Dette er en 3D ikke-hydrostatisk «finite element»-modell. Modellen er utviklet av det Tekniske Universitetet i Delft og Svašek Hydraulics (Labeur, 2009, Labeur & Wells, 2007, 2009, 2010, Talstra, 2016).

Modellen tar hensyn til tidevannsstrømning, avrenning fra elver, tetthetsstrømning på grunn av blanding av saltvann og ferskvann, korioliskrefter og evt. vindeffekter. Modellen inkluderer en sedimenttransportmodul som er benyttet i dette prosjektet (avsnitt 2.3)

2.2. Beregningsnett og dybde

Modellen omfatter fjordsystemet rundt Osterøy (Figur 2-1), og bruker et trekantnett. Fordelen med trekantnett er at kompliserte geometrier kan inkluderes enkelt i modellen, og at en da kan ha en høyere oppløsning i interesseområdet og optimalisering av datamaskintid.

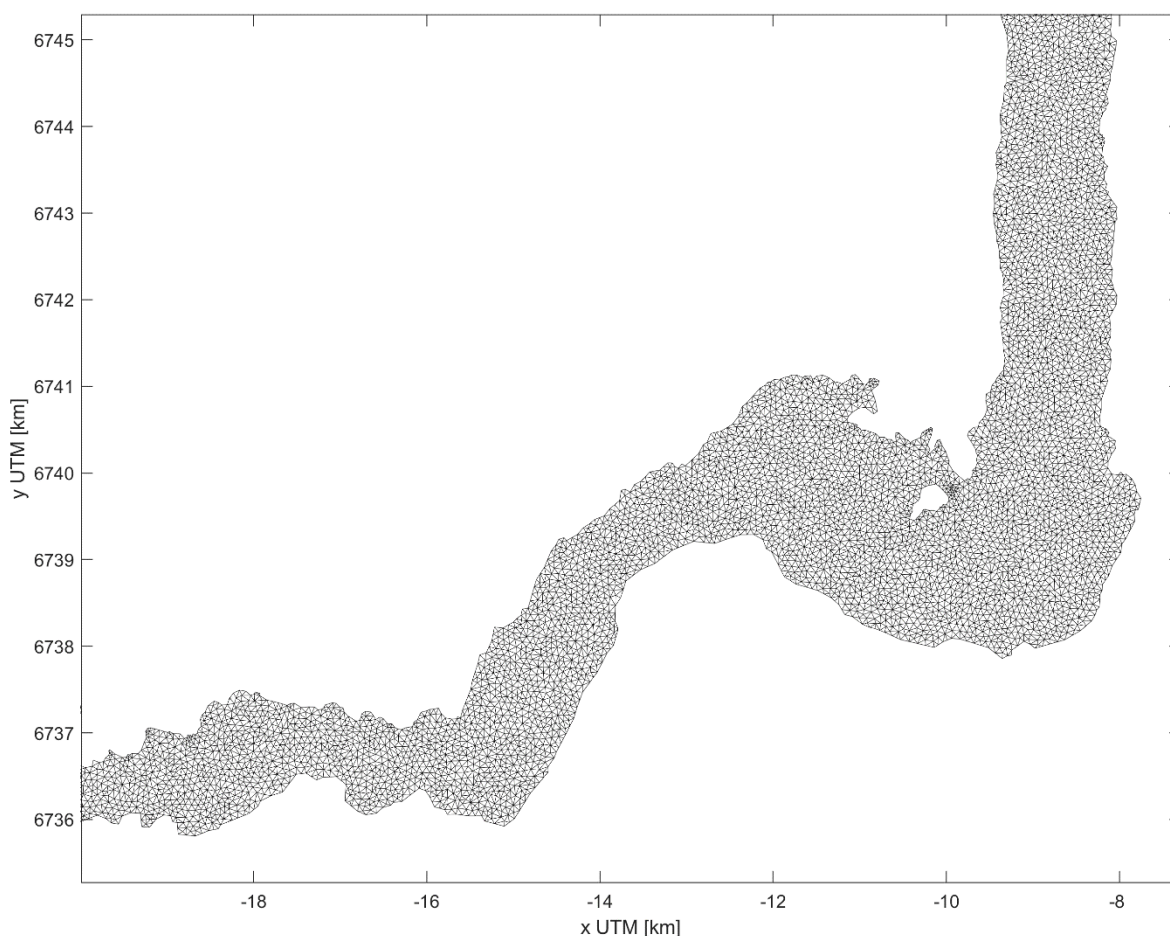


Figur 2-1: Beregningsnett for fjordsystemet rundt Osterøy. Detalj av beregningsnettet i rød firkant er vist i Figur 2-2

Horisontal oppløsning varierer i modellen. Oppløsningen til modellen tilpasses slik at den har høyeste oppløsning rundt de tre utslippspunktene i Sørfjorden og Veafjorden (Figur 2-2). Her er det en horisontal oppløsning på ca. 60 meter. Også rundt utløpet av Vosso har modellen en høy horisontal oppløsning på 45m. Resten av fjordsystemet har en oppløsning på 200m.

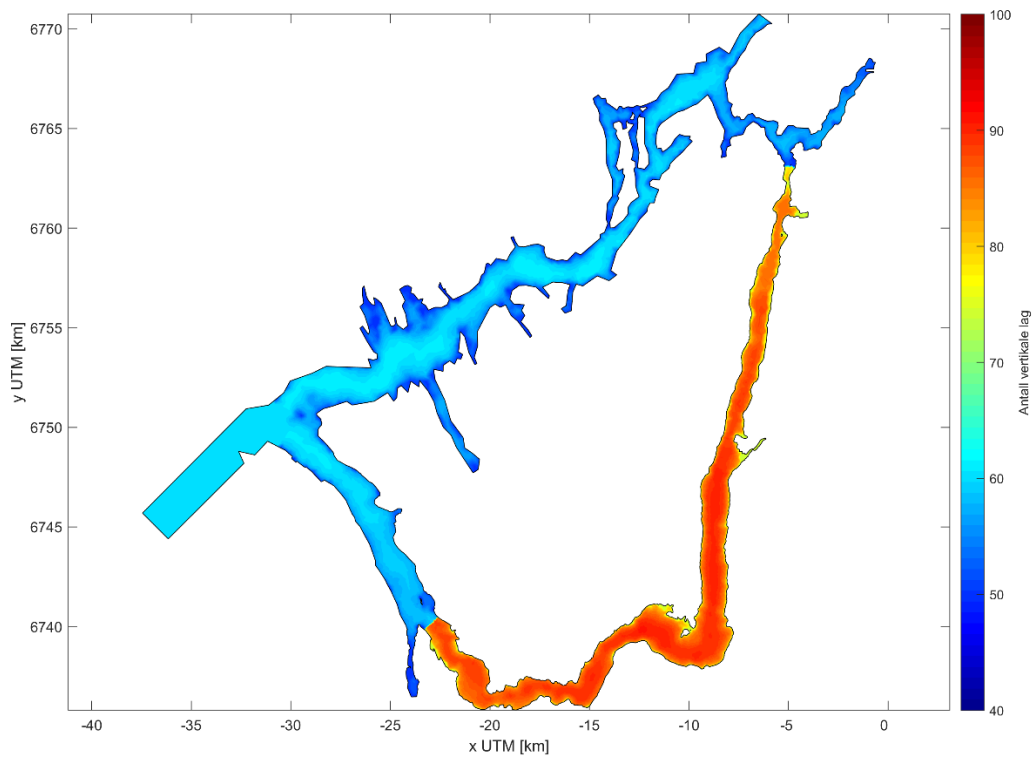
Dybdata ble lastet ned fra kartverket sin nettside med en horisontal oppløsning på 50m og ble interpolert til beregningsnettet. Dybden i modellen vises i Figur 2-5.

Beregningsnettet på ytre vestre grensebetingelse er lagt i horisontale rette vinkler (Figur 2-1), og dybden ble satt konstant på 400m (Figur 2-5). Dette er nødvendig for at modellen skal kjøre stabilt.

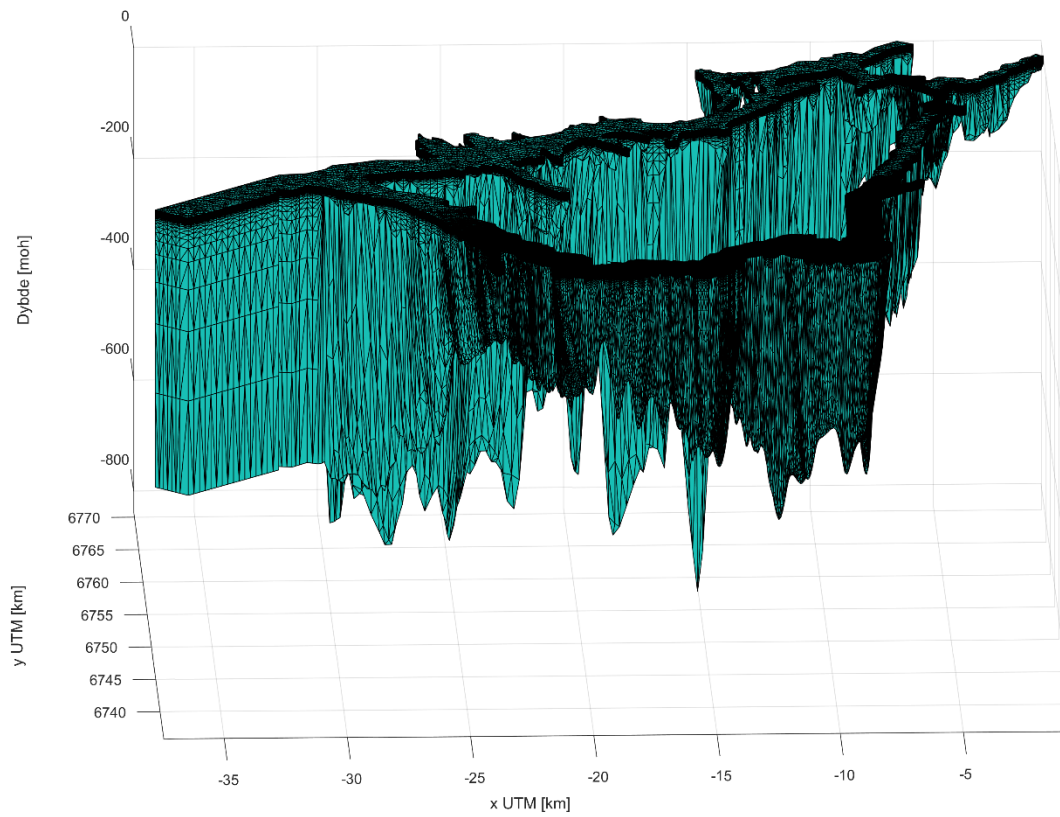


Figur 2-2: Detalj beregningsnett Sør fjorden og Veafjorden

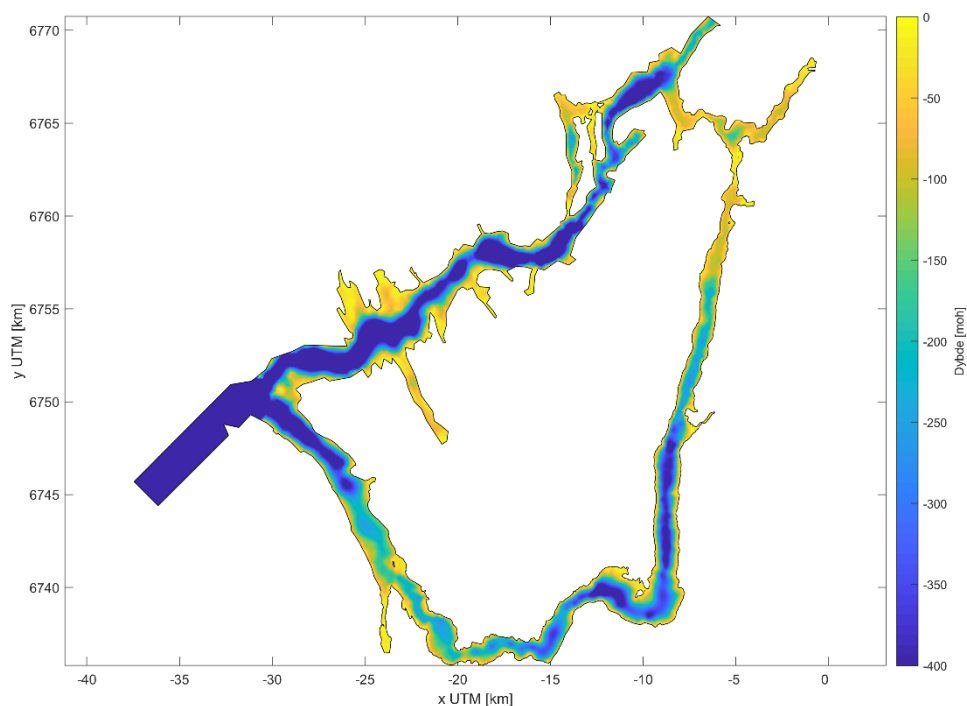
Modellen kjører med ulike vertikale lag, med høyeste oppløsning i overflatelaget, slik at sprangsjiktet kan representeres i modellen. I overflaten er vertikal oppløsning på 0,125m. Det er den samme oppløsningen som ble brukt i Dam Engineering (2017). Antall lag følger også dybden i modellen. I interesseområdet i Veafjorden og Sør fjorden er det ca. 90 vertikale lag. I øvrige deler av fjordsystemet er det ca. 60 vertikale lag (Figur 2-3). Totalt i modellen er det ca. 1,1 million punkter. Tre-dimensjonalt bilde av beregningsnettet vises i Figur 2-4.



Figur 2-3: Antall vertikale lag i modellen



Figur 2-4: Tredimensjonalt beregningsnett som viser at det er høyere vertikal oppløsning i overflatelaget.



Figur 2-5: Dybde i modellen

2.3. Sedimenttransportmodul

Modellen har en sedimenttransportmodul som er laget for silt og leirpartikler. Modulen inkluderer:

- Adveksjon/diffusjon av partikler
- Sedimentasjon av partikler med en definert synkehastighet
- Sedimentering på bunnen (ved lav strømnings hastighet)
- Resuspensjon fra bunnen (ved høy strømnings hastighet)

I dette prosjektet kjører vi modellen med to ulike typer sediment: silt og leire. Disse sedimenttypene har ulik synkehastighet, og dermed reagerer de forskjellig ved samme strømnings-/vannføringsforhold.

Synkehastighet er definert som:

- Silt: 1 mm/s
- Leire: 0,002 mm/s.

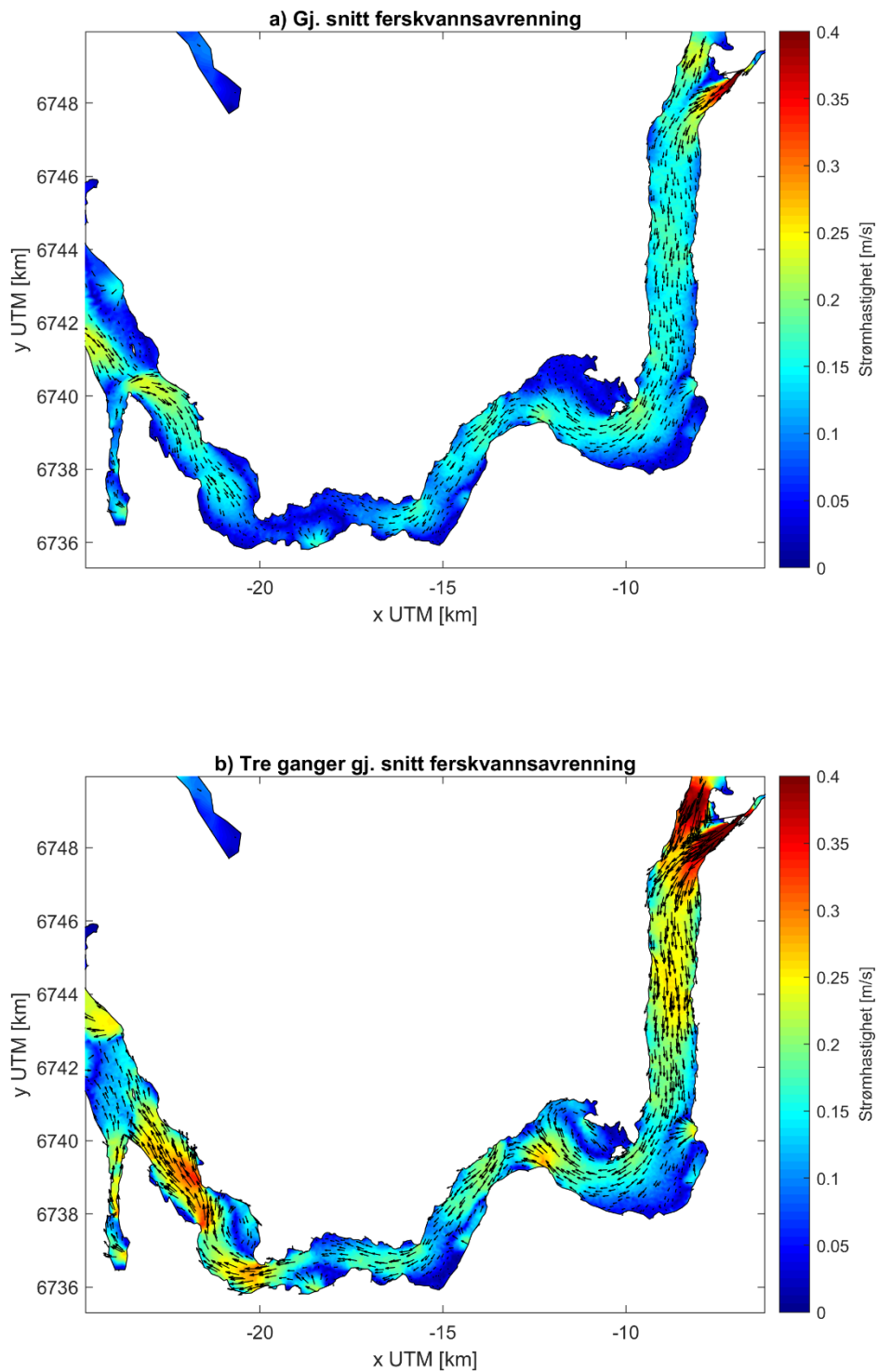
Vi forutsetter ingen flokkulering av leire og siltpartikler i vannet. Det er kjent at leirpartikler i saltvann kan klumpe seg sammen og synke hurtigere enn synkehastighetene som er gitt her (se f.eks. Sutherland m.fl., 2014).

