

Strømforhold og partikkelkonsentrasjoner i nedre del av Glomma utenfor Borg Havn



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 Strømførhold og partikkelkonsentrasjoner i nedre del av Glomma utenfor Borg Havn.	Løpenr. (for bestilling) 6911-2015	Dato November 2015
	Prosjektnr. Undernr. 14365	Sider Pris 27
Forfatter(e) André Staalstrøm Odd Arne Skogan	Fagområde Oseanografi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Vestfold	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) Rambøll AS	Oppdragsreferanse
--------------------------------	-------------------

Sammendrag:

Strømførhold og partikkelkonsentrasjoner i nedre del av Glomma utenfor Borg Havn er påvirket av at ferskvann møter saltvann. Ferskvannslaget tykkelse minker på vei utover mot havet. På stasjon G3 befinner kompensasjonsstrømmen seg mellom 3-7 m og 12-15 m dyp, avhengig av vannføring i Glomma og tidevannet. Under 12-15 m er strømstyrken svært lav. Ved mudring utenfor elvemunningen vil sannsynligheten være stor for at partikler vil fraktes oppover elva med kompensasjonsstrømmen. Turbiditeten i ferskvannslaget har middelværdi på 13 FNU og er i stor grad påvirket av tilførsel oppstrøms og ikke fra lokale kilder. I saltkilen er middelværdien mellom 3,5 og 9,2 FNU, men maksimalverdiene kan bli veldig høye og dette er trolig på grunn av lokale partikkelskyer som kommer fra for eksempel oppvirvling fra propeller.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Turbiditet	1. Turbidity
2. Strømmålinger	2. Water current measurement
3. Elvemunning	3. River mouth
4. Saltkile	4. Salt-wedge



Odd Arne Skogan
Prosjektleder



Anna Birgitta Ledang
Kvalitetssikrer



Anders Gjorvad Hagen
Forskningsleder

**Strømforhold og partikkelkonsentrasjoner i nedre del
av Glomma utenfor Borg Havn**

Forord

Hensikten med denne rapporten er å presentere resultater og analyser fra målinger som er gjort ved Borg havn på oppdrag fra Rambøll. Bakgrunnen for rapporten er at det er planlagt mudring ved innseilingen til havnen, og det er ønskelig å danne et bilde av bakgrunnsnivåer av turbiditet og strømforhold.

Det rettes en takk til André Staalstrøm som har lagt ned mye arbeid i databehandling, notater og rapport. I tillegg takkes det for et godt samarbeid med Aud Helland og Rambøll. Takker også John Rune Selvik, Anders Gjørwad Hagen og Anna Birgitta Ledang for kvalitetskontroll, samt Medyan Antonsen for bidrag i felt. Takk også til Borg havn IKS for god hjelp med båt og mannskap.

Oslo, 4. desember 2015

Odd Arne Skogan

Innhold

	1
Sammendrag	5
Summary	6
1. Bakgrunn	7
2. Beskrivelse av området	9
3. Oversikt over feltarbeid	10
4. Sirkulasjonsmønsteret	15
4.1 Generelt om strømbildet i en elv med saltvannsinntrengning	15
4.2 Resultat fra tidligere målinger	15
4.3 Vannføring i Glomma	18
4.4 Strømmålinger	19
5. Variasjon i partikkelkonsentrasjon	22
5.1 Turbiditet	22
5.2 Ferskvannslaget	22
5.3 Saltkilen	23
6. Samlet vurdering	24
Vedlegg A. Tilpasning til en tre-lags modell	25

Sammendrag

I området utenfor Borg Havn, det vil si nedre del av Glomma og området utenfor elvemunningen, er sirkulasjonen preget av at ferskvann møter saltvann. Det er kraftig strøm i ferskvannslaget ut mot sjøen som river med seg saltvann som befinner seg rett under ferskvannslaget. Medrivningen fører til en kompensasjonsstrøm oppover elva. Høy vannføring i elva gir dypere ferskvannslag, men også en kraftigere og mer konsentrert kompensasjonsstrøm. Tidevannet påvirker i stor grad kompensasjonsstrømmen. På fallende tidevann bremses denne opp, og kan i visse tilfeller snu.

Utenfor elvemunningen er ferskvannslaget tynnere. På stasjon G3 befinner kompensasjonsstrømmen seg mellom 3-7 m og 12-15 m dyp, avhengig av vannføring i Glomma og tidevannet. Under 12-15 m er strømstyrken svært lav. Ved mudring utenfor elvemunningen vil sannsynligheten være stor for at partikler vil fraktes oppover elva med kompensasjonsstrømmen.

Turbiditeten i ferskvannslaget er i middel 13 FNU, med verdier opp mot 60 FNU. Dette tilsvarer omtrent en partikkelkonsentrasjon på henholdsvis 13 og 60 mg/L. Turbiditet målt i ferskvannslaget på stasjon G1b og G2b har høy korrelasjon med turbiditet målt på stasjon Baterød 15-16 km lenger opp i elva. Dette tyder på at høy partikkelkonsentrasjon i ferskvannslaget skyldes tilførsel fra oppstrøms i Glomma og ikke lokale kilder.

I saltkilen er middelverdien til turbiditeten lavere enn de 13 FNU som ble målt i ferskvannslaget. Middelverdien er mellom 3,5 og 9,2 FNU i saltkilen. Maksimalverdien i saltkilen er derimot svært høye, mellom 320 og 1221 FNU. De høye verdiene opptrer ikke i større grad på slutten av måleseriene, som i så fall kunne være et tegn på begroing. Det antas derfor at disse høye målingene skyldes partikkelskyer som er virvlet opp i nærheten av målestasjonen, enten på grunn av turbulente strømforhold eller resuspensjon av sediment som følge av propellgenerert turbulens. I saltkilen er turbiditeten i 75 % av tiden lavere enn 8,5 FNU og i 95 % av tiden lavere enn 27,1 FNU.

For å kunne vurdere om partikkelkonsentrasjonen endrer seg over tid eller mellom stasjoner, er det nødvendig å betrakte statistiske størrelser målt over en viss tid. For å kunne dokumentere om høye partikkelkonsentrasjoner skyldes en bestemt kilde, for eksempel et mudringsområde, er det helt nødvendig å måle på flere stasjoner i forskjellig avstand fra det antatte kildeområdet.

Summary

Title: Circulation and particle concentrations in the lower part of the Glomma River outside Borg Harbour

Year: 2015

Author: André Staalstrøm, Odd Arne Skogan

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 978-82-577-6646-7

In the area outside Borg Harbor, i.e. the lower part of the Glomma River and the area outside the estuary, the circulation is affected by the fact that fresh water meets salt water. It is strong seaward flow of freshwater that entrains saline water located just below the fresh water layer. The entrainment causes an upstream compensation current. High river discharge results in a deeper layer of freshwater, but also a more powerful and concentrated compensation current. The tide largely affects the compensation current. On falling tides this current is slowed down, and may in some cases turn.

Outside the river mouth the freshwater layer is thinner. At station G3 the compensation current are located between 3-7 m and 12-15 m depth, depending on river discharge and tides. Below 12-15 m depth the current speed is very low. During dredging operations outside the river mouth it is likely that particles will be transported upriver.

The turbidity in the freshwater layer has a mean value of 13 FNU, with values up to 60 FNU. This corresponds to a particle concentration of respectively 13 and 60 mg/L. Turbidity measured in the freshwater layer at station G1b and G2b has high correlation with turbidity measured at station Baterød 15-16 km further up the river. This suggests that high particle concentrations in the freshwater layer are caused by sources located upstream in the Glomma River and not local sources.

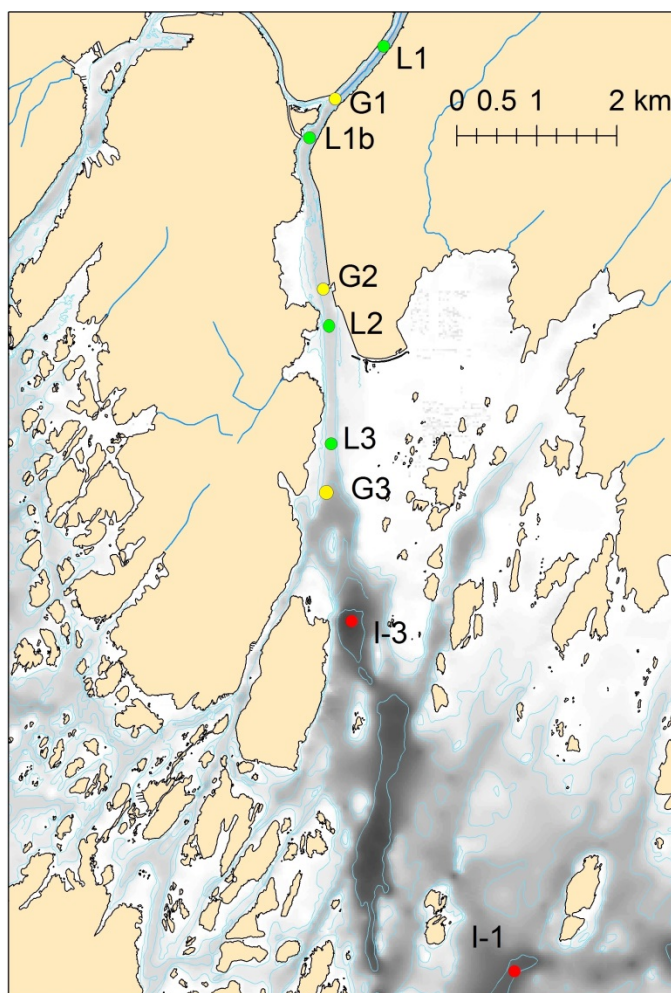
In the salt wedge the mean turbidity lower than the 13 FNU measured in the freshwater layer. The mean value is between 3.5 and 9.2 FNU in the salt wedge. The maximum value in the salt wedge, however, is very high, between 320 and 1221 FNU. The high values do not occur to a greater extent at the end of the measurement series, which in that case would have been an indication of fouling. It is therefore believed that these high readings are due to particle clouds whirled up near the observations, either because of turbulent flow conditions or propeller activity. In the salt wedge the turbidity is lower than 8.5 FNU in 75% of the time and in 95% of the time lower than 27.1 FNU.

In order to assess whether the particle concentration changes over time or between stations, it is necessary to consider statistical variables measured over certain time duration. To document the high particle concentrations due to a particular source, such as a dredging area, it is absolutely necessary to have observations at several stations at different distances from the assumed source area.

