



MILJØEFFEKTER AF SPILD AF NYE LAVSVOVLEHOLDIGE SKIBSBRÆNDSTOFFER I DET ARKTISKE HAVMILJØ

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 654

2025



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

MILJØEFFEKTER AF SPILD AF NYE LAVSVOVLHOLDIGE SKIBSBRÆNDSTOFFER I DET ARKTISKE HAVMILJØTITEL

Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 654

2025

Janne Fritt-Rasmussen¹
Mette Dalgaard Agersted¹
Pia Lassen²
Susse Wegeberg¹
Kim Gustavson¹

¹Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience

²Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

| | |
|----------------------------|--|
| Serietitel og nummer: | Videnskabelig rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 654 |
| Kategori: | Rådgivningsrapport |
| Titel: | Miljøeffekter af spild af nye lavsvovlholdige skibsbrændstoffer i det arktiske havmiljø |
| Forfatter(e): | Janne Fritt-Rasmussen ¹ , Mette Dalgaard Agersted ¹ , Pia, Lassen ² , Susse Wegeberg ¹ , Kim Gustavson ¹ |
| Institution(er): | ¹ Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience, ² Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab |
| Udgiver: | Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi © |
| URL: | http://dce.au.dk |
| Udgivelsesår: | April 2025 |
| Redaktion afsluttet: | April 2025 |
| Faglig kommentering: | David Boertmann |
| Kvalitetssikring, DCE: | Kirsten Bang |
| Sproglig kvalitetssikring: | Charlotte Hviid |
| Finansiel støtte: | Miljøstøtte til Arktis, Miljøministeriet |
| Bedes citeret: | Fritt-Rasmussen, J., Agersted, M. D., Lassen, P., Wegeberg, S., Gustavson, K. 2025. Miljøeffekter af spild af nye lavsvovlholdige skibsbrændstoffer i det arktiske havmiljø. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 28 s. - Videnskabelig rapport nr. 654 |
| | Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse |
| Sammenfatning: | De globale reguleringer om reduceret svovlindhold i skibsbrændstoffer, har medført et behov for en ny type brændstoffer med et lavt svovlindhold. Der eksisterer kun begrænset viden om mulige miljøeffekter og bekæmpelse af spild med disse nye lavsvovlholdige olier (LSFO) i havmiljøet. Det overordnede formål med nærværende projekt er at udbygge vidensgrundlaget om mulige effekter og skader på arktiske marine organismer efter spild af LSFOer. I projektet er der gennemført en række laboratoriestudier af LSFOers effekter på udvalgte arktiske organismer under kontrollerede forhold. Resultaterne fra laboratoriestudierne er medtaget i en såkaldt EOS-analyse (Environment & Oil Spill Response analyse), hvor afledte miljøeffekter fra oliespild og relaterede bekæmpelsesmetoder er vurderet i forhold til mulige effekter og skader på forskellige arktiske organismegrupper. Vurderingen af LSFOerne er sammenholdt med konventionelle olietyper (bunkerolier, arktisk dieselolie). |
| Emneord: | Arktisk, Olie, Miljø, Effekter, Svovl, bekæmpelse, Low Sulphur Fuel Oils, LSFO |
| Foto forside: | Foto af Janne Fritt-Rasmussen: Young Sund, Daneborg, Østgrønland |
| ISBN: | 978-87-7156-944-5 |
| ISSN (elektronisk): | 2244-9981 |
| Sideantal: | 28 |

Indhold

| | |
|--|-----------|
| Forord | 5 |
| Sammenfatning | 6 |
| Summary | 7 |
| 1 Baggrund | 8 |
| 2 Sammenfatning af internationale LSFO- projekter | 10 |
| 2.1 'Low Sulphur Fuel Oils – identification of key environmental impacts in a cold marine environment' - Nordisk Ministerråd projekt | 10 |
| 2.2 "New low sulphur fuels, fate and behavior in cold water conditions" - PAME/EPPR-projekt | 10 |
| 2.3 IMAROS I og II | 11 |
| 2.4 Andre studier med LSFO | 12 |
| 3 Eksperimentelt arbejde | 14 |
| 3.1 Udvælgelse af olier til undersøgelser | 14 |
| 3.2 Udvælgelse af testorganismer | 18 |
| 3.3 Eksperimentelle undersøgelser | 18 |
| 4 Sammendrag af resultater | 19 |
| 4.1 Akut toksicitet af LSFO på muslinger | 19 |
| 4.2 Kronisk toksicitet af LSFO på muslinger | 20 |
| 4.3 Akut toksicitet på tang | 20 |
| 4.4 Effekter og skader af oliespild på fjer fra arktiske havfugle (lomvie og ederfugl) | 21 |
| 4.5 Ophobning af svært nedbrydelige olieforbindelser i arktiske fødekæder | 21 |
| 4.6 EOS analyse | 23 |
| 5 Miljørisikovurdering af spild og bekæmpelse af lavsvovlholdige skibsbrændstoffer i et arktisk havmiljø – konkluderende bemærkninger | 25 |
| 6 Referencer | 27 |

Forord

De globale reguleringer fra IMO (International Maritime Organization) omkring reduceret svovlindhold i skibsbrændstoffer fra 2020 har resulteret i, at nye brændstoffer med et lavt svovlindhold (Low Sulphur Fuel Oils - LSFO) er udviklet og kommet på markedet. I tilfælde af spild med LSFO i arktiske farvande mangler der viden om de miljømæssige effekter af olierne. Projektets formål er at udbygge vidensgrundlaget om LSFO-spilds effekter på arktiske organismer, herunder belyse mulige afledte effekter ved de forskellige bekæmpelsesmetoder.

Projektet er støttet af Miljøministeriet, Miljøstøtte til Arktis.

Sammenfatning

De globale reguleringer fra IMO (International Maritime Organization) omkring reduceret svovlindhold i skibsbrændstoffer, som trådte i kraft i januar 2020, har medført et behov for en ny type brændstoffer med et lavt svovlindhold. Baggrunden for IMO-reguleringerne er at reducere svovldioxid luftforurening. Sådanne "Low Sulphur Fuel Oils" (LSFO) er kommet på markedet, som erstatning for de traditionelle bunkerolier med et højt svovlindhold. Der eksisterer kun begrænset viden om mulige miljøeffekter og bekæmpelse af spild med LSFO i havmiljøet. Indledende undersøgelser iværksat af det norske Kystverket har vist, at de forskellige LSFO har meget forskellige fysiske og kemiske egenskaber. Dette har stor betydning for oliernes opførsel ved spild i havet og de mulige effekter og skader på dyre- og planteliv. En øget viden om de enkelte LSFOers skæbne ved spild er desuden meget vigtig i forhold til at sikre den rette bekæmpelsesstrategi.

Det overordnede formål med nærværende projekt er at udbygge vidensgrundlaget om mulige effekter og skader på arktiske marine organismer efter spild af LSFOer. I projektet er der gennemført en række laboratoriestudier af LSFOers effekter på udvalgte arktiske organismer under kontrollerede forhold. Resultaterne fra laboratoriestudierne er medtaget i en såkaldt EOS-analyse (Environment & Oil Spill Response analyse), hvor afledte miljøeffekter fra oliespild og relaterede bekæmpelsesmetoder er vurderet i forhold til mulige effekter og skader på forskellige arktiske organismegrupper. Vurderingen af LSFOerne er sammenholdt med konventionelle olietyper (bunkerolier, arktisk dieselolie).

Projektet er knyttet til, og supplerer, to andre projekter; dels et projekt i Arktisk Råd arbejdsgrupperne PAME og EPPR ("New low sulphur fuels, fate and behavior in cold water conditions"), og dels et indledende studie dækket af Nordisk Ministerråd (NMR) (Fritt-Rasmussen et al. 2023). De specifikke olietyper samt testorganismer er udvalgt på baggrund af hhv. PAME/EPPR- og NMR-projekterne, så der sikres synergi mellem projekterne og de derved giver det størst mulige udbytte.

