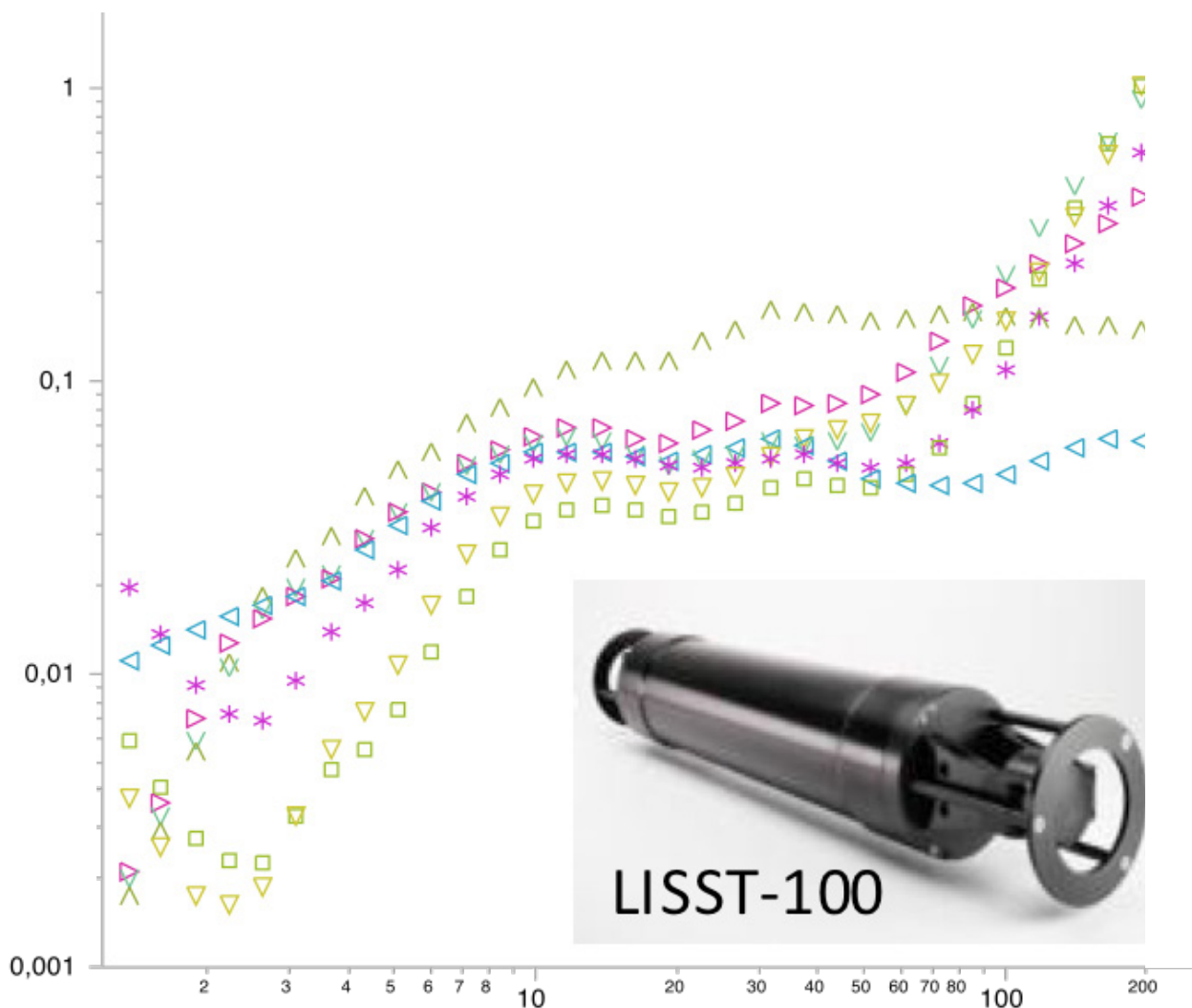


Tiltaksrettede undersøkelser i Gunneklevfjorden. Detaljkartlegging av kvikksølv og partikler i vannmassen, tokt nr. 1.



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

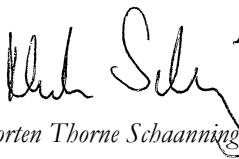
| | | |
|--|----------------------------------|--|
| Tittel Tiltaksrettede undersøkelser i Gunneklevfjorden. Detaljkartlegging av kvikksølv og partikler i vannmassen, tokt nr. 1. | Løpenummer 7157-2017 | Dato 29.05.2017 |
| Forfatter(e) Morten Schaanning, Bjørnar Beylich, Sabine Marty, Hans Fredrik Veiteberg Braaten | Fagområde Miljøgifter - marin | Distribusjon Åpen |
| | Telemark | Utgitt av NIVA Prosjektnummer 16133.4 |

| | |
|---------------------------|----------------------------------|
| Oppdragsgiver(e) Hydro | Oppdragsreferanse Bernt Malme |
|---------------------------|----------------------------------|

Sammendrag

Under arbeidet med tiltaksplan for Gunneklevfjorden viste massebalanseberegninger at resuspensjon av forurensede sedimenter kunne være en viktig prosess for å forklare konsentrasjonen av kvikksølv i fjordens vannmasser. Målet med denne oppfølgende undersøkelsen var primært å undersøke om detaljkartlegging av kvikksølv og partikler i vannmassen kunne bekrefte eller avkrefte denne antagelsen. Feltarbeidet ble utført på stigende vannstand 29.-30.11.2016. Noe over 60 vannprøver ble innsamlet fra 24 stasjoner og analysert for kvikksølv. Utvalgte prøver ble filtrert og analysert også for løst kvikksølv. I tillegg ble temperatur, saltholdighet, tetthet, turbiditet og partikkelstørrelsesfordeling (PSD) målt med sonder på 15 stasjoner. Målingene av temperatur og saltholdighet viste et tydelig skille mellom et overflatelag og et dyplag definert ved terskeldyp på 2,5 m. Konsentrasjonen av totalt kvikksølv økte med dypet, mens konsentrasjon av løst kvikksølv avtok med økende dyp. In situ målingene av partikkelstørrelsesfordelingen indikerte også en forskjell mellom de to vannlagene, men både bruken av instrumentet og tolkningen av dataene er foreløpig på et utprøvningsstadium. Det anbefales at det foreslåtte programmet følges med gjennomføring av en tilsvarende undersøkelse i 2017.

| | |
|---|---|
| Fire emneord 1. Brakkvann 2. Kvikksølv 3. Partikkelstørrelsesfordeling 4. Tiltaksplan | Four keywords 1. Brackish water 2. Mercury 3. Particle size distribution 4. Action plan |
|---|---|


Morten Thorne Schaanning
Prosjektleder


Marianne Olsen
Forskningsleder

Tiltaksrettede undersøkelser i Gunneklevfjorden

Detaljkartlegging av kvikksølv og partikler i
vannmassen, tokt nr 1.

Forord

Denne undersøkelsen er utført i henhold til NIVAs tilbud «Tiltaksrettede undersøkelser i Gunneklevfjorden», Aktivitet 4a «Hg i vannmassen» og 4b «In situ partikkelstørrelse». Tilbudet er datert 01.04.2016 og de to aktivitetene er planlagt gjennomført årlig i perioden 2016, 2017 og 2018. Denne rapporten beskriver resultatene fra 2016. Oppfølgende undersøkelser i 2017 og 2018 skal gjennomføres avhengig av erfaringene fra 2016. Feltarbeidet ble utført av Bjørnar Beylich og Vetle Fredheim. Hans Fredrik Veiteberg Braaten har hatt ansvaret for analysene av kvikksølv ved NIVAs laboratorium i Oslo. Sabine Marty har kvalitetssikret datafilene fra CTD og Liss-sensorene og tilrettelagt dataene for videre analyser. Rapporten er i hovedsak utarbeidet av undertegnede med god hjelp fra nevnte medforfattere og nyttige innspill til den endelige teksten fra Forskningsleder Marianne Olsen.

Oslo, 29.05.2017

Morten Schaanning

Innholdsfortegnelse

| | |
|--|-----------|
| 1 Innledning | 7 |
| 2 Materiale og metoder | 7 |
| 3 Resultater | 10 |
| 3.1 Saltholdighet og temperatur | 10 |
| 3.2 Turbiditet..... | 13 |
| 3.3 Målinger med LISST 100X..... | 13 |
| 3.4 Kvikksølv | 16 |
| 4 Oppsummerende diskusjon og anbefalinger | 19 |
| 5 Referanser | 22 |

Sammendrag

Denne rapporten beskriver resultater fra innsamling av vannprøver og hydrofysiske målinger i Gunneklevfjorden 29.-30.11.2016. Målet med undersøkelsen som er planlagt gjentatt i 2017 og 2018, er primært å undersøke om detaljkartlegging av kvikksølv og partikler i vannmassen kan bekrefte eller avkrefte antagelsen om at resuspensjon av forurensede sedimenter bidrar vesentlig til konsentrasjonen av kvikksølv i fjordens vannmasser og dermed til øket risiko for spredning fra Gunneklevfjorden til områdene utenfor.

Noe over 60 vannprøver ble innsamlet fra 24 stasjoner og analysert for kvikksølv. Utvalgte prøver ble filtrert og analysert også for løst kvikksølv. I tillegg ble temperatur, saltholdighet, tetthet, turbiditet og partikkelstørrelsesfordeling (PSD) målt med sonder på 15 stasjoner. PSD ble målt med en laseroptisk sonde (LISST100X) som indikerer partikkelstørrelse i 32 fraksjoner logaritmisk økende fra 1.25 til 250 μm .

Feltarbeidet ble utført på stigende vannstand 29.-30.11.2016. Målingene av temperatur og saltholdighet viste et tydelig skille mellom et overflatelag og et dyplag definert ved terskeldyp på 2,5 m og det ble funnet klare indikasjoner på innstrømning av vann over tersklene i begge ender av fjorden. Konsentrasjonen av totalt kvikksølv økte med dypet, mens konsentrasjon av løst kvikksølv avtok med økende dyp. De høyeste konsentrasjonene av kvikksølv ble funnet nærmest bunnen i de dypeste delene av fjorden på motsatt side av Herøya. Tilførselene av kjølevann fra Yara fabrikk ble identifisert ved relativt høy temperatur og lav saltholdighet på en stasjon midt i fjorden. Konsentrasjonen av kvikksølv var lav i dette området og indikerer at kjølevannet bidrar til å redusere konsentrasjonen av kvikksølv i fjordens øvre vannlag.

