

Dataanalyse av kontinuerlige målinger utenfor Quartz Corp AS på Drag i Tysfjord.



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

NIVA Region Midt-Norge

Høgskoleringen 9
7034 Trondheim
Telefon (47) 22 18 51 00
Telefax (47) 73 54 63 87

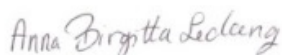
Tittel Dataanalyse av kontinuerlige målinger utenfor Quartz Corp AS på Drag i Tysfjord.	Løpenr. (for bestilling) 6710-2014	Dato 12.06.2014
	Prosjektnr. Undernr. 11327	Sider Pris 27
Forfatter(e) Anna Birgitta Ledang og John Arthur Berge	Fagområde Oseanografi	Distribusjon Fri
	Geografisk område Nordland	Trykket NIVA

Oppdragsgiver(e) The Quartz Corp AS	Oppdragsreferanse
--	-------------------

Sammendrag

I mars 2012 ble det plassert en permanent målerigg utenfor Drag i Tysfjord. Den måler kontinuerlig temperatur, saltholdighet, strøm, turbiditet og pH. Resultater fra 2013 viste en tydelig sammenheng mellom utslipp fra syrevaskfasen og pH målingene. Utslipp fra bedriften resulterte i at 0,02 % av alle pH-målingene hadde pH lavere enn 6,5 og 6,9 % hadde pH lavere enn 7,5. Størstedelen av strømmen går inn i fjorden, og store deler av utslippet blir derfor trolig ikke fanget opp av måleriggen ettersom lokalisering av måleriggen er oppstrøms utslippspunktet. For data fra mai til desember var det ikke registrert noen pH-reduksjon relatert til utslippet på 10 m dyp i målepunktet. I den grad pH reduksjonen vil gi biologiske effekter, vil dette trolig finne sted for fastsittende organismer i nærområdet (<39x fortykning). Ut i fra tidligere modellberegninger, tilsvarer dette en avstand innenfor 20 m i fra utslippet ved en strømhastighet på 2 cm/s. Resultater fra måleriggen viser derimot en større Δ pH enn forventet ved en større avstand fra utslippspunktet. Det bør derfor vurderes å gjøre nye modellberegninger for en mer fullstendig vurdering av mulige pH-effekter.

Fire norske emneord	Fire engelske emneord
1. Marin målerigg	1. Marine measurement platform
2. Utslippsovervåkning	2. Discharge monitoring
3. pH	3. pH
4. Turbiditet	4. Turbidity



Anna Birgitta Ledang
Prosjektleder



Kai Sørensen
Forskningsleder

**Dataanalyse av kontinuerlige målinger utenfor
Quartz Corp AS på Drag i Tysfjord.**

Forord

Det ble i mars 2012 satt ut en permanent marin målerigg utenfor Drag i Tysfjord etter en anbefaling om en bedre overvåkning av utslippet fra Quartz Corp AS til sjøresipienten Denne ble i 2013 utvidet med ett ekstra måledyp, på 10 meter.

Prosjektet har blitt gjennomført av NIVA, med god kommunikasjon med Kari Moen ved The Quartz Corp AS underveis i arbeidet.

Måleriggen ble utplassert i mars 2012 av Arne Veidel og Morten Willbergh. Service på riggen ble gjennomført i mai 2013 av Odd Arne Segtnan Skogan fra NIVA og John Olaf Pedersen fra The Quartz Corp AS, og i oktober 2013 av Odd Arne Segtnan Skogan (NIVA), Kjell Inge Kosmo (The Quartz Corp AS) og Anna Birgitta Ledang (NIVA).

Anna Birgitta Ledang er prosjektleder og forfatter av rapporten. John Arthur Berge har bidratt i vurderingen av biologiske pH effekter.

Oslo, 18. juni 2014

Anna Birgitta Ledang

Innhold

Sammendrag	5
Summary	7
1. Innledning	8
1.1 Bakgrunn og formål	8
1.2 Områdebeskrivelse	8
1.3 Målerigg	9
1.4 Resultater fra tidligere undersøkelse	11
2. Resultater	12
2.1 Hydrografi	12
2.2 Strømmålinger	14
2.3 pH	16
2.4 Turbiditet	17
2.5 Produksjonsdata	18
3. Vurdering av resultatene	20
3.1 Sammenheng mellom turbiditet og produksjonsdata fra oppredningsfasen	20
3.2 Sammenheng mellom målt pH ved måleriggen og utslipp fra syrevaskfasen.	22
3.3 Effekter av redusert pH	24
4. Konklusjon	25
5. Referanser	26

Sammendrag

I 2010 gjennomførte NIVA en undersøkelse av sjøresipienten for Norwegian Crystallites A/S med bakgrunn i sjøutslipp fra to ulike produksjonsprosesser av kvarts; en oppredningsfase og en syrevaskfase. Undersøkelsen omfattet blant annet repeterte enkeltmålinger av salt, temperatur, turbiditet og pH i sjøresipienten ved flere stasjoner rundt utslippspunktet, beregning av pH ut i fra mengden svovelsyre og fluorkiselsyre samt modellering av fortykning og innlagringsdyp for utslippet i sjøresipienten.

På bakgrunn av disse resultatene ble det anbefalt et overvåkningsprogram spesielt med tanke på å få til kontinuerlige målinger av vannsøylen for å bedre kunne fange opp utslippet i sjøresipienten samt å få bedre dokumentert om bunnfaunaen i sjøresipienten blir berørt. En målerigg ble derfor utplassert mars 2012 omkring 70 m nordvest fra utslippsrørene til The Quartz Corp AS.

Resultatene fra 2012 viste at episoder med høy turbiditet sammenfalt med perioder med lav eller ingen drift for flotasjonsprosessene. Dette kan indikere at det kan være partikkelutslipp fra oppredningsfasen i ledning 2 i disse periodene som ikke var fanget opp i produksjonsdata. Det ble vist tydelig sammenheng mellom utslipp fra syrevaskfasen og målt pH-reduksjon ved målepunktet i sjøresipienten. Sammenheng mellom utslipp fra bedriften til resipienten og responsen av dette utslippet på sjøvannets pH ble vist. Utslippet fra bedriften ga pH-reduksjon ned i 6,6. Til tross for dette var det kun 0,5 % av målingene med pH under 7,4. Det var mulig tegn til avgang i bunnfauna. En del hvite korn ble funnet, og det er naturlig å tro at deler av dette er kvarts og at noe av dette er skjell-/korallrester. Det var muligens tegn til avgang i sedimentet, men ut i fra SPI-undersøkelsen ser det ikke ut til å være noe problem med nedslamming.

Resultater fra 2013 viser igjen en tydelig sammenheng mellom utslipp fra syrevaskfasen og lavere pH målinger målt ved målepunktet. 83 % av pH-målingene har pH større enn eller lik 8, mens det er kun 0,02 % av målingene som har pH lavere enn 6,5, 0,4 % av målingene som har pH lavere enn 7, 1,7 % som har pH lavere enn 7,5 og 6,9 % som har pH lavere enn 7,5. I disse beregningene er pH-målinger målt når det ikke er gjennomført utslipp fra syrevask også inkludert. Størsteparten av strømmen går inn fjorden, men de lave pH-målingene er målt ved utgående strøm. Dette vil si at store deler av utslippet ikke vil bli fanget opp av måleriggen, og hyppigheten av lave pH-målinger vil sannsynligvis være høyere hvis måleriggen var plassert nedstrøms av utslippspunktet.

Av alle målingene med pH lavere enn eller lik 8, så var 0,4 % med pH lavere enn 6,5, 6,4 % med pH lavere enn 7 og 25 % med pH lavere enn 7,5. Det var ingen målinger av pH lavere enn eller lik 6. Målinger av pH i 2013 er fra perioden slutten av mai og ut desember 2013. Målingene fra 10 m viser ikke det samme mønster som på 20 m, og dette dypet er trolig lite påvirket av utslippet med lav pH og/eller at fortykningen har vært såpass stor at pH-verdiene er tilbake til normalt for sjøvann. I dette er det likevel ikke gjort noen vurdering av vinterforholdene hvor sjiktningen i vannsøylen er liten og gjennomslag til overflaten kan forekomme, og det kan derfor ikke utelukkes at lavere pH-målinger kan forekomme om vinteren også ved 10 m.

Utslipp og fortykning er en kontinuerlig prosess. Fastsittende organismer som befinner seg i utslippets nærrområde vil oppleve en mer permanent eksponering, mens pelagiske organismer følger vannmassene og bare eksponeres for en Δ pH som kan gi effekter så lenge fortykningen er mindre enn 39 ganger. I den grad pH reduksjonen gir effekter vil dette trolig i hovedsak kun finne sted for fastsittende organismer i nærrområde ettersom tidligere modellberegninger basert, vil dette tilsvare en avstand innenfor 20 m i fra utslippet ved en strømhastighet på 2 cm/s.

Tidligere modellberegninger basert på oppdatert utslippsdata for den aktuelle perioden, viste at ved en avstand på omkring 70 m ville en fortykning være på mellom 30x til 450x for strømtillfellene 2 og 10 cm/s. Dette tilsvarer en Δ pH mellom 0,2 og 0. Måleriggen er plassert omkring 70 m fra utslippspunktet, og pH-målingene fra 2014 viste at 6,9 % av alle pH-målingene hadde pH lavere enn 7,5 som tilsvarer Δ pH på 0,7.

Resultater fra måleriggen viser altså en større ΔpH , og det bør derfor vurderes nye modellberegninger med nye oppdaterte utslippstall fra for å kunne gjøre en mer oppdatert og en mer fullstendig vurdering av mulige pH-effekter.

Summary

Title: Data report from permanent marine measuring platform in Tysfjord

Year: 2014

Author: Anna Birgitta Ledang and John Arthur Berge

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN No.: ISBN 978-82-577-6445-6

In 2010, NIVA conducted a survey of the marine recipient of Norwegian Crystallites A / S, based on sea discharge from two different production processes of quartz; the dressing enrichment process and the acid wash stage. The survey included repeated single measurements of salinity, temperature, turbidity and pH in marine recipient at several stations around the discharge point, calculation of pH on the basis of the amount of sulfuric acid and fluosilici acid and modeling of dilution and the vertical ascent of the discharge plume in the marine recipient.

On the basis of these results, a monitoring program was recommended for better continuous measurements of the water column and a monitoring of the marine recipient. A measurement rig was deployed in March 2012 about 70 m north from discharge pipes outside The Quartz Corp AS.

It was shown clear correlation between emissions from the acid washing stage and measured pH reduction at the measurement point in the marine recipient. The relationship between the discharge from the industry and the response of this discharge on the seawater pH was shown. The discharge gave pH reductions down to 6,6. Despite this, only 0,5 % of the measurements was with a pH below 7,4. There were possible sign of tailing in the fauna. Some white corn was found, and some of these could be quartz and some of this could also be shell and/or coral remnants. There was possibly sign of tailing in the sediment, but based on the SPI survey, there appear to be no problems with sediment deposition.

