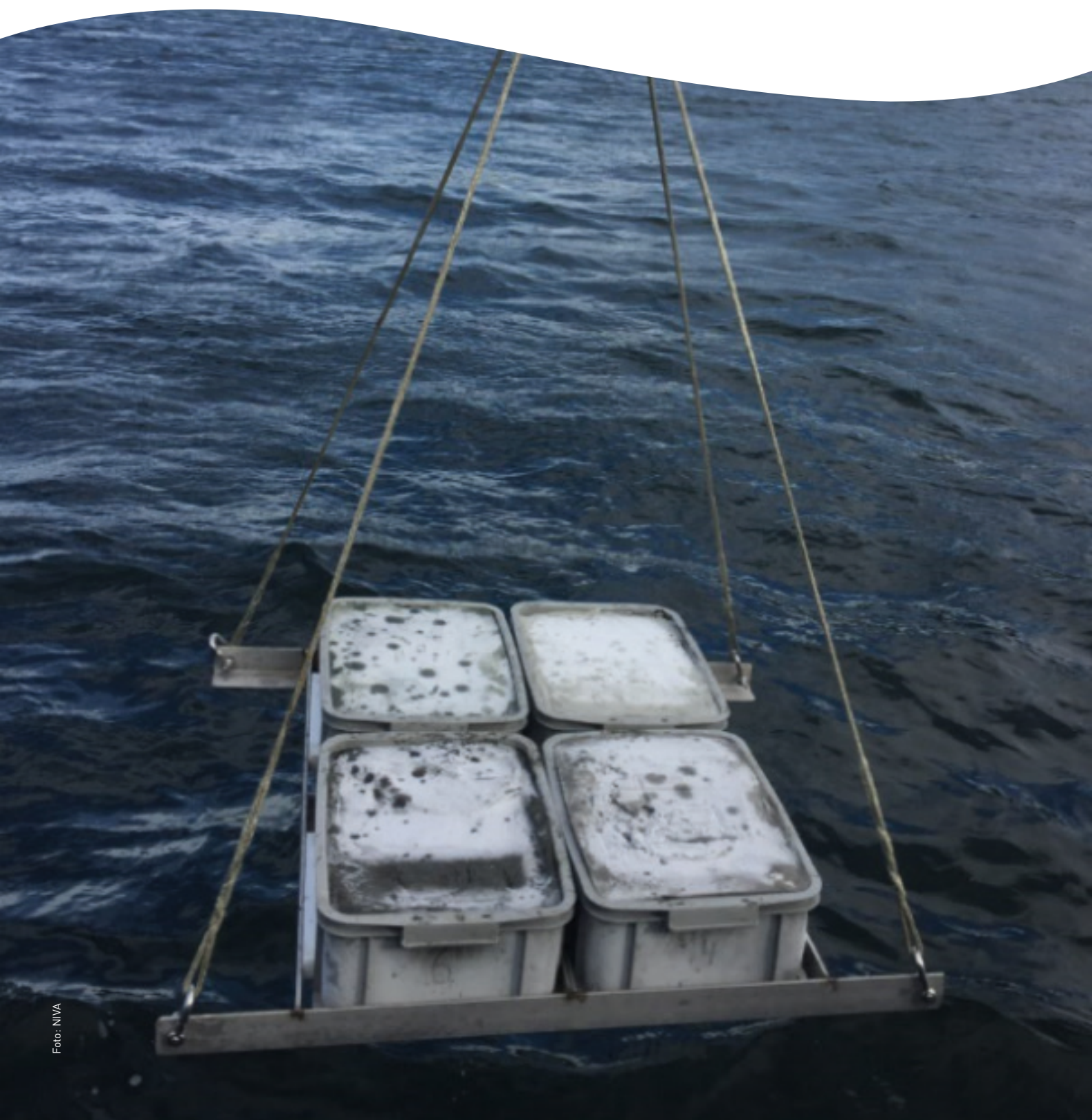


Miljørisiko ved utslipp fra gruvevirksomhet på Stjernøy – en sammenfatning av tester utført i regi av forskningsprosjektet NYKOS.



RAPPORT

Hovedkontor

Gaustadalléen 21
0349 Oslo
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Sør

Jon Lilletuns vei 3
4879 Grimstad
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Innlandet

Sandvikaveien 59
2312 Ottestad
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Region Vest

Thormøhlensgate 53 D
5006 Bergen
Telefon (47) 22 18 51 00

NIVA Danmark

Njalsgade 76, 4. sal
2300 København S, Danmark
Telefon (45) 39 17 97 33

Internett: www.niva.no

Tittel Miljørisiko ved utslipp fra gruvevirksomhet på Stjernøy – en sammenfatning av tester utført i regi av forskningsprosjektet NYKOS.	Løpenummer 7464-2020	Dato 13.02.2020
Forfatter(e) Morten Thorne Schaanning, Hilde Cecilie Trannum, Steven Brooks	Fagområde Marin biologi	Distribusjon Åpen
	Geografisk område Finnmark	Sider 42

Oppdragsgiver(e) Sibelco Nordic AS	Oppdragsreferanse Roar Sandøy
	Utgitt av NIVA Prosjektnummer 190189

Sammendrag

Denne rapporten sammenfatter resultater av ulike tester med avgang fra Sibelcos gruvevirksomhet på Stjernøy, Finnmark, oppnådd under forskningsprosjektet NYKOS. Videre vurderes resultatene i sammenheng med overvåking av de biologiske samfunnene i bedriftens nærområde. Det var god overenstemmelse mellom de økotoxikologiske «hel-sediment» testene av avgangen og forsøk utført med hele bunnfaunasamfunn i mesokosmos og i Oslofjorden. Disse viste at faunaen ble signifikant ($p < 0,05$) påvirket etter sedimentasjon av 0,3-6 cm avgang som var relevant sammenlignet med gjennomsnittlig sedimentasjon estimert til 6 cm/år i det avgangspåvirkede området på bunnen av Stjernesundet. Forsøkene viste også at sediment-vann flukser av silikat og fosfat ble påvirket etter sedimentasjon av lave doser avgang (0,3-2 cm). Feltundersøkelser i Stjernøysundet har vist at bunnfaunaen er mest forstyrret i de grunne områdene nær utslippspunktet, mens den i større avstand fra utslippspunktet, der sedimentasjonen er estimert til å være lavere, ikke var vesentlig forstyrret. Det ble konkludert at det er lite sannsynlig at de observerte effektene kan tilskrives andre forhold enn fysisk påvirkning knyttet til forhøyet sedimentasjon og eventuelt redusert næringstilgang i områder dominert av avgangsmasser.

Fire emneord	Four keywords
1. Gruveavgang	1. Mine tailings
2. Økotoxikologi	2. Ecotoxicology
3. Mesokosmos	3. Mesocosm
4. Rekolonisering	4. Recolonisation

Denne rapporten er kvalitetssikret iht. NIVAs kvalitetssystem og godkjent av:

Morten Thorne Schaanning
Prosjektleder

Marianne Olsen
Forskningsleder

ISBN 978-82-577-7199-7
NIVA-rapport ISSN 1894-7948

© Norsk institutt for vannforskning. Publikasjonen kan siteres fritt med kildeangivelse.

Miljørisiko ved utslipp fra gruvevirksomhet på Stjernøy

- en sammenfatning av tester utført i regi av
forskningsprosjektet NYKOS

Forord

Denne rapporten er en sammenfatning av resultatene fra NIVAs undersøkelser 2014-2019 av avgang tilsendt fra Sibelcos gruvevirksomhet på Stjernøy, Finnmark. Undersøkelsene var en del av arbeidspakke 4 «Effekter av gruveavgang på marine bentiske økosystemer» under forskningsprosjektet NYKOS - Ny Kunnskap Om Sjødeponi – (NFR prosjekt nr. 236658). I tillegg til undersøkelsene under NYKOS omfatter rapporten en sammenfatning av overvåkingsdata fra den lokale resipienten i Stjernesundet. Rapporten er utarbeidet i henhold til vårt tilbud av 30.04.2019 (Jnr. 0236/19) akseptert av Sibelco Nordic AS i epost fra Roar Sandøy 21.05.2019. Undertegnede har hatt ansvaret for utarbeidelse av rapporten med god støtte fra Hilde Cecilie Trannum som har ledet undersøkelsene av effekter på bunnfaunaen, og Steven Brooks som har hatt en tilsvarende rolle i forhold til økotoksikologiske tester. Forskningsleder Marianne Olsen har kvalitetssikret og godkjent rapporten i henhold til NIVAs standard prosedyrer for gjennomføring av eksterne prosjekter.

Oslo, 13.02.2020

Morten Thorne Schaanning

Innholdsfortegnelse

1	Introduksjon.....	8
1.1	Sibelco Stjernøy	8
1.2	Bakgrunn og målsetting	11
1.3	Fysisk-kjemisk karakterisering av de tre avgangsmaterialene.....	12
2	Økotoksikologiske tester	13
2.1	Vannuttrekk	13
2.1.1	Tillaging.....	13
2.1.2	Utløsing av metaller	13
2.1.3	Effekter på testorganismer.....	14
2.2	Helsediment tester	16
2.2.1	Testprinsipp.....	16
2.2.2	Effekter på testorganismer.....	16
3	Forsøk med bunnfaunasamfunn.....	17
3.1	Mesokosmos	17
3.1.1	Oppsett	18
3.1.2	Visuelle observasjoner.....	18
3.1.3	Nedtrengning av oksygen	19
3.1.4	Utvexling av O ₂ og næringsalter	20
3.1.5	Bunnfauna	24
3.2	Forsøk i felt – rekolonisering	28
3.2.1	Oppsett og metodikk	29
3.2.2	Visuelle observasjoner.....	30
3.2.3	Sedimentparametere	30
3.2.4	Bunnfauna	30
4	Overvåking i Stjernesundet.....	33
4.1	Sediment	34
4.2	Bløtbunssamfunn.....	35
4.3	Hardbunssamfunn	36
5	Diskusjon	36
5.1	Generell vurdering av testenenes følsomhet og relevans	36
5.2	Toksisitet av vannuttrekkene	37
5.3	Helsediment-testene	38
5.4	Feltobservasjoner og forsøk med bunnfauna.....	38
5.5	Episodisk hypersedimentasjon	39
5.6	Sammenfattende vurderinger	39
6	Referanser.....	41

Sammendrag

Sibelcos gruvevirksomhet på Stjernøy i Finnmark produserer et nefelin-feltspatkonsentrat basert på en lokal forekomst av bergarten nefelinsyenitt. Avgangen slippes ut som tørrstoff i strandsonen hvorfra den transporteres nedover en bratt skråning og spres i vifteform utover den flate fjordbunnen på over 400 m dyp. Avgangen var av en tre avgangstyper som ble sammenlignet i forskjellige testoppsett i forskningsprosjektet NYKOS. Malmene har lavt innhold av tungmetaller og det brukes ikke kjemikalier under oppredningen. Avgangen var derfor à priori forventet å gi minst skadelige effekter på sjøbunnen. Testene omfattet økotoksikologiske tester på marine organismer eksponert i vannuttrekk fra avgangen og helt sediment iblandet avgang. I tillegg ble det utført forsøk med effekter av økende sedimentasjon av avgang på hele samfunn i bokskjerneprøver (mesokosmos) og feltforsøk med rekolonisering i avgang i kasser utplassert på 30m dyp i Oslofjorden. Målet med denne rapporten var å gi en samlet vurdering av mulige effekter av avgangen fra Sibelco Stjernøy basert på resultatene fra disse forsøkene og fra feltundersøkelser i Stjernesundet i perioden 1993-2016.

Litt overraskende viste de økotoksikologiske testene med vannuttrekkene størst effekt fra Sibelcos avgang. Mest sannsynlig skyldtes dette at Sibelcos avgang, i motsetning til de to andre, ikke var ekvilibrert med sjøvann før tillaging av vannuttrekkene og at dette kan ha medført høyere konsentrasjoner av enkelte metaller i vannuttrekkene.

I alle tester der organismer ble eksponert mot selve avgangen (økotoksikologiske hel-sediment tester, mesokosmosforsøk og feltforsøk i Oslofjorden), var resultatene nokså entydige ved at det var lite skadelige effekter av avgangen fra Sibelco ut over de effektene som kan forventes å følge av økt sedimentasjonshastighet. Mesokosmos-forsøket viste at sedimentasjon av 0,3-6 cm avgang i løpet av en fire-ukers periode hadde signifikante effekter på bunnfaunaen og på utvekslingen av næringssalter mellom sjøbunnen og vannet over. Spesielt var fluksene av silikat og fosfat følsomme for små mengder (0,3-2 cm) avgang, trolig som følge av redusert bioturbasjon (irrigasjon) og adsorpsjon/desorpsjon på avgangspartiklene. Effektene på bunnfaunaen var sammenlignbare med små til moderate effekter observert i den avgangspåvirkede delen av den flate fjordbunnen i Stjernesundet. Ifølge NGU's undersøkelser tilføres dette området i gjennomsnitt ca 6 cm avgang per år. Episodisk utrasing i de bratte skråningene og spredning utover fjordbunnen med sterke turbiditetsstrømmer er trolig en viktig mekanisme for hvordan avgangen sedimenterer i dette området. I områder der turbiditetsstrømmen treffer kan det forventes en umiddelbar negativ effekt med redusert biomasse og individantall og enkelte arter vil kunne forsvinne helt, men selv etter omfattende rasepisoder indikerer både feltstudiene og rekoloniseringsforsøkene at livskraftige bunndyr-samfunn vil gjenopprettes i løpet av noen få måneder.

Vesentlig forringelse av bunnfaunaen ble bare observert i nærområdet, dvs. Lillebukta, der det også er store effekter på hardbunns-samfunnene. Årsaken til effektene på faunaen kan være lavt næringsinnhold eller forstyrrelse av viktige livsfunksjoner som respirasjon, næringsopptak og beskyttelse hos organismer tilpasset sjøbunn med en mye lavere sediment-tilvekst. Sedimenter med høyt innhold av Sibelco-avgang blir også svært kompakt, noe som kan påvirke enkelte arter, og også medføre redusert oksygenpenetrasjon.

Summary

Title: Environmental risk sea disposal of tailings from a Norwegian mine – a recapitulation of test results obtained under the research project NYKOS. Year: 2020

Author(s): Morten Thorne Schaanning, Hilde Cecilie Trannum, Steven Brooks

Source: Norwegian Institute for Water Research, ISBN 978-82-577-7199-7

Sibelco's mining operations at Stjernøy in Finnmark produce a nepheline feldspar concentrate based on a local occurrence of the rock mineral nepheline syenite. The outlet is discharged as dry matter in the littoral zone from which it is transported down a steep slope and spread in a 1.5 km² fan-shaped area on the fjord bottom at more than 400 m depth. The tailings were one of the three tailings types compared in different test setups in the NYKOS research project. The ore has a low content of heavy metals and no chemicals are used during the preparation. Therefore, the tailings were expected to provide the least harmful effects on the seabed. The tests included ecotoxicological tests on marine organisms exposed in seawater elutriates of the tailings and whole sediment mixed with the tailings. In addition, experiments were conducted to assess the effects of increasing sedimentation of tailings on natural, benthic communities in box core samples (mesocosm) and field experiments with recolonization in tailings in boxes located at 30m deep in the Oslofjord. The objectives of this report were to provide an overall assessment of potential effects of the tailings from Sibelco Stjernøy based on the results of these experiments and from field studies in the Stjernesundet during the period 1993-2016.

Surprisingly, the ecotoxicological tests on water elutriates of the Sibelco tailings had larger effects than corresponding elutriates of the two other tailings types tested. Unlike the other test products types, Sibelco's tailings are not equilibrated with seawater prior to discharge. This may have resulted in some initial release of exchangeable metal fractions to the small volumes of the elutriates.

In all tests where organisms were in direct contact with tailings (ecotoxicological whole-sediment tests, mesocosm experiments and field trials in the Oslofjord), the results confirmed that harmful effects of the Sibelco tailings were small beyond the effects expected from increased sedimentation. The mesocosm experiment showed that sedimentation of 0.3-6 cm tailings over a four-week period had significant effects on the bottom fauna and on the exchange of nutrients between the seabed and the water above. In particular, fluxes of silicate and phosphate were sensitive to small amounts (0.3-2 cm) of discharge, probably due to reduced bioturbation (irrigation) and adsorption/desorption exchange with tailings particles. The effects on the bottom fauna were comparable to the small or moderate effects observed in tailings affected area in the deep part of Stjernesundet. According to investigations performed by the Norwegian Geological Survey (NGU), the sedimentation of tailings in this area is on average 6 cm of tailings per year. Frequent avalanches of tailings accumulated in the steep slopes and the formation of turbidity currents spreading out on the flat fjord bottom are probably an important mechanism for how the tailings settle in this area. In areas where the turbidity flow strikes, an immediate negative impact with reduced biomass and numbers of individuals and complete disappearance of some species is likely to occur. However, even after episodes with extensive sedimentation, both field monitoring studies and the recolonization experiments indicated that viable benthic communities will recover within a few months.

Substantial deterioration of the bottom fauna was observed only in the immediate vicinity of the discharge in Lillebukt, where there are also major effects on the hard-bottom communities. The cause of the effects on the fauna may be food shortage or disruption of important life functions such as respiration, nutrient uptake and protection for organisms adapted to a seabed with very slow sediment growth. High content of Sibelco tailings have also been found to result in a very compact sediment, which can affect some species and reduce oxygen penetration.

1 Introduksjon

1.1 Sibelco Stjernøy

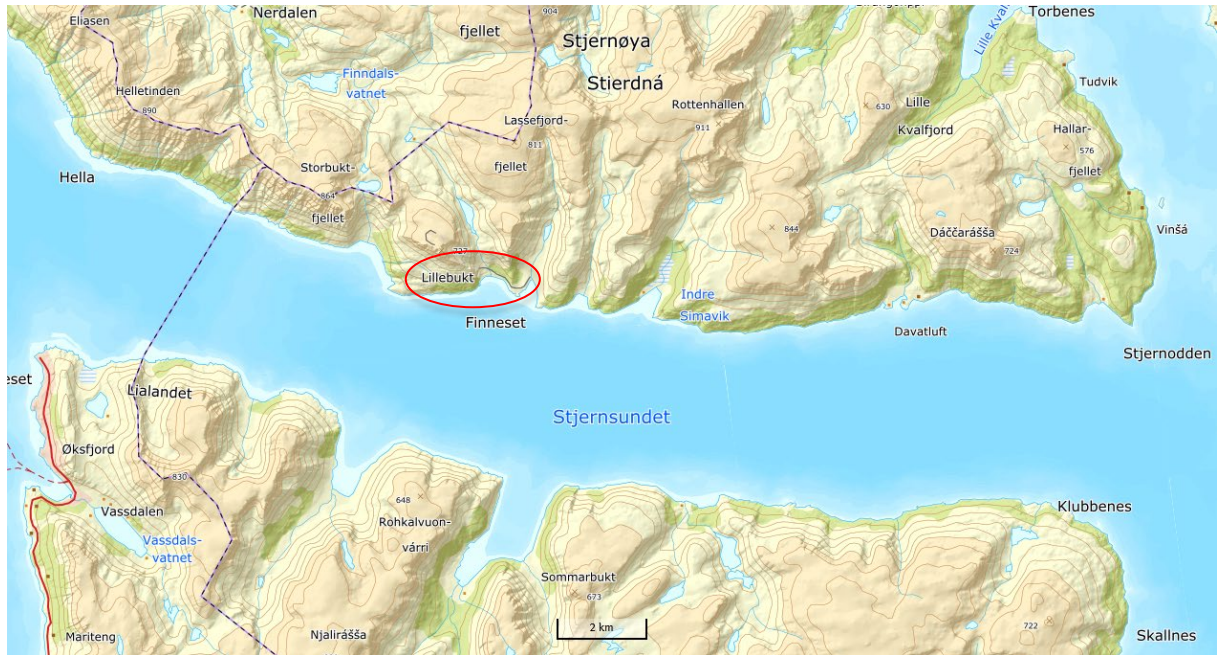
Sibelcos gruvevirksomhet på Stjernøy i Finnmark produserer et nefelin-feltspatkonsentrat basert på en lokal forekomst av bergarten nefelinsyenitt. Nefelin (Na,K)AlSiO₄ brukes som råstoff i glass- og keramisk industri. Produksjonsanlegget er lokalisert ved Lillebukt og får råstoffet fra gruvedrift i fjell og et dagbrudd ved fjellet Nabbaren 650 m.o.h. (Figur 1).