In situ målingene av partikkelstørrelsesfordelingen indikerte også en forskjell mellom de to vannlagene. Forskjellen var en tendens til større innslag av store partikler i dyplaget. Dette ble vist statistisk ved en PCA-analyse (Principal Component Analyses), men det må understrekes at både bruken av instrumentet og tolkningen av dataene er foreløpig på et utprøvningsstadium.

Den gjennomførte kartleggingen av kvikksølv og partikler ble utført i henhold til aktiviteter foreslått i NIVAs tilbud «Tiltaksrettede undersøkelser i Gunneklevfjorden», datert 01.04.2016. I tilbudet ble det foreslått at undersøkelsene skulle gjennomføres første gang i 2016 og at tilsvarende undersøkelser skulle gjentas i 2017 og 2018 avhengig av erfaringene fra 2016. Denne rapporten beskriver resultatene fra 2016. Det anbefales at det foreslåtte programmet følges og at det gjennomføres en tilsvarende undersøkelse sensommer eller tidlig høst 2017.

Summary

Title: Investigations related to action plans for remediation of Gunneklevfjorden. Detailed mapping of mercury and particle size distribution in water, survey no. 1.

Year: 2017

Author: Morten Schaanning, Bjørnar Beylich, Sabine Marty, Hans Fredrik Veiteberg Braaten

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN 978-82-577-6892-8

Previous mass balance calculations have shown that resuspension of contaminated sediments may be an important process explaining the concentrations of mercury in the water mass of Gunneklevfjorden. The objective of the work initiated here is primarily to investigate if detailed mapping of mercury and particles in the water can provide further evidence for this assumption. The report shows the results of the first of three surveys planned. Approximately 60 water samples were collected from 24 stations in the less than 1 km² wide and 10 m deep fjord, and analyzed for total mercury. Selected samples were filtered and reanalyzed to distinguish between dissolved and total concentrations. In addition, in situ profiles of temperature, salinity, turbidity and particle size distribution (PSD) were measured on standard CTD and a LISST100X probe at 15 of the stations sampled for mercury. The results showed two distinct layers separated at about the depth of the sills (~2.5 m) separating the fjord from the outside areas. Linear regressions revealed that the concentration of total mercury increased significantly ($p < 0.05$) with depth, whereas the concentration of dissolved mercury decreased with increasing depth. Principal component analyses of the PSD-data seemed to indicate a difference of the size pattern between the two water layers, but both the use of the instrument and the interpretation of the huge amount of data generated, is for the time being considered to be in a provisional test phase at our institute. We recommend that the proposed program is followed with a second survey in 2017.

1 Innledning

Tidligere utarbeidet massebalanse for Hg i Gunneklevfjorden viste at målt utlekking fra sedimentene sammen med øvrige kjente tilførsler ikke var tilstrekkelig til å forklare vannmassens innhold av Hg (Olsen, m.fl., 2015, Schaanning m.fl., 2015). Det ble derfor konkludert at resuspensjon fra sedimentene kunne gi et vesentlig tilskudd til Hg i vannmassene i tillegg til utlekking som hovedsakelig måler fluksen av løst Hg. Et program for oppfølging av dette ble igangsatt i 2016. I hht programmet skal det tas prøver av fjordens vannmasser for måling av tot. Hg og suspenderte partikler skal undersøkes in situ med laseroptisk sonde (Lisst 100x). Måleprogrammet ble gjennomført første gang i 2016, med mulighet for gjentakelse for å fange opp variasjoner som kan genereres av ulike hydrografiske situasjoner (vannføring i Skienselva, vindpåvirkning). Eventuell gjentakelse vurderes på grunnlag av erfaringene som gjøres underveis. Denne rapporten danner således grunnlaget for beslutning om ev. nytt tokt i 2017.

2 Materiale og metoder

Feltarbeidet ble gjennomført 30. november 2016. Det ble tatt totalt 70 vannprøver i dyp fra 0.1 til 9 m (**Tabell 1**, Figur 1). Alle prøvene ble analysert for Tot.Hg. 26 prøver ble i tillegg analysert for løst Hg etter filtrering gjennom 0.45 µm nucleopore filter. Disse er merket* i tabellen.

Et utvalg av de samme stasjonene ble undersøkt med sonder dagen etter innsamling av vannprøvene. Vanlig CTD ble benyttet for bestemmelse av temperatur, saltholdighet og turbiditet. Turbiditeten

bestemmes her optisk som svekkelse av gjennomgangen av vanlig lys. Resultatene oppgis i enheten FTU som tilnærmet tilsvarende mengden av partikler (mg L⁻¹).

29.11.16

Ti

04:43 65cm

10:05 49cm

17:01 67cm

22:39 51cm

I tillegg ble det benyttet en laserbasert LISST 100x (Laser In-situ Scattering and Transmissometry) som måler størrelsesfordelingen (PSD, «Particle Size Distribution») av partikler i 32 fraksjoner fra 1 til 230 µm (Reynolds et al., 2010, Slade and Boss, 2015). Instrumentet beregner volumet av partiklene (µl L⁻¹) under antagelser om partikkelform. Kuleformete partikler er den vanligste modellen.

30.11.16

On

05:15 64cm

10:37 49cm

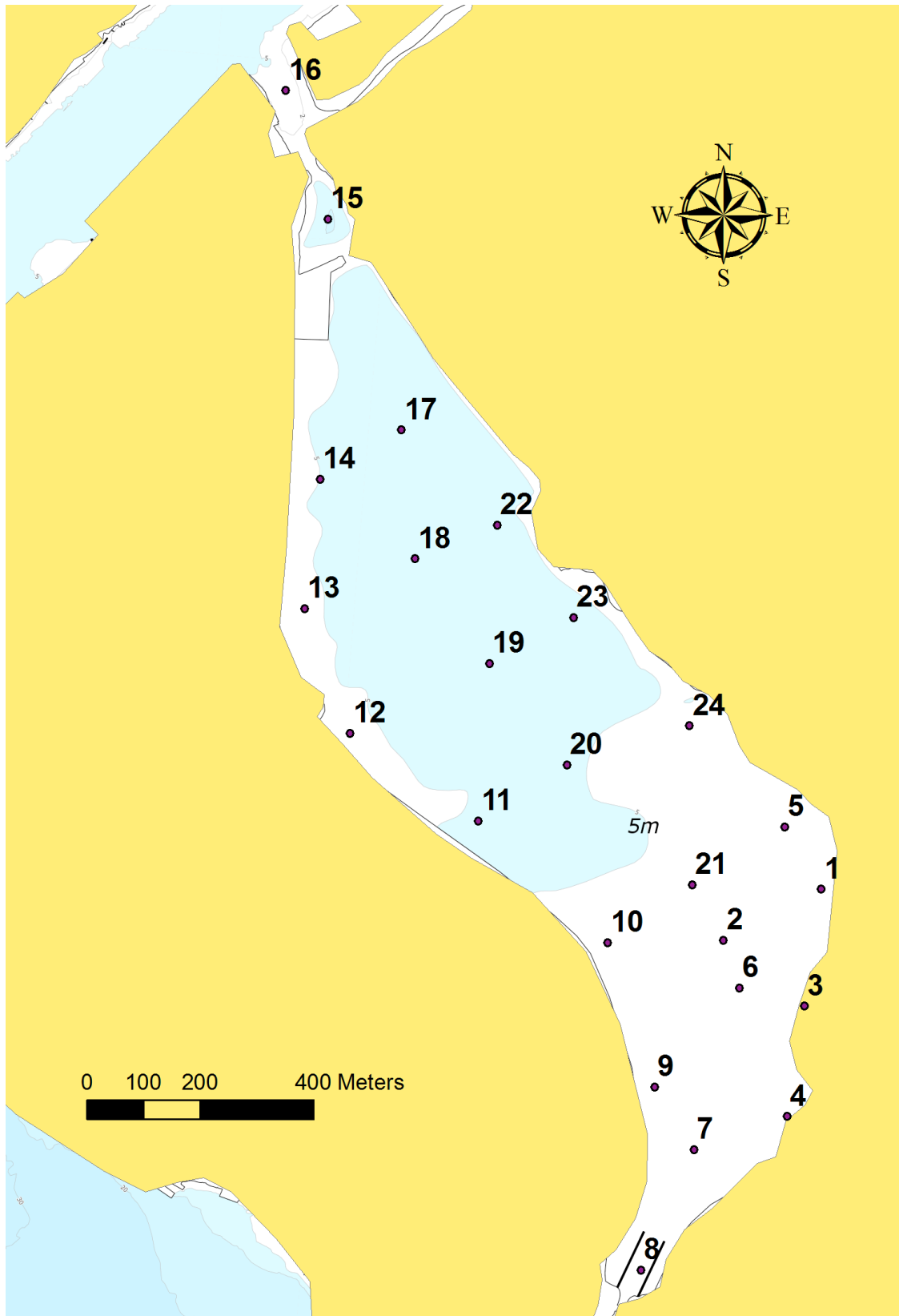
17:33 67cm

23:08 51cm

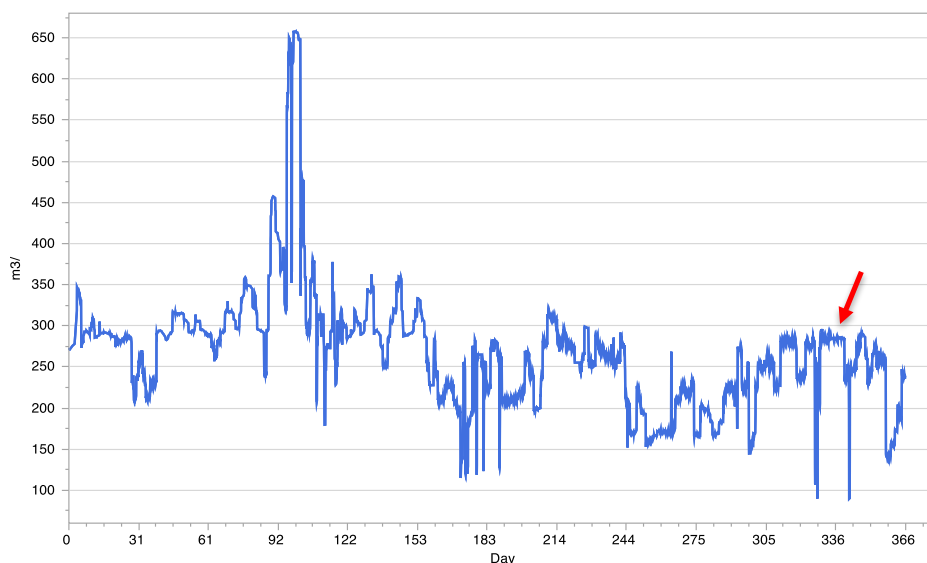
Utdraget fra norske tidevannstabeller for Helgeroa 29. og 30. november 2016 (se rammen til venstre) viser at mens CTD-målingene pågikk i tidsrommet kl 13:06 til 14:18 var tidevannet stigende fra 49 cm kl 10.37 til 67 cm kl 17:33. Samtidig var vannføringen i Skienselva ved Skotfos 285 m³ s⁻¹ (Figur 2).