2.4. Andre forutsetninger

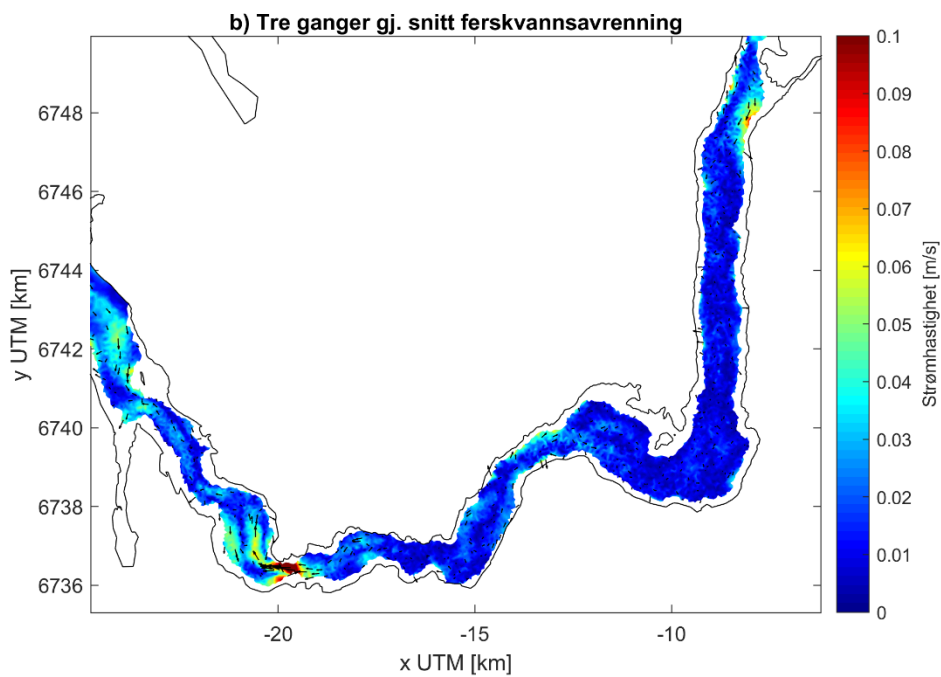
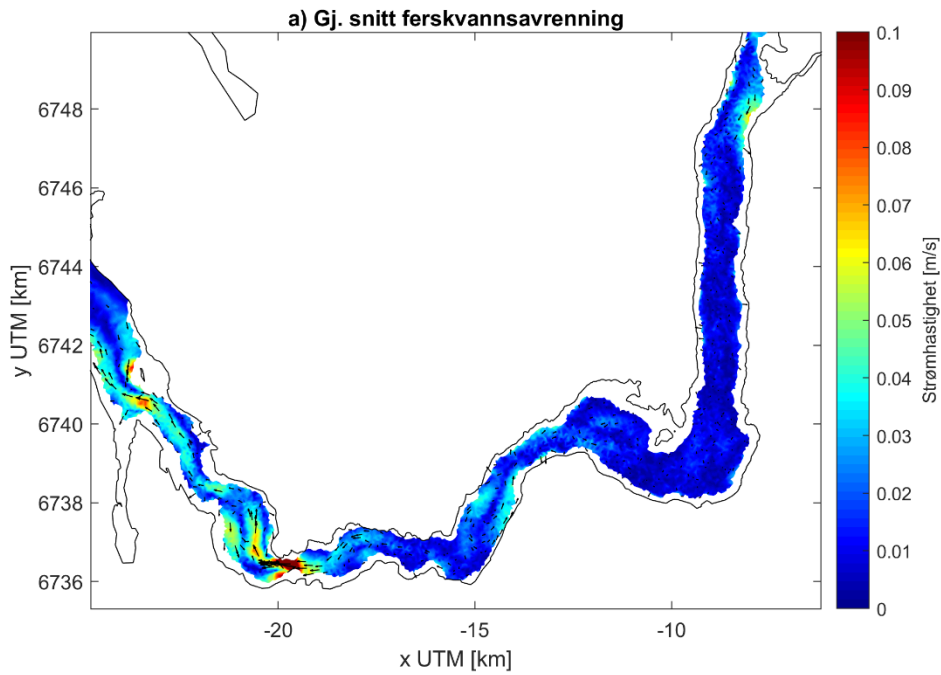
- Modellen blir kjørt med en ferskvannsavrenning fra elvene i fjordsystemet rundt Osterøy som er definert i elvenett fra NVE sin nettside.
- Tidevannsinformasjon er hentet fra den globale TPXO-modellen og påført på ytre grensebetingelser.
- Modellen kan regne med vindkrefter, men det ble ikke brukt i disse simuleringene. Vindeffekten er særlig merkbar i overflatelaget. Siden finstoffet skal slippes ut på 50m dybde er forventningen at dette ikke medfører store endringer i spredningsbildet.
- Modellen bruker en konstant eddy-viskositet modell for horisontal og vertikal diffusjon på $1E-6 \text{ m}^2/\text{s}$.
- Tidssteg i modellen er 30 sekunder.
- Ruhet i modellen er 1 cm.
- Initial saltholdighet er 35ppt. Modellen blir kjørt til brakkvannslaget og stratifisering har stabilisert seg, det viser seg at dette oppstår etter 1-2 ukers simulering.

2.5. Strømningsbilde

- Figur 2-6 viser et strømningsbilde av overflatestrømning for gjennomsnittlig ferskvannsavrenning (Figur 2-6a) og for tre ganger gjennomsnittsavrenning (Figur 2-6b).
- Høyere ferskvannsavrenning forårsaker høyere overflatestrømning. Legg merke til at utslipp fra lokale elver kan sees som hastigheter som går på tvers av fjorden.
- Figur 2-7 viser strømningsbilde for begge scenarier på 100m dybde. Her ser vi at strømhastighet er mye lavere, og det er lite forskjell mellom de to scenariene.



Figur 2-6: Overflatestrømning for et scenario med a) gjennomsnitt ferskvannsavrenning b) tre ganger gjennomsnitt ferskvannsavrenning



Figur 2-7: Strømning på 100m dybde for et scenario med a) gjennomsnitt ferskvannsavrenning b) tre ganger gjennomsnitt ferskvannsavrenning.

3. Kalibrering

3.1. Vertikal oppløsning

En viktig del av kalibreringen består av å reprodusere ferskvannslaget på 5-10m. Det viste seg etter flere kjøringar at vi trenger en høy oppløsning i overflatelaget i modellen. Med en vertikal oppløsning på 0,125m (se forrige kapittel) kunne vi nå saltholdighetsverdier i overflatelaget som er i samme orde størrelse som observert (se saltholdighetsplot i Figur 4-10 og Figur 4-11). I neste kapittel ser vi at dette er avgjørende for spredning av konsentrasjonen til ferskvannslaget.

3.2. Strømning

I dette kapitlet sammenligner vi strømningsmålingene fra fem lokasjoner (Figur 1-6) med modellresultater. Vi har kjørt modellen med en konstant ferskvannstilførsel fra elver på tre ganger gjennomsnittet og sammenlignet med målinger fra juni 2020, da ferskvannstilførsel var også stor. Vi viser til Rambøll/SWECO (2022) for resultater av strømningsmålingene.

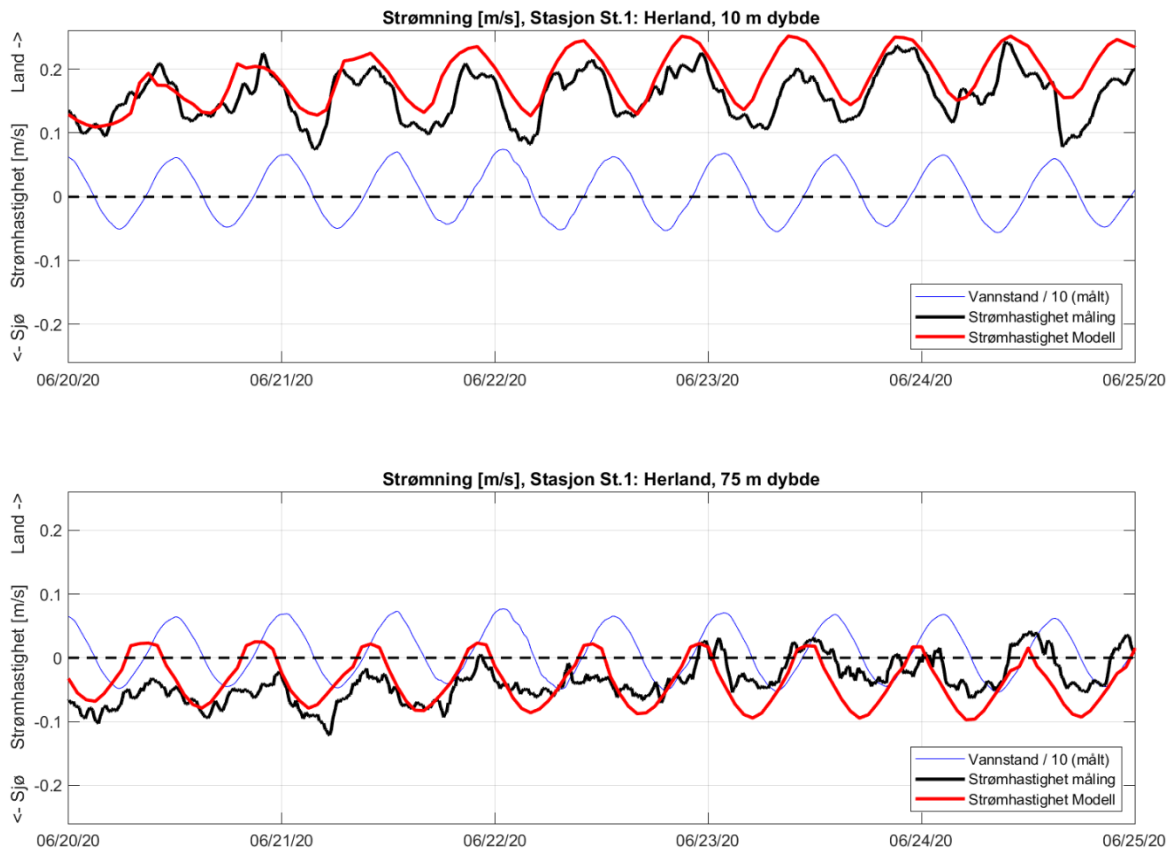
Resultatene av sammenligningen vises i Figur 3-1 til og med Figur 3-5. Figurene viser absolutt strømhastighet på 10 og 75m dybde. Tallene er positive når strømmingen er rettet mot land (østover for stasjon 1 og 2 eller nordover for stasjon 3-5), og negative når strømming er rettet mot sjø.

3.2.1. Stasjon 1 Herland

Stasjon 1 (Herland), ligger i nærheten av Osterøybrua (Figur 1-6). Strømhastigheten er relativt sterk og ligger mellom 10 og 25 cm/s i østlige retning mot land (Figur 3-1). Modellerte strømningshastigheter ligger i samme orde størrelse som målingene.

Den østlige strømmingen mot land kan forklares med at dette er kompensasjonsstrømming under ferskvannslaget i overflaten, som trolig har retning mot sjø. Videre ser vi et tydelig sinusformet tidevannssignal (2 ganger daglig) i både strømningsmålinger og modellresultater. Amplituden til tidevannssignalet på 10m dybde er omtrent 5-8 cm/s og er omtrent lik for både målingen og modellen (en høy amplitude betyr at variasjon i strømhastighet er stor).

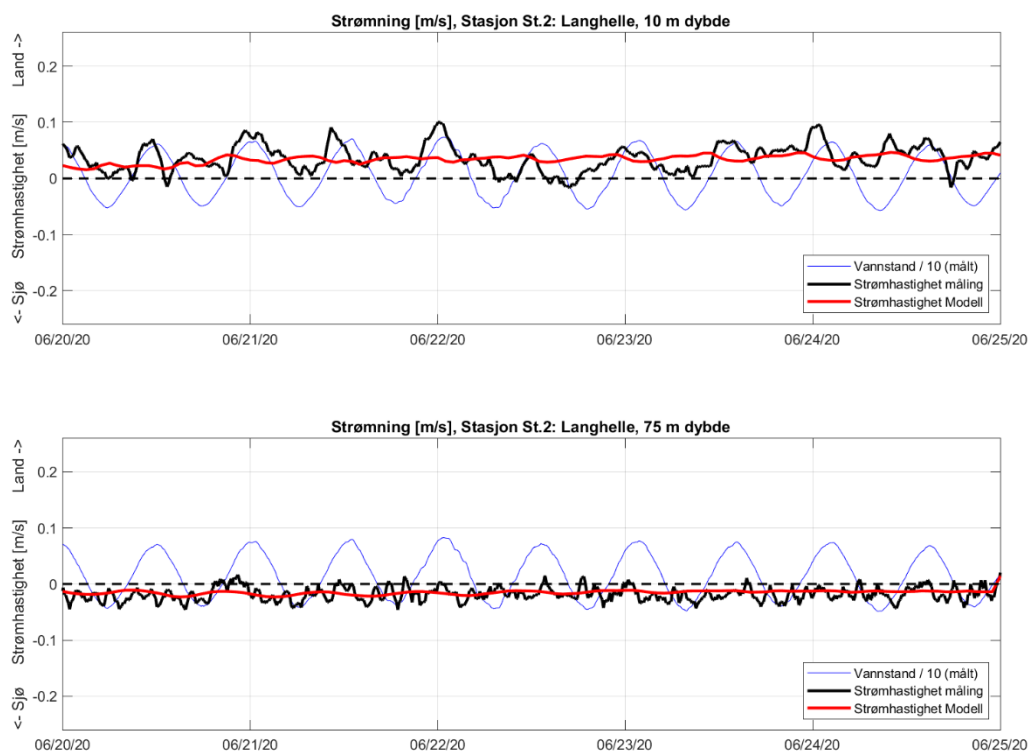
På 75m dybde (nederste figur i Figur 3-1) ser vi at strømmingen stort sett er rettet mot sjø både i modellen og målingene. Absolutt strømningshastighet er på -10 cm/s til +3 cm/s. Vi ser fremdeles et sinusformet tidevannsignal, med litt mindre amplitude enn på -10m dybde.



Figur 3-1: Strømhastighet måling og modell, St.1, Herland for 10 og 75m, juni 2020.

3.2.2. Stasjon 2 Langhelle

Stasjon 2 ligger ved Langhelle i svingen mellom Sørfjorden og Veafjorden. På 10m dybde ser vi at strømmingen i både målinger og modell og er rettet mot land (øst) og har en gjennomsnittlig hastighet på omtrent 3-4 cm/s (Figur 3-2). Den sinusformete tidevannstrømning i målingene er generelt større enn modellen. På 75m dybde ser vi ingen sinusformet (tidevanns)strømning i både modellen og målingene. Strømning er rettet mot sjø og har en gjennomsnittlig hastighet på 1-2 cm/s.



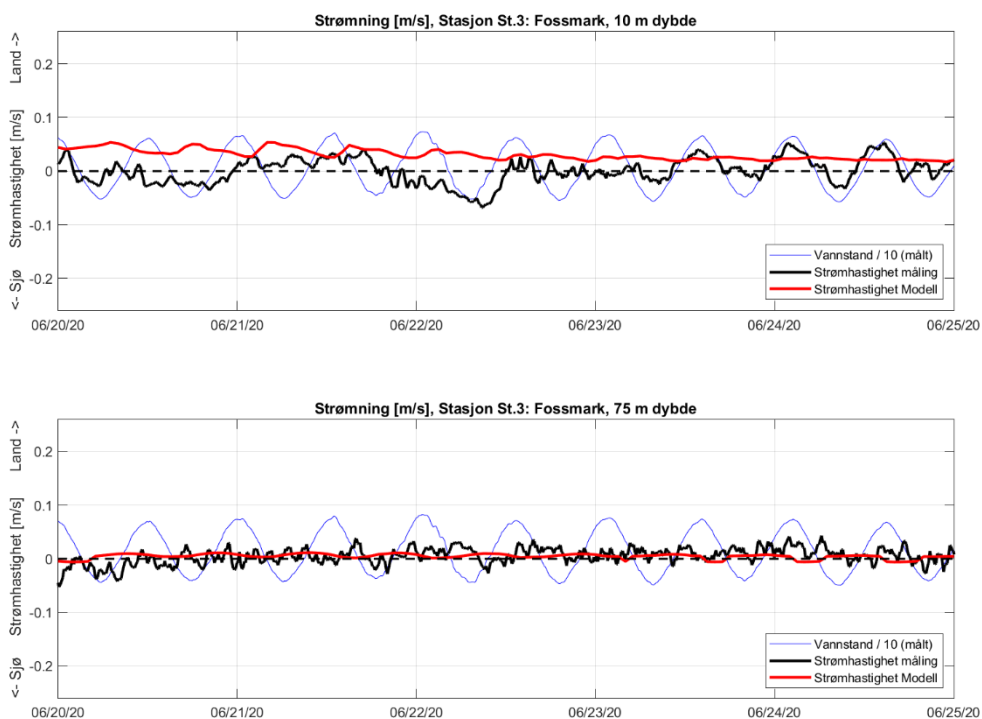
Figur 3-2: Strømhastighet måling og modell, St.2, Langhelle for 10 og 75m, juni 2020.

3.2.3. Stasjon 3 Slåtteskallen

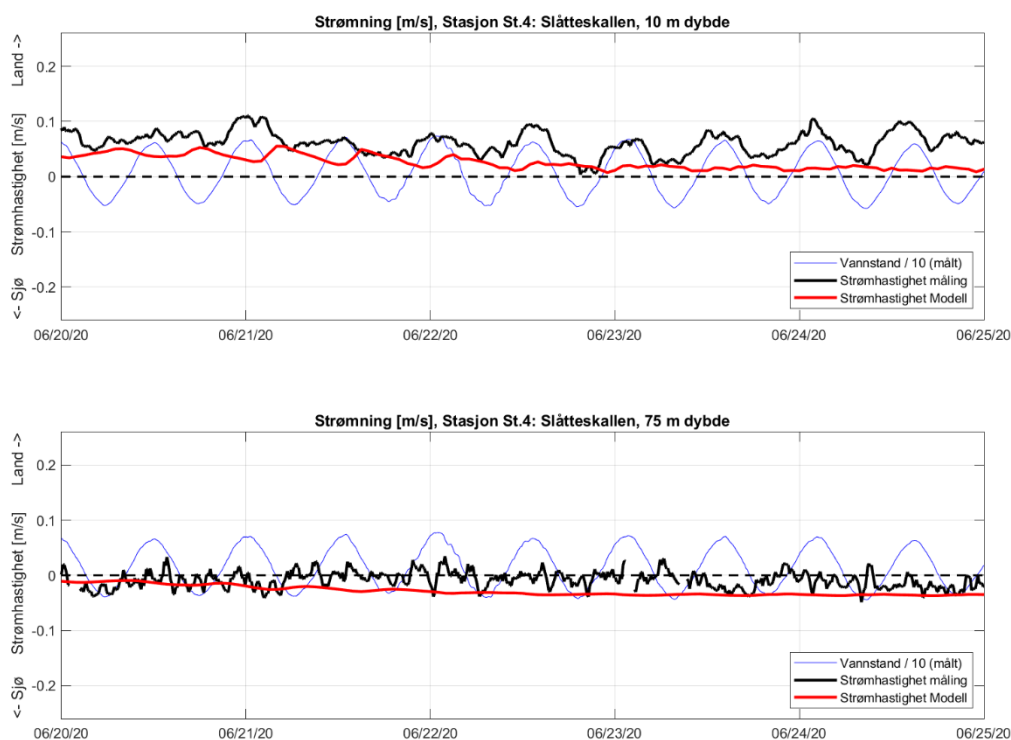
Stasjon 3 (Fossmark) ligger i Veafjorden (Figur 1-6). Strømningen på 10 meters dybde er rettet mot land og har en strømningshastighet på noen cm/s (Figur 3-3). Vi ser et tidevannssignal som er litt større i målingene enn modellen. På 75m dybde ser vi nesten ingen strømning i både målingene og modellen.

