

Langtidsvirkninger av utslipp til sjø fra petroleumsvirksomheten

Resultater fra ti års forskning

Program
Havet og kysten



Langtidsvirkninger av utslipp til sjø fra petroleumsvirksomheten

Resultater fra ti års forskning

Delprogram i Havet og kysten, PROOFNY
og avsluttet forskningsprogram PROOF

© Norges forskningsråd 2012

Norges forskningsråd
Postboks 2700 St. Hanshaugen
0131 OSLO
Telefon: 22 03 70 00
Telefaks: 22 03 70 01
bibliotek@forskningsradet.no
www.forskningsradet.no/

Publikasjonen kan bestilles via internett:
www.forskningsradet.no/publikasjoner

eller grønt nummer telefaks: 800 83 001

Grafisk design omslag: Jentestreker AS
Foto/ill. omslagsside: Vidar Vassvik (profilbilde),
Kristin Stand By og Shutterstock

Oslo, februar 2012

ISBN 978-82-12-03027-5 (pdf)

Innhold

1. Innledning.....	7
2. Utslipp av produsert vann	8
2.1 Hva er produsert vann?.....	8
2.2 Måling av produsertvann-komponenter i vann og organismer	9
2.3 Biologiske effekter av produsert vann	10
3. Utslipp fra borevirksomheten.....	13
3.1 Utslippsbeskrivelse.....	13
3.2. Miljøvirkninger av dagens vannbaserte utslipp	15
3.3. Kaksutslipp på dypt vann	17
3.4. Miljøvirkninger fra gamle kakshauger	18
4. Utslipp av olje	19
5. Effekter av utslipp fra petroleumsindustrien i Arktis.....	19
5.1 innledning.....	19
5.2. Betydning av temperatur	20
5.3. Betydning av lys.....	20
5.4. Følsomhet hos arktiske nøkkelarter	21
5.5. Effekter av boreutslipp i Arktis	21
5.6. Vil virkningene av utslipp i Arktis være annerledes enn lenger sør?.....	22
6. Økologiske langtidsvirkninger og risikovurdering	23
7. Konklusjoner	25
7.1. Kunnskapsgevinst, operasjonelle utslipp	25
7.2 Kunnskapsgevinst, effekter i Arktis	27
8. Referanser.....	28
9. Oversikt over prosjekter under PROOF og PROOFNY	35

Forord

Utslipp av produsert vann er den kilden som tilfører størst andel olje til havet i tillegg til å tilføre en rekke andre kjemikalier. Ti års forskning på langtidseffekter av utslipp til sjø fra petroleumsvirksomheten viser at komponenter i produsert vann kan ha en rekke negative effekter for helsetilstanden, funksjonene og reproduksjonen hos fisk og virvelløse dyr. Hovedinntrykket er likevel at risikoen for langsiktig miljøskade av utslippene er moderate.

Forskningen i de presenterte prosjektene har bidratt til bedre modellverktøy for miljøovervåking. På norsk sokkel har overvåkingen minsket bekymringen for tidligere tiders deponering av oljeforurenset avfall (borekaks) på sjøbunnen rundt installasjonene. Eksperimenter har vist at kakset som slippes ut i dag er renere, men at dette likevel kan gi alvorlige effekter for eksponerte organismer.

Økosystemet i Barentshavet skiller seg fra områdene lenger sør på sokkelen. Det er lavere temperatur, andre lysforhold og is. Kunnskapen om hvordan utslipp fra petroleumsvirksomheten påvirker arktiske marine organismer er styrket. Forskningsresultater viser små forskjeller mellom arktiske og tempererte marine organismers følsomhet for oljerelatert forurensning. Men samtidig er det viktig å være oppmerksom på at faktorer som utslippsforhold, klima, økologisk sesongvariasjon og fordeling av bestander i tid og rom også kan ha betydning for om det arktiske økosystemet reagerer på utslipp på samme måte som tempererte økosystemer.

Det siste av fire temaer som rapporten tar for seg, er forskningen på effekter av boreutslipp.

Målet med programmet "Langtidsvirkninger av utslipp til sjø fra petroleumsvirksomheten» er å framskaffe økt kunnskap om langtidseffekter av offshorevirksomhetens utslipp. Kunnskapen er nødvendig for at myndighetene skal kunne styre utviklingen i olje- og gassvirksomheten og samordne utnyttelsen av ressursene. Et vesentlig moment er at den samlede påvirkningen av havmiljøet ikke får alvorlige konsekvenser for marine organismer. Denne rapporten vil være et viktig bidrag for å forstå hvilken påvirkning offshorevirksomheten har på havmiljøet og unngå vesentlige negative effekter.

Forskningsprogrammet "Langtidsvirkninger av utslipp til sjø fra petroleumsvirksomheten (PROOF)" ble satt i gang høsten 2002, og er blitt videreført som et eget delprogram PROOFNY i *Havet og kysten*. Delprogrammet finansieres av OLF, Olje- og energidepartementet og Miljøverndepartementet.

Rapporten er utarbeidet for Forskningsrådet av Torgeir Bakke, Norsk institutt for vannforskning (NIVA), Jarle Klungesøyr, Havforskningsinstituttet (HI) og Steinar Sanni, International Research Institute of Stavanger AS (IRIS).

Oslo, februar 2012

Fridtjof Unander,
direktør
Divisjon for energi, ressurser og miljø

Sammendrag

Hovedmålet med PROOF og PROOFNY har vært å avklare om operasjonelle og utilsiktede utslipp fra petroleumsvirksomheten gir langsiktige, negative effekter på det marine økosystemet. Programmet har fram til 2011 omfattet 65 prosjekter og resultert i rundt 110 publikasjoner og rapporter. Utslipp av produsert vann skaper størst bekymring fordi det er den kilden som gir størst tilførsel av olje og en rekke andre kjemikalier til havet. PROOFNY har vist at komponenter i produsert vann kan forårsake en rekke negative effekter som har konsekvenser for helsetilstand, funksjon og reproduksjon i enkeltindivider av fisk og virvelløse dyr. Det er lagt spesiell vekt på å studere mulige endokrine effekter, men også andre effekttyper som genskader, oksidativt stress, vekst og reproduksjon har vært undersøkt. Programmet har utviklet nye og forbedrede metoder for å måle biologiske responser. En fortsatt utfordring er at den økologiske betydningen av disse responsene forblir uavklart så lenge de i liten grad kan kobles til konsekvenser for bestander og samfunn.

Molekylærbiologiske mønstre av f.eks. gener, proteiner og andre livsviktige stoffgrupper har potensiale til å kunne belyse slik kobling, men metodeutviklingen er fortsatt i sin begynnelse. Hovedinntrykket fra PROOFNY er likevel at risikoen for langsiktig miljøskade av utslippene er moderat.

PROOFNY har bidratt til utvikling av bedre modellverktøy for å koble sammen følsomhet på biomarkørnivå og artsnivå og for å koble effekter på enkeltarter til bestander og samfunn. Disse arbeidene er langt fra fullført. Slike modeller er nyttige, men gir uansett bare en kobling mellom årsak og virkning basert på sannsynligheter og gjennomsnittsførhold. Den store utfordringen er å bedømme hvor godt modellene beskriver den virkelige verden, og hvorvidt avvikene fra de registrerte sammenhengene er så store, hyppige og tilfeldige at de overskygger modellkonklusjonene.

Miljøovervåkingen på norsk sokkel har redusert bekymringen for skadeeffekter av tidligere tiders deponering av oljeforurenset avfall (borekaks) fra borevirksomheten på sjøbunnen rundt installasjonene. Det er funnet skade på hyse som kan knyttes til utslipp nær eldre oljefelter i Nordsjøen, men det er ikke klart om dette skyldes kontakt med borekaks eller produsert vann. Eksperiment under PROOFNY har vist at det mye renere kakset som i dag slippes ut, også kan gi effekter som er alvorlige for de individene som blir eksponert, men forsøkene har også sannsynliggjort at effektene er begrenset i tid og rom. Dette samsvarer med erfaringen fra miljøovervåkingen. Risikoen for svake, langsiktige effekter av dagens kaksutslipp kan likevel ikke elimineres helt. Det er stort behov for kunnskap om effekter av kaksutslipp på korallrev og svampsamfunn i kaldere farvann og på dypere vann. Dette er tema i noen av de senere prosjektene i PROOFNY, men få resultater er rapportert til nå. Det er vist at dypvannskoraller til en viss grad kan motstå nedslamming, det være seg fra naturlige mineralpartikler eller borekaks. Vi vet i praksis ingenting ennå om effekter på svamp.

PROOFNY har styrket vår kunnskap om hvordan utslipp fra petroleumsindustrien påvirker arktiske marine organismer. Det er påvist forskjeller i sårbarhet for utslipp mellom arktiske og tempererte arter, men forskjellene er små og går i begge retninger. Det er ikke noe som tyder på at arktiske organismer er mer sårbare enn lignende organismer ellers på sokkelen. Enkeltarters sårbarhet er midlertid bare en av faktorene som bestemmer om det arktiske økosystemet reagerer på utslippene på samme måte som tempererte økosystemer. Sårbarhet kan overskygges av faktorer som utslippsforhold, klima, økologisk sesongvariasjon, og fordeling av bestander i tid og rom. Det er et sterkt behov for forskning som kan belyse hvilken betydning disse faktorene har for total økologisk sårbarhet overfor olje og andre utslipp fra petroleumsvirksomhet i Arktis.

Det er fortsatt stor usikkerhet forbundet med hvorvidt effekter på individer og samfunn i nærområdet for et utslipp har ringvirkning på større områder, populasjoner og samfunn. I prinsippet vil man aldri kunne fastslå, bare sannsynliggjøre, at langsiktige, økologiske effekter ikke vil forekomme. Bedre kunnskap om individeffekter er neppe tilstrekkelig for å forutsi effekter på høyere nivå, siden konsekvenser for bestander og samfunn sannsynligvis i langt større grad styres av sesong, populasjoners forekomst i tid og rom og oseanografiske faktorer, enn av helsetilstand hos de individene som blir eksponert. Betydningen av slike storskala-faktorer er bare i liten grad studert, men selv om betydningen blir bedre kjent, vil muligheten for å forutsi konsekvenser av et utslipp også være betinget av forutsigbare variasjoner.

1. Innledning

”Langtidsvirkninger av utslipp til sjø fra petroleumsvirksomheten” er et delprogram under Norges forskningsråds program Havet og kysten. Delprogrammet ble startet opp som eget forskningsprogram i 2002 (PROOF), og er blitt videreført som delprogrammet Havet og kysten – PROOFNY. PROOF og PROOFNY (heretter kalt PROOFNY) finansieres av Oljeprodusentenes landsforening (OLF), Olje- og energidepartementet og Miljøverndepartementet.

Målet med PROOFNY er å fremskaffe økt kunnskap om hvordan utslipp fra petroleumsvirksomheten kan påvirke havmiljøet på lang sikt. Med dette menes virkninger som spenner over mer enn en generasjon, eller som fører til langsiktig negativ endring av samfunn og økosystem. En gjennomgående utfordring har vært å studere koblingen fra effekter på enkeltindivider til effekter på bestander og økosystem. PROOFNY har prioritert følgende problemstillinger:

- Langsiktige virkninger av operasjonelle utslipp fra produksjon og boring.
- Arktiske organismers følsomhet for utslipp av olje og kjemikalier fra petroleumsindustrien med spesiell vekt på isdekkede farvann.
- Utvikling av nye og forbedrete metoder for miljøovervåking og tidlig varslings om effekter.
- Virkninger av akutte utslipp av olje med spesiell vekt på vannsøylen, strandsonen og isfylte farvann.

PROOFNY har fram til 2011 omfattet 65 prosjekter og resultert i rundt 110 publikasjoner og rapporter. Hovedtyngden av prosjektene har omhandlet operasjonelle utslipp, først og fremst av produsert vann. Overvåking og undersøkelser har vist at slike utslipp meget raskt fortynnes til konsentrasjoner som er under grensen for biologiske effekter. Det har derfor vært et mål å utvikle metoder som kan påvise og kvantifisere utslippsstoffer i lave konsentrasjoner i vann og organismer og metoder for å påvise mulige effekter av slike konsentrasjoner.

Studier av effekter fra borevirksomheten har dekket virkninger av dagens utslippspraksis på økologi og organismer i vann og sediment og den betydning avfallsdeponier på sjøbunnen fra tidligere tiders boreutslipp har hatt.