Of all the measurements of pH less than or equal to 8, it was 0,4% with a pH lower than 6,5, and 25% with a pH lower than 7,5. There were no measurements of pH less than or equal to 6. Measurements of pH in 2013 are between late May and December 2013. Measurements from 10 m do not show the same pattern as the 20 m measurements, and this depth might be less affected by the discharge of low pH and/or the dilution has been extensive. It is still not made any assessment of the winter conditions where the stratification is small and surface breakthrough of the diluted discharge may occur. Lower pH readings could therefore occur during winter also at 10 m.

Discharges and dilutions are continuous processes. Fixed organisms on the sea bed in the discharge neighborhood will experience a more permanent exposure, while pelagic organisms follow water masses and will be exposed to a Δ pH which can provide effects as long as the dilution is less than 39 times. To the extent that the pH reduction gives effects, it would probably involve permanent sea bed organism close by since previously model results show that 39x corresponds to a distance within 20 m from the discharge, at a current speed of 2 cm/s.

Former model based on updated discharge data for the corresponding period showed that at a distance of about 70 m, a dilution would be of between 30x to 450x for the current speed cases 2 and 10 cm/s. This corresponds to a Δ pH of 0,2 and 0. The measurement rig is located about 70 m from the discharge point, and the pH measurements from 2013 showed that 6,9 % of all the pH measurements had a pH below 7,5, which corresponds to a Δ pH of 0,7. Results from the measurement rig thus show a greater Δ pH, and it should be considered to do a new model run with updated discharge numbers to make a more updated and a more complete assessment of possible pH effects.

1. Innledning

1.1 Bakgrunn og formål

I 2010 gjennomførte NIVA en undersøkelse av sjøresipienten med bakgrunn i utslipp fra The Quartz Corp A/S, tidligere Norwegian Crystallites A/S, og herved omtalt som bedriften med bakgrunn i utslipp fra bedriften (Ledang m. fl., 2011). Bedriften produserer kvarts, og produksjonsprosessen medfører utslipp til sjø ved 30 meters dyp fra to ulike prosesser. Ett rør (kalt ledning 2) har utslipp fra oppredningsfasen¹ og består av ferskvann samt mineralpartikler, svovelsyre, fluorkiselsyre og flotasjonskjemikalier. Det andre røret (kalt ledning 3) har utslipp fra syrevaskfasen og består av en større del sjøvann pumpet inn fra 30 meters dyp og en mindre del ferskvann med fluorkiselsyre.

Undersøkelsen omfattet blant annet repeterte enkeltmålinger av salt, temperatur, turbiditet og pH i sjøresipienten ved flere stasjoner rundt utslippspunktet, beregning av pH ut i fra mengden svovelsyre og fluorkiselsyre samt modellering av fortykning og innlagingsdyp for utslippet i sjøresipienten.

På bakgrunn av resultatene fra denne undersøkelsen ble det anbefalt et overvåkningsprogram, spesielt med tanke på å få til kontinuerlige målinger av vannsøylen som lettere kunne fange opp eventuelle effekter enn ved enkeltmålinger spredt i tid, samt å få bedre dokumentert om bunnfaunaen i sjøresipienten blir berørt. Deler av dette arbeidet ble videreført for 2013 og i denne rapporten blir data fra 2013 fra målepunktet til måleriggen presentert.

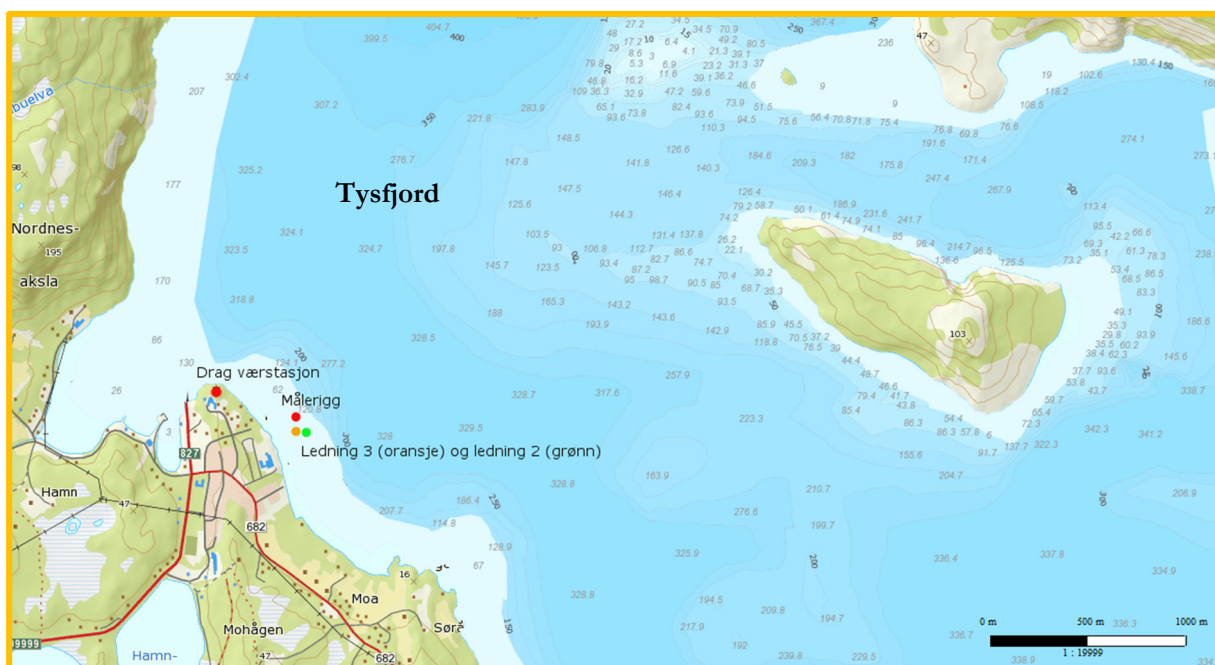
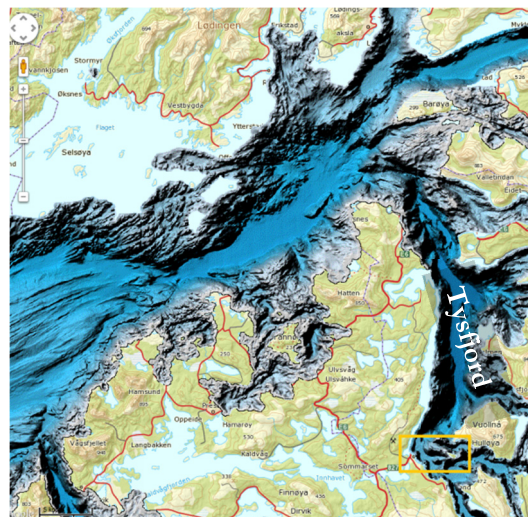
1.2 Områdebeskrivelse

Tysfjord er en dyp fjord nordøst for Bodø, og innenfor og øst for Vestfjorden (**Figur 1**).

Generelt så strømmer en del av den norske kyststrømmen som en sløyfe inn i Vestfjorden på den sørøstlige siden og ut igjen langs med Lofotveggen på den nord-vestlige siden (Sætre og Mork, 1981). Endringer i vindmønsteret kan i episoder endre på dette strømmønsteret.

Det største dypet er ved inngangen til Tysfjord fra Vestfjorden på 717 m. Videre innover fjorden går det en renne fra dette dypeste punktet som ender på omkring 200-300 m innerst i fjorden, og er grunnere i de forskjellige fjordarmene i indre del av fjorden. Utenfor Drag, hvor utslippspunktene for ledning 2 og ledning 3 finnes, og hvor måleriggen ble plassert (**Figur 1**, nederst), er det en bratt skråning som ender i et bunndyp på omkring 329 m. Det er få elveutløp i denne fjorden, og lite ferskvannsbidrag. Hydrografimålinger fra Ledang m. fl. (2011) viste også at fjorden var lite ferskvannspåvirket, med en svak sjiktning gjennom store deler av året.

¹ I oppredningsfasen blir kvartsråstoffet grovknust og finknust. Råstoffet går gjennom flere magnetseparasjonssteg og flotasjonssteg for å få best mulig rensset kvarts.



Figur 1. Øverst oversiktskart over Vestfjorden og Tysfjorden (til venstre, kilde: Google, til høyre, kilde: <http://www.ngu.no/mareano/Prosjekt/kart/Havbunnskart-landskap.html>). Nederst lokalt kart over Tysfjord ved Drag markert som oransje boks (kilde: <http://www.gislink.no/gislink/>). Ledning 2 (grønn) er fra oppredningsfasen og ledning 3 (oransje) er fra syrevaskfasen.

1.3 Målerigg

Måleriggen i Tysfjord ble utplassert i slutten av mars 2012, nord for utslippsledningene og omkring 70 m i avstand fra utslippsrørene til NC A/S. Målingene pågår fortsatt, men den måleserien som er analysert her dekker perioden mai til desember 2013. Riggen måler temperatur, salinitet, turbiditet, pH og strøm. Måleintervallet er satt til 15 minutter og dataene blir overført kontinuerlig til NIVAs datamonitorings side www.aquamonitor.no. Produksjon og utslipp fra oppredningsfasen (ledning 2) er kontinuerlig, mens produksjon og utslipp til sjøvannstank fra syrevaskfasen (ledning 3) er en batchprosess. Prosessen består derimot av flere enheter slik at batchene delvis kan overlape. Målefrekvensen må være høy nok til at batch-utslippene skal kunne bli fanget opp av måleriggen. Målesensorene er plassert på 10 og på 20 m dyp.



Figur 2. Marin målerigg med bøye i overflaten som markerer posisjon til rigg. Solcellepanel benyttes for å sikre kontinuerlig målinger uten bytte av batterier.

Tabell 1. Posisjoner for utslippspunkter og målestasjoner

	Breddegrad	Lengdegrad
Ledning 2	68.04600 °	16.09400 °
Ledning 3	68.04600 °	16.09500 °
Målerigg	68.04660 °	16.09397 °
Referansestasjon	68.04012 °	16.20633 °

Tabell 2. Målenøyaktighet til de ulike sensorene på måleriggen.

Parameter	Usikkerhet
Strøm	± 0,15 cm/s eller 1 %
Turbiditet	± 2 NTU eller 5 %
pH	± 0,2 enhet
Temperatur	± 0,15 °C
Saltholdighet	± 0,1 ppt eller 1 %

Saltholdighet måles ikke direkte, men beregnes i instrumentet ut fra temperatur og målt konduktivitet.

Måleinstrumentene montert på måleriggen er fra YSI og Aanderaa. En multiparametersonde av typen YSI6820 er montert på 10 meters dyp. Denne sonden har sensorer som måler pH, temperatur, ledningsevne, trykk og turbiditet. Blant sensorene er en av typen 6560 som måler temperatur og ledningsevne. I tillegg blir det brukt en multiparametersensor av modell YSI 600XL V2-1 på 20 meters dyp med de samme sensorene som er på 10 m. Strømmålinger er tatt med en DCS Z-pulse sensor fra Aanderaa.