Malmen har lavt innhold av tungmetaller (Tabell 1). Sammenholdt med tidligere kvalitetskriterier for sedimenter (TA-2229/2007) var konsentrasjoner i avgangsprøver analysert i 1993 og 2009 innenfor klasse I «Bakgrunn» for samtlige metaller vist i tabellen. Nye grenseverdier for sedimenter er skjerpet noe for krom, kobber og sink (Veileder 2:2018). I forhold til disse ligger avgangen fra Sibelco nær øvre grense for bakgrunnsnivå av kobber og krom og opp mot eller litt over grenseverdien for klasse III for sink. Konsentrasjonen av de øvrige metallene er, også etter de nye kriteriene, lavere enn øvre grense for bakgrunnsnivå.

I oppredningen benyttes ingen kjemikalier, kun knusing, tørking, nedmaling og magnetseparering. Avgangen består derfor av rene, mineralske masser, hovedsakelig feltspat, amfibol, nefelin, pyroksen, biotitt og kalkspat. Bedriften har opplyst om et sannsynlig innhold på ca 0,3% sulfider. Partikkelstørrelse oppgis å være ca 45% mindre enn 63 µm og ca 15% mindre enn 15 µm. Utslippstillatelsen er på 300 000 tonn/år, mens faktiske utslipp har vært fra ca. 210-240 000 tonn/år siden 2010 (norskeutslipp.no).

Avgangen slippes ut i strandsonen der finstoffet kan være synlig tilstede i overflaten (Figur 2, øverst). Hovedmengden synker ned via raviner og kanaler i den bratte fjordsiden (Figur 2, midten) og spres til slutt utover i en vifte som dekker om lag 1,5 km² av fjordbunnen ned til 463 m dyp (Figur 2, nederst). Totalt er det akkumulert 1,5-2,3 millioner m³ avgangsmasser på fjordbunnen etter 1995. Multistråle undersøkelser utført i 2016 og 2018 avdekket dybdeendringer i ravinene opptil ±3 m på de to årene (Bøe m.fl., 2018). Dette viser at sjøbunnen i området er påvirket av stor transport av avgangsmasser som gir opphav til skred og sterke turbiditetsstrømmer i fjordsidene og hypersedimentasjon på den flatere fjordbunnen inntil 1,5-2 km fra utslippspunktet.

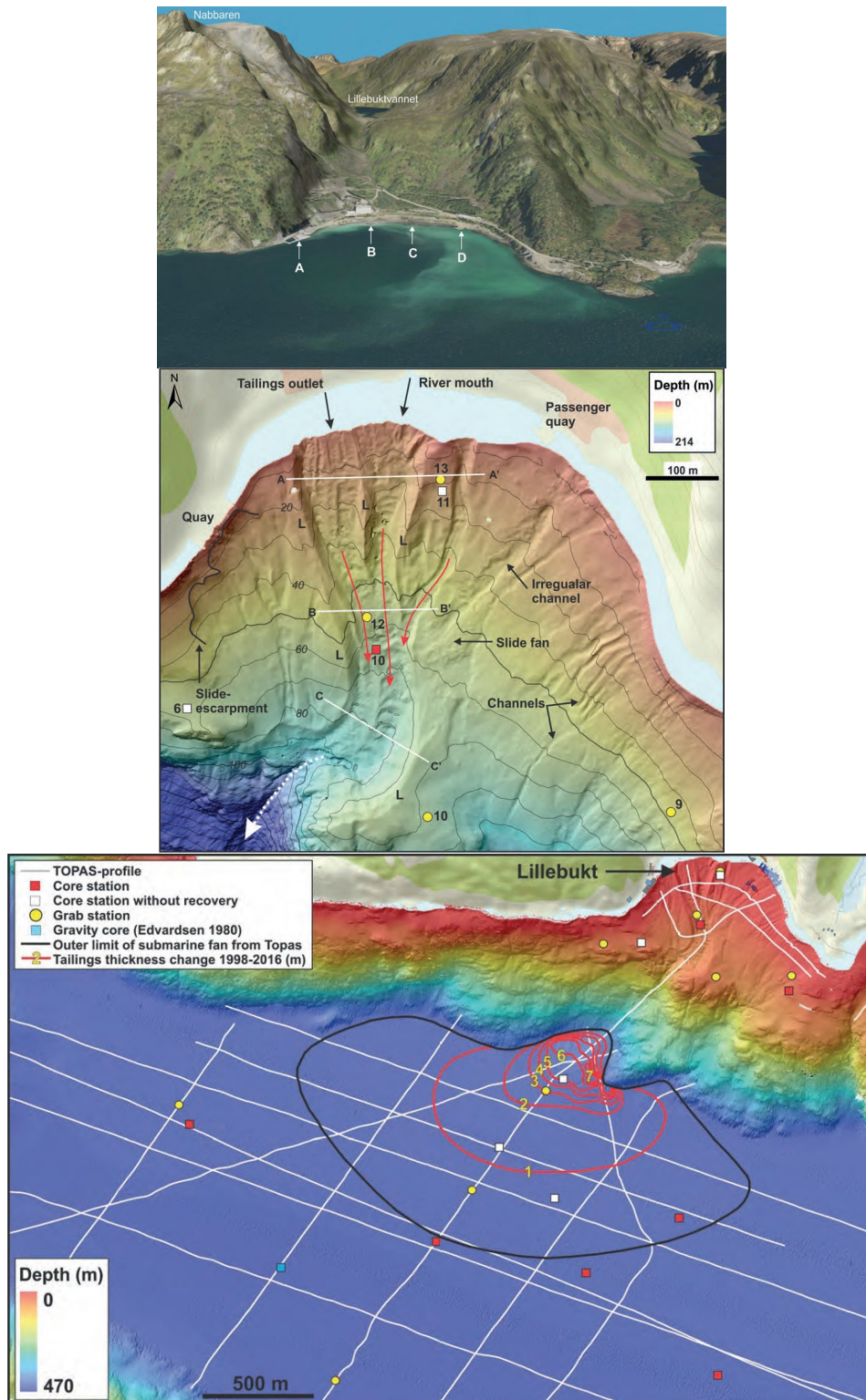
Det er ingen bebyggelse eller bosetning i området rundt Lillebukta bortsett fra gruveanlegget til Sibelco inkl. knuseverk, utskipningshavn og driftsbygningene. Således er det heller ingen vesentlige øvrige kilder til forurensning. I Stjernesundet er det moderat viktige fiskefelt, og interessen for oppdrett i området er økende (Dahl Hansen m.fl., 2012).



Figur 1 Produksjonsanleggene til Sibelco Nordic er plassert i Lillebukta der avgangen slippes ut i strandkanten.

Tabell 1. Klassifisering av avgangsprøver fra Sibelco Stjernøy analysert i 1993 og 2009 (Berge m.fl. 1993, 2009) i henhold til Veileder 2:2018 utgitt av Direktoratgruppen for vanddirektivet. «ia» betyr ikke analysert.

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
<i>Analyser av avgangsmateriale fra Sibelco Stjernøy</i>								
1993	ia	0,13	64	11	<0,01	26	2	119
2009	<3	<0,09	52,6	20,7	0,01	17,3	3,61	143
<i>Klassifisering av sedimenter (Veileder 02:2018)</i>								
Klasse I	<15	<0,2	60	<20	<0,05	<30	<25	<90
Klasse II			60-660	20-84				90-139
Klasse III				20-84				139-750



Figur 2 Bildet øverst viser produksjonsanleggene til Sibelco i Lillebukt, Stjernesundet. Finstoff fra Sibelcos utslipp av avgangsmasser er synlig i overflatelaget til høyre for utslippspunktet (B) og elveosen (C). I midten sees hvordan elveslam og avgangsmasser har gravet ut raviner og kanaler i den bratte fjordsiden og nederst hvordan avgangen har akkumulert på fjordbunnen etter 1998 (Bøe m.fl, 2018).

1.2 Bakgrunn og målsetting

Mange norske bergverksbedrifter plasserer eller ønsker å plassere avgangsmasser i sjødeponier i nærheten av produksjonsanleggene. Noen av disse virksomhetene benytter organiske kjemikalier som kan være toksiske for marine organismer.

En viktig målsetting for aktivitetene under NYKOS arbeidspakke 4 «Effekter av gruveavgang på marine bentiske økosystemer» var å undersøke i hvilken grad disse kjemikaliene kan påvirke økosystemtilstanden i deponiområdene. Dette ble gjort ved å sammenligne avgang fra tre prosessanlegg som var i drift våren 2015 og som produserte avgang med forskjellig innhold av restkjemikalier. Disse var Sydvaranger gruver som benyttet kjemikalier til gjenvinning av vann fra avgangen (fortykning), Omya Hustadmarmor som benyttet både fortykning og flotasjonskjemikalier, og Sibelco Stjernøy som ikke benytter noen kjemikalier og som derfor i utgangspunktet skulle fungere som kontroll. Representative uttak av avgangsmassene ble sendt til NIVA første kvartal 2015 og delprøver fra disse (se Figur 4) er benyttet i ulike tester og forsøk utført i perioden 2015-2019.

Målet med denne rapporten var å sammenstille resultatene fra de ulike testene og gi en samlet vurdering av mulige effekter av avgangen fra Sibelco Stjernøy. Vurderingen er basert på studier og tester på svært forskjellige nivåer fra standardisert tester i småskala laboratorieforsøk via mesokosmos- og felt-forsøk. Også rapporter fra faktisk kartlegging av forholdene i deponiområdet er vurdert. Tilnærmingene har ulike styrker og svakheter i forhold til presisjon og reproducerbarhet på den ene siden og relevans på den andre siden (Figur 3).

Om kjemikalier i gruveavgang

Flotasjonskjemikalier (skumdannere) brukes for å binde og samle opp ønskede mineraler eller binde og fjerne forurensing. I omvendt flotasjon følger kjemikaliet fortrinnsvis med avgangen og gir derfor større utslipp av kjemikaliet enn vanlig flotasjon.

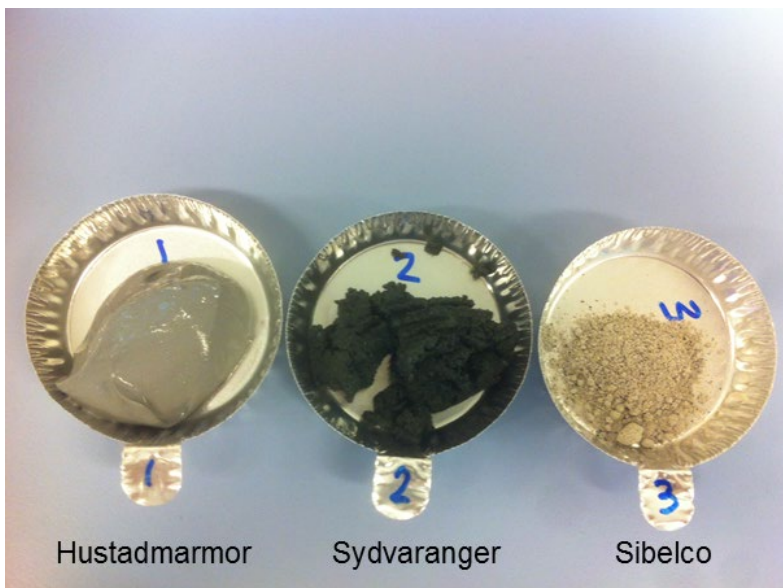
Fortykningskjemikalier brukes for å gjenvinne og resirkulere vann fra avgangen før den slippes ut i sjøen. Akutt giftighet av flotasjonskjemikalier har vært observert både for fisk, bløtbunnsfauna og mikroorganismer (Webb m.fl., 1976, Dopson m.fl., 2006, Näslund m.fl., 2011), mens vanlig brukte flokkuleringsmidler (magnafloc, polydadmac) ser ut til å være lite giftige i konsentrasjoner som finnes i gruveavgang (Berge m.fl., 2012, 2014).



Figur 3. Tentativ fremstilling av presisjon og relevans av undersøkelser og tester anvendt i dette arbeidet.

1.3 Fysisk-kjemisk karakterisering av de tre avgangsmaterialene

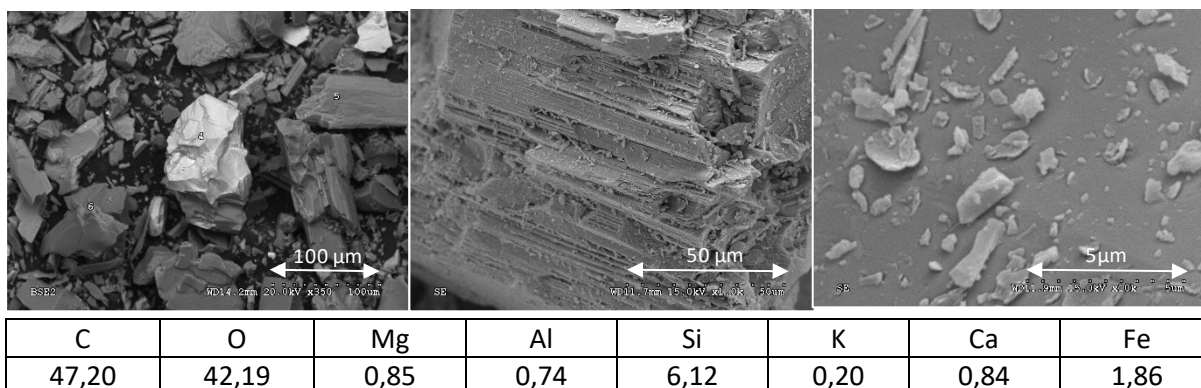
Ulikt avgangsprøvene fra Sydvaranger og Hustadmarmor, var avgangen fra Sibelco i utgangspunktet tørr (Figur 4). Dette kan ha hatt en viss betydning i forhold til initielle prosesser og utveksling av stoff mellom partiklene og det vandige miljøet i testene. De tre avgangene var relativt like i forhold til lavt innhold av sulfider og tungmetaller, men forskjellige m.h.t. bruken av kjemikalier i oppredningsprosessene.



Figur 4. Homogeniserte delprøver av avgang som deponeres i norske fjorder levert til NIVA våren 2015.

Elektronmikroskopi-bilder og analyser av elementfordelingen (SEM-EDX) i en delprøve av avgangen fra Sibelco Stjernøy er vist i Figur 5. Finfraksjonen bestemt ved våtsikting viste en relativt grovkornet avgang med $42\pm 2\%$ $< 63\ \mu\text{m}$, sammenlignet med Sydvaranger $48\pm 7\%$ og Hustadmarmor $97\pm 1\%$.

Totalt nitrogen var lavere enn deteksjonsgrensen på $1\ \mu\text{g}/\text{mg}$ i alle tre materialene. Dette viser at det ikke var spor etter naturlig organisk materiale i noen av avgangene. Dette ble bekreftet av innholdet av organisk karbon (TOC) som også var lavere enn deteksjonsgrensen $10\ \mu\text{g}/\text{mg}$ i avgang fra Sibelco og Sydvaranger.



Figur 5. SEM-EDX elektronmikroskopi-bilder og elementfordelingen (%) til avgangsprøve tilsendt fra Sibelco-Stjernøy våren 2015.

2 Økotoksikologiske tester

De økotoksikologiske testene av avgangen tilsendt fra Sibelco-Stjernøy våren 2015 omfattet giftighetstester på tre marine organismer eksponert i vannuttrekk av avgangen, og to marine organismer eksponert ved direkte kontakt med avgangen. Metoder og resultater er mer fullstendig beskrevet i Brooks m.fl., 2019.

2.1 Vannuttrekk

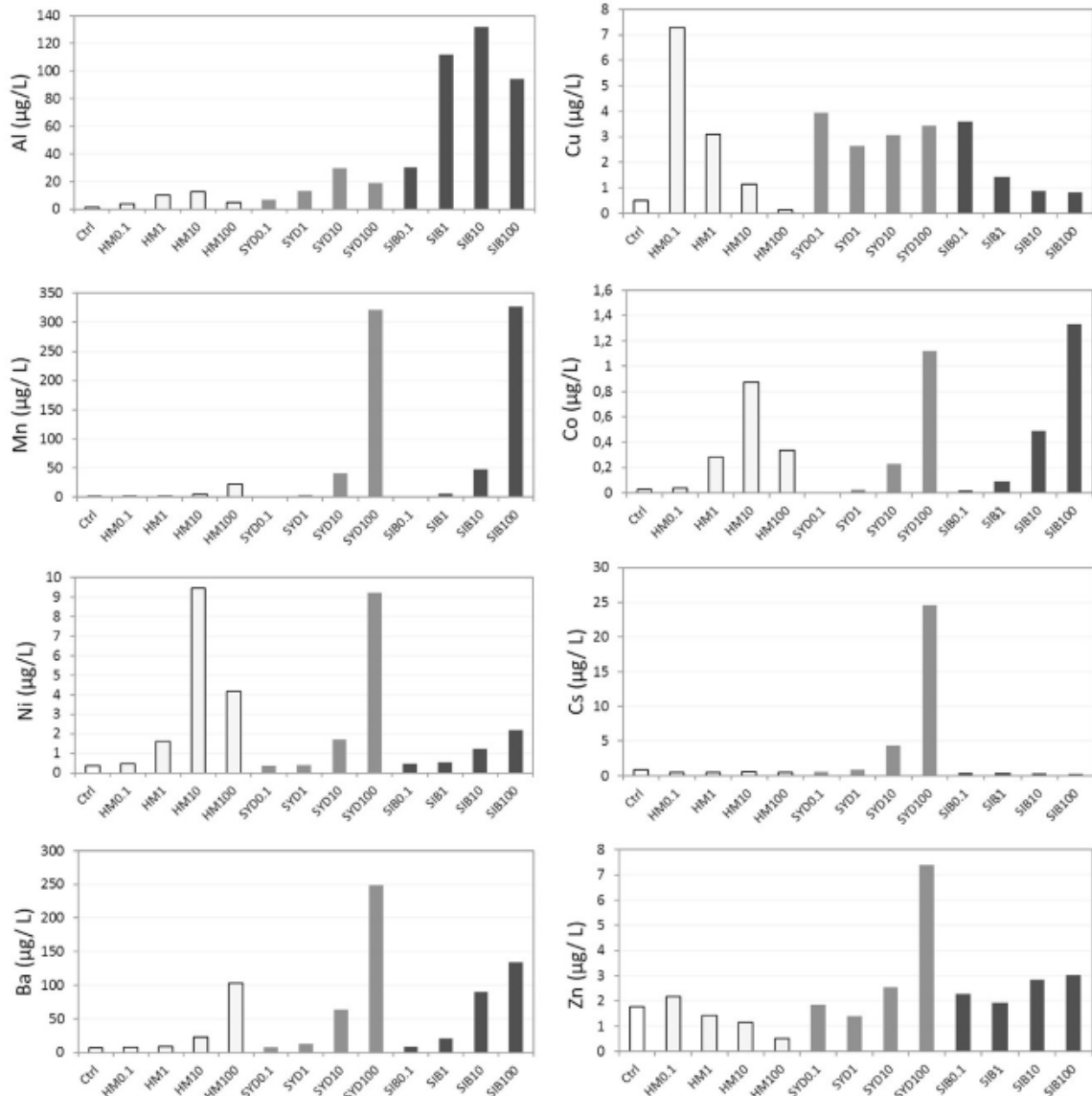
2.1.1 Tillaging

Vannuttrekkene ble laget ved tilsetting av 0,1, 1, 10 og 100 mg (tørrvekt) av avgangen til 2 serier med 1 L filtrert sjøvann ($0,2\ \mu\text{m}$) med hhv naturlig pH 8,2 og surgjort til pH 6,2. Løsningene ble plassert på ristebord (100 rpm) i mørke ved 20°C . Etter 7 dager ble halvparten av flaskene tatt av ristebordet og satt i ro noen timer før delprøver ble tatt ut og filtrert på $0,2\ \mu\text{m}$. En del av det filtrerte vannet ble analysert på ICP-MS. Resten ble brukt til bestemmelse av akutt giftighet på østers embryo, krepsdyret *Tisbe battagliai* (etter ISO 14669) og den marine planktonalgen *Skeletonema pseudocostatum* (etter ISO 10253).