Med utvidelsen av petroleumsutvinning nordover er det behov for mer kunnskap om hvordan utslipp fra petroleumsindustrien vil kunne påvirke det marine økosystemet i Arktis. Dette er et viktig tema i PROOFNY. Prosjektene tar for seg omdanning, nedbrytning og endring i

toksisitet av olje ved lave temperaturer og ser på hvordan arters sårbarhet for olje og andre utslipp er under arktiske forhold. Det har også vært viktig å bedømme gyldigheten av å bruke eksisterende viten fra tempererte områder på arktiske forhold.

Forskningsrådet har fått utarbeidet en vitenskapelig samleartikkel som beskriver resultatene framkommet i PROOFNY og evaluerer disse i forhold til programmets målsetning (Bakke et al. 2011 *submitted*). Den er basert på de vitenskapelige artiklene og rapportene som til nå er produsert og på statusrapporter levert til Forskningsrådet. Forskningsrådet har også sett behov for en populærvitenskapelig sammenfatning av programmets mangfold og resultater. Denne rapporten søker å dekke en slik framstilling.

2. Utslipp av produsert vann

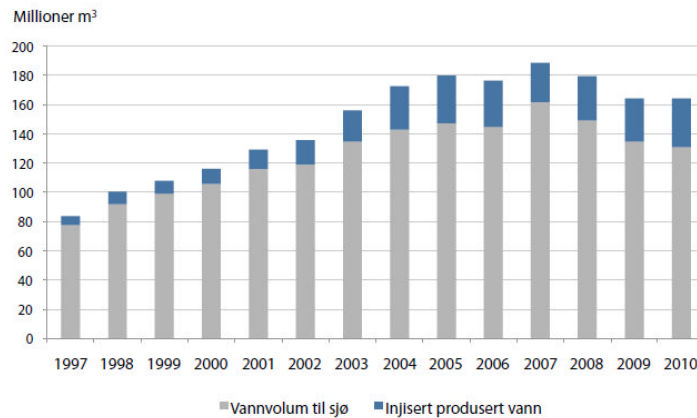
2.1 Hva er produsert vann?

Produsert vann er vann som følger med olje og gass fra reservoaret. Det består både av naturlig vann fra formasjonene og vann som er injisert for å øke utvinningen. Produsert vann er komplekst og kan inneholde flere tusen ulike enkeltforbindelser. Typisk inneholder det dispergert olje, mono- og polysykliske aromatiske hydrokarboner (PAH), alkylfenoler (AP), tungmetaller, naturlig radioaktivt materiale (NORM), organisk stoff, organiske syrer, uorganiske salter, mineralpartikler, svovel og sulfider. I tillegg vil injeksjonsvann som følger med kunne inneholde ulike kjemikalier som er tilsatt for eksempel for å forhindre bakterievekst, korrosjon og emulsjonsdannelse, stimulere flokkulering og binde oksygen. Neff et al. (2011) gir en god beskrivelse av typisk sammensetning av produsert vann. Mengde og sammensetning av produsert vann kan variere mye fra felt til felt og over feltets levetid. En rekke av stoffene er i større eller mindre grad toksiske. OSPAR-kommisjonen og norske myndigheter setter krav til bruk av miljøvennlige tilsatskjemikalier (PLONOR, «gule» og «grønne» kjemikalier), men eksakte utslippsgrenser er bare satt for innhold av olje (< 30 mg/l).

Samlet utslipp av produsert vann på norsk sokkel nådde sin foreløpige topp rundt 2007 og var i 2011 på 131 millioner m³ (OLF 2011 og Figur 1). Vannproduksjon og utslipp forventes i følge Oljedirektoratets prognoser (Fakta 2011) å stige frem mot 2015.

Nivåer og effekter av produsert vann har vært overvåket på utvalgte felter de siste 10-15 årene (Sundt et al. 2008, Brooks et al. 2009). PROOFNY har gjennom flere prosjekter bidratt til

utvikling av metoder som er innarbeidet i overvåkingen. Overvåkingen har så langt vist at effektene er begrenset til innenfor ca. 1-2 km fra utslippene (Brooks et al. 2011).



Figur 1. Utslipp og injeksjon av produsert vann på norsk sokkel 1997 – 2010 (Kilde: OLF 2011).

2.2 Måling av produsertvann-komponenter i vann og organismer

For å kunne bestemme innholdet av kjemiske stoffer i rimelig god detalj kreves det bruk av avanserte kjemiske analysemetoder. PAH og alkylfenoler har hatt størst oppmerksomhet både på grunn av forekomst og stoffgruppens toksiske virkninger. Produsert vann fortynnes raskt etter utslipp slik at nivåene av PAH og alkylfenoler gjerne går fra ng/l til pg/l i sjøvannet. Det er utviklet metoder ved bruk av passive prøvetakere (SPMD, POCIS) som absorberer og anriker stoffer fra vannmassene over tid til nivåer som det er mulig å måle (Boitsov et al. 2004, 2007, Harman et al. 2008a, b, 2009, 2010, 2011). Viktige konklusjoner fra disse prosjektene er at man må bruke ulike typer passive prøvetakere for henholdsvis upolare stoffer som for eksempel PAH og polare stoffer som for eksempel alkylfenoler.

Gjennom årene er det utviklet mange metoder for analyse av PAH i biologisk materiale. Metodene, som ofte gjør bruk av kromatografi (GC/MS eller HPLC), er selektive og sensitive nok til å beregne innholdet av enkeltkomponenter i f. eks. muskel og lever hos fisk. I PROOFNY er det utviklet en metode for måling av alkylfenoler i biologisk materiale, som omfatter ekstraksjon med diklormetan, fjerning av fett i ekstraktene, derivatisering og analyse på GC/MS (Meier et al. 2005). Metoden muliggjør svært følsomme målinger av de meta- og para-substituerte alkylfenolene, men egner seg mindre for de orto-substituerte (se for eksempel Boitsov et al. 2007).

Fisk har stor evne til å bryte ned og skille ut stoffer som PAH og alkylfenoler, men nedbrytningsprodukter av stoffene kan påvises i gallevæske. Under PROOFNY er GC/MS-baserte metoder for å analysere gallemetabolitter videreutviklet slik at det nå er mulig å påvise metabolitter av PAH og alkylfenoler også i villfisk (Jonsson et al. 2008a, b, Brooks et al. 2009, Harman et al. 2009a, Sundt et al. 2009a, b). Metodene har vært benyttet både i eksperimentelle studier og i overvåkning rundt oljeinstallasjonene.

Et par alternative metoder til avanserte og dyre kjemiske analyser av gallemetabolitter er blitt testet ut. Prinsippet er å lage elektrokjemiske sensorer som kan måle PAH-metabolitter med affinitet til et belegg av DNA (Lucarelli et al. 2003, Bagni et al. 2005). En tilsvarende elektrokjemisk sensor for registrering av alkylfenol-metabolitter er også under utvikling (Bulukin et al. 2006). Målet er å kunne bruke slike metoder til en hurtig og billig test som viser om prøver inneholder metabolitter av PAH og alkylfenoler. En del metodiske utfordringer er ennå ikke løst når det gjelder selektivitet og følsomhet.

Flere studier er gjennomført for å se hva som bestemmer opptak, omsetning og utskillelse av stoffer fra produsert vann i fisk. Det er gjort forsøk med stoffer gitt både via sjøvann og føde. Det er funnet god sammenheng mellom nivå av PAH og alkylfenoler i sjøvann, stoffenes fettløselighet, og nivåene av gallemetabolitter i torsk (Grung et al. 2009). Sammenhengen var mindre tydelige for flyktige forbindelser og for PAH og alkylfenoler i føde. I et forsøk med radioaktivt merkede alkylfenoler ble det funnet at oppkonsentreringen i galle var ti ganger høyere når alkylfenolene forekom i vann enn i føde (Sundt et al. 2009a). Flere studier har vist at alkylfenoler lett tas opp av fisk, men også at de skilles ut via galle i løpet av timer eller noen få dager. Voksen fisk skiller ut PAH effektivt gjennom galle i løpet av dager til uker. Egg, larver og yngel av torsk tar også effektivt opp alkylfenoler i produsert vann (Meier et al. 2010). Det har vist seg at de tidligste livsstadiene (egg og larver) har mindre kapasitet til å metabolisere og skille ut de kortkjedete alkylfenolene enn juvenil og voksen fisk.

2.3 Biologiske effekter av produsert vann

Det har knyttet seg størst bekymring til effekter på formeringsevne hos fisk, og særlig av alkylfenoler. Det er påvist at alkylfenoler kan ha østrogenliknende effekter på fisk, som igjen kan gi seg utslag i forstyrrelse av gonadeutvikling og produksjon av egg og sperm. Enkelte PROOFNY-prosjekter har lagt vekt på denne type effekter. Tollefsen et al. (2007) og Tollefsen og Nilsen (2008) fant for regnbueørret ut at alkylfenoler bandt seg effektivt til proteiner som normalt binder steroider og at både alkylfenoler og andre stoffer i produsert

vann derfor kanskje hadde kjønnsormon-hermende virkning selv ned mot realistiske konsentrasjoner i sjøvannet. Tollefsen et al. (2011) viste at komplekse blandinger av oljerelaterte stoffer påvirket formeringsfysiologien hos torsk, mens typiske helseindikatorer som kondisjonsindeks og relativ gonade- og levervekt ikke ble påvirket. Flere andre undersøkelser støtter disse resultatene, og viser at stoffer i produsert vann kan forstyrre kjønnsutvikling og reproduksjon hos fisk (Meier 2007, Tollefsen et al. 2007, Thomas et al. 2009, Meier et al. 2011, Sundt & Bjorkblom 2011). De konsentrasjonene som har gitt effekter finnes normalt bare i vannmasser nærmere enn et par km fra utslippene. Meier et al. (2010) konkluderte med at vidtrekkende og langvarige reproduksjonseffekter av produsert vann på fisk er lite sannsynlig.

PROOFNY har påvist at produsert vann også kan ha en rekke andre effekter. Torsk som fikk fôr med alkylfenoler viste klare tegn på oksidativ stress etter en uke (Hasselberg et al. 2004a, b). Det var også tegn til at alkylfenoler hemmet CYP1A- og CYP3A-enzymaktivitet i hanfisk etter fire uker. Dette enzymsystemet er fiskens førstelinjeforsvar mot fremmedstoffer. I andre prosjekter er det funnet at produsert vann også kan stimulere den samme enzymaktiviteten hos torsk (bl.a. Abrahamson 2008, Meier et al. 2010, Jonsson & Björkblom 2011, Sundt et al. 2011). Dette at stoffer i produsert vann både kan hemme og stimulere samme enzymsystem gjør det vanskelig å tolke responser man finner i miljøovervåkingen av produsert vann. Oksidativt stress og celledød er funnet i forsøk med leverceller fra regnbueørret eksponert for vannløst fraksjon og oljedråper fra 10 ulike typer produsert vann (Farmen et al. 2010). Nivåene som skulle til for å forårsake oksidativt stress var imidlertid flere størrelsesordener høyere enn det som er typisk i sjøen rundt utslipp. Tollefsen et al. (2008) konkluderte med at levercelledød hos regnbueørret grunnet alkylfenoler sannsynlig skyldtes påvirkning på cellenes stoffskifte. Holth et al. (2010, 2011) fant at langtidseksponering av torsk til en etterlikning av produsert vann med fenol, alkylfenoler og PAH førte til endring i gener som styrer detoksifisering, immunforsvar, cellers selvdestruksjon (apoptose) og oksidativt stress. Verken overlevelse eller generelle helseparametre som kondisjonsindeks, relativ gonade- og levervekt og hematokrit ble påvirket. Meier et al. (2010) fant at nyklekkede torskelarver eksponert til 0,1 og 1 % produsert vann døde ved at de mistet evnen til å ta til seg føde. Genskader i form av økning i DNA-addukter og forekomst av mikronuclei er påvist i eksperimenter med torsk eksponert for olje og alkylfenoler (Holth et al. 2009) og i frittlevende hyse fra Tampen-området i Nordsjøen, der det er svært høy petroleumsaktivitet (Grøsvik et al. 2010, Balk et al. 2011). Alkylfenoler i føde har også vist seg å øke andelen mettede fettsyrer

og redusere andelen flerumettede fettsyrer i lever hos torsk (Meier et al. 2007). Grøsvik et al. (*upublisert*) fant tilsvarende endring i fettsyresammensetning i villfanget hyse fra Tampen.

PROOFNY har dokumentert effekter av PAH og andre oljekomponenter som er vanlige i produsert vann også på virvelløse dyr. Baussant et al. (2011) bekreftet tidligere funn av Lowe and Pipe (1987) om at dispergert olje kan forhindre eggutvikling hos blåskjell og faktisk medføre at eggene brytes ned for andre metabolske formål. Baussant et al. (2011) fant at olje også forårsaket DNA-skade hos blåskjellarvene etter klekking.