1.4 Resultater fra tidligere undersøkelser

Modellresultater fra Ledang m.fl. (2011) basert på fem ulike tetthetsprofiler gjennom året og fra ulike sesonger (januar, november, juni, oktober og desember) viste at grunnet ferskvann i utslippet fra oppredningen (ledning 2) og liten tetthetssjiktning i vannsøylen² var det gjennomslag til overflaten for fire av fem profiler med svak strøm (2 cm/s) for dette utslippet. Ved sterk strøm (10 cm/s) var innlagringsdypet hhv. 25 og 20 m for to av profilene, og innlagring omkring 5-10 m for de andre profilene. Modellberegninger viste også at ved en avstand på 3 m fra utslippet vil partikkelkonsentrasjonen være på 100 til 420 mg/l og ved en avstand 100 til 200 m vil partikkelkonsentrasjonen være mellom 2 og 12 mg/l, basert på 29 090 mg/l (partikkelkonsentrasjon gitt fra bedriften) i utslippet.

For utslipp fra syrevaskfasen (ledning 3) tok beregningene hensyn til at det er fortennet før utslipp med en stor andel sjøvann fra 30 m dyp (97 % sjøvann og 3 % ferskvann), men også her viste modellresultater at det ved noen tilfeller var gjennomslag til overflaten. Ved svak strøm på 2 cm/s ga beregningene innlagringsdyp på 28 og 20 m for to av de fem profilene, og gjennomslag til overflaten for de andre tre tilfellene. Ved sterk strøm på 10 cm/s ga modellberegningene ingen gjennomslag av det fortynnede utslippet til overflaten, og innlagringsdyp på hhv. 29, 23 og 15 m for tre av de fem profilene. Etter en fortykning på mellom 34x til 194x vil pH være tilbake på 8,0 til 8,2 og dette vil innebære en avstand på 20 til 200 m fra utslippspunktet, avhengig av strømhastigheten (sammenlignet med en pH ned mot 2,7 akkurat i utslippspunktet og uten videre fortykning i resipienten).

Med tanke på et framtidsscenario, ble et supplerende modelleringsarbeid (Ledang og Schaanning, 2011) gjennomført. Dette innebar ett scenario med økning av fluorkiselsyre på ~321 % (fra 5249 kg/døgn til 22 125 kg/døgn) med 1x sjøvannsinnblanding (samme mengde sjøvann som i tidligere modelleringsarbeid) og ett scenario med samme mengde fluorkiselsyre med 4x sjøvannsinnblanding. Disse to tilfellene vil gi en utslippsokning fra ledning 3 på 26 % og 317 %. Modellresultatene viste at ved 1x blanding med sjøvann ville 4 av 5 tilfeller ha gjennomslag til overflaten ved svak strøm. Ved sterk strøm var det innlagring omkring 4 m for 3 tilfeller, og 25 og ~16 m for to tilfeller. Samtidig viste resultatene at pH vil være mellom 6,6 og 7,8 ved en avstand på 10 m fra utslippspunktet grunnet fortykning (sammenlignet med en pH på 1,9 i utslippspunktet og uten videre fortykning i resipienten). For scenarioet med 4x sjøvannsinnblanding var det ingen gjennomslag til overflaten for hverken svak eller sterk strøm. Innlagringsdyp ved svak strøm på 2 cm/s var på ~3 m for tre av fem tilfeller og 23 og 28 m for to tilfeller. For sterk strøm på 10 cm/s var det innlagring på 10 m for tre tilfeller og på 23 og 28 m for to tilfeller, altså størst endring i innlagringen i det øvre laget ved sterk strøm. Ved en avstand på 35 m vil pH ha økt til mellom 7,9 og 8,0 grunnet fortykning (sammenlignet med pH ned mot 2,7 ved utslippspunkt og uten videre fortykning i resipienten).

I 2011 ble det etter forespørsel av bedriften gjennomført toksisitetstest (EC10 og EC50) på den marine algen *Skeletonema costatum* og den marine copepoden *Tisbe battagliai* fra tre ulike utslippsvann; fra flotasjon 1, fra flotasjon 2 og totalt utslippsvann som er både flotasjon 1 og flotasjon 2. Resultatene indikerte at algeveksten var mer følsom for utslippsvannet sammenlignet med copepoden. Videre viste resultatene at utslippsvann fra flotasjon 2 var litt mer toksisk enn flotasjon 1, men en interaksjon mellom flotasjon 1 og flotasjon 2 ga en redusert toksisitet i det totale utslippsvannet.

I Ledang og Beylich (2013) ble det vist en tydelig sammenheng mellom utslipp fra syrevaskfasen og målt pH-reduksjon ved målepunktet i sjøresipienten. Utslipp fra bedriften ga pH-reduksjon ned i 6,6, men til tross for dette var det kun 0,5 % av målingene som var under 7,4. SPI-undersøkelse viste at det kunne være kvarts i sedimentet, men hvite korn som ble observert kunne også være skjell-/korallrester.

² Tetthetsforskjellen mellom 30 m dyp og overflaten var bare 0,3 til 1,5 sigma-t enheter, dvs. hhv. ca. 1 og 5 % av forskjellen mellom ferskvann og rent havvann

2. Resultater

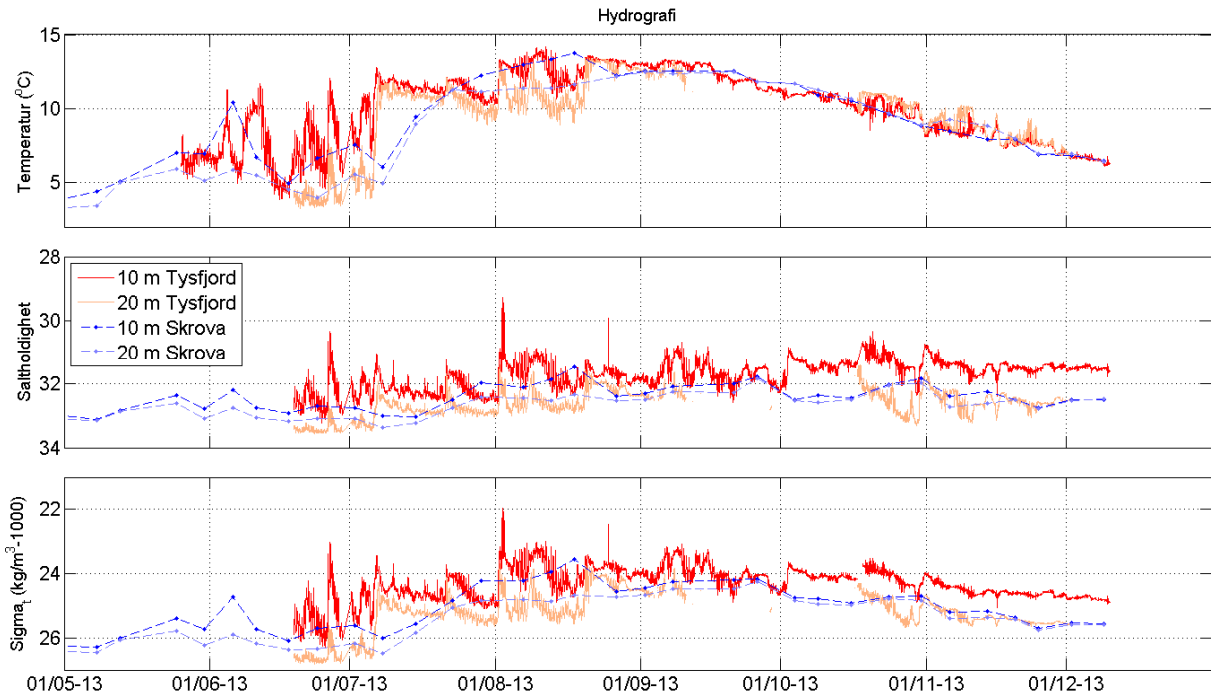
Fra omtrent midten av desember 2012 kom det ikke lenger data fra måleriggen på grunn av dårlig batteri. I stedet for vedlikehold i januar, ble det bestemt å utsette dette ettersom produksjonen hos bedriften ville ha et opphold. Det ble derfor gjennomført vedlikehold på måleriggen i mai, og dette inkluderte oppsett av et nytt måledyp på 10 m. Data presentert i denne rapporten er derfor fra perioden 1. mai 2013 til 1. januar 2014, og dette gjelder også tilleggsdata fra værstasjoner og produksjonsdata gitt av bedriften. Fra september var det problemer med vanninntrenging i kontakten til sensoren på 20 m. Dette vil være synlig som manglende datapunkter og diskontinuitet i tidsserien.

2.1 Hydrografi

I **Figur 3** er en tidsserie av temperatur, saltholdighet og tetthet (σ_t) presentert fra 10 m og 20 m fra måleriggen og fra samme dyp fra den faste stasjonen Skrova³ til Havforskningsinstituttet (HI). Merk at både saltholdighet og tetthet er vist i reversert skala; det vil si høyeste verdier er nederst og de laveste er vist øverst.

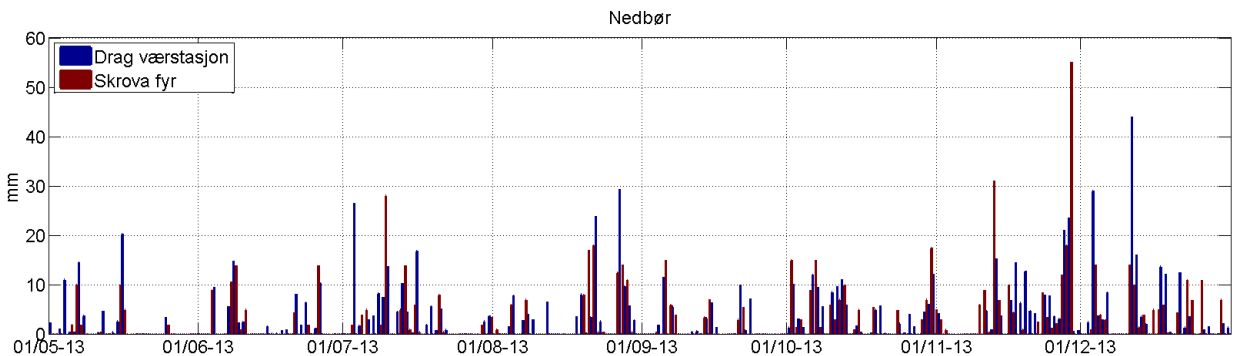
Tidsserien viser tydelig den sesongmessige variasjonen gjennom året. Fra mai og frem til september stiger temperaturen ved begge målestasjoner og ved begge dyp, og i den samme perioden er det også en nedgang i saltholdighet. I begynnelsen av juli er det en tydelig økning i temperatur, og en nedgang i saltholdighet ved måleriggen, etterfulgt av Skrova noen dager senere. Skrova-stasjonen er lokalisert på nordsiden av Vestfjorden. Den generelle sirkulasjonen i Vestfjorden har innstrømning av den norske kyststrømmen inn i Vestfjorden på den sør-østlige siden og ut igjen langs med Lofotveggen på den nord-vestlige siden (Sætre og Mork, 1981). Økning i temperatur og svak nedgang i saltholdighet noen dager senere ved Skrova enn i Tysfjord tyder på at vann kan ha entret fjorden etter å ha nådd enden av Vestfjorden for så å bevege seg ut av Vestfjorden igjen. Fra og med september og videre utover høsten og vinteren er det en nedgang i temperaturen ved begge dyp ved måleriggen og ved Skrova. På 10 m dyp er endringen mindre, sett bort i fra de kortvarige endringene som ses med samme mønster ved både 10 og 20 meter, og det er større forskjell i saltholdighet mellom 10 og 20 m i målepunktet enn ved de samme dypene ved Skrova, og fra november er saltholdighet ved 20 m i målepunktet tilsvarende de to dypene ved Skrova.