3.2.4. Stasjon 4 (Fossmark) og Stasjon 5 (Tettenes)

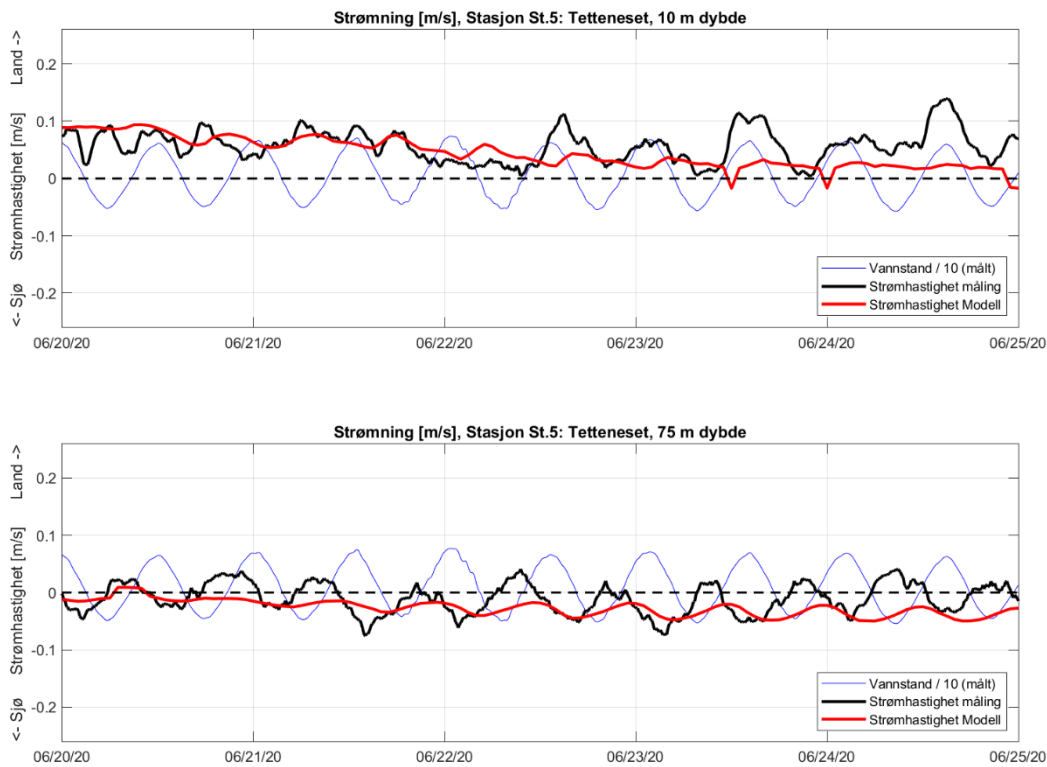
På stasjon 4 og 5, som ligger også i Veafjorden (Figur 1-6), ser vi samme trenden som ved stasjon 1 og 2 (Figur 3-4 og Figur 3-5). På 10m dybde ser vi generelt strømning som er rettet mot land (nordover) og på 75m dybde ser vi strømning som er rettet mot sjø. Strømhastigheten er generelt mindre enn 10 cm/s og ofte mindre enn 5 cm/s.



Figur 3-3: Strømhastighet måling og modell, St.3, Fossmark for 10, og 75m, juni 2020.



Figur 3-4: Strømhastighet måling og modell, St.4, Slåtteskallen for 10, og 75m, juni 2020.



Figur 3-5: Strømhastighet måling og modell, St. 5, Tetteneet for 10, og 75m, juni 2020.

Det er altså greit samsvar mellom modellerte og målte strømningsforhold under stor ferskvannsavrenning. Strømhastighet er i samme størrelsesorden og er rettet mot land på 10m dybde og mot sjø på 75m dybde for både målingene og modellen.

Tidevannssignalet er mest tydelig på stasjon 1 og er simulert korrekt.

Rambøll/SWECO (2022) viser strømrøser over forskjellige perioder fra flere måneder. Under disse forholdene ser vi mer skiftende retninger mot land og sjø enn denne perioden i juni 2022. Dette er mest sannsynlig på grunn av tidevannet som da blir dominerende over ferskvannsavrenning og den estuarine sirkulasjonsstrømningen. I juni 2022 ser vi særlig at den dominerende strømningsretningen er påvirket av mye ferskvannsavrenning. Dette er nærmere diskutert under usikkerheter i kap. 5.3.

4. Scenarier

4.1. Innledning

Vi kjører seks scenarier med forskjellige innstillinger. Tabell 4-1 gir en oversikt over innstillinger i modellen for de forskjellige scenariene. Forskjellene mellom de ulike scenariene er ferskvannsavrønning, dybden på utslippet, dropp vs. kontinuerlig utslipp og bunnforhold i dag versus fremtidig situasjon med utfyllingene på plass.

Alle scenarier kjøres med utslipp av silt og leire. Utslippsmengde er satt til 10 kg/s kontinuerlig utslipp eller tilsvarende utslippsmengde for dropp utslipp over lang tid. Dette gjelder for alle utslippspunktene og for både silt og leire. På denne måte kan man sammenligne de ulike utslippspunktene og silt versus leire. Utslippsmengden er valgt tilfeldig og resultatene kan skaleres med riktig utslippsmengde på et senere tidspunkt.

Tabell 4-1: Oversikt over modellerte scenarier

Scenario	Bunnforhold	Ferskvannsavrønning	Tidevann	Utslipp Romslo	Utslipp Langhelle neset	Utslipp Linnebakkene
Sc. 1	Som i dag	Gjennomsnitt	Ja	50m dybde, kontinuerlig	50m dybde, kontinuerlig	50m dybde, kontinuerlig
Sc. 2	Som i dag	3x gjennomsnitt	Ja	50m dybde, kontinuerlig	50m dybde, kontinuerlig	50m dybde, kontinuerlig
Sc. 3	Som i dag	Gjennomsnitt	Ja	-	-	2m dybde, kontinuerlig
Sc. 4	Som i dag	Gjennomsnitt	Ja	-	-	10m dybde, kontinuerlig
Sc. 5	Som i dag	Gjennomsnitt	Ja	50m dybde, dropp-utslipp	50m dybde, dropputslipp	50m dybde, dropp-utslipp
Sc. 6	Fremtidig (med 10 million m ³ utfylling)	Gjennomsnitt	Ja	50m dybde, kontinuerlig	50m dybde, kontinuerlig	50m dybde, kontinuerlig

4.2. Resultater Scenario 1 og Scenario 2

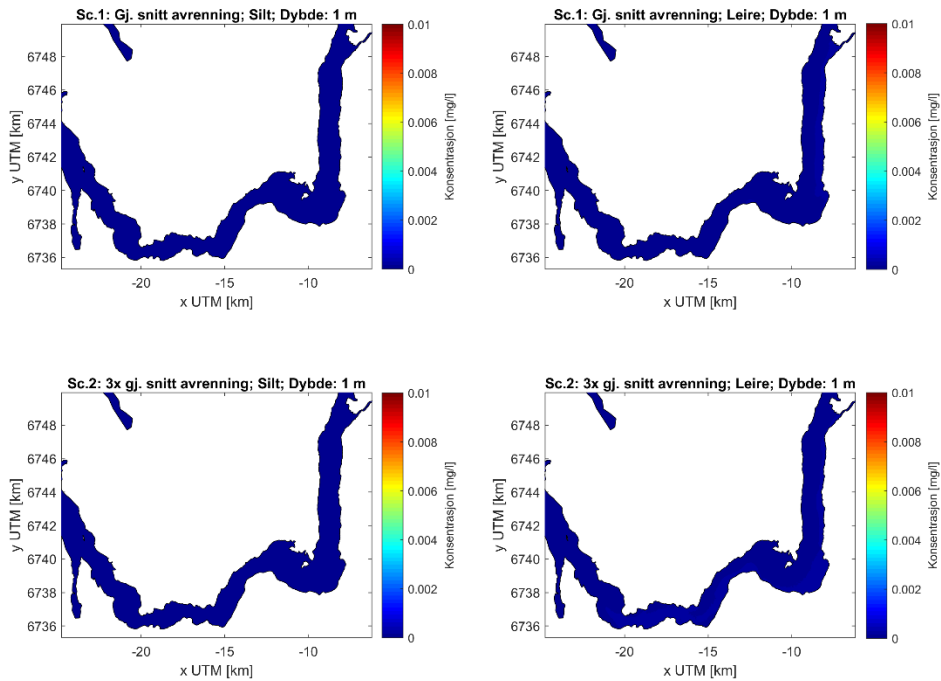
Scenario 1 er et basisscenario med gjennomsnittlig ferskvannsavrenning og kontinuerlig utslipp på 50m i Romslo, Langhelleneset og Linnebakkene. Scenario 2 er likt scenario 1, men med tre ganger gjennomsnittlig ferskvannsavrenning.

4.2.1. Konsentrasjoner på utvalgte dyp

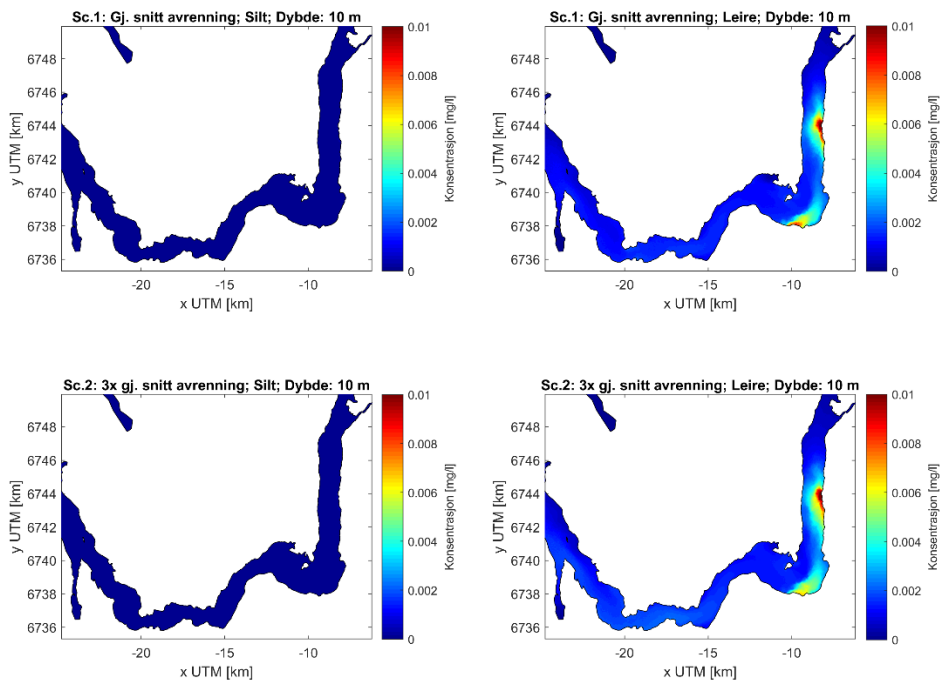
Resultatene for konsentrasjon etter 8,3 dager med kontinuerlig utslipp (da ferskvannlaget ble innstilt), vises på 1m dybde (Figur 4-1), 10m dybde (Figur 4-2), 25m dybde (Figur 4-3), 50m dybde (Figur 4-4), 100m dybde (Figur 4-5) og 200m dybde (Figur 4-6). Lagtykkelse av sedimentet som har nådd bunnen vises i Figur 4-7. Vedlegg 1 viser de samme resultatene som i Figur 4-1 til og med Figur 4-7, men med en annen fargeskala.

Resultatene viser at sedimentene ikke når overflatelaget i noen av scenarioene. Haloklinen er en barriere for sedimentene til å komme opp i overflatelaget. Siden den vertikale saltholdighetsprofilen under haloklinen er ganske lik under ulike forhold, kan sedimentet spre seg vertikalt under denne haloklinen. Dette gjelder særlig leirepartikler som har størst spredningsevne. Siltpartikler synker til bunns, mens leirepartikler stort sett blir i suspensjon under haloklinen.

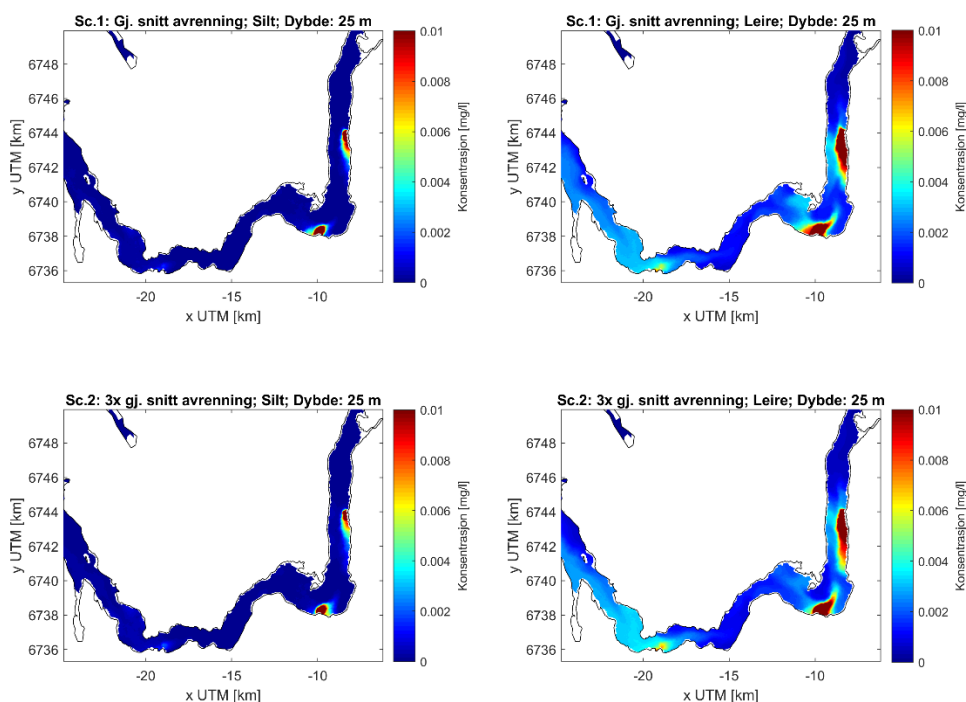
Det er liten forskjell mellom Scenario 1 og Scenario 2. Det ser ut til at høyere ferskvannsavrenning ikke påvirker spredningsevnen under haloklinen i særlig grad.



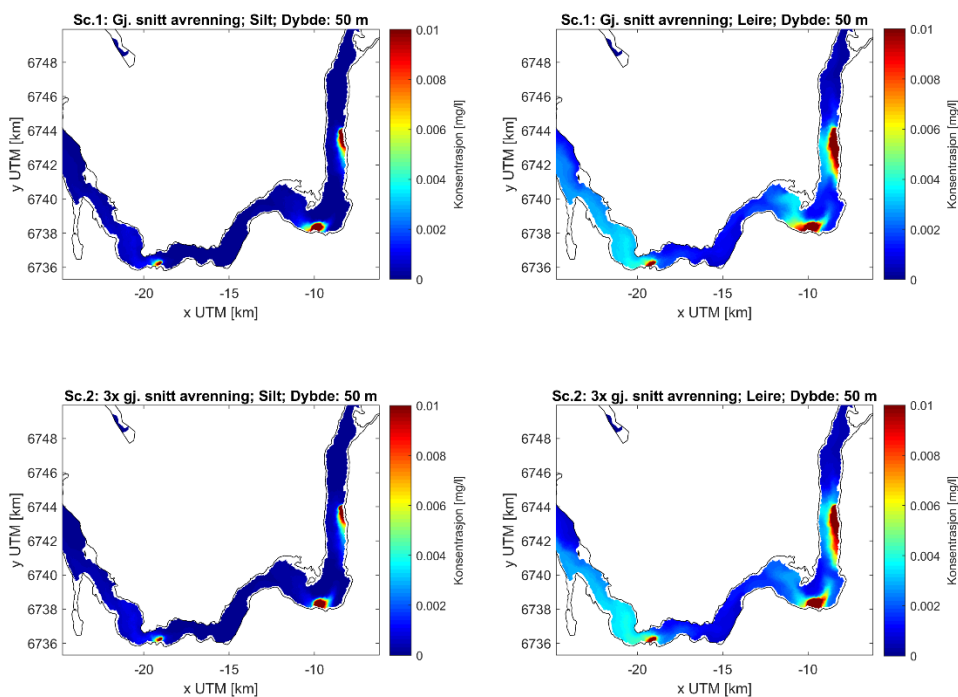
Figur 4-1: Sedimentkonsentrasjon på 1m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire, etter 8,3 dager.



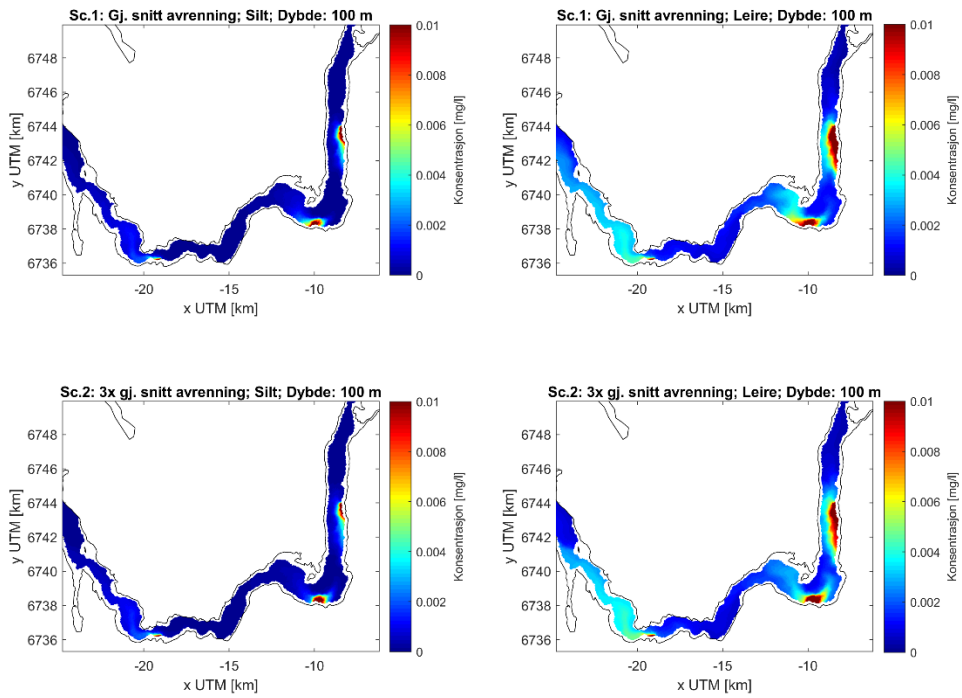
Figur 4-2: Sedimentkonsentrasjon på 10m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dag.