Tabell 1. Prøvetaking Gunneklevfjorden 29.-30.11.2016. * = prøver analysert både for tot. Hg og løst Hg.

| Stasjon | lat | long | Vannndyp (m) | Vannprøve 29.11. kl. | Vannprøvedyp (m) | LISST 30.11. | CTD 30.11. |
|----------------|------------|-------------|-------------------------|---------------------------------|-----------------------------|-------------------------|-----------------------|
| 8 | 59,1147 | 9,6438 | 2,3 | 09:54 | 0,1; 1 | 13:05 | 13:06 |
| 7 | 59,1167 | 9,6451 | 2,6 | 10:01 | 0,1; 1 | 13:12 | 13:13 |
| 9 | 59,1176 | 9,6437 | 3,1 | 10:06 | 0,1; 1; 2 | | |
| 4 | 59,1173 | 9,6479 | 1 | 10:12 | 0,1 | 13:16 | 13:17 |
| 3 | 59,1191 | 9,6481 | 2,9 | 10:19 | 0,1*; 1* | 14:23 | 14:22 |
| 2 | 59,1200 | 9,6455 | 1,8 | 10:28 | 0,1* | 13:24 | 13:25 |
| 1 | 59,1209 | 9,6484 | 1,6 | 10:31 | 0,1* | 14:19 | 14:18 |
| 6 | 59,1193 | 9,6461 | 4,2 | 10:38 | 0,1; 1; 3 | 13:20 | 13:21 |
| 10 | 59,1198 | 9,6419 | 4,7 | 10:46 | 0,1; 1; 3 | | |
| 21 | 59,1208 | 9,6444 | 4,9 | 10:52 | 0,1*; 1; 3* | 13:33 | 13:34 |
| 5 | 59,1219 | 9,6471 | 3,3 | 10:59 | 0,1; 1; 2 | | |
| 24 | 59,1233 | 9,6439 | 5 | 11:08 | 0,1; 1; 3; 4 | | |
| 20 | 59,1226 | 9,6402 | 5,7 | 11:12 | 0,1; 1; 3; 4 | 13:37 | 13:38 |
| 11 | 59,1216 | 9,6377 | 3,4 | 11:22 | 0,1; 1; 2 | | |
| 12 | 59,1228 | 9,6335 | 1,4 | 11:29 | 0,1 | 14:14 | 14:12 |
| 19 | 59,1241 | 9,6376 | 4,7 | 11:36 | 0,1*; 1; 3* | 13:45 | 13:43 |
| 23 | 59,1249 | 9,6401 | 6,2 | 11:43 | 0,1*; 1*; 3*; 5* | | |
| 22 | 59,1263 | 9,6375 | 7 | 11:49 | 0,1; 1; 3; 5 | | |
| 18 | 59,1256 | 9,6351 | 6,2 | 11:33 | 0,1; 1; 3; 5 | 13:49 | 13:47 |
| 13 | 59,1247 | 9,6318 | 3,8 | 11:41 | 0,1*; 1*; 2* | | |
| 14 | 59,1268 | 9,6319 | 3,3 | 11:44 | 0,1; 1; 2 | | |
| 17 | 59,1276 | 9,6343 | 6,8 | 11:49 | 0,1*; 1; 3; 5* | 13:53 | 13:52 |
| 15 | 59,1309 | 9,6315 | 10,9 | 11:58 | 0,1*; 1*; 3*; 5*; 7*; 9* | 13:58 | 13:56 |
| 16 | 59,1329 | 9,6299 | 4,6 | 12:05 | 0,1*; 1*; 3* | 14:03 | 14:01 |



Figur 1. Stasjonskart og utdrag av tidevannstabell for Helgeroa for tidsrommet rundt prøveinnsamling og målinger. I området mellom stasjon 5 og 7 er det et område med undervannsvegetasjon («enga») fra strandkanten og ned til 2-3 m dyp (Mjelde, 2015).



Figur 2. Vannføring ved Skotfos 01.01.-31.12.2016. Pila markerer tidspunkt for prøvetaking. (Data fra NVE).

3 Resultater

3.1 Saltholdighet og temperatur

Saltholdighet er en typisk konservativ egenskap som bare endres som følge av blanding av vannmasser med ulik saltholdighet. Temperaturen regnes vanligvis også som en konservativ egenskap men nær overflaten kan avkjøling og oppvarming endre temperaturen uten at det nødvendigvis også foregår noen blanding av vannmasser. Sees det bort fra denne ikke-konservative egenskapen, vil alle blandinger av to vanntyper i et TS-diagram ligge på en rett linje mellom de to vanntypene.

TS diagrammet i Figur 3 er basert på sondemålinger integrert i 50 cm intervaller fra overflaten til bunnen. Målingene er tilegnet midlere dyp innenfor hvert intervall. Dypet 0,25 m angir således gjennomsnittlig temperatur og saltholdighet mellom 0 og 0,5 m dyp. Diagrammet viser tre markert forskjellige vanntyper: 1) kaldt vann med lav saltholdighet (stasjon 15; 0.25 m), 2) saltere vann nær bunnen på stasjonen nærmest Skienselva (stasjon 16; 4.25m), og 3) helt ferskt og relativt varmt vann i overflaten på stasjon 18.

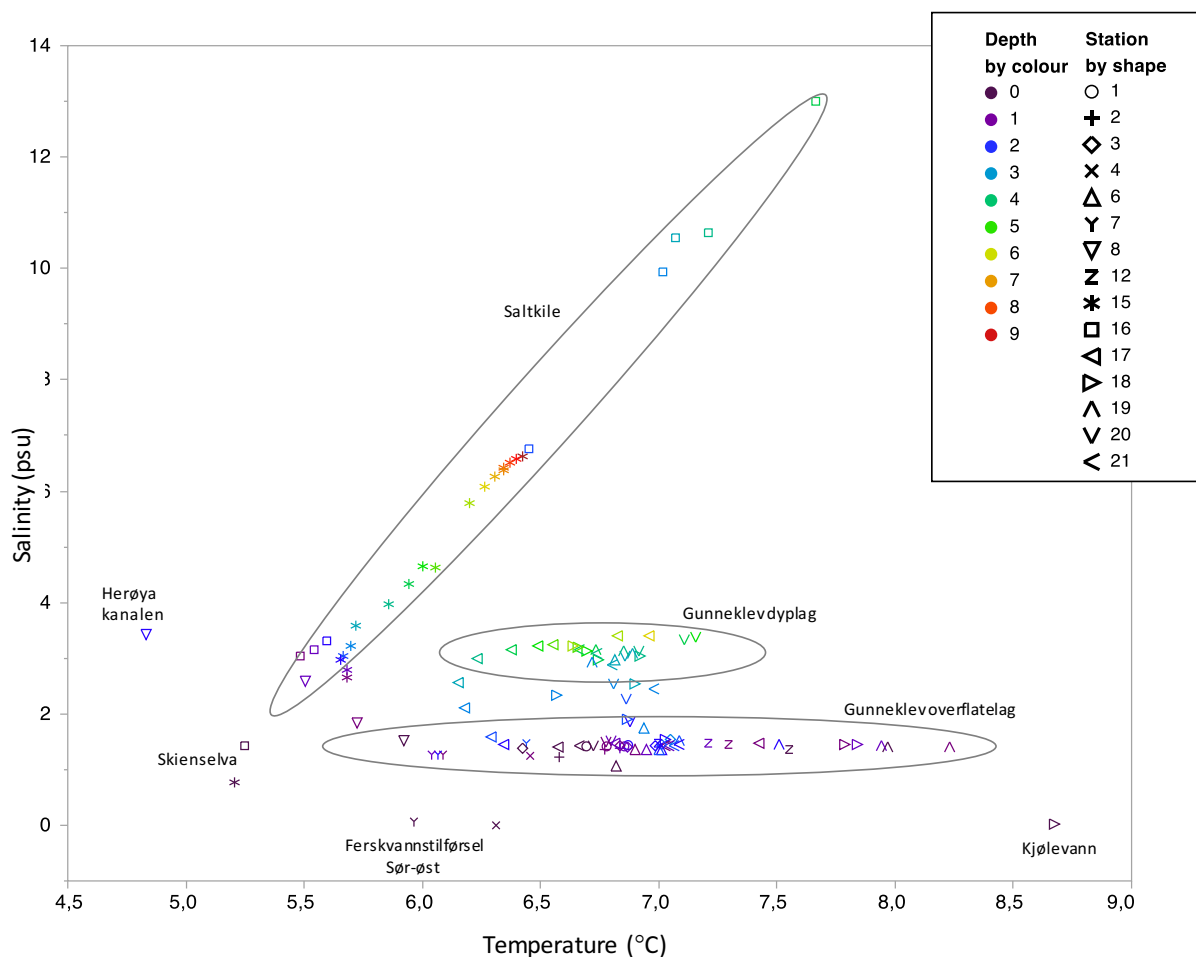
Stasjon 18 er lokalisert midt fjords rett utenfor kjølevannsutslippet fra Yara og det er liten tvil om at denne prøven var påvirket av dette utslippet. Kilen med sjøvann (saltkilen) som trenger oppover elva under det utstrømmende elvevannet vises tydelig fra 2.5 til 4.5 m dyp på stasjon 16 nærmest elva og vanntypen i terskeldyp 2-2.5 m (blått kvadrat) er veldig lik vanntypen på 5.5-9.5 m dyp på stasjon 15 (gulgrønne-røde stjerner). Dette viser at det tunge vannet i saltkilen har strømmet inn over terskelen nærmest elva og fylt opp bassenget mellom de to tersklene. Videre innstrømning ser ut til å ha påvirket midlere dyp (2,5-4 m) på stasjon 17 (blågrønne trekant med spiss mot venstre) og 2,5-3 m på stasjon 18 (blågrønn trekant med spiss mot høyre). De blågrønne vinklene i overgangen mellom de to vannlagene kan indikere vertikalblanding ved stasjonene 20 og 21 som ligger lenger inne i fjorden. Det er ingen indikasjon på at dette området er påvirket av innstrømmende vann som ville gitt et negativt temperatur-avvik.