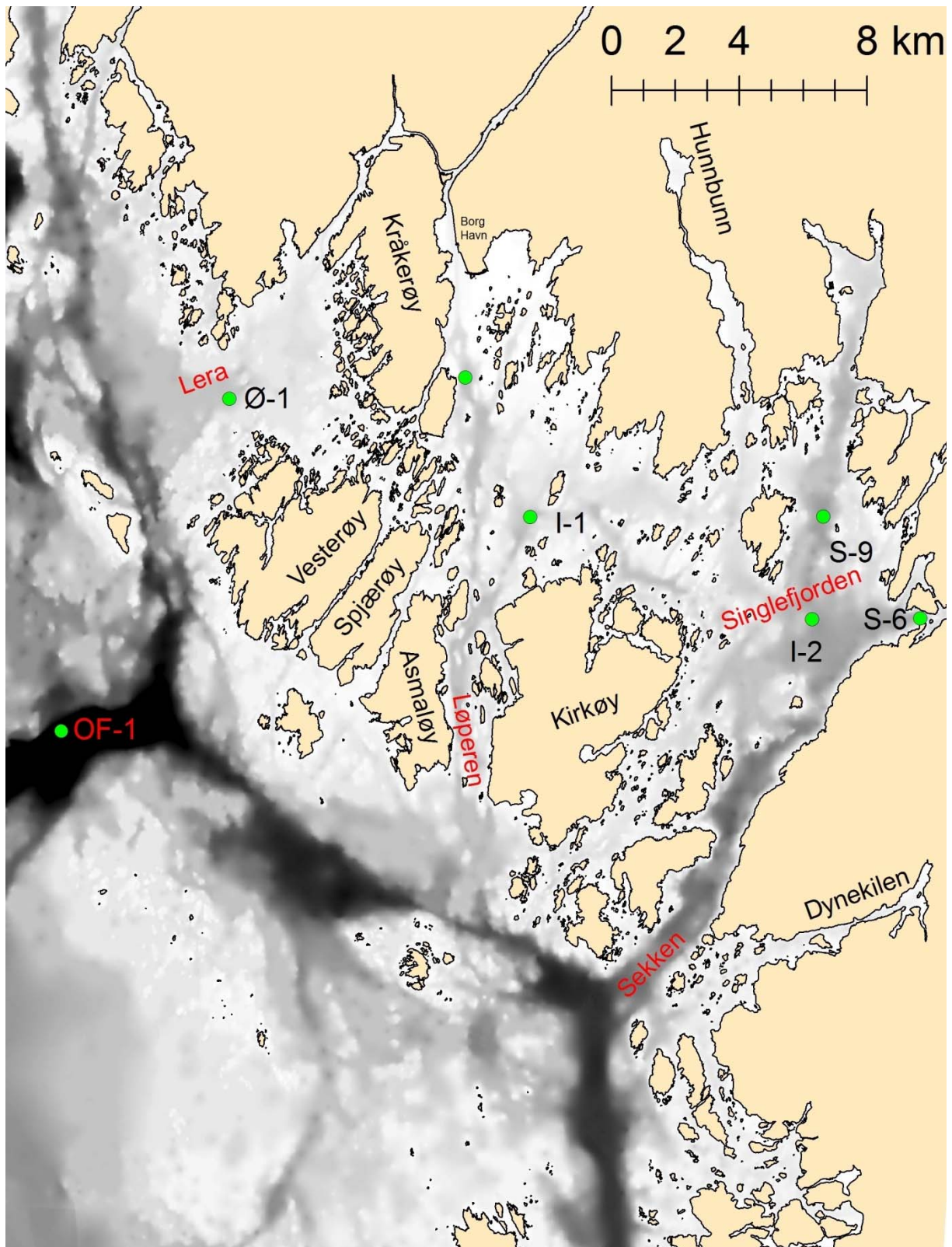
1. Bakgrunn

En større mudringsoperasjon er under planlegging for innseilingen til området rett utenfor Borg Havn i Fredrikstad. Som en bakgrunn for dette ønskes det å dokumentere den naturlige turbiditeten eller partikkelkonsentrasjonen i vannmassene, samt strømforholdene i området, mellom stasjon G1 og G3 på kartet (**Figur 1**) nederst i Glommas utløp.

Glomma renner ut i Hvaler, som noen ganger omtales som Glommaestuariet (**Figur 2**). Estuarier er områder hvor ferskvann fra elver møter sjøvann, og her foregår det intens blanding av disse vannmassene. Denne blandingen har stor betydning for vannkvalitet, vannkjemi og biologi. Ofte fins det i slike områder arter som er tilpasset de spesielle forholdene som fins her. I blandingssonen foregår det flere prosesser som har effekt på partikkeltransport. Partikler dannes og aggregerer, påvirket av biologiske og geokjemiske prosesser, som videre har konsekvenser for transport og oppholdstid for næringssalter og suspenderte partikler i estuariet. Tilførsel av partikler i området kommer både med ferskvannet i elva og med saltvannet fra Glommaestuariet. I tillegg til dette vil partikler virvles opp fra bunn av de sterke strømmene i elva og på grunn av skipstrafikk.



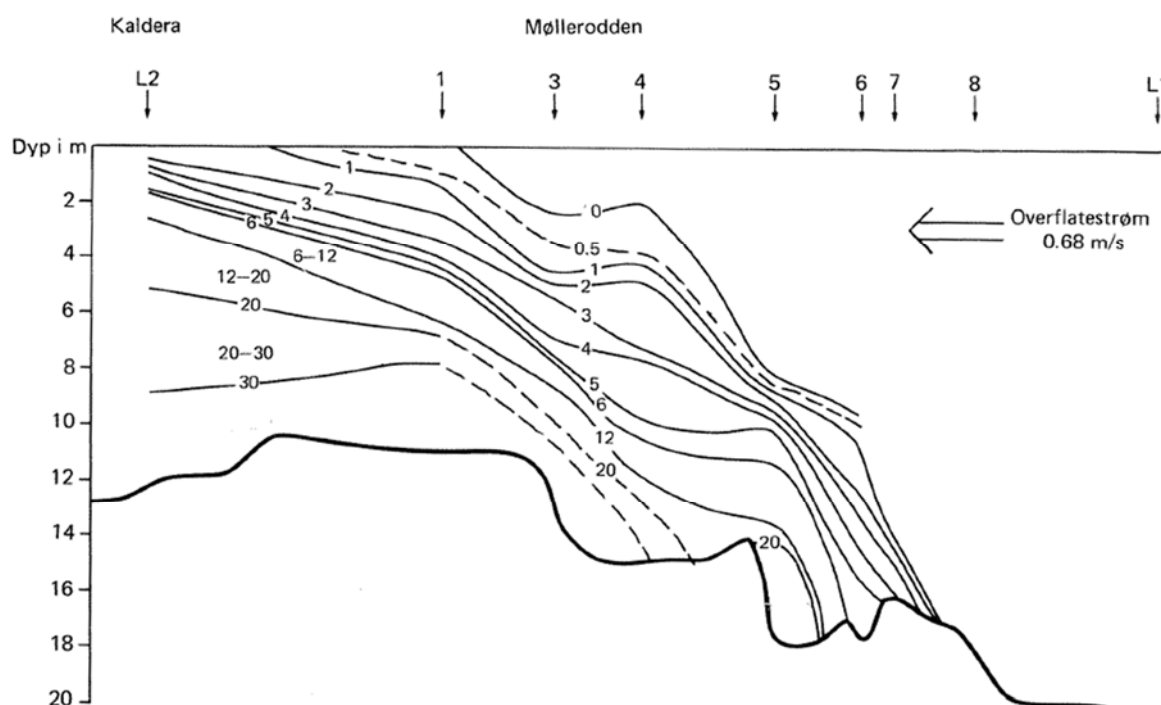
Figur 1. Kart over Glommas utløp. Fargeskalaen og de blå konturlinjene angir vanddybden. Stasjoner hvor det er målt strømprofiler i ASTRI-prosjektet er angitt med grønne prikker. Overvåkningsstasjoner fra programmet for Ytre Oslofjord er angitt med røde prikker. Stasjoner hvor det har vært utplassert målerigger i dette prosjektet er angitt med gule prikker.



Figur 2. Kart over Hvaler. Stasjoner fra overvåkningsprogrammet for Ytre Oslofjord er angitt med grønne prikker. Fargeskalaen angir bunntopografien.

2. Beskrivelse av området

Glommaestuariet som befinner seg sør-øst i Norge, er definert som et saltkile-estuarie. Det vil si at i elva er det et øvre lag med ferskvann som renner ut mot havet, og et lag av saltvann under dette som kan trenge langt opp i elva som en kile. Dette betyr at det langs bunn av elva kan strømme både oppover og nedover elva. Elva deler seg i to ved Fredrikstad (Figur 1). Det østre løpet er dypest med dyp ned mot 20 m. Det vestre løpet er grunnere med dyp på omtrent 10 m. Det antas at saltkilen kun trenger opp i elva i det dype østre løpet. Nedstrøms i elva vil ferskvann fra elva strømme utover i overflatelaget. Historiske målinger av saltholdighet viser at det under dette laget er en saltvanskile som strekker seg oppover i elva (Figur 3).



Figur 3. Beskrivelse av saltvanskilen den 2. juli 1980 hvor vannføringen var $1500 \text{ m}^3/\text{s}$. Elvevannet renner fra høyre mot venstre. Posisjonene til stasjonene L1 og L2 er markert øverst på figuren. Verdiene er saltholdighet i promille.

På grunn av at overflatelaget river med seg vann fra saltvanskilen, vil det være en kompensasjonsstrøm som går oppover elva langs bunn. Akkurat hvor langt opp i elva saltvanskilen strekker seg vil være avhengig av hvor stor vannføringen er i Glomma. Hvor dypt skillet mellom det utstrømmende ferskvannslaget og den salte kompensasjonsstrømmen er, vil også variere med posisjon i elva og med vannføring. I enkelte tilfeller vil vannet kunne strømme utover i hele vannsøylen, og dette vil ha en stor effekt på forholdene når det gjelder saltholdighet og turbiditet langs bunn. En mudring av området nedstrøms målepunktet vil derfor kunne tenkes å spre partikler både oppover elva langs saltvanskilen, og utover mot havet med overflatevannet.

I overvåkningsprogrammet for Ytre Oslofjord er det to stasjoner utenfor det østre løpet, I-3 og I-1. På stasjon I-3 er det gjort kun sporadiske målinger.

3. Oversikt over feltarbeid

I prosjektet har det vært utplassert måleinstrumenter i nærheten av de tre posisjonene G1, G2 og G3 markert på **(Figur 1)**.

Instrumenteringsløsningen fra NIVA skulle belyse hvordan strømforholdene kan påvirke spredningen av partikler i forbindelse med mudringsarbeidet, samt danne et bilde av bakgrunnsnivåer.