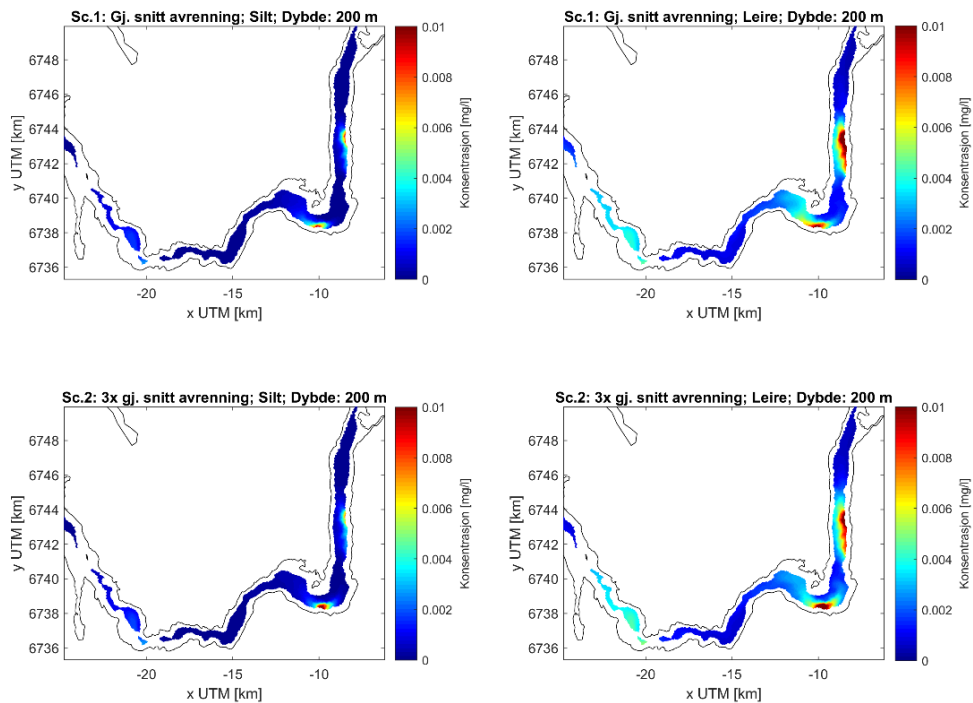
Figur 4-3: Sedimentkonsentrasjon på 25m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dag.



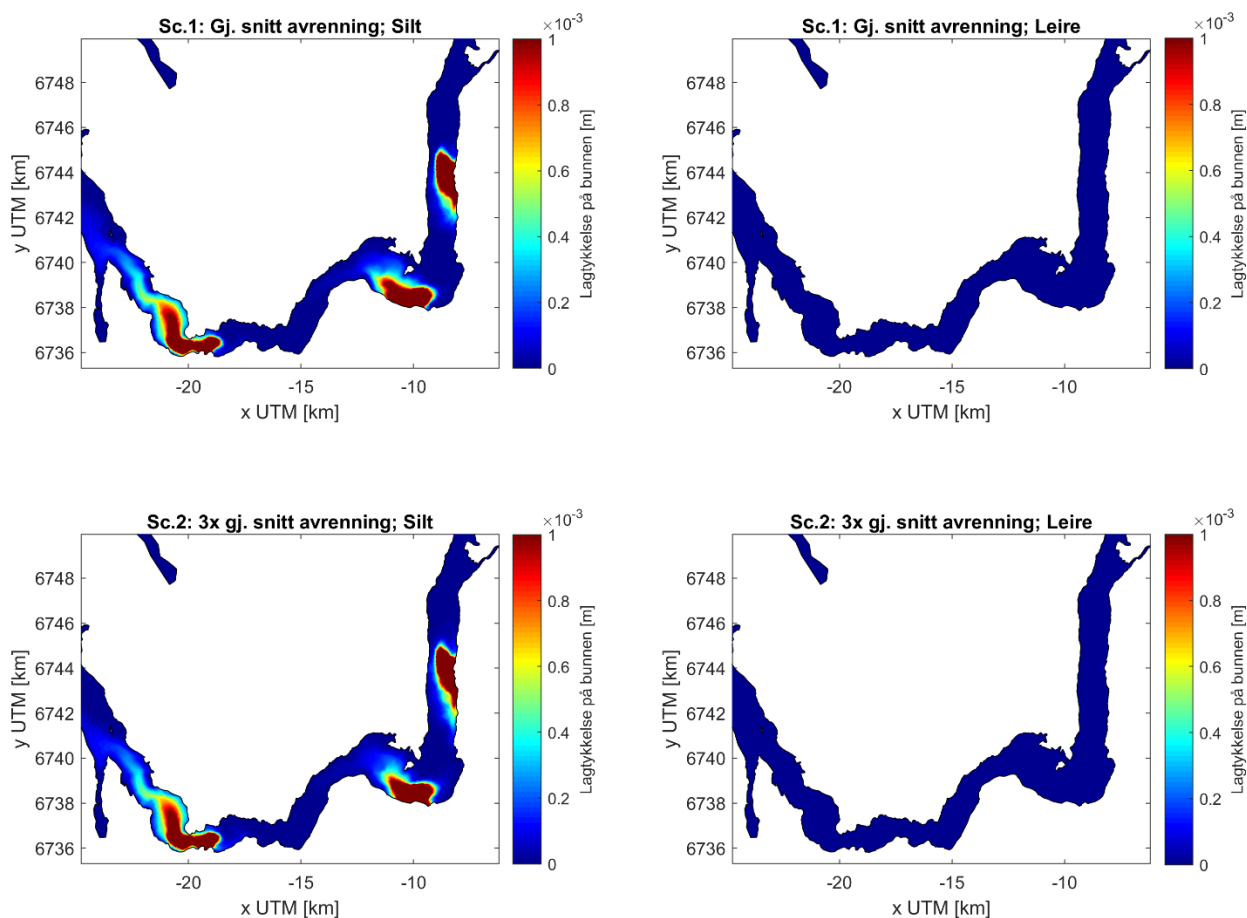
Figur 4-4: Sedimentkonsentrasjon på 50m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.



Figur 4-5: Sedimentkonsentrasjon på 100m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.



Figur 4-6: Sedimentkonsentrasjon på 200m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.

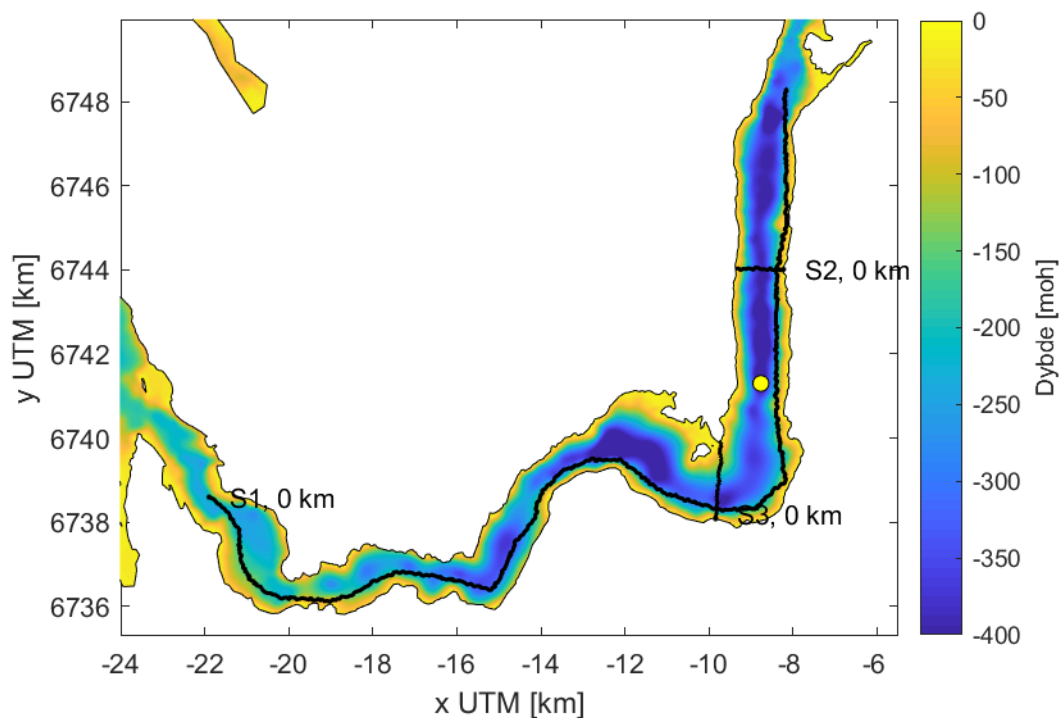


Figur 4-7: Lagtykkelse på bunnen; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.

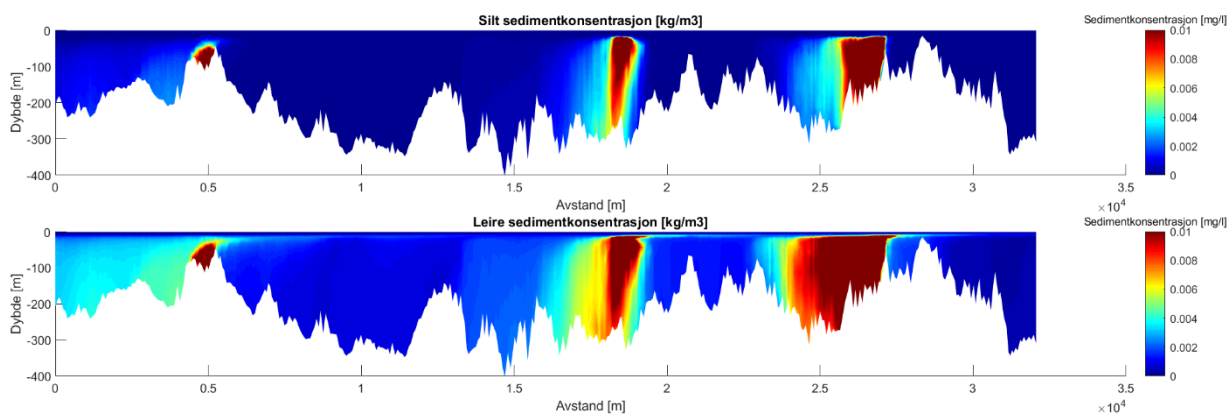
4.2.2. Konsentrasjoner i lengde- og tverrsnitt av fjorden

Vi definerer et snitt S1 i lengderetningen av fjordsystemet fra Indre Arna til Stanghelle (Figur 4-8) og presenterer konsentrasjon av silt/leire for Scenario 1 etter 8,3 dager (Figur 4-9). Vi ser tydelig de tre utslippspunktene. Silt synker til bunnen i et område noen kilometer rundt utslippspunktet, imens leire kan spre seg mye lengre, siden det har lengre suspensjonstid.

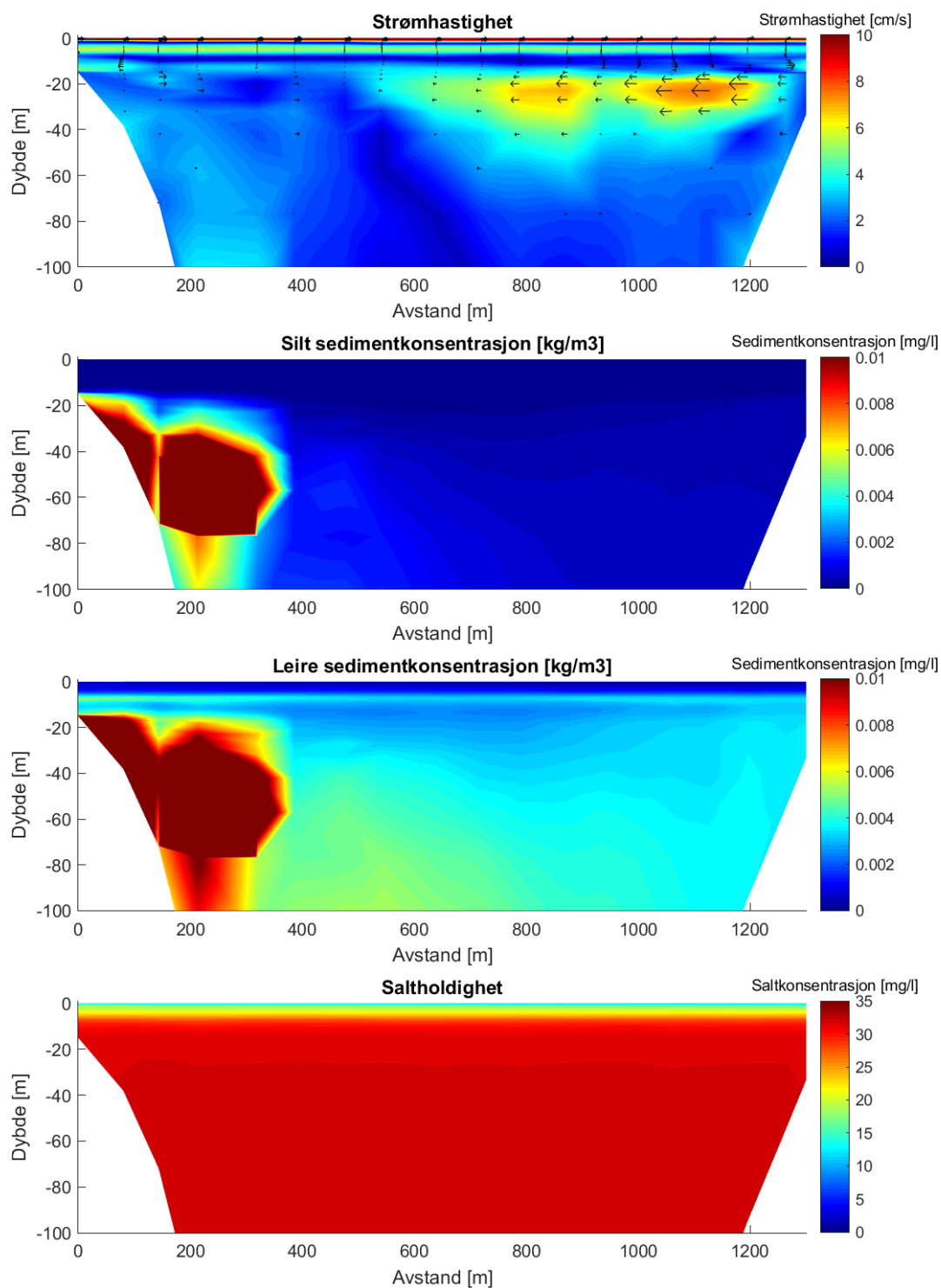
Figur 4-10 viser et tverrsnitt ved Linnebakkene. Figur 4-11 viser et tverrsnitt ved Langhelleneset. Her ser vi at sedimentet delvis spres nordover, se også Figur 4-4. Årsaken kan være en sirkulær strømning i denne delen av fjorden forårsaket av at fjorden svinger i dette området.



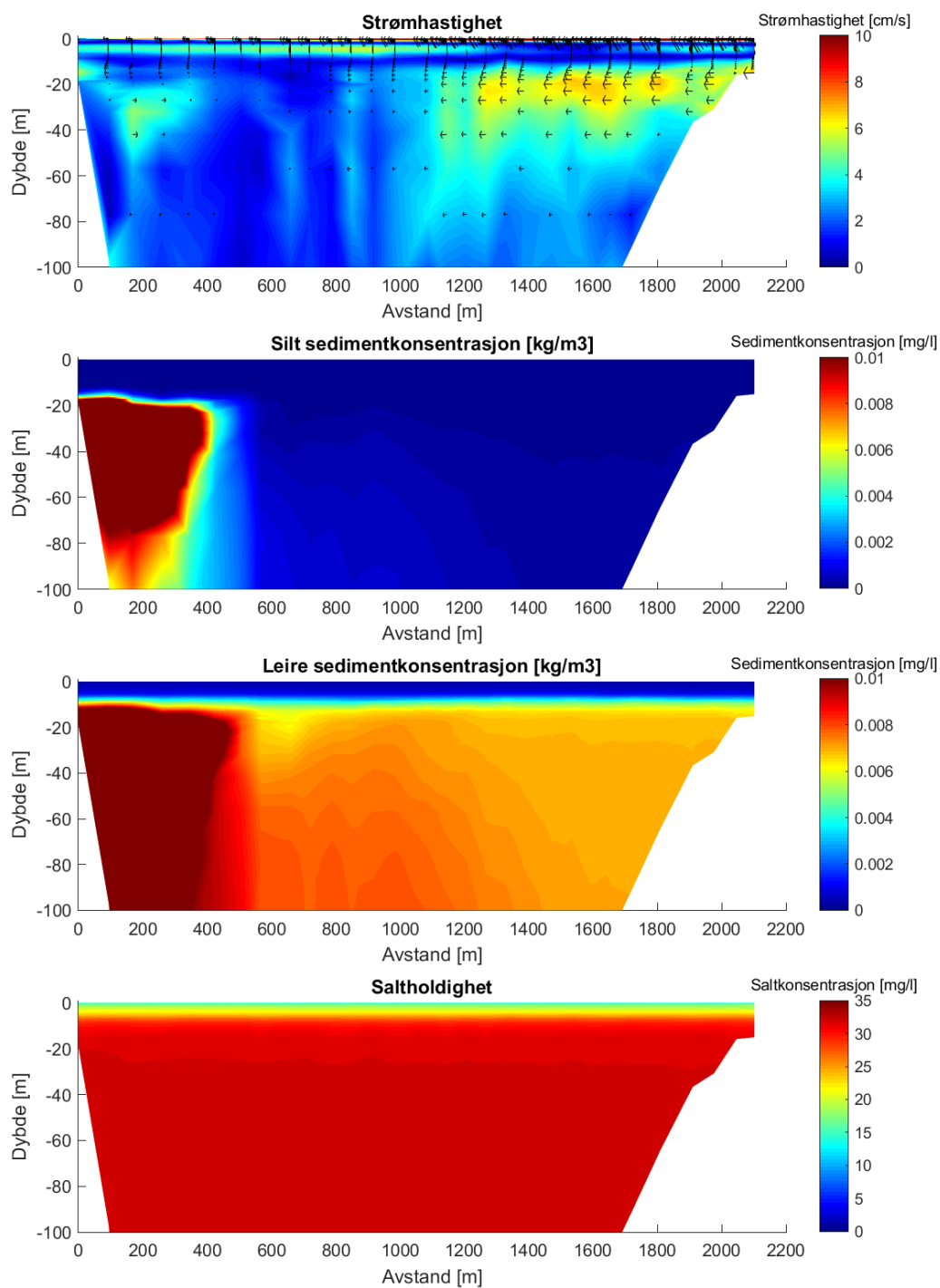
Figur 4-8: Definisjon av snitt S1, S2, og S3 (svart linje) og lokasjon for konsentrasjonsutvikling over tid (gult punkt).