Summary

The global IMO regulations on reduced sulphur content in marine fuels, which came into force in January 2020, have led to a need for a new type of fuel with a low sulphur content. The background for the IMO regulations is to reduce air pollution from sulphur dioxide. Such "Low Sulphur Fuel Oils" (LSFO) have come on the market as a replacement for the traditional bunker oils with a high sulphur content. There is only limited knowledge about possible environmental effects and how to combat these LSFOs in the marine environment in case of an oil spill. Preliminary studies initiated by the Norwegian Coastal Administration have shown that the different LSFOs have very different physical and chemical properties. This affects the behaviour of the oils in an event of spill in the sea as well as the possible impact and damage to marine and coastal organisms. Increased knowledge about the fate of the individual LSFOs is also very important in relation to ensuring the right spill response strategy/options in the event of a spill with LSFO.

The overall purpose of this project is to expand the knowledge base on possible impacts and damages to Arctic marine organisms following a LSFO spill. In the project, several laboratory studies have been completed on the effects of LSFOs on selected Arctic organisms under controlled conditions. The results from the laboratory studies have been included in a so-called EOS analyses (Environment & Oil Spill Response), where derived environmental effects from oil spills and related response methods are assessed in relation to possible effects and damage to different Arctic organism groups. The assessment of the LSFOs has been compared with conventional oil types (bunker oils, Arctic diesel oil).

The project is linked to and complements two other projects; a project in the Arctic Council working groups PAME and EPPR ("New low sulphur fuels, fate and behavior in cold water conditions"), and an initial study covered by the Nordic Council of Ministers (NMR) (Fritt-Rasmussen et al. 2023). The specific oil types and test organisms have been selected based on the PAME/EPPR and NMR projects, respectively, to ensure synergy between the projects and thereby the greatest possible yield.

1 Baggrund

Det er velkendt, at oliespild i havet kan have store og langvarige miljøeffekter, herunder effekter og skader på havfugle, hvaler, fisk, vandlopper og muslinger, m.fl. Desuden kan oliespild på havet spredes og derved påvirke store områder samt lokaliteter lang fra spildstedet. Megen af den eksisterende viden om oliers effekter og skæbne i havmiljøet er relateret til store spild, hvor råolie er involveret, fx fra tankskibet Exxon Valdez i Prins William Sound i Alaska i 1989 og fra boreplatformen Deep Water Horizon i den Mexicanske Golf i 2010. 25 år efter Exxon Valdez forulykkede, blev der stadig påvist effekter af oliespildet i havmiljøet (Shiganaka 2014). Det er derfor vigtigt at have et oliespildsberedskab klar for hurtig og effektiv bekæmpelse af spildet.

I takt med klimaforandringerne vil udbredelse og tykkelse af havisen reduceres, hvilket forventes at medføre øget skibstrafik, nye sejruter og derved øget risiko for oliespild i grønlandske farvande. Oliespildsbekæmpelse i Grønland/Arktis er udfordret af store afstande, begrænset infrastruktur, havis, isbjerge og kulde og skal derfor tilpasses disse forhold. Trods store forskningsprojekter de senere år (fx www.arcticresponsetechnology.org, www.graceoil-project.eu/en-US, Holt et al. 2017, Jørgensen et al. 2019) er der stadig behov for forskning/udvikling af effektive oprensningsteknikker ved oliespild i arktiske/isfyldte områder.

Globale IMO-reguleringer (IMO MARPOL Convention), med henblik på at reducere svovlindholdet i skibsbrændstof, trådte i kraft i januar 2020 (max 0,5 % S). Derudover er der, siden 2015, særlige krav (max 0,1 % S) til svovlindholdet i de særlige SECA-områder (Sulphur Emission Control Areas). Dette har medført en stigning i "Low Sulphur Fuel Oils" (LSFO)/hybridolier som erstatning for de traditionelle bunkerolier. LSFO'er er en bred gruppe af forskellige olier med det lave svovlindhold som eneste fællesnævner. LSFO'er har meget forskellige egenskaber, herunder viskositet, densitet og stivnepunkt. Egenskaberne har betydning for oliernes opførsel ved spild i havet og de mulige effekter på miljøet.

I den nyligt publicerede rapport "Oliespild i grønlandske farvande, miljømæssige udfordringer og beredskab" (Fritt-Rasmussen et al. 2020) anbefalede DCE bl.a. at: *'2/ tunge bunkerolier (HFO eller de nye hybridolier med et lavt svovlindhold indtil nærmere viden omkring disse foreligger) ikke anvendes som brændstof eller fragtes i grønlandske farvande'*. Anbefalingen blev givet på baggrund af manglende viden om de nye LSFO'er, bl.a. med henblik på anbefalinger i forhold til brug og bekæmpelse af LSFO-spild i grønlandske farvande, men også en forståelse af effekterne ved spild. Formålet med nærværende projekt er derfor at bidrage til øget viden om og forståelse af mulige miljøeffekter fra spild med LSFO i havet, som kan indgå ved håndtering og bekæmpelse af LSFO.

Indledende forsøg iværksat af det norske Kystverket (Sørheim et al. 2020; Hellstrøm et al. 2017; Faksness & Altin 2017) viste, at de testede LSFO'er havde meget forskellige fysiske og kemiske egenskaber og derfor dækkede et vidt spekter af olietyper. I lighed med konventionelle olietyper er det forventeligt, at disse forskellige egenskaber vil have stor betydning for, hvordan LSFO-spild vil opføre sig i havmiljøet og dermed omfanget af de miljømæssige effekter. Resultaterne fra de indledende forsøg har ført til en bekymring hos Kystverket og andre internationale interessenter omkring mulighederne for

bekæmpelse af spild forårsaget af LSFOer i havmiljøet, samt miljøeffekter af de forskellige LSFOer, der løbende kommer på markedet. I januar 2020 startede således EU-projektet 'IMAROS' (Improving response capacities and understanding the environmental impact of new generation low sulphur marine fuel oil spills) med fokus på LSFO-spild i tempererede områder. For at dække arktiske og subarktiske forhold blev der i oktober 2020 initieret et Arktisk Råd projekt (kombineret PAME- og EPPR-godkendt projekt, "New low sulphur fuels, fate and behavior in cold water conditions") med det formål at øge viden grundlaget om sammensætning af LSFOer og toksicitet i kolde farvande. DCE har på vegne af Kongeriget Danmarks PAME- og EPPR-delegationer deltaget i dette projekt med faglig ekspertise.

Nærværende videnskabelige rapport indeholder en opsamling og konklusioner om LSFOer på baggrund af:

- 1) Internationale projekter om LSFOer (Afsnit 2).
- 2) Effektstudier med LSFOer på en række arktiske organismer gennemført i nærværende projekt (Afsnit 3 og 4).
- 3) Analyse af miljøeffekter ved bekæmpelse af LSFO-spild (EOS-analyse) (Afsnit 4).
- 4) Konklusioner og overordnet miljøvurdering af spild og bekæmpelse af LSFO i et arktisk havmiljø (Afsnit 5).

2 Sammenfatning af internationale LSFO-projekter

2.1 'Low Sulphur Fuel Oils – identification of key environmental impacts in a cold marine environment' - Nordisk Ministerråd projekt

'Low Sulphur Fuel Oils – identification of key environmental impacts in a cold marine environment' - projektet blev støttet af Nordisk Ministerråd (Fritt-Rasmussen et al. 2023). Projektet inkluderede små-skala laboratorieforsøg med bekæmpelse af oliespild ved kemisk dispergering af olien, *in-situ* afbrænding af olien på vandoverfladen og biologisk nedbrydning af LSFOer i vand. Tre forskellige LSFOer indgik i undersøgelserne: WRD, ULSFO 2018 og HDME50.