³ Kilde: http://www.imr.no/forskning/forskningsdata/stasjoner/free_search.php

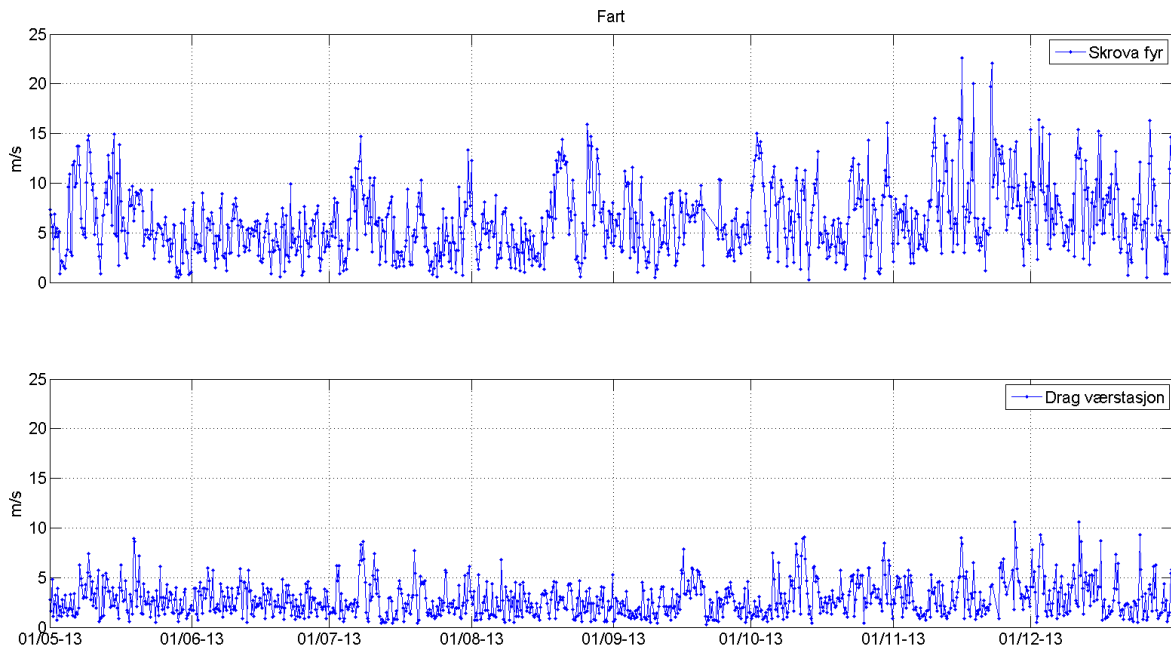


Figur 3. Tidsserie av hydrografien (temperatur, saltholdighet og tetthet som sigma_t) fra måleriggen i Tysfjord og fra HI-stasjonen Skrova i Vestfjorden. Det er vist målinger fra 10 og 20 m fra begge lokaliseringsen. Merk at både saltholdighet og tetthet er vist i reversert skala; høyest nederst og lavest øverst.

Oktober, november og desember var nedbørsrike måneder på Drag med henholdsvis 124, 148 og 164 mm med nedbør (vist i **Figur 4**). Nedbørsepisodene var hyppigere her enn i Vestfjorden. Samtidig var det sterk vind i Vestfjorden i disse månedene (vist i **Figur 5**) som kan føre til blanding og homogent lag i de øvre vannmassene her. Dette trolig forklarer den økte differansen i temperatur og saltholdighet mellom 10 og 20 m i Tysfjord, mens differansen var mindre mellom 10 og 20 m ute i Vestfjorden.



Figur 4. Nedbørsdata fra værstationen ved Drag og Skrova fyr.

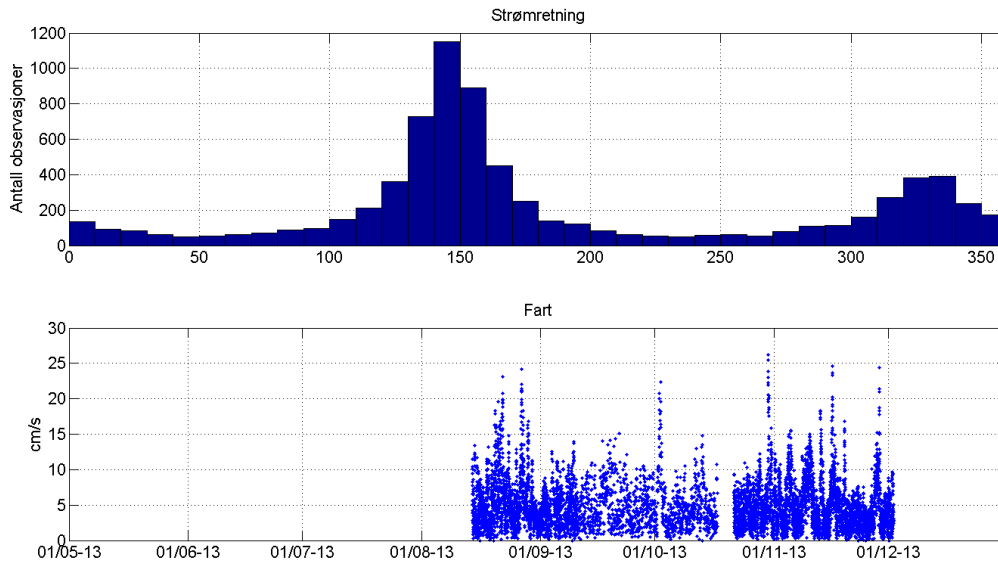


Figur 5. Tidsserie over vindfart ved værstasjonen til Skrova fyr og Drag.

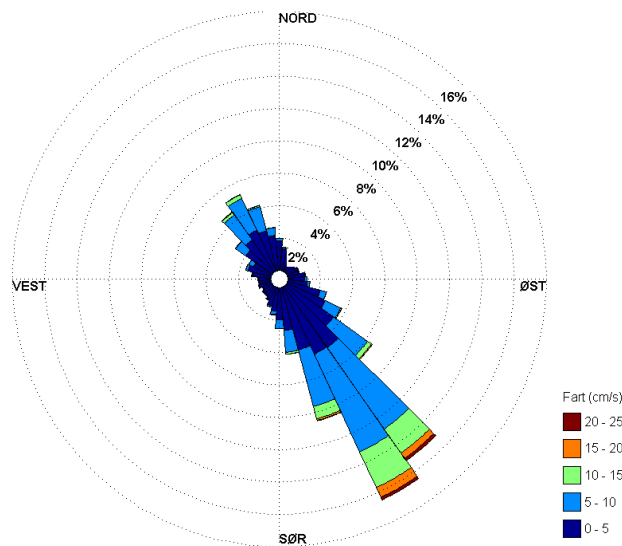
2.2 Strømmålinger

I **Figur 6** og **Figur 7** er strømdata fra 20 m presentert. Histogrammet øverst i **Figur 6** viser at den hyppigste retningen er 140° (herved kalt sørøstlig strøm som er inn fjorden), etterfulgt av 330° (herved kalt nordvestlig strøm som er ut fjorden). Nederste panel viser at de fleste observasjonene (tettast farge) for fart ligger i området 0 til 10 cm/s. For noen tilfeller har det vært sterk strøm opp mot 20 cm/s.

Fordelingen av fart i de ulike retningene er vist i roseplottet i **Figur 7**. Denne figuren viser tydeligere hvilke «transport»-retninger og fartsintervaller som dominerer ved lokaliseringen av måleriggen i Tysfjord. Den bekrefter også det som **Figur 6** viser, at strøm mot sørøst i intervallet fra null opp til 10 cm/s er det som skjer hyppigst.

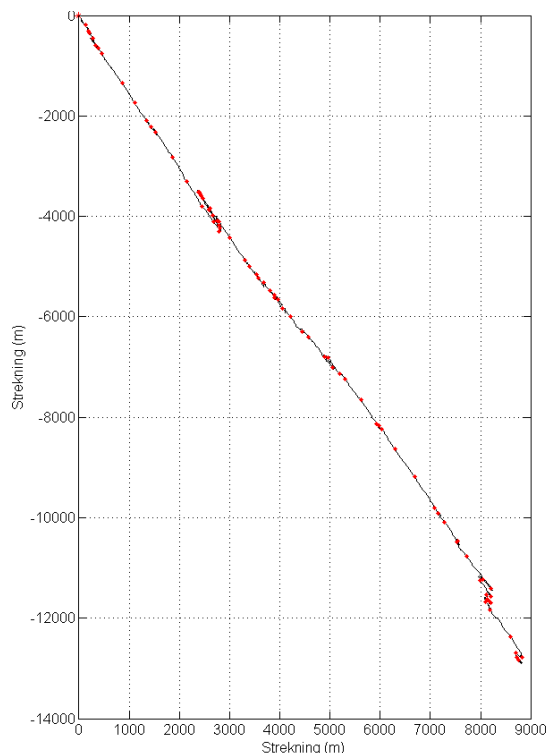


Figur 6. Øverste panel viser frekvensen til de ulike strømretningene hvor 0 og 360 er nordlig strøm (strøm som beveger seg mot nord), 90 er østlig, 180 er sørlig og 270 er vestlig. Nederste panel viser strømfarten i cm/s (uten retning).

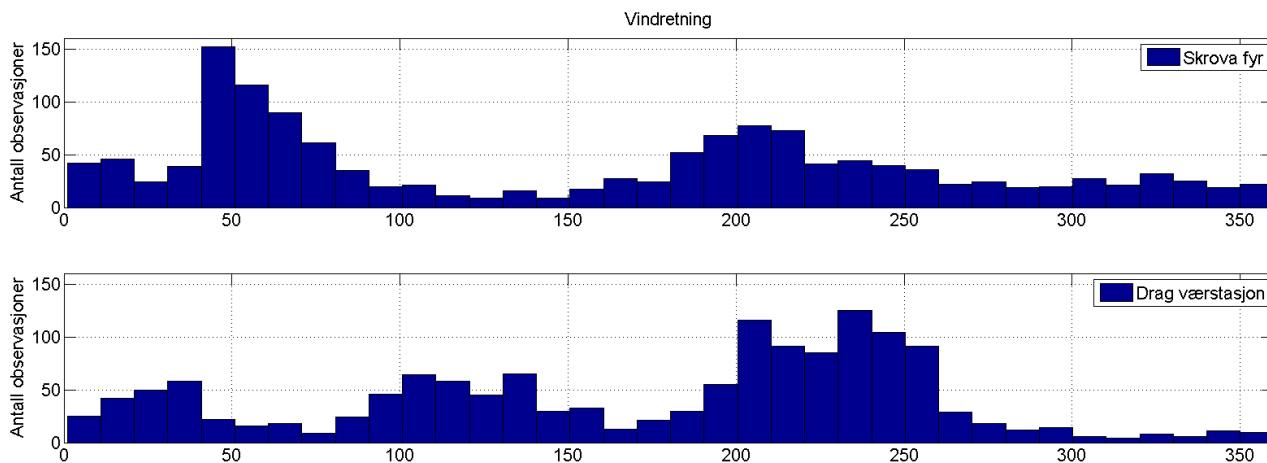


Figur 7. Retning og fart er presentert i en strømrose. Sirkelradius indikerer andel farsmålinger i prosent, fargekodene viser de ulike fartsintervallene og sektorene representerer de ulike retningene.