I første måleperioden var instrumenter utplassert ved stasjon G1 **(Figur 4)**. Instrumentene som ble brukt var Nortek Aquadopp profiler 1MHz og YSI 600 multiparametersonde med sensorer for turbiditet, ledningsevne og temperatur. En skisse av oppsettet vises i **Figur 7**. Strømsensoren sto midtstrøms på 17 meters dyp. Omtrent 20 meter fra strømsensoren, mot land, var en YSI festet med oppdrift slik at den målte på 15 meters dyp. I tillegg var det en YSI inne ved land som hang ned på 2 meters dyp. De to YSI-sondene var koblet med kabel til en logger. Denne loggeren sendte data kontinuerlig hvert 10. minutt inn til NIVA Oslo via mobilnettet.

I periode 2 ble de samme instrumentene flyttet nedover i elva til stasjon G2 **(Figur 5)**. Ved posisjon G2b, i overflaten, ble det plassert en YSI tilsvarende som for oppsettet i periode 1. Stasjonsposisjonene er listet opp i **Tabell 1**. De eneste endringene for selve stasjonen er at turbiditetssensor på posisjon 1 (G2 midtstrøms) nå bare er 1m over bunnen for ikke å være til hinder for båttrafikk siden dybden i området er ca. 11 meter. Stasjonen er nå lengre nedstrøms og nærmere det aktuelle mudringsområdet.

I periode 3 ble multiparametersonden (YSI 600) med sensorer for turbiditet, saltholdighet og temperatur beholdt inne ved land på stasjon G2b **(Figur 5)**. I tillegg ble denne stasjonen utvidet med en tilsvarende sonde slik at det ble en på 2 meters dyp og en på 6 meters dyp **(Figur 8)**. Strømsensoren (Aquadopp profiler 1MHz) med en tilhørende YSI600 **(Figur 9)** ble plassert ut lengre ned i utløpet på stasjon G3 **(Figur 6)**.

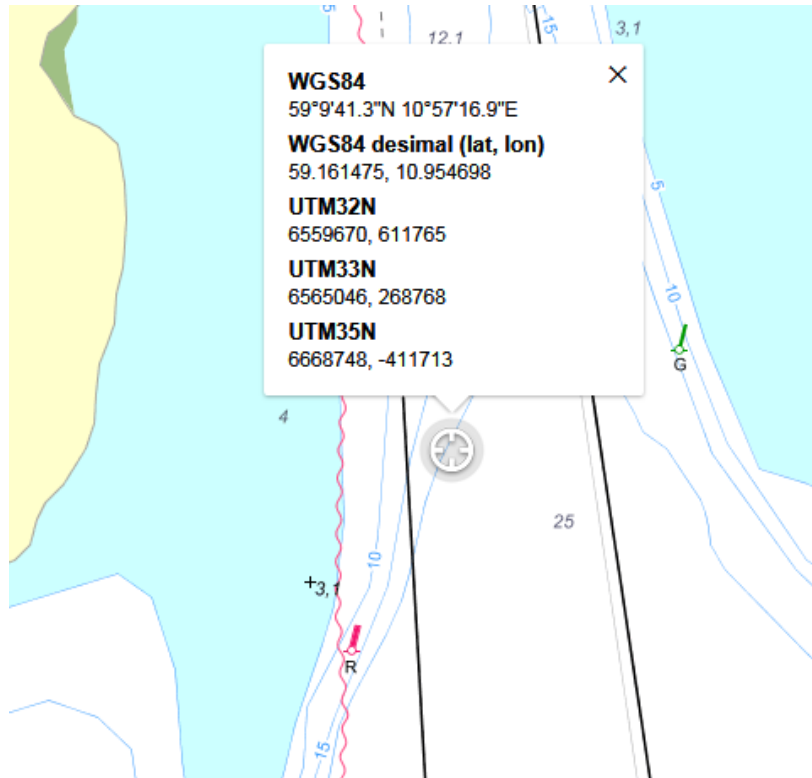
Strømsensoren var ikke koblet til ekstern logger, og data fra denne ble hentet ut manuelt ved å ta opp sensoren. Datatømming fra denne ble gjort ved periodens slutt. Dessverre viste det seg at strømmåleren ikke hadde stått i riktig vinkel i periode 2, slik at målingene fra den perioden ikke kunne brukes. For periode 1 og 3 var det gode data fra målingene. Strømmålerens landing på sjøbunnen i periode 3 ble verifisert ved hjelp av en tiltsensor som registrerte om rammen til strømsensoren har riktig vinkel ved landing. Tiltvinkelen ble målt til 7 grader som var innenfor akseptabelt avvik fra 0-nivået.



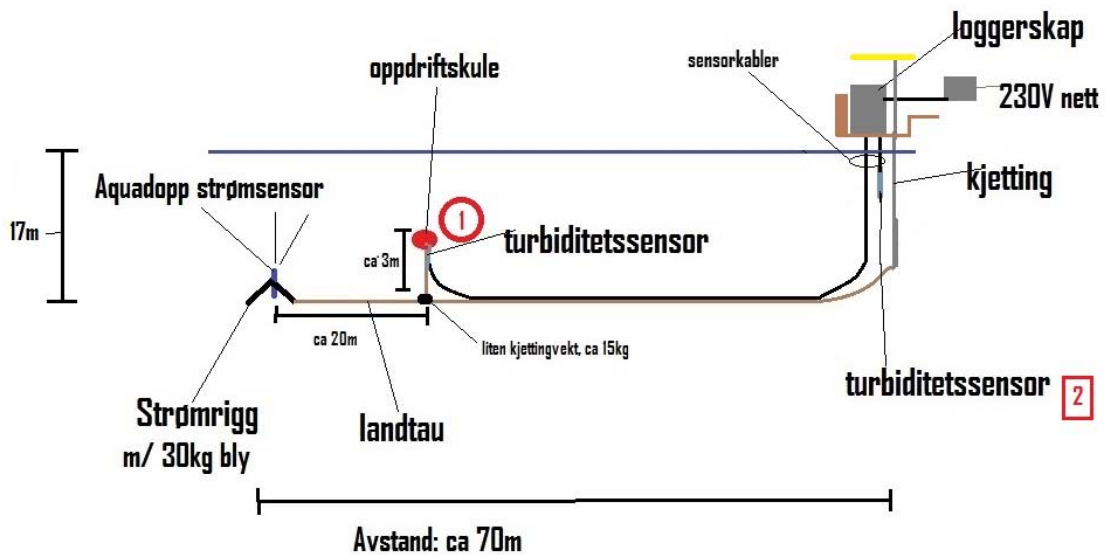
Figur 4. Kartutsnitt fra området nord for havnen, med posisjon for stasjonen i periode 1.



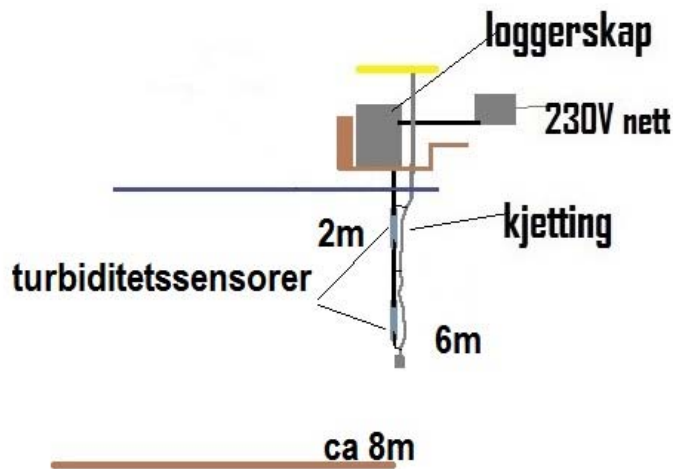
Figur 5. Kartutsnitt fra området i nedre del av havnen; G2 for strømsensor og turbiditetssensor nede ved bunnen. G2b er turbiditetssensor i overflaten inne ved land. G2 ble brukt i periode 2, og G2b ble brukt både i periode 2 og 3.



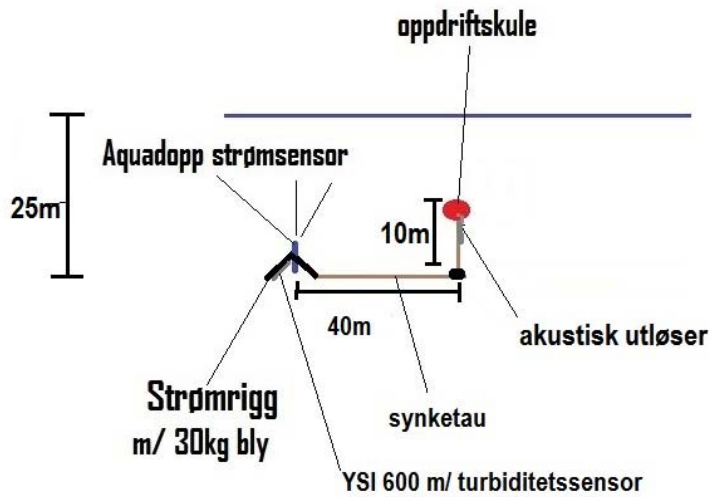
Figur 6. Kartutsnitt som viser området ved stasjon G3 brukt i periode 3.



Figur 7. Oppsett av stasjon ved G1 og G2. Dyptet anvist til 17m stemmer for stasjonsoppsettet ved G1, mens det for G2 er 11m. Turbiditetssensoren merket «1» er ved posisjon G2 på ca. 1 meters dyp.



Figur 8. Oppsett av stasjon ved G2b for periode 3. Turbiditetssensorene var på 2 og 6 meters dyp.



Figur 9. Oppsett av stasjon ved G3 for periode 3. Turbiditetssensoren er festet til rammen for strømsensoren. Rammen var også utstyrt med en tiltsensor som gjorde det mulig å verifisere at rammen landet riktig.

Tabell 1. Posisjoner hvor det har vært utplassert målerigger i dette prosjektet.

Stasjonsnavn	Breddegrad	Lengdegrad	Periode	Instrumenter
G1b	59.204335°	10.952039°	1	YSI ved 2 m
G1	59.204838°	10.951524°	1	ADCP YSI
G2b	59.184261°	10.952404°	2	YSI ved 2 m
G2	59.183882°	10.951406°	2	ADCP (data tapt) YSI ved 10-11 m
G2b	59.184261°	10.952404°	3	YSI ved 2 m YSI ved 6-7 m
G3	59.161475°	10.954698°	3	ADCP YSI ved 22-23 m

4. Sirkulasjonsmønsteret

4.1 Generelt om strømbildet i en elv med saltvannsinntrengning

Sirkulasjonen i Glomma kan beskrives med en tre-lagsmodell. Det øvre laget defineres som det laget hvor det strømmer kraftig utover og hvor saltholdigheten er lav, og dette laget kalles ferskvannslaget. Under dette ligger det et lag hvor det som regel også strømmer utover, men hvor saltholdigheten øker kraftig med dypet, og dette laget kalles sprangsjiktet. Nederst ligger det et lag hvor saltholdigheten er mye høyere, og dette kalles saltkilen.