2.1.2 Utløsning av metaller

Metall-analysene (Figur 6) viste relativt høye konsentrasjoner av aluminium ($80\text{-}140\ \mu\text{g}/\text{L}$) i uttrekkene med avgang $1\text{-}100\ \text{mg}/\text{L}$, mangan (50 og $320\ \mu\text{g}/\text{L}$) og barium (90 og $140\ \mu\text{g}/\text{L}$) i uttrekkene med avgang 10 og $100\ \text{mg}/\text{L}$. Disse metallene regnes for å være lite toksiske og er ikke

klassifisert i Vanddirektivet. Konsentrasjonene av metallene kopper (Cu), nikkel (Ni) og sink (Zn) var i hht kriteriene gitt av Direktoratgruppen vanddirektivet (Veileder 2:2018) innenfor klasse II «Ingen toksiske effekter» i alle uttrekkene av Sibelco-avgangen.



Figur 6. Konsentrasjoner av metaller i 7 dagers vannuttrekk (sjøvann, pH 8,2) av avgang fra Sibelco (SIB), Hustadmarmor (HM) og Sydvaranger gruver (SYD). (Fra Brooks m.fl, 2019).

2.1.3 Effekter på testorganismer

Det ble ikke funnet noen toksiske effekter på *T. battagliai* etter 48 timers eksponering i vannuttrekk fra noen av avgangsmaterialene.

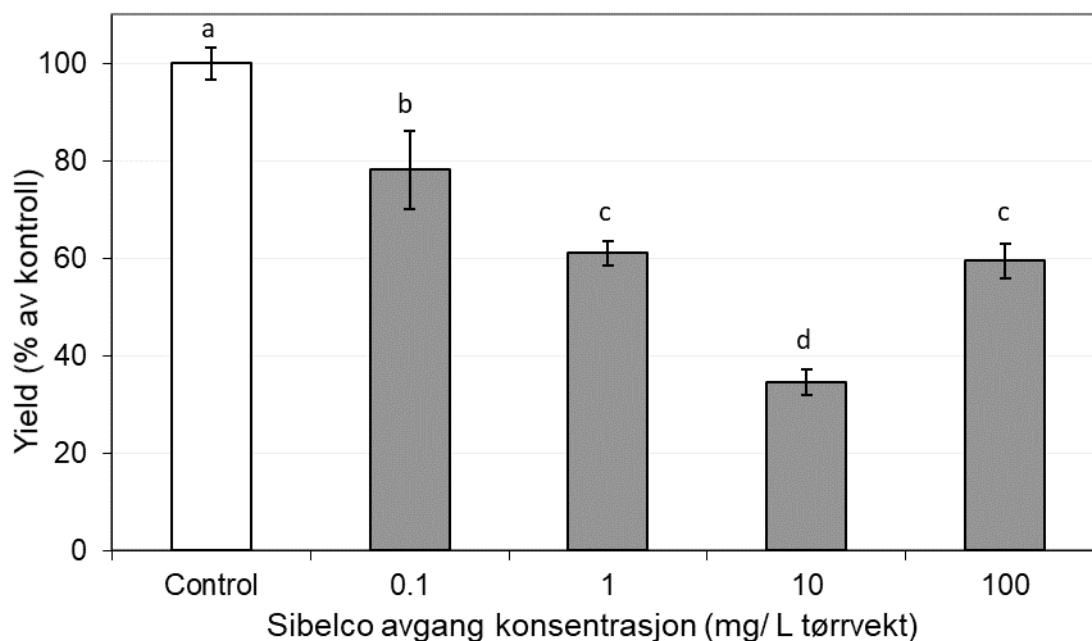
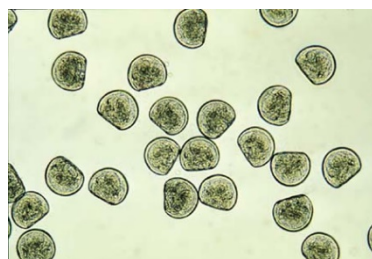
Resultatene fra østers embryo testen (Tabell 2) viste effekter av Sibelco-avgangen ved konsentrasjoner fra og med 10 mg/L i 7 dagers uttrekket og fra og med 1 mg/L i 28 dagers uttrekket

(LOEC = Lowest Observable Effect Concentration) og EC50 (effekt på 50% av individene) på hhv 7,86 og 7,32 mg/L. Denne testen viste lite eller ingen effekter av avgangene fra Hustadmarmor og Sydvaranger.

Veksten av *Skeletonema* ble signifikant påvirket i alle vannuttrekkene. Påvirkningen var størst for Sibelco med en totalvekst på 35-60% ved konsentrasjoner 1-100 mg/L sammenlignet med kontroller i rent sjøvann (Figur 7). Til sammenligning var veksten 70-90% i alle vannuttrekkene med avgang fra Hustadmarmor og Sydvaranger.

Tabell 2. Effekter av 7 og 28 dagers vannuttrekk (sjøvann, pH 8,2) av avgangsmasser fra Hustadmarmor, Sydvaranger og Sibelco Stjernøy på utviklingen av østers embryo etter eksponering i 24 timer. Fra Brooks m.fl., 2019.

	Uttrekk (dager)	NOEC	EC50
Sibelco	7	1	7,86
	28	0,1	7,32
Hustadmarmor	7	>100	-
	28	>100	-
Sydvaranger	7	>100	-
	28	10	>100



Figur 7. Effekter av vannuttrekk av Sibelco avgang på vekst av den marine planktonalgen *Skeletonema pseudocostatum*. Hver søyle representerer middelverdi \pm 1 standard avvik. Forskjellige bokstaver viser signifikante forskjeller mellom konsentrasjoner av avgangsmassen (ANOVA, Tukey $p < 0,05$). (Fra Brooks, Escudero-Onate og Lillicrap, 2019).

2.2 Helsediment tester

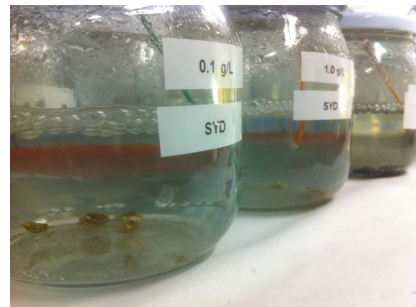
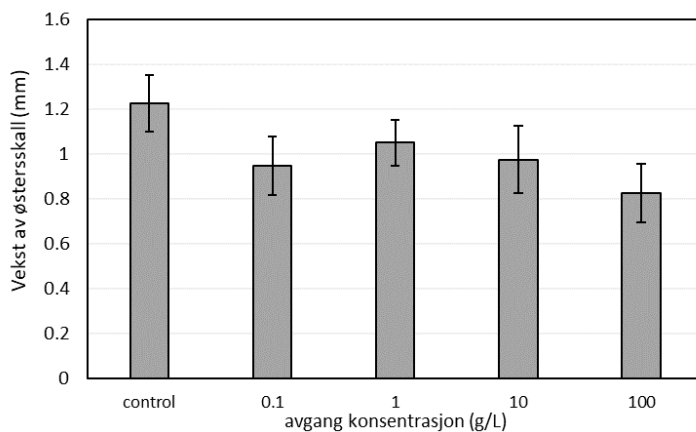
2.2.1 Testprinsipp

I disse testene blir organismer eksponert mot avgangspartikler suspendert i sjøvann eller som sedimentert materiale. Avgangen ble fortynnet med marint sediment med partikkelstørrelse tilsvarende siltig leire.

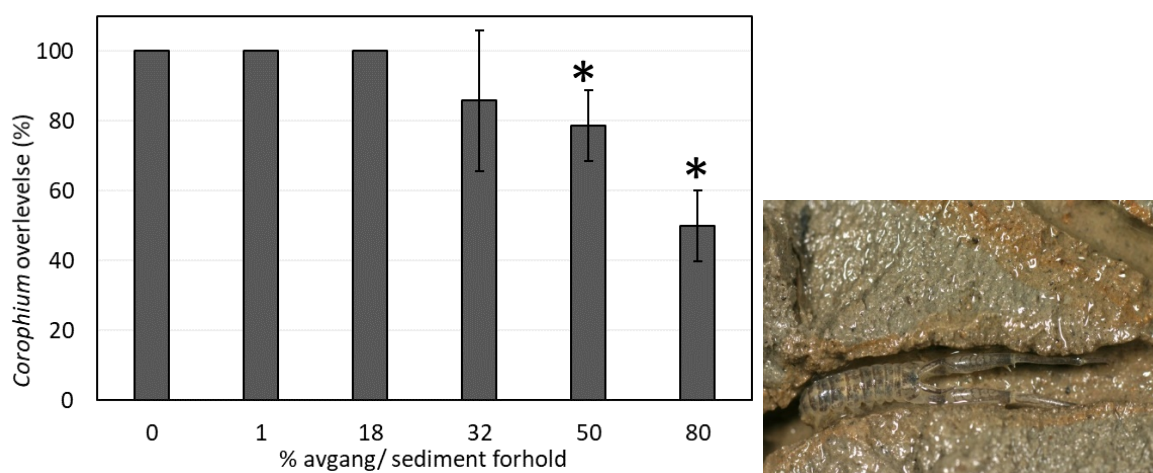
2.2.2 Effekter på testorganismer

Skallveksten hos østersyngel eksponert 21 dager i suspendert avgang viste ingen signifikant effekt verken for Sibelco (Figur 8) eller noen av de to andre avgangstypene (Brooks m.fl., 2019).

Overlevelse av den sedimentlevende tangloppen *Corophium volutator* ble påvirket ved høyeste konsentrasjon avgang (80%) (Figur 8). Det samme resultatet ble oppnådd for avgangen fra Sydvaranger, mens Hustadmarmor viste effekter allerede fra 32% avgang (Brooks m.fl., 2019).



Figur 8. Skallvekst hos østersyngel (*C. gigas*) etter 21 dagers eksponering i 0-100 g/L suspendert avgang fra Sibelco. Søylene viser gjennomsnittlig vekst for 40 individer. Variansanalysen viste ingen signifikant forskjell (ANOVA, Tukey $p > 0,05$) mellom behandlingene (data fra Brooks m.fl., 2019).



Figur 9. Mortalitet av den sedimentlevende tangloppen (*C. volutator*) eksponert i marine sedimenter blandet med 0-80% avgang fra Sibelco. Søyler merket med * viser signifikant redusert overlevelse sammenlignet med kontroll (ANOVA, Tukey $p < 0,05$). (Etter Brooks m.fl., 2019).

3 Forsøk med bunnfaunasamfunn

Det ble også utført tester med bunnfaunasamfunn, som angitt i Figur 3. Slike tester representerer test på flere arter samtidig, og hvor også økologiske interaksjoner inkluderes. Disse eksperimentelle tilnærmingene var påtenkt å representere overgangssonen mellom et sjødeponi og normal sjøbunn, snarere enn selve deponiet, og tykkelsen på gruveavgangslaget hadde en skala på cm. Det er nettopp i denne sonen responsen er antatt å kunne variere mellom ulike avgangstyper, og likeledes her man kan forvente å få mest miljømessig gevinst ved å modifisere avgangens egenskaper.

3.1 Mesokosmos

Forsøkene i bløtbunnslaboratoriet er basert på den enkle ideen at intakt sjøbunn overføres til laboratoriet, der man så lar avgangen sedimentere i tynne sjikt i et miljø som ligner mest mulig på miljøet i fjorden der avgangen sedimenterer; oppsettet kalles derfor også for «simulated seabed study». Sedimentet i kjernene er dekket med et 10-15 cm vannlag som kontinuerlig tilføres ufiltrert vann fra 60 m dyp i fjorden, og i forsøkshallen er det mørkt og kjølig.

Aller først hentes sjøbunnsprøvene hentes opp med en 0,1 m² box-corer som gir en uforstyrret prøve med naturlige geokjemiske gradienter, biogeokjemiske prosesser og artsrike biologiske samfunn (bakterieflora, meiofauna <1 mm og makrofauna >1 mm). Testenheten på 0,1 m² (overflateten til hver corer) gir et representativt økosystem der anslagsvis 20--50 forskjellige arter av makrofauna (dyr > 1 mm) kan opprettholde sine normale nisjer og funksjoner. Dette tilsvarer arealet til en grabbprøve, slik at resultatene direkte kan sammenliknes med overvåkingsdata, eksempelvis fra Stjernesundet. Etter en akklimatiseringsperiode på noen uker, tilsettes testmaterialene. Underveis i forsøket kan man måle prosesser som for eksempel flukser av næringsalter og oksygenpenetrasjon, og ved forsøkets avslutning siktes faunaen.

Ved å variere behandlingen (lagtykkelse, partikkeltype, innhold av kjemikalier osv.) under ellers like forhold kan effekter måles og knyttes opp mot den spesielle behandlingen denne prøven har vært

utsatt for. Metodikken gir således svært detaljert informasjon på dose-respons-forhold, med mulighet for å kunne måle en rekke parametere.

3.1.1 Oppsett

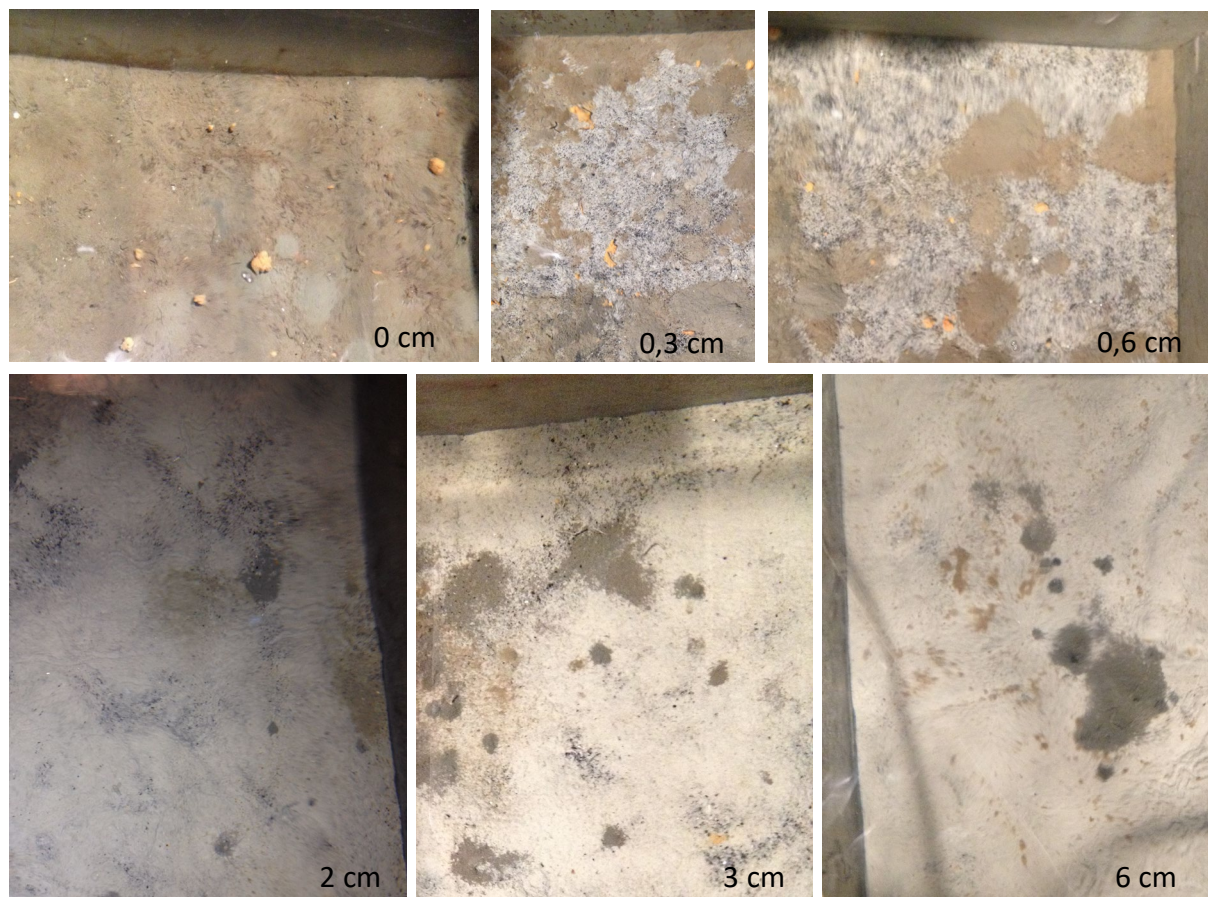
Forsøket i mesokosmos er beskrevet i detalj i Trannum m.fl., 2018. Forsøket ble utført med 30 stk 0,1 m² kjerneprøver innsamlet på 110-116 m dyp i Oslofjorden i mars 2015 (Figur 10). Avgangsmaterialene tilsendt fra hhv Sibelco, Sydvaranger og Hustadmarmor ble tilsatt over en fire ukers periode i mai 2015. Like mengder avgang ble tilsatt en gang per uke til henholdsvis 0, 3, 6, 10, 15, 20, 30, 40, 50 og 60 mm total lagtykkelse. Tilsetningen ble gjort ved å blande suspensjoner av avgangen forsiktig inn i overvannet i hver kjerne og la avgangen sedimentere til vanntilførselen ble restartet den påfølgende dag. Etter siste tilsetning ble det bare gjort non-destruktiv prøvetaking, dvs. elektrodemålinger direkte i kjerneprøvene og uttak av vannprøver, frem til avslutning av forsøket 22.-25. september 2015.



Figur 10. Innsamling av kjerneprøver (venstre) og arbeid med prøvene etter installering i mesokosmos ved Marin Forskningsstasjon Solbergstrand (tre bilder til høyre). Bildet øverst i midten viser nærbilde av en påfuglmark (*Sabella sp.*).

3.1.2 Visuelle observasjoner

Fotografier av sedimentoverflaten tatt umiddelbart før sikting av sedimentene viste at tildekkingen med 3 og 6 mm ikke var sammenhengende lag av avgangen på toppen av sedimentene (Figur 11). Dette skyldtes blanding av sedimenter og avgangsmaterialer forårsaket av bioturbasjon (dvs. biologisk omrøring) etter tilsetning. Ved større doser (2-6 cm) var avgangslagene sammenhengende, men med spor etter organismer på overflaten, ventilasjonshull og ansamlinger av gammelt sediment plassert på toppen av avgangen av gravende organismer.