Prosjektene under PROOFNY har altså vist at produsert vann kan forårsake en rekke ulike effekter i fisk og andre marine dyr. Flere av effektene er naturlige reaksjoner på kjemisk stress, og bør ikke gi negative effekter så lenge kapasiteten for å motstå slikt stress ikke overskrides. Andre effekter viser mer fundamental biologisk forandring, som celledød, genforandringer, DNA-skade, endret fettsyresammensetning og forstyrret reproduksjon. Et fellestrekk for alle undersøkelsene er at effektene er påvist ved en fortykning av produsert vann på 0,1 – 1 % eller høyere. Dette er en fortykning som oppnås svært nær utslippskilden. Tilgjengelige måleresultater fra felt har som oftest også gitt indikasjoner på at effektene er lokale. Det er også påvist effekter i hyse fra Tampen-området fanget i større avstand fra utslippene, men dette er mest sannsynlig vedvarende effekter av lokal eksponering, ikke effekter av lav eksponering i et større område.

Et viktig mål med PROOFNY har vært å øke forståelsen av mekanismene bak de påviste effektene. Dette har motivert undersøkelser av såkalte «omics»-responser, dvs. hvordan hele mønsteret av viktige stoffgrupper i celler og vev blir påvirket. Dette kan være gener (genom), RNA (transcriptom), proteiner (proteom) eller totalt innhold av bestemte metabolitter (metabolom). Utviklingen av «omics»-metoder er fortsatt i sin begynnelse og det er liten erfaring med å tolke mønstrene, men det er forventet at denne type kartlegging vil kunne øke forståelsen av virkningsmekanismer på individnivå, og lede til identifikasjon av «signal»-molekyler eller molekylmønstre som både er sensitive og regulerer viktige biologiske funksjoner. På denne måten har «omics»-mønstre et klart potensiale i effektovervåking av naturlige organismer rundt utslippene. Prosjekter under PROOFNY (Bohne-Kjersem et al. 2009, 2010, Karlsen et al. 2011, Nilsen et al. 2011a, b) har vist at råolje, «kunstig» produsert vann og alkylfenoler kan gi klare endringer i proteinprofil i egg, larver og juveniler av torsk. Dette er proteiner som regulerer immunsystem, fertilitet, ben- og muskelutvikling, øyeutvikling, fettsyreomsetning, cellemobilitet, apoptose og andre vitale funksjoner. I et pågående prosjekt (Karlsen et al. 2011) tas det sikte på å øke forståelsen for genomresponser

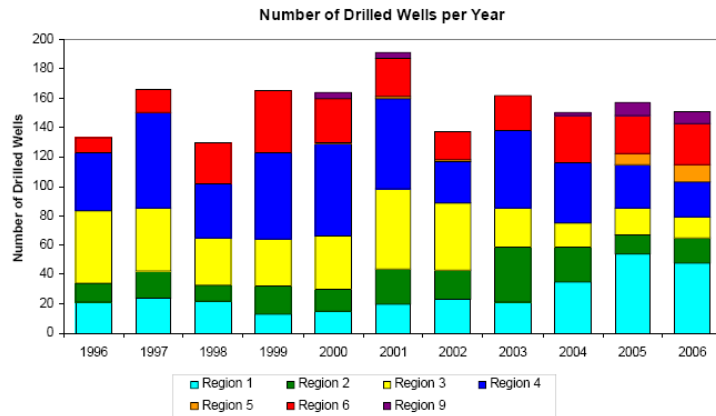
hos torsk til produsert vann ved å koble data fra proteom- og transkriptomanalyser til et pågående arbeid med gensekvensering for torsk (www.codgenome.no).

For å forstå hvordan produsert vann kan påvirke det pelagiske produksjonssystemet er det viktig å kjenne til virkningene på zooplankton. Metodene som er brukt for å studere dette har hittil vært upålitelige. Flere PROOFNY-prosjekter har studert gentranskripsjon og andre molekylære responser i raudåte og en nærstående art hoppekreps i forsøksopplegg som dekker flere generasjoner (Hansen et al. 2007, 2008a, b, 2009, 2010, 2011). De har funnet at dispergert olje, PAH-forbindelsen naftalen og kobber kan modifisere gener involvert i prosesser som næringsopptak, skallskifte, lagring og omsetning av fett, protein- og aminosyremetabolisme, i tillegg til forsvarssystemer mot toksisitet og oksidativt stress. Metoden har derfor et klart potensiale i effektovervåkingen rundt utslipp av produsert vann.

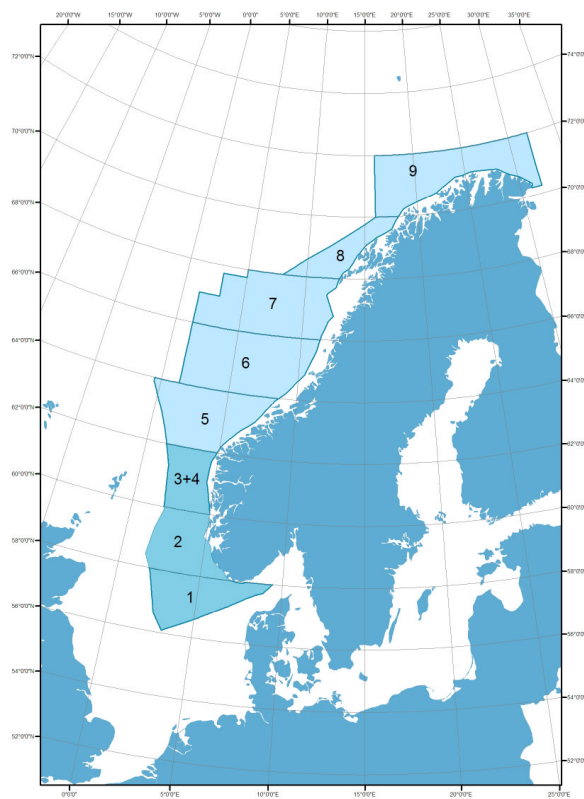
3. Utslipp fra borevirksomheten

3.1 Utslippsbeskrivelse

De største operasjonelle utslippene fra petroleumsvirksomheten i tillegg til produsert vann er utslipp fra brønnboring. Disse utslippene består av knust masse fra borehullet (borekaks) sammen med kjemikalier brukt under boring. Boring skjer med konstant tilførsel av borevæske (boreslam). Denne har som funksjon å smøre borekronen, stabilisere brønntrykket og brønnveggene og transportere borekaks opp fra borehullet. Hovedbestanddelene er en basevæske, enten vann eller olje, og et vektstoff, oftest barytt (bariumsulfat). Vektstoffene kan inneholde spor av ulike tungmetaller. I tillegg tilsettes en lang rekke kjemikalier for å oppnå de ønskede tekniske egenskapene i borevæsken. I perioden 1996-2006 ble det i gjennomsnitt boret ca. 125 brønner pr. år på norsk sokkel (Figur 2). Typisk mengde kaks produsert ved en brønnboring er ca. 1000 tonn, noe mindre etter år 2000.



Figur 2. Lete- og produksjonsbrønner boret i ulike regioner (se Figur 3) på norsk sokkel 1996-2006 (DNV 2007).



Figur 3. Inndeling av norsk sokkel i regioner for miljøovervåking.

Fram til 1993 ble det sluppet ut betydelige mengder borekaks med rester av både vannbasert og oljebasert boreslam, og utslipp av oljeholdig kaks var den viktigste kilden til operative oljeutslipp fra petroleumsvirksomheten. Fra 1993 ble utslipp av kaks med mer enn 1 % oljeinnhold forbudt av hensyn til miljøet. I en periode ble oljebasert basevæske erstattet av organiske væsker som estere, etere og olefiner, men operasjonelle utslipp av kaks med vedheng av olje eller syntetiske basevæsker opphørte rundt 2005. I dag skjer det i praksis bare

operative utslipp av kaks fra boring med vannbasert borevæske. All kaks med oljeinnhold over 1 vektprosent må enten reinjiseres eller tas til land for behandling. De store utlippene av oljebasert kaks på 80- og 90-tallet har imidlertid resultert i betydelige deponier av forurenset borekaks som har samlet seg under og rundt plattformene. De største kaksdeponiene har en høyde på over 25 m, et volum på ca. 45 000 m³ og dekker et bunnareal på over 20 000 m². Miljøovervåking av sjøbunnen rundt disse deponiene har vist at reduksjon av olje i sedimentet og restitusjon av bunnfaunaen har vært rask etter at utlippene i seg selv ikke lenger inneholder olje, selv om de gamle, forurensete kaksdeponiene fortsatt eksisterer. I dag er det sjelden å finne faunapåvirkning lengre ute enn 500 meter fra installasjonene.

3.2. Miljøvirkninger av dagens vannbaserte utslipp

Overvåkingen har altså vist en klar miljøforbedring på norsk sokkel etter at det bare ble tillatt å slippe ut kaks fra vannbasert boring. Utlippene av kaks med vannbasert borevæske er imidlertid store og vedvarende. Borevæsken tilsettes også en rekke stoffer for å fungere tilfredsstillende. Dette kan f.eks. være for å endre viskositet, forhindre avleiringer eller tap av borevæske til berggrunnen og for smøring av borestreng og borehode. Selv om tilsetningsstoffene primært er «grønne og gule» kjemikalier som i utgangspunktet ikke har i-boende miljøfarlige egenskaper, og selv om miljøovervåkingen ikke har påvist effekter av vannbasert kaks på bunnfauna utenfor en avstand av 250 meter fra boreinstallasjonene, er det fortsatt usikkert hvorvidt utlippene kan gi uønskede effekter over lang tid. En rekke PROOFNY-prosjekter har hatt som mål å kartlegge effekter av dagens vannbaserte borevæske og kaks basert på kontrollerte eksperimenter. Schaanning et al. (2008) og Trannum et al. (2010) lot kaks fra vannbasert boring sedimentere i millimetertynne lag på ”naturlige” sedimentsamfunn tatt inn i laboratoriet (mesocosmer). De fant at tilsetningen økte forbruket av oksygen og nitrat i sedimentene, i noen tilfeller vedvarende i mer enn 6 måneder. Dette indikerer at boreslammet inneholdt lett nedbrytbart organisk stoff, mest sannsynlig glykol. De fant også at kakset som la seg på bunnen, reduserte forekomst av enkelte følsomme dyrearter i sedimentet selv om ingen arter forsvant helt. Kakset hadde også en svak innvirkning på rekrutteringen til bunnfaunaen (Trannum et al. 2011). Hovedårsaken til de biologiske effektene syntes å være redusert oksygen fra nedbrytningen, men det var også indikasjoner på at toksisitet kunne spille en rolle. Nedslamming eller form og størrelse på kakspartiklene så ut til å ha liten betydning. Effektene viste seg når kakslaget ble over ca. 10 mm tykt, noe som normalt bare finnes nærmere enn ca. 250 meter fra et utlipp (Trannum 2011). Resultatene gir ikke grunn til å forvente effekter ut over en slik avstand, men forsøkene har ikke dekket

lengre eksponeringstid enn noen få måneder. Forsøkene har heller ikke dekket gjentatt kaksedimentering spredt utover i tid, som vil være det typiske ved produksjonsboring på en installasjon. Man kan derfor ikke utelukke akkumulerende effekter i et større område, men dersom slike effekter skulle være av betydning for faunasammensetning og samfunnsstruktur ville de høyst sannsynlig blitt fanget opp av miljøovervåkingen.

Tidligere undersøkelser har vist at vannbasert borevæske i suspensjon kan gi gjelleskader og påvirke ernæringsfysiologi hos filtrerende muslinger. Disse studiene er fulgt opp gjennom PROOFNY (Bechmann et al. 2006). Suspensjoner av baryttbasert borevæske over 0,5 mg/l ga gjelleskader hos juvenil torsk. Suspensjoner på ca. 40 mg/l førte til redusert kondisjonsfaktor etter tre ukers eksponering. Pussig nok viste torskelarver utsatt for suspensjoner på 1-10 mg/l økt fødeopptak, vekst og overlevelse. En mulig forklaring var at tilstedeværelse av slampartiklene i vannet stimulerte spisereaksjonen hos larvene. De fant også at suspensjoner av vektstoffet barytt stimulerte veksten hos pelagiske larver av blåskjell, mens tilsvarende suspensjon av kaks med barytt ga redusert fødeopptak og vekst. Redusert vekst ble antatt å skje fordi størrelsen på kakspartiklene passet larvene. Dette førte til stort inntak av partikler uten næringsverdi. Baryttpartiklene hadde ikke tilsvarende effekt siden de var for store til å bli spist, men dette forklarer ikke hvorfor veksten faktisk ble stimulert. Suspendert borevæske ned til en konsentrasjon på 0,5 mg/l påvirket en rekke anatomiske, biokjemiske, fysiologiske og genetiske biomarkører hos blåskjell og kamskjell. Påvirkningene var svake, men i stor grad entydige. Tilsvarende påvirkning er også funnet på blåskjell og kamskjell satt i bur ca. 250 meter fra et regulært boreutslipp, og da ved en beregnet gjennomsnittlig konsentrasjon av suspendert borevæske/kaks på 0,15 mg/l (Berland et al. 2006). Dette er noe lavere enn de laveste konsentrasjonene som ga effekter i laboratoriet.