I det mellomliggende laget, sprangsjiktet, går strømmen utover, men strømhastigheten endrer seg fort med dypet, og det er kraftige skjærkrefter i dette laget. Disse friksjonskreftene gjør at energien i elvestrømmen blir brukt til å rive med seg underliggende saltvann. Denne transporten av vann fra saltkilen og opp i ferskvannslaget kalles medrivningen. Denne transporten av vann må kompenseres og det settes derfor opp en kompensasjonsstrøm i saltkilen i retning opp elva. Styrken på denne transporten er avhengig av hvor effektiv den vertikale blandingen i nedre del av elva er. Er det mye vertikal blanding, det vil si mye medrivning av vann, blir også kompensasjonsstrømmen kraftigere.

4.2 Resultat fra tidligere målinger

I et tidligere forskningsprosjekt ASTRI, ble det 15. juni 2001 tatt profilerende målinger av temperatur, saltholdighet og strøm. Det ble foretatt målinger på tre stasjoner i elveløpet, stasjon L1 plassert før elva deler seg, stasjon L1b plassert i østre løp nedenfor der elva deler seg og på stasjon L3 plassert rett utenfor det østre elveutløpet (**Figur 1**). Resultater her er hentet fra en upublisert artikkel forfattet av K. Sørensen, B. Bjerkeng, J. Høkedal, A. Helland og G. Severinsen.

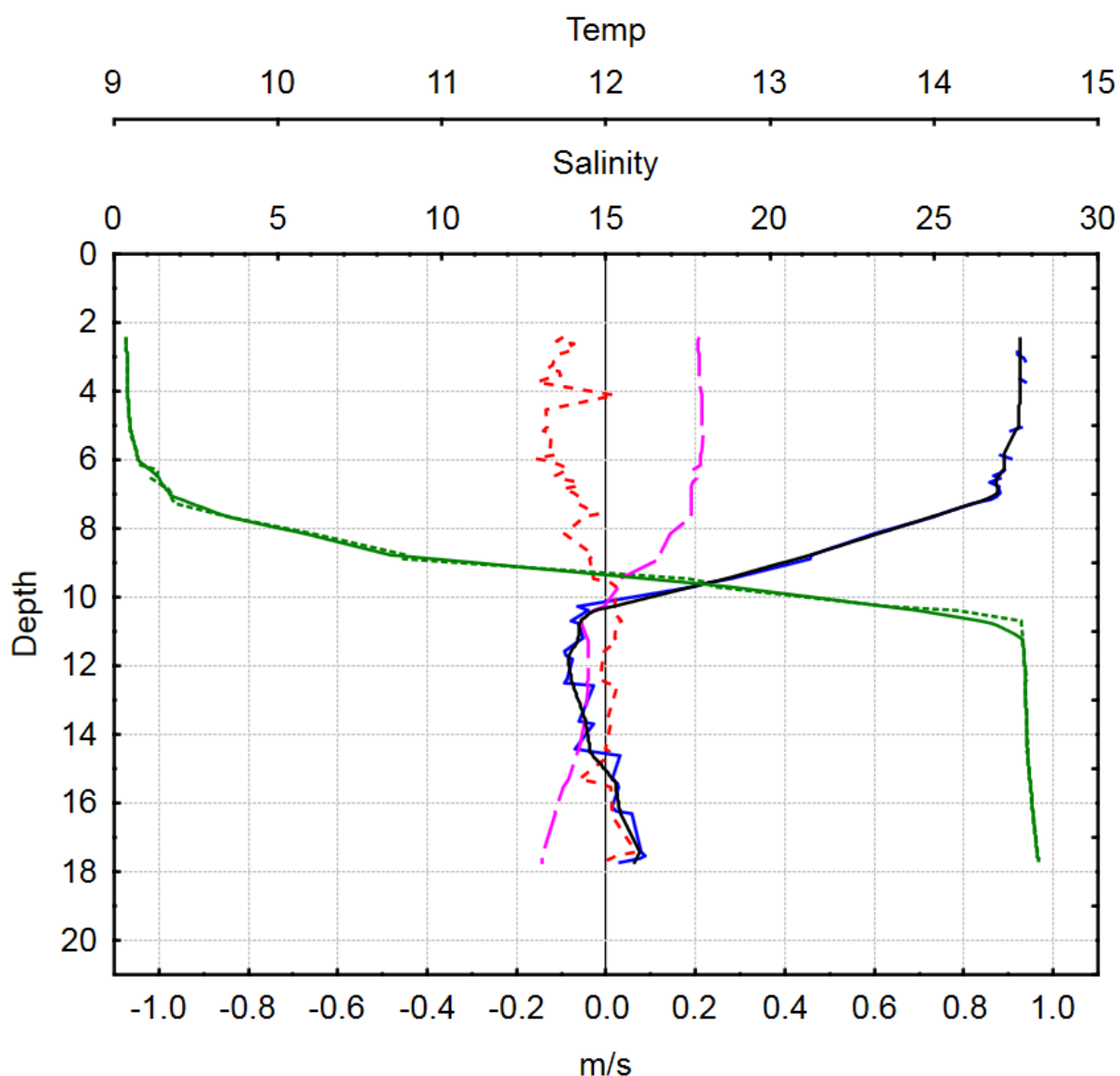
På stasjon L1 (**Figur 10**) er det 20 m dyp, og den 15. juni 2001 var det utstrømmende ferskvannslaget 10 m dypt med en gjennomsnittlig saltholdighet på 1,4 psu. De øverste 7 meterne var homogene med en strømhastighet på 0,9 m/s, og saltholdighet mellom 0,35 og 1,55 psu og en temperatur på 12,6 °C. På 10 m var strømhastigheten tilnærmet 0 m/s og saltholdigheten 22,1 psu. En kompensasjonsstrøm med en saltholdighet på 27,5 psu gikk oppover elva i dybdeintervallet 10 -15 m. Den høyeste strømstyrken var her 0,1 m/s. Under 15 m strømmet det utover.

På stasjon L1b (**Figur 11**) som befinner seg 2 km lenger nedstrøms, var det den samme dagen et 7 m tykt ferskvannslag, med en gjennomsnittlig saltholdighet på 4,4 psu og en strømhastighet opp mot 0,9 m/s. Fra 7 m og ned til bunn var det en kompensasjonsstrøm med en gjennomsnittlig saltholdighet på 27,2 psu og med en strømstyrke oppover elva opp mot 0,2 m/s.

På stasjon L3 (**Figur 12**) rett utenfor østre elveutløp var det den samme dagen et 5 m tykt ferskvannslag, med en gjennomsnittlig saltholdighet på 4,9 psu og en strømhastighet opp mot 0,5 m/s.

Disse nøkkelparameterne er samlet i

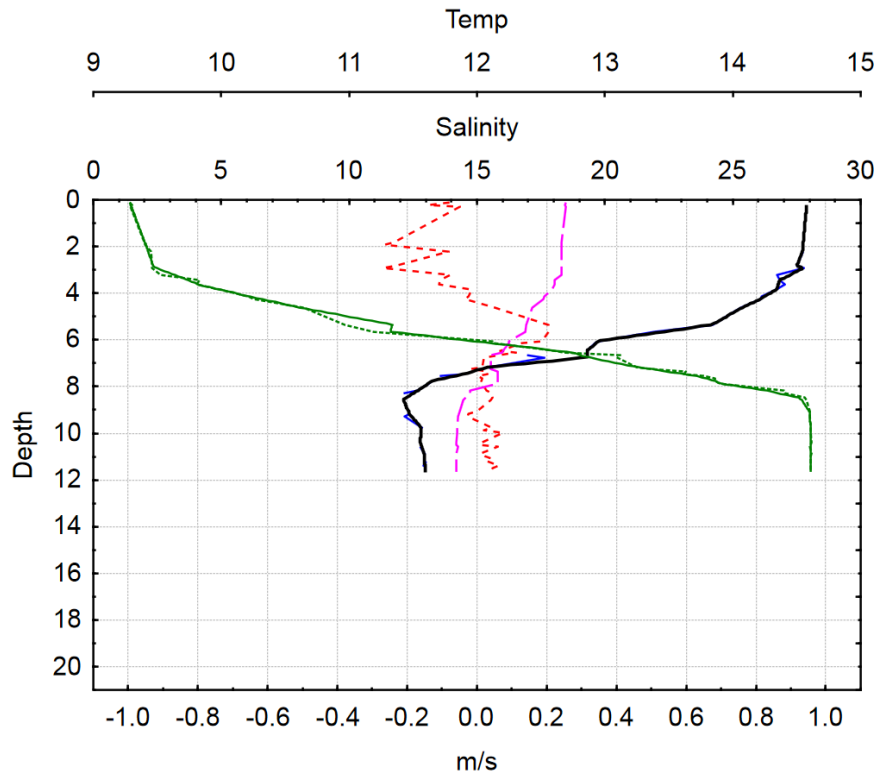
Tabell 2 nedenfor for de tre stasjonene, L1, L1b og L3. Ferskvannslaget har en relativt konstant hastighet som fortsetter til utenfor utløpet der ferskvannslaget brer seg utover horisontalt i estuariet. På vei nedover elva blir det utstrømmende laget tynnere og får høyere saltholdighet etter hvert som underliggende saltvann blir blandet inn. Saltkilen, det vil si den underliggende kompensasjonsstrømmen, blir svakere, får noe lavere saltholdighet og blir tynnere på vei oppover i elva. Vannføringen i Glomma, målt på Solbergfoss, var 900 m³/s den 15. juni 2001.