I **Figur 8** er et progressiv vektor diagram presentert som viser hvordan en partikkel ville ha beveget seg hvis strømmen ville ha vært lik overalt som i målepunktet, uansett hvor partikkelen ville ha befunnet seg. Dette er ikke tilfelle, men diagrammet reflekterer de lokale strømforholdene. Gjennom diagrammet er lokaliseringen til måleriggen i Tysfjord tydelig størst påvirket av sørøstlig strøm. Hvis vinden hadde vært dominerende fra nordvest, kunne dette vært med å forklare denne dominerende strømretningen selv om strømmålingene er ved 20 m. Vinddata fra målestasjonen Drag viser derimot at hovedretningen for vinden er mellom 200° og 250°, som betyr sørvestlig vind (vind fra sørvest). Dette tyder derfor på at det i Tysfjord er en sirkulasjon med strøm inn fjorden på sørsiden av fjorden og trolig en utgående strøm på nordsiden av fjorden.



Figur 8. Progressivt vektor diagram som viser hvordan en partikkel ville ha beveget seg hvis strømmen ville ha vært lik overalt som i målepunktet. Perioden er fra mai til desember.

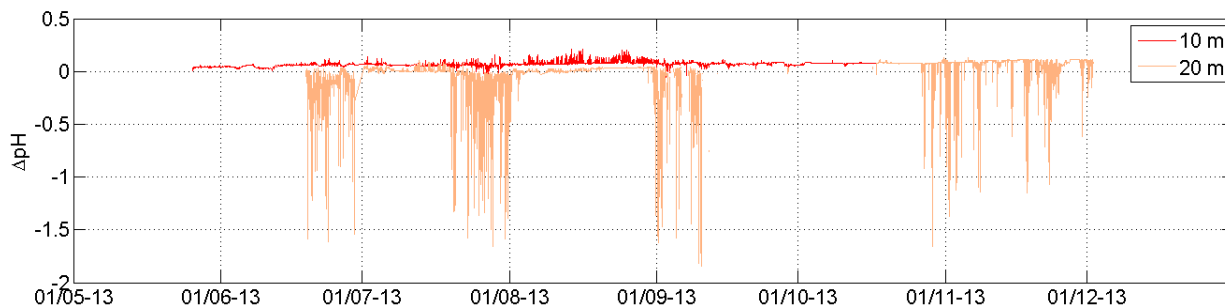


Figur 9. Histogram over vindretning ved værstasjon ved Skrova fyr og på Drag i Tysfjord.

2.3 pH

pH i sjøvann fluktuerer naturlig gjennom døgnet med en variasjon fra 7,4 til 9,2 på daglig basis (Middelboe and Hansen, 2007). I næringsrike kystvann vil variasjonen i pH være spesielt stor, fra 7,1 til 9,7 (Hansen, 2002). Variasjonen i pH er også bestemt av den geografiske lokaliseringen med ulik biologisk produksjon, lystilgjengelighet og ulik påvirkning av vannmasser (Chierici, 2011). Resultater fra Chierici (2011) har vist at pH ligger rundt 8,2 for prøver tatt ved omtrent samme breddegrad som lokaliseringen til Tysfjord på Norskekysten, at Tysfjord har god innstrømning fra Vestfjorden i vest (som vist i **Figur 3**) og ferskvannbidraget i fjorden er lavt.

I **Figur 10** er pH-målinger fra målepunktet ved 10 og 20 meter vist som differanse mellom målt pH og pH for sjøvann (8,2). Dataene viser et tydelige jevnlig fall i pH på 20 m, mens det ved 10 m er mye lavere variasjon.



Figur 10. pH-målinger fra målerigg presentert som differansen mellom målt og 8,2 fra 10 m og fra 20 m.

I **Tabell 3** og **Tabell 4** er andel målinger av pH under en viss grense vist, og det var ingen målinger av pH lavere enn eller lik 6.

Tabell 3. Andel målinger av pH under en viss grense. pH-målinger målt utenom syrevaskutslipp er også inkludert.

pH	Andel (%)
≥ 8	83,3
$< 6,5$	0,02
< 7	0,4
$< 7,5$	1,7
< 8	7,1

Tabell 4. Andel målinger av pH under en viss grense. Kun pH-målinger lavere enn eller lik 8 inkludert.

pH	Andel (%)
$< 6,5$	0,4
< 7	6,4
$< 7,5$	24,5

Målinger av pH i 2013 er fra perioden slutten av mai og ut desember 2013. Målingene fra 10 m viser ikke det samme mønster som på 20 m, og dette dypet er trolig lite påvirket av utslippet med lav pH og/eller at fortyningen har vært såpass stor at pH-verdiene er tilbake til normalt for sjøvann. I dette er det ikke gjort noen vurdering av vinterforholdene hvor sjiktningen i vannsøylen er lavere, og gjennomslag til overflaten kan forekomme, og det kan derfor ikke utelukkes at lavere pH-målinger kan forekomme om vinteren også ved 10 m.

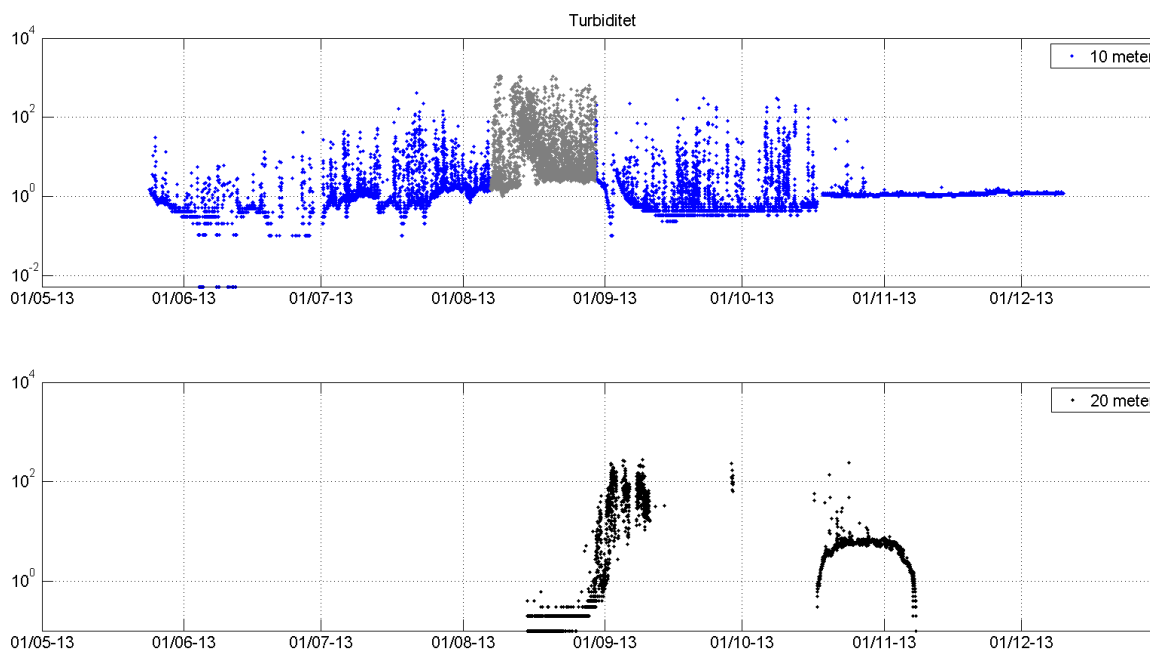
2.4 Turbiditet

Turbiditet måles som spredning av en infrarød lysstråle og brukes ofte som mål på partikkelmengden i en resipient, og det antas at 1 FTU \approx 1 TSM mg/l⁴.

⁴ Kai Sørensen, pers.med.

Turbiditet er målt både ved 10 og 20 meters dyp og vist i **Figur 11**. Gjennom 2013 har det vært gjennomført flere ett punktskalibrering samt en etterjustering av turbiditetsverdier som har ligget jevnt over for høyt eller lavt sammenlignet med resultater fra turbiditetsanalyser av vannprøver. Tidsserien viser generelt høye turbiditetsverdier ved 10 meter, spesielt i august som er marker i grått. Dette skyldes trolig begroing på sensoren. I midten av oktober ble det gjennomført en service på riggen og turbiditetsverdiene på 10 m stabiliserte seg etter det.

Ved 20 m sørget en feil med oppsettfilen at det ikke kom inn turbiditetsdata fra dette dypet før i august. Fra september var det vanninntrenging i kontakten til sensoren på dette dypet. Den mistenkelige «kurven» til turbiditet ved 20 m etter dette skyldes trolig en feil med sensoren.



Figur 11. Tidsserie av turbiditet presentert i log-skala, øverst fra 10 m og nederst fra 20 m. Uthevet grå punkter samsvarer med ingen produksjon hos bedriften.

2.5 Produksjonsdata

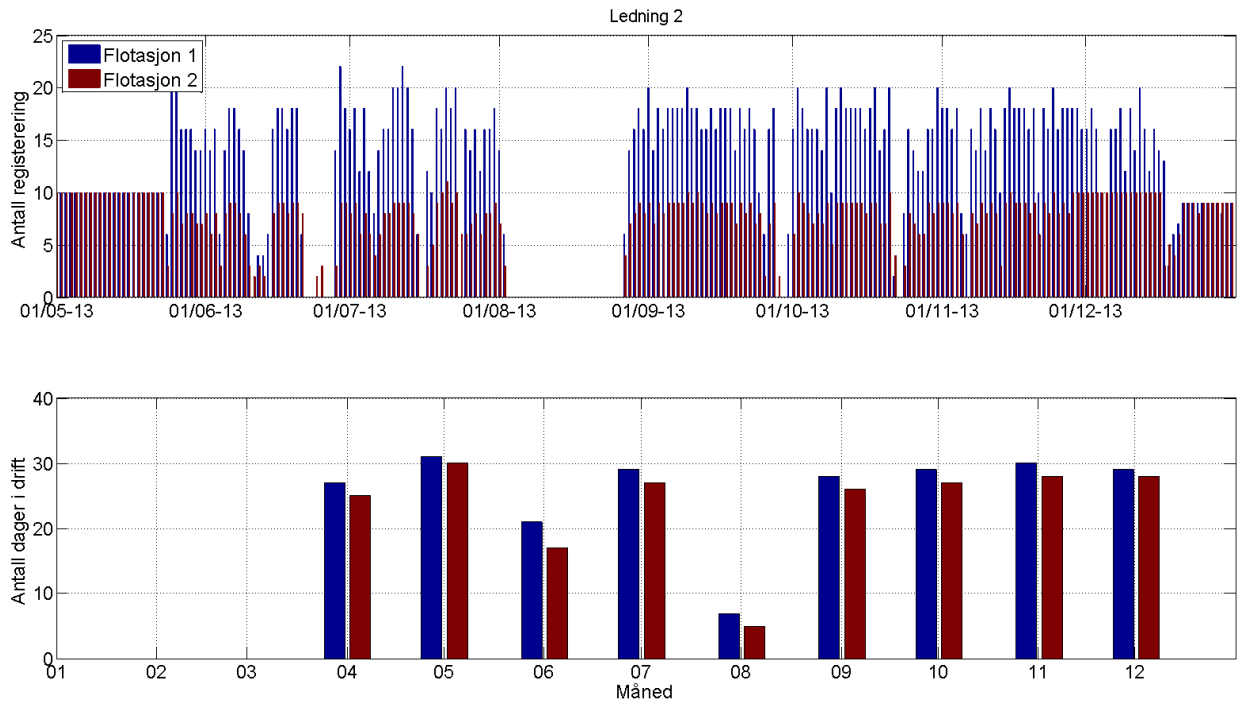
I oppredningsfasen blir kvartsråstoffet grovknust og finknust. Råstoffet går gjennom flere magnetseparasjonssteg og flotasjonssteg for å få best mulig rensket kvarts. Utslippsvann fra denne prosessen pumpes ut gjennom ledning 2 som ferskvann.