Figur 4-9: Snitt S1 fra Indre Arna til Stanghelle; Scenario 1; Konsentrasjon silt og leire etter 8,3 dager. Se Figur 4-8 for lokasjon av snittet.



Figur 4-10: Snitt S2 rundt Linnebakkene, fra øst (0m) til vest; Scenario 1; Konsentrasjon silt og leire etter 8,3 dag. Se Figur 4-8 for lokasjon av snittet.

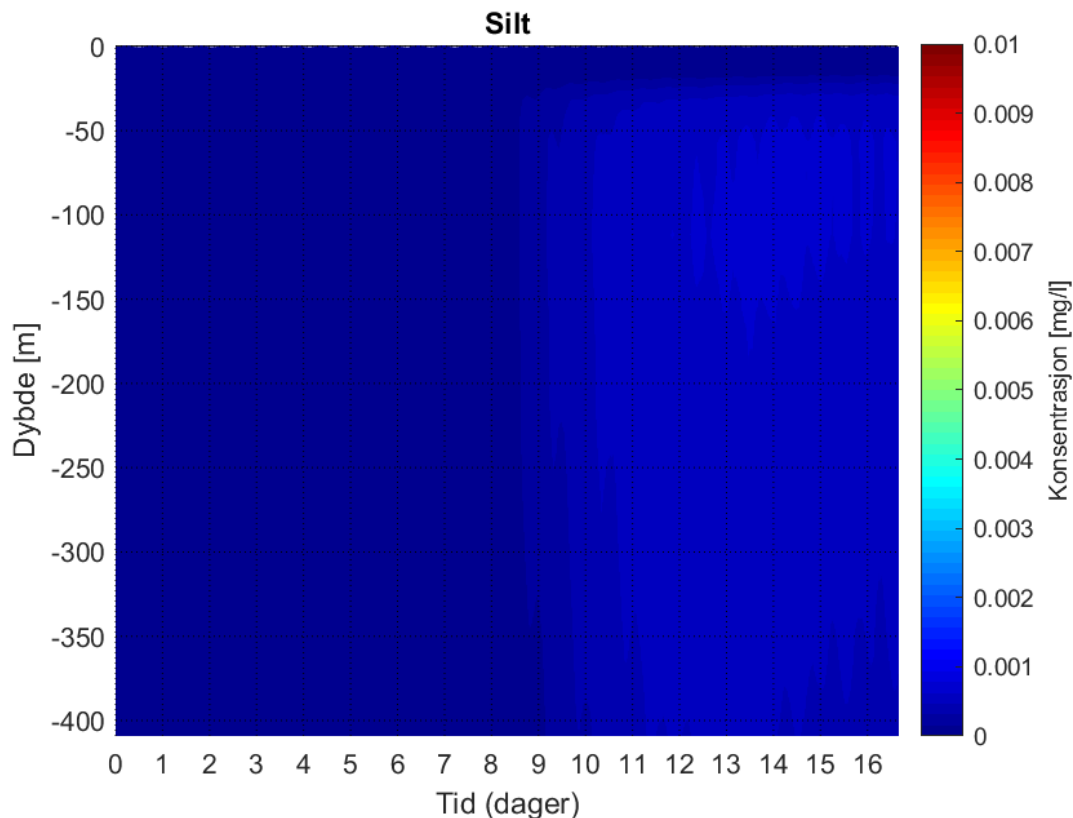


Figur 4-11: Snitt S3 rundt Langhelle, fra sør (0m) til nord; Scenario 1; Konsentrasjon silt og leire etter 8,3 dag. Se Figur 4-8 for lokasjon av snittet.

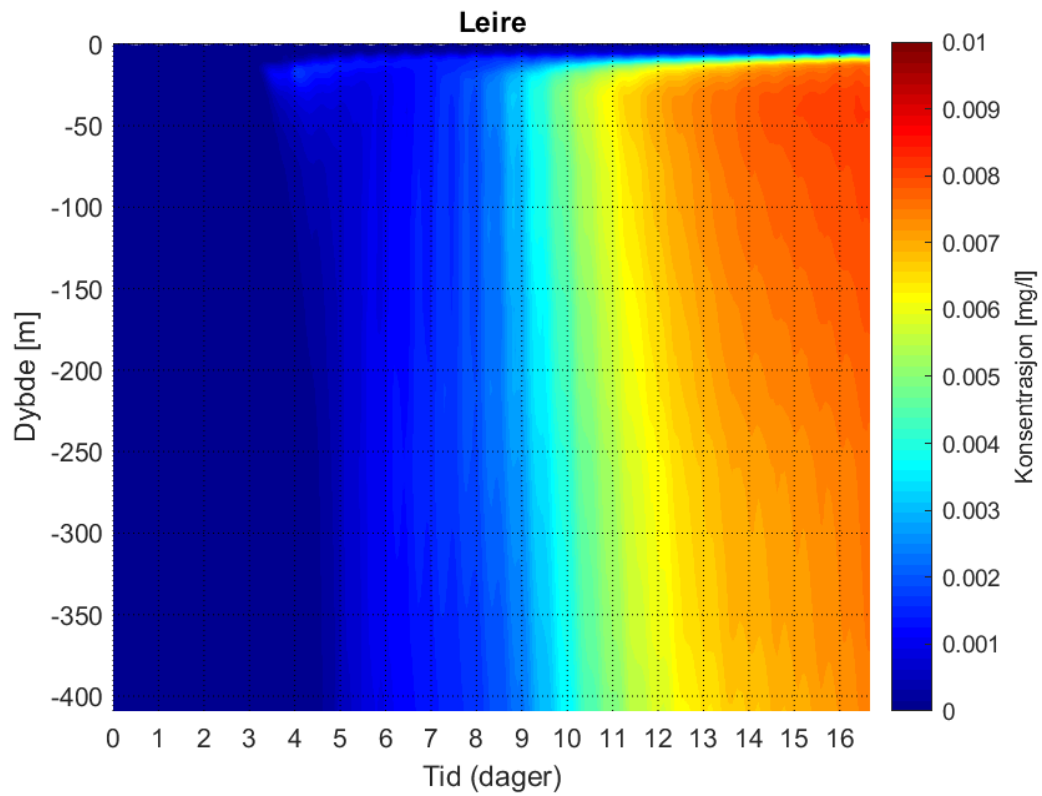
4.2.3. Konsentrasjonsutvikling over tid

Videre ser vi på konsentrasjon over tid i et punkt nær Vaksdal (gult punkt i Figur 4-8). Vi ser at særlig konsentrasjon av leire fremdeles øker etter 16 dager med kontinuerlig utslipp for scenario 1, imens siltkonsentrasjonen ser ut til å stabilisere seg.

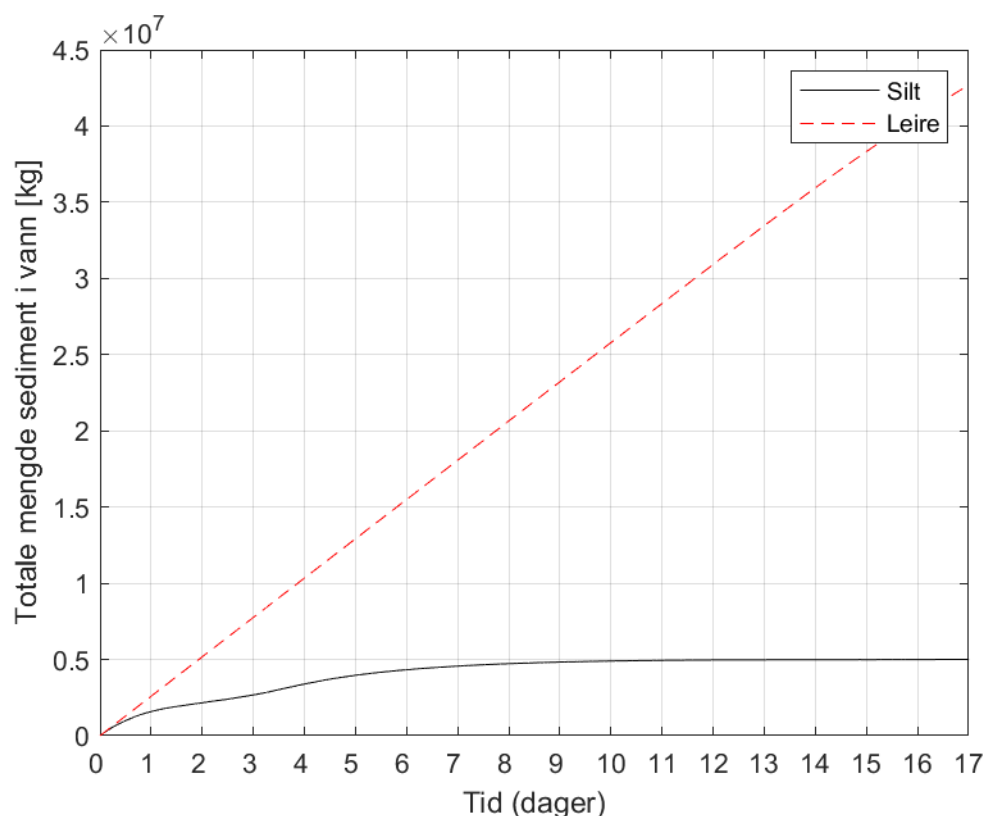
Vi kan se litt nærmere på det ved å sjekke total mengde sediment i vannet i modellen over tid (Figur 4-14). Mengde med silt i vannet stabiliserer seg etter noen dager (utslippsmengde er da lik sedimenteringsmengde). For leire stabiliserer totale mengde sediment i vannet seg ikke etter 17 dager. Sedimenteringen er for liten i forhold til utslippsmengde. Derfor øker sedimentkonsentrasjon over tid for leire.



Figur 4-12: Siltkonsentrasjon over tid lokasjon Vaksdal, scenario 1. Se Figur 4-8 for lokasjon (gult punkt)



Figur 4-13: Leirekonsentrasjon over tid lokasjon Vaksdal, scenario 1. Se Figur 4-8 for lokasjon (gult punkt)



Figur 4-14: Total mengde sediment i vannet i modellen over tid, silt og leire, Scenario 1.

4.3. Resultater Scenario 3 og Scenario 4

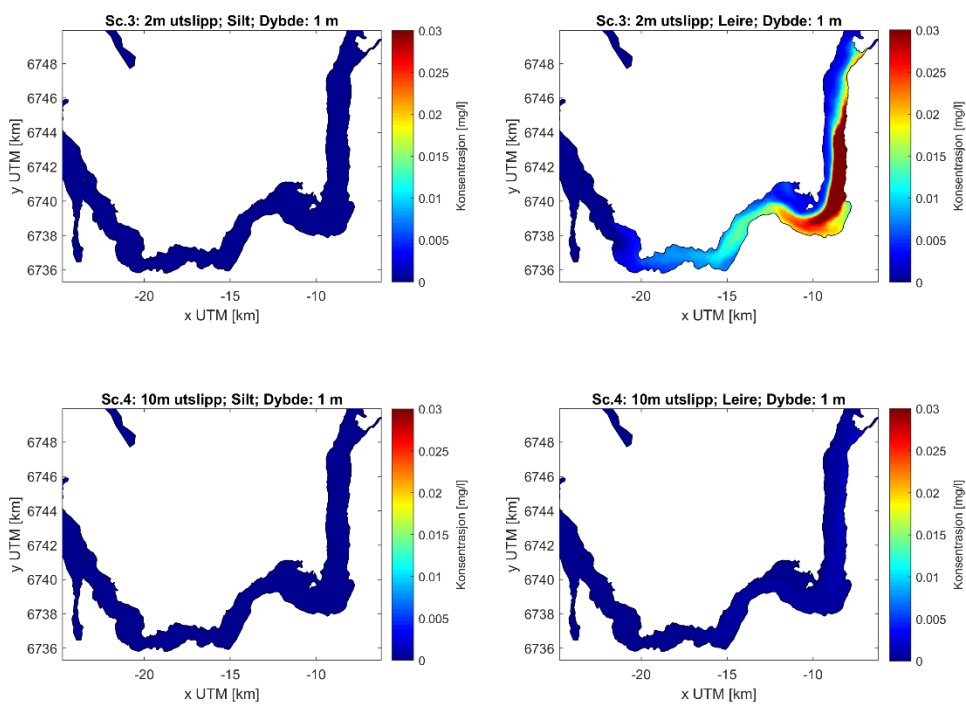
I scenario 3 er det gjennomsnittlig ferskvannsavrenning og kontinuerlig utslipp på 2m dybde ved Linnebakkene (ingen utslipp ved Romslo og Langhelleneset). Scenario 4 er det samme som Scenario 3, men med utslipp på 10m dybde. Strømforholdene for Scenario 3 og 4 er det samme som i Scenario 1, bare utslippspunktet er annerledes.

Resultatene for konsentrasjon vises på 1m dybde (Figur 4-15), 10m dybde (Figur 4-16), 25m dybde (Figur 4-17), 50m dybde (Figur 4-18), 100m dybde (Figur 4-19) og 200m dybde (Figur 4-20). Lagtykkelse av sedimentet som har nådd bunnen vises i Figur 4-21. Vedlegg 1 viser de samme resultatene som i Figur 4-15 til og med Figur 4-21, men med en annen fargeskala.

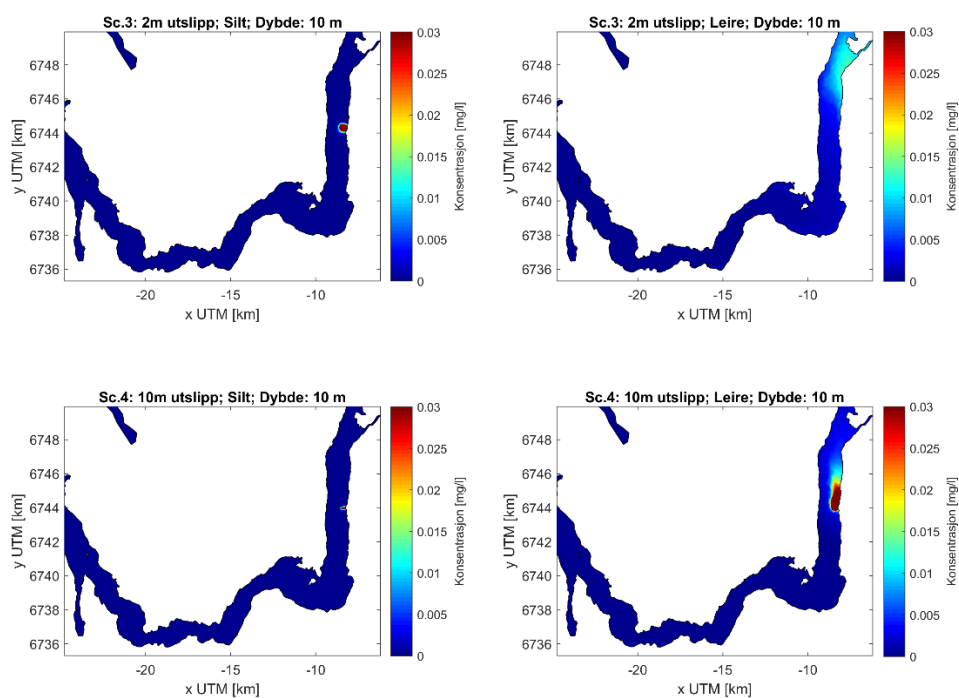
Figur 4-15 viser at leire ved et utslipp på 2m (Scenario 3) i hovedsak forblir i overflatelaget og blir fraktet videre til sjø. En liten andel av sediment i overflatelaget synker til bunnen. På

10m dybde ser vi en liten forhøyd leirekonsentrasjon mot Dalelva (Figur 4-16). Siltutslipp på 2m dybde synker i hovedsak til bunnen i et område rundt utslippspunktet.

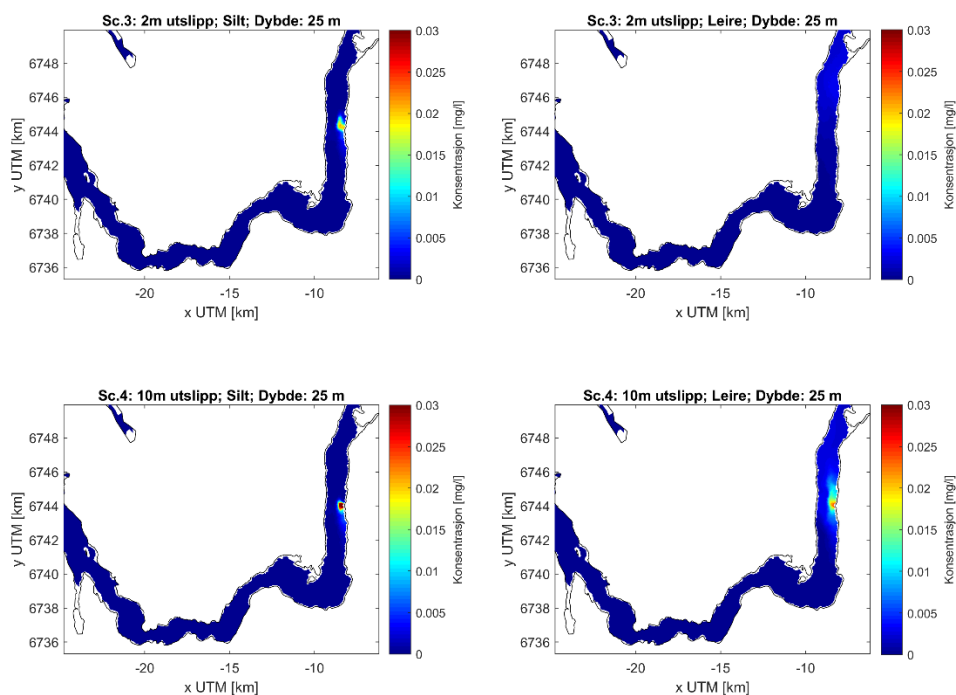
For Scenario 4 ser vi at leireutslipp på 10m dybde gir et annerledes forløp enn utslipp på 2m (Scenario 3). Vi ser ingen leire på 1m dybde (Figur 4-15). På 10m dybde blir leire i hovedsak transportert med den estuarine sirkulasjonsstrømningen mot Dalelva (Figur 4-16). Leire synker videre til dypere lag (Figur 4-20), men forblir i hovedsak i et område på flere km rundt utslippspunktet.