Det er tidligere funnet at tungmetaller i barytt er lite biotilgjengelige (Neff 2008, Pettersen og Hertwich 2008), men Bechmann et al. (2006) påviste at både blåskjell, kamskjell og torsk akkumulerte metaller etter tre ukers eksponering til brukt borevæske i suspensjon. Etter tre uker i rent vann var det fortsatt forhøyde nivåer av bly, krom og kvikksølv, noe som viser at metallene ble tatt opp og ikke bare forekom på partikler i tarmen. Barium var tilbake på normalnivå og har antakelig fulgt partiklene ut gjennom avføring. Hannam et al (poster SETAC) viste at 14 ukers eksponering til 4 mg/l suspendert borevæske førte til akkumulering av metaller og fysiologiske skader hos kamskjell. De biologiske funksjonene var normale etter fire uker i rent vann, mens forhøyet metallinnhold vedvarte. Resultatene tyder på at effektene av borevæsken skyldtes fysisk stress, ikke metalltoksisitet. Disse forsøkene demonstrerer at

tungmetaller i barytt er biotilgjengelige, men sier ikke noe om hvor raskt organismene tar opp metallene. Siden typiske nivåer av naturlig suspendert materiale i Nordsjøen ligger på 0,2 – 0,4 mg/l, er det lite trolig at en tilleggsbelastning av suspenderte partikler på 0,15 mg/l vil ha målbare fysiske effekter på planktonorganismer som driver forbi. Det er enda mindre trolig at fysisk stress vil gi akkumulerende effekter i vannsøylen fordi samme vannmasse neppe blir utsatt for gjentatt tilførsel av kaks. De valgte eksponeringstidene var svært mye lengre enn dette. Det er derfor rimelig å konkludere med at borevæske og kaks i suspensjon etter utslipp bare vil kunne gi lokale og kortvarige effekter på dyr i vannmassene.

Ut fra PROOFNY-resultatene kan man trekke den konklusjonen at vannbasert borevæske og kaks kan gi biologiske effekter både som suspensjon i vannmassene og etter sedimentering. Effektene synes først og fremst å komme av fysisk stress, men også oksygenreduksjon i sedimentet og kjemisk toksisitet kan spille en rolle. De kaks-suspensjonene som har gitt effekter vil normalt bare forekomme i vannet ut til maksimalt 1-2 km fra utslippene, mens tykkelsen på kaks lag som har gitt effekter på bunnfauna normalt er begrenset til områder nærmere enn ca. 250 meter.

3.3. Kaksutslipp på dypt vann

Utvidelse av petroleumsvirksomheten til dypere vann har skapt bekymring for skade på kaldtvannskoraller og svamp og de artsrike samfunnene som disse genererer.

Gruntvannskoraller i varme strøk er sårbare for nedslamming og man er derfor opptatt av om kaksutslipp kan føre til nedslamming og skade på dypvannskorallrev langs sokkelkanten. Problemstillingen er tatt opp i enkelte nylig påbegynte prosjekter under PROOFNY, men resultater foreligger ikke ennå. I et annet prosjekt (Larsson and Purser 2011) ble korallarten *Lophelia pertusa*, som danner dypvannsrevene, utsatt for gjentatt sedimentering av naturlig sjøbunnsediment og vannbasert borekaks. Korallene var i stand til å fjerne en nedslamming på 6 mm, men ikke på 19 mm. Forfatterne konkluderer med at der sedimentet ble liggende på korallen ville vevet under dø. Det var ingen forskjell i effekter mellom tilførsel av borekaks eller naturlig sediment. Resultatene indikerer at *Lophelia* ikke er spesielt følsom for sedimentering av kaks, og dette samsvarer med de mange funn av kaldtvannskoraller på oljeinstallasjoner der det har foregått utslipp av flere typer kaks over mange år.

Miljøovervåking på Morvinfeltet i 2009 og 2010 konkluderte med at strømforhold, men ikke kaksbelastning påvirket atferden hos lokale dypvannskoraller (Buhl-Mortensen et al. 2010).

Vi vet imidlertid ikke noe om toleransen overfor kakssedimentering hos øvrige arter som finnes på de rike dypvannsrevene, og heller ikke noe om sårbarheten hos svamp.

3.4. Miljøvirkninger fra gamle kakshauger

Ved starten av PROOF var det fortsatt stor bekymring for at utlekking og erosjon skulle spre forurensning fra de gamle kakshaugene. Årlig overvåking viste at sedimentene på det verste var forurenset av olje fra borevæske ut til 7 km nedstrøms den gang utslipp av oljeholdig kaks foregikk. Det ble videre funnet effekter på bunnfauna ut til 3-4 km. Det er observert relativt rask kjemisk og biologisk restitusjon etter at disse utlippene ble stoppet i 1993, men de gamle kaksdeponiene vil fortsatt være en kilde til lokal forurensning i mange år.

Under PROOFNY har Leung et al. (2005), Bjorgesæter and Gray (2008) og Bjorgesæter (2009) benyttet data fra mange års miljøovervåking rundt kakshaugene til å generere artsfølsomhetskurver (SSD¹) for bunnfauna overfor barium, kadmium og PAH. De tok utgangspunkt i fysiske, kjemiske og biologiske data fra ca. 1000 faste sedimentstasjoner samlet i en felles database (MOD) som er allment tilgjengelig. Ut fra SSD-kurvene har de beregnet grenseverdier for hvert stoff som beskytter 95 % av alle artene i bunnsamfunnene. Normalt er SSD-kurver generert fra toksisitetstester, og dekker derfor bare det begrensede antall arter som inngår i testene. SSD-kurvene i PROOFNY-prosjektene er basert på følsomheten hos 240 – 615 arter av bunnfauna i sitt naturlige miljø rundt plattformene. De utregnede grenseverdiene for effekter av metaller og PAH er på linje med grenseverdiene som anvendes av oljeindustrien i deres risikobaserte forvaltning av borekjemikalier (ERMS; Altin et al. 2008), men strengere enn den norske miljøkvalitetsstandarden for sedimenter basert på toksisitetstester. Grenseverdien for kadmium var for eksempel 33 ganger strengere og for PAH åtte ganger strengere enn norske nasjonale grenseverdier. Noe av grunnen til en slik systematisk forskjell er at de nasjonale grenseverdiene gjelder for hvert stoff isolert, mens grenseverdiene utledet fra MOD-databasen reflekterer effektene av hvert stoff når alle forurensningsstoffene fra boreutslipp er til stede. Grenseverdiene er derfor strengt tatt bare gyldige for sedimentfaunaen på de feltene som inngår i SSD-kurvene. En foreløpig gjennomgang av nyere sedimentdata fra 14 norske petroleumsinstallasjoner indikerer imidlertid at grenseverdiene også er konservative nok til å beskytte sedimentfaunaen rundt andre installasjoner.

¹ Species sensitivity distributions

4. Utslipp av olje

Flere av prosjektene i PROOFNY har studert omdanning og effekter av olje fra akutte utslipp. Olje inneholder en kompleks og ukjent blanding av komponenter som dels er hydrokarboner, dels hydrokarbonliknende molekyler med innslag av oksygen, nitrogen og svovel. Biologisk nedbrytning bidrar til kompleksiteten ved dannelse av nedbrytningsprodukter. Mange av stoffene er vanskelige å identifisere og kvantifisere siden de ikke kan skilles fra hverandre ved bruk av vanlig gasskromatografi. Kromatogrammene gir bare en stor uoppløst topp (UCM- Unresolved Complex Mixture) som inneholder en masse stoffer. Et PROOFNY- prosjekt (Melbye et al 2009) har utviklet en metode for å splitte UCM-toppen i fraksjoner for deretter å teste hver av fraksjonene for toksisitet. Ved bruk av væskechromatografi (HPLC) fikk man ut 16 fraksjoner av stoffer med gradvis økende polaritet (og vannløselighet). Disse fraksjonene ble analysert kjemisk ved bruk av det siste og mest avanserte innenfor analyseteknikk (GC-FID, GC/MS og GCxGC-ToF-MS). Dette bekreftet at en UCM inneholder flere tusen forbindelser, og at det i praksis er umulig å identifisere alle. Toksitetstester viste et høyt toksisk potensiale i flere av UCM-fraksjonene og høyest i en av de mest polare fraksjonene preget av et stort antall mettede og umettede (dvs. aromatiske) ringformede sulfoksider. Toksitet av fraksjonene var positivt korrelert med mengden materiale i hver fraksjon. At de polare fraksjonene bidro sterkt til toksisiteten i oljen skyldtes derfor at de også var mest vannløselige.

5. Effekter av utslipp fra petroleumsindustrien i Arktis

5.1 innledning

Et viktig tema i PROOFNY har vært hvordan utslipp fra petroleumsindustrien vil kunne påvirke det marine økosystemet i Arktis. Oljeutvinning i den sørvestlige delen av Barentshavet er i gang og det er gjort nye store funn, og ikke minst etter grenseavklaringen med Russland er det blitt mer og mer aktuelt også å tenke på utvinning lenger østover og i den høyarktiske regionen. Økosystemet spesielt nord i Barentshavet skiller seg på flere måter fra områdene lenger sør på sokkelen og det har vært spørsmål om i hvor stor grad erfaringen og kunnskapen vi har om effekter av operasjonelle og utilsiktede utslipp fra

petroleumsvirksomheten i Nordsjøen og Haltenbanken kan brukes for å forutsi mulige effekter under arktiske forhold. Flere av PROOFNY-prosjektene har direkte eller indirekte gitt informasjon som bedrer vår mulighet til å bedømme dette.

5.2. Betydning av temperatur

Skadsheim et al. (2009) sammenliknet hydrokarbonakkumulering, enzymatiske og genotoksiske biomarkører i torsk fra Nordsjøen og Barentshavet ved eksponering til råolje. Torsk fra Nordsjøen ble eksponert for Nordsjøolje ved 10 °C. Torsk fra Barentshavet ble eksponert for olje fra Barentshavet ved 4 °C. Metabolisering av PAH og detoksifiseringsaktivitet (CYP1A) var noe lavere hos Barents-torsken, men i store trekk var responsmønsteret det samme. Johnsson and Bjørkblom (2011) gjorde tilsvarende forsøk med voksne og larver av en rekke fiskearter som finnes i både tempererte og polare områder. Responsmønsteret hos voksen fisk var det samme i alle artene, men varierte noe i intensitet. Nivåene av hydrokarboner som utløste effekter på larvene (1,5 – 5 µg/l målt som PAH) var på linje med det som er funnet i andre undersøkelser, dvs. at følsomheten ikke var systematisk forskjellig under subarktiske kontra tempererte forhold.

Hansen et al. (2011) undersøkte effektene av forvitret råolje på to nærstående arter av hoppekreps, den tempererte *Calanus finnmarchicus* (raudåte) holdt ved 10 °C og den høyarktiske *C. glacialis* ved 2 °C. *C. glacialis* var noe mindre følsom overfor olje enn *C. finnmarchicus*, men forskjellen var liten. Toksisk virkning og økt dødelighet inntrådte litt senere i den høyarktiske arten, og dyr med høyest lipidinnhold overlevde lengst. Bechmann et al. (2010) fant også lavere dødelighet og langsommere vekst hos rekellarver når de ble eksponert for olje fra Barentshavet ved 5 °C enn ved eksponering til Nordsjøolje ved 10 °C. Disse studiene indikerer at følsomheten for olje kan være noe mindre under arktiske forhold og i arktiske organismer enn hos marine organismer lenger sør.