Øverste panel i **Figur 12** viser antall registreringer av dag fra to flotasjonsprosesser, kalt flotasjon 1 og flotasjon 2, mens nederste panel viser antall dager per måned det er drift og prosessene kjøres. Gjennom 2013 er det fra april til desember jevnt med dager i drift for flotasjon 1 og flotasjon 2, med unntak av juni og august hvor det er færre driftsdager.

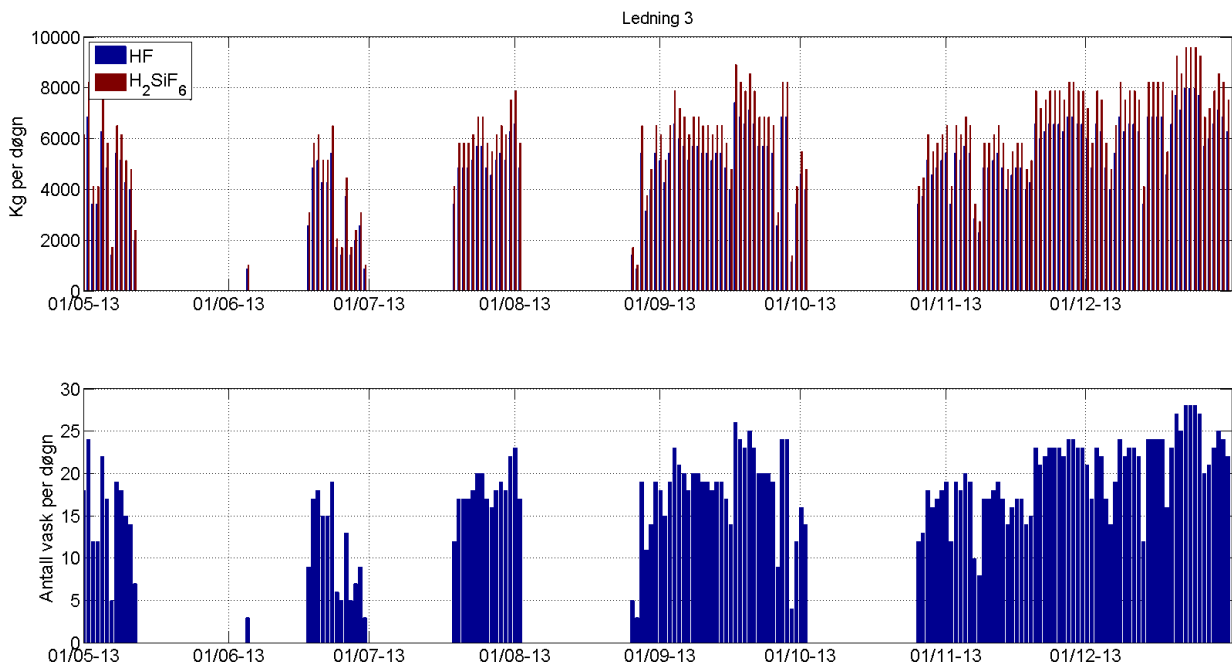
Utslipp fra ledning 3 består av en større del sjøvann som er pumpet inn fra 30 meters dyp som er blandet med en liten del ferskvann (omtrent 97 % sjøvann og 3 % ferskvann, Ledang m.fl. (2011)). I syrevaskfasen brukes flussyre (HF) for å løse opp små mengder av det gjenværende uønskede mineral. Flussyren reagerer med kvartsen som behandles og danner fluorkiselsyre.

I **Figur 13** er antall kg flussyre benyttet per døgn vist i øverste panel sammen med kg fluorkiselsyre per døgn. Flussyren er beregnet til å være 83,3 % av mengden fluorkiselsyre. I nederste panel er antall vask per døgn presentert. Perioden er den samme for tidligere figurer med data fra måleriggen fra Tysfjord.

Resultatene viser at produksjonen foregår i periodevis frem til november. Etter november er det stort sett kontinuerlig produksjon i varierende omfang helt frem til utgangen av 2013.



Figur 12. Øverst antall registreringer per dag av prosessene flotasjon 1 og flotasjon 2 og nederst antall dager i drift gjennom hele året i 2013.



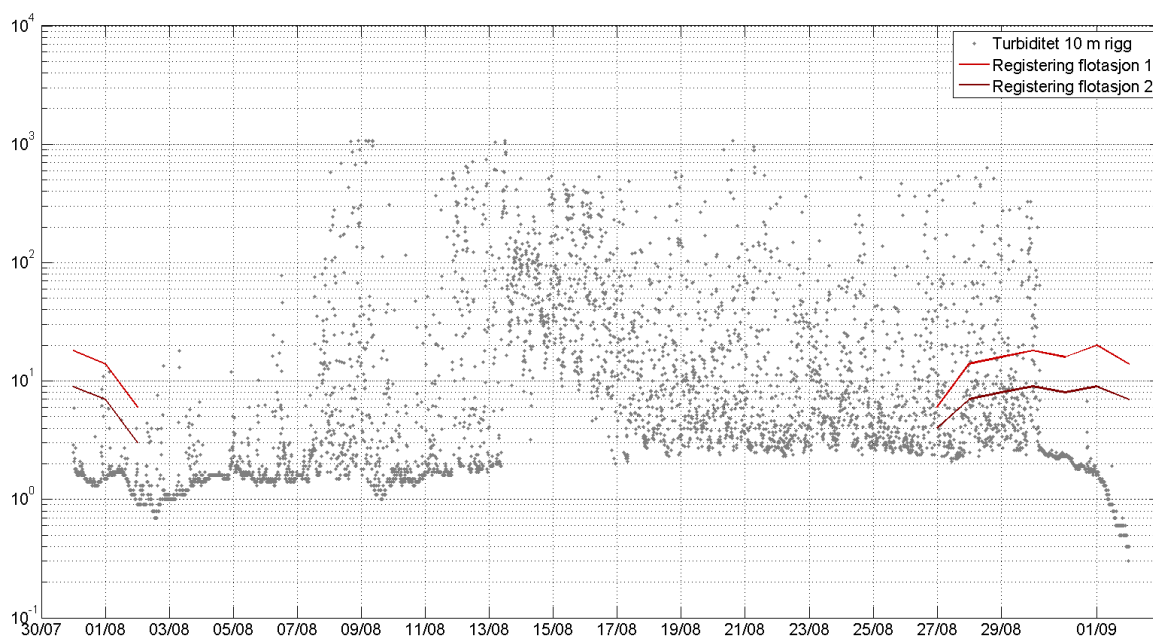
Figur 13. Øverst er antall kg syre per døgn fra syrevaskfasen presentert, mens det i nederste panel er presentert antall vask per døgn.

3. Vurdering av resultatene

3.1 Sammenheng mellom turbiditet og produksjonsdata fra oppredningsfasen

Ved å sammenligne turbiditetsdata fra 10 m i **Figur 11** og flotasjonsdata i **Figur 13**, kunne det se ut til å være en sammenheng mellom de høye turbiditetsverdiene i august og ingen registrering av flotasjon (produksjonsstans) fra samme periode fra oppredningsfasen

Ved en nøyere sammenligning er det lite som tyder på at de ekstremt høye turbiditetsverdiene ved 10 m dyp målt i august måned skyldes utslipp fra oppredningsfasen. Fra 2. august 2013 er det ingen flotasjonsregistrering og de høyeste turbiditetsmålingene starter rundt 8. august. Målinger med veldig høy turbiditet (> 100 FTU) fortsetter frem til 30. august, mens registrering av flotasjon starter 27. august.



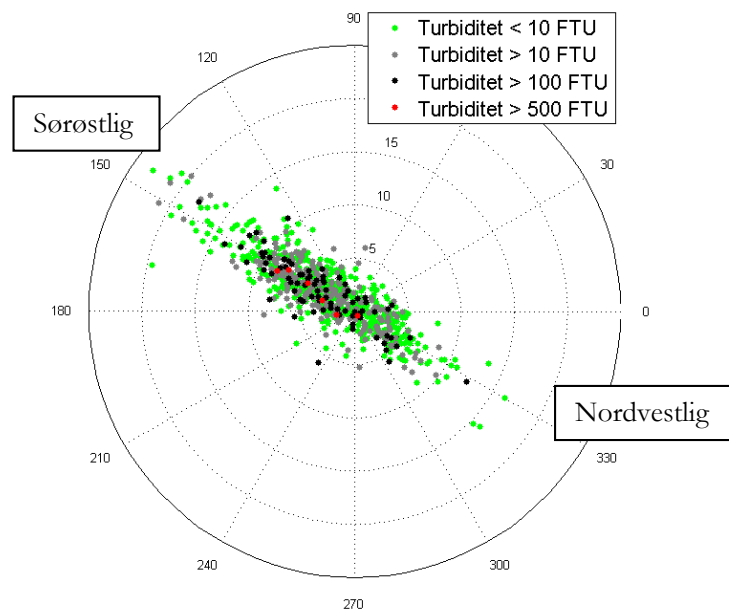
Figur 14. Utdrag av turbiditetsdata og flotasjon-registreringsdata i perioden 31. juli til 2. september 2013.

En grundigere undersøkelse av sammenhengen mellom utslipp og høy turbiditetsmålinger kan gjøres ved å se på strøm sammen med turbiditet. Ved å se på strømretning og styrke, kan dette si noe om hvilken retning utslippet vil bli transportert. Ved en nordvestlig retning vil utslippet passere måleriggen, og dette ville trolig gi økt utslag på turbiditet ved denne strømretningen, hvis de veldig høye turbiditetsmålingene i august skulle være relatert til utslippet. Resultatene i **Figur 16** viser ikke denne sammenhengen for utdraget 1. august til 1. september. Turbiditetsmålingene har spredning langs med strømretningene sørøst og nordvest og har ingen tydelig mønster. I **Figur 16** er turbiditet vist mot inn- og utfjordsstrøm i et tidsvindu fra 20. august til 23. august for å se enda nøyere på sammenhengen mellom retning og turbiditetsverdier. Høy turbiditet blir målt ved strøm inn fjorden, ved strøm ut fjorden og ved liten strøm, og det er ingen tydelig mønster.