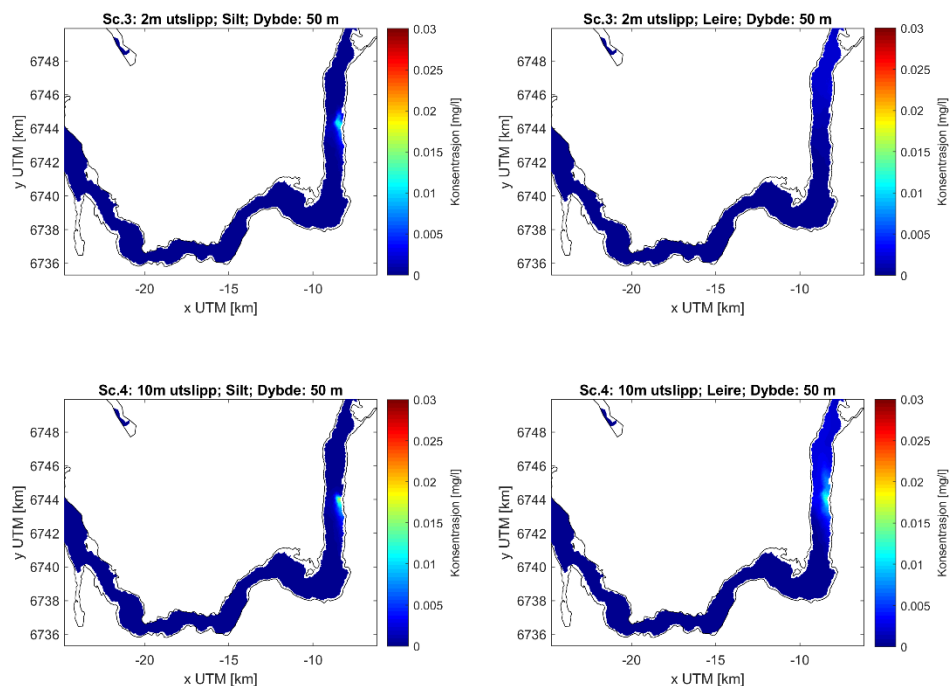
Figur 4-15: Sedimentkonsentrasjon på 1m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager



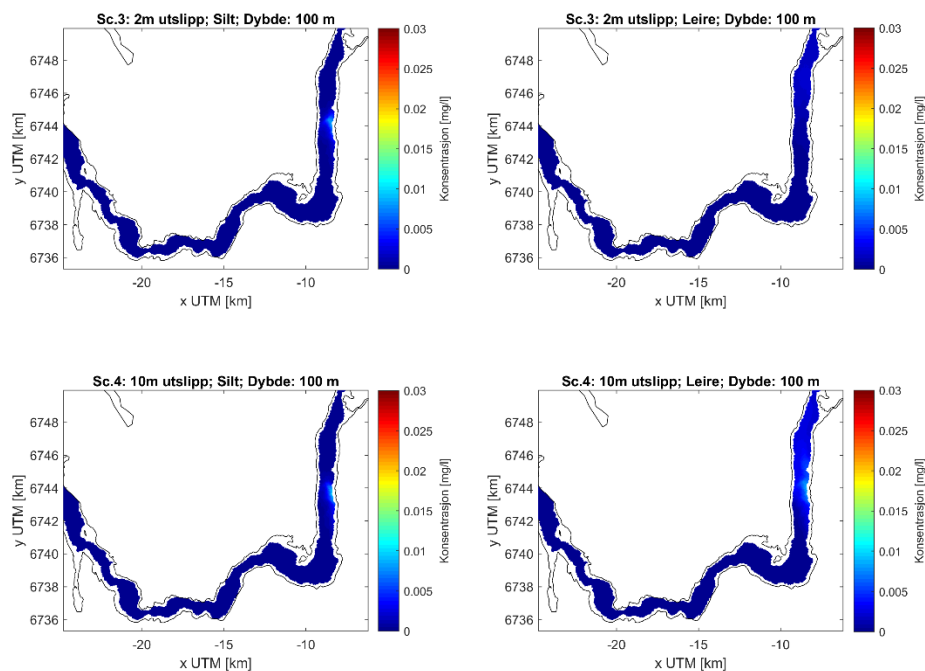
Figur 4-16: Sedimentkonsentrasjon på 10m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager



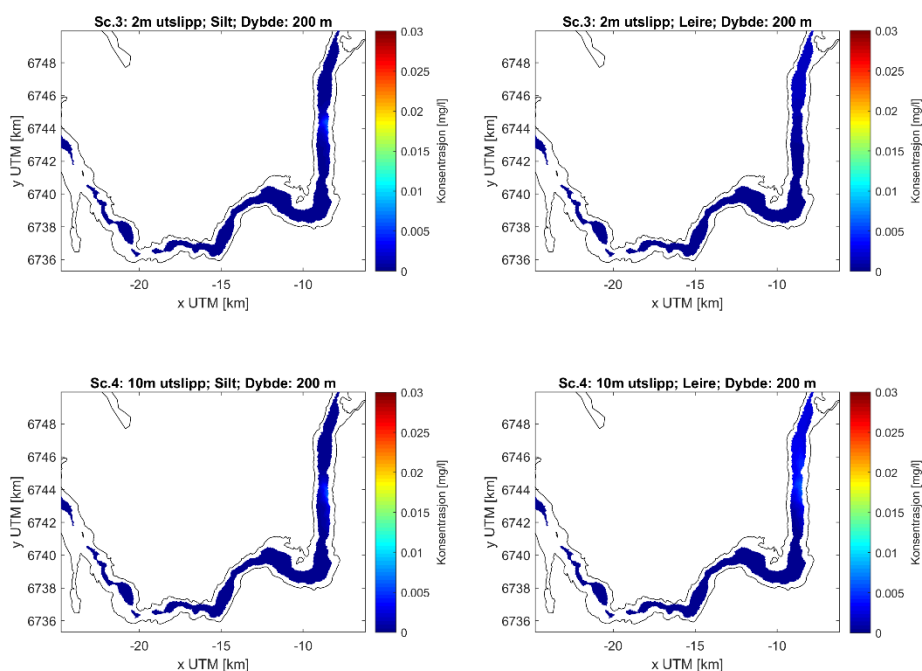
Figur 4-17: Sedimentkonsentrasjon på 25m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager



Figur 4-18: Sedimentkonsentrasjon på 50m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager

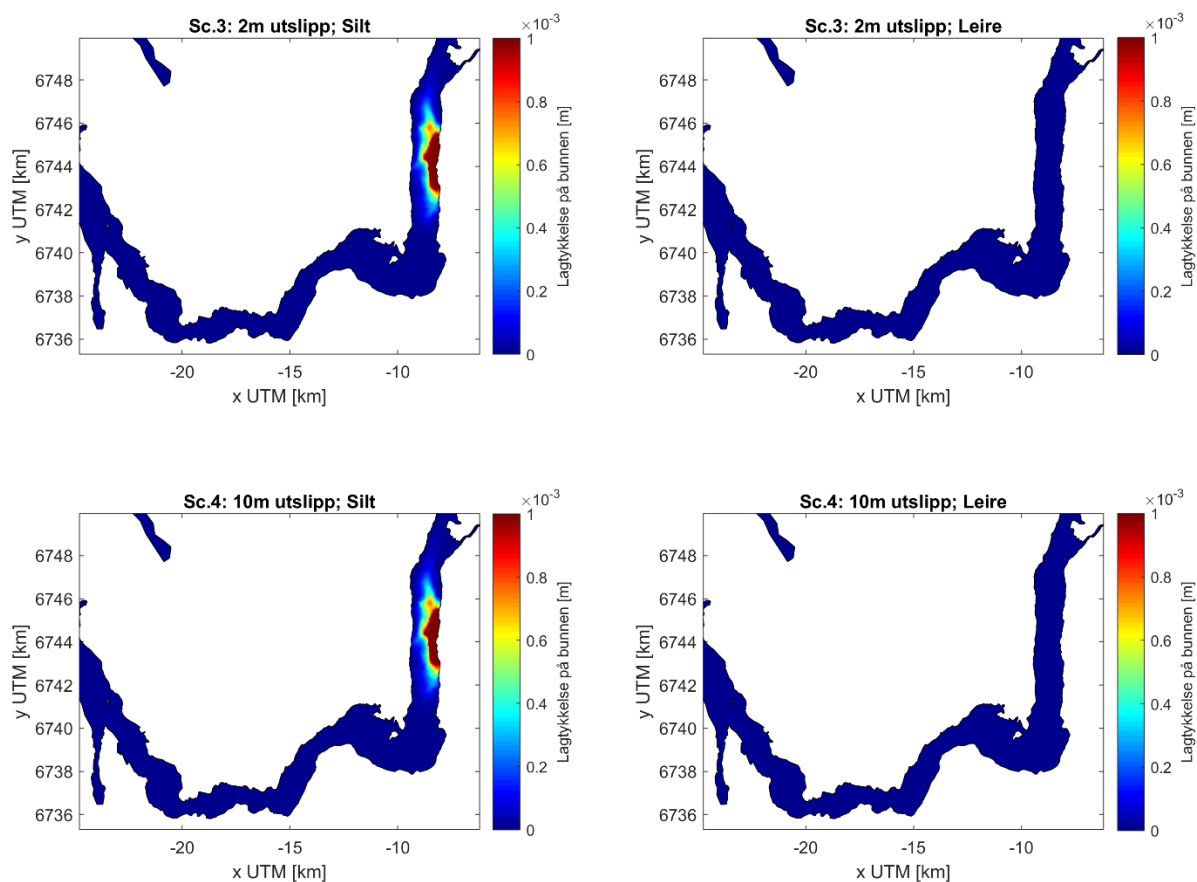


Figur 4-19: Sedimentkonsentrasjon på 100m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager



Figur 4-20: Sedimentkonsentrasjon på 200m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager

Lagtykkelse på bunnen (Figur 4-21) viser at Scenario 3 og 4 er nesten like for silt. Her gjør det ingen forskjell om utslipp er på 2 eller 10m dybde. For leire har vi sett at det er store forskjeller i spredningen, der leire (nesten) ikke har nådd bunnen etter 8,3 dager (Figur 4-21).



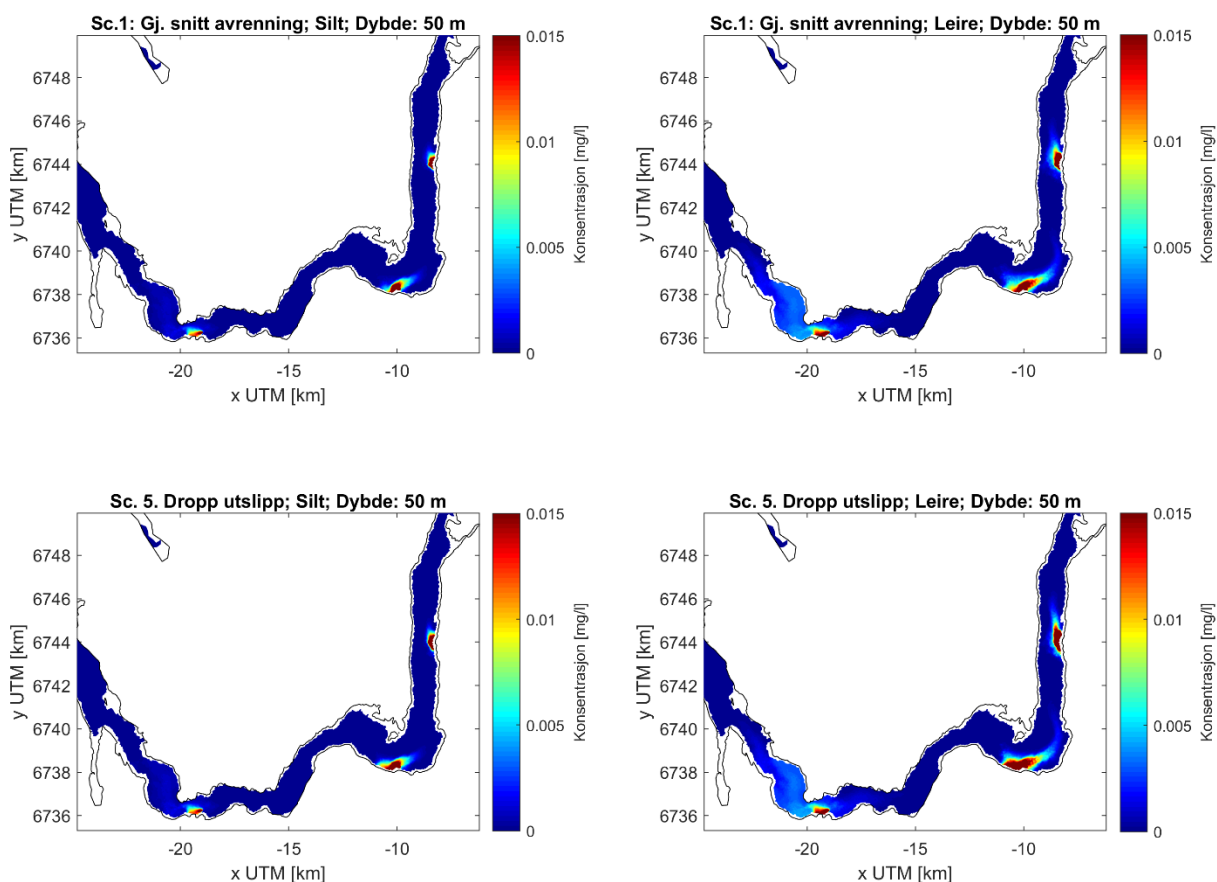
Figur 4-21: Lagtykkelse på bunnen; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.

4.4. Resultater Scenario 5

I det mest sannsynlige scenariet skal lastebiler dumpe sprengstein fra lekter i fallrør. Dette er altså ikke en kontinuerlig prosess. Derfor undersøker vi effekten av et dropp-utslipp i Scenario 5, istedenfor kontinuerlig utslipp (Scenario 1). Vi dumper i dette scenariet i en periode på 30 sekunder (et tidskritt i modellen) like mye som et kontinuerlig utslipp på 3 minutter. Etter hvert gjentar vi denne syklusen gjennom simuleringsperioden.

Figur 4-22 viser resultatet for sedimentkonsentrasjon på 50m dybde etter 3,5 dager, for Scenario 1 og Scenario 5. Lokalt rundt utslippspunktetene kan man se noen forskjeller, men lengre vekk fra utslippspunkt ser vi samme konsentrasjon i de to scenariene. Konklusjonen er at konsentrasjon rundt utslippspunktet påvirkes av om det er kontinuerlig eller dropp-utslipp, men over lang avstand ser vi like resultater for begge utslippmetoder.

Vi ser det samme i øvrige dybder, vi viser ikke flere figurer her.



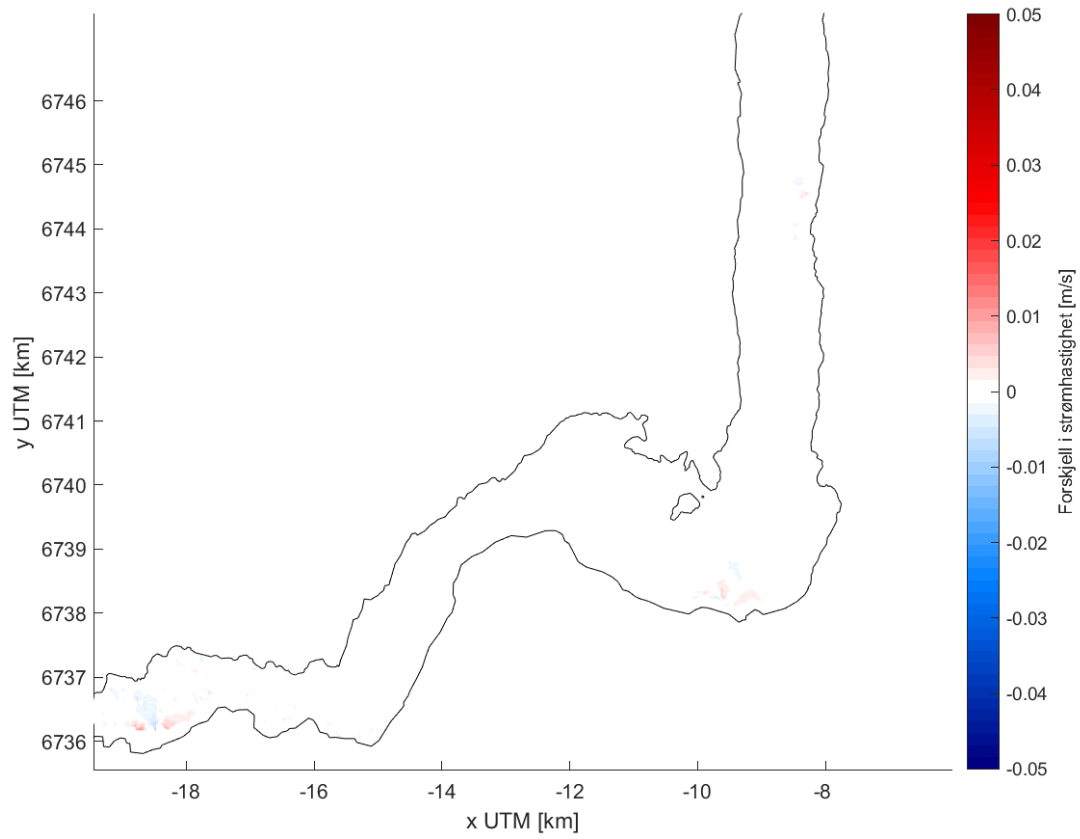
Figur 4-22: Sedimentkonsentrasjon på 50m dybde; Scenario 1 og Scenario 5; silt og leire etter 3,5 dag

4.5. Resultater Scenario 6

I scenario 6 er dybdeforholdene i modellen er justert med endelige utfylling på plass. Spørsmål er om et endret bunnforhold påvirker strømming og dermed spredningen av finstoff.

Totalt har vi justert bunnen med omtrent 10 million m³ ved Romslo (3 million m³), Stanghelleneset (3,2 million m³) og Linnebakkene (3,9 million m³).

Vi har sett på forskjell i strømhastighet etter to dager på en dybde på 100m (Figur 4-23). Forskjeller rundt utfyllingene ligger innenfor noen mm/s. Forskjellen er lokal rundt utfyllingene og gir ingen vesentlige endringer. Vi anser det derfor usannsynlig at det kan påvirke spredningen av finstoffet i vesentlig grad.



Figur 4-23: Forskjell i strømhastighet på 100m dybde mellom Scenario 1 og Scenario 6 etter to dager

5. Usikkerheten i modelleringen

5.1. Stratifisering

Figur 1-5 viser stratifisering i Sørfjorden over flere år. Det er til tider et veldig tynt/grunt ferskvannslag. Det kan være mulig at det i noen korte perioder vil skje en «outcropping» av overflatelaget. Det betyr at suspendert fint sediment, som under normale forhold befinner seg under ferskvannslaget, kan komme opp til overflaten under disse forholdene. Fra Scenario 3 ser vi at leirepartikler i overflatelaget blir i overflatelaget i lang tid. Dette er noe som bør tas hensyn til, f.eks. ved overvåking av ferskvannslaget under dumpingene.

5.2. Flokkulering

De simulerte scenarier viser en stor forskjell i spredningspotensial mellom siltpartikler og leirepartikler. Siltpartikler synker relativt raskt til bunnen og sprer seg ikke langt fra utslippslokasjon. For leirepartikler er forutsetningen i simuleringen at de ikke flokkulerer. Fra litteratur vet vi derimot at partikler fra marin eller limnisk leire flokkulerer i saltvann (f.eks. Sutherland m.fl, 2014).