5.3. Betydning av lys

Mange tidligere undersøkelser har vist at lys og spesielt UV-lys både øker nedbrytning og toksisitet av olje på sjøoverflaten. Man kan derfor tenke seg at toksisitet av olje vil være større i Arktis enn lenger sør om sommeren, og lavere om vinteren. Under PROOFNY fant Larsen (2007 *upublisert*) høyere dødelighet hos rekellarver eksponert til UV-behandlet råolje enn til olje som ikke hadde vært utsatt for UV-lys. Rekellarvene befinner seg i de øvre vannlagene om sommeren og lyspåvirkningen vil derfor kunne forsterke virkningene av et oljesøl. UV-

lys ga ingen tilsvarende fototoksisk effekt på torskeyngel i det samme prosjektet, men hos polartorsk økte nivåene av PAH-metabolitter i galle, og evnen til å motstå oksidativt stress ble redusert. Krapp et al. (2009) viste at UV-bestråling tilsvarende det som trenger igjennom havisen om sommeren, reduserte evnen til å motstå oksidativt stress også hos amfipoden *Gammarus wilkitzkii*. Dette er en nøkkelart i det spesielle økosystemet som er på undersiden av havisen langs iskanten i Barentshavet.

5.4. Følsomhet hos arktiske nøkkelarter

Flere prosjekter har studert effekter av olje på *G. wilkitzkii*. Camus & Olsen (2008) påviste misdannelser hos embryoer etter 30 dagers eksponering til løst råolje, men bare ved konsentrasjoner over ca. 10 mg/l sumPAH. Slik eksponering er lite sannsynlig ved et oljeutslipp i havisen. I et tilsvarende forsøk med lavere eksponering (27 µg/l sumPAH) ble det funnet rask akkumulering og langsom utskillelse av PAH i eggbærende hunner (Skadsheim et al. *upublisert*). Dette er forventet siden dyrene har høyt lipidinnhold. Hatlen et al. (2009) viste at 27 µg/l ikke påvirket overlevelse eller skallskifte, men ga økt respirasjon, tegn på oksidativt stress og økt fettoksidasjon. Disse responsene hadde ingen sammenheng med dose. Det er vanskelig å sette eksponeringen inn i en større sammenheng, men sett i forhold til at en allment akseptert effektgrense for kronisk eksponering til olje ligger på 50 µg/l som totalmengde hydrokarboner, er 27 µg/l av PAH-fraksjonen alene en relativt høy belastning. De relativt moderate effektene på *G. wilkitzkii* tyder på at arten ikke er spesielt sårbar for oljeeksponering i forhold til andre arter.

5.5. Effekter av boreutslipp i Arktis

Miljøovervåkingen på norsk sokkel har ikke påvist noen systematisk forskjell i effekter av boreutslipp på bunnfaunasamfunn fra Nordsjøen til det sørøstre Barentshavet (Renaud et al. 2008), men siden det er gjort få undersøkelser etter boring i Barentshavet, er det for tidlig å konkludere at arktisk bunnfauna vil respondere på boreutslipp på samme måten som faunaen lenger sør. Olsen et al. (2007) fant signifikant økning i oksygenforbruk og redusert fauna-biomasse i sedimentkjerner fra Barentshavet etter eksponering til både oljehydrokarboner og vannbasert borekaks. Tilsvarende ble ikke funnet i sedimentkjerner fra Oslofjorden. Det er tidligere funnet tendenser til større effekt av syntetisk borevæske på arktiske sedimentsamfunn enn på samfunn fra Oslofjorden (Schaanning et al. 1997). Man kan likevel ikke konkludere med at effekter av boring vil være sterkere i arktiske enn i tempererte sedimenter ut fra disse forsøkene, siden sammenlikningene er gjort med sedimenter fra

Oslofjorden som er tilpasset forurensningsbelastning. En annen undersøkelse under PROOFNY indikerer imidlertid at forskjeller i følsomhet på samfunnsnivå kanskje kan forventes. Jørgensen et al. (2011) fant at det var en systematisk forskjell i samfunnsstruktur hos sedimentfauna i Nordsjøen og i det østlige Barentshavet. Total artsrikhet var omtrent lik, men bunnområdene i Barentshavet hadde større innslag av arter som lever på sedimentet (epifauna), mens bunnen i Nordsjøen var dominert av arter som lever i sedimentet (infauna). Slike funksjonelle forskjeller på stor skala indikerer at samfunnene også kan ha ulik følsomhet, spesielt overfor suspendert materiale for eksempel fra boreutslipp.

5.6. Vil virkningene av utslipp i Arktis være annerledes enn lenger sør?

Resultatene fra PROOFNY har styrket inntrykket av at det er forskjeller mellom arktiske og tempererte marine organismer og samfunn for følsomhet fra oljerelatert forurensning. De har også vist at forskjellene er små og kan gi utslag begge veier, og gir ikke grunn til å forvente at arktiske organismer i seg selv er mer følsomme for utslipp fra petroleumsindustrien enn organismer fra andre deler av sokkelen. Likevel kan man ikke se bort fra at andre faktorer enn biologisk følsomhet er systematisk så forskjellige at de totale økologiske effektene av utslipp blir forskjellige. PROOFNY-prosjekter har vist at bakteriell nedbrytning av olje foregår helt ned mot frysepunktet, men prosessen går langsommere når vanntemperaturen synker (Brakstad et al. 2004, Brakstad og Bonaunet 2006). Forsøk i felt har også bekreftet at olje som lagres i havis tar lang tid på å brytes ned (Brakstad et al. 2008). Andre storskala-faktorer som kan tenkes å dominere det totale konsekvensbildet, er for eksempel klima, økologisk sesongvariasjon, og fordeling av bestander i tid og rom. Et eksempel er den grunnleggende forskjellen i sedimentfauna mellom Nordsjøen og Barentshavet nevnt i forrige kapittel (Jørgensen et al. 2011). Forhold knyttet til utslippene i seg selv vil også spille inn. Alt dette er faktorer vi kjenner for lite til og som kan være svært uforutsigbare som påpekt av Hjermann et al. (2007). Det er derfor ennå ikke mulig å konkludere om det arktiske marine økosystemet vil være mer eller mindre sårbart for utslipp fra petroleumsindustrien enn økosystem lenger sør på sokkelen.

6. Økologiske langtidsvirkninger og risikovurdering

Økologiske virkninger av utslipp fra borevirksomheten er rimelig godt kartlagt gjennom miljøovervåkingen, iallfall for sokkelområdene i Sør- og Midt-Norge. Resultatene så langt gir også inntrykk av at faunaresponsene til boreutslipp er de samme i det sørlige Barentshavet. PROOFNY har gitt resultater som viser at kaks fra vannbasert boring påvirker, men i liten grad enkeltarter og sedimenter, og dette samsvarer med overvåkingsresultatene. På samme måte har PROOFNY-resultatene gitt sterke indikasjoner på at økologiske effekter av utslipp av produsert vann ikke er sannsynlige, men de skiftende og uforutsigbare fysiske og biologiske forholdene i det pelagiske økosystemet gjør det ekstra vanskelig å kartlegge koblingen mellom påviste individeffekter og eventuelle effekter på bestander og samfunn.

Risikoanalyser synes fortsatt å være det eneste hjelpemiddelet vi har for å bedømme om utslippene fra petroleumsindustrien kan ha økologiske konsekvenser. PROOFNY har bidratt til å etablere enhetlige metoder for risiko- og miljøkonsekvensvurdering. Dette kan bedre vår mulighet til å beskytte miljøet mot eventuell langsiktig påvirkning av utslippene. Et eksempel er en miljørisikoanalyse av alkylfenoler i produsert vann overfor bestander av torsk, hyse og sei i Nordsjøen utført av Beyer et al., (2011 *in press*). Eksponerings- og risikomønstre for fiskeartene ble simulert ut fra tall for utslipp og spredning av produsert vann, bestandsfordelinger, og data om miljøfarlighet for de aktuelle alkylfenolene. Det ble konkludert med at eksponeringen til alkylfenoler fra produsert vann på norsk sokkel er for lav til å forårsake reproduksjonseffekter av betydning på disse bestandene.

En tilnæringsmåte i PROOFNY har vært å bruke risikomodellering til å koble biomarkør-responser både tilbake til kildene og til mulige økologiske konsekvenser. Miljørisikoanalyser anvender i stor grad grenseverdier for effekter (NOEC/LOEC²) for å bedømme skadeomfang i rom og tid. Man kan forvente at grenseverdiene for effekter vil være forskjellig for ulike biologiske egenskaper og på individ-, bestands- og økosystemnivå. Et pågående prosjekt under PROOFNY har som mål å bygge bro mellom følsomhet på biomarkørnivå og artsnivå (Smit et al. 2009). Her er grenseverdier for effekter av oljehydrokarboner etablert på basis av artsfølsomhetskurver (SSD) for biomarkørene gentoksisitet og oksidativt stress hos seks marine arter og tilsvarende kurver for individfunksjoner (vekst, reproduksjon og overlevelse) hos 26 arter. I gjennomsnitt var de utvalgte biomarkørene 35-50 ganger mer sensitive enn individfunksjonene. For eksempel indikerer pilotdataene benyttet av Smit et al. (2009) at en

² No Observed Effects Concentration/Lowest Observed Effects Concentration

vil kunne ha signifikante biomarkørutslag i 8-9 av 10 arter for gentoksisitet og oksidativt stress, samtidig som påvirkning av individfunksjoner ved tilsvarende nivå av oljebasert eksponering bare vil finnes i om lag 1 av 10 arter. Effekter på en biomarkør behøver m.a.o. ikke i seg selv å bety at organismen skades, men vil kunne være et tidlig varsel om effekter som kan bli mer alvorlige etter hvert. Målet nå er å utvide datagrunnlaget for SSD til å omfatte flere arter, spesielt arktiske, og et større typeutvalg av miljøgiftighet (bredere spekter av biomarkører). Tilnærmingen overfor kan bidra til retningslinjer for når biomarkørresponser signaliserer fare for organismene. Neste steg, å vurdere risiko på bestandsnivå på basis av individeffekter, kan ennå bare gjøres ved modellering. Slike modeller er for tiden under utvikling for fisk av Hjermann et al. (2007, *in prep.*), og for krill (*Meganyctiphanes norwegicus*) av Hjermann & Ravagnan (*in prep.*).

Det er altså fortsatt stor usikkerhet forbundet med å avklare hvorvidt effekter på individer og samfunn i nærområdet for et utslipp har ringvirkning på større områder, populasjoner og samfunn, og om virkningene er langsiktige. I prinsippet vil man aldri kunne fastslå at langsiktige, økologiske effekter ikke vil forekomme, i beste fall bare sannsynliggjøre dette under vekten av best tilgjengelige kunnskap. Videre studier på individeffekter vil neppe gi kunnskap til å forutsi effekter på høyere nivå med tilstrekkelig pålitelighet, siden konsekvenser for bestander og samfunn sannsynligvis i langt større grad styres av sesong, populasjoners forekomst i tid og rom og storskala oseanografiske faktorer, enn av helsetilstand hos de individene som blir eksponert. Betydningen av disse faktorene er bare i liten grad kjent og studert, men søkes belyst i en modellbasert tilnærming under PROOFNY (Hjerman et al. 2007, *upublisert*; Hjermann & Ravagnan *in prep.*). Likevel, selv om betydningen av storskala-faktorer blir bedre kjent, vil muligheten til å forutsi konsekvenser av et utslipp være betinget at faktorene også varierer i tid og rom på en forutsigbar måte.

7. Konklusjoner

7.1. Kunnskapsgevinst, operasjonelle utslipp

Hovedmålet med PROOF og PROOFNY har vært å avklare hvorvidt operasjonelle og utilsiktede utslipp fra petroleumsvirksomhetene gir langsiktige, negative effekter på det marine økosystemet, og å forbedre vår evne til å forutsi om slike effekter kan oppstå av fremtidige utslipp. Det har blant annet vært stilt spørsmål til om virksomheten har bidratt til reduksjonen i fiskebestandene i Nordsjøen.

Utslippene av produsert vann har skapt størst bekymring både fordi de er den kilden som har gitt størst tilførsel av olje og en rekke andre kjemikalier til sjøen fra petroleumsvirksomheten, og fordi det er svært vanskelig å kartlegge om utslippene har virkning på det pelagiske økosystemet og fiskebestandene. PROOFNY har vist at komponenter i produsert vann kan forårsake en rekke negative effekter som har konsekvenser for helsetilstand, funksjon og reproduksjon i enkeltindivider av fisk og virvelløse dyr. Det er lagt spesiell vekt på mulige endokrine effekter, men også andre effekttyper som genskader, oksidativt stress, vekst og reproduksjon har vært påvist. Det er også utviklet nye og forbedrede metoder for å måle biologiske responser som både er følsomme og har fundamental betydning for de organismene som blir påvirket. Spesielt synes kartlegging av molekylærbiologiske mønstre av f.eks. gener, proteiner og andre livsviktige stoffgrupper å kunne kombinere følsomhet med høy økologisk relevans. Utvikling av disse metodene er fortsatt i sin begynnelse og det er ikke godt nok avklart hvor nyttige de kan være, blant annet i miljøovervåkingen. Likevel, den økologiske betydningen av utslippene forblir uavklart så lenge de effektene man har klart å måle ikke kan kobles til konsekvenser for bestander og samfunn. Hovedinntrykket fra PROOFNY er imidlertid at potensialet for miljøskade gjennomgående er moderat, og de konsentrasjonene som har gitt effekter forekommer normalt ikke lengre fra utslippspunktene enn i størrelsesorden 1 km. Denne utbredelsen stemmer godt overens både med overvåkingsresultater og gjennomførte risikovurderinger. Det er likevel ikke mulig å utelukke risikoen for at svake virkninger på enkeltarter kan ha akkumulerende økologiske effekter, selv om sannsynligheten for dette er liten.