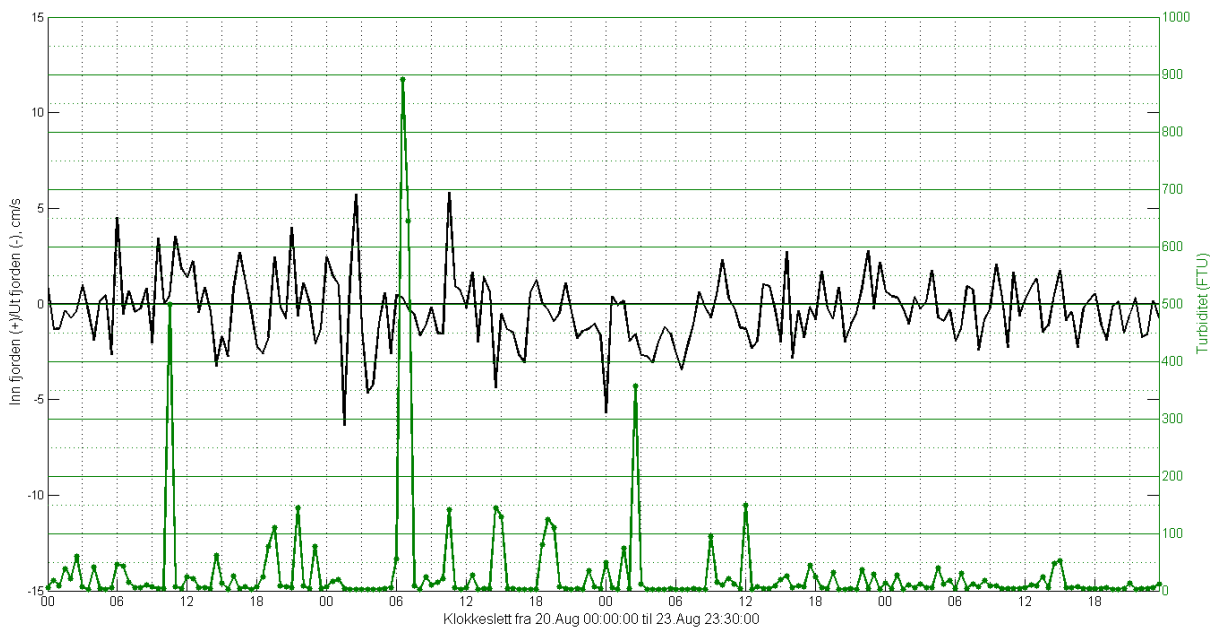
Ut i fra dette er naturlig å anta de høye verdiene sommeren 2013 skyldes begroing på sensoren og at de ikke er relatert til utslipp fra oppredningsfasen.

Det var ingen ordinære utslipp i produksstansen i august.⁵

⁵ Kari Moen, The Quarz Corp AS, pers. med..

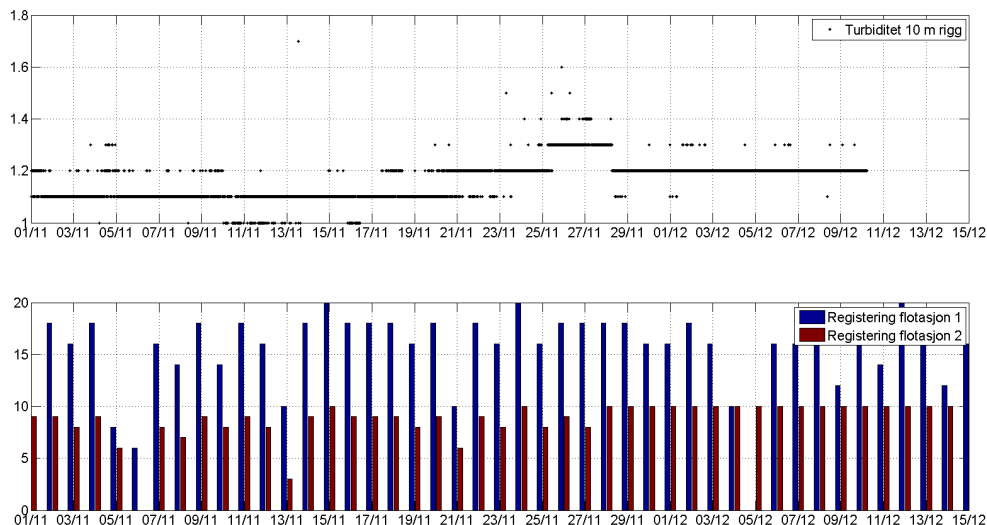


Figur 15. Turbiditet plottet mot strøm i perioden 1. august til 1. september 2013.



Figur 16. Turbiditet og inn- og utfjordsstrøm vist for et tidsvindu fra 20. august til 23. august.

Resultatene fra 2012 viste at episoder med høy turbiditet sammenfalt med perioder med lav eller ingen drift for flotasjonsprosessene, og det kunne derfor ikke utelukkes at dette kunne være partikkelutslipp fra oppredningsfasen i ledning 2 i disse periodene. For perioden november til desember 2013 er det i **Figur 17** vist øverst turbiditet fra 10 m og nederst antall registreringer av flotasjon 1 og flotasjon 2 i samme periode. Det er ingen påfallende sammenheng mellom turbiditetsmålingene og flotasjonsregistreringene.



Figur 17. Øverst turbiditet ved 10 m fra november og desember, og nederste flotasjon 1 og flotasjon 2 fra samme periode.

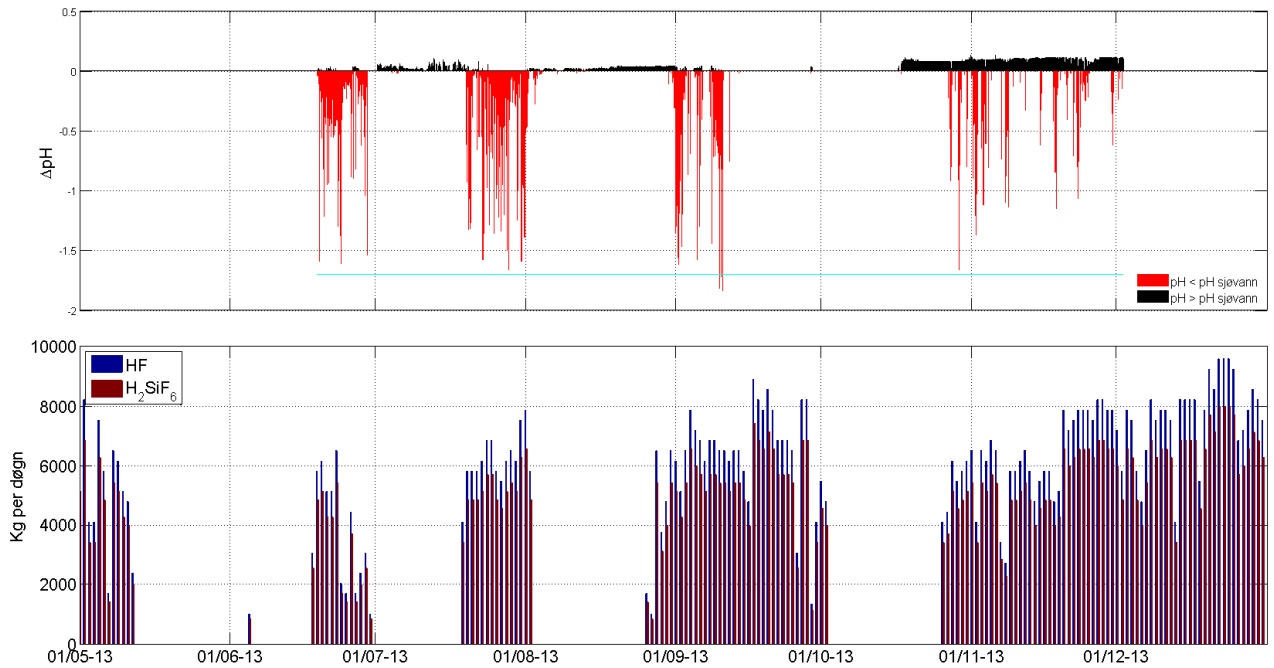
3.2 Sammenheng mellom målt pH ved måleriggen og utslipp fra syrevaskfasen.

I **Figur 18** er pH-målinger fra måleriggen ved 20 m presentert sammen med mengden flussyre (HF) og fluorkiselsyre (H_2SiF_6). For målingene av pH er disse presentert som differansen mellom målt pH og pH for sjøvann (8,2).

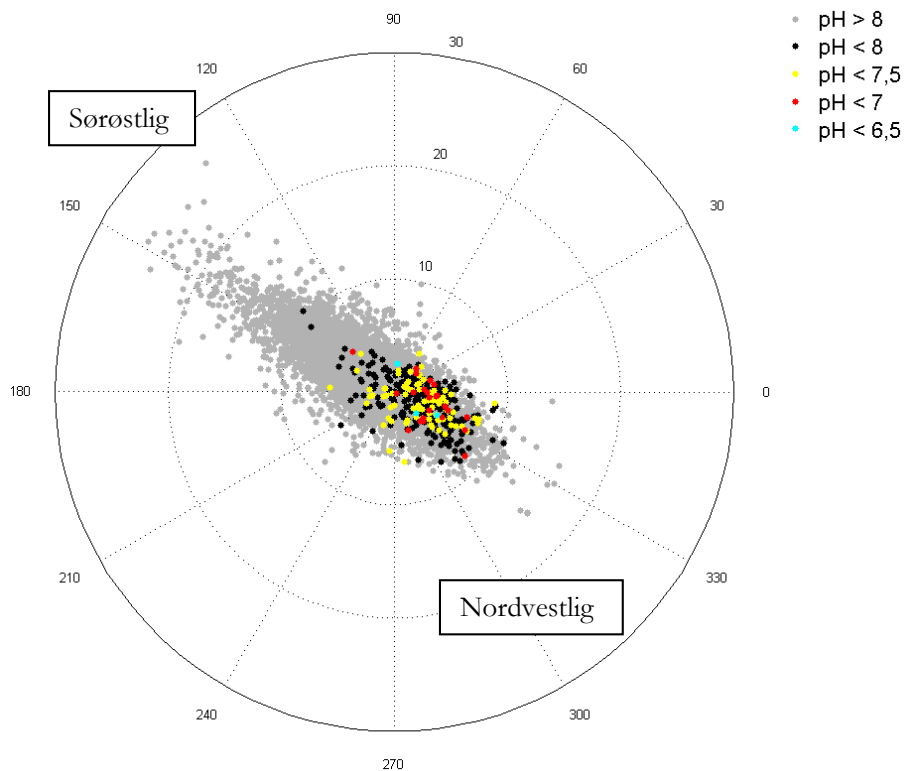
Tidsseriene i **Figur 18** kan sammenlignes direkte for å se på sammenhengen mellom utslipp fra syrevaskfasen og dens virkning på pH i resipienten. Det er kun valgt å vise pH-målinger fra 20 m dyp, ettersom **Figur 10** viste at det var liten variasjon i pH ved 10 m.