Potensialet for nedsynking av innstrømmende vann sees tydelig i Figur 4 der vann over terskeldyp på begge stasjonene ved Kulltangen (stasjon 15 og 16) og også ved båthavna i sydvest (stasjon 8) har høyere tetthet enn vannet i resten av fjorden. Vannet i 2-2,5m dyp ved Kulltangen har klart potensiale til å skifte

ut dypvannet i fjorden dersom den observerte situasjonen vedvarer tilstrekkelig lenge. Vannet som er påvirket av innstrømning gjennom Herøykanalen er kaldere enn vannet i saltvannskilen i elva og kan spores innover til stasjon 7, men synes ikke å ha potensiale til å påvirke dypvannet.

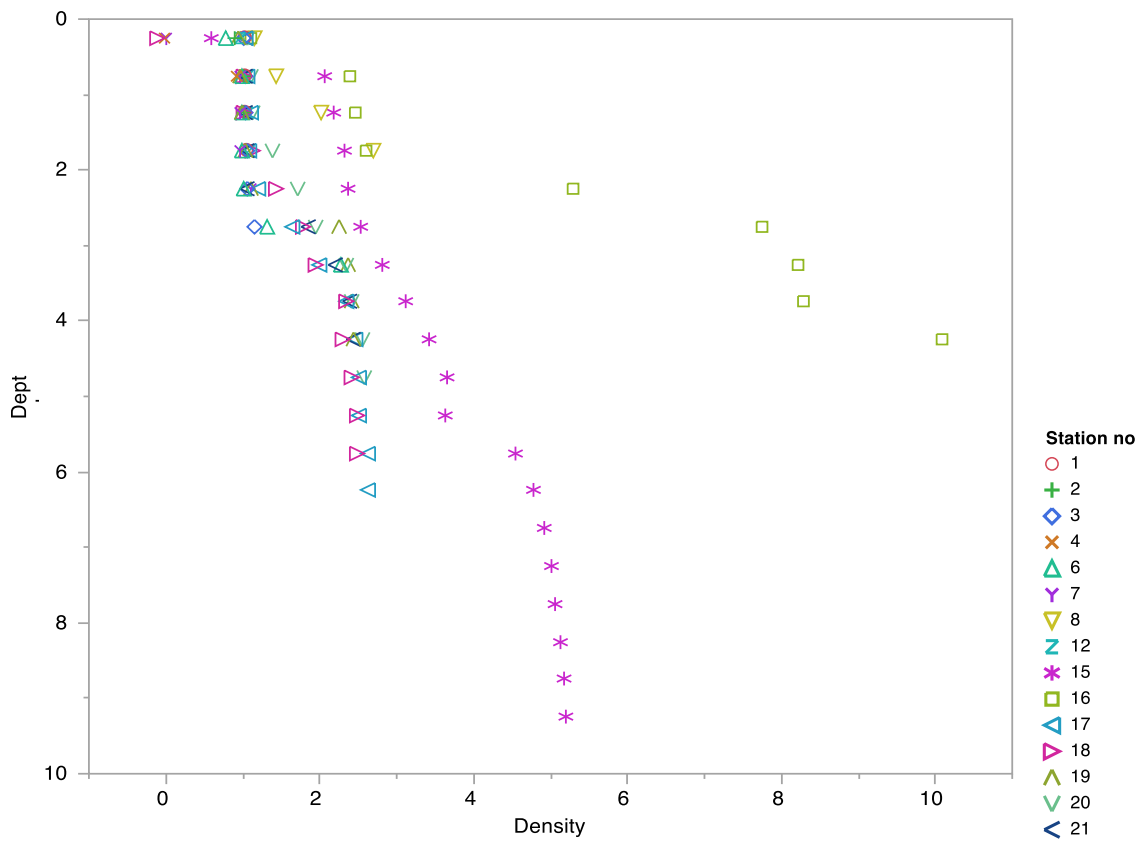
Det kan også se ut som det tilføres noe kaldt vann i overflaten ved stasjonene like nord og øst for båthavna (stasjon 7; 0.25m og stasjon 4; 0.25 m).

Vannmassene inne i fjorden er tydelig todelt i et overflatelag med saltholdighet ca 1.5 (tetthet ca $1,0^1$) og et dypvann med saltholdighet ca 3 (tetthet ca 2,3). Figur 4 viser at dette skillet går ganske presist ved 2.5-3 m som tilsvarer terskeldypene mot Skienselva og Frierfjorden. Både overflatelaget og dyplaget er godt gjennomblandet med små gradienter i saltholdighet og tetthet. Overflatelaget spenner over et relativt stort temperaturintervall fra 6 til 8 °C. Dette kan skyldes avgivelse av varme til atmosfæren som på denne årstiden generelt vil ha lavere temperatur enn overflatelaget og kjølevannet.

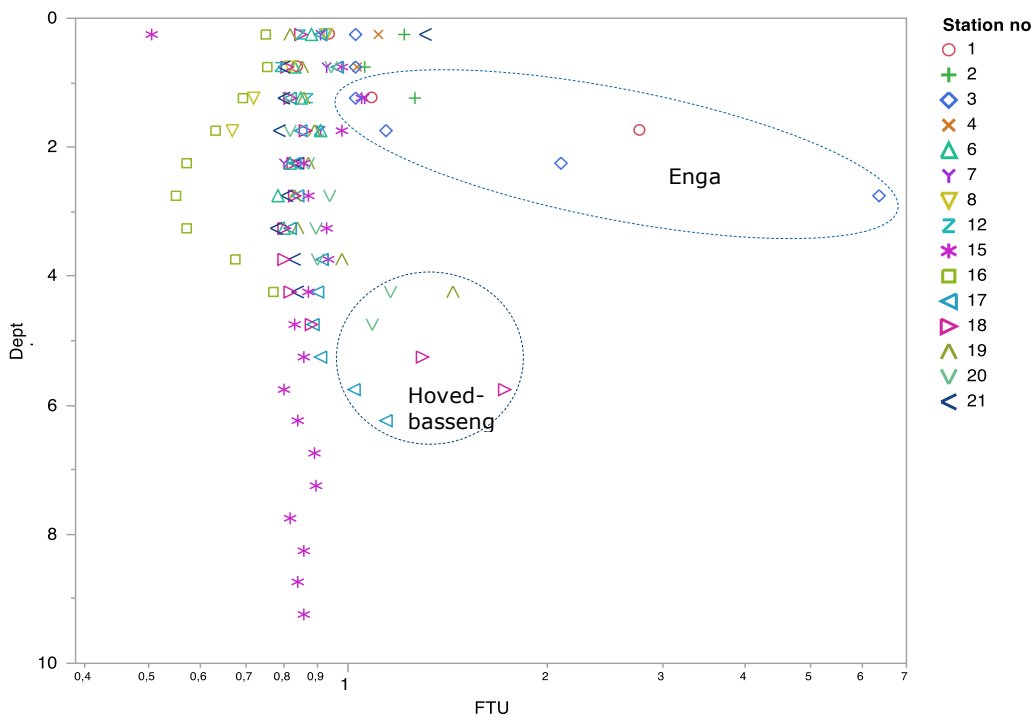


Figur 3. TS diagram for Gunneklevfjorden og Skienselva (st. 16) 30.11.2016 kl 12:06-13:20. Punktene viser 0,5 m gjennomsnittsverdier for dypene 0,25m, 0,75m, 1,25m, 1,75 m osv til bunnen på hver stasjon. Dypet er vist med symbolenes farge og stasjonsnummer er vist med symbolenes form som angitt i tegnforklaring.

¹Egentlig σ_t som er (tetthet -1)*1000.



Figur 4. Vertikal variasjon av tetthet (σ_t) i Gunneklevfjorden og Skienselva (st. 16) 30.11.2016.



Figur 5. Turbiditet målt med CTD-sonde i Gunneklevfjorden og Skienselva (st. 16) 30.11.2016.

3.2 Turbiditet

Turbiditeten varierte mellom 0,75 og 1,0 FTU i de fleste prøvene og det var ingen klar variasjon med dypet (Figur 5). I de øvre 2m av vannsøylen var turbiditeten ofte noe lavere på de tre stasjonene med innstrømmende vann (stasjon 15, 8 og 16). På stasjonene i området i og nær undervannsvegetasjon («enga»), var det ofte høy turbiditet (stasjonene 1, 2, 3 og 4), og den høye turbiditeten nærmest overflaten på stasjon 21 kan muligens også skyldes spredning av partikler fra dette området. Utover dette ble det observert relativt høy turbiditet nærmest bunnen på stasjonene midt i fjorden (stasjon 17, 18, 19 og 20).