Risikomodellering er det eneste verktøyet man i dag har for å bedømme hvordan effekter på individer kan slå ut på bestander og samfunn. PROOFNY har bidratt til utvikling av modellverktøy som kan koble sammen følsomhet på biomarkørnivå og artsnivå basert på toksisitetstester. Programmet utvikler også modeller for å koble effekter på enkeltarter til

bestander og samfunn og for å forutsi hvordan effekter på en bestand kan påvirke andre bestander. Disse arbeidene er langt fra fullført, men forventes å gjøre risikoanalyser av effekter fra produsert vann mer pålitelige. Modeller gir likevel bare en kobling mellom årsak og virkning basert på sannsynlighet og gjennomsnittsforhold. Den store utfordringen er å bedømme hvor godt modellene beskriver den virkelige «gjennomsnitts»-verden, og hvorvidt avvikene fra gjennomsnittet er så store, hyppige og tilfeldige at de overskygger modellkonklusjonene.

Miljøovervåkingen på norsk sokkel har redusert bekymringen for skadeeffekter av tidligere tiders utslipp av avfall fra borevirksomheten. Effekter på bunnsedimentene er i det alt vesentlig begrenset til noen få hundre meters avstand fra kaksdeponiene, og intet tyder på at denne utbredelsen vil øke. Hvorvidt oljeforurensset kaks kan påvirke lokal bunnlevende fisk er imidlertid uavklart. Hyse nær de store kaksdeponiene i Nordsjøen viser klare tegn på biologisk skade som kan knyttes til utslippene fra petroleumsvirksomheten, men det er ikke klart om dette skyldes kontakt med sediment og kaks eller eksponering til produsert vann.

Risikoen for langsiktige effekter av vannbasert borevæske er heller ikke avklart.

Eksperimentelle undersøkelser under PROOFNY har vist at slik borevæske kan gi effekter som er alvorlige for de individene som blir eksponert, men de har også sannsynliggjort at effektene er begrenset i tid og rom. Dette samsvarer med erfaringen fra miljøovervåkingen. Likevel har ikke resultatene helt eliminert at de vedvarende utslippene over tid kan gi akkumulerende virkning på bunnsedimentene. Et kjernesporsmål man har ønsket å få belyst er risikoen for effekter av kaksutslipp på korallrev og svampsamfunn på dypere vann. Dette er bare i liten grad dekket under PROOFNY, men er tatt opp i enkelte nylig påbegynte prosjekter. Disse har foreløpig ikke frembragt resultater. Et annet prosjekt indikerer at dypvannskoraller har begrenset evne til å takle nedslamming, men at dette i like stor grad gjaldt sedimentering av naturlige mineralpartikler som borekaks. Hyppig forekomst av koraller med god vekst og som har festet seg på eldre oljeplattformer som har hatt betydelige utslipp av oljeholdig kaks over lang tid, tyder likevel på at selve korallarten tåler slike utslipp godt. Hvorvidt andre arter i korallsamfunnet tåler kakssedimentering er ikke kjent. Prosjektene som studerer effekter av boreutslipp på svamp, har ennå ikke rapportert noen resultater.

7.2 Kunnskapsgevinst, effekter i Arktis

PROOFNY har styrket vår kunnskap om hvordan utslipp fra petroleumsindustrien påvirker arktiske marine organismer. I sammenliknende studier er det påvist forskjeller i sårbarhet mellom arktiske og tempererte arter, både for utslipp av produsert vann og boreavfall. Forskjellene har imidlertid vært små og går i begge retninger. Det er ikke noe i resultatene som tyder på at marine organismer som er viktige i arktiske og sub-arktiske samfunn, er mer sårbare for utslipp enn lignende organismer ellers på sokkelen. Det ser heller ut til at effekt fremkallende prosesser går noe langsommere under sub-arktiske forhold. Dette gjelder også nedbrytningen av olje. Enkeltarters sårbarhet er midlertid bare en faktor som bestemmer om det arktiske økosystemet håndterer utslippene på samme måte som tempererte økosystemer. Storskala-faktorer som klima, økologisk sesongvariasjon, romlig fordeling av bestander og samfunn og utslippsforhold vil etter alt å dømme dominere det totale konsekvensbildet for operasjonelle og utilsiktede utslipp. Det er derfor viktig å studere disse faktorenes betydning nærmere, også for å avklare om det er mulig å koble utslippsmønster, påvirkningsfaktorer og konsekvens på en forutsigbar måte.

8. Referanser

- Abrahamson ABI, Brunstrom B, Sundt RC, Jorgensen EH (2008) Monitoring contaminants from oil production at sea by measuring gill EROD activity in Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Environmental Pollution* 153:169-175
- Altin D, Frost TK, Nilssen I (2008) Approaches for derivation of environmental quality criteria for substances applied in risk assessment of discharges from offshore drilling operations. *Integrated Environmental Assessment and Management* 4:204–214
- Bagni G, Baussant T, Jonsson G, Barsiene J, Mascini M (2005) Electrochemical device for the rapid detection of genotoxic compounds in fish bile samples. *Analytical Letters* 38:2639-2652
- Bakke T, Klungsoyr J, Sanni S (2011) Long term environmental impact of discharges from the Norwegian petroleum industry. Review of a 10 year research programme. (Submitted *Mar Ecol Prog Ser*)
- Balk L, Hylland K, Hansson T, Berntssen MHG, Beyer J, Jonsson G, Melbye A, Grung M, Torstensen BE, Borseth JF, Skarphedinsdottir H, Klungsoyr J (2011) Biomarkers in Natural Fish Populations Indicate Adverse Biological Effects of Offshore Oil Production. *Plos One* 6
- Baussant T, Ortiz-Zarragoitia M, Cajaraville MP, Bechmann RK, Taban IC, Sanni S (2011) Effects of chronic exposure to dispersed oil on selected reproductive processes in adult blue mussels (*Mytilus edulis*) and the consequences for the early life stages of their larvae. *Marine Pollution Bulletin* 62:1437-1445
- Bechmann RK, Larsen BK, Taban IC, Hellgren LI, Moller P, Sanni S (2010) Chronic exposure of adults and embryos of *Pandalus borealis* to oil causes PAH accumulation, initiation of biomarker responses and an increase in larval mortality. *Marine Pollution Bulletin* 60:2087-2098
- Bechmann RK, Westerlund S, Baussant T, Taban IC, Pampanin DM, Smith M, Lowe D (2006) Impacts of drilling mud discharges on water column organism and filter feeding bivalves. International Research Institute of Stavanger (IRIS) Report no 7151697, 142 pp
- Bjorgesaeter A, Gray JS (2008) Setting sediment quality guidelines: A simple yet effective method. *Marine Pollution Bulletin* 57:221-235
- Bjorgesæter A (2009) Environmental effects of oil and gas exploration on the benthic fauna of the Norwegian continental shelf. An analysis using the OLF-database. PhD dissertation, University of Oslo, Norway
- Bohne-Kjersem A, Bache N, Meier S, Nyhammer G, Roepstorff P, Saele O, Goksoyr A, Grosvik BE (2010) Biomarker candidate discovery in Atlantic cod (*Gadus morhua*) continuously exposed to North Sea produced water from egg to fry. *Aquatic Toxicology* 96:280-289
- Bohne-Kjersem A, Skadsheim A, Goksoyr A, Grosvik BE (2009) Candidate biomarker discovery in plasma of juvenile cod (*Gadus morhua*) exposed to crude North Sea oil, alkyl phenols and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). *Marine Environmental Research* 68:268-277

- Boitsov S, Meier S, Klungsoyr J, Svardal A (2004) Gas chromatography-mass spectrometry analysis of alkylphenols in produced water from offshore oil installations as pentafluorobenzoate derivatives. *Journal of Chromatography A* 1059:131-141
- Boitsov S, Mjos SA, Meier S (2007) Identification of estrogen-like alkylphenols in produced water from offshore oil installations. *Marine Environmental Research* 64:651-665
- Brakstad OG, Bonaunet K, Nordtug T et al. (2004) Biotransformation and dissolution of petroleum hydrocarbons in natural flowing seawater at low temperature. *Biodegradation* 15: 337-346
- Brakstad OG, Bonaunet K (2006) Biodegradation of petroleum hydrocarbons in seawater at low temperatures (0-5 degrees C) and bacterial communities associated with degradation. *Biodegradation* 17: 71-82
- Brakstad OG, Nonstad I, Faksness L-G, et al.(2008) Responses of microbial communities in Arctic sea ice after contamination by crude petroleum oil. *Microbial Ecology* 55: 540-552
- Brooks S, Sundt RC, Harman C, Finne EF, Grung M, Vingen S, Godal BF, Baršienė J, Skarphéðinsdóttir S (2009) Water column monitoring 2009. Norwegian Institute for Water Research, Report No 5882-2009, 86 pp
- Brooks SJ, Harman C, Grung M, Farmen E, Ruus A, Vingen S, Godal BF, Barsiene J, Andreikenaite L, Skarphéðinsdóttir H, Liewenborg B, Sundt RC (2011) Water Column Monitoring of the Biological Effects of Produced Water from the Ekofisk Offshore Oil Installation from 2006 to 2009. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues* 74:582-604
- Buhl-Mortensen P, Klungsoyr J, Meier S, Purser A, Tenningen E, Thomsen L (2010) Environmental monitoring report. Morvin 2009-2010. Institute of Marine Research, Norway 2010
- Bulukin E, Bagni G, Jonsson G, Baussant T, Mascini M (2006) Rapid screening of alkylphenol exposure in fish bile using an enzymatic peroxidase biosensor. *International Journal of Environmental Analytical Chemistry* 86:1039-1048
- Camus L, Olsen GH (2008) Embryo aberrations in sea ice amphipod *Gammarus wilkitzkii* exposed to water soluble fraction of oil. *Marine Environmental Research* 66:223-224
- Farmen E, Olsvik PA, Berntssen MHG, Hylland K, Tollefsen KE (2010) Oxidative stress responses in rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) hepatocytes exposed to pro-oxidants and a complex environmental sample. *Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology & Pharmacology* 151:431-438
- Grung M, Holth TF, Jacobsen MR, Hylland K (2009) Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) Metabolites in Atlantic Cod Exposed via Water or Diet to a Synthetic Produced Water. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues* 72:254-265
- Grøsvik BE, Meier S, Liewenborg B, Nesje G, Westrheim K, Fonn M, Kjesbu OS, Skarphéðinsdóttir H, Klungsoyr J (2010) PAH and biomarker measurements in fish from condition monitoring in Norwegian waters in 2005 and 2008. ICES annual Science Conference 20-24 September 2010 Paper ICES CM 2010/F:06
- Hansen BH, Altin D, Booth A, Vang SH, Frenzel M, Sorheim KR, Brakstad OG, Storseth TR (2010) Molecular effects of diethanolamine exposure on *Calanus finmarchicus* (Crustacea: Copepoda). *Aquatic Toxicology* 99:212-222