Tidsserien av pH-målinger fra måleriggen og syrevaskdata gitt av bedriften viser et godt samsvar. De langvarige periodene med ingen avvik eller positive avvik ($\Delta pH \geq 0$) forekommer i perioder uten syrevask, med unntak av siste del av september og første del av oktober hvor det var problemer med vanninntrenging i kontakt på målesensoren. Negative avvik i pH ($\Delta pH < 0$) forekommer i perioder med syrevask. Den cyanfargede linjen viser pH tilsvarende 6,5.

I **Figur 19** er sammenhengen mellom strøm og pH vist i et polar plott. Hovedstrømretningen er sørøstlig, og nordvestlig. I tilfellene med $pH < 8$ skjer det oftest i situasjoner hvor strømfarten er mindre 10 cm/s. Størsteparten av disse målingene er målt ved nordvestlig strøm (ut av fjorden) og det vil si at utslippsskyen med avløpsvannet vil passere måleriggen mellom 10 og 30 minutter etter utslippet ved 5 til 10 cm/s strøm. **Figur 19** viser også at det ved noen tilfeller er målt lav pH ved sørøstlig strøm. Dette kan skyldes at vannmasser med redusert pH har blitt fraktet forbi måleriggen, og ved en endring i strømretning vil denne vannmassen passere måleriggen også ved strøm inn fjorden.



Figur 18. pH-målinger fra målerigg ved 20 m presentert øverst som differanse i pH mellom målt og 8.2 (antatt pH til sjøvann). Cyan farge viser Δ pH på 1,7, som representerer en pH på 6,5. Nederst er mengden av flussyre (HF) og fluorkiselsyre (H_2SiF_6) som blir brukt per døgn i syrevaskprosessen presentert.



Figur 19. Strøm i form av retning (grader) og fart (radius) ut i fra forskjellig pH-verdier. Grå er pH > 8, sort er pH < 8, gul er pH < 7,5, rød er pH < 7 og cyan er pH < 6,5.

3.3 Effekter av redusert pH

I de senere år har det vært mye omtale om at økt CO₂ innhold i atmosfæren gir forsuringen av sjøvann, og at dette er bekymringsfullt. Mye av nyere litteratur på effekter av redusert pH i sjøvann er basert på CO₂ induisert forsuring. Det er imidlertid undersøkelser som tyder på at CO₂ induisert forsuring har større effekt enn redusert pH forårsaket av sterke syrer (Kikkawa et al. 2004).

Det har tidligere vært antatt at marine organismer først påvirkes av redusert pH når reduksjonen av pH (Δ pH) er mer enn ca. 0,4 pH enheter og at det er få eksempler på at selv en reduksjon på 0,5-1 pH enheter gir signifikante effekter (Knutzen, 1981). For en del organismer er nok det også riktig, men fokuset omkring CO₂ økningen i atmosfæren og mulige forsuringseffekter har før til at en i dag er bekymret, selv for CO₂ induserte reduksjoner i pH på så lite som 0,2 enheter, og da særlig for larvestadier og organismer som danner kalkskall.

Ut i fra tidligere beregninger (Ledang m.fl, 2011) basert på syremengde gitt av bedriften, vil utslippet fra ledning 3 ha en pH =2,7. Beregningene viste også at en fortykning på 10x vil gi en Δ pH på 1,2, og en fortykning på 39x vil gi en Δ pH på 0,2. Ut i fra modellberegninger gjort i dette arbeidet, tilsvarer dette en avstand innenfor 20 m i fra utslippet med en strømhastighet på 2 cm/s.

Utslipp og fortykning er en kontinuerlig prosess. Fastsittende organismer som befinner i utslippets nærområde vil oppleve en mer permanent eksponering, mens pelagiske organismer følger vannmassene og bare eksponeres for en Δ pH som kan gi effekter så lenge fortykningen er mindre enn 39 ganger. I den grad pH reduksjonen gir effekter vil dette trolig i hovedsak kun finne sted for fastsittende organismer i nærområde (<39x fortykning).

Måleriggen er plassert omkring 70 m fra utslippspunktet, og pH-målingene viser at 6,9 % av alle pH-målingene har pH lavere enn 7,5 som er en Δ pH på 0,7. Som vist i delkapittel 2.2 går størstparten av strømmen inn fjorden, men de lave pH-målingene er målt ved utgående strøm (**Figur 19**). Dette vil si at store deler av utslippet ikke vil bli fanget opp av måleriggen, og hyppigheten av lave pH-målinger vil sannsynligvis være høyere hvis måleriggen var plassert nedstrøms av utslippspunktet. Samtidig viste modellberegninger i Ledang m. fl. (2011) at ved en avstand på omkring 70 m ville en fortykning være på mellom 30x til 450x for strømtifellene 2 og 10 cm/s, som vil si en Δ pH mellom 0,2 og 0. Resultater fra måleriggen viser derimot en større Δ pH ved en slik avstand, og det bør derfor vurderes nye modellberegninger for å kunne gjøre en mer fullstendig vurdering av mulig pH-effekter.

4. Konklusjon

Det har blitt vist en tydelig sammenheng mellom utslipp fra syrevaskfasen og lavere pH målinger målt ved målepunktet. 83 % av pH-målingene har pH større enn eller lik 8, mens det er kun 0,02 % av målingene som har pH lavere enn 6,5, 0,4 % av målingene som har pH lavere enn 7, 1,7 % som har pH lavere enn 7,5 og 6,9 % som har pH lavere enn 7,5. I disse beregningene er pH-målinger målt når det ikke er gjennomført utslipp fra syrevask også inkludert. Størsteparten av strømmen går inn fjorden, men de lave pH-målingene er målt ved utgående strøm. Dette vil si at store deler av utslippet ikke vil bli fanget opp av måleriggen, og hyppigheten av lave pH-målinger vil sannsynligvis være høyere hvis måleriggen var plassert nedstrøms av utslippspunktet. Det vil derfor være hensiktsmessig å flytte måleriggen nedstrøms utslippspunktet.

Av alle målingene med pH lavere enn eller lik 8, så var 0,4 % med pH lavere enn 6,5 og 25 % med pH lavere enn 7,5. Det var ingen målinger av pH lavere enn eller lik 6. Målinger av pH i 2013 er fra perioden slutten av mai og ut desember 2013. Målingene fra 10 m viser ikke det samme mønsteret som på 20 m, og dette dypet er trolig lite påvirket av utslippet med lav pH og/eller at fortynningen har vært såpass stor at pH-verdiene er tilbake til normalt for sjøvann. På grunn av manglende vinterdata, er det ikke gjort noen vurdering av vinterforholdene hvor sjiktningen i vannsøylen vil være liten og gjennomslag til overflaten vil kunne forekomme. Det kan derfor ikke utelukkes at det vil forekomme lavere pH-målinger i vintermånedene også ved 10 m.

Utslipp og fortynning er en kontinuerlig prosess. Fastsittende organismer som befinner seg i utslippets nærområde vil oppleve en mer permanent eksponering, mens pelagiske organismer følger vannmassene og bare eksponeres for en Δ pH som kan gi effekter så lenge fortynningen er mindre enn 39 ganger. I den grad pH reduksjonen gir effekter vil dette trolig finne sted for fastsittende organismer i nærområdet ettersom tidligere beregninger viste at en fortynning på 39x tilsvarende en avstand innenfor 20 m fra utslippspunktet, ved en strømhastighet på 2 cm/s.

Tidligere modellberegninger basert på oppdatert utslippsdata for den aktuelle perioden, viste at ved en avstand på omkring 70 m ville en fortynning være på mellom 30x til 450x for strømtillfellene 2 og 10 cm/s. Dette tilsvarende en Δ pH mellom 0,2 og 0. Måleriggen er plassert omkring 70 m fra utslippspunktet, og pH-målingene fra 2013 viste at 6,9 % av alle pH-målingene hadde pH lavere enn 7,5 som tilsvarende Δ pH på 0,7. Resultater fra måleriggen viser altså en større Δ pH, og det bør derfor vurderes nye modellberegninger med nye oppdaterte utslippstall fra for å kunne gjøre en mer oppdatert og en mer fullstendig vurdering av mulige pH-effekter.

Veldig høye målinger av turbiditet i målepunktet skyldes trolig begroing. Det var vanskelig å vise noen sammenheng mellom turbiditetsmålingene og utslippet fra oppredningsfasen, men nettopp på grunn av utfordringene med begroing og vanninntrenging kan det foreløpig ikke utelukkes at det vil være utslag i målepunktet ved et senere tidspunkt. Det anbefales derfor en bedre kontinuitet på turbiditetsmålingene.

5. Referanser

- Chierchi, M., Sørensen, K., Johannessen, T., Børsheim, K. Y., Olsen, A., Yakushev, E., Omar, A., Blakseth, T. A. (2011). Tilførselsprogrammet 2011. Overvåking av forsuring av norske farvann. Klif rapport, TA-2936/2012, NIVA rapport 6365-2012. 65 s.
- Hansen, P. J. (2002). "Effect of high pH on the growth and survival of marine phytoplankton: implications for species succession." *Aquatic Microbial Ecology* 28(3): 279-288.
- Hofmann, G. E., J. E. Smith, K. S. Johnson, U. Send, L. A. Levin, F. Micheli, A. Paytan, N. N. Price, B. Peterson, Y. Takeshita, P. G. Matson, E. D. Crook, K. J. Kroeker, M. C. Gambi, E. B. Rivest, C. A. Frieder, P. C. Yu and T. R. Martz (2011). "High-Frequency Dynamics of Ocean pH: A Multi-Ecosystem Comparison." *PLoS ONE* 6(12): e28983.
- Ledang, A. B., Skei, J., Eikrem, W. Schanning, M. og Norling, P., 2011. Undersøkelse av sjøresipienten utenfor Norwegian Crystallites AS på Drag i Tysfjord. NIVA-rapport, 6129-2011, 46 s.
- Ledang, A.B. og Schaanning, M., 2011. Modellering av utslipp og beregning av pH ved et framtidsscenario - et supplerende dokument til rapport 6129. Notat, 10 s.
- Ledang, A. B. og Beylich, B. (2012). Dataanalyse av kontinuerlige målinger utenfor Norwegian Crystallites A/S på Drag i Tysfjord. NIVA rapport, 6436-2012. 29 s.
- Middelboe, A. L. and P. J. Hansen (2007). "Direct effects of pH and inorganic carbon on macroalgal photosynthesis and growth." *Marine Biology Research* 3(3): 134-144.
- Wicks, L.C. og Roberts, J. M., 2012. Benthic invertebrates in a high-CO₂ world. *Oceanography and Marine Biology, Annual rev.* 50, 127-187.
- Kikkawa, T., J. Kita and A. Ishimatsu, 2004. Comparison of lethal effects of CO₂ and acidification on red sea bream (*Pagrus major*) during the early development stages. *Mar. Pollut. Bull.*, 48, 108-110.
- Zeebe, R.E. and Wolf-Gladrow, D..CO₂ in seawater: equilibrium, kinetics, isotopes. Elsevier Oceanography Series, 65. First Edition, 2001.
- Sætre, R. og Mork, M. The Norwegian Coastal current: proceedings from the Norwegian Coastal Current Symposium, Geilo, 9-12 September 1980, Volume 1. University of Bergen, 1981.