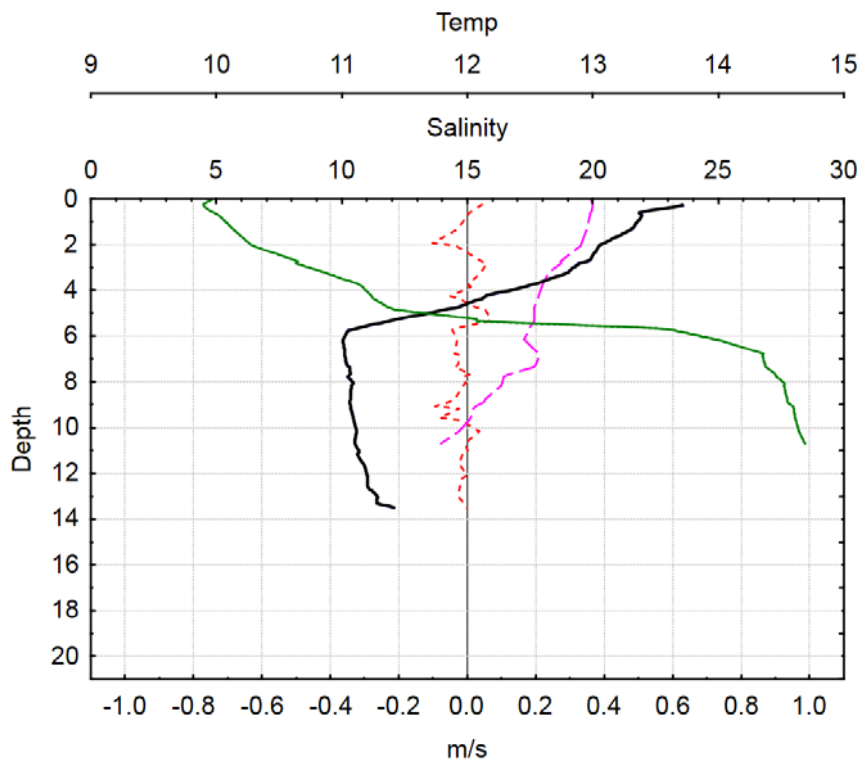
Figur 10. Profil på stasjon L1 nedenfor brua i Fredrikstad, hvor saltholdighet (grønn kurve), temperatur (rosa kurve), strøm i elveretningen (svart og blå kurve) og strøm på tvers av elva (rød kurve). Målingene ble foretatt 15. juni 2001 kl. 13:14-13:23 UTC.

Tabell 2. Nøkkelparametere for sirkulasjon på tre stasjoner i Glommas østre utløp 15. juni 2001.

Stasjon	Saltholdighet i overflatelaget	Saltholdighet i kompensasjonsstrømmen	Tykkelsen av øvre lag (m)	Strømstyrke i øvre lag (m/s)	Maksimal strømstyrke i kompensasjonsstrømmen (m/s)
L1	1,4	26,5	10	0,9	0,1
L1b	4,4	27,2	7	0,9	0,2
L3	4,9	28,0	4	0,5	0,3



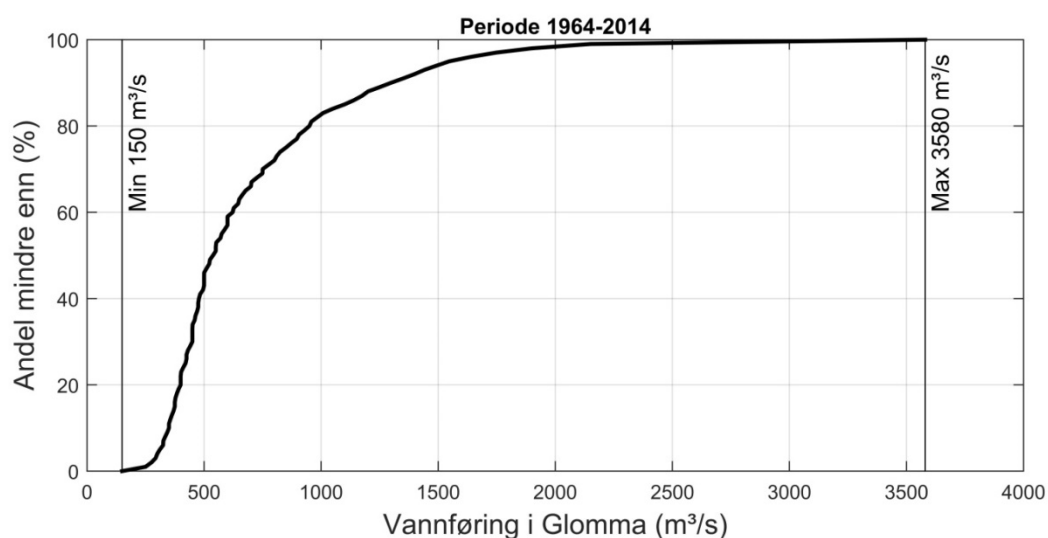
Figur 11. Profil på stasjon L1b ved nedenfor brua i Fredrikstad, hvor saltholdighet (grønn kurve), temperatur (rosa kurve), strøm i elveretningen (svart og blå kurve) og strøm på tvers av elva (rød kurve). Målingene ble foretatt 15. juni 2001 kl. 12:35-12:44 UTC.



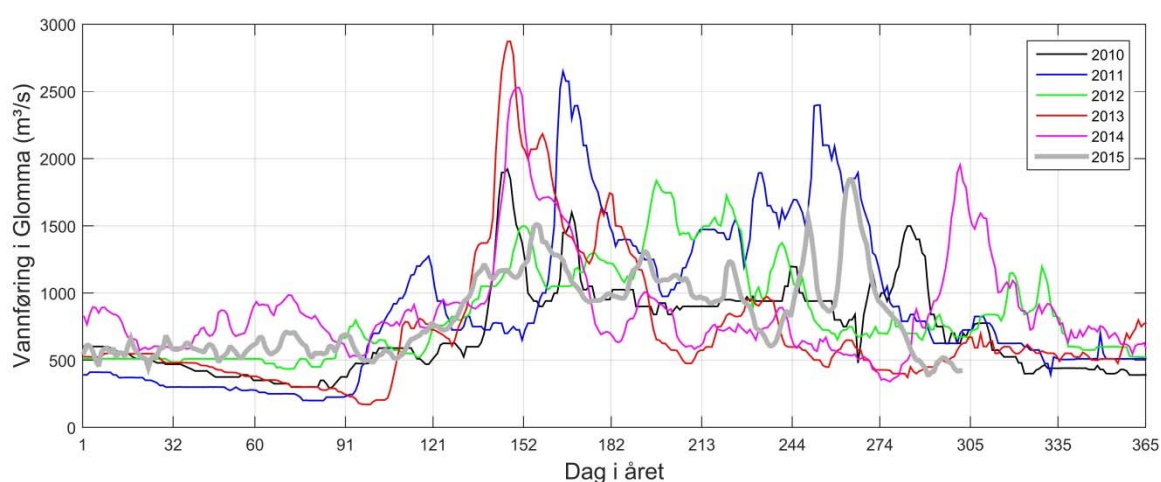
Figur 12. Profil på stasjon L3 ved nedenfor brua i Fredrikstad, hvor saltholdighet (grønn kurve), temperatur (rosa kurve), strøm i elveretningen (svart og blå kurve) og strøm på tvers av elva (rød kurve). Målingene ble foretatt 15. juni 2001 kl. 11:46-11:55 UTC.

4.3 Vannføring i Glomma

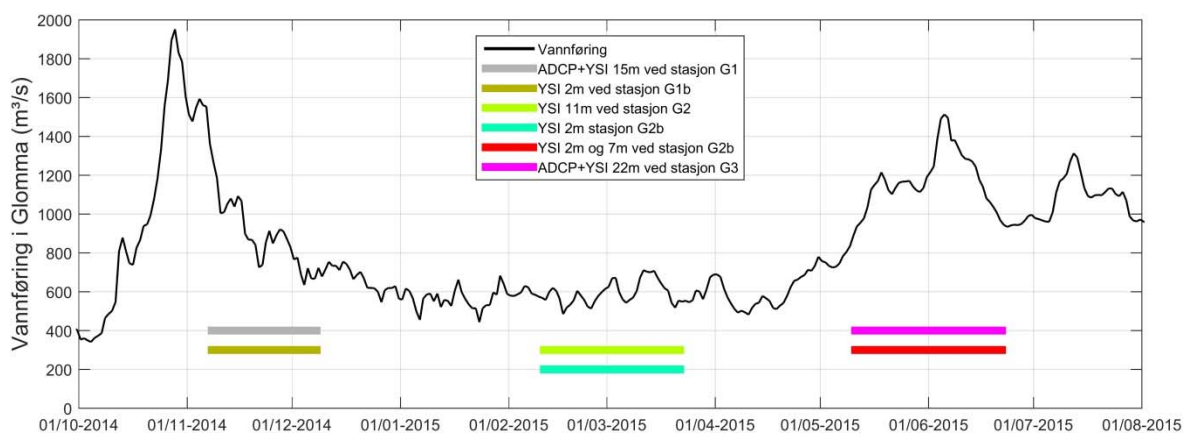
Strømprofilene vist i forrige delkapittel var foretatt når vannføringen i Glomma var på 900 m³/s. Her vil vi se på hvordan vannføringen i Glomma varierer. **Figur 13** viser den kumulative fordelingen av vannføringen i Glomma i perioden 1964 til 2014. Median vannføringen er 538 m³/s. Laveste vannføring i måleperioden er 150 m³/s og høyeste vannføring 3580 m³/s. **Figur 14** viser hvordan vannføringen var i 2014 og 2015 i forhold til andre år. Ofte kommer det en kraftig vårfloam i mai. I 2015 kom ikke den kraftigste vårfloamen før i juni. **Figur 15** viser vannføringen i de periodene det ble foretatt målinger. I løpet av de periodene det ble foretatt strømmålinger varierte vannføringen fra omtrent 500 m³/s som laveste verdi og omtrent 1500 m³/s som høyeste verdi.



Figur 13. Statistikk for vannføring i Glomma, basert på målinger fra Solbergfoss og Sarpsfoss. På y-aksen vises persentilverdiene, det vil si andelen av observasjonene som er mindre enn den verdien på x-aksen. Medianverdien er det samme som 50-persentilen, og median vannføring er 538 m³/s. 10-persentilen er 350 m³/s og 90-persentilen er 1300 m³/s. Det betyr at vannføringen i 80 % av tiden er mellom 350 og 1300 m³/s.



Figur 14. Vannføring i Glomma fra forskjellige år. På x-aksen er det dag i året for den første i hver måned indikert.



Figur 15. Vannføring i Glomma i måleperiodene. Periodene hvor de forskjellige instrumentene var plassert er indikert.