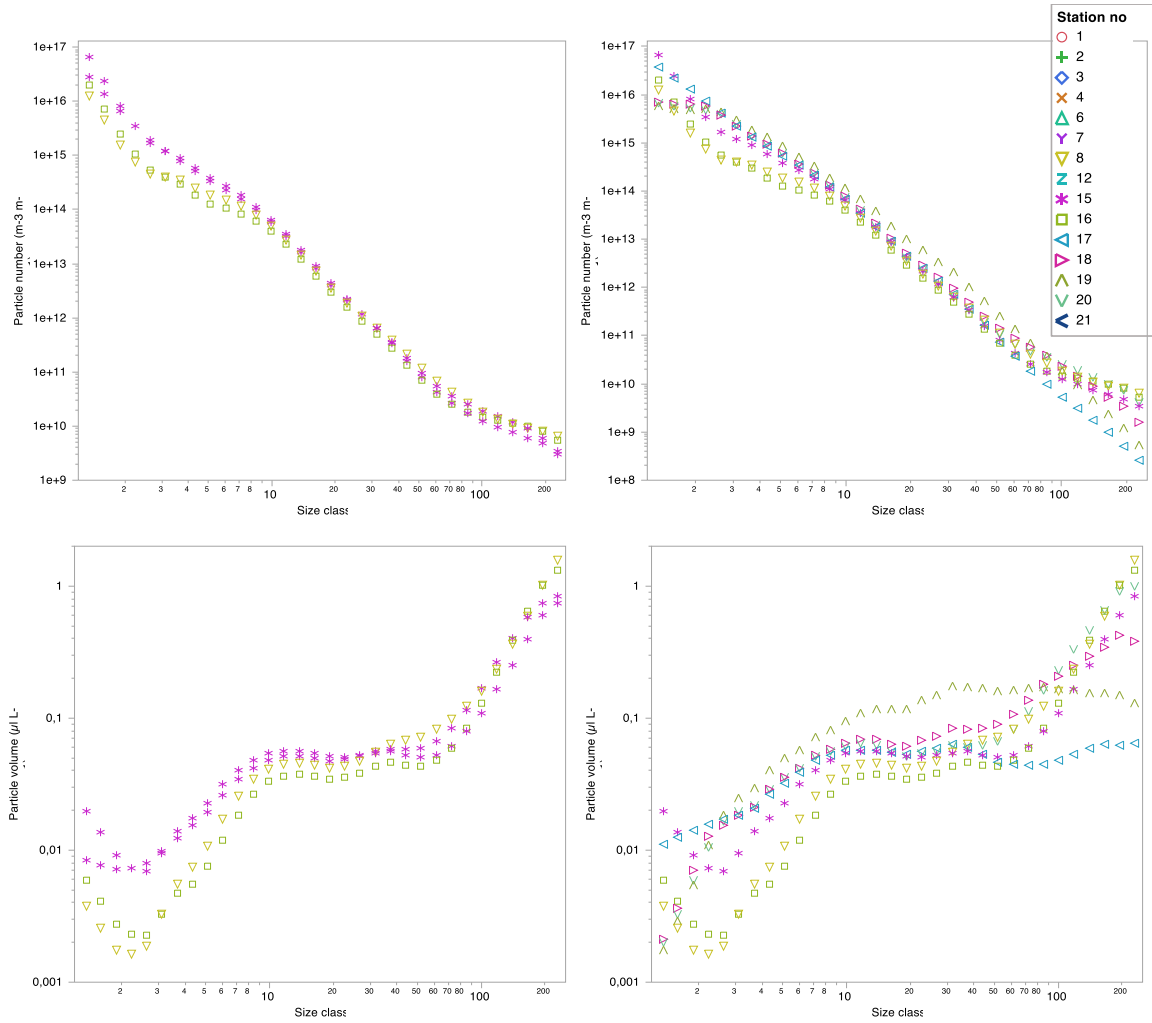
3.3 Målinger med LISST 100X

Størrelsesfordelingen PSD (Particle Size Distribution) er vist både som totalt volum (Figur 6, nederst) og antall partikler (Figur 6, øverst) innenfor hver av de 32 størrelsesintervallene som LISST 100X registrerer. Det er her antatt at partiklene har kuleform (spheric model). Det innstrømmende vannet i terskelområdet med lavest turbiditet (Figur 6, venstre) hadde mest volum i de største klassene og også en hale med økende volumer i de minste klassene. Utvalget av prøver vist i diagrammet nederst til høyre, der prøver fra dyplaget med høyere turbiditet er inkludert, dekker ytterpunktene for skyen av punkter for de totalt 78 profilene ekstrahert fra instrumentet.

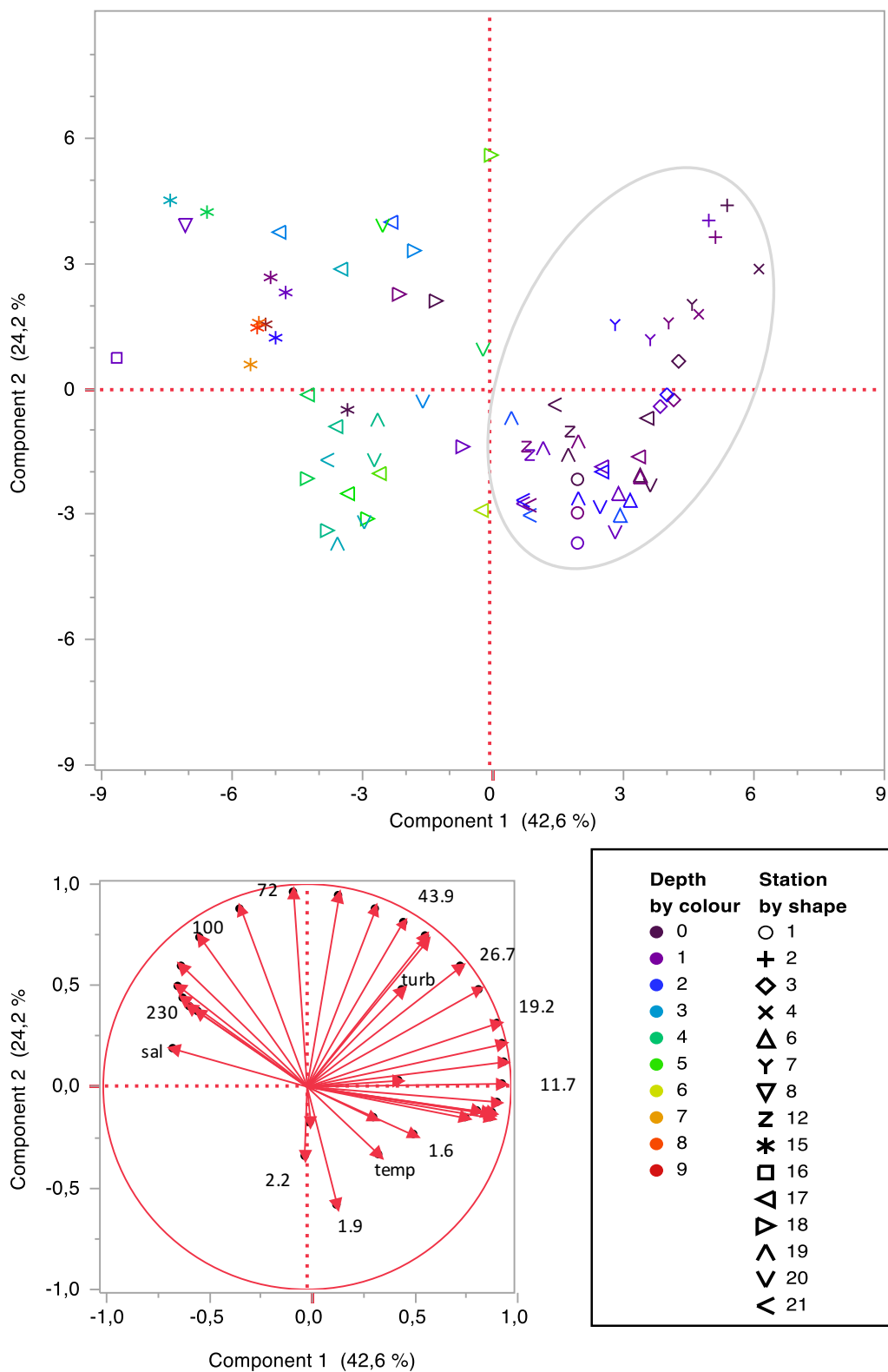
En annen måte å karakterisere partiklene på er å gjøre en PCA (Principal Component Analyses) som er en slags mønsteranalyse. En slik analyse, gjort for de 32 størrelsesklassene samt saltholdighet, temperatur og turbiditet, er vist i Figur 7. Score plottet ville vært tilnærmet identisk dersom temperatur, saltholdighet og turbiditet hadde vært utelatt. Plottet viser at de fleste prøvene fra overflatelaget og ingen av prøvene fra dyplaget scorer positivt for komponent 1. Prøver fra overflatelaget som scorer negativt for komponent 1 er først og fremst prøvene fra stasjon 8, 15 og 16, dvs stasjonene der det ble observert innstrømmende vann. I tillegg finner vi de fire prøvene fra 0-2 m dyp på den kjølevannspåvirkede stasjon 18 i denne gruppen og prøvene fra 2-3 m dyp på stasjon 17 som var påvirket av innstrømmende vann fra Skienselva (smlgn. Figur 3).

Scorene på komponent 1 indikerer at overflatelaget er karakterisert ved små og mellomstore partikler opp til 40-50 μm mens dypvannet og overflatelaget på stasjoner påvirket av innstrømmende vann eller kjølevann er karakterisert ved større partikler. En mulig forklaring på dette er at høyere turbulens i innstrømmende vannmasser og kjølevann bidrar til at større partikler vil kunne holde seg svevende i overflatelaget. Dypvannet i Gunneklevfjorden er i svært lite bevegelse og i den grad disse vannmassene inneholder store partikler må det være partikler med lav tetthet og liten synkehastighet, f.eks. organiske aggregater eller fnokker løsrevet fra sedimentene.