Konklusionen fra projektet var bl.a., at olierne havde begrænset dispergerbarhed ved vandtemperaturer på 2 og 5 °C. Dette tillægges bl.a. oliernes høje stivnepunkt (pour point, den laveste temperatur hvor olien ikke længere flyder). Småskala *in-situ* afbrændingsforsøg blev gennemført med forskellige initiale oliefilmstykker på vandoverfladen og viste, at alle olierne kunne antændes. Desuden viste forsøgene, at afbrændingsresterne forblev på vandoverfladen efter afkøling. Nedbrydningsforsøgene viste, at olierne var svært bionedbrydelige ved lave vandtemperaturer, hvilket også gjaldt ved tilførsel af kemisk dispergeringsmiddel. Studierne omfattede kun friske olier og ikke forvitrede (dvs. udsat for fordampning og emulsion) olier. Forvitring vil yderligere reducere potentialet for bekæmpelse af oliespild. En anden konklusion fra projektet var, at LSFO-spild primært vil påvirke organismer, der er knyttet til havoverfladen, bl.a. havfugle og sæler, samt organismer der er knyttet til tidevandszonen (fx alger, ålegræs, fiskeyngel, muslinger, krebsdyr, børsteorme m.fl.), i og med at olierne forblev på havoverfladen og ikke kom ned i vandsøjlen.

Yderligere detaljer fra projektet kan findes i Fritt-Rasmussen et al. 2023.

2.2 "New low sulphur fuels, fate and behavior in cold water conditions" - PAME/EPPR-projekt

I Arktisk Råd regi er der stor bevågenhed i forhold til anvendelse af LSFO i arktiske farvande. Derfor blev der i oktober 2020 initieret et Arktisk Råd projekt (kombineret PAME- og EPPR-godkendt projekt, "New low sulphur fuels, fate and behavior in cold water conditions") med det formål at øge vidensgrundlaget om toksicitet og sammensætning af LSFOer i kolde arktiske farvande. Kystverket i Norge leder projektet.

DCE har på vegne af Kongeriget Danmarks PAME- og EPPR-delegationer deltaget som ekspert i projektet. DCE har løbende deltaget i projektets møder og har efterfølgende afleveret de vigtigste punkter på e-mail eller ved online møder til Kongeriget Danmarks PAME og EPPR Head of Delegations. I februar 2024 blev der afholdt en workshop, hvor både forskere og industri var samlet. DCE deltog i workshoppen.

PAME/EPPR-projektet har bl.a. kortlagt, hvilke LSFOer der benyttes på skibe, som besejler de arktiske farvande, med henblik på at sikre behørig beredskabsplanlægning og bekæmpelsesstrategier ved et LSFO-spild på havet. Kortlægningen bygger på ASTD-data (Arctic Ship Traffic Data) og tilhørende

VPS-bunkerolie-data (Veritas Petroleum Services) fra 2019. Analysen konkluderer, at der er stor variation med hensyn til viskositet, densitet og stivnepunkt af de forskellige LSFOer, som anvendes som skibsbrændstof i Arktis. Disse omfatter VLSFO (0,5 %S) og ULSFO (0,1 %S) (hhv. Very og Ultra Low Sulphur Fuel Oil). Størstedelen af VLSFO og ca. ⅓ af ULSFO, der anvendes i arktiske farvande, falder ind under HFO-definitionen (43.1.2 i MARPOL Annex I), og vil være forbudt, når den nye IMO-regel 43A træder endelig i kraft i 2029 (internationalt forbud mod brug af HFO i Arktis). Men det betyder på den anden side også, at ikke alle residuale brændstoffer (både ULSFO og VLSFO), som tidligere er benyttet i Arktis, vil blive forbudt. En anden vigtig konklusion fra analysen er, at stivnepunktet er højt for de fleste af olierne. Dette betyder, at olien i mange tilfælde vil stivne til en fast masse, når den kommer i et koldt havmiljø og derved begrænse eller ikke muliggøre, at spildet kan bekæmpes med eksisterende udstyr. Resultaterne er samlet i en fælles PAME- og EPPR-rapport (PAME & EPPR 2024).

En anden del af projektet bestod i at kortlægge fysiske og kemiske egenskaber for en række LSFOer, som er relevante for de arktiske områder og som ikke tidligere er testet. Flere forskellige LSFOer (WRG (<0.05 % S), en MGO (<0.1 % S) og en VLSFO Belgium 1 (<0.5 % S)) blev analyseret for de samme parametre i forskellige laboratorier (Norge, Sverige, USA, Canada og Kina). En fælles protokol for analyser og metoder blev udviklet og godkendt i projektet (Daling et al. 2021). Efterfølgende blev yderligere laboratorietest gennemført i Norge og Canada på fire nye LSFOer (VLSFO Canada (<0.05 % S), ULSFO (<0.01 % S), VLSFO Belgium 2 (<0.05 % S) og VLSFO Latvia (<0.05 % S)) på baggrund af metoder, som er beskrevet i Faksness et al. (2024b). En særlig udfordring var at måle viskositeten, da olierne bliver faste, når temperaturen falder, hvilket igen hænger sammen med LSFOernes høje stivnepunkter. Generelt viste det sig at være vanskeligt at gennemføre samtlige analyser i protokollen ensartet på alle de involverede laboratorier. Resultater for måling af voksindhold, stivnepunkt og viskositet var især følsomme overfor metodevalget. Analyserne ved de forskellige laboratorier viste også, at det var svært at sammenligne toksicitetseffekter, og det foreslås derfor at beregne *toxic units* i stedet for.

Flere detaljer kan findes i en række rapporter der beskriver analysemetoder (Daling et al. 2021, Faksness et al. 2024b) og resultater (Faksness and Daling 2023, Faksness et al. 2024a.).

Overordnet blev projektet forsinket pga. pausen i Arktisk Råd samt covid-19 og deraf afledte forsinkelser i laboratorier. Det afsluttende arbejde på en samlet rapport inklusive anbefalinger for hele projektet er derfor påbegyndt i slutningen af august 2024. Projektet forventes afsluttet i maj 2025 og opsummeres i en afsluttende rapport (PAME/EPPR 2025 under forberedelse).

2.3 IMAROS I og II

IMAROS I og II er begge EU-projekter. IMAROS I blev gennemført 2020-21. IMAROS II startede i januar 2024 og løber til og med 2025. DCE deltager i ekspertgruppen i IMAROS II.

I IMAROS I (Improving response capacities and understanding the environmental impacts of new generation low sulphur MARine fuel Oil Spills) blev 13 forskellige LSFOer testet. Alle olierne anvendes i Europa. Oliernes fysiske og kemiske egenskaber samt mulighed for bekæmpelse af spild ved forskellige bekæmpelsesmetoder blev undersøgt i laboratorietest. Resultaterne fra

IMAROS I projektet er bl.a. præsenteret på det norske Kystverkets hjemmeside (https://www.kystverket.no/en/preparedness-and-emergency-response-against-acute-pollution/research-and-development/imaros_eng/).

Undersøgelsen viste, at oliernes viskositet varierede betydeligt. Viskositet er en vigtig faktor for, hvordan et olieudslip opfører sig i havmiljøet. En anden væsentlig faktor, der påvirker spredningen af et olieudslip, er oliens stivnepunkt. Karakteriseringen af de testede LSFOer viste, at stivnepunktet varierede fra -9 til 30 °C. Når olien forvitres på havet, vil stivnepunktet stige yderligere. Nogle af de undersøgte LSFOer dannede ikke en fast sammenhængende masse (klump), men mange små klumper, som er sværere at opsamle med eksisterende udstyr og metoder.

IMAROS-projektets resultater indikerede, at størstedelen af LSFOerne vil forblive på havoverfladen, da oliernes densitet var mellem 0,91 og 1,00 ved både 5 og 15 °C. Fordampningstests viste desuden en maksimal fordampning på 30 %, hvilket betyder, at størstedelen af olien forbliver på havoverfladen.

Projektet testede også potentialet for mekanisk opsamling, kemisk dispergering og *in-situ* afbrænding af spild på havoverfladen. På grund af den store variation i viskositet og stivnepunkt mellem olierne, både i frisk og forvitret tilstand, er valget af mekanisk skimmer til at opsamle olien fra overfladen afgørende, da nogle olier stivner øjeblikkeligt, mens andre forbliver højviskøse og klæbrige. Ingen af de testede skimmere fungerede optimalt, men projektet udelukker ikke, at andre skimmere kunne være bedre egnet til LSFOer, samt at forskellige tilpasninger kunne løse nogle af udfordringerne. En særlig udfordring var oliens dårlige adhesion til og bevægelse mod skimmerne. Forsøgene med afbrænding af LSFOer viste, at denne metode er vanskelig på grund af de operationelle forhold på havet. Desuden udviste olierne en meget lav grad af dispergerbarhed, især efter forvitring (fordampning og dannelse af emulsion med havvandet).