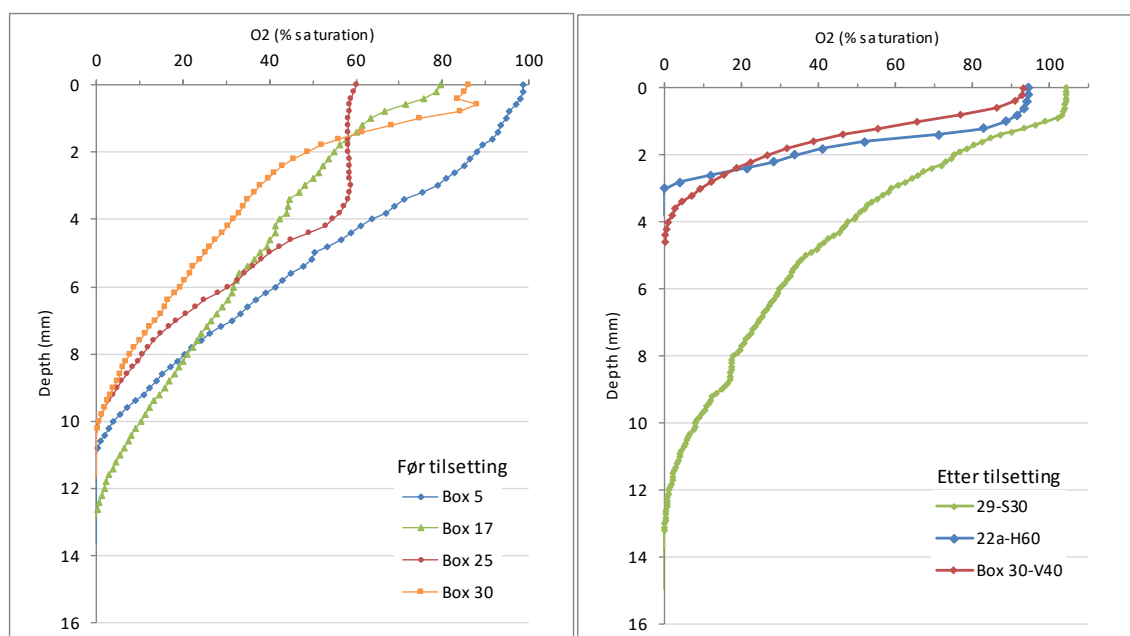
Figur 11. Overflater av kjerneprøver med 0-6 cm sedimentert avgang fra Sibelco Stjernøy, fotografert ved avslutningen av forsøket i bløtbunnslaboratoriet. Merk: ulike lysforhold gir litt ulike fargesjatteringer.

3.1.3 Nedtrengning av oksygen

Nedtrengning av O_2 har stor betydning for dyr som lever nedgravet i sedimentene og som ikke har forbindelser med vannet over via organer (sifonger o.l.) eller ventilerte graveganger. Nedtrengningen drives av molekylær diffusjon og bioturbasjon og begrenses av respirasjonsprosesser i sedimentene. Molekylær diffusjon er primært knyttet til sedimentets innhold av finfraksjoner som tetter igjen de vannfylte rommene mellom mineralpartiklene. Diffusjonen fra vannet over sedimentet vil derfor normalt være større i grovkornede enn i finkornede sedimenter, men det er viktig å være klar over at et sediment med mye grovkornet materiale kan tettes igjen av finstoff selv om det prosentvise innholdet av finstoff er lavt. Det er derfor ikke nødvendigvis noen god sammenheng mellom %finstoff og diffusjonsforholdene i sedimentet.

Oksygenmetning i porevannet ble målt med mikroelektroder i tilfeldig valgte bokser før (14.04.2015) og etter (15.06.2015) tilsetning avgangsmaterialene (Figur 12). Før tilsetning ble det målt O_2 ned til dyp mellom 10,2 og 12,4 mm i de fire undersøkte kjernene. Etter tilsetning ble det målt nedtrengning til 13 mm i avgangen fra Sibelco, men bare til 3,0-4,2 mm i de to andre avgangene. Vi har ingen replisering av disse resultatene, men det er nærliggende å tro at den relativt store nedtrengningen av O_2 i avgangen fra Sibelco skyldes at denne avgangen var relativt grovkornet (42% < 63 μm), sammenlignet med kontrollsedimentene (typisk 60% < 63 μm) og Hustadmarmor (97% < 63 μm). I tidligere forsøk er det rapportert lignende forskjeller med en nedtrengning av O_2 til 16 mm i sand

uten finfraksjoner, 7 mm i pukkerkverksmateriale med 13% $63 \mu\text{m}$ og 2,6 mm i finmalt kalkstein med 88% $63 \mu\text{m}$ (Näslund m.fl., 2012). Den store forskjellen mellom Sibelcos masser og avgangen fra Sydvaranger indikerer at avgangen fra Sibelco er mindre tettpakket etter deponering på sjøbunnen selv om det er liten forskjell i % finstoff. Dette kan skyldes forskjeller i mineralogi, partikkelform eller forskjeller i partiklenes størrelsesfordeling som ikke fremkommer ved enkel sikting på $63 \mu\text{m}$ sikt. Uansett kan den gode nedtrengningen av O_2 ansees gunstig i forhold til biomangfoldet i sjøbunnen. Imidlertid har det vært registrert lukt av hydrogensulfid i sedimentet i Lillebukta, hvilket ble tolket som at avgangen dannet et kompakt sediment (Trannum og Vogeles, 2001). Dette ble ikke registrert i 2012 (Dahl Hansen m.fl., 2012).



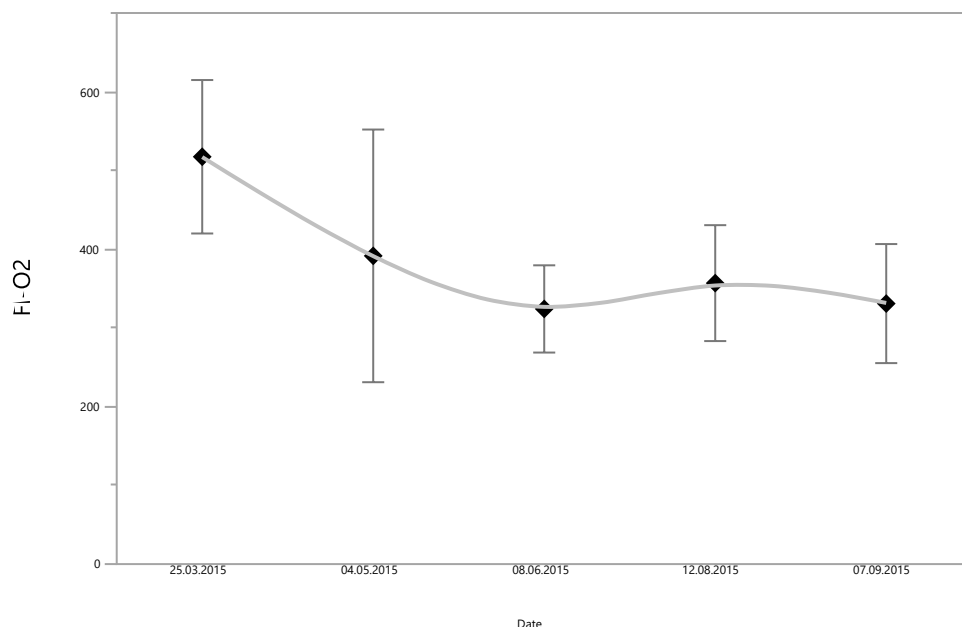
Figur 12. Oksygen-metning målt med mikroelektroder i fire ubehandlede kjerneprøver før (venstre) og etter (høyre) tilsetning av gruveavgang fra henholdsvis Sibelco (S30), Hustadmarmor (H60) og Sydvaranger (V40).

3.1.4 Utveksling av O_2 og næringsalter

Oksygenforbruket ble målt med en vanlig O_2 -elektrode og beregnet på grunnlag av differensen mellom konsentrasjonen inn og ut av hver boks, utskiftingshastigheten av vannet i boksen og sediment arealet. Fluksene av næringsalter ble beregnet på samme måte, men konsentrasjonene ble analysert ved konvensjonelle, spektrofotometriske analyser av vannprøver.

Oksygenforbruket i sedimentet skyldes respirasjon fra dyr og bakterier og er ikke korrelert med diffusjonen. Oksygenforbruket avtok noe i løpet av forsøket som følge av nedbrytning av ferskt organisk materiale som fulgte med kjernene ved overføring fra felt til mesokosmos (Figur 13). Overføringen skjedde i mars da det normalt er høy primærproduksjon og større tilførsel av organisk materiale til sedimentene enn om høsten. Det er ikke grunnlag for å anta at det er vesentlig mindre sedimentasjon av organisk materiale i mesokosmoset enn ute i fjorden, så nedgangen i løpet av forsøksperioden før tilsetningen av avgangen kan representere en naturlig årstidsvariasjon. Tilsetning av avgangen kan ha bidratt til den lille reduksjonen mellom 04.05. og 08.06., men nedgangen var liten og kan indikere at det var lite nedbrytbart organisk materiale tilstede i sedimentene også før

tilsetning av avgangen. Den tydeligste effekten av tilsetningen så ut til å være redusert variasjon mellom prøvene som er rimelig når sedimentet dekkes med et enhetlig materiale.



Figur 13. Oksygenforbruk ($\mu\text{mol O}_2 \text{ m}^{-2} \text{ h}^{-1}$) i kjerneprøver behandlet med gruveavgang fra Sibelco. Punktene representerer gjennomsnitt av ti prøver \pm et standardavvik. Avgangen ble tilført i perioden mellom 04.05. og 08.06.2015.

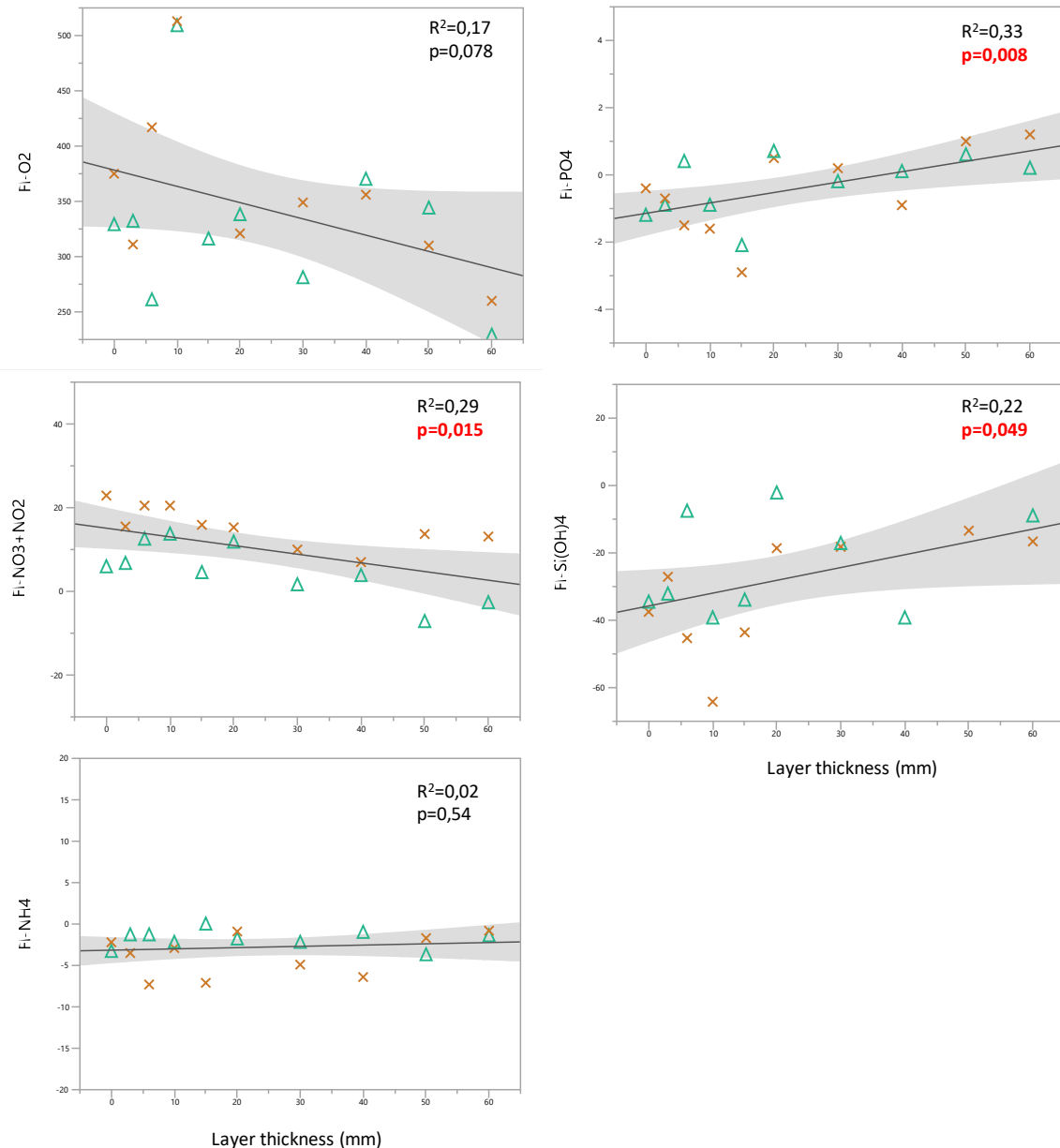
Flukser av næringssalter ble målt to ganger etter tilsetning av avgangen, 12.08. og 07.09.2015. Lineær regresjon ga generelt svak korrelasjon ($R^2 \leq 0.33$) mellom mengden av avgang tilført sedimentoverflaten og flukser både av O_2 og næringssalter (Figur 14). Ved kurvetilpasning som vist i Figur 15 ble det fanget opp en større andel av variansen i plottene og ved optimalisering av modellen viser det seg et skille ved lagtykkelse på ca 2cm. Når lagtykkelsen øker fra 0 til 2 cm endres fluksene av O_2 og næringssalter raskt. Ytterligere økning av lagtykkelsen utover 2 cm påvirker fluksene mindre. Dette kan skyldes at ved lagtykkelse over 2 cm klarer dyra i dette sedimentet i liten grad å opprettholde stoffutvekslingen mellom sjøbunnen og vannet over. Sammenfallet av maksimum opptak av oksygen og nitrat og frigjøring av silikat og fosfat ved ca 10 mm lagtykkelse kan indikere at dyra er spesielt aktive som følge av at de prøver å opprettholde normale funksjoner, dvs en stressreaksjon som gir forhøyet respirasjon.

Likheten mellom fluksene av nitrat og oksygen skyldes at på samme måte som O_2 forbrukes ved respirasjon hos aerobe bakterier og alle større dyr, kan nitrat forbrukes ved respirasjon hos denitrifiserende bakterier som bryter ned organisk materiale i lag av sedimentene der det er lite tilgjengelig O_2 .¹

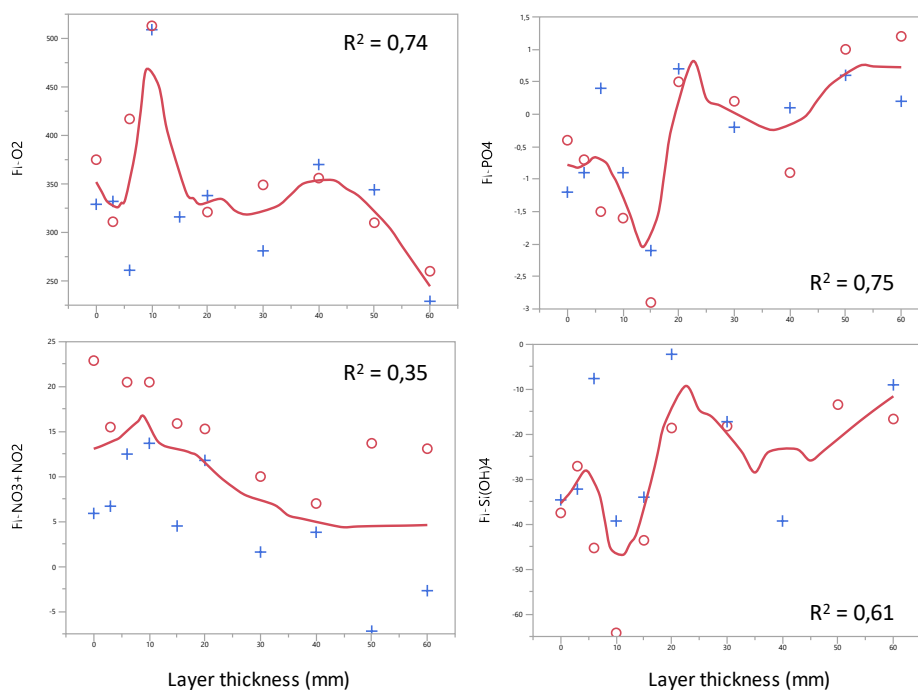
Fluksene både av O_2 og NO_3 var positive, dvs. at det er et opptak fra vann til sediment av disse stoffene. Begge fluksene avtok med økende lagtykkelse, og dette var signifikant ($p < 0.05$) for nitrat.

¹ Analysene av nitrat inkluderer nitritt slik at fluksene målt her er summen av disse to formene. Nitritt er en ustabil forbindelse og konsentrasjonen er vanligvis svært liten sammenlignet med konsentrasjonen av nitrat. Vi antar derfor at bidraget fra nitritt ikke har noen vesentlig påvirkning av fluksene målt i dette arbeidet.

Endringen med økende lagtykkelse skyldes mest sannsynlig at både aerob respirasjon og denitrifikasjon svekkes i sedimentene når tilgangen på organisk karbon fra den opprinnelige sjøbunnen blir mindre.



Figur 14. Flukser av oksygen og næringsalter i kjerneprøver med økende lagtykkelse (0-60 mm). Best mulig tilpasset rett linje og konfidensintervall er vist sammen med korrelasjonsfaktor (R^2) og sannsynlighet (p) for at det ikke er noen sammenheng mellom fluks og lagtykkelse. Signifikant sammenheng ($p < 0.05$) er markert med rød skrifttype. Målingene ble utført 12.08.2015 (X) og 07.09.2015 (Δ).



Figur 15. Flukser av oksygen og næringsalter i kjerneprøver med økende lagtykkelse (0-60 mm). Kurven er tilpasset observasjonene med en glattmodell (Kernel smoother). Korrelasjonsfaktor (R^2) angir hvor stor andel av variansen som fanges opp av modellen. Målingene ble utført 12.08.2015 (o) og 07.09.2015 (+). Samme data som i figuren over.

Ammonium kan frigjøres i sedimentene som følge av nedbryting av organisk materiale og betydelige flukser av ammonium kan observeres fra sedimenter med mye ferskt organisk materiale. F.eks. kan et dødt dyr i sedimentet være nok til å gi en betydelig fluks av ammonium i en kort periode. Ammonium omdannes ofte relativt raskt til nitrat av nitrifiserende bakterier, men i dette forsøket indikerte nitratopptaket i sedimentene at nitrifikasjon ikke var en vesentlig prosess. Ammonium var aldri målbart i tilførselsvannet og bare tilstede i svært lave konsentrasjoner i utløpsvannet. De små mengdene ammonium som kan ha blitt produsert av heterotrof aktivitet i sedimentene vil raskt kunne utnyttes i proteinsyntesen og assimileres av tilstedeværende organismer. Ammonium vil derfor ikke akkumulere i porevannet så lenge nedbrytningsaktiviteten er lav. Både oksygenforbruket, nitratopptaket og ammoniumproduksjonen i disse sedimentene tyder på liten tilgang på lett nedbrytbart organisk materiale. Den biologiske aktiviteten syntes å gå på «sparebluss».