- Hansen BH, Altin D, Hessen KM, Dahl U, Breitholtz M, Nordtug T, Olsen AJ (2008a) Expression of ecdysteroids and cytochrome P450 enzymes during lipid turnover and reproduction in *Calanus finmarchicus* (Crustacea : Copepoda). *General and Comparative Endocrinology* 158:115-121
- Hansen BH, Altin D, Nordtug T, Olsen AJ (2007) Suppression subtractive hybridization library prepared from the copepod *Calanus finmarchicus* exposed to a sublethal mixture of environmental stressors. *Comparative Biochemistry and Physiology D-Genomics & Proteomics* 2:250-256
- Hansen BH, Altin D, Rorvik SF, Overjordet IB, Olsen AJ, Nordtug T (2011) Comparative study on acute effects of water accommodated fractions of an artificially weathered crude oil on *Calanus finmarchicus* and *Calanus glacialis* (Crustacea: Copepoda). *Science of the Total Environment* 409:704-709
- Hansen BH, Altin D, Vang SH, Nordtug T, Olsen AJ (2008b) Effects of naphthalene on gene transcription in *Calanus finmarchicus* (Crustacea : Copepoda). *Aquatic Toxicology* 86:157-165
- Hansen BH, Nordtug T, Altin D, Booth A, Hessen KM, Olsen AJ (2009) Gene Expression of GST and CYP330A1 in Lipid-Rich and Lipid-Poor Female *Calanus finmarchicus* (Copepoda: Crustacea) Exposed to Dispersed Oil. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues* 72:131-139
- Harman C, Boyum O, Tollefsen KE, Thomas K, Grung M (2008a) Uptake of some selected aquatic pollutants in semipermeable membrane devices (SPMDs) and the polar organic chemical integrative sampler (POCIS). *Journal of Environmental Monitoring* 10:239-247
- Harman C, Brooks S, Sundt RC, Meier S, Grung M (2011) Field comparison of passive sampling and biological approaches for measuring exposure to PAH and alkylphenols from offshore produced water discharges. *Marine Pollution Bulletin* 63:141-148
- Harman C, Farmen E, Tollefsen KE (2010) Monitoring North Sea oil production discharges using passive sampling devices coupled with in vitro bioassay techniques. *Journal of Environmental Monitoring* 12:1699-1708
- Harman C, Holth TF, Hylland K, Thomas K, Grung M (2009a) Relationship between polycyclic aromatic hydrocarbon (PAH) accumulation in semipermeable membrane devices and PAH bile metabolite levels in Atlantic Cod (*Gadus morhua*). *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues* 72:234-243
- Harman C, Thomas KV, Tollefsen KE, Meier S, Boyum O, Grung M (2009b) Monitoring the freely dissolved concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and alkylphenols (AP) around a Norwegian oil platform by holistic passive sampling. *Marine Pollution Bulletin* 58:1671-1679
- Harman C, Tollefsen KE, Boyum O, Thomas K, Grung M (2008b) Uptake rates of alkylphenols, PAHs and carbazoles in semipermeable membrane devices (SPMDs) and polar organic chemical integrative samplers (POCIS). *Chemosphere* 72:1510-1516
- Hasselberg L, Meier S, Svardal A (2004a) Effects of alkylphenols on redox status in first spawning Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquatic Toxicology* 69:95-105
- Hasselberg LS, Meier S, Svardal AT, Hegelund T, Celander MC (2004b) Effects of alkylphenols on CYP1A and CYP3A expression in first spawning Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Aquatic toxicology* 67 (4):303-313

- Hatlen K, Camus L, Berge J, Olsen GH, Baussant T (2009) Biological effects of water soluble fraction of crude oil on the Arctic sea ice amphipod *Gammarus wilkitzkii*. *Chemistry and Ecology* 25:151-162
- Hjermann DO, Melsom A, Dingsor GE, Durant JM, Eikeset AM, Roed LP, Ottersen G, Storvik G, Stenseth NC (2007) Fish and oil in the Lofoten-Barents Sea system: synoptic review of the effect of oil spills on fish populations. *Marine Ecology-Progress Series* 339:283-299
- Holth TF, Beckius J, Zorita I, Cajaraville MP, Hylland K (2011) Assessment of lysosomal membrane stability and peroxisome proliferation in the head kidney of Atlantic cod (*Gadus morhua*) following long-term exposure to produced water components. *Marine Environmental Research* 72:127-134
- Holth TF, Beylich BA, Skarphedinsdottir H, Liewenborg B, Grung M, Hylland K (2009) Genotoxicity of Environmentally Relevant Concentrations of Water-Soluble Oil Components in Cod (*Gadus morhua*). *Environmental Science & Technology* 43:3329-3334
- Holth TF, Thorsen A, Olsvik PA, Hylland K (2010) Long-term exposure of Atlantic cod (*Gadus morhua*) to components of produced water: condition, gonad maturation, and gene expression. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 67:1685-1698
- Jonsson G, Cavcic A, Stokke TU, Beyer J, Sundt RC, Brede C (2008a) Solid-phase analytical derivatization of alkylphenols in fish bile for gas chromatography-mass spectrometry analysis. *Journal of Chromatography A* 1183:6-14
- Jonsson G, Stokke TU, Cavcic A, Jorgensen KB, Beyer J (2008b) Characterization of alkylphenol metabolites in fish bile by enzymatic treatment and HPLC-fluorescence analysis. *Chemosphere* 71:1392-1400
- Jonsson H, Björkblom C (2011) Biomarker bridges - biomarker responses to dispersed oil in four marine fish species. *International Research Institute of Stavanger (IRIS) Report no 7151791*, 44 pp
- Jorgensen LL, Renaud PE, Cochrane SKJ (2011) Improving benthic monitoring by combining trawl and grab surveys. *Marine Pollution Bulletin* 62:1183-1190
- Karlsen OA, Bjørneklett S, Berg K, Brattås M, Bohne-Kjersem A, Grøsvik BE, Goksøyr A (2011) Integrative environmental genomics of cod (*Gadus morhua*): the proteomics approach. *Journal of Toxicology and Environmental Health, Part A* 74:494-507
- Krapp RH, Baussant T, Berge J, Pampanin DM, Camus L (2009) Antioxidant responses in the polar marine sea-ice amphipod *Gammarus wilkitzkii* to natural and experimentally increased UV levels. *Aquatic Toxicology* 95:162-162
- Larsen BK (2007 unpublished) Effects of off-shore oil industry related discharges in the Arctic. Report Project No 159176 to the Norwegian Research Council
- Larsson AI, Purser A (2011) Sedimentation on the cold-water coral *Lophelia pertusa*: Cleaning efficiency from natural sediments and drill cuttings. *Marine Pollution Bulletin* 62:1159-1168
- Leung KMY, Bjorgesaeter A, Gray JS, Li WK, Lui GCS, Wang Y, Lam PKS (2005) Deriving sediment quality guidelines from field-based species sensitivity distributions. *Environmental Science & Technology* 39:5148-5156

- Lowe DM, Pipe RK (1987) Mortality and quantitative aspects of storage cell utilization in mussels, *Mytilus edulis*, following exposure to diesel oil hydrocarbons. *Marine Environmental Research* 22:243-251
- Lucarelli F, Authier L, Bagni G, Marrazza G, Baussant T, Aas E, Mascini M (2003) DNA biosensor investigations in fish bile for use as a biomonitoring tool. *Analytical Letters* 36:1887-1901
- Meier S, Andersen TC, Lind-Larsen K, Svoldal A, Holmsen H (2007) Effects of alkylphenols on glycerophospholipids and cholesterol in liver and brain from female Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology & Pharmacology* 145:420-430
- Meier S, Klungsoyr J, Boitsov S, Eide T, Svoldal A (2005) Gas chromatography-mass spectrometry analysis of alkylphenols in cod (*Gadus morhua*) tissues as pentafluorobenzoate derivatives. *Journal of Chromatography A* 1062:255-268
- Meier S, Morton HC, Andersson E, Geffen AJ, Taranger GL, Larsen M, Petersen M, Djurhuus R, Klungsoyr J, Svoldal A (2011) Low-dose exposure to alkylphenols adversely affects the sexual development of Atlantic cod (*Gadus morhua*): Acceleration of the onset of puberty and delayed seasonal gonad development in mature female cod. *Aquatic Toxicology* 105:136-150
- Meier S, Morton HC, Nyhammer G, Grosvik BE, Makhotin V, Geffen A, Boitsov S, Kvestad KA, Bohne-Kjersem A, Goksoyr A, Folkvord A, Klungsoyr J, Svoldal A (2010) Development of Atlantic cod (*Gadus morhua*) exposed to produced water during early life stages Effects on embryos, larvae, and juvenile fish. *Marine Environmental Research* 70:383-394
- Meier SA, T. C. Lind-Larsen, K. Svoldal, A. Holmsen, H. (2007) Effects of alkylphenols on glycerophospholipids and cholesterol in liver and brain from female Atlantic cod (*Gadus morhua*). *Comparative Biochemistry and Physiology C-Toxicology & Pharmacology* 145:420-430
- Neff J, Lee K, DeBlois EM (2011) Produced water: Overview of composition, fates, and effects. Chapter 1 in: Lee K, Neff J (eds) *Produced Water* Springer, NY
- Neff JM (2008) Estimation of bioavailability of metals from drilling mud barite. *Integr Environ Assess Manag* 4:184-193
- Nilsen MM, Meier S, Larsen BK, Andersen OK, Hjelle A (2011a). An estrogen responsive plasma protein expression signature in Atlantic cod (*Gadus morhua*) revealed by SELDI-TOFMS. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 74: 2175-2181.
- Nilsen MM, Meier S, Andersen OK, Hjelle A (2011b). SELDI-TOF MS analysis of alkylphenol exposed Atlantic cod with phenotypic variation in gonadosomatic index. *Marine Pollution Bulletin* 62: 2507-2511
- OLF (2011) Environmental Report 2011. The environment cooperation of the oil and gas industry - facts and trends. Norwegian Oil Industry Association, 60 p (in Norwegian)
- Olsen GH, Carroll ML, Renaud PE, Ambrose WG, Olsson R, Carroll J (2007) Benthic community response to petroleum-associated components in Arctic versus temperate marine sediments. *Marine Biology* 151:2167-2176
- Pettersen J, Hertwich EG (2008) Critical review: Life-cycle inventory procedures for long-term release of metals. *Environmental Science & Technology* 42:4639-4647

- Schaanning M, Lichtenthaler R, Rygg B (1997) Biodegradation of Esters and Olefins in Drilling Mud Deposited on Arctic soft-bottom communities in a low-temperature Mesocosm. Norwegian Institute for Water Research, Report No 3760-1997, 57 pp
- Schaanning MT, Trannum HC, Oxnevad S, Carroll J, Bakke T (2008) Effects of drill cuttings on biogeochemical fluxes and macrobenthos of marine sediments. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 361:49-57
- Skadsheim A, Baussant T, Sanni S (unpublished) Assessing long term biological effects on the ice amphipod *Gammarus wilkitzkii* exposed to the water soluble fraction (WSF) of crude oil following an accidental discharge scenario. Poster presentation, Research Council of Norway, Project No 164407/S40
- Skadsheim A, Sanni S, Pinturier L, Moltu UE, Buffagni M, Bracco L (2009) Assessing and monitoring local and long-range-transported hydrocarbons as potential stressors to fish stocks. *Deep-Sea Research II* 56:2037-2043
- Smit MGD, Bechmann RK, Hendriks AJ, Skadsheim A, Larsen BK, Baussant T, Bamber S, Sanni S (2009) Relating biomarkers to whole-organism effects using species sensitivity distributions: a pilot study for marine species exposed to oil. *Environmental Toxicology and Chemistry* 28:1104-1109
- Sundt RC, Baussant T, Beyer J (2009a) Uptake and tissue distribution of C-4-C-7 alkylphenols in Atlantic cod (*Gadus morhua*): Relevance for biomonitoring of produced water discharges from oil production. *Marine Pollution Bulletin* 58:72-79
- Sundt RC, Bjorkblom C (2011) Effects of Produced Water on Reproductive Parameters in Prespawning Atlantic Cod (*Gadus morhua*). *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues* 74:543-554
- Sundt RC, Brooks S, Grøsvik BE, Pampanin DM, Farmen E, Harman C, Meier S (2011) Water column monitoring of offshore produced water discharges. Compilation of previous experience and suggestions for future survey design. International Research Institute of Stavanger (IRIS) Report no 7911854, 123 pp
- Sundt RC, Brooks S, Ruus A, Grung M, Arab N, Godal BF, Barsiene J, Skarphéðinsdóttir H (2008) Water Column Monitoring 2008. International Research Institute of Stavanger (IRIS) Report no 7151832, 76 pp
- Sundt RC, Meier S, Jonsson G, Sanni S, Beyer J (2009b) Development of a laboratory exposure system using marine fish to carry out realistic effect studies with produced water discharged from offshore oil production. *Marine Pollution Bulletin* 58:1382-1388
- Thomas KV, Langford K, Petersen K, Smith AJ, Tollefsen KE (2009) Effect-Directed Identification of Naphthenic Acids As Important in Vitro Xeno-Estrogens and Anti-Androgens in North Sea Offshore Produced Water Discharges. *Environmental Science & Technology* 43:8066-8071
- Tollefsen KE, Blikstad C, Eikvar S, Finne EF, Gregersen IK (2008) Cytotoxicity of alkylphenols and alkylated non-phenolics in a primary culture of rainbow trout (*Onchorhynchus mykiss*) hepatocytes. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 69:64-73
- Tollefsen KE, Harman C, Smith A, Thomas KV (2007) Estrogen receptor (ER) agonists and androgen receptor (AR) antagonists in effluents from Norwegian North Sea oil production platforms. *Marine Pollution Bulletin* 54:277-283