2.4 Andre studier med LSFO

I Norge er der i de seneste år gennemført en række tests på LSFOer i forskellige projekter. Nedenfor er resultaterne fra disse studier opsummeret, men de citerede rapporter bør konsulteres for detaljer.

Sørheim et al. (2020) kortlagde de fysiske og kemiske egenskaber for tre forskellige LSFOer. De fandt, som også vist i andre projekter, lav fordampning, højt stivnepunkt mellem 3 og 24 °C, stigende viskositet med faldende temperatur og dannelse af stabile vand-i-olie emulsioner. Disse karakteristika vil have negativ indflydelse på muligheden/effektiviteten af mekanisk oprensning af et oliespild. I forhold til dispergerbarhed sås en variation mellem forskellige dispergeringsmidler, og generelt vurderedes det, at dispergerbarheden var lav for de tre testede olier, både friske og forvitrede. Simulering af oliernes skæbne i havmiljøet ved forskellige vindhastigheder viste overordnet, at olierne forblev på havoverfladen.

Hellstrøm et al. (2017) er en opsummerende rapport over en række studier med bl.a. LSFOer. Test med disse LSFOer viste, at de ved spild på havet forventes at kunne opsamles ved brug af mekaniske metoder, både friske og forvitrede olier. Studiet angiver, at skimmertype til den mekaniske opsamling skal vælges ud fra LSFO/emulsionernes forventede viskositet. For nogle af olierne vil en yderligere udfordring være LSFOernes høje stivnepunkt og

afledte tilbøjelighed til at stivne ved spild på havet. For de testede olier konkluderer rapporten, at kemisk dispergering kun bør udføres, umiddelbart efter et spild er sket, og mens viskositeten af emulsionerne er lav. En højere dosering af dispergeringsmiddel var mindre effektiv for de testede olier end successiv dispergering (flere påføringer af dispergeringsmiddel). Øget energi (fx vind eller bølger) viste sig at bidrage til øget dispergering af olierne. I forhold til afbrænding (*in-situ* burning) viste resultaterne, at metoden kun har et lille potentiale, særligt pga. oliernes højere *flash point* (temperatur hvor dampe fra olien kan antændes) samt LSFOernes evne til at danne emulsioner.

Toksicitetstests med WAF (water accommodated fractions dvs. den del af olien der opløses i vandet) af olierne er også gennemført (Faksness & Altin 2017). Den akutte toksicitet, udtrykt som TU (toxic unit), blev beregnet på baggrund af den kemiske sammensætning af WAF og Kow (et mål for stoffers fedtopløselighed) for de enkelte komponenter. En $TU > 1$ for den samlede WAF antyder, at olien forventes at forårsage mere end 50 % dødelighed hos testorganismene. For alle LSFOerne testet, inkl. forvitrede olier, var TU under 1, og de havde de mindst toksiske WAF'er.

Holt et al. (2017) beskriver forskellige mekaniske oprensningssystemer testet på bl.a. LSFO under forhold, der svarer til norske sommer- og vintertemperaturer. Både test med et tykt olielag og test i en flydespærrer på en strømmende vandoverflade blev gennemført. Adhæsionsbånds-, børste- og skive-skimmere blev testet. Resultaterne viste, at for nogle af olierne fungerede alle de forskellige skimmere, men for andre af olierne var opsamlingen enten dårlig eller kraftigt reduceret.

3 Eksperimentelt arbejde

3.1 Udvælgelse af olier til undersøgelser

De tre LSFOer, som er inkluderet i undersøgelserne i dette projekt, er udvalgt på baggrund af deres forskelligartede fysiske og kemiske sammensætning. Det er generelt meget vanskeligt at få adgang til olier til eksperimentelt arbejde. Olierne er modtaget med hjælp fra kontakter i Kystverket, Norge. Olierne er også benyttet i tidligere projekter, for at sikre synergi (Fritt-Rasmussen et al. (2023) og Tabel 3.1).

Alle olierne er benyttet som friske olier uden yderligere forvitring. Derudover er der i nogle af undersøgelserne anvendt afbrændingsrester fra olierne og kemisk dispergeret olie.

De tre LSFOer er:

WRD (Wide Range Diesel Oil (*andre navne* Wide Range Gas Oil/Marine Distillate Oil) består af <30 % residual olie og >70 % diesel, og er et destillatbrændstof.

ULSFO (Ultra Low Sulphur Fuel Oil, Shell 2018). ULSFO 2018 er en residualolie med en høj densitet og stivnepunkt.

HDME50 (Heavy Distillate Marine ECA 50). HDME50 er et destillatbrændstof med en mindre del af asfaltener.

For at kunne sammenligne LSFOerne med konventionelle olier, er også en arktisk dieselolie (AGO) inkluderet i undersøgelserne. I EOS-analyserne er der endvidere også inkluderet en tung bunker olie (IFO180) for sammenligning.

Udvalgte fysiske og kemiske egenskaber for de olier, der indgik i undersøgelserne, er vist i nedenstående Tabel 3.1. Figur 3.1 viser GC-FID kromatogrammerne for olierne fra nC5-alkaner til nC35-alkaner som systematiske smalle toppe.

Faktaboks

Viskositeten er et udtryk for oliens modstand mod at flyde. Viskøse olier har en såkaldt ikke-newtonsk opførsel, dvs. viskositeten af olien ændres af en fysisk påvirkning fx af bølger. Det betyder, at en olie spildt på havet under turbulente forhold kan være flydende, men ved roligere forhold bliver olien meget mere viskøs (Øksenvåg et al. 2021). For viskositet er derfor angivet to værdier ved forskellige forskydningshastigheder (shear rate).

Stivnepunktet (pour point) er den temperatur, hvorved olien stivner/ikke kan hældes. Stivnepunktet giver således information om brændstoffets adfærd (fx fast eller ej) ved forskellige havtemperaturer. Stivnepunktet er relateret til oliens voksindhold. Når temperaturen falder, krystalliserer vokserne i olien, og den krystallinske voksstruktur forhindrer at olien er flydende. Olier med oprindelse i voksagtige og paraffinholdige råolier vil højst sandsynligt have et højt stivnepunkt (Moldestad & Daling 2006).

Flammepunktet er et standardiseret mål for den laveste temperatur, ved hvilken olien afgiver dampe i en tilstrækkelig mængde, så der dannes en antændelig damp/luftblanding.

Densiteten eller oliernes specifikke massefylde er mål for, hvor tung olien er i forhold til, hvor meget den fylder. Oliers massefylde er som regel under 1, hvilket betyder at de er lettere end vand og flyder på havoverfladen.

Voksindholdet (paraffin) er en vigtig parameter, der bl.a. påvirker oliens viskositet.

Asfaltener er komplekse non-polære forbindelser, der findes i olie, og som kan have betydning for bl.a. stabilitet af en vand-i-olie emulsion. Tunge olier har typisk et højt indhold af asfaltener.