Fosfat (PO_4) og silikat ($Si(OH)_4$) er spesielle næringsalter i den forstand at de påvirkes både av biologiske og mineralogiske prosesser. Silikatfluksen er vanligvis rettet fra sediment til vann og ofte omvendt korrelert med oksygenopptaket. Dette har blitt tolket som nedbryting av planteplankton med silikatskall, f.eks. diatomeer som er vanlige i norske farvann. I tillegg har silikatfluksen en mineralogisk komponent ved at silikater løses langsomt ut fra silikatmineraler i sedimentene. Flukser på 30-40 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{h}^{-1}$ som observert i sedimentene behandlet med ≤ 3 mm avgang (Figur 14) kan ansees typisk for sedimenter fra denne lokaliteten i Oslofjorden og avtagende negativ fluks med økende tykkelse av avgangen er konsistent med avtagende opptak av O_2 (og nitrat).

Fosfatflukser kan typisk gå begge veier, både fra sediment til vann og fra vann til sediment. Fosfat er en viktig biologisk forbindelse og kan assimileres av organismer som lever i sedimentene. Fosfat kan også interferere med mineraler, spesielt jernoksyder som er effektiv adsorbent for PO_4 . Fosfat kan

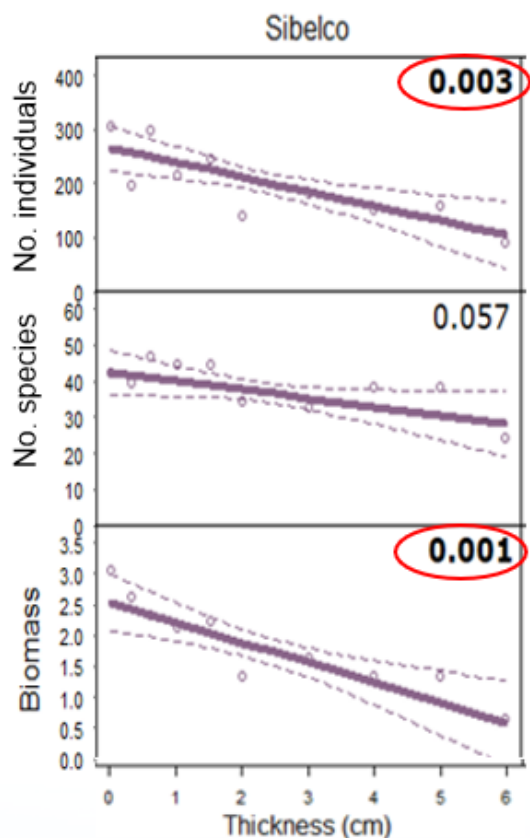
frigjøres ved nedbrytning av organisk materiale. Frigjøring av mineralsk bundet fosfat er mest kjent i forbindelse med anoksiske forhold som kan gi massiv reduksjon og løsing av treverdig jernoksyd og adsorbent fosfat. På samme måte som for silikat kan den biologiske komponenten forklare avtagende utlekking av fosfat med økende innslag av avgangsmateriale som gir lavere biologisk aktivitet og gir lavere opptak av O₂ og NO₃. Imidlertid er det tvilsomt om opptaket observert i prøvene med mest avgang kan skyldes assimilasjon. Mer trolig skyldes dette opptaket adsorpsjon til mineralske faser.

Både fosfat- og silikat-fluksene viste store variasjoner i prøvene med avgang fra Sibelco. Begge disse fluksene var signifikant påvirket ($p < 0,05$) av lagtykkelse for alle de tre avgangene testet i NYKOS, men korrelasjonen med $0,23 < R^2 < 0,33$ for Sibelco var betydelig svakere enn $0,63 < R^2 < 0,70$ for avgangene fra Hustadmarmor og Sydvaranger (Trannum m.fl., 2018). En mulig forklaring på dette kan være at avgangen fra Sibelco ikke var ekvibrert i vandig miljø på samme måte som de to andre avgangene. Avgangene fra Hustadmarmor og Sydvaranger hadde hatt en lang forhistorie i vandig miljø i prosessanleggene og under lagring frem til forsøksstart sammenlignet med avgangen fra Sibelco som var tørr helt frem til den ble oppsluttet i sjøvann og tilsatt våre prøver. Initiell adsorpsjon/desorpsjon kan tenkes å påvirke fluksene av fosfat og silikat og det er ikke utenkelig at tilsvarende initiell ekvibrering mellom sjøvannet og avgangspartiklene kan ha bidratt til de relativt høye konsentrasjonene av aluminium, mangan og barium som ble observert i vannuttrekkene av avgangen fra Sibelco vist i Figur 6.

3.1.5 Bunnfauna

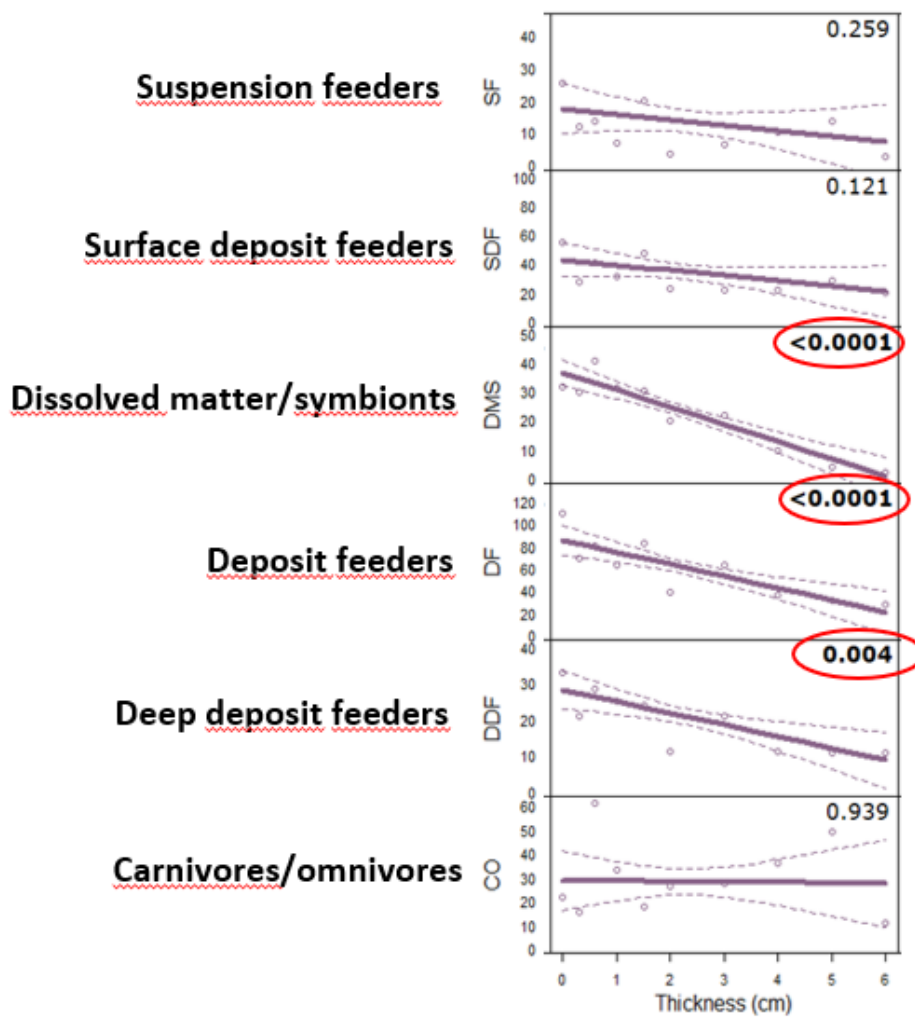
Ved avslutningen av forsøket ble alt sedimentet siktet på 1 mm sikt. Restmaterialet ble konserverert og bestemt til nærmeste art eller gruppe i hht til standard prosedyrer for prøvetaking og opparbeiding av makrofauna.

Hovedresponsen til faunaen er vist i Figur 16. De komplette resultatene finnes i Trannum et al., 2018. Det ble observert en signifikant reduksjon i antall individ og biomasse med økende lagtykkelse av Sibelco-avgangen, og for antall arter var reduksjonen helt på grensen til å være innenfor det vanlige kravet om 95% signifikans-nivå eller bedre ($p=0,057$). Ved 6 cm lagtykkelse var antall individ mer enn halvert, og biomassen var redusert med drøyt 80%. Det nevnes at alle tre av disse responsene var signifikante for Hustadmarmor, som altså ga en sterkere effekt enn Sibelco. Syd-Varanger-materialet ga derimot en signifikant effekt kun på antall arter, mens den var på grensen til signifikant for biomassen.



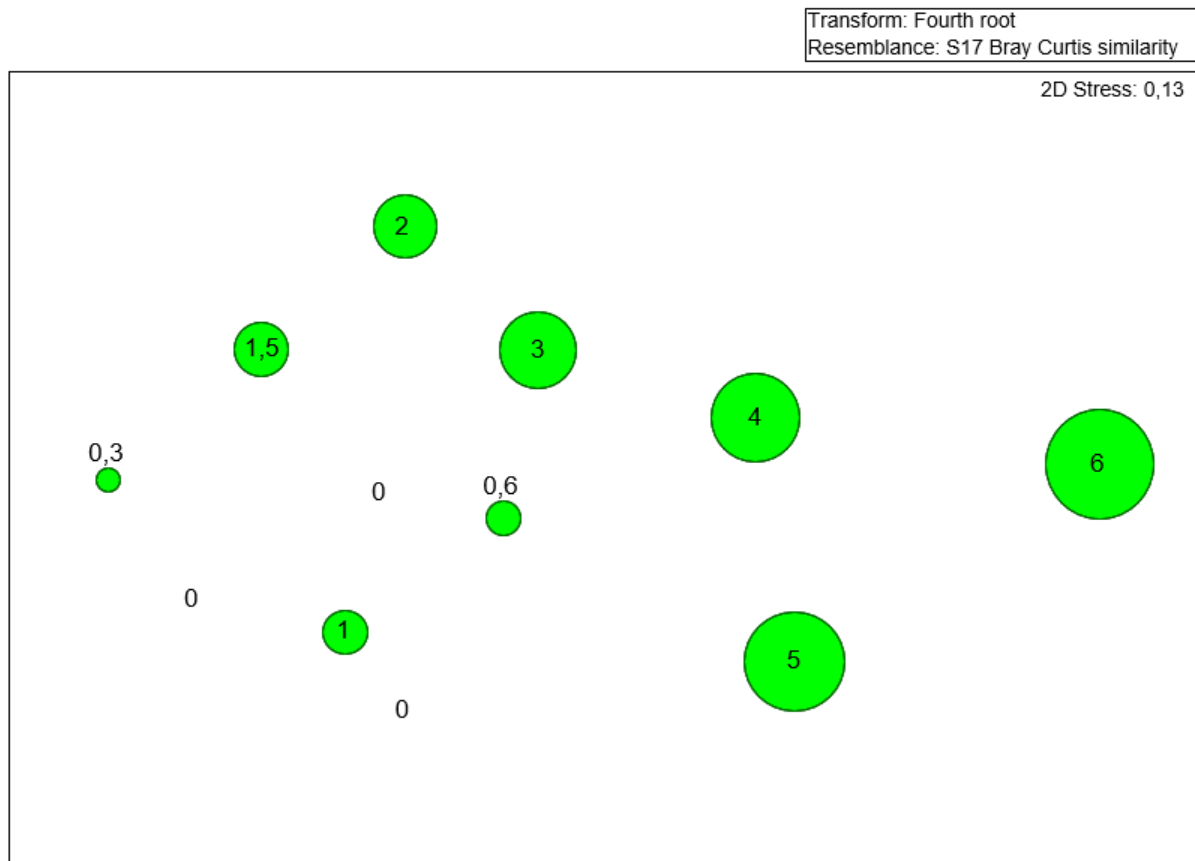
Figur 16. Responsen til antall individ, antall arter og biomasse av bunnfauna på økende lagtykkelser med de tre testmaterialene (Hustadmarmor, Sibelco og Syd-Varanger) (modellerte kurver basert på GAM). Signifikante responser er markert med rød sirkel. Stiplet, rød strek viser predikert terskelverdi (fra GLM).

Også leveviset til gruppene ble undersøkt, som er vist i Figur 17. I Sibelco-avgangen ble det funnet en sterk negativ respons på arter som lever av partikler under sedimentoverflaten («deposit feeders» og «deep deposit feeders»). Når laget med avgang blir noen cm tykt, vil slike arter måtte leve av nettopp avgangspartiklene, som jo er næringsfattige. Også arter som lever av oppløst organisk materiale og av symbiotiske bakterier («dissolved matter/symbionts») ble signifikant negativt påvirket. Flere av slike arter lever ofte i sedimenter med mye næring, og øker ofte i tilfeller med organisk beriking; altså det motsatte av hva som er tilfelle her. Derimot var det ingen signifikant respons for arter som lever av å filtrere partikler fra vannmassene eller henter partikler fra sedimentoverflaten, selv om også disse viste en tendens til reduksjon med økende lagtykkelse. Slike arter vil kunne livnære seg av ordinært sedimenterende materiale så fremt intensiteten til sedimentasjon av avgangspartikler ikke er altfor stor. Arter som lever som karnivore/omnivore ble ikke signifikant negativt påvirket. Disse artene blir ikke direkte eksponert for «fremmede» partikler, og er generelt en forurensningstolerant gruppe (Pearson og Rosenberg, 1978). For å sette responsen til Sibelco-avgangen i sammenheng med de andre avgangene, nevnes at samtlige fødegrupper ble signifikant negativt påvirket av Hustadmarmor-avgangen med unntak av karnivore/omnivore. Syd-Varanger ga en negativ effekt kun på arter som lever av organisk materiale på sedimentoverflaten («surface-deposit feeders»).



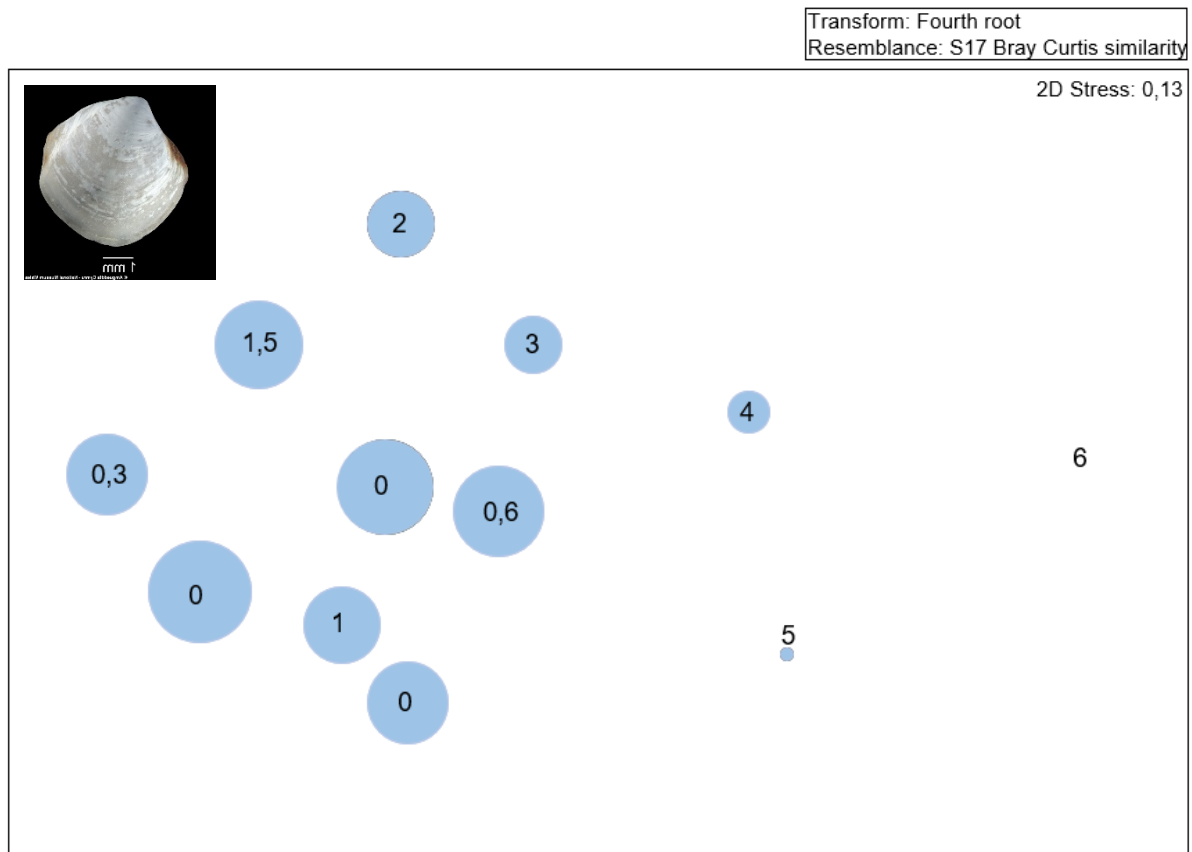
Figur 17. Responsen til de ulike fødegruppene av bunnfauna på økende lagtykkelser med Sibelco-avgangen (modellerte kurver basert på GAM). Signifikante responser er markert med rød sirkel. Stiplet, rød strek viser predikert terskelverdi (fra GLM).

MDS-ordinasjon av bunnfaunaen i mesocosm-forsøket er vist i Figur 18 for boksene behandlet med Sibelco-avgang og kontroll. x-aksen representerer i stor grad lagtykkelse, som tolkes som at et økende lag gir en økende respons til bunnfaunaen. Det er først etter 2-3 cm responsen inntreer. Nærings saltfluksene endret seg mest når lagtykkelsen økte fra 0,3 til 2 cm. Når lagtykkelsen har økt til 2 cm eller mer er både stoffutvekslingen og faunaen tydelig påvirket.



Figur 18. MDS-ordinasjon av bunnfauna i mesocosm-forsøket. Lagtykkelsen av Sibelco-avgangen er gitt som tall i cm, og illustrert med arealet av sirklene.

Tilsvarende MDS-ordinasjon er også vist i Figur 19, hvor størrelsen på sirkelen i stedet angir antallet av muslingen *Thyasira equalis*. Arten var den tallmessige mest dominerende i forsøket, og fremkom samtidig som en av de mest sensitive artene. Arten livnærer seg dels av partikler i vannet og nede i sedimentet og dels vha. symbiotiske bakterier, hvilket stemmer rimelig godt med responsene til fødegruppene vist ovenfor. Den er ikke spesielt tolerant ovenfor forurensning, i tråd med at den altså reagerte på gruveavgangen. Responsen synes å inntre etter ca. 3 cm, og den lever nettopp noen cm under overflaten, slik at den ikke vil være omsluttet av avgang når lagene er tynne. Når den derimot blir nedgravd i avgang, klarer den ikke å overleve i selve avgangsmassen.



Figur 19. MDS-ordinasjon av bunnfauna i mesocosm-forsøket. Lagtykkelsen av Sibelco-avgangen er gitt som tall i cm. Størrelsen på sirklene gjenspeiler tettheten til muslingen *Thyasira equalis*; den tallmessige mest dominerende arten i forsøket. Figuren viser at muslingen forsvinner helt i de mest påvirkede samfunnene med lagtykkesler på 4, 5 og 6 cm.