Tunnelmassene (og dermed finstoffet som oppstår under tunneldriving) vil ha variabel mineralogi. Partikler fra marin/limnisk leire kan derfor sannsynlig ikke direkte sammenlignes med finstoff fra tunnelmassene, selv om de har samme kornstørrelse. På grunn av form, krystallstruktur og geokjemi må man regne med at partikler fra sprengstein flokkulerer sannsynlig dårligere i saltvann enn partikkel fra marin eller limnisk leire.

Det er viktig at det utføres pilotforsøk med knust stein fra bergarter som ligger i tunneltrassen før oppstart av anleggsfasen. Data fra pilotforsøk er av stor nytte for innsikt i spredningspotensial og videre validering/kalibrering av spredningsmodellen.

5.3. Strømning

Som vist i kap. 3.2 om kalibrering, var strømrretningen i modellen og målingene stort sett i samme retning under (mye) ferskvannsavrenning. Med lavere ferskvannsavrenning kan man forvente at strømning skjer i mer variabel retning, stort sett på grunn av tidevannsstrømning som blir mer dominerende. For siltutslipp betyr det at spredningen

kan være noen kilometer i en annen retning enn det modellen viser. Her må man regne med at et område på noen km (ca. 2-5km) rundt utslippspunktet (i alle retninger) blir påvirket over lang tid.

For leire (uten flokkulering) ser vi at spredningspotensialet er mye større. Her må man regne med at et område på flere km (ca. 5-10 km) rundt utslippspunkt (i alle retninger) blir påvirket over lang tid.

6. Konklusjon

I forbindelse med ny E16 og jernbane på strekningen Arna – Stanghelle, vil det skapes store mengder overskuddsmasser. Deponering av omtrent 10 millioner m³ overskuddsmasser i sjø er under vurdering.

I denne rapporten presenteres resultater fra 3D-modellering av finstoffutslipp i Veafjorden/Sørfjorden for å simulere deponering av tunnelstein for ny E16/Vossobanen.

Basert på modellresultatene kan vi dra disse konklusjonene:

- Fint sediment (leire og silt) fra de tre utslippspunktene på 50m dybde når ikke overflatelaget i Veafjorden og Sørfjorden. Ferskvannslaget er en barriere for fint sediment og blir suspendert under ferskvannslaget.
- Konsentrasjon av suspenderte leirpartikler (mindre enn 6 µm) øker over tid fordi sedimentasjonen av leirepartikler foregår så sent og fordi den horisontale strømmen er ikke sterk nok til å føre partikler ut av området.
- Etter 16 dager modellkjøring var det ikke oppstått likevekt i konsentrasjon.
- Konsentrasjon av siltpartikler (mellom 6-63µm) når i hovedsak likevekt etter noen dager. Sedimentasjon av siltpartikler er stor nok for å unngå videre oppkonsentrering i vannmassene.
- Et bunnområde på flere kilometer rundt utslippspunktene blir berørt av sedimentasjon av siltpartikler. Sedimentering av leirepartikler skjer i modellen, men i mindre grad enn siltpartikler.
- Leirpartikler blir lengre i suspensjon enn siltpartikler. Dette medfører at disse partiklene blir transportert lengre vekk fra utslippspunktet enn siltpartikler.
- Det er lite forskjell i sedimentkonsentrasjon ved modellering med gjennomsnittlig ferskvannsavrenning (Scenario 1) og 3x gjennomsnittlig ferskvannsavrenning (Scenario 2) når utslippet skjer på 50m dybde.
- Et utslipp av leire på 2m dyp (i ferskvannslaget) istedenfor 50m dyp gir store forskjeller i spredningen (Scenario 3). Leire forblir stort sett i overflatelaget og sprer seg videre nedstrøms mot sjø.
- Et utslipp av leire på 10m dyp (Scenario 4) gir et annerledes spredningsbilde enn utslipp på 2m (Scenario 3). Utslipp av leire på 2m forblir stort sett i overflatelaget og sprer seg videre nedstrøms mot sjø, imens utslipp på 10m sprer seg med returstrømmingen oppstrøms og synker også videre til dypere lag.

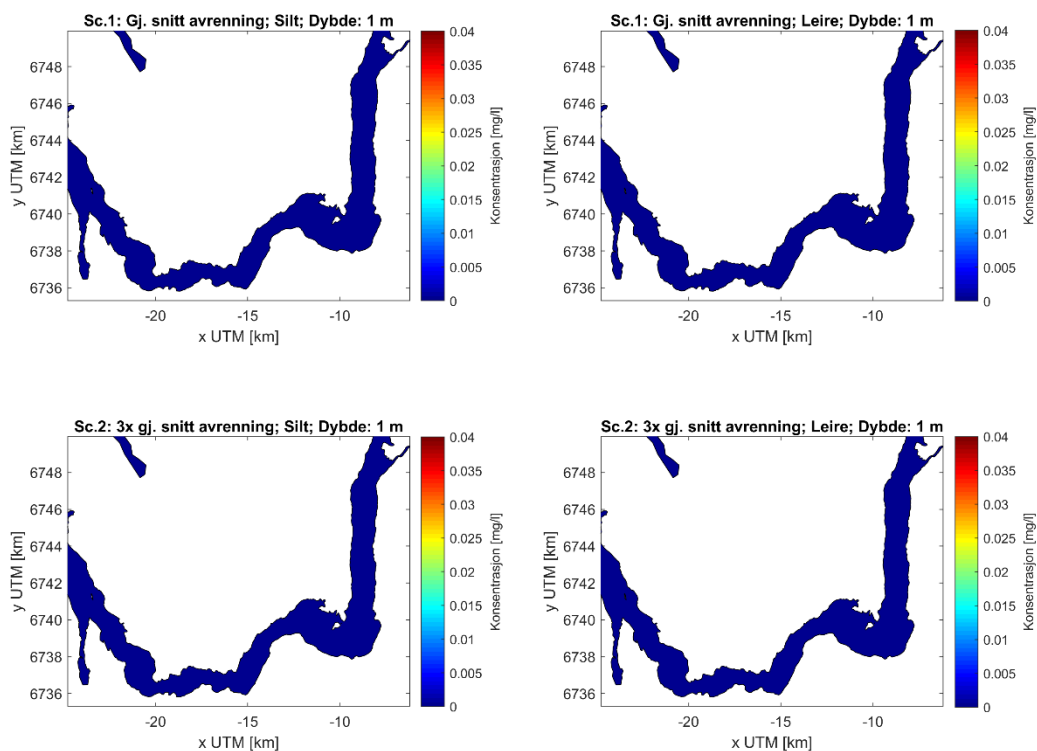
- Utslipp av silt på 2m (Scenario 3) eller 10m (Scenario 4) gir det samme bildet av sedimenteringen ved utslippslokalitetene.
- Et scenario med kontinuerlig utslipp (Scenario 1) versus et dropp-utslipp-scenario (Scenario 5) gir forskjell i konsentrasjon rundt utslippspunkt (near-field), men over lang avstand (far-field) ser vi like resultater som for kontinuerlig utslipp (Scenario 1).
- Utfyllingen i sjø på 10 millioner m³ påvirker strømforholdene bare lokalt og i mindre grad (Scenario 6) og kan dermed ikke påvirke spredningen av finstoffet i stor grad.

Kilder

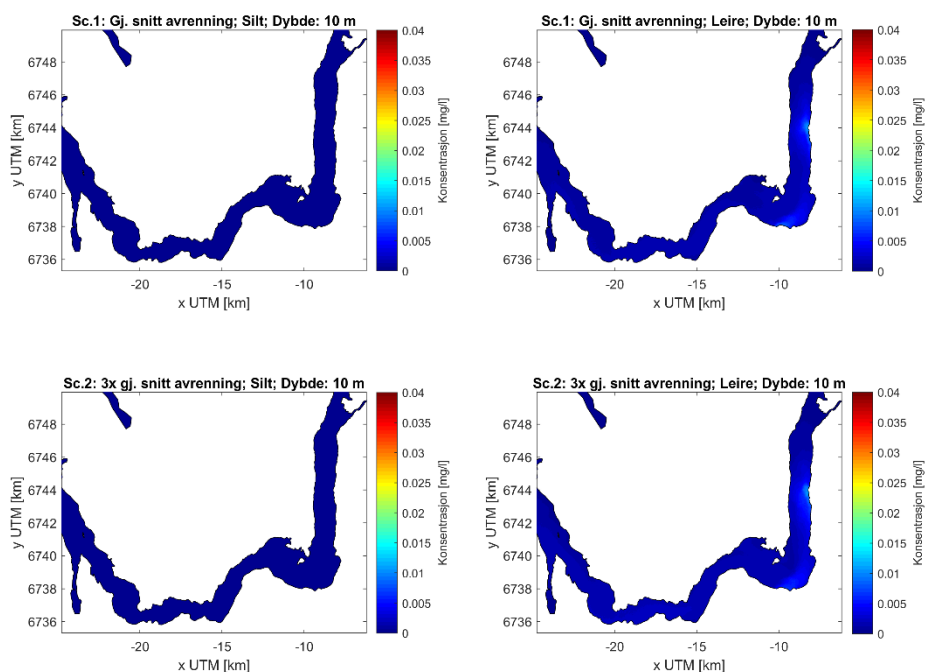
- Dam Engineering, 2017, Simulation of the spreading of fine sediment in Sørfjorden due to rock dumping
- Havforskningsinstituttet. 2015. Omsetning av tilført partikulært organisk materiale i fjordbasseng med dype terskel. Rapport nr. 1/2015.
- Labeur, R.J., Wells, G.N., (2007), A Galerkin interface stabilisation method for the advection-diffusion and incompressible Navier-Stokes equations, Computer methods in Applied Mechanics and Engineering 196, pp. 4985-5000.
- Labeur, R.J., Wells, G.N., (2009), Interface stabilized finite element method for moving domains and free surface flows, Computer methods in Applied Mechanics and Engineering 198, pp. 615-630.
- Labeur, R.J., Wells, G.N., (2010), Energy stable and momentum conservation interface stabilised finite element method for the incompressible Navier-Stokes equations, SIAM Journal of Scientific Computations, 34(2), pp. A889-A913.
- Labeur, R.J., (2009), Finite element modeling of transport and non-hydrostatic flow in environmental fluid mechanics, PhD thesis, Technical University Delft.
- Rambøll/SWECO, 2022, Strømmålinger i Sørfjorden
- Sutherland B.R., Barrett, K.J., Gingras, M., 2014, Clay settling in fresh and salt water, Environmental Fluid Mechanics.
- Talstra, H., (2016) User manual FINEL3d, Svašek Hydraulics

Vedlegg 1: Figurer med andre fargeskala

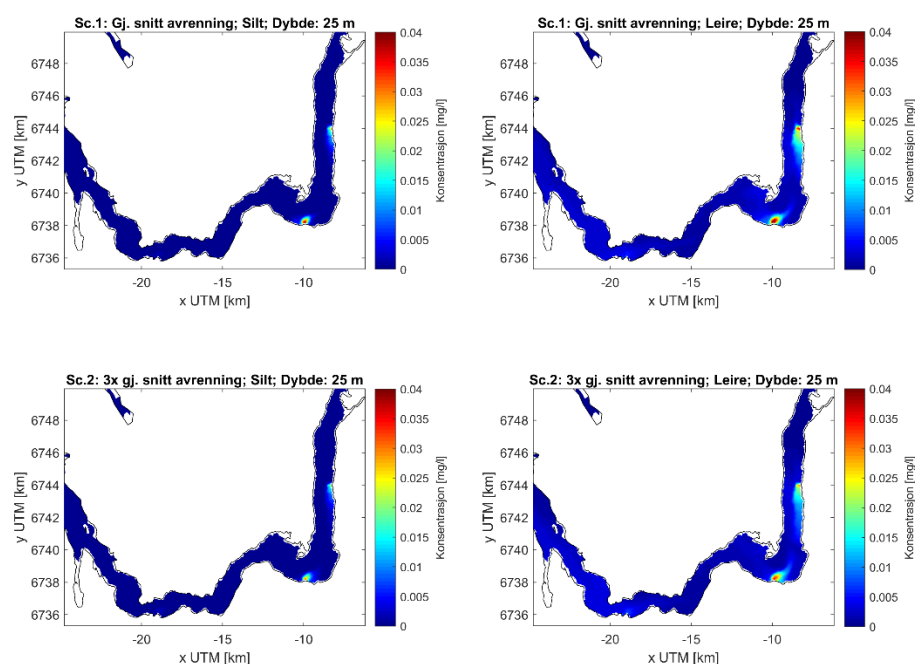
Scenario 1 og 2



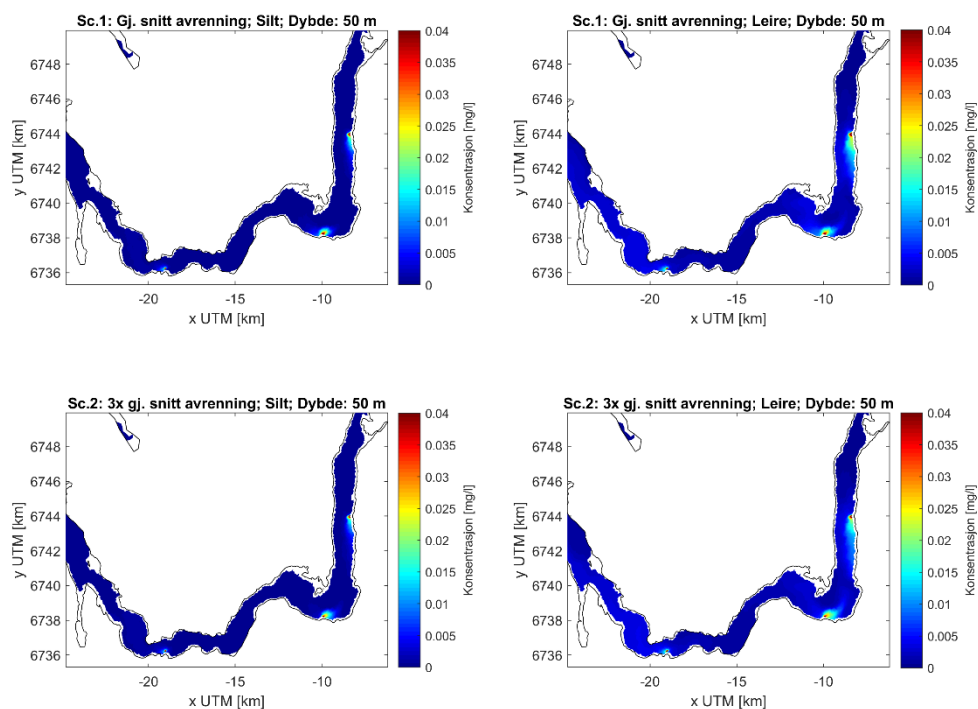
Figur 1: Sedimentkonsentrasjon på 1 m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.



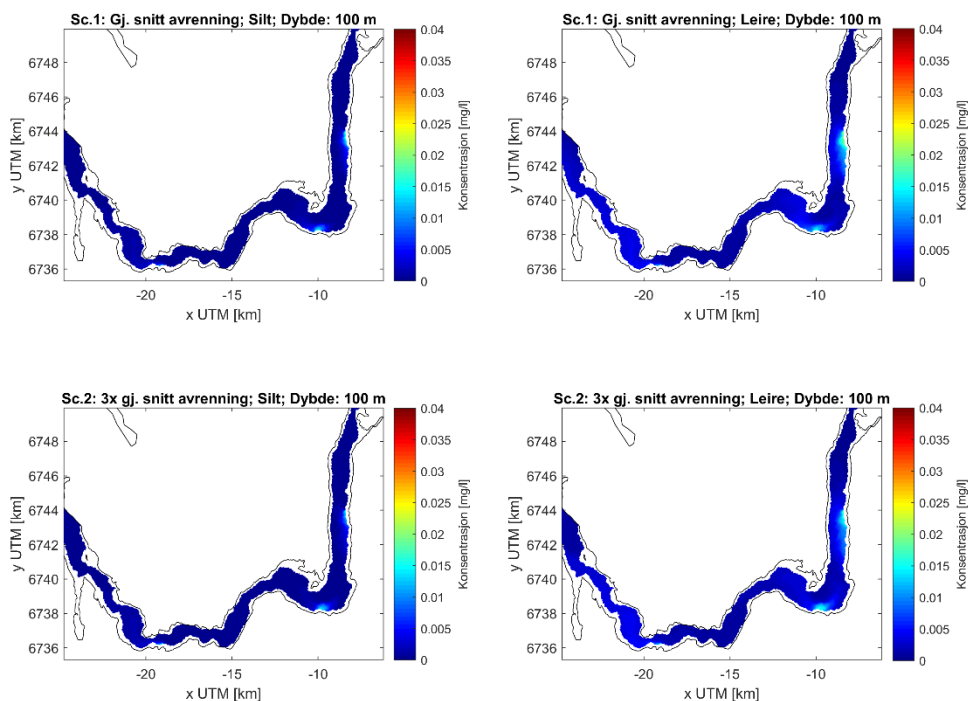
Figur 2: Sedimentkonsentrasjon på 10m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.



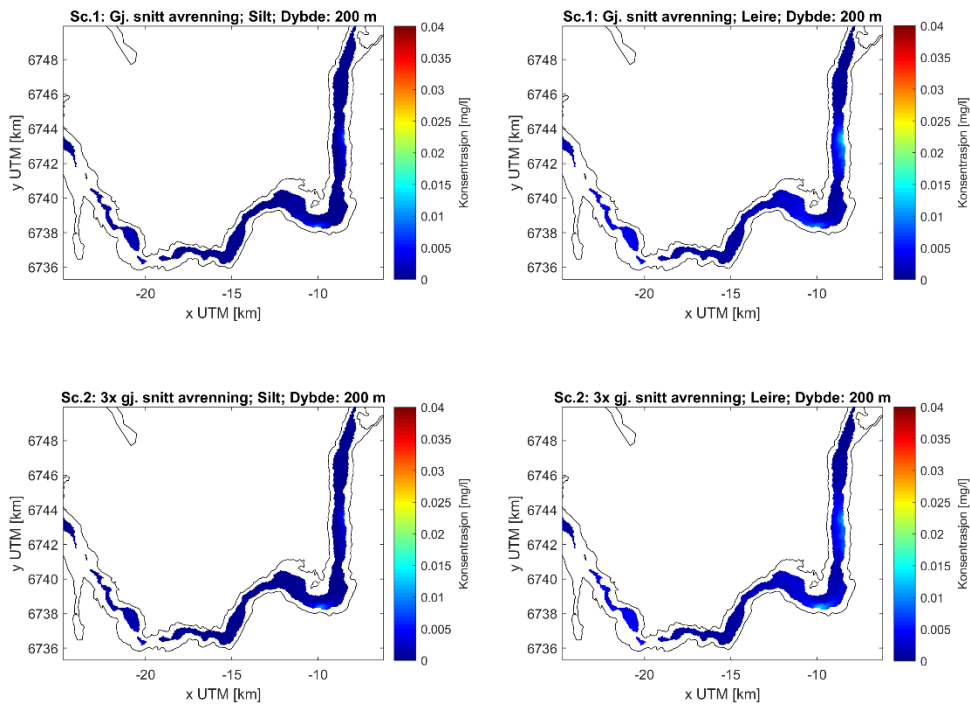
Figur 3: Sedimentkonsentrasjon på 25m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.