Tabel 3.1. Fysiske og kemiske egenskaber for olierne i projektet

| | WRD ¹ | ULSFO ³ | HDME50 ⁵ | AGO ⁷ | IFO180 ⁸ | |
|--|----------------------|---------------------------|--------------------------|--|---------------------|------------------|
| | | | | | IFO380 | MGO |
| Densitet v. 15 °C | 0,872 g/ml | 0,917 g/ml | 0,903 g/ml | 0,81 – 0,84 g/ml | 0,979 g/ml | 0,820-0,860 g/ml |
| Stivnepunkt | -15 °C | 24 °C | 12 °C | | -6 °C | |
| Flammepunkt | >100 °C ² | 85 °C | 186 °C | 61,0 °C | 114 °C | 61 °C |
| Svovlindhold | 0,042 % | 0,1 % | 0,1 % | 10 mg/kg | 1,90 % | |
| Viskositet v. 5 °C (10 s ⁻¹) | 102 mPa/s | 42.029 mPa/s ⁴ | 5.045 wt. % ⁶ | 1,5 – 3,0 mm ² /s (v. 40 °C) | n.a. | n.a. |
| Viskositet v. 5 °C (100 s ⁻¹) | 92 mPa/s | 9.678 mPa/s ⁴ | 2.472 wt. % ⁶ | n.a. | n.a. | n.a. |
| Asfalten-indhold | 0,01 wt. % | 0,14 wt. % | 0,062 | n.a. | n.a. | n.a. |
| Voksindhold | 4,74 wt. % | 20,7 wt. % | 9,52 | n.a. | n.a. | n.a. |

n.a. data ikke tilgængelig

¹Marine distillate oil, 23 February 2021, ExxonMobil. Denne olie var også inkluderet i studier med skæbne og opførsel på kysten (Øksenvåg et al. (2021) med prøvenavn SINTEF ID 2021-361-S2 FRESH (WRG/MSD)). Alle værdier er fra Øksenvåg et al. (2021), bortset fra ²Sørheim and Daling (2020).

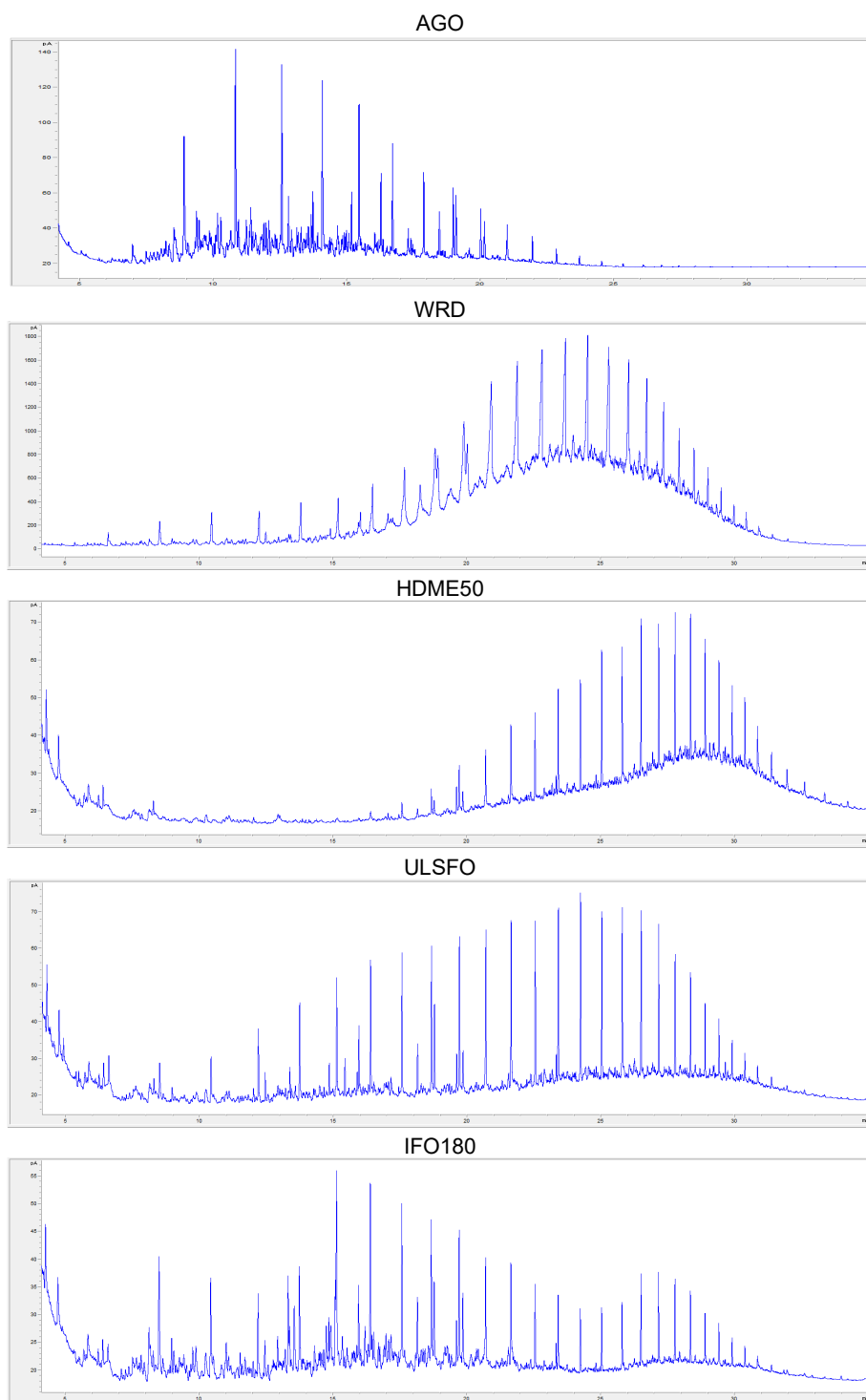
³RMD80 0.1%, 18. februar 2018, Rubis terminal, Rotterdam, Netherlands. Olien var også en del af studierne i Sørheim et al. (2020) med prøvenavn SINTEF ID: 2019-11170. Alle værdier fra Sørheim et al. (2020) bortset fra ⁴Øksenvåg et al. (2021).

⁵ExxonMobile Premium HDME50. Olien var også inkluderet i Hellstrøm (2017), Hellstrøm et al. (2017) og Fakness and Altin (2017), med prøvenavn SINTEF ID: 2016-0231. Egenskaber fra en anden batch er angivet fra Hellstrøm (2017) bortset fra ⁶Øksenvåg et al. (2021), da der kun foreligger begrænset information fra oliens dataark (MSDS).

⁷Alle værdier er angivet fra produktspecifikationer angivet af Polar Oil.

⁸IFO180 benyttet i projektet er leveret af Polar Oil. Det er en blanding af IFO380 og marin diesel, blandet af Polar Oil, og den møder specifikationerne for IFO180 (viscosity < 180 cS at 50 °C). Der eksisterer ikke et specifikt analysecertifikat for denne olie. Derfor er værdierne i tabellen for olierne inkluderet i IFO180 blend og skal ses som eksempel for IFO180. Alle værdier er angivet fra produktspecifikationer angivet af Polar Oil.

Figur 3.1. GC-FID (Gas Chromatography Flame Ionization Detector) kromatogrammer for AGO, WRD, HDME50, ULSFO og IFO180. For HDME50, ULSFO og IFO180, er den første del af kromatogrammerne op til 7 minutter, udslag for solventen og er ikke del af olierne. Kromatogrammerne viser n-alkaner som systematiske smalle toppe, hvor de første toppe er fra forbindelser med det laveste kogepunkt. Mere komplekse forbindelser ses som uklare bump under toppene (ofte kaldet 'Unresolved Complex Mixture'). Figurerne er også vist i rapporten Fritt-Rasmussen et al. (2023).



3.2 Udvalgelse af testorganismer

Fra et tidligere studie (Fritt-Rasmussen et al. 2023) blev følgende konkluderet på baggrund af laboratorietests med en række LSFOer: *'The main challenge for many of the new generation of LSFOs (both VLSFOs and ULSFOs) is that many (but not all) have a high pour point and viscosity and therefore high persistence in the marine environment, which may limit the effectiveness of the different response options. Our results indicate that the LSFOs tested likely have a high degree of persistence on the sea surface and shoreline even when chemical dispersion or in-situ burning is attempted. Hence, overall the results of this small-scale study suggest that the next step in investigating potential toxic effects should focus on organisms associated with the sea surface, e.g., seabirds, and shoreline organisms such as blue mussels (Mytilus edulis) and tidal vegetation (Fucus spp.)'*.

Andre studier har også vist, at LSFO har stor persistens på havoverflade og kyster (IMAROS, www.kystverket.no/en/preparedness-and-emergency-response-against-acute-pollution/research-and-development/imaros_eng/).