3.2 Forsøk i felt – rekolonisering

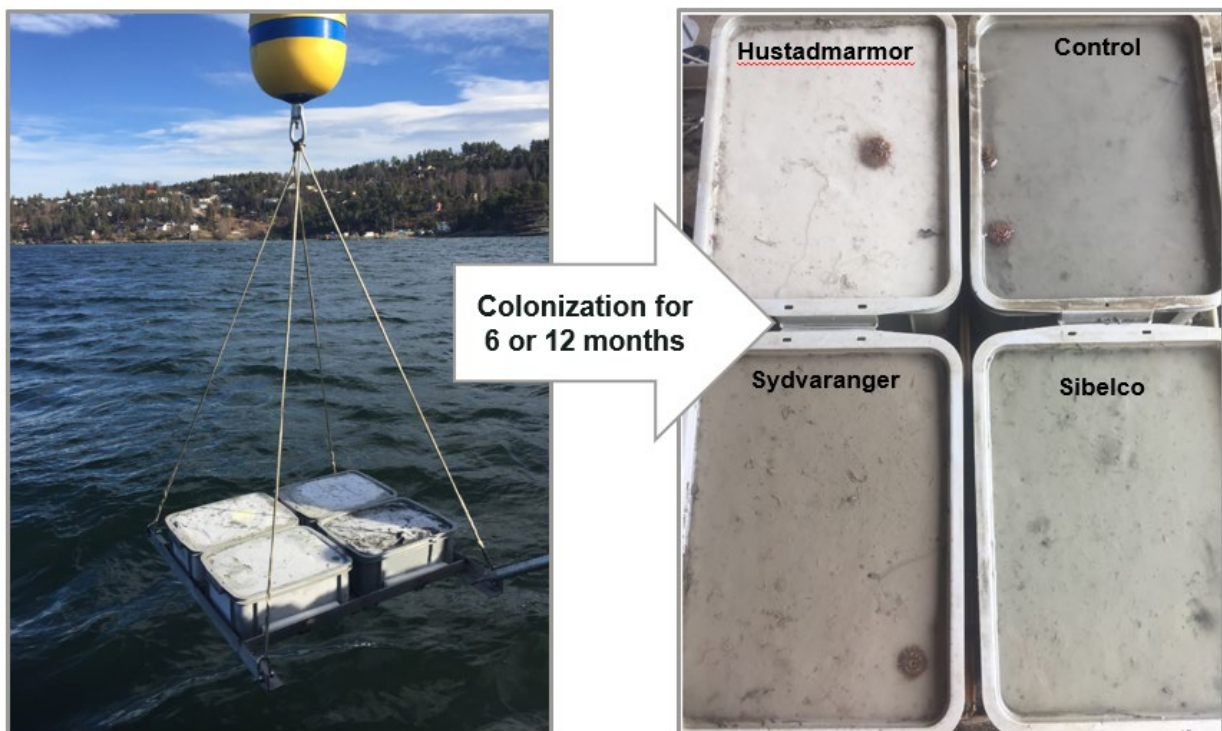
Som det siste av de eksperimentelle tilnærmingene, ble det utført et rekoloniseringsforsøk. Mens mesokosmos-forsøket representerer en test på modne samfunn og dyr, representerer dette forsøket en test på unge samfunn og individer i tidlige livsstadier. Videre er det viktig å være klar over at mesokosmos-forsøket kun studerer dødelighet siden rekruttering av nye dyr er liten (Berge m.fl., 1986), mens her er det nettopp rekrutteringen som studeres. Larvestadiet er ansett å være et av de mest sårbare stadiene i livssyklusen, hvilket gjør rekoloniseringsstudier spesielt relevante.

Metodikken er her at man først samler inn «ordinært» sediment. Dette homogeniseres og fylles i bokser som fryses ned for å fjerne alt dyreliv. Dernest legges det på et lag med testsubstrat; her gruveavgang. Boksene fryses så ned på nytt for å sikre at partiklene ikke virvles opp når rammene skal settes ut. Dernest plasseres boksene i bunnrammer, som settes ut på flat bunn, hvor de blir gjenstand for kolonisering av bløtbnnsarter. De fleste av disse artene har larver som lever i de frie vannmassene, og som bunnslår seg og etablerer seg i boksene. Enkelte arter, særlig de mer mobile, kan også krabbe oppi rammene og kolonisere på den måten. Etter hvert utvikles artsrike samfunn i boksene. Når rammene skal hentes opp, setter dykkere på et lokk på hver boks for å hindre resuspensjon av sedimentet under opphenting. Overflatearealet til boksen tilsvarer arealet til

mesokosmos-kjernene og en ordinær grabb, hvilket muliggjør sammenlikning av resultatene med de øvrige bunnfaunadataene. Ved siste opphenting ble det også hentet opp grabber fra det omkringliggende miljøet («ambient») for å kunne vurdere hvor likt det nylig etablerte samfunnet var med det modne samfunnet utenfor.

3.2.1 Oppsett og metodikk

I dette forsøket ble det brukt lagtykkelser på 2 cm, som i mesokosmos pekte seg ut som nivået hvor effektene flatet ut. Tillagingen av testmaterialene ble gjort på samme måte som beskrevet under mesokosmos-forsøket. Hver ramme hadde fire bunnrammer; med en boks pr. behandling (dvs. Sibelco, Syd-Varanger, Hustadmarmor og kontroll) i hver ramme, se Figur 20. Til sammen åtte rammer ble satt ut, og fire ble hentet opp etter et halvt år og fire etter et år. Rammene ble satt ut i mars 2017, og hentet opp hhv. i september 2017 og mars 2018. Dypet var på 26-28 m, og de var plassert om lag 10-20 m fra hverandre.



Figur 20. Eksperimentelt oppsett for rekoloniseringsforsøket. Rammene stod på bunnen i seks eller tolv måneder.

Etter opphenting ble sedimentet i boksene siktet og faunaen artsbestemt på samme måte som beskrevet ovenfor. Videre ble det tatt ut sedimentprøve for analyse av kornstørrelse, totalt organisk karbon og totalt nitrogen fra de øverste to cm av sedimentet.

De komplette resultatene er presentert i Trannum m.fl. (in press). Nedenfor presenteres kun de mest sentrale resultatene og med vekt på effektene av Sibelcos avgang.

3.2.2 Visuelle observasjoner

Overflaten var svært intakt etter opphenting, og det var mye spor av dyr og graveganger og enkelte levende dyr på overflaten som små krepsdyr, slangestjerner og sjømus. Over laget med avgang hadde det sedimentert naturlig materiale, og dette laget var tykkere etter 12 enn 6 mnd. Avgangen fra Sibelco, ga et svært kompakt «topplag», sammenlignet med de andre-avgangene og kontrollen som hadde en løsere overflate. Det var noe lukt av hydrogensulfid i enkelte bokser. En død sjømus ble observert i en av Sibelco-boksene opphentet etter 6 mnd. og en etter 12 mnd. Døde sjømus ble også funnet i en av de andre boksene med gruveavgang, men ingen i kontrollboksene.

3.2.3 Sedimentparametere

Innhold av finstoff og organisk karbon og totalt nitrogen er vist i Tabell 2 under. Finfraksjonen i avgangen var på 41%, mens det var 55% i kontrollsedimentet. Etter seks mnd. var finfraksjonen i de øverste 2 cm 46% og etter tolv måneder 52%, som altså viser at det tilsatte laget gradvis har blitt iblandet det «ordinære» sedimentet. Mengden totalt organisk karbon (TOC) var < 1 µg/mg i avgangen, mens det var 14,6 µg/mg i det ordinære sedimentet. Etter seks måneder var mengden TOC 3,5 µg/mg i de øverste 2 cm og 3,4 µg/mg etter 12 måneder, som igjen viser at laget med avgang har blitt iblandet annet sediment. Totalt nitrogen (TN) ble ikke målt i «råmaterialene», men var under deteksjonsgrensen på 1 µg/mg i Sibelco-boksene både etter 6 og 12 mnd., mot hhv. 1,0 og 1,6 µg/mg i kontrollboksene. Den lave verdien av næring målt som TOC og TN viser at det er lite næring for bunnfaunaen i selve avgangen. Når det kun er et tynt lag, vil dyrene mikse opp sedimentet under, og videre vil det hele tiden sedimentere organisk materiale fra vannsøylen som representerer «drivstoffet» til bunnsamfunnene. Dette materialet forbrukes svært raskt, hvilket betyr at målt TOC og TN ofte representerer lite nedbrytbart karbon med lav næringsverdi.

Tabell 3. Sedimentets finfraksjon (% < 63 µm) og innhold av total organisk karbon (TOC, µg/mg) i testmaterialene og boksene (0-2 cm, gjennomsnitt per behandling) etter 6 og 12 måneder. C = Control, S = Sibelco.

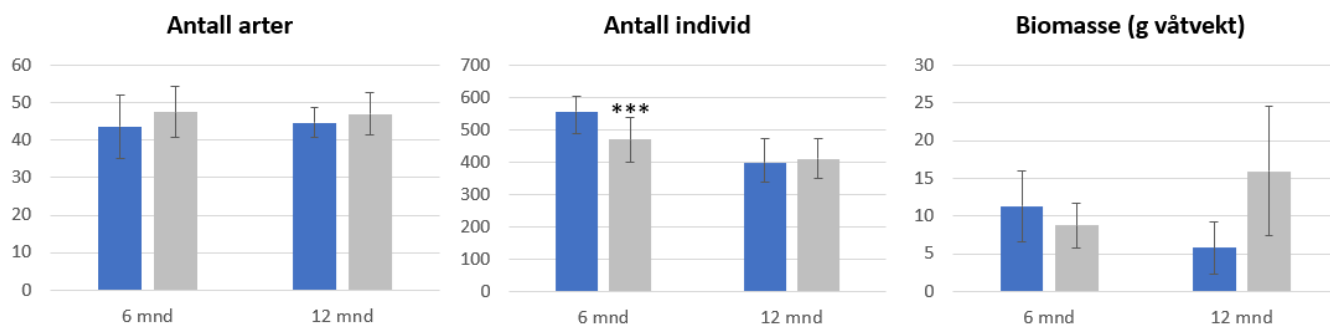
	Testmateriale		6 måneder			12 måneder		
	Finfraksjon	TOC	Finfraksjon	TOC	TN	Finfraksjon	TOC	TN
C	55	14,6	53	12,5	1,0	66	16,0	1,6
S	41	<1	46	3,0	<1	52	8,9	<1

3.2.4 Bunnfauna

Etter allerede seks måneder var det etablert over 40 arter og noen hundre individ i gjennomsnitt pr. boks (Figur 21). Mens antall individ generelt ble redusert fra seks til tolv måneder, antakelig som følge av en økning i økologiske interaksjoner over tid, var artsantallet så godt som konstant.

Etter seks måneder var det kolonisert signifikant færre dyr i Sibelco-boksene enn i kontrollboksene, men etter tolv måneder var tallet så godt som identisk. Og selv om forskjellen i antallet dyr var høyst signifikant etter seks måneder, må det merkes at forskjellen ikke anses som veldig stor. For antall arter var det ingen signifikante forskjeller mellom Sibelco-boksene og kontrollboksene, og ved begge anledninger var det faktisk noe flere arter i Sibelco-boksene. Heller ingen forskjeller var signifikante for biomassen, og her var biomassen i Sibelco-boksene noe lavere enn i kontrollboksene etter seks måneder, men høyere etter 12 måneder. Selv om de andre avgangstypene ikke er vist her, kan det

nevnes at det etter både 6 og 12 måneder var signifikant flere dyr i Sibelco-boksene enn i Hustadmarmor-boksene, men færre enn i Syd-Varanger-boksene (Trannum m. fl., In press).



Figur 21. Gjennomsnittlig antall arter, individ og total biomasse (uten store sjømus) i kontroll (blå søyler) og Sibelco (grå søyler) (\pm standaravvik). Verdi signifikant forskjellig fra kontroll (Tukey's test, utført for 6 og 12 mnd. separat) er indikert med stjerner; *** p < 0,001.

De mest dominerende artene i boksene er vist i Tabell 4, igjen for kontroll (C) og Sibelco (S). Den mest dominerende arten i begge behandlinger og etter begge tidsintervall var den lille, rørbyggende børstemarken *Pseudopolydora pauchibranchiata*. I Sibelco-boksene var tettheten kun halvparten av kontrollboksene etter seks måneder. Det var i stor grad denne arten som lå til grunn for at den totale tettheten var lavere i Sibelco-boksene enn i kontrollene, som vist i Figur 21. Derimot viste andre arter høyere tetthet i Sibelco-boksene enn i kontrollene, slik som to andre rørbyggende børstemark: *Galathowenia oculata* og *Amphitrite cirrata*. Mens *P. pauchibranchiata* lager rør av svært fine sedimentkorn, bruker *G. oculata* og *A. cirrata* større korn. Selv om ikke forskjellen i selve finfraksjonen var vesentlig ulik mellom Sibelco-boksene og kontrollene, var sedimentet finere i kontrollboksene, og videre kan det ha vært ulikheter også i flere sedimentfraksjoner enn de to som ble analysert her. Responsen kan derfor tolkes som at de ulike trenger forskjellige substrat. Økningen i enkelte arter i Sibelco-boksene kan videre tolkes som at reduksjonen i den mest dominerende arten fører til mindre økologiske interaksjoner, og at dette kan fasilitere andre arter ved at nisjer blir ledige.

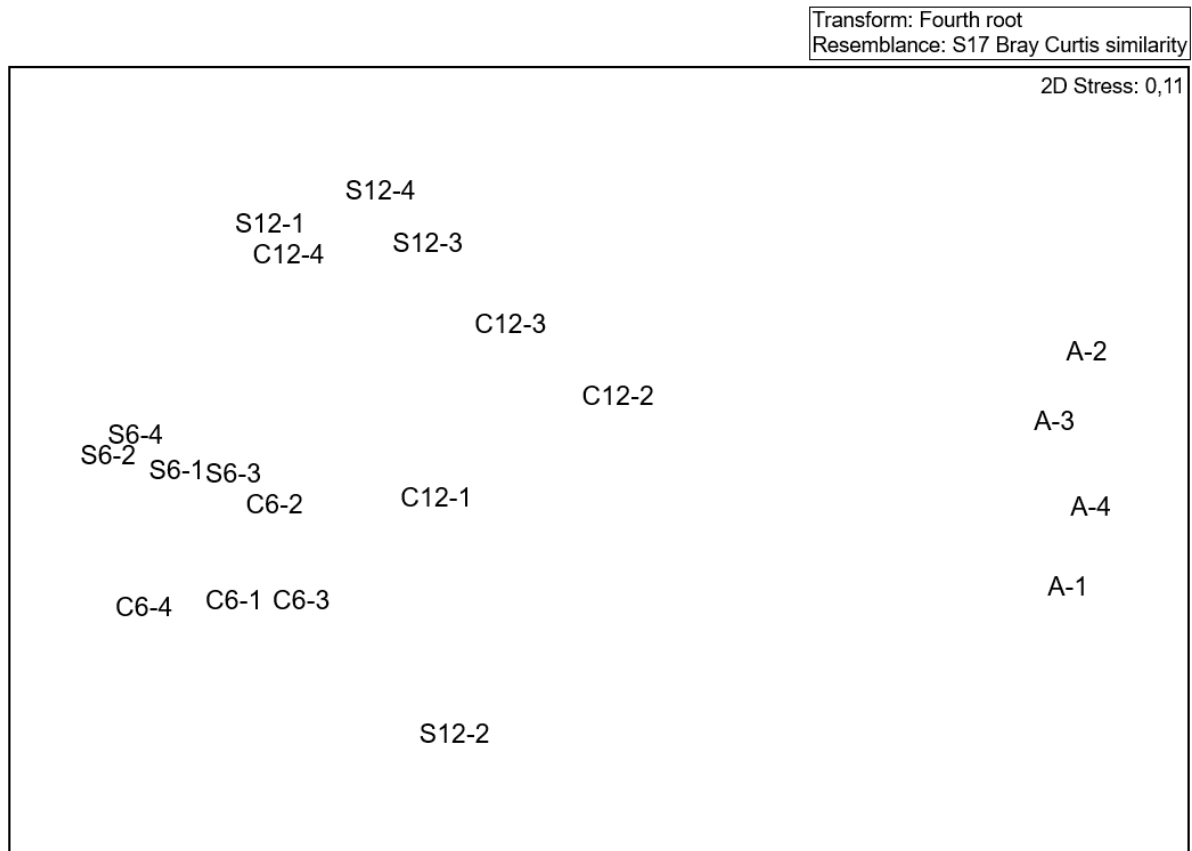
Også for dette datamaterialet er det utført multivariat statistikk. MDS-ordinasjonen er vist i Figur 22 for kontrollboksene, Sibelco-boksene og ambient (dvs. omkringliggende samfunn, som ble innsamlet samtidig med boksene som ble tatt opp etter 12 måneder). For det første fremgår det at de reetablerte samfunnene naturlig nok var likere de naturlige samfunnene rett utenfor rammene etter tolv enn seks måneder. Man ser også at forskjellen mellom boksene var større etter tolv enn seks måneder, antakelig som følge av at det over tid dannes mer «unike» samfunn i boks, mens den aller første koloniseringen er mer universell. Når det gjelder effekt av avgangen, ble Sibelco-boksene etter seks måneder klynget sammen i plottet, men de var likevel ikke vesentlig ulike fra kontrollboksene. Mindre grad av gruppering av synlig etter tolv måneder. For hele datamaterialet (dvs. også med Hustadmarmor- og Syd-Varanger-boksene) ble det utført en statistisk test på forskjellene i artssammensetningen mellom behandlingene med avgang og kontrollene (vha. post-hoc tester i PERMANOVA, Trannum m.fl., in press). I denne testen fremkom det at det ikke var signifikant forskjell på de etablerte samfunnene i Sibelco-boksene og kontrollene, i samsvar med MDS-plottet i Figur 22. For de multivariate analysene er det viktig å være klar over at dataene etter vanlig praksis ble transformert før analysen (fjerde-rot transformasjon), slik at forskjeller som går på nettopp forskjell i tetthet til enkeltarter dempes vesentlig. Det er altså ikke noen uoverensstemmelse mellom

ordinasjonen og resultatene som ble observert for individtetthet og for den ulike utbredelsen til enkelte arter beskrevet ovenfor.

Det er hittil ikke utført noen funksjonell analyse av faunaen i rekoloniseringsforsøket eller utført noen systematisk sammenlikning mellom ulike fødegrupper.

Tabell 4. Gjennomsnittlig antall av de ti mest dominerende artene i rekoloniseringsforsøket, 2017/2018. C = Control, S = Sibelco.