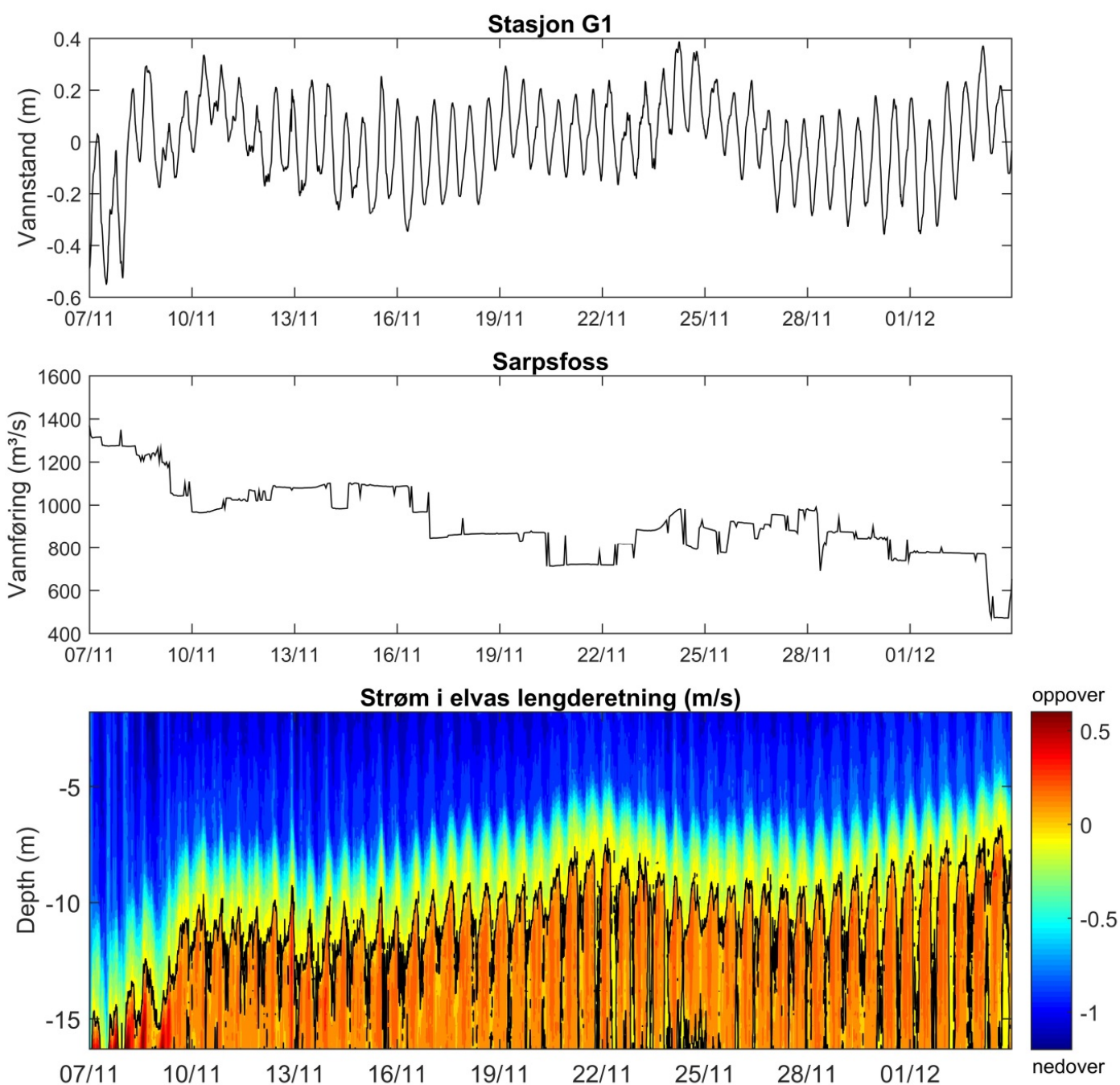
4.4 Strømmålinger

De tidligere målingene som vi har sett på til nå gir bare et øyeblikksbilde. **Figur 3** viser en situasjon hvor vannføringen er omtrent 1500 m³/s, mens **Figur 10** til **Figur 12** viser en situasjon hvor vannføringen er omtrent 900 m³/s. Strømmønsteret, og også spredningsmønsteret til partikler i elva, vil variere i tid med variasjon i vannføring i Glomma og med tidevannspumping på grunn av varierende vannstand ute i Glommaestuariet.

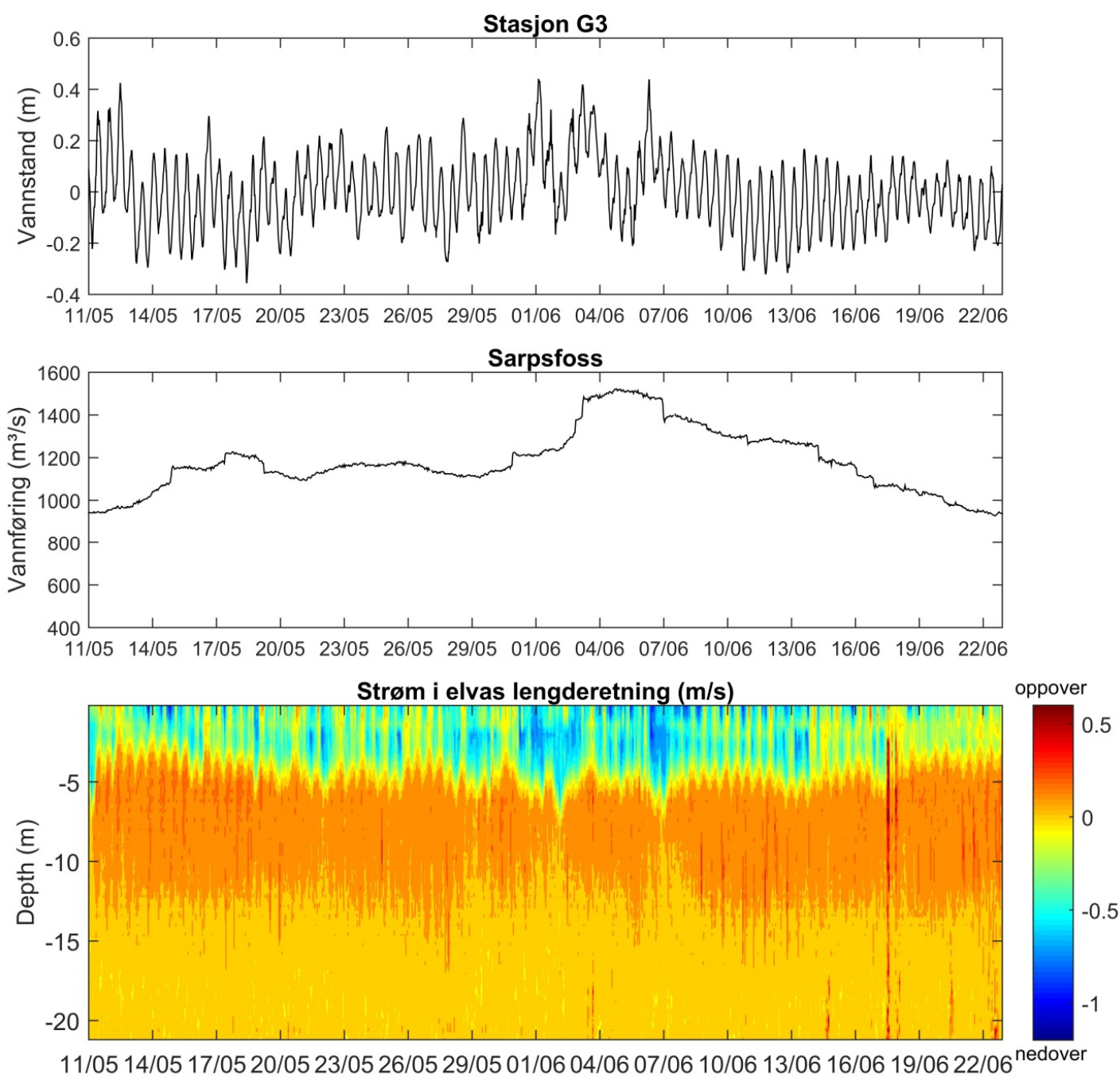
I perioden 7. november til 3. desember 2014 (periode 1) ble det foretatt kontinuerlige målinger av strøm med en profilerende strømmåler på stasjon G1 (**Figur 16**). I begynnelsen av perioden var vannføringen mer enn 1300 m³/s, mens den lavest vannføringen i perioden var omtrent 500 m³/s. Som forventet så er det en kraftig utadgående strøm i overflatelaget, med en dypere kompensasjonsstrøm oppover elva. Tykkelsen på overflatelaget varierer med vannføringen i Glomma. Vannstandsendringer på grunn av tidevann har stor betydning for variasjonen i strømmønsteret. Faktisk har tidevannet større påvirkning på om det strømmer utover helt ned til bunn, enn det vannføringen i Glomma har. Når det er høy vannføring blir faktisk strømmen langs bunn oppover elva kraftigere, mens det ved lavere vannføring kan strømme utover helt ned til bunn på fallende tidevann. Dette skyldes at medrivingen i dette tilfellet er større.

I perioden 11. mai til 22. juni 2015 (periode 3) ble det foretatt strømmålinger i en posisjon lenger ut i elveløpet, på stasjon G3 (se **Figur 1**). Ferskvannslagets tykkelse varierer fra 3 til 7 m. Vannføringen i denne perioden var fra 900 til 1500 m³/s. Til sammenligning var ferskvannslagets tykkelse på omtrent 5 m i juni 2001 på stasjon L3 som er nær G3 (se **Figur 12**). I disse målingene er det tydelig at kompensasjonsstrømmen går ned til 12 til 15 meters dyp. Under dette dypet er det nesten strømstille.

Ved mudring i dybdeintervallet fra 3-7 m og ned til 12-15 m i området nær stasjon G3, så er det stor sannsynlighet for at partikler vil fraktes oppover elva.



Figur 16. Øverst vises vannstanden i Glomma på stasjon G1. I midten vises vannføringen i Glomma målt ved Solbergfoss. Nederst vises strømmen i Glomma langs elvas lengderetning. Den positive retningen er definert oppover, så rød farge indikerer strøm oppover elva, mens blå farge indikerer strøm nedover elva. En svart konturlinje er tegnet der strømmen er 0.



Figur 17. Øverst vises vannstanden i Glomma på stasjon G3. I midten vises vannføringen i Glomma målt ved Sarpsfoss. Nederst vises strømmen i Glomma langs elvas lengderetning. Den positive retningen er definert oppover, så rød farge indikerer strøm oppover elva, mens blå farge indikerer strøm nedover elva.