På den baggrund blev der derfor konkluderet, at de mest relevante organismer at undersøge for påvirkning ved LSFO-spild er organismer ved havoverfladen og organismer i tidevandszonen. I projektet er der derfor gennemført undersøgelser af effekter af forskellige LSFOer på arktiske fuglefjer (afsnit 4.4) og korttidseffekter på muslinger og tang (afsnit 4.1 og 4.3) og langtidseffekter på muslinger (afsnit 4.2). Derudover er der gennemført en kort teoretisk vurdering af toksicitet og bioakkumulering af LSFO i højarktiske vandløpper ud fra indholdet af polyaromatiske hydrocarboner (PAHer) i olierne (afsnit 4.5).

3.3 Eksperimentelle undersøgelser

Der er i projektet gennemført en række eksperimentelle undersøgelser, som omfatter toksiske og fysiske effekter af LSFOer, og med AGO som referenceolie. Finasol 52, der anvendes som kemisk dispergeringsmiddel af oliespild i havmiljøet, er også inkluderet i nogle af undersøgelseerne.

1. *Akut toksicitet af LSFO på muslinger.* Undersøgelse af akut toksicitet på blåmuslinger (*Mytilus edulis*) af hhv. olie i vand (WAF) og dispergeret olie (CWAF) af olierne: AGO, WRD, HDME50. Dispergeringsmidlet Finasol 52 blev benyttet til at fremstille CWAF.
2. *Kronisk toksicitet af LSFO på muslinger.* Undersøgelse af kronisk toksicitet på blåmuslinger (*Mytilus edulis*) af hhv. WAF og CWAF af olierne: AGO, WRD, HDME50. Dispergeringsmidlet Finasol 52 blev benyttet til at fremstille CWAF.
3. *Akut toksicitet på tang.* Undersøgelse af akut toksicitet på klørtang (*Fucus disticus*) af hhv. WAF og CWAF af olierne: AGO, WRD, HDME50, ULSFO. Dispergeringsmidlet Finasol 52 blev benyttet til at fremstille CWAF.
4. *Effekter og skader af oliespild på fjer fra arktiske havfugle.* Undersøgelser af effekter og skader på fjer af polarlomvie- (*Uria lomvia*) og ederfugl (*Somateria mollissima*) af olierne: AGO, WRD, HDME50, ULSFO, samt afbrændingsrester fra WRD og ULSFO.

Sammendrag af resultaterne af de gennemførte studier er givet i kapitel 4. Desuden vil resultaterne blive publiceret i videnskabelige tidsskrifter (Fritt-Rasmussen et al. 2025 under forberedelse og Gustavson et al. 2025a og b under forberedelse).

4 Sammen drag af resultater

Følgende er et sammen drag af resultaterne fra de gennemførte undersøgelser af LSFOers toksiske effekter på muslinger og tang, samt oliernes effekter og skader på fuglefjer.

4.1 Akut toksicitet af LSFO på muslinger

Akut toksicitet af LSFOerne og AGO som reference blev undersøgt på blåmuslinger (*Mytilus edulis*) indsamlet i tidevandzonen ved Arktisk station på Disko i Vestgrønland. Undersøgelserne blev gennemført i laboratorier på Arktisk Station, Grønland.

I undersøgelserne blev muslingerne eksponeret for hhv. WAF (Water Associated Fraction) og CWAF (Chemically-enhanced water accommodated fractions). WAF er den andel af olien, som ved langsom omrøring kan blive opløst naturligt i havvand, mens CWAF er den andel af olie, som ved tilsætning af kemisk dispergeringsmiddel kan nedblandes i havvand. Finasol 52 blev benyttet som dispergeringsmiddel. Typisk er det kun en mindre del af olien, som naturligt kan opløses eller dispergeres i havvand. Bekæmpelse af olie på havoverfladen kan foretages via kemisk dispergering af olien. Det kemiske dispergeringsmiddel sprøjtes på olien, og ved hjælp af bølge- og vindenergi vil olien dispergere ned i vandsøjlen. Koncentrationen af olie i WAF- og CWAF-opløsningerne i undersøgelserne var ikke overraskende markant højere for CWAF- end i WAF-opløsningerne.

Muslinger har et unikt og effektivt filtreringssystem over gællerne. En musling på 2 cm kan fx filtrere mere end 1 liter havvand i timen. Udover at gællerne sikrer ilttilførslen til muslingen, er gællerne også et meget effektivt filtreringssystem til opsamling af fødepartikler (typisk planktonalger) i havvandet. Effekterne på muslingerne fra olieeksponeringen er målt ved at måle muslingernes ændring af fødeoptagelsesraten.

Undersøgelserne viste, at fødeoptagelsesraten var markant hæmmet ved de to højeste koncentrationer af AGO (WAF og CWAF). For LSFOerne var fødeoptagelsesraten også hæmmet ved de højeste tilsætninger af CWAF (for WRD og HDME50) og WAF (HDEM50).

Toksiciteten af dispergeringsmidlet Finasol 52 blev også undersøgt. Der var en meget stor effekt af dispergeringsmidlet alene. Dette kan være en del af forklaringen på den øgede toksicitet af CWAF i forhold til WAF. Den høje toksicitet af dispergeringsmidlet alene indikerer, at anvendelse af dispergeringsmidler skal ske med stor forsigtighed i forhold til beskyttelse af dyreliv.

For yderligere detaljer henvises til Gustavson et al. (2025a under udarbejdelse).

4.2 Kronisk toksicitet af LSFO på muslinger

Kronisk toksicitet af LSFOerne med AGO som reference blev undersøgt på blåmuslinger (*Mytilus edulis*) indsamlet i tidevandszonen på lavt vand ved Arktisk station på Disko i Vestgrønland. Undersøgelserne blev gennemført i laboratorier ved Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience.

I undersøgelserne blev muslingerne eksponeret for hhv. WAF (Water Associated Fraction) og CWAF (Chemically-enhanced water accommodated fractions). Som beskrevet i 4.1 er WAF den andel af olien, som ved langsom omrøring naturligt kan blive opløst i havvand, mens CWAF er den andel af olie, som ved tilsætning af kemisk dispergeringsmiddel kan nedblandes i havvand. Finasol 52 blev benyttet som dispergeringsmiddel. Typisk er det kun en mindre del af olien, som naturligt kan opløses eller dispergeres i havvand. Bekæmpelse af olie på havoverfladen kan fortages via kemisk dispergering af olien. Det kemiske dispergeringsmiddel sprøjtes på olien, og ved hjælp af bølge- og vindenergi vil olien dispergere ned i vandsøjlen, og organismer, der lever i vandsøjlen, vil således kunne eksponeres for den dispergerede olie.

Muslinger har et unikt og effektivt filtreringssystem over gællerne. En musling på 2 cm kan fx filtrere mere end 1 liter havvand i timen. Udover at gællerne sikrer ilttilførslen til muslingen, er gællerne også et meget effektivt filteringsystem til opsamling af fødepartikler (typisk planktonalger) i havvandet. Effekterne af olierne på muslingerne er målt ved at måle muslingernes påvirkning på fødeoptagelsesraten over 14 dage og for forskellige koncentrationer.

Undersøgelserne viste, at der er en sammenhæng mellem hæmningen af fødeoptagelsesraten og de WAF- og CWAF-koncentrationer muslingerne blev eksponeret for. Mest markante effekter sås for CWAF og dispergeringsmidlet selv. Hæmningen af fødeoptagelsesraten var stort set den samme, efter muslinger blev overført til rent vand. Dette indikerer, at effekterne er kroniske, enten fordi skaderne på muslinger ikke var reversible, eller oliestofferne blev akkumuleret i muslingerne under eksponeringen, der dermed gav anledning til fortsat belastning af muslingerne.

For yderligere detaljer henvises til Gustavson et al. (2025b under udarbejdelse).

4.3 Akut toksicitet på tang

Akut toksicitet af LSFOerne og AGO som reference blev undersøgt på klørtang (*Fucus distichus*) indsamlet i tidevandszonen ved Arktisk station på Disko i Vestgrønland. Undersøgelserne blev gennemført ved Arktisk Station.