Art	C, 6 mnd	Art	C, 12 mnd
<i>Pseudopolydora paucibranchiata</i>	1047	<i>Pseudopolydora paucibranchiata</i>	687
<i>Galathowenia oculata</i>	352	<i>Galathowenia oculata</i>	234
<i>Scalibregma inflatum</i>	226	<i>Jasmineira caudata</i>	145
<i>Edwardsia</i> sp.	92	<i>Edwardsia</i> sp.	54
<i>Prionospio fallax</i>	69	<i>Scalibregma inflatum</i>	39
<i>Jasmineira caudata</i>	52	<i>Chaetozone setosa</i>	35
<i>Ophelina acuminata</i>	40	<i>Ampelisca tenuicornis</i>	33
<i>Amphitrite cirrata</i>	33	<i>Prionospio fallax</i>	32
<i>Chaetozone setosa</i>	27	<i>Amphitrite cirrata</i>	27
<i>Eupolymnia nesidensis</i>	21	<i>Nemertea</i> indet	19
Art	S, 6 mnd	Art	S, 12 mnd
<i>Pseudopolydora paucibranchiata</i>	492	<i>Pseudopolydora paucibranchiata</i>	620
<i>Galathowenia oculata</i>	439	<i>Galathowenia oculata</i>	270
<i>Amphitrite cirrata</i>	196	<i>Edwardsia</i> sp.	103
<i>Edwardsia</i> sp.	103	<i>Jasmineira caudata</i>	91
<i>Scalibregma inflatum</i>	87	<i>Scalibregma inflatum</i>	57
<i>Therochaeta flabellata</i>	71	<i>Prionospio fallax</i>	51
<i>Prionospio fallax</i>	70	<i>Ampelisca tenuicornis</i>	47
<i>Jasmineira caudata</i>	48	<i>Amphitrite cirrata</i>	36
<i>Eteone longa/flava</i>	29	<i>Chaetozone setosa</i>	35
<i>Eupolymnia nesidensis</i>	28	<i>Nemertea</i> indet	25



Figur 22. MDS-ordinasjon av bunnfaunaen i koloniseringsforsøket. C=kontroll, S=Sibelco, A=Ambient (de naturlige samfunnene rett utenfor bunnrammene). Tallene 6 og 12 rett etter bokstaven angir måneder etter utsetning, og tallene 1-4 angir replikat.

4 Overvåking i Stjernesundet

Overvåkingen i Stjernesundet startet opp i 1993 (Larsen m. fl., 1993), og har senere funnet sted i 2000 (Trannum og Vögele, 2000), 2004 (Larsen m. fl., 2004) og 2012 (Dahl Hansen m. fl. 2012). I tillegg ble det i 2016 utført undervannsfilmning ved hjelp av ROV for å undersøke evt. forekomst av Lophelia-koraller og for å vurdere om området var påvirket av sedimenterende partikler (Larsen, 2016).

Overvåkingen har omfattet:

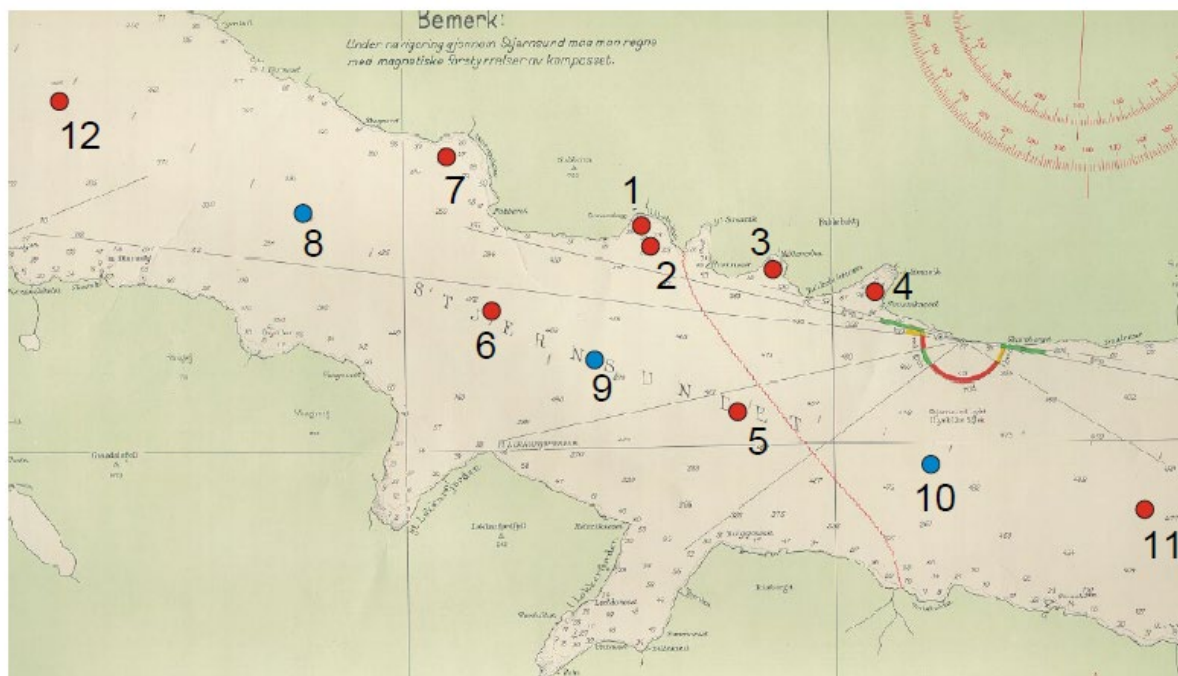
- Registrering av organisk innhold og andel finstoff i bunnsediment på bløtbunn
- Registrering av biologisk mangfold til bløtbunnfaunaen
- Undersøkelse av hardbunnsamfunn

4.1 Sediment

Bunnsedimenter ble analysert for organisk bundet karbon og kornstørrelsesfordeling, og både grunne og dype stasjoner ble undersøkt. Kart over sedimentstasjonene er vist i Figur 23.

Bunnsedimentet i de dypere deler av Stjernesundet har innslag av finpartikulært materiale fra utslippet, som episodisk raser ut i Stjernesundet. Det har vært ganske store mellomårlege variasjoner i andelen finstoff, som har blitt tolket som variasjon i hyppighet av ras.

Mengden normalisert, organisk karbon (nTOC) i sedimentet er i overvåkingen klassifisert iht. Molvær m.fl. (1997), som er gjengitt i klassifiseringsveilederen. Her er det svært viktig å være klar over at klassifiseringen er utviklet mht. effekter av forhøyet innhold av næring. I tilfeller med utslipp av gruveavgang, som jo består av mineralske partikler, blir klassifiseringen således mindre relevant siden det snarere finner sted en uttynning av næringsinnholdet. Uansett er verdien nyttig for å kunne sammenlikne stasjonene, hvor lave verdier i dette tilfellet brukes for å indikere påvirkning av avgangen. Stasjonene i Lillebukta (stasjon 1 og 2) har hele tiden, dvs. fra 1993 til 2012, hatt det laveste innholdet av nTOC, tilsvarende «svært god» tilstand (Dahl Hansen m. fl. 2012). Også de øvrige grunne stasjonene har hatt lavt innhold av nTOC, tilsvarende «god» eller «svært god» tilstand, men likevel høyere enn stasjonene i Lillebukta. Av de dype stasjonene har stasjon 9, som ligger nærmest utslippet, også hatt lavt innhold av nTOC gjennom hele perioden, hvilket har blitt tolket som at avgang har akkumulert. Stasjonene 5 og 6, som ligger på hver sin side av stasjon 9 i dypålen i Stjernesundet, har også hatt lave verdier tilsvarende «svært god» tilstand med unntak av «god» tilstand på stasjon 5 i 1993. De øvrige dype stasjonene har hatt noe høyere nivå, men likevel innenfor enten «svært god» eller «god» tilstand. Avgangen har altså påvirket sedimentet i nærområdet, både i Lillebukta og i det dypere området utenfor bukta.



Figur 23. Prøvetaksstasjoner for innsamling av sediment og /eller bunnfauna i Stjernesundet. På stasjoner merket med rødt ble det tatt både sediment- og bunnfaunaprøver, mens på stasjoner merket med blått ble det kun tatt sedimentprøver. Kart hentet fra Trannum og Vögele (2000). Ikke alle stasjoner er tatt ved hver overvåking.

4.2 Bløtbunnssamfunn

Stasjonskart for undersøkelse av bløtbunnssamfunn er vist i Figur 23.

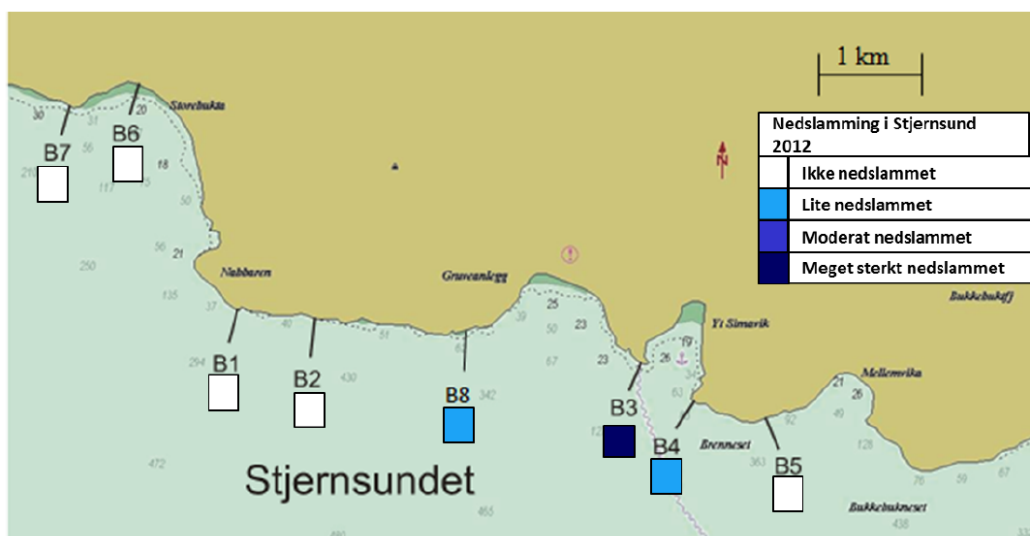
Stasjonene i selve Lillebukt (stasjon 1 og 2) har vært tydelig påvirket av avgangen. Ved den siste overvåkingen i 2012 var tilstanden kun «moderat» til «dårlig» på begge disse stasjonene basert på parameterne Shannon-Wiener (H') og Hurlberts diversitet (ES_{100}). Også artsantallet har vært relativt lavt. Videre var det tendens til at tilstanden var blitt forverret, dvs. at påvirkningen hadde økt. Det er ikke beregnet indekser hvor artenes grad av toleranse inngår, slik kravet i dagens overvåking er. Uansett viser artssammensetningen svært stort innslag av forurensningstolerante arter. Ved den siste overvåkingen i 2012 var børstemarken *Capitella capitata* den mest dominerende arten på stasjon 1, og utgjorde 77 % av individmengden. Denne arten er regnet for å være en av de aller mest tolerante artene av makrofauna, og finnes i høye tettheter ved ulike former for forstyrrelse, for eksempel både ved organisk belastning og fysisk forstyrrelse slik som her. Også flere av de øvrige artene var typisk for forstyrrede områder, eksempelvis muslingen *Thyasira sarsi*. Denne arten finnes særlig når det er lite oksygen tilgjengelig i sedimentet, da den til dels livnærer seg vha. symbiotiske sulfatreduserende bakterier. Funnet av denne er derfor i tråd med at det har vært tilfeller med oksygenvinn i sedimentet. Den finnes også i høye tettheter i sjødeponiet i Frænfjorden (Tranum m.fl. 2019), hvor funnet dels er satt i sammenheng med at avgangspartiklene gjør sedimentet kompakt og homogent og derav reduserer oksygenpenetrasjonen, men dels også at det her brukes flotasjonskemikalier som er nedbrytbare. Arten *Scoloplos acutus*, som også hadde relativt høy tetthet på stasjon 1, er derimot regnet som en følsom art (<http://www.marinespecies.org/aphia.php?p=taxdetails&id=607421#attributes>). Videre nevnes at det var forekomst av rørbyggende arter, slik som børstemarkene *Owenia fusiformis* og *Galatowenia oculata*. Generelt har rørbyggende former fremkommet som sensitive ovenfor nedslamming av gruveavgang (Tranum m.fl. 2019), og tilstedeværelsen av disse viser at samfunnene ikke er entydig negativt påvirket. Børstemarken *G. oculata* økte i nettopp Sibelco-behandlingen i rekoloniseringsforsøket, som stemmer svært godt overens med funnet av denne arten i Sjernsundet inkl. på stasjon 1 i Lillebukt (Dahl-Hansen m.fl., 2012). Stasjon 2 har hatt enda lavere artsantall enn stasjon 1, samt innslag av forurensningstolerante arter slik som *C. capitella*. Her må det imidlertid nevnes at stasjonen ligger i et svært bratt område, hvilket antakelig medfører en ytterligere reduksjon i sedimentstabiliteten. Det er også vanskelig å prøveta. Sist nevnes at det ble observert lavere forekomst av filtrerende arter i Lillebukt enn på de grunne referansestasjonene.

I det dype området nærmest Lillebukt, stasjonene 5 og 6 i Sjernsundet, har det generelt vært svært høye individtettheter (på stasjon 9 er det ikke samlet inn bunnfauna, kun sediment). Artsantallet har samtidig vært normalt til høyt, og tilstanden var i 2012 «god» basert på de to målte indeksene (H' og ES_{100}). Selv om det har vært noe innslag av forurensningstolerante arter, slik som *Chaetozone sp.*, har ikke disse hatt særdeles høye tettheter, slik som var tilfelle på stasjon 1. Det var også innslag av sensitive arter. Videre dominerte rørbyggende arter på begge stasjonene, hvilket indikerer at fysisk nedslamming ikke påvirket samfunnene i noen stor grad. De to stasjonene viste høy dominans av enkeltarter; *Spiophanes kroyeri* på stasjon 6 og *Myriochele heeri* på stasjon 5; begge rørbyggende børstemark. En slik høy tetthet kan indikere at stasjonene i noen grad er påvirket, og særlig *S. kroyeri* kan være assosiert med forstyrrelse, men de er likevel ikke blant de aller mest tolerante artene. Videre lever disse artene av partikler på overflaten og/eller i vannsøylen. Nettopp slike arter fremkom som sensitive ovenfor stor grad av nedslamming av uorganiske partikler i det ovennevnte mesokosmos-forsøket (Tranum m.fl., 2018) og også feltundersøkelsen i Frænfjorden (Tranum m.fl., 2019), og den høye tettheten her indikerer igjen at avgangspartiklene ikke i noen stor grad påvirker faunaen.

Øvrige stasjoner i de undersøkte grunne og dype områdene i Stjersundet har ikke vist nevneverdige indikasjoner på påvirkning. Som det også er konkludert med av Dahl-Hansen m.fl. (2012) anses det altså å være bløtbunnsfaunaen i Lillebukta som er sterkt påvirket av utslippet, mens de nærmeste stasjonene i dypålen i Stjersundet er marginalt påvirket. I området utenfor dette kan det ikke spores noen effekter.

4.3 Hardbunnsamfunn

Mht. hardbunnsamfunn er det ikke eksperimentelle data å sammenlikne med. Her nevnes derfor kun at det er observert stor grad av nedslamming i nærområdet til utslippet (Dahl-Hansen m.fl., 2012), se Figur 24. Videre viser samfunnsstrukturen at hardbunnsamfunnene på stasjonene nærmest utslippet er påvirket av avgangen, men kun fra under omlag 12 m dyp. Det ble påvist færre arter av både alger og dyr i nærområdet til utslippet enn i de øvrige gruntvannsamfunnene, og videre ble det påvist partikler fra avgangen på slim og fødeorganer til organismer opptil 2 km fra utslippet (Trannum og Vögele, 2000). Det kan også nevnes at det generelt er observert påfallende lite sekkedyr i området (Dahl-Hansen m.fl. 2012). Disse lever av å filtrere partikler, og kan muligens ha blitt negativt påvirket av stort innslag av partikler fra avgangen, i tråd med liknende funn for bløtbunnsamfunnene som er diskutert ovenfor.



Figur 24. Illustrasjon av graden av nedslamming i gruntvannsområdet i Stjersundet (hentet fra Dahl Hansen m.fl., 2012).

5 Diskusjon

5.1 Generell vurdering av testenenes følsomhet og relevans

Forsøkene og testene utført i NYKOS WP4 vil ha varierende utsagnskraft. Alle forsøkene ble utført med replisering eller gradienter som tillater statistisk beregning av sannsynlighet (p) som gir utsagn av typen « p % sannsynlighet for ingen effekt». Generelt kan det sies at de standardiserte testprotokollene sikrer god replisering og kontroll av forsøksbetingelsene slik at det er små sjanser

for «tilfeldig signifikante» resultater (jfr. Figur 3). I tillegg gjøres testene på organismer som er dokumentert egnet og ofte på spesielt følsomme, tidlige utviklings-stadier (f.eks. embryo av østers). Forsøkene utført i mesokosmos og felt har sin styrke i høy relevans ved at testmiljøet ligner mer på det virkelige miljøet i et sjødeponi, og at testene omfatter effekter på et representativt utvalg av 20-40 arter eller funksjonelle grupper som vil finnes på de fleste fjordbunner dekket av løsmasser (bløtbunn). Forsøkene i mesokosmos vil stort sett måle overlevelse (Berge m.fl., 1986), mens rekoloniserings-forsøkene vil inkludere mer følsomme stadier med nedslag av larver og tidlige utviklingsstadier.

Vannuttrekkene benyttet i de økologiske testene (kap. 2.1) ble tillaget ved at avgangsmengder på 0,1-100 mg/L ble ristet i lukket flaske ved 20°C i 7 eller 28 dager. Avgang som slippes ut i vannsøylen vil ha forholdsvis korte oppholdstider i de frie vannmassene. Finstoffet, som vil ha lengst oppholdstid, utgjør en liten andel av totalmengden og vil fortynnes raskt til lave konsentrasjoner. For eksempel har vertikalprofiler tatt opp rundt et utslipp av gruveavgang i Bergsfjorden, vist at forhøyet turbiditet var begrenset til et område inntil ca 500 m fra utslippspunktet (Schaanning m.fl., 2018) og at de høyeste konsentrasjonene på hver stasjon aldri overskred 12 mg/L. Nøyaktig oppholdstid av vannmassene rundt utslippspunktet er ikke kjent, verken for Bergsfjorden eller i Stjernesundet, men det kan antas at disse vil være i størrelsesorden timer snarere enn dager. Testløsningene med de høyeste konsentrasjonene opptil 100 mg/L avgang ekvilibrerer med sjøvann i 7 dager og ved høyere temperatur enn det som normalt forekommer i Stjernesundet, må derfor antas å representere «worst case» i forhold til forventet utløsning av avgangskomponenter i de frie vannmassene ved utslippspunktet.

På sedimentoverflaten vil oppholdstiden i topplaget med biologisk aktivitet være i størrelsesorden år og ti-år før avgangen begraves av nye utslipp eller naturlig sedimentasjon. Konsentrasjonen av avgang vil kunne variere fra null og helt opp til tilnærmet ren avgang. Vannuttrekkene vil derfor være mer relevante i forhold til utløsning av avgangskomponenter til porevannet og eventuelt til stagnerte «lommer» av vann over sedimentene. Hedsediment-testene inkludert forsøkene i mesokosmos og felt vil derfor ha størst relevans både i forhold til utløsning til porevann og direkte opptak fra avgangspartikler i kontakt med dyra via tarm eller andre eksponerte kroppsoverflater.