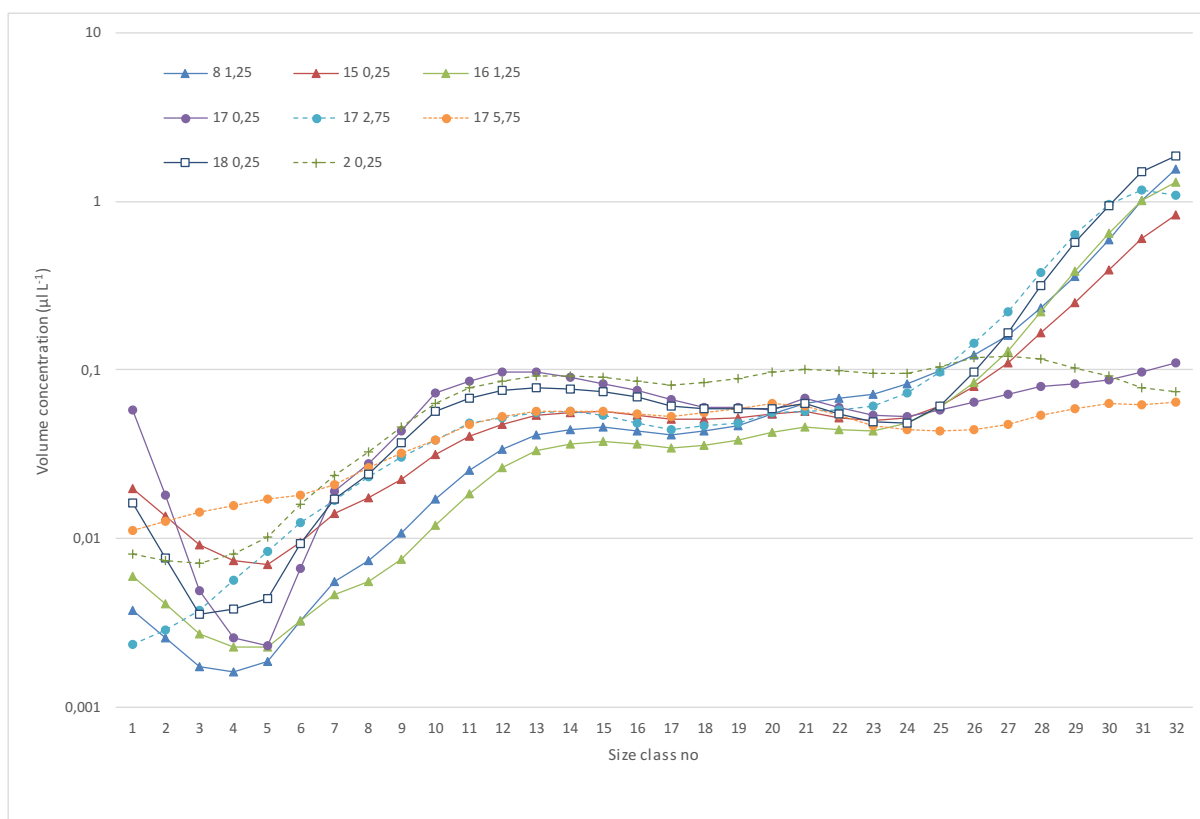
Noen utvalgte partikkelprofiler er vist i Figur 8. Halene som peker oppover på høyre side viser høye konsentrasjoner av store partikler på stasjonene med innstrømmende vann (0-1,5 m på stasjon 8, 15, 16 og 2,5-3 m på stasjon 17) og kjølevann (0-0,5 m på stasjon 18). Prøvene fra stasjonene 2 og 17 viser at dette innslaget av store partikler ikke var tilstede i overflatelaget (0-0,5 m) verken i nordøst eller sydvest. Prøven nær bunnen på stasjon 17 (5,5-6m) hadde ikke den typiske halen som var karakteristisk for dyplaget. I PCA-plottet gjenfinnes denne prøven nær inntil gruppen for overflatelaget med score 0 for komponent 1 og score -3 for komponent 2. Flere profiler for dyplaget (stasjon 18, 19 og 20) er vist i Figur 6.



Figur 6. Resultater fra målinger med LISST 100X i Gunneklevfjorden og Skienselva (st. 16) 30.11.2016. Profilene til venstre viser innstrømmende vann med lavt partikkelinnhold (stasjon 8, 15 og 16, overflate). Profilene til høyre viser i tillegg vann med høyt partikkelinnhold (stasjon 17, 18, 19 og 20, nærmest bunnen). De to øverste diagrammene viser antall partikler, de to nederste viser partikkelvolum antatt sfærisk form. Profilene representerer ytterpunktene for variasjonene målt i Gunneklevfjorden denne dagen.



Figur 7. PCA (Principal Component Analyses) av volumkonsentrasjonen for hver av de 32 størrelsesfraksjonene samt turbiditet, temperatur og saltholdighet. Score plot (øverst) viser de to første komponentene i hver prøve. Loading plot (nederst til venstre) viser vektorene for hvert enkelt parameter med tall som angir partikkelstørrelse (μm) for noen av de 32 fraksjonene.



Figur 8. Particle size distribution (PSD) at selected stations (2, 8, 15, 16, 17 and 18) and depths (0.25 m, 1.25 m, 2.75 m and 5.75 m). Legend shows station no and depth.

3.4 Kvikksølv

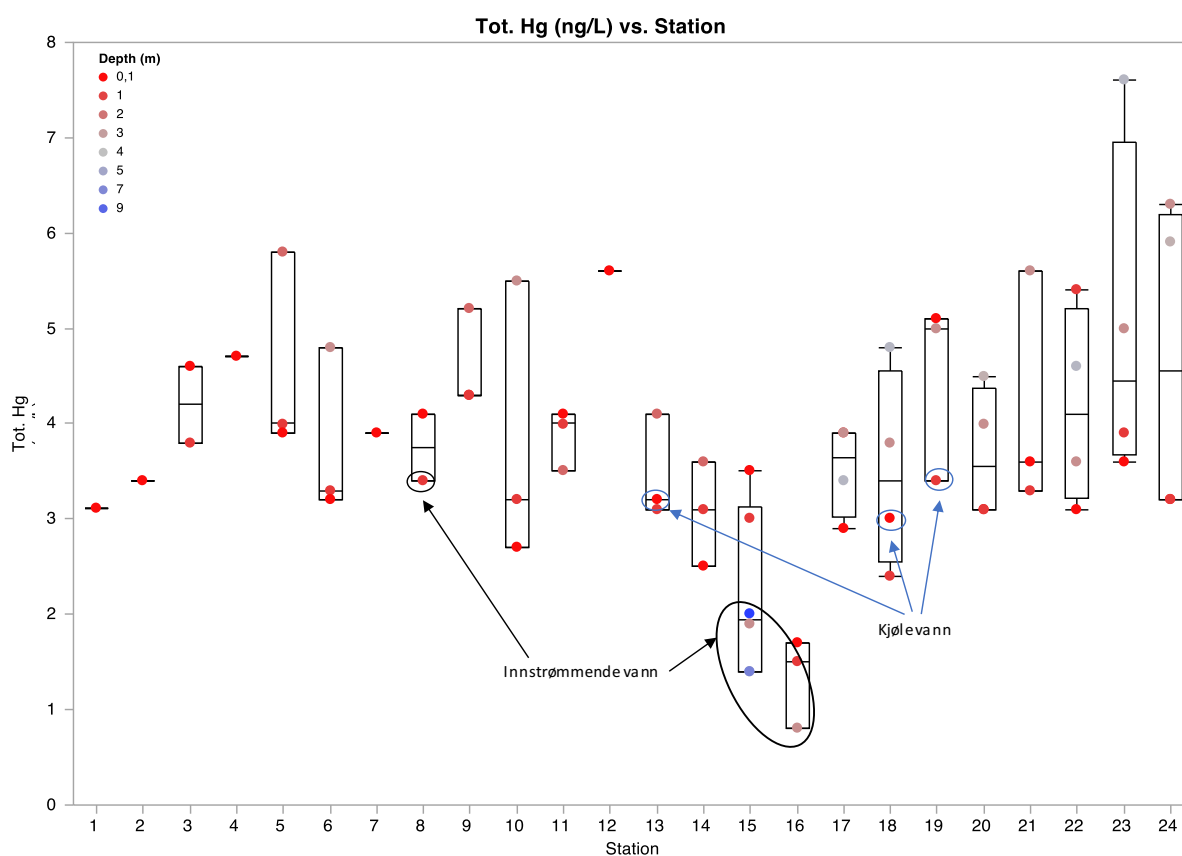
Den laveste konsentrasjonen av kvikksølv (Figur 9) ble observert i det innstrømmende vannet på 2m dyp på stasjon 16 og lave konsentrasjoner ble også observert ned mot bunnen på stasjon 15. At konsentrasjonene nærmest overflaten var noe høyere enn i dypet på disse to stasjonene skyldes at innstrømningen over terskelen kompenseres av utstrømmende vann i overflaten til tross for at vannstanden var stigende på det tidspunktet prøvene ble tatt. Konsentrasjonene i det innstrømmende vannet sør i fjorden (stasjon 8) var høyere enn ved Kulltangen og dette kan skyldes både større innblanding av gammelt vann fra Gunneklevfjorden, oppvirvling fra båthavna eller påvirkning fra avleiringer under innstrømning gjennom den lange og grunne Herøykanalen.

Prøvene påvirket av kjølevannet inneholdt mer Hg enn det innstrømmende vannet fra Skienselva, men konsentrasjonene var lave sammenlignet med de fleste prøvene fra fjorden. Både kjølevannet og det innstrømmende vannet vil bidra til å holde konsentrasjonene i Gunneklevfjorden på et relativt lavt nivå. Bortsett fra stasjon 15 som var sterkt påvirket av det innstrømmende vannet, ble de høyeste konsentrasjonene generelt observert nærmest bunnen i de dypeste områdene (Figur 9, Figur 10). Det vil si prøver fra 4-5 m dyp som bare ble prøvetatt på stasjonene 17, 18, 20, 22, 23 og 24. Tendensen til økende konsentrasjoner inn mot land på motsatt side av Herøya (stasjon 23 og 24) skyldes sannsynligvis en kombinasjon av relativt store vanddyb og lang oppholdstid for vannmassene i denne delen av fjorden. Det ble dessverre ikke målt turbiditet i dette området, men stasjonene 17- 20 viste alle noe forhøyet turbiditet sammenlignet med resten av fjorden. Dette er som forventet dersom resuspensjon av sedimenter er en viktig kilde til kvikksølv i vannmassene. Relativt høye konsentrasjoner nærmest bunnen (2-3 m dyp) på

stasjonene 5, 6, 9 og 10 kan også best forklares med lang oppholdstid og utlekking fra sedimentene. Turbiditet ble ikke målt på disse stasjonene så det er ikke noe grunnlag her for å vurdere eventuell betydning av resuspensjon. Noen av stasjonene i enga viste økende turbiditet ned mot bunnen og dette kan skyldes større aktivitet av dyr (både fugl, fisk og sediment-levende dyr). Vannprøvene for analyser av Hg ble imidlertid tatt høyere opp i vannmassen (0,1-1m) og konsentrasjonene på stasjon 1 og 2 var blant de laveste i fjorden.