En stor andel af olie spildt i havet forbliver på havoverfladen. Organismer knyttet til havoverfladen, på lavt vand og i tidevandszonen, vil være særligt eksponeret for spild, herunder forskellige arter af klørtang, som er meget udbredt i tidevandszonen og på lave vanddybder i arktiske farvande.

I undersøgelserne blev skudspidser af klørtang eksponeret for hhv. WAF (Water Associated Fraction) og CWAF (Chemically-enhanced water accommodated fractions). WAF er den andel af olien, som ved langsom omrøring naturligt kan blive opløst i havvand, mens CWAF er den andel af olien, som ved tilsætning af kemisk dispergeringsmiddel kan nedblandes i havvand. Finasol 52 blev benyttet som dispergeringsmiddel.

Effekter af olierne og dispergeringsmidlet blev undersøgt ved at måle tangens fotosynteseaktivitet. Fotosynteseaktiviteten blev bestemt ved at måle på indbygningen og optagelsen af ¹⁴C-mærket bikarbonat i skudspidserne over 2 timer efter spidserne havde været eksponeret i 12 timer for WAF, CWAF eller Finasol 52. Undersøgelserne viste, at fotosynteseaktiviteten på skudspidser var markant hæmmet af dispergeringsmidlet og CWAF fra WRD. Effekterne af de øvrige eksponeringer var i forhold til kontroller ikke signifikante.

For yderligere detaljer henvises til Gustavson et al. (2025a under udarbejdelse).

4.4 Effekter og skader af oliespild på fjer fra arktiske havfugle (lomvie og ederfugl)

Undersøgelserne af effekter og skader fra oliespild og afbrændingsrester på fjer fra arktiske havfugle blev udført i laboratorieforsøg, Aarhus Universitet, Institut for Ecoscience.

I undersøgelserne blev effekter og skader på fjer fra arktiske havfugle (lomvie og ederfugl) undersøgt ved eksponering af fjer for oliefilm fordelt på en vandoverflade i et glastestkar i laboratoriet. I undersøgelserne benyttedes følgende friske olier: AGO, WRD, HDME50, ULSFO, samt afbrændingsrester fra WRD og ULSFO. Afbrændingsresterne var fra et laboratorieforsøg, hvor bekæmpelsesmetoden med afbrænding af olien på vandoverfladen, blev testet (Fritt-Rasmussen et al. 2023). Effekter og skader på fuglefjerene efter eksponering blev kvantificeret i mikroskop ved bestemmelse af et såkaldt Amalgamation Index, samt ved at måle fjerens optag af vand og/eller olie (fjerens vægtstigning).

Undersøgelserne viste, at eksponering for alle de undersøgte olier og afbrændingsrester forårsagede effekter og skader på fjerene. ULSFO og WRD resulterede i flere effekter på havfuglefjerene sammenlignet med AGO. For HDME50 var resultaterne mindre tydelige i forhold til, om effekter og skader på fuglefjerene var mere omfattende end for AGO. Undersøgelserne viste desuden, at eksponering af fuglefjerene for afbrændingsrester ikke resulterede i signifikant flere effekter og skader på fjerene sammenlignet med eksponering for den tilsvarende friske olie. Dog sås de betydeligste skader på de fjer, der blev eksponeret for afbrændingsrester.

For yderligere detaljer henvises til Fritt-Rasmussen et al. (2025 under udarbejdelse).

4.5 Ophobning af svært nedbrydelige olieforbindelser i arktiske fødekæder

For at vurdere en evt. effekt af olie i vandsøjlen, er der på baggrund af oliernes kemiske sammensætning gennemført en teoretisk risikovurdering for arktiske vandløpper ved eksponering til olieforbindelser fra LSFO.

Arktiske organismer har et meget højt indhold af fedt, som er resultatet af en tilpasning til de lave temperaturer og de store sæsonvariationer i tilgængelighed af føde. Vandløpper er en nøgleart i de arktiske økosystemer, da de er fødegrundlag for fisk, havfugle og hvaler. Fedtindholdet i arktiske vandløpper kan være helt op til 50 % af deres vægt. En del af olie er svært nedbrydelige forbindelser, de såkaldte tjæreforbindelser (PAH – Polyaromatiske Hydrocarboner). Disse PAH'er kendetegnet ved at være fedtopløselige og udgør derfor en risiko for ophobning i arktiske organismer med et højt fedtindhold. PAH-

forbindelser har både akutte og kroniske toksiske egenskaber. De er bl.a. kræftfremkaldende, og kan påvirke immunforsvaret. For PAH-forbindelser ophobet i vandløpper er der derfor stor risiko for at PAH-forbindelser overføres og ophobes i de arktiske fødekæder.

Risikoen for ophobning i organismer og fødekæder afhænger af PAH-forbindelsernes molekylvægt og deres fedtopløselighed. Log Kow er et mål for stoffernes fedtopløselighed og dermed for deres evne til ophobning og bioakkumulering i fedtvæv hos organismer, bl.a. arktiske vandløpper. En højere log Kow betyder højere fedtopløselighed for det pågældende stof.

Risikoen for ophobning af PAH-forbindelser i arktiske organismer og fødekæder er vurderet ud fra PAH-sammensætningen og -indholdet i LSFOerne. I risikovurdering vurderes log Kow for de enkelte PAH-forbindelser samt PAH-koncentrationerne ($\mu\text{g/g}$) målt i de forskellige LSFOer inkluderet i dette studie (Tabel 4.1).

Ud fra oliernes indhold af PAH-forbindelser og disses log Kow værdier (Tabel 4.1) ses den største risiko for ophobning i arktiske organismer ved spild i havmiljøet af IFO180, ULSFO og AGO. WRD har et generelt lavt indhold af PAH-forbindelser og deraf tilsvarende lav risiko i forhold til ophobning af PAH-forbindelser i arktiske organismer (Tabel 4.1). For olierne ses en stigning af de mest fedtopløselige PAH-forbindelser (høj log Kow) ved afbrænding.

Tabel 4.1. Koncentrationen af PAHer i de forskellige olier ($\mu\text{g/g}$) og deres tilhørende log Kow. Log Kow fra Stogiannidis & Laane (2015).