5.2 Toksisitet av vannuttrekkene

Til tross for lavt innhold av tungmetaller og ingen bruk av kjemikalier i prosessanleggene ble det funnet toksiske effekter av vannuttrekkene av avgangen fra Sibelco, mens det var små eller ingen effekter av vannuttrekkene fra de to andre avgangene. Disse resultatene var uventet og vi er ikke kjent med at det har vært utført giftighetstesting av denne avgangen tidligere som eventuelt kunne bekrefte eller avkrefte våre resultater. Uttrekkene ble produsert ved 7 og 28 dager risting (100 rpm) i sjøvann ved pH 8,2 og partikler ble fjernet ved filtrering på 0,2µm filter før eksponering av organismene. Toksiske effekter ble observert både på utvikling av østers embryoer og veksten av en marin planktonalge. Analyser av vannuttrekkene viste lave nivå (klasse II) av metallene sink, nikkel og kopper som er definert med grenseverdier for toksisitet i vannforskriften. Avgangen inneholder heller ikke andre toksiske metaller som kan tenkes å ha løst ut i konsentrasjoner over tilsvarende grenseverdier. Uttrekkene inneholdt imidlertid forholdsvis høye konsentrasjoner av mangan, aluminium og barium. En grunn til dette kan være at avgangen ble levert tørr, i motsetning til de to andre avgangstypene som ble oversendt og lagret i store beholdere (200-1000L) fylt opp med vann. All initiell utlekking av metaller fra Sibelco-avgangen vil akkumulere i det lille volumet i risteflaskene, mens tilsvarende utlekking fra de andre avgangene vil kunne unnsnippe i prosessanlegget før uttak av avgangsprøvene eller ved fortynning i vannet i beholderen. Disse metallene (Mn, Al, Ba) regnes vanligvis å være lite giftige og er ikke klassifisert i vannforskriften. De målte konsentrasjonene på

0,13 mg/L Al, $\leq 0,33$ mg/L Mn og $\leq 0,15$ mg/L Ba (Figur 6) var lavere enn litteraturverdier sitert i Brooks, m.fl. 2019, som indikerte EC50-verdier på 0,8 - 14,8 mg/L for aluminium, 16 mg/L for mangan og 0,19 mg/L for barium. Brooks m.fl., 2019, konkluderte at de observerte effektene på østers embryo og *Skeletonema* mest sannsynlig skyldtes en kombinasjon av høye konsentrasjoner av Mn, Al og Ba.

Som argumentert i foregående avsnitt (kap.5.1) er det lite sannsynlig at slike konsentrasjoner vil kunne inntreffe i de frie vannmassene rundt utslippspunktet i Stjernesundet. Dette er relativt enkelt å verifisere med analyser av disse elementene i filtrerte og ufiltrerte vannprøver innsamlet i de turbide vannmassene nedstrøms utslippspunktet i Lillebukta. Dersom utløsingen skyldes initiell ekvibrering med sjøvannet vil utlekkingen avta relativt kort tid etter at avgangen kommer ut i sjøen.

5.3 Helsediment-testene

Disse testene ga svært like resultater for avgang fra Sibelco og avgang fra Sydvaranger, dvs. ingen effekter på østersyngel, men signifikant redusert overlevelse av *Corophium* sp. eksponert i den høyeste dosen med 80% avgang og 20% sediment (Figur 9). Avgangen med flotasjonskjemikalier kom derimot dårligere ut i *Corophium*-testen med betydelig redusert overlevelse også ved lavere 50 og 32% avgang. Disse resultatene var i god overenstemmelse med resultatene fra mesokosmos-forsøket som viste at avgangen med flotasjonskjemikalier hadde større effekt enn avgangen med bare flokkuleringsmidler og Sibelco-avgangen uten kjemikalier.

Effektene i behandlingen med 80% avgang kan relateres til en fysisk effekt av selve partiklene. Knuste mineraler kan skade enkelte organismer ved at små og/eller skarpkantede partikler setter seg fast og skader og hemmer visse organfunksjoner som gjeller og fødeorganer (Michel m.fl., 2014, Farkas, 2017). En komplimentær forklaring som ville være mer konsistent med resultatene av vannuttrekkene kunne være utlekking til porevannet og en kombinert kjemisk effekt av forhøyede konsentrasjoner av Mn, Al og Ba i porevannet.

5.4 Feltobservasjoner og forsøk med bunnfauna

Selv om forsøkene med bunnsamfunn ble utført i Oslofjorden, som er en fjord uten sjødeponi, anses resultatene å ha generell relevans fordi flere av de samme artene som er tilstede i Stjernesundet også finnes i Oslofjorden, og enda flere når man ser på slekts-nivå. Særlig er artene som «førstegangsetablerere», dvs. de første som typisk koloniserer et nytt substrat, nærmest universelle på tvers av geografi. Eksempelvis ble de opportunistiske artene *Chaetozone* sp., *Capitella capitata* og *Mediomastus* sp. registrert i både mesokosmos- og feltforsøkene samt i feltovervåkingen. Andre eksempler mht. likhet i enkeltarter er den rørbyggende børstemarken *Galatowenia oculata*, som hadde høy tetthet både i rekoloniseringsforsøket og i Stjernesundet, inkl. at den ble registrert i Lillebukta. De rørbyggende børstemarkene *Spiophanes krøyeri* og *Terebellides stroemi* og muslingene *Thyasira equalis* og *Abra nitida* er andre eksempler på arter som ble funnet både i Stjernesundet, og i forsøkene utført i Oslofjorden og mesokosmos. Alle disse artene syntes å respondere på gruveavgang i mesokosmos-forsøket, og i tråd med dette ble de registrert i dypålen i Stjernesundet, men ikke i Lillebukta. Sist er det viktig å være klar over at de funksjonelle responsene er mer generiske enn responsen som går på selve artssammensetningen.

Totalt sett var det mindre effekter i rekoloniseringsforsøket enn i mesokosmos-forsøket. Her er det viktig å være klar over at mens mesokosmos-forsøket som nevnt over kun måler dødelighet, er rekoloniseringsforsøket basert på at artene skal etablere seg. En annen viktig forskjell er at dyrene i mesokosmos fysisk ble utsatt for selve sedimenteringen, mens dyrene i rekoloniseringsforsøket

etablerte seg oppå lagene med avgang, og slik «slapp unna» en av stressfaktorene. Det er også viktig å være klar over at man i rekoloniseringsforsøket fikk en betydelig «fortynningseffekt» siden laget var såpass tynt (2 cm), og underveis i forsøket ble mikset både med laget under og etter hvert også med det nylig, naturlige sedimenterende laget over. Sist var de rekoloniserte samfunnene fremdeles i et relativt tidlig suksesjonsstadium, med høyere dominans av mer opportunistiske og tolerante arter, enn de modne samfunnene i mesokosmos-forsøket.

Sammenliknet med en feltsituasjon er det videre viktig å være klar over at skalaen i forsøkene var liten både mht. arealet for faunaen (0,1 m²), samt tykkelsen på avgangsmassene (skala på cm). Slik sett kan ikke resultatene overføres direkte til en feltsituasjon hvor hele området som har vært gjenstand for deponering, skal gjenetableres. Deponiet kan i noen tilfeller være flere titalls meter dypt, og fylle opp et helt fjordbasseng – eller her store deler av bukten. Dette begrenser tilgangen på rekrutterende organismer. Både skala og frekvens er svært viktig for restitusjonen. Nettopp derfor er det viktig å supplere med data fra feltsituasjonen, slik som vist i tilnærmingen i Figur 3.

Avgangsmaterialet inneholder lite næring, vist ved lavt innhold av totalt organisk karbon og nitrogen. Stor sedimentering antas derfor å kunne fortynne næringen, særlig for filtrerende og partikkelpisende arter. Videre kan partiklene tilstoppe både føde- og respirasjonsorganene. Dersom partiklene i tillegg er skarpkantet, kan dette muligens gi ytterligere skade. Det ble som nevnt ovenfor observert færre filtrerende arter både på hard- og bløtbunn i Lillebukt, som er i tråd med analysen av faunaens funksjoner i sjødeponiet i Frænfjorden. Imidlertid var det i Sibelco-boksene i mesokosmos-forsøket ikke signifikant reduksjon i mengden filtrerende arter eller arter som lever av partikler på sedimentoverflaten, selv om de også her ble redusert. I mesokosmos var jo den tilsatte mengden svært liten og lite hyppig i forhold til hva dyrene utsettes for i feltsituasjonen, hvilket kan forklare den ulike responsen. Her er det igjen viktig å være klar over at de eksperimentelle tilnærmingene var påtenkt å representere overgangssonen mellom deponiet og normal sjøbunn, snarere enn selve deponiet.

5.5 Episodisk hypersedimentasjon

Hyppige ras utløst av avgangen som sedimenterer i Lillebukt og den bratte skråningen ut mot Stjernesundet gir opphav til turbiditets-strømmer som følger rennene i den bratte skråningen nedover til den flate fjordbunnen der avgangen spres utover i en 1,5 km² stor vifte (Figur 2). Bø m.fl., 2018, anslo at det siden 1995 er sedimentert 1,5-2 millioner m³ avgang i dette området. Dette tilsvarer en gjennomsnittlig sedimentasjonsrate på 6 cm år⁻¹. Dersom avgangen tilføres episodisk fra turbiditetstrømmer utløst av hyppige ras i skråningen, vil bunnfaunaen i dette området ha vært utsatt for en belastning som det ikke er urealistisk å sammenligne med skadene påført etter sedimentasjon av 0,3-6 cm avgang over en fire ukers periode som i mesokosmos-forsøket, eller rekolonisering på en 2 cm lagtykkelse som benyttet i rekoloniseringsforsøket. Disse forsøkene indikerte små til moderate effekter av nedslamming (Figur 16-Figur 19) og relativt rask rekolonisering (Figur 21-Figur 22). Bunnfaunaen i det avgangspåvirkede området i Stjernesundet ble beskrevet som moderat påvirket, men forekomsten av rørbyggende arter indikerte at fysisk nedslamming ikke hadde påvirket samfunnene i noen stor grad.

5.6 Sammenfattende vurderinger

Effekter av vannuttrekkene var større for Sibelco enn for de to andre avgangene undersøkt i NYKOS-prosjektet. Dette skyldes mest sannsynlig at Sibelcos avgang, i motsetning til de to andre, er tørr frem til deponering. I våre forsøk var den tørr frem til den ble ekvibrert med sjøvann i en lukket flaske. Første gang de knuste steinmassene blir eksponert i sjøvann initieres ione-bytte-prosesser

som kan innebære en utveksling av ladede ioner mellom vann og partikler. Fluksmålingene av fosfat og silikat viste store variasjoner i sedimenter tilsatt Sibelco avgang. Effektene inntraff i uttrekk ned til 0,1 mg avgang per liter sjøvann. Slike partikkelkonsentrasjoner er målt i nærheten av tilsvarende utslipp, men begrenset til noen få titalls meter fra utslippspunktet. Sammenlignet med sedimentene er dette et dynamisk miljø med korte oppholdstider og stor fortykning. Vår vurdering er derfor at det er lite sannsynlig at effekter tilsvarende de som ble observert etter relativt lange eksponeringstider i vannuttrekkene vil ha noen betydning i de frie vannmassene rundt utslippspunktet. En nærmere undersøkelse av dette kunne eventuelt være å kartlegge konsentrasjonene av metaller som barium, aluminium og mangan i vannprøver nær utslippspunktet så vel som i porevann ekstrahert fra sedimenter påvirket av avgangen.

I alle tester der organismer ble eksponert mot selve avgangen (økotoks, mesokosmos og felt-forsøk), var resultatene nokså entydige ved at det var mindre negative effekter av avgangen fra Sibelco og Sydvaranger enn av avgangen fra Hustadmarmor. Det er heller ikke observert effekter fra Sibelcos avgang som avviker fra de effektene som kan forventes å følge av øket sedimentasjonshastighet som sådan.

Forsøkene har vist at økt sedimentasjonshastighet endret sediment-vann utvekslingen av O₂ og næringssalter og reduserte antall arter, individer og biomasse. Endringen av fluksene var størst ved små doser 3-10 mm og flatet ut ved sedimentasjon av omkring 20 mm avgang i løpet av fire uker. De biologiske endringene økte med økende lagtykkelse og signifikante endringer ble påvist når hele konsentrasjonsgradienten ble inkludert i analysene. Dataene tydet på at ca 2 cm i løpet av en fire-ukers periode representerer en slags grenseverdi for effekter etter en hendelse med hypersedimentasjon utløst naturlig etter flom eller skred eller destabilisering av partikkelhauger bygget opp i nærheten av et utslipp av f.eks. gruveavgang. Vi understreker at dette gjelder plutselige hendelser og at vi ikke har grunnlag for å knytte dette til noen grenseverdi for sedimentasjonshastighet f.eks i cm per år.

Vesentlig forringelse av faunaen er lokalisert til nærområdet, hvor sedimentasjonen er svært høy, dvs. Lillebukta. Her er bløtbunnsfaunaen svært påvirket, og det er også store effekter på hardbunnsamfunnene. Samtidig ser man både i feltforsøket og i feltsituasjonen at tolerante arter bestandig vil være tilstede og kolonisere substratet, og videre at effekten av tynne lag synes å være relativt liten.

Når sedimentasjonen er lav og/eller forekommer lite hyppig, anses den altså ikke å påvirke faunaen negativt i noen stor grad. Men hvis sedimenteringen av gruveavgang er mer kontinuerlig og av en viss størrelse, som ifølge forsøkene ser ut til å tilsvare om lag 2 cm på 4 uker, vil samfunnet endre seg betydelig. Denne påvirkningen kan være knyttet til uttynning av næring, ødeleggelse av nisjer i overgangen mellom sediment og vann og utilstrekkelig evne til å relokalisere etter hvert som sediment-vann grenseflaten forflyttes oppover. Sedimenter med høyt innhold av Sibelco avgang blir også svært kompakt, noe som kan påvirke enkelte arter, og også medføre redusert oksygenpenetrasjon.

Episoder hvor massene raser ut langs skråningen fanges ikke godt opp av overvåkingen. En slik episode kan, i alle fall for mer perifere stasjoner, best sammenliknes med mesokosmos-forsøket, hvor avgang ble lagt oppå intakte samfunn ved enkeltanledninger. Man vil da kunne forvente at man får en umiddelbar negativ effekt som kan gi dødelighet i alle fall av enkeltarter. Selv om massene skulle føre til at mesteparten av faunaen blir umiddelbart borte, vil man etter kort tid få kolonisering av nye arter. Det er mulig at dette går saktere i Stjernesundet enn i Oslofjorden pga. større

sesongmessige variasjoner, men de mest opportunistiske artene er tilstede i alle miljø og produserer larver året rundt, så vedvarende desimerte sedimenter vil ikke forventes.

6 Referanser

Berge, J.A., M.Schaanning, T.Bakke, K.A.Sandøy, G.M.Skeie and W.G. Ambrose, Jr., 1986. A Soft-bottom Sublittoral Mesocosm by the Oslofjord: Description, Performance and Examples of Application. *Ophelia*, 26: 37-54.

Berge, J., Helland, A., Larsen, L.-H., Moy, F., Sørensen, K. & Walday, M. 1993: Miljøundersøkelse i Stjernesundet, Finnmark i forbindelse med utslipp av gruveavgang fra North Cape Nefelin AS. *Akvaplan-niva Report 411.93.372.01.01*, 59 pp.

Berge J.A., Beylich B., Brooks, S., Jaccard P.F., Tobiesen A., Øxnevad S., 2012. Overvåking av Bøkfjorden 2011 og giftighetstesting av gruvekjemikalier Magnafloc LT 38 og Magnafloc 10. NIVA-rapport 6310-2012. 121 ss.

Berge J.A., Schwermer C., Tobiesen A., Vogelsang C., 2014. Gruveavgang i Bøkfjorden – utlekking og giftighetstesting av vannbehandlingskemikalier. NIVA-rapport 6693-2014, 56 ss.

Brooks SJ, Escudero-Oñate C, Lillicrap A. 2019. An ecotoxicological assessment of mine tailings from three Norwegian mines. *Chemosphere*. 233: 818-827.
<https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.06.003>.

Bøe, R., Sandøy, R., Baeten, N.J., Lepland, A., Bellec, V.K., Chand, S., Longva, O., Klug, M., Plassen, L. & Schønenberger, J. 2018: Marine mine tailings disposal at Lillebukt, Stjernesundet, North Norway: distribution, sedimentary processes and depositional impacts. *Norwegian Journal of Geology* 98, 461–482. <https://dx.doi.org/10.17850/njg98-3-08>.

Dahl-Hansen, I.E., Mannvik, H.P. & Larsen, L.H. 2012: Undersøkelse av miljøtilstanden i Lillebukta og Stjernesund, Finnmark 2012. *Akvaplan-niva Report 5463-1*, 77 pp.

Dopson M., Sundkvist J.E., Lindström E.B., 2006. Toxicity of metal extraction and flotation chemicals to *Sulfolobus metallicus* and chalcopyrite bioleaching. *Hydrometallurgy* 81 (2006) 205–213.

ISO 10253, 2016. Water Quality – Marine Algal Growth Inhibition Test with *Skeletonema Sp.* and *Phaeodactylum tricornatum*.

ISO 14669, 1999. Water Quality – Determination of Acute Lethal Toxicity to Marine Copepods (Copepoda, Crustacea).

Larsen, L.-H., Dahl-Hansen, G., Vögele, B. & Trannum, H.C. 2004: Miljøundersøkelsen i forbindelse med utslipp av gruveavgang fra North Cape Minerals, Stjernøya, Finnmark, 2004. *Akvaplan-niva Report 411.3138*, 47 pp.

Näslund, J., Samuelsson, G., Gunnarson, J., Nascimento, F., Nilsson, H.C., Cornelissen, G. and Schaanning, M.T., 2011. A benthic mesocosm study on ecosystem effects of thin layer capping materials suggested for sediment remediation. *Marine Ecology Progress Series* 449:27-39. doi10.3354/meps09546.

Pearson, T.H.; Rosenberg, R. Macrobenthic succession in relation to organic enrichment and pollution of the marine environment. *Oceanogr. Mar. Biol. Annu. Rev.* 1978, 16, 229–311.

Ramirez-Llodra, E., Trannum, H.C., Evenset, A., Levin, L.A., Andersson, M., Finne, T.E., Hilario, A., Flem, B., Christensen, G., Schaanning, M. & Vanreusel, A. 2015: Submarine and deepsea mine tailing placements: A review of current practices, environmental issues, natural analogues and knowledge gaps in Norway and internationally. *Marine Pollution Bulletin* 97, 13–35. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.05.062>.

Schaanning M., Beylich B., Borgersen G., Gitmark J., Golmen L. og Moy, S., 2018. Miljøundersøkelser i Bergsfjorden, Senja 2018. NIVA-rapport 7292-2018, 80s

TA-2229/2007. Statens forurensingstilsyn. Veileder for klassifisering av miljøgifter i vann og sediment. ISBN 978-82-7655-537-0.

Trannum, H.C. & Vögele, B., 2001. Miljøundersøkelser i Stjernesundet, Finnmark, 2000, i forbindelse med utslipp av gruveavgang. *Akvaplan-niva Report* 411.2031, 38 pp.

Trannum, H.C., Gundersen, H., Escudero-Oñate, C., Johansen, J.T., Schaanning, M.T., 2018. Effects of submarine mine tailings on macrobenthic community structure and ecosystem processes. *Science of the Total Environment* 630: 189-202. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.207>

Trannum, H.C., Borgersen, G., Oug, E., Glette, T., Brooks, L., Ramirez-Llodra, E., 2019. Epifaunal and infaunal responses to submarine mine tailings in a Norwegian fjord. *Marine Pollution Bulletin* 149 110560, ISSN 0025-326X, <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110560>

Trannum, H.C., Næss, R., Gundersen, H. Macrofaunal colonization of mine tailings impacted sediments. *In press* in *Science of the Total Environment*

Veileder 2:2018. Klassifisering. Direktoratgruppen vanndirektivet 2018.

Webb M., Ruber H., Leduc G., 1976. The toxicity of various mining flotation reagents to rainbow trout (*Salmo gairdneri*). *Water Research*, 10-4, 303-306.

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