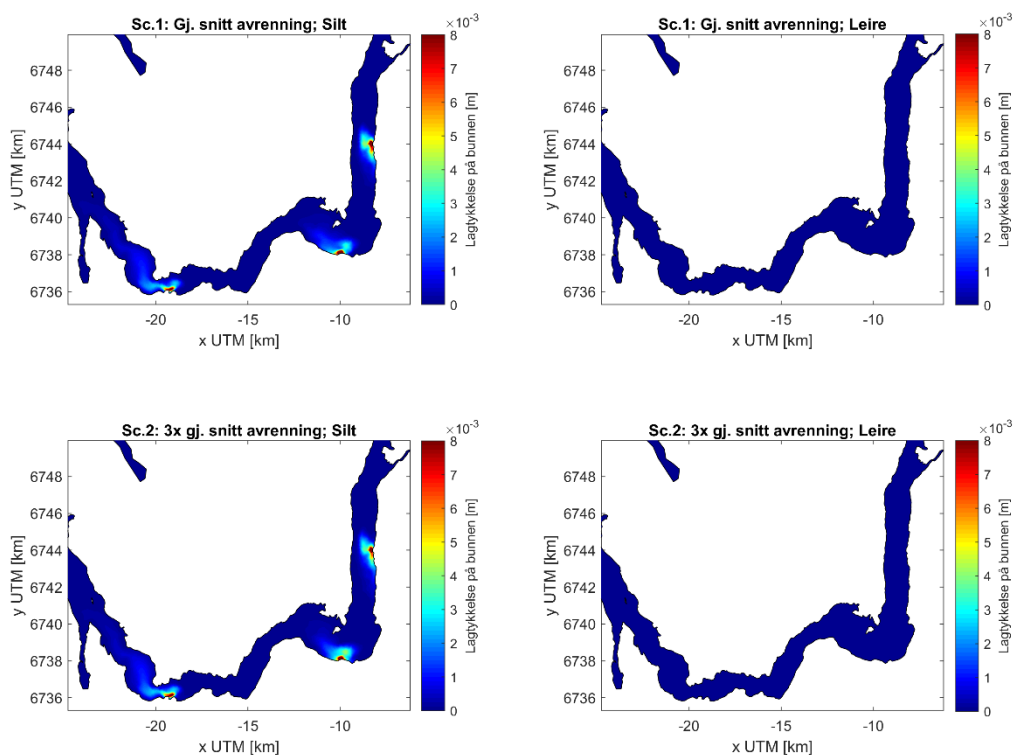
Figur 4: Sedimentkonsentrasjon på 50m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.



Figur 5: Sedimentkonsentrasjon på 100m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.

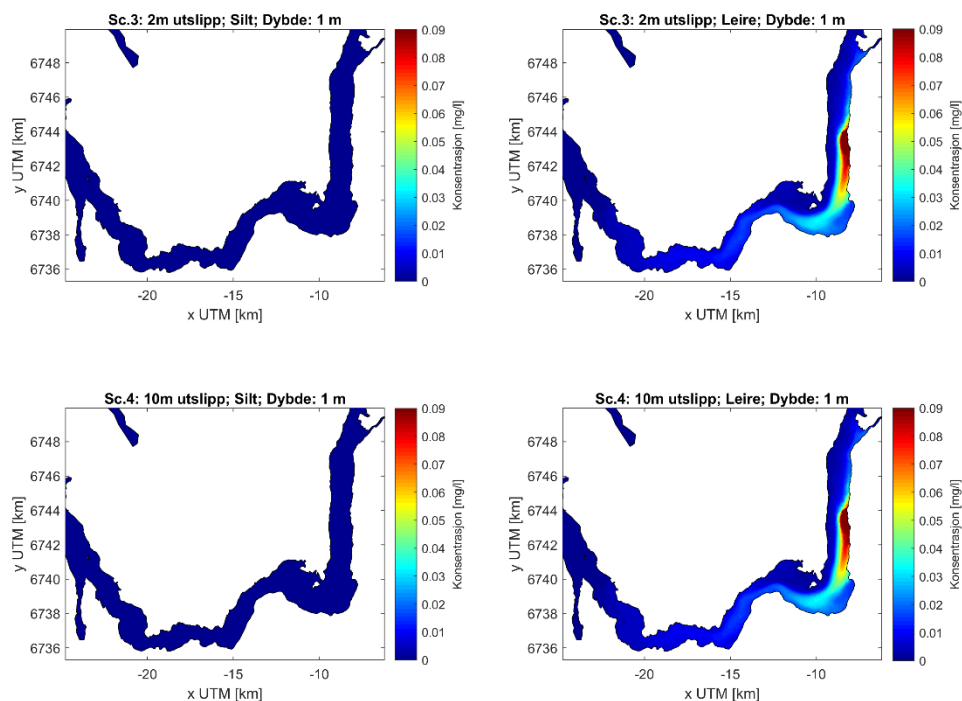


Figur 6: Sedimentkonsentrasjon på 100m dybde; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.

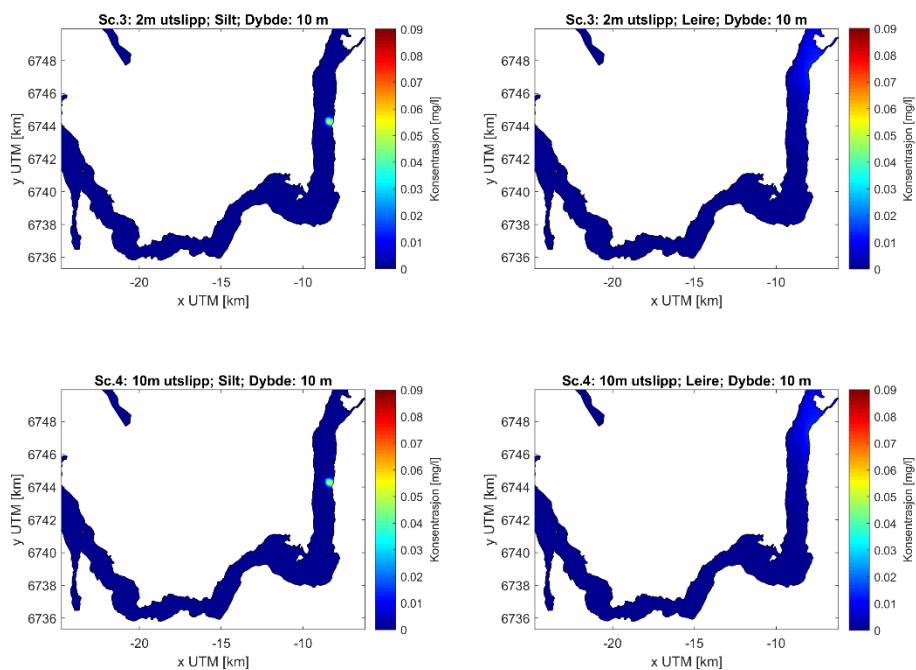


Figur 7: Lagtykkelse på bunnen; Scenario 1 og Scenario 2; silt og leire etter 8,3 dager.

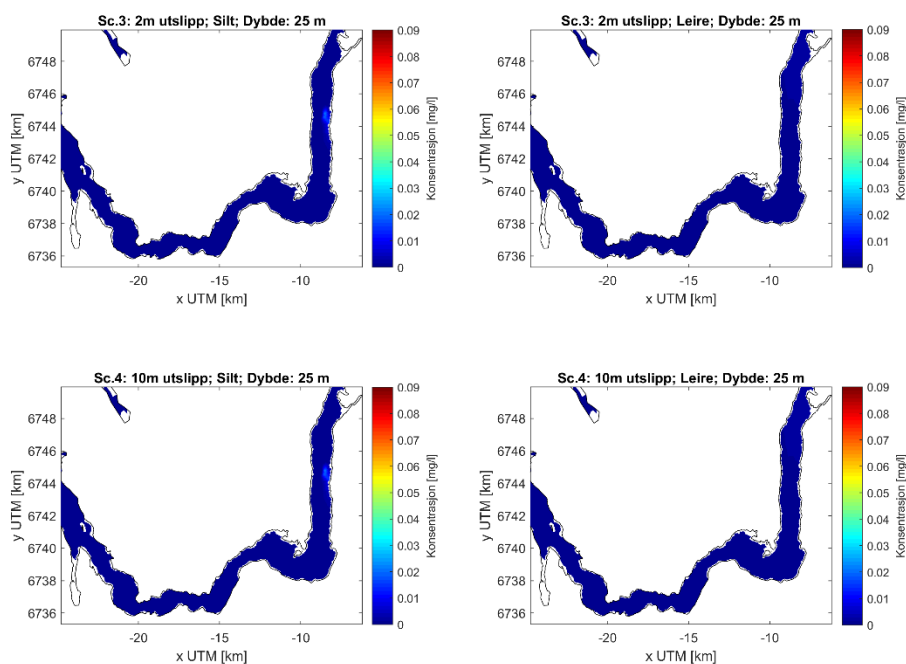
Scenario 3 og 4



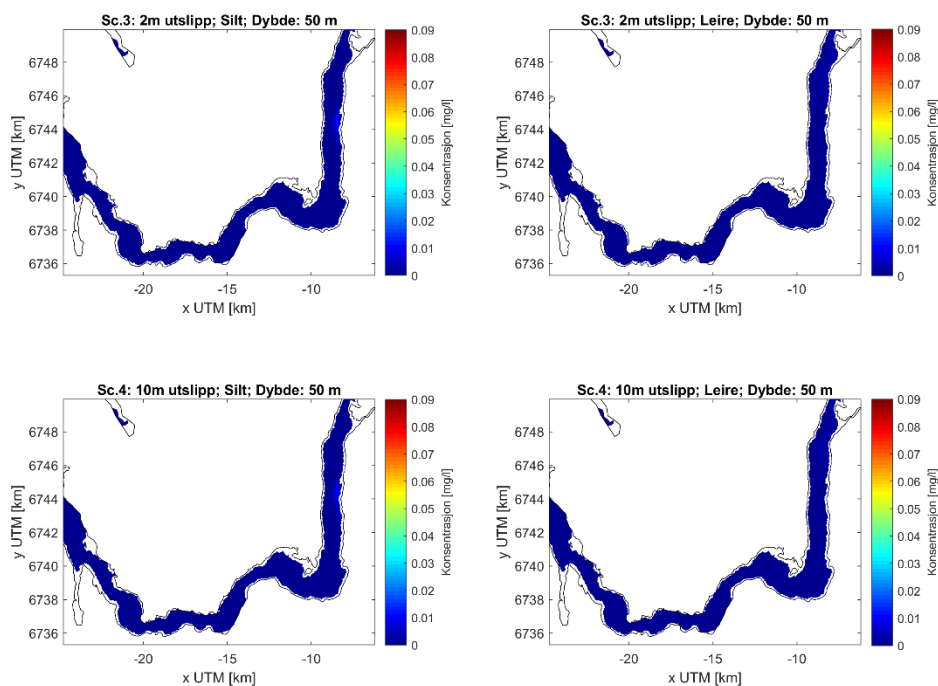
Figur 8: Sedimentkonsentrasjon på 1m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.



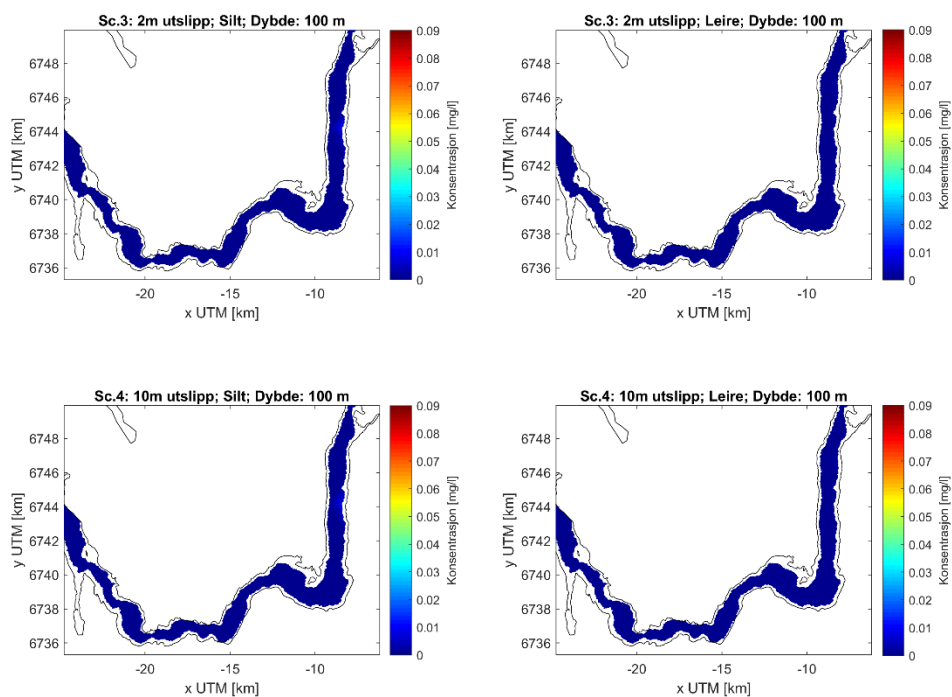
Figur 9: Sedimentkonsentrasjon på 10m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.



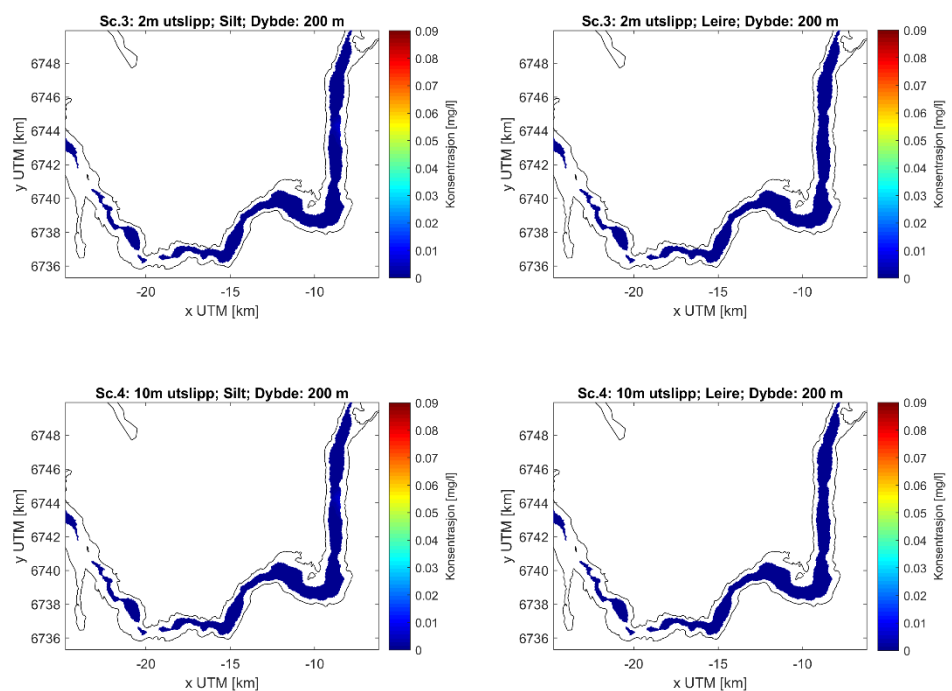
Figur 10: Sedimentkonsentrasjon på 25m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.



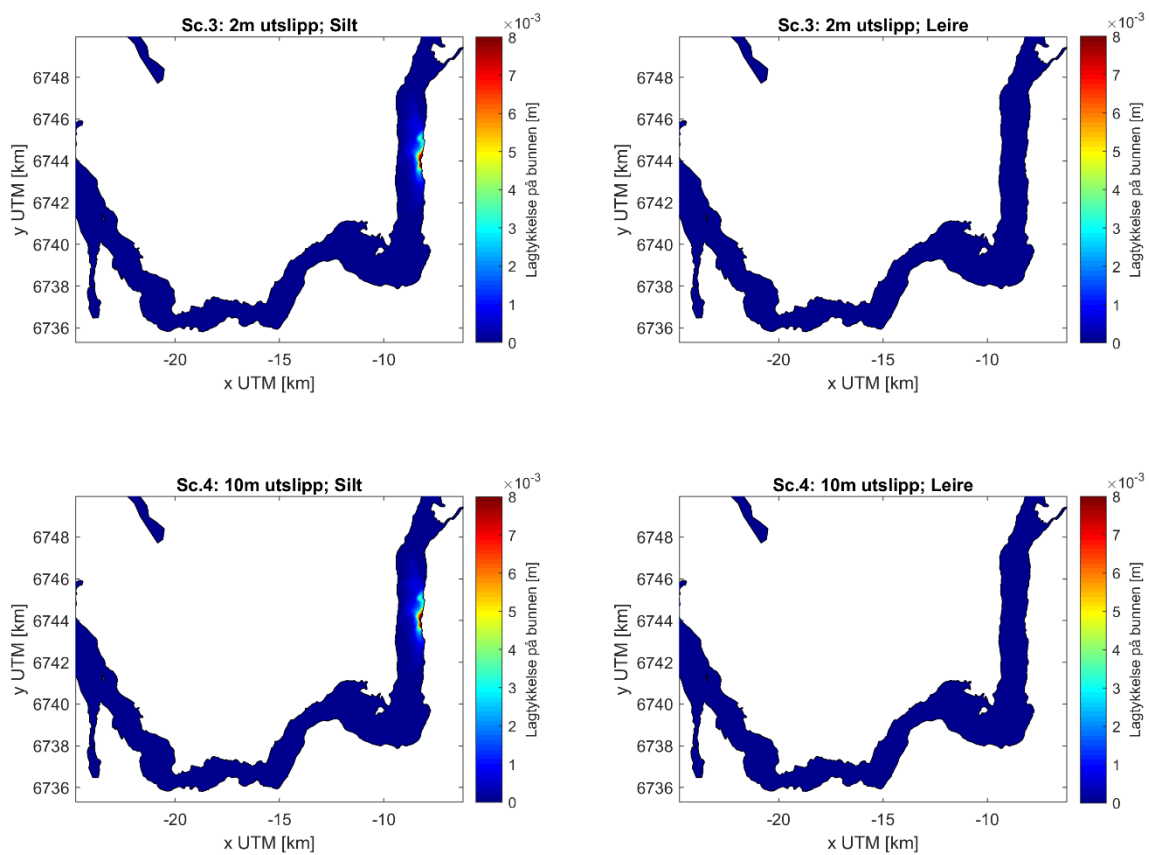
Figur 11: Sedimentkonsentrasjon på 50m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.



Figur 12: Sedimentkonsentrasjon på 100m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.



Figur 13: Sedimentkonsentrasjon på 200m dybde; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.



Figur 14: Lagtykkelse på bunnen; Scenario 3 og Scenario 4; silt og leire etter 8,3 dager.



asplan viak