Den høyeste konsentrasjonen i overflatelaget (5,6 ng L⁻¹) ble observert på stasjon 12. Stasjonen er grunn og ligger på Herøya-siden, like ved strandkanten. Både utlekking fra sedimentene og avrenning fra land kan være kilde til denne litt forhøyete verdien. Relativt lave konsentrasjoner i 3 m dyp på stasjon 18 og 3 og 5 m på stasjon 17 bekrefter TS diagrammet som indikerer at disse vannmassene er påvirket av det innstrømmende vannet.

Vertikalfordelingen av kvikksølv (Figur 11) viste signifikant økende konsentrasjon av partikulert Hg og signifikant avtagende konsentrasjon av løst Hg med økende dyp. Det er betydelig spredning i disse dataene og relativt få målinger i dyplaget, men trenden er som forventet dersom resuspensjon av partikkelbundet Hg fra sedimentene er en viktigere kilde til Hg i fjordens vannmasser enn utlekking av løst Hg. Resultatene bekrefter også tidligere målinger ved in situ filtrering av store vannprøver (Tabell 2) som også viste at konsentrasjonen av Hg på partiklene var større i dypvannet enn i overflatelaget. Bindingen av Hg til partiklene kan foregå både i de frie vannmassene og på sedimentoverflaten der de vil eksponeres for høye konsentrasjoner i porevannet. Resuspenderte partikler som oppholder seg lenge i dyplaget og i gjentatte perioder kan tenkes å hvile på sedimentoverflaten der de vil kunne plukke opp kvikksølv fra det sterkt forurensede porevannet, vil ventelig øke sitt innhold av Hg over tid.



Figur 9. Total konsentrasjon av kvikksølv i alle prøver innsamlet på stigende vannstand 29.11.2016.

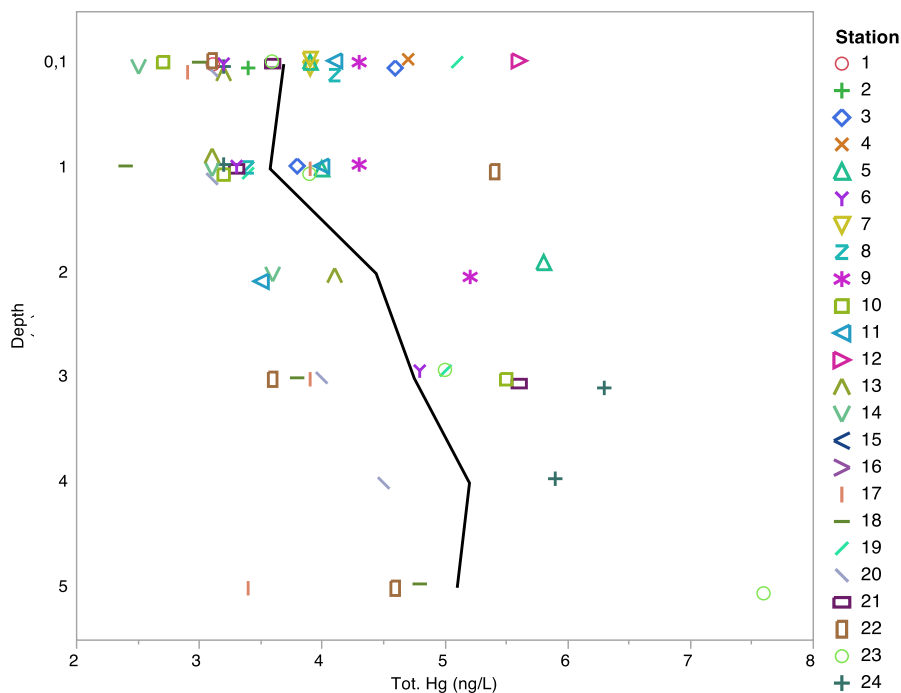
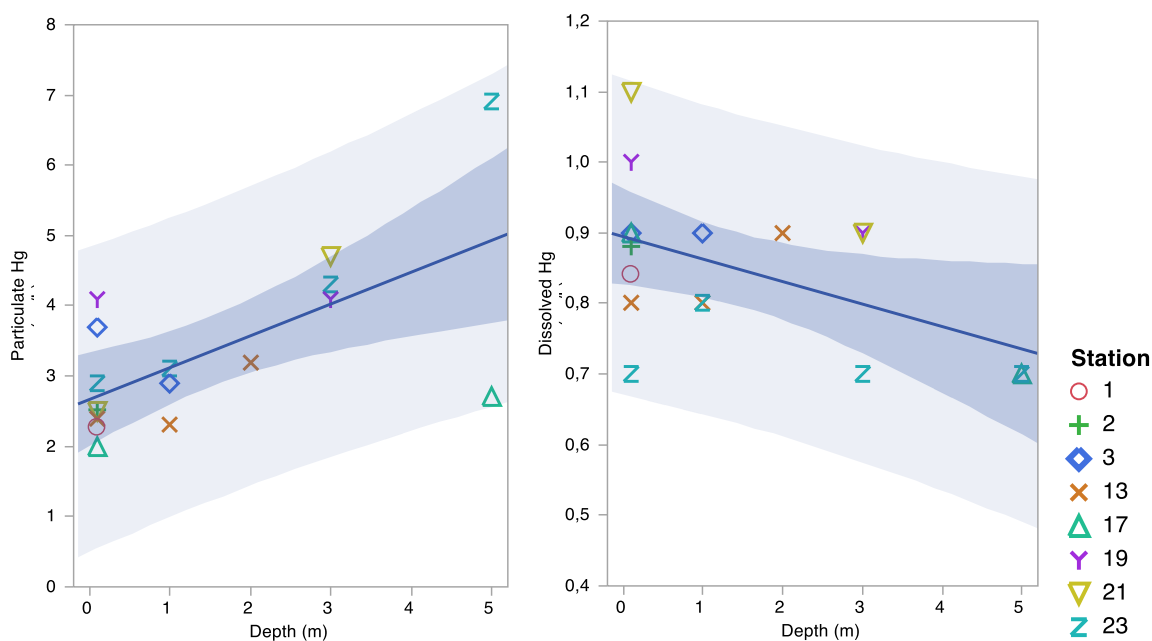


Figure 10. Vertical distribution of Hg in Gunneklefjorden 29.11.2016. Station 15 and 16 omitted. Line is drawn through mean values at each depth.



$$\text{Particulate Hg (ng/L)} = 2,67 + 0,452 \cdot \text{Depth},$$

$$R^2=0,411, p=0,0056$$

$$\text{Diss. Hg (ng/L)} = 0,89 - 0,0318 \cdot \text{Depth (m)}$$

$$R^2= 0,244, p=0,0437$$

Figure 11. Distribution with depth of particulate (left) and dissolved (right) Hg. Curve equations, correlation coefficients (R^2) and probabilities p (that slopes are not different from zero) are shown below the respective plots.

Tabell 2. Konsentrasjonen av kvikksølv fordelt på løst og fast fase i vannprøver fra 1 m og 5 m dyp i Gunneklevfjorden i mars 2015 (fra Allan, 2015).

| | 1m ± stdev | 5m |
|-------------------------------------|------------|-----|
| Løst (ng l ⁻¹) | 1,5 ± 0,3 | 1,2 |
| Partikulært (ng l ⁻¹) | 1,8 ± 0,8 | 3,9 |
| Partikulært (µg g ⁻¹ TS) | 1,2 ± 0,6 | 3,0 |

4 Oppsummerende diskusjon og anbefalinger

Prøvetakingen viste at innstrømmende salt vann med potensiale for å skifte ut dypvannet i fjorden var tilstede i alle dyp på stasjonene utenfor den innerste av de to tersklene mot Skienselva (stasjon 15 og 16). Det innstrømmende vannet hadde bare i mindre grad påvirket vannmassene lenger innover i fjorden. Relativt høy saltholdighet på stasjonen ved båthavna like ved utløpet til Herøykanalen (stasjon 8) viste påvirkning av innstrømmende vann også i dette området.

På stasjonene lenger inne i Gunneklevfjorden viste CTD målingene et relativt tydelig skille mellom et overflatelag 0-2,5 m og et dyplag >2,5 m. Som vist i Tabell 3 var typisk saltholdighet 1,2-1,5 i overflatelaget og 2,7-3,1 i dyplaget. Overflatelaget var noen tidels grader varmere, mens turbiditeten ikke var systematisk forskjellig i de to lagene. Overgangssonen ved 2,5 m dyp tilsvarer terskeldypene i begge ender av fjorden.

Turbiditeten inne i fjorden var generelt noe høyere (>0,7 FTU) enn i det innstrømmende vannet på stasjon 8 og 16 der turbiditeten var mellom 0,5 og 0,7 FTU. De høyeste turbiditetene ble registrert nærmest bunnen, både i dyplaget midt i bassenget (stasjonene 17-20) og spesielt i overflatelaget inne i enga (stasjonene 1-3).