- Tollefsen KE, Nilsen AJ (2008) Binding of alkylphenols and alkylated non-phenolics to rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss*) hepatic estrogen receptors. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 69:163-172
- Tollefsen KE, Sundt RC, Beyer J, Meier S, Hylland K (2011) Endocrine modulation in Atlantic cod (*Gadus morhua* L.) exposed to alkylphenols, polyaromatic hydrocarbons, produced water, and dispersed oil. *Journal of Toxicology and Environmental Health-Part a-Current Issues* 74:529-542
- Trannum HC (2011) Environmental effects of water-based drill cuttings on benthic communities - biological and biogeochemical responses in mesocosm- and field-experiments. PhD dissertation, University of Oslo, Norway
- Trannum HC, Nilsson HC, Schaanning MT, Oxnevad S (2010) Effects of sedimentation from water-based drill cuttings and natural sediment on benthic macrofaunal community structure and ecosystem processes. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 383:111-121
- Trannum HC, Setvik A, Norling K, Nilsson HC (2011) Rapid macrofaunal colonization of water-based drill cuttings on different sediments. *Marine Pollution Bulletin* 62:2145-2156

9. Oversikt over prosjekter under PROOF og PROOFNY

Prosjekt nummer	Prosjekttittel	Institutt	Prosjekt-ansvarlig	År for slutt-rapport
141213	Effekter av produksjonsvann på egg og larveutvikling samt kjønnsdifferensiering hos torsk	Havforskningsinstituttet	Asbjørn Svardal	2004
152231	Contamination of fish in the North Sea by the offshore oil and gas industry	Havforskningsinstituttet	Jarle Klungsøyr	2003
152232	Hormonforstyrrende effekter av miljøgifter i produksjonsvann fra oljeinstallasjoner	Havforskningsinstituttet	Asbjørn Svardal	2005
152449	GC/MS determination of produced water PAH and alkylphenol metabolites in marine fish	International Research Institute of Stavanger AS	Jonny Beyer	2003
152450	Hydrocarbon release from oil dropets to seawater: experimental and computational verification of a model	International Research Institute of Stavanger AS	Arnfinn Skadsheim	2003
152451	Impacts of metals from drill cuttings and mud to the marine water column	International Research Institute of Stavanger AS	Stig Westerlund	2002
152452	Identification of ecologically relevant toxic components in effluents from offshore activities (OffTiE)	Norsk institutt for vannforskning	Knut-Erik Tollefsen	2003
152460	Biodegradation of oil in the seawater column with emphasis on Arctic conditions	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Odd Gunnar Brakstad	2003
152465	Chemical composition and toxicity of bioavailable polar crude oil fractions - a literature study	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Alf Glein Melbye	2002
152466	Long-term (chronic) effects of produced water effluents affecting reproduction in marine crustacean plankton. Introductory activities	Institutt for biologi Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Anders J. Olsen	2003
153692	3 - Hormone disruption and possible DNA damage on fish of alkylphenols in produced water from offshore installations	Havforskningsinstituttet	Jarle Klungsøyr	2008


153858	Crude oil pollution measured in discharged processed water flows using optical polarization	Institutt for fysikk og teknologi Universitetet i Bergen	Erling A. Hammer	2005
153882	Validation of methods and data for Environmental Risk Assessment off-shore	Akvamiljø as	Steinar Sanni	2006
153898	Pollutant exposure and effects in fish related to the discharge of produced water in the North Sea oil industry	International Research Institute of Stavanger AS	Jonny Beyer	2006
154764	Algorithms for automatic detection of oil spills in SAR images – ADOS -	Institutt for informatikk Universitetet i Oslo	Anne Helene Schistad Solberg	2007
157649	Long term effects of offshore discharges on cold water zooplankton: establishing a test system for chronic exposure	Akvaplan-niva AS	Jolynn Carrol	2005
157658	Establishment of the gill EROD assay as a biomarker of oil and produced water discharge	Norges fiskerihøgskole Universitetet i Tromsø	Even Jørgensen	2004
157673	Chemical characterisation of polar components in produced water	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Per S. Daling	2006
157678	Weathering of marine oil spills under Arctic conditions	UNIS	Per Johan Brandvik	2008
157687	Long-term - chronic - effects of produced water effluents affecting reproduction in marine crustacean plankton	Institutt for biologi Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Anders J. Olsen	2005
159016	Experimental tests of petroleum-associated components on benthos at community, individual and cellular levels – EXPAC -	Akvaplan-niva AS	Jolynn Carrol	2007
159113	Integrating monitoring methods for impact of offshore discharges to the North Sea - IMONIT	Norsk institutt for vannforskning	Knut-Erik Tollefsen	2007
159176	Effects of off-shore industry related discharges in the Arctic	International Research Institute of Stavanger AS	Bodil Katrine Larsen	2007
159183	Impacts of drilling mud discharges on water column organism and filter feeding bivalves	International Research Institute of Stavanger AS	Stig Westerlund	2006

160769	Naturlige radionuklider i det marine miljø med vekt på Nordsjøen - oppsummering	Norse Decom	Per Varskog	2003
163338	3 - Effects on development, sex differentiation and reproduction in cod (<i>Gadus morhua</i>) exposed to produced water during early life stages	Havforskningsinstituttet	Jarle Klungsøyr	2008
163323	Radioactivity in produced water from Norwegian oil and gas installations - concentrations, bioavailability and doses to marine biota	Institutt for energiteknikk - Kjeller	Dag Øistein Eriksen	2007
164398	The use of passive sampling devices in monitoring of potential impact of offshore discharges and accidental oil spills (PASSIMPACT)	Norsk institutt for vannforskning	Merete Grung	2009
164401	Identification of estrogen-like compounds in produced water from offshore oil installations	Havforskningsinstituttet	Stepan Boitsov	2005
164406	Environmental effects of oil and gas exploration on the benthic fauna of the Norwegian continental shelf: an analysis using the OLF database	Biologisk institutt Universitetet i Oslo	Maren Onsrud	2008
164407	Long term effects on Arctic ecosystem from accidental discharges	International Research Institute of Stavanger AS	Steinar Sanni	2009
164410	Parameterisation of the environmental impacts on bottom fauna of water-based drilling fluids and cuttings	Norsk institutt for vannforskning	Karl Norling	2011
164413	Proteome expression signatures (PES) in fish as a diagnostic tool to evaluate the environmental impacts of offshore oil and gas exploration	International Research Institute of Stavanger AS	Anne Hjelle	2012
164419	Predicting chronic effects in fish from sublethal markers	Norsk institutt for vannforskning	Ketil Hylland	2010
164423	3 - Effects of produced water to Atlantic cod: Mechanistic studies and biomarker development with proteomics based methods	Molekylær-biologisk institutt Universitetet i Bergen	Anders Goksøyr	2008
164427	Comparative oral and water based exposures of cod to produced water components	Akvamiljø as	Rolf Sundt	2005

164430	The unresolved complex mixture (UCM) of petrogenic oils: Impacts in the seawater column	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Odd Gunnar Brakstad	2006
170429	Long term - chronic - effects of produced water effluents affecting reproduction in marine crustacean plankton. Phase 2.	Institutt for biologi Norges teknisk-naturvitenskapelige universitet	Anders J. Olsen	2009
173333	Parameterisation of the environmental impacts on bottom fauna of water based drilling fluids and cuttings - Field and mesocosm experiments	Norsk institutt for vannforskning	Hans Christer Nilsson	2009
173373	Exposure system for continuous controlled exposure of fish eggs and larvae with dispersed oil.	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Trond Nordtug	2007
173418	Drilling mud follow up study - Input data and validation experiments for ERMS	International Research Institute of Stavanger AS	Renée Katrin Bechmann	2009
173446	Environmental occurrence of fluorinated alkyl substances from fire fighting foams used on Norwegian oil platforms	Norsk institutt for luftforskning - Tromsø	Dorte Herzke	2008
173451	Effects of the unresolved complex mixture (UCM) of petrogenic oils in the marine water column - Phase 2.	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Odd Gunnar Brakstad	2007
173487	Long term effects of oil accidents on the pelagic ecosystem of the Norwegian and Barents Seas	Centre for Ecological and Evolutionary Synthesis Universitetet i Oslo	Nils Chr. Stenseth	2010
178015	Study of the long-term effects on Atlantic herring (<i>Clupea harengus</i>) exposed to an oil polluted <i>Calanus finmarchicus</i> diet	Havforskningsinstituttet	Jarle Klungsøyr	2010
178318	The impact of produced water on fish reproduction: a multigeneration approach	Det matematisk-naturvitenskapelige fakultet, Universitetet i Bergen	Ian Mayer	2012
178408	Integration of biomonitoring with risk assessment by constructing of biomarker bridges for water column organisms exposed to produced water.	International Research Institute of Stavanger AS	Steinar Sanni	2012

178434	The possible role of zooplankton in modulating ecosystem effects of acute oil spills in the Norwegian and Barents seas.	Centre for Ecological and Evolutionary Synthesis Universitetet i Oslo	Nils Chr. Stenseth	2011
178621	Assessment of mixture toxicity of compounds in discharges to the North Sea and coastal areas of Norway	Norsk institutt for vannforskning	Knut-Erik Tollefsen	2013
184641	Effects of oil compounds and persistent organic pollution (POP) on the phospholipid composition and membrane fluidity in Atlantic cod.	Havforskningsinstituttet	Sonnich Meier	2012
184699	Impact of water-based drilling mud in the Barents Sea: a study using the epibenthic coral species <i>Lophelia pertusa</i>	International Research Institute of Stavanger AS	Thierry Baussant	2012
184716	Toxicity of acute oil discharges to cod larvae - Relative contribution of oil droplets, water soluble fraction and photosensitization	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Trond Nordtug	2011
189613	AMPERA - Implementation of risk assessment methodologies for oil and chemical spills in the European marine environment (RAMOCS) - ERA-NET	Norsk institutt for vannforskning	Kevin Thomas	2012
189614	AMPERA - Toxicity profiling of the major EU transported HNS and oil types (TOXPROF) - ERA - NET	Norsk institutt for vannforskning	Kevin Thomas	2012
189616	AMPERA - Ecological risk assessment information data-mining and comparison - ERA-NET	International Research Institute of Stavanger AS	Thierry Baussant	2010
190247	Benthic indicators for monitoring the ecosystem of the Barents Sea	Akvaplan-niva AS	Paul Renaud	2012
190265	Phylogenetic microarrays and high-throughput sequencing: a new tool for biodiversity assessment in northern Norway	UNI Research AS	Christofer Troedsson	2014
191698	Pollution risk and impact analysis for the Barents Sea ecosystem	Havforskningsinstituttet	Frode Vikebø	2013

196193	3rd Norwegian Environmental Toxicology Symposium - Emerging solutions for emerging challenges	Molekylær-biologisk institutt Universitetet i Bergen	Anders Goksøyr	2011
196604	Metabolomics to study toxicity of acute discharges to cod larvae	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Trond Nordtug	2011
196685	Spatiotemporal variability in mortality and growth of fish larvae in the Lofoten-Barents Sea ecosystem	Centre for Ecological and Evolutionary Synthesis Universitetet i Oslo	Dag Ø. Hjermmann	2014
196711	Understanding fitness-related effects of dispersed oil on <i>Calanus finmarchicus</i>	SINTEF Materialer og kjemi - Trondheim	Bjørn Henrik Hansen	2013
203894	Response of deep-water sponge fauna to oil drilling discharges: linking molecular and biological parameters	Havforskningsinstituttet	Jan Helge Fosså	
204023	Integrated model system: Risk and ecosystem based management of Arctic waters	International Research Institute of Stavanger AS	Steinar Sanni	
204025	Insights into the sensitivity of cold-water communities to drilling mud: enhancing diagnosis and decision-making with emphasis on <i>Lophelia</i> .	International Research Institute of Stavanger AS	Thierry Baussant	



Publikasjonen kan bestilles på
www.forskningsradet.no/publikasjoner

Norges forskningsråd
Stensberggata 26
Postboks 2700 St. Hanshaugen
No-0131 Oslo

Telefon: +47 22 03 70 00
Telefaks: +47 22 03 70 01
post@forskningsradet.no
www.forskningsradet.no

Utgiver:
© Norges forskningsråd
Havet og kysten
www.forskningsradet.no/havkyst

Februar 2012
ISBN 978-82-12-03027-5 (pdf)

Design: Jentestreker AS
Foto forside: Vidar Vassvik (profilbilde),
Kristin Stand By og Shutterstock