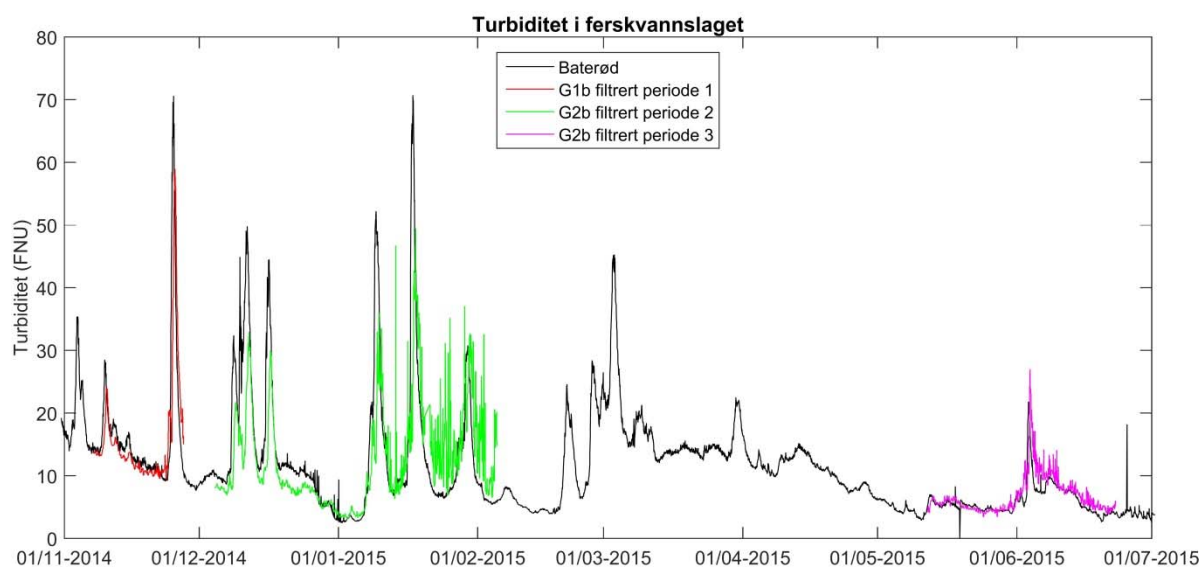
5. Variasjon i partikkelkonsentrasjon

5.1 Turbiditet

Turbiditet er et optisk mål på hvor god sikt det er i vannet. En turbiditetsenhet, omtalt som FNU, er definert på en slik måte at en enhet omtrent tilsvarer 1 mg/l suspenderte partikler. I denne vurderingen har vi lagt til grunn at denne sammenhengen gjelder. Enhetene NTU og FTU har også vært brukt for turbiditet.

5.2 Ferskvannslaget

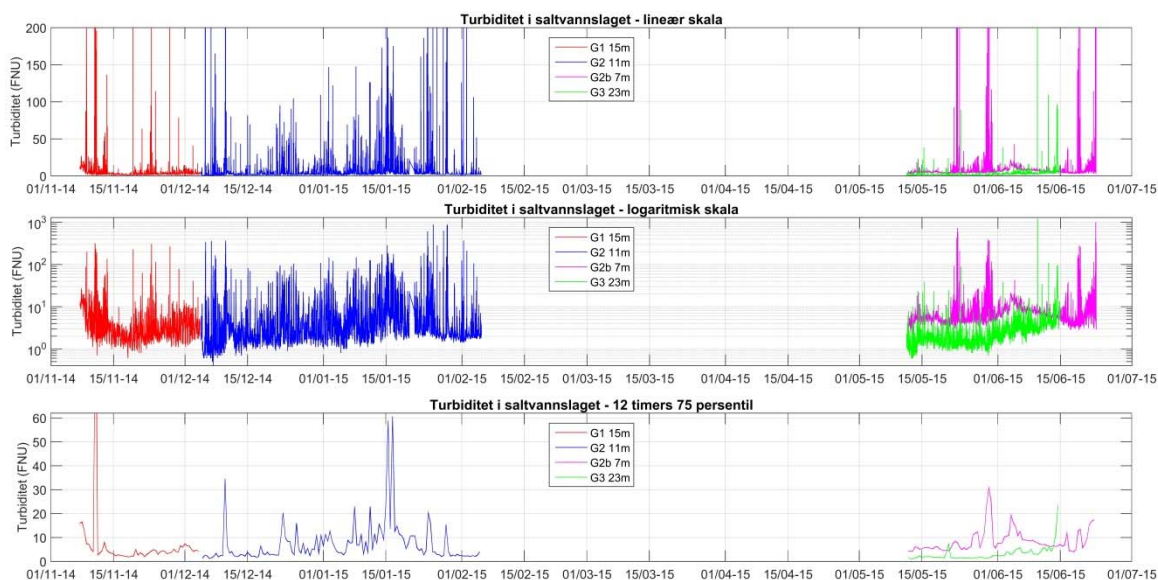
Store mengder partikler fraktes utover med elvevannet. I dette prosjektet har det blitt foretatt målinger i ferskvannslaget på stasjon G1b i en periode og på stasjon G2b i to perioder. Målingene var påvirket av begroing. Dataene ble forsøkt filtrert med å bruke de laveste verdiene i løpet av en periode på 3 timer. De filtrerte målingene er sammenlignet med data fra RID stasjon Baterød som ligger 15-16 km lenger opp i elva i **Figur 18**. Det er tydelig at partikkelkonsentrasjoner i ferskvannslaget i nedre del av Glomma skyldes partikler som kommer med elvevannet. Turbiditeten varierer mellom 3 og 60 FNU på stasjon G1b og G2b. Middelerverdien på stasjon Baterød er 13 FNU.



Figur 18. Turbiditet i ferskvannslaget. Data er hentet fra RID stasjon Baterød (svart kurve), og sammenlignet med målt turbiditet i ferskvannslaget på stasjon G1b og G2b.

5.3 Saltkilen

I saltvannslaget nær bunn, i saltkilen, vil partikler fraktes oppover elva i kompensasjonsstrømmen. Kilder til høy partikkelkonsentrasjon kan være nedsynkning av partikler fra ferskvannslaget, oppvirvling fra bunn på grunn av turbulent strøm, propelloppvirvling eller tilførsel fra sjøvannet utenfor elvemunningen. **Figur 19** viser turbiditet målt i saltvannslaget på forskjellige dyp, stasjoner og perioder. Svært høye verdier opptrer, og i figuren er derfor målingene vist med både lineær (øverst) og logaritmisk skala (i midten). Den høyeste verdien ble målt på stasjon G3 på omtrent 23 m og den var 1221 FNU. Alle disse målingene er foretatt relativt nær bunn, og det er mest sannsynlig at høye partikkelkonsentrasjoner skyldes oppvirvling fra bunn relativt nær målepunktet. Ut ifra de målingene som er gjort i forbindelse med dette prosjektet, har det ikke vært mulig å identifisere hvilken kilde som er viktigst. Turbiditetsverdien nær bunn på stasjon G3 var generelt lavere enn på stasjon G2b, noe som kan tolkes som at partikkeltransport opp elva fra området utenfor elvemunningen er mindre viktig. Statistikk for målingene i saltvannslaget er oppsummert i **Tabell 3**. I **Figur 19** er også 75 persentil verdien i løpet av 12 timer vist. Det betyr at i 75 % av tiden er verdien lavere enn det som er oppgitt på grafen. I mesteparten av tiden er 75 persentilen lavere enn omtrent 10 FNU.



Figur 19. Turbiditet i saltvannslaget. Øverst er data vist på en lineær skala, men data høyere enn 200 FNU vises ikke. I midten er data vist på en logaritmisk skala. Nederst er 75 persentilen for hver 12. time vist.

Tabell 3: Statistikk for turbiditeten nær bunn ved stasjonene G1, G2, G2b og G3.

	Turbiditet ved ca. 15 m ved G1 (FNU)	Turbiditet ved ca. 11 m ved G2 (FNU)	Turbiditet ved ca. 7 m ved G2b (FNU)	Turbiditet ved ca. 23 m ved G3 (FNU)
Gjennomsnitt	5,7	8,2	9,2	3,5
5 presentilen	1,3	1,1	3,8	1,0
25 presentilen	1,9	1,8	4,7	1,4
Median	2,7	2,4	6,1	1,8
75 presentilen	4,3	5,3	8,5	3,1
95 presentilen	12,6	27,1	17,3	6,7
Maksimumsverdi	320	885	1003	1221

6. Samlet vurdering

I området utenfor Borg Havn, det vil si nedre del av Glomma og området utenfor elvemunningen, er sirkulasjonen preget av at ferskvann møter saltvann. Det er kraftig strøm i ferskvannslaget ut mot sjøen som river med seg saltvann som befinner seg rett under ferskvannslaget. Medrivningen fører til en kompensasjonsstrøm oppover elva. Høy vannføring i elva gir dypere ferskvannslag, men også en kraftigere og mer konsentrert kompensasjonsstrøm. Tidevannet påvirker i stor grad kompensasjonsstrømmen. På fallende tidevann så bremses denne opp, og kan i visse tilfeller snu.

Utenfor elvemunningen er ferskvannslaget tynnere. På stasjon G3 befinner kompensasjonsstrømmen seg mellom 3-7 m og 12-15 m dyp. Under 12-15 m er strømstyrken svært lav. Ved mudring vil sannsynligheten være stor for at partikler vil fraktes oppover elva.

Turbiditeten i ferskvannslaget er i middel 13 FNU, med verdier opp mot 60 FNU. Dette tilsvarer omtrent en partikkelkonsentrasjon på henholdsvis 13 og 60 mg/L. Turbiditet målt i ferskvannslaget på stasjon G1b og G2b har høy korrelasjon med turbiditet målt på stasjon Baterød 15-16 km lenger opp i elva. Dette tyder på at høy partikkelkonsentrasjon i ferskvannslaget skyldes tilførsel fra oppstrøms i Glomma og ikke lokale kilder.

I saltkilen er middelverdien til turbiditeten lavere enn de 13 FNU som ble målt i ferskvannslaget. Middelverdien er mellom 3,5 og 9,2 FNU i saltkilen. Maksimalverdiene i saltkilen er derimot svært høye, mellom 320 og 1221 FNU. De høye verdiene opptrer ikke i større grad på slutten av måleseriene, som kunne ha vært et tegn på begroing. Det antas derfor at disse høye målingene skyldes partikkelskyer som er virvlet opp i nærheten av målestasjonen, enten på grunn av turbulente strømforhold eller resuspensjon av sediment som følge av propellgenerert turbulens. I saltkilen er turbiditeten i 75 % av tiden lavere enn 8,5 FNU og i 95 % av tiden lavere enn 27,1 FNU.

For å kunne vurdere om partikkelkonsentrasjonen endrer seg over tid eller mellom stasjoner, er det nødvendig å betrakte statistiske størrelser målt over en viss tid. For å kunne dokumentere om høye partikkelkonsentrasjoner skyldes en bestemt kilde, for eksempel et mudringsområde, er det helt nødvendig å måle på flere stasjoner i forskjellig avstand fra det antatte kildeområdet.