Lisst-målingene syntes å indikere en forskjell i størrelsesfordelingen (PSD) mellom partiklene fra overflatelaget og de fra dyplaget. PCA-analysen viste således to store klustere der prøvene fra overflatelaget inne i fjorden var assosiert med de minste partiklene (1-62 µm) mens dypvannet var assosiert med de større partiklene (72-230 µm). Det innstrømmende vannet på de tre stasjonene 8, 15 og 16 grupperte seg sammen med prøvene assosiert med de store partiklene og en mulig forklaring på dette kan være at de største partiklene synker ut når turbulensen avtar fra området ved tersklene og innover i fjorden. Også overflatelaget på stasjon 18 plasserte seg i gruppen for de større partiklene. Denne stasjonen var mest påvirket av kjølevannet og forklaringen på det avvikende PSD mønsteret kan være høyere turbulens på samme måte som ved tersklene eller også at kilden er en helt annen. Kjølevannet tas inn fra relativt stort dyp i en nærliggende innsjø og PSD-mønsteret kan selvsagt også påvirkes i prosessen.

Det var en god del støy i filene fra Lisst-instrumentet og en rekke registreringer og dybdeintervaller ble tatt ut av datasettet fordi de ble antatt å skyldes feilmålinger. Et av problemene kan ha vært forstyrrelser fra luftbobler på instrumentet. Bedrede felrutiner vil kunne avhjelpe dette problemet ved et eventuelt seinere tokt i fjorden.

Tabell 3. Sammendrag av CTD-målinger i overflatelag og dyplag i Gunneklevfjorden 30.11.2017. Omfatter data fra alle stasjoner unntatt 8, 15 og 16 som var påvirket av innstrømmende vann.

| | Sal (psu) | Temp (°C) | Sigma-t | FTU |
|-----------------------------|--------------|--------------|---------|------|
| <u>Overflatelag 0-2,5 m</u> | | | | |
| Mean | 1,365 | 6,94 | 0,995 | 0,98 |
| Std Dev | 0,370 | 0,54 | 0,291 | 0,32 |
| Upper 95% Mean | 1,466 | 7,09 | 1,075 | 1,07 |
| Lower 95% Mean | 1,263 | 6,79 | 0,915 | 0,89 |
| N | 53 | 53 | 53 | 53 |
| <u>Dyplag 2,5-6,5 m</u> | | | | |
| Mean | 2,905 | 6,74 | 2,238 | 1,13 |
| Std Dev | 0,463 | 0,25 | 0,369 | 1,00 |
| Upper 95% Mean | 3,075 | 6,83 | 2,373 | 1,49 |
| Lower 95% Mean | 2,735 | 6,65 | 2,102 | 0,76 |
| N | 31 | 31 | 31 | 31 |

I tillegg til det innstrømmende vannet over tersklene i begge ender av fjorden, slippes det ut betydelige mengder kjølevann fra Herøya i nærheten av stasjon 13. Dette vannet er ferskt og ble påvist i minst fortynt form i overflaten på stasjon 18 midt i fjorden (saltholdighet 0,03 psu, temperatur 8,67°C). Både kjølevannet og det innstrømmende vannet inneholdt mindre Hg enn vannet inne i fjorden. Dette var i overensstemmelse med massebalansemodellen i tiltaksplanen. Denne antok at konsentrasjonene av kvikksølv i vannmassene var et resultat av at tilførslene (i hovedsak resuspensjon og utlekking fra sedimentene og opptak fra atmosfæren) ble balansert ved fortynningen fra kjølevannet og det innstrømmende tidevannet.

TS-diagrammet indikerte at det innstrømmende vannet nådde innover i fjorden til stasjon 17 der det påvirket store deler av vannsøylen (Figur 3). Dette kan forklare hvorfor konsentrasjonen av Hg i 5 m dyp var svært lav sammenlignet med konsentrasjonene observert nærmest bunnen på de andre stasjonene der prøver ble tatt i dyplaget, dvs stasjonene 18- 24 (Figur 10). Bortsett fra denne ene prøven var det en generell sammenheng mellom høye konsentrasjoner av Hg (Figur 10) og høy turbiditet nærmest bunnen (Figur 5) i de sentrale delene av fjorden (stasjon 17-20). Uheldigvis ble det ikke gjort turbiditetsmålinger i området der de høyeste konsentrasjonene av Hg ble målt, dvs i dyplaget på stasjonene 23 og 24. Disse målingene kunne presumptivt gi en bedre bekreftelse på sammenhengen mellom høye konsentrasjoner av Hg og høy turbiditet i dyplaget som er det en kunne forvente dersom resuspensjon av sedimenter var en viktig kilde for spredning av Hg.

Undersøkelsen har vist at detaljkartlegging av partikler og partikkelbundet vs løst Hg kan gi vesentlig informasjon om hvilke faktorer som kontrollerer spredningen av kvikksølv i Gunneklevfjorden. Lisst-instrumentet har gitt helt ny informasjon om partikkelstørrelsesfordelingen og de oppnådde dataene indikerer at det er målbare forskjeller i PSD mønsteret i ulike deler av vannmassene. Svakheten i dette datasettet ligger i suboptimale feltrutiner for det nye LISST-instrumentet og at forholdsvis mange registreringer ble utelatt grunnet støy, spesielt i fjordens randområder. Nye rutiner for bruken av instrumentet er utviklet og vil bli implementert i fremtidige undersøkelser.

Dersom vi får anledning til å gjenta undersøkelsen vil det bli lagt vekt på

- forbedret feltrutine for å redusere støyen i Lisst-målingene
- flere målinger i dyplaget
- færre målinger i overflatelaget

- CTD og LISST profiler på alle stasjoner der det tas vannprøver

En detaljert prøvetakingsplan er foreslått i Tabell 4. Toktet vil fortrinnsvis bli forsøkt gjennomført under andre værmessige og hydrografiske forhold enn de som rådet under toktet i 2016. Realistisk vil sjansene være gode for å kunne gjennomføre en undersøkelse på fallende tidevann på sensommeren (august – september) når vannføringen i elva vil kunne være på laveste nivå. Det er vanskelig å planlegge for undersøkelser under gitte værforhold, men dersom muligheten byr seg vil feltarbeidet gjennomføres fortrinnsvis under eller like etter en periode med mer enn normal påvirkning av vind og bølger

Tabell 4. Forslag til prøvetakingsprogram for 2017.

| Stasjon | lat | long | Vannndyp (m) | Vannrøvedyp (m) | Vannrøvedyp (m) | Analyser Hg | | LISST | CTD |
|---------|--------------------|--------|--------------|--------------------|--------------------|-------------|----------|-------|-----|
| | | | | 2016 | Forslag 2017 | Total | Filtrert | | |
| 1 | 59,1209 | 9,6484 | 1,6 | 0,1 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 2 | 59,12 | 9,6455 | 1,8 | 0,1 | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 3 | 59,1191 | 9,6481 | 2,9 | 0,1; 1 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 4 | 59,1173 | 9,6479 | 1 | 0,1 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 5 | 59,1219 | 9,6471 | 3,3 | 0,1; 1; 2 | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 6 | 59,1193 | 9,6461 | 4,2 | 0,1; 1; 3 | 0,1; 1; 3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 7 | 59,1167 | 9,6451 | 2,6 | 0,1; 1 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 8 | 59,1147 | 9,6438 | 2,3 | 0,1; 1 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 9 | 59,1176 | 9,6437 | 3,1 | 0,1; 1; 2 | | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 10 | 59,1198 | 9,6419 | 4,7 | 0,1; 1; 3 | 0,1; 1; 3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 11 | 59,1216 | 9,6377 | 3,4 | 0,1; 1; 2 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 12 | 59,1228 | 9,6335 | 1,4 | 0,1 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 13 | 59,1247 | 9,6318 | 3,8 | 0,1; 1; 2 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 14 | 59,1268 | 9,6319 | 3,3 | 0,1; 1; 2 | 0,1 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 15 | 59,1309 | 9,6315 | 10,9 | 0,1; 1; 3; 5; 7; 9 | 0,1; 1; 3; 5; 7; 9 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 16 | 59,1329 | 9,6299 | 4,6 | 0,1; 1; 3 | 0,1; 1; 3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 17 | 59,1276 | 9,6343 | 6,8 | 0,1; 1; 3; 5 | 0,1; 1; 3; 5 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 18 | 59,1256 | 9,6351 | 6,2 | 0,1; 1; 3; 5 | 0,1; 1; 3; 5 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 19 | 59,1241 | 9,6376 | 4,7 | 0,1; 1; 3 | 0,1; 1; 3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 20 | 59,1226 | 9,6402 | 5,7 | 0,1; 1; 3; 4 | 0,1; 1; 3; 4 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 21 | 59,1208 | 9,6444 | 4,9 | 0,1; 1; 3 | 0,1; 1; 3 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 22 | 59,1263 | 9,6375 | 7 | 0,1; 1; 3; 5 | 0,1; 1; 3; 5 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 23 | 59,1249 | 9,6401 | 6,2 | 0,1; 1; 3; 5 | 0,1; 1; 3; 5 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 24 | 59,1233 | 9,6439 | 5 | 0,1; 1; 3; 4 | 0,1; 1; 3; 4 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| 25 | Ny mellom 15 og 17 | | 7? | | 0,1; 1; 3; 5; 7 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

5 Referanser

- Olsen M., Schaanning M., Eek E., Næs K., 2015. Beslutningsgrunnlag og tiltaksplan for forurensete sedimenter i Gunneklevfjorden. NIVA rapport 6922-2015, 192 pp.
- Mjelde, M. Vannvegetasjon i brakkvann, med spesiell vekt på Gunneklevfjorden i Telemark. NIVA-rapport 6767-2015, 23s.
- Reynolds, R. A., D. Stramski, V. M. Wright, and S. B. Woźniak (2010), Measurements and characterization of particle size distributions in coastal waters, *J. Geophys. Res.*, 115, C08024, doi:10.1029/2009JC005930.
- Schaanning, M.T, M.Olsen og K.Ndungu, 2015. Beslutningsgrunnlag og tiltaksplan for forurensete sedimenter i Gunneklevfjorden. Delrapport fra Aktivitet 4. Biotilgjengelighet av kvikksølv og dioksiner i sedimenter og effekter av behandling med aktivt kull. NIVA rapport 6796-2015. 37 s.
- Slade W.H. and E.Boss, 2015. Spectral attenuation and backscattering as indicators of average particle size. *Applied Optics*, Vol. 54, No. 24, 7264-7277.

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 samfunnsniv.



Norsk institutt for vannforskning

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