Vedlegg A. Tilpasning til en tre-lags modell

Sirkulasjonen i Glomma kan beskrives med en tre-lagsmodell. Det øvre laget kan defineres som det laget hvor det strømmer kraftig utover og hvor saltholdigheten er lav, og dette laget kan kalles ferskvannslaget. Under dette ligger det et lag hvor det som regel også strømmer utover, men hvor saltholdigheten øker kraftig med dypet, og dette laget kan kalles sprangsjiktet. Med utgangspunkt i de profilerende strømmålingene på stasjon G1 er skilleflaten mellom ferskvannslaget og sprangsjiktet, definert som det dypet hvor det strømmer utover med en hastighet på 0,6 m/s. Hvis z er den vertikale akse som peker oppover og som har verdi 0 ved overflaten, H_1 er dybden til ferskvannslaget v er strømhastighet i elvas lengderetning med positiv retning oppover i elva, så kan dette skrives

$$v(z = -H_1) = -v_{\text{lim1}} \quad (1)$$

hvor v_{lim1} er 0,6 m/s.

Tykkelsen av sprangsjiktet er H_2 , og den vertikale posisjonen til den nedre grensen av dette laget er $z = -H_1 - H_2$. Ideelt så burde denne grensen defineres som det dypet hvor strømhastigheten er null, men dette egner seg ikke så godt siden strømmen langs bunn skifter retning, og dermed vil det ved visse tidspunkt være null strøm helt ned til bunn. En praktisk definisjon av denne skille flaten er at den er 1,2 m under det dypet hvor det strømmer utover med en hastighet på 0,2 m/s. Dette kan skrives

$$v(z = -H_1 - H_2 + \partial H) = -v_{\text{lim2}} \quad (2)$$

hvor ∂H er 1,2 m og v_{lim2} er 0,2 m/s.

Under disse lagene ligger saltkilen, som har tykkelsen $H_3 = H - H_1 - H_2$, hvor H er det totale vanddyper, som på stasjon G1 er omtrent 17,5 m. Tykkelsen av disse lagene kan nå bestemmes ved å benytte (1) og (2) på strømmålingene fra stasjon G1. Ut ifra disse to definisjonene varierer ferskvannslagets tykkelse på stasjon G1 mellom 4,2 og 16,3 m, med en gjennomsnittsverdi på 7,6 m. Sprangsjiktets tykkelse varierer mellom 1,2 og 5,5 m, med en gjennomsnittsverdi på 2,8 m. Saltkilens tykkelse varierer mellom 0 og 11,0 m, med en gjennomsnittsverdi på 7,1 m.

Den dybdemidlede strømmen i hvert lag kan så beregnes

$$v_1(t) = \frac{1}{H_1} \int_{z=-H_1}^{z=0} v(z, t) dz \quad (3)$$

$$v_2(t) = \frac{1}{H_2} \int_{z=-H_1-H_2}^{z=H_1} v(z, t) dz \quad (4)$$

$$v_3(t) = \frac{1}{H_3} \int_{z=-H}^{z=-H_1-H_2} v(z, t) dz \quad (5)$$

Figur 20 viser midlet strøm i hvert lag beregnet fra (3) til (5). Det er en tydelig tidevannsdrevet variasjon i strømmen både i ferskvannslaget og i saltkilen. I ferskvannslaget varierer strømmen mellom -1,08 og -0,72 m/s. I saltkilen varierer den midlede strømmen mellom -0,13 og 0,50 m/s. I sprangsjiktet, mellom disse to lagene, er det naturlig at strømmen er mer konstant, siden dette laget er definert ut ifra strømsstyrken.

Strømstyrken varierer her mellom -0,60 og -0,15 m/s. Den kraftige strømmen utover i sprangsjiktet, forekommer når vannføringen i Glomma er stor.

Det vil være gunstig å lage formler for sirkulasjonen i de forskjellige lagene, som er funksjoner av andre parametere. Disse formlene kan således benyttes i perioder hvor det ikke fins strømmålinger. Her vil fokuset være på det nederste laget, saltkilen, siden strømmen her skifter retning og er viktig for partikkelspredning i forbindelse med mudring.

Saltkilestrømmen v_3 , kan deles inn i en saktevarierende del \bar{v}_3 , og en som oscillerer med tidevannsperioder, \tilde{v}_3 .

$$v_3(t) = \bar{v}_3 + \tilde{v}_3 \quad (6)$$

Den saktevarierende delen defineres som et løpende døgnmiddel. Det vil si at middelveiden hele tiden beregnes over en periode som er 12 timer før og etter det tidspunktet det skal beregnes middelveiden for

$$\bar{v}_3(t) = \frac{1}{T} \int_{t-T/2}^{t+T/2} v_3(t) dz \quad (7)$$

Midlingsperioden T er 24 timer. Den tidevansdrevne delen kan nå beregnes fra observert strøm i det nedre laget og de to ligningene (6) og (7).

Det kan antas at tidevansdelen henger sammen med vannstandsendringer i Glommaestuariat. Dette underbygges av at korrelasjonen mellom \tilde{v}_3 og vannstanden målt på stasjonen Vikar, $\tilde{\zeta}$, har en beregnet korrelasjon på 0,65. Vi har da trukket fra den saktevarierende delen av vannstanden og forskjøvet vannstandsobservasjonene 3 timer og 10 minutter. Ved å benytte minste kvadrats metode kan vi finne følgende formel for den tidevansdrevne strømmen i saltkilen

$$\tilde{v}_3(t) = \tilde{A} \cdot \tilde{\zeta}(t - \Delta t) \quad (8)$$

hvor Δt er 3 timer og 10 minutter, og \tilde{A} er $0,41 \text{ s}^{-1}$ og vannstanden har enheten m.

Videre kan det antas at den saktevarierende delen av saltkilestrømmen henger sammen med vannføringen i Glomma. På **Figur 20** ser det ut til at ved høy vannføring så er tykkelsen av saltkilen liten, mens strømmen blir kraftigere. Denne antagelsen underbygges av at det var en viss korrelasjon mellom døgnmidlet vannføring, \bar{Q} , og den saktevarierende saltkilestrømmen i måleperioden. Korrelasjonen var 0,59. Minste kvadrats metode gir

$$\bar{v}_3(t) = \bar{A} \cdot \bar{Q} + \bar{B} \quad (9)$$

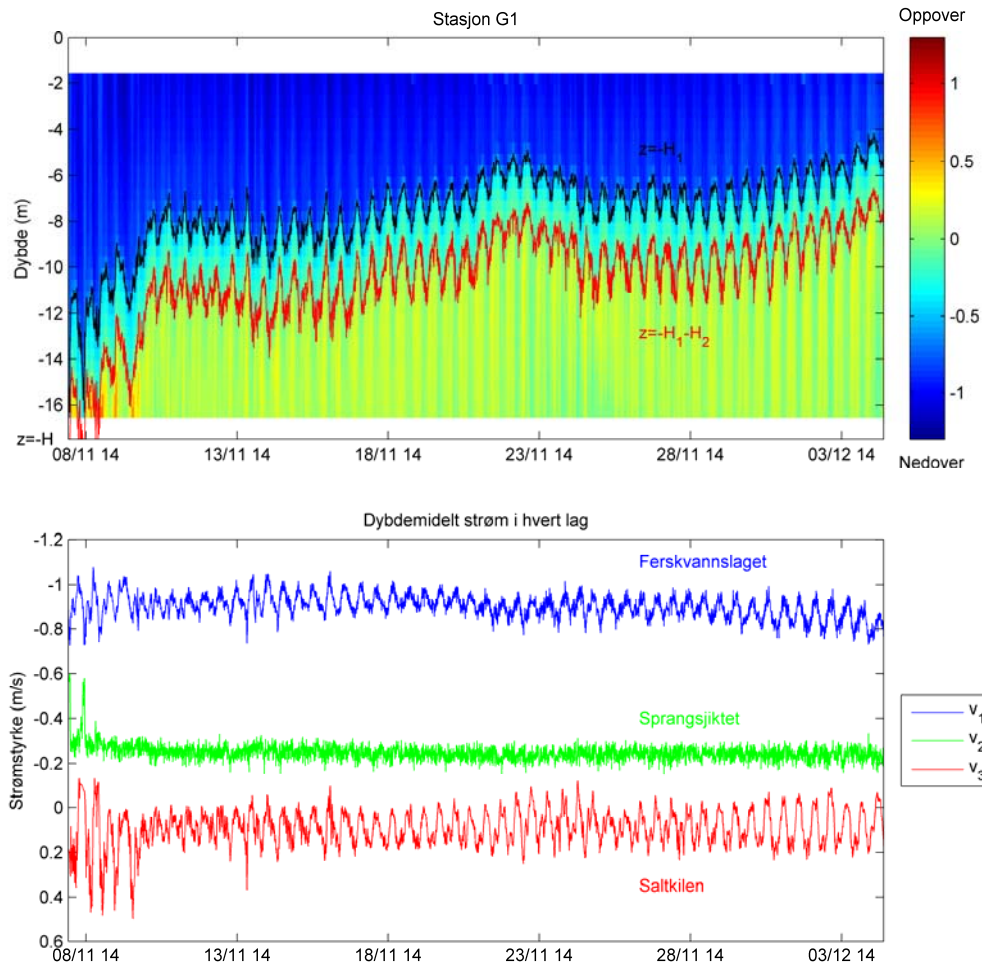
hvor \bar{A} er $1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-2}$ og \bar{B} er $-1,1 \cdot 10^{-2} \text{ m/s}$.

Saltkilestrømmen kan nå beregnes ut ifra ligning (8) og (9), og ved å sammenligne dette med på observasjoner så kan feilen i dette estimatet beregnes. Ligning (8) og (9) beregner saltkilestrømmen med en nøyaktighet på 4 cm/s i 50 % av tiden, og med en nøyaktighet på 8 cm/s så lenge vannføringen er mindre enn $1100 \text{ m}^3/\text{s}$. For å kunne estimere hvordan strømmen i saltkilen mer nøyaktig ved høy vannføring i Glomma, er det nødvendig med mer data målt i perioder med flom.

Retningen på saltkilestrømmen blir estimert korrekt i 90 % av tilfellene. Disse beregningene er basert på data fra stasjon G1, men det er sannsynlig at det samme kan sies om strømmen i saltkilen også på stasjon

G2, men koeffisientene \tilde{A} , \bar{A} og \bar{B} vil da ha andre verdier. Det antas at den viktigste parameteren \tilde{A} , vil ha en lavere verdi ved stasjon G2, siden saltvannskilen er tykkere her.

Strømmen langs bunn i Glommas nedre løp, som vil være avgjørende for spredning av partikler som virvles opp ved mudring, kan beregnes med en akseptabel nøyaktighet basert på målinger av vannstand ved Viker og vannføring i Glomma, så lenge vannføringen i Glomma er mindre enn $1100 \text{ m}^3/\text{s}$.



Figur 20. Øverst vises målt strøm i Glommas lengderetning på stasjon G1. Skilleflatene mellom de tre lagene er tegnet inn. Negative verdier markert med blått er strøm utover mot Hvaler, mens positive verdier er strøm oppover elva. Nederst vises den midlede strømmen i hvert lag.

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