| | Antal aroma- tringe | Log Kow | FO180 | HMDE50 | WRD | Residue WRD | ULSFO | Residue ULSFO | AGO | Residue AGO |
|---------------------------|------------------------|---------|--------|--------|------|----------------|-------|------------------|------|----------------|
| Naphthalene | 2 | 3,4 | 675 | 51,9 | 12 | 20,1 | 79 | 10,5 | 449 | 32,6 |
| 2-Methylnaphthalene | 2 | 4,4 | 2213 | 42,9 | 13 | 10,6 | 207 | 10,7 | 189 | 28,8 |
| 1-Methylnaphthalene | 2 | 3,9 | 1294 | 37,8 | 12,7 | 12,6 | 132 | 10,8 | 239 | 29,4 |
| Dimethylnaphthalener | 2 | 4,9 | 4953 | 236 | 61,5 | 28,6 | 1012 | 60,4 | 530 | 133,6 |
| Trimethylnaphthalener | 2 | 5,6 | 2088 | 253 | 59,5 | 17,1 | 1017 | 63,7 | 200 | 128,2 |
| Acenaphthylene | 2+ | 4,1 | 41,4 | 2,04 | 0,20 | 40,5 | 14,7 | 15,1 | 4,74 | 80,9 |
| Acenaphthene | 2+ | 3,9 | 123 | 8,49 | 1,41 | 4,76 | 40,4 | 4,57 | 19 | 19,4 |
| Fluorene | 2+ | 4,2 | 154 | 49 | 18,6 | 8,18 | 38,4 | 5,75 | 16,7 | 30,2 |
| Dibenzothiophen | 2 | 4,3 | 60,9 | 1,89 | 0,28 | 1,31 | 10,4 | 0,75 | 1,91 | 2,05 |
| Phenanthrene | 3 | 4,5 | 439 | 129,3 | 1,53 | 69,9 | 109 | 22,3 | 11,6 | 48,4 |
| C1-Phenanthrener | 3 | 5,1 | 1377 | 465 | 54,9 | 115 | 693 | 76,1 | 45,1 | 105 |
| C2-Phenanthrener | 3 | 5,5 | 1579 | 798 | 106 | 212 | 2194 | 252 | 68,8 | 170 |
| C3-Phenanthrener | 3 | 6,1 | 115 | 102 | 27,6 | 35,4 | 412,6 | 55,9 | 6,42 | 18,4 |
| Anthracene | 3 | 4,5 | 46,4 | 15,1 | 0,76 | 28,9 | 8,49 | 8,53 | 2,97 | 9,61 |
| Fluoranthene | 3+ | 5,2 | 14,6 | 8,96 | 0,87 | 35,6 | 31,6 | 12,9 | 0,28 | 19,6 |
| Benzo(a)fluorene | 3+ | 5,9 | 45,1 | 32,9 | 0,68 | 19,4 | 141 | 23 | 1,43 | 9,34 |
| Pyrene | 4 | 5,2 | 69,1 | 49,4 | 2,43 | 60,5 | 231 | 40,1 | 1,38 | 41,1 |
| 1-Methylpyrene | 4 | 5,5 | 70,8 | 42 | 3 | 19,1 | 252 | 40,4 | 1,07 | 9,40 |
| Benzo(a)anthracene | 4 | 5,9 | 37,4 | 0,64 | <DL | 21,5 | 110 | 29,4 | 0,05 | 8,61 |
| Chrysene/triphenylene | 4 | 5,9 | 84,4 | 38,4 | 2,3 | 36,4 | 232 | 60,6 | 0,45 | 8,42 |
| Benzo(b+j+k)fluoranthener | 5 | 5,8 | 20,7 | 14,7 | 0,06 | 31,3 | 34,9 | 25,6 | 0,08 | 10,1 |
| Benzo(e)pyrene | 5 | 6,0 | 27,7 | 22,7 | 0,23 | 15,7 | 76,7 | 46,1 | 1,05 | 3,48 |
| Benzo(a)pyrene | 5 | 6,0 | 19,7 | 2,99 | 0,75 | 26,8 | 48,1 | 33,7 | 0,02 | 7,47 |
| Perylene | 5 | 6,3 | 9,32 | 7,08 | 0,18 | 5,79 | 18,9 | 11,5 | 0,01 | 1,71 |
| Indeno(1,2,3-cd)pyrene | 5+ | 7,1 | 2,14 | 1,97 | <DL | 16,5 | 6,58 | 15,9 | <DL | 4,22 |
| Dibenz(a,h)anthracene | 6 | 6,8 | 5,5 | 1,31 | 0,06 | 1,18 | 11,8 | 9,9 | <DL | 0,33 |
| Benzo(ghi)perylene | 6 | 6,5 | 10,2 | 7,52 | 0,14 | 18,9 | 28 | 38,3 | 0,01 | 5,18 |
| SumPAH | | | 15.575 | 2.415 | 381 | 913 | 7.190 | 984 | 1789 | 965 |

4.6 EOS analyse

En EOS-analyse (Environment & Oil Spill Response analyse) blev udført på baggrund af viden om LSFOer. Gennem EOS-analysen opnås en miljømæssig, scenariebaseret vurdering af effekterne fra LSFO-spild og relaterede bekæmpelsesstrategier på de forskellige dele af havmiljøet, sammenholdt med konventionelle olietyper. EOS-analysen er en skrivebordsanalyse, og baseres på olieudslipsscenarioer og den eksisterende viden om biodiversitet og miljø i det område, som analysen udføres for.

Som case benyttedes 1000 m³ brændstof spildt på Store Hellefiskebanke i Disko bugt området i Vestgrønland. Dette område er biologisk vigtigt og passer af relativ meget skibstrafik. Der er tidligere udarbejdet en tilsvarende analyse for Store Hellefiskebanke i relation til råoliespild, hvis data denne EOS-analyse er baseret på (Wegeberg et al. 2016 og Wegeberg et al. 2024). De grundlæggende miljødata og oplysninger om Store Hellefiskebanke er givet i Wegeberg et al. (2016) og i Wegeberg et al. (2024). Tre forskellige LSFOer er inkluderet: WRD (Wide range diesel oil); ULSFO (Ultra Low Sulphur Fuel Oil Shell 2018); og HMDE50 (Heavy Distillate Marine ECA 50). Derudover er IFO180 og AGO (Arctic Gas Oil) inkluderet for at kunne sammenligne med konventionelle olier. Resultaterne fra de forskellige EOS-analyser giver de samme konklusioner for alle olierne inkluderet i analyserne (Figur 4.1).

For alle årstider er både mekanisk oprensning og *in-situ* afbrænding en god mulighed for at bekæmpe olien og derved få en positiv miljøeffekt af bekæmpelsen. Det er *ikke* tilrådeligt at undlade at gøre noget. I forhold til brugen af kemisk dispergeringsmiddel er resultatet fra EOS-analysen ikke entydigt, og før kemisk dispergering evt. tages i brug, skal der inddrages yderligere ekspertvurdering i forhold til den givne situation. Dette skyldes, at der på Store Hellefliskebanke både er sårbare organismer på overfladen men også i vandsøjlen. Ved kemisk dispergering fjernes olien fra overfladen, men blandes ned i vandsøjlen, hvor organismerne vil kunne påvirkes negativt af den dispergerede olie.

På baggrund af de forskellige simuleringer med de forskellige olietyper og EOS-analyser er det tydeligt, at olietyper i denne spildsituation/lokaltet har mindre betydning end tilstedeværelsen af sårbare organismer. Men det er også tydeligt, at LSFOerne er et overfladeproblem, og at dette ikke ændrer sig med øget tid på havoverfladen, sammenlignet med fx AGO, hvor størstedelen af olien efter 3 dage findes enten i vandsøjlen eller på havbunden.

Det skal bemærkes, at EOS-analysen ikke kan anwise, hvilke metoder der operationelt er mest optimale at benytte. Den fulde EOS-analyserapport kan ses i Fritt-Rasmussen & Gustavson (2025).

Figur 4.1. Resultaterne fra EOS-analysen. Resultaterne er de samme uanset olietyper.

| EOS results | | | | |
|-------------|---------------------|---------------------|-----------------|-----------------|
| | Mechanical recovery | Chemical dispersion | In situ burning | Do nothing |
| Spring | OK | Consider | OK | Not recommended |
| Summer | OK | Consider | OK | Not recommended |
| Autumn | OK | Consider | OK | Not recommended |
| Winter | OK | Consider | OK | Not recommended |

5 Miljørisikovurdering af spild og bekæmpelse af lavsvovlholdige skibsbrændstoffer i et arktisk havmiljø – konkluderende bemærkninger

På baggrund af nærværende projekt, men også på baggrund af resultater fra andre projekter (Kapitel 2), er nedenstående miljørisikovurdering ved spild af LSFO i et arktisk havmiljø udarbejdet. Desuden gives anbefalinger på baggrund af vurderingen i forhold til fremtidig forskning og undersøgelser samt fokusområder i relation til bekæmpelse af spild af LSFO.

LSFOer er en gruppe af forskellige skibsbrændstoffer, hvor nogle er destillater og andre er residualolier. Fælles for dem alle er, at de har et lavt svovlindhold. Overordnet har LSFOer meget forskellige egenskaber, hvilket resulterer i forskellige operationelle udfordringer og begrænsninger ved bekæmpelse af oliespild i havmiljøet. For mange af LSFOerne er det påvist, at de har et højt stivnepunkt og derfor vil stivne ved spild i koldt havvand. Sådanne LSFOer vil også have en begrænset naturlig nedbrydning, hovedsageligt på grund af et mindre overfladeareal, hvor nedbrydning kan foregå. En anden udfordring relateres til LSFOernes evne til at danne stabile emulsioner samt oliernes høje viskositet. En stor andel af LSFOerne har en lav naturlig dispergering og forbliver således på havoverfladen.

Spild af LSFOer udgør derfor en særlig stor risiko for overfladelevende organismer såsom havfugle, samt organismer i bølge- og tidevandszone, f.eks. blåmuslinger, brunalger, fiskeyngel mv. Derfor vil risikoen for påvirkning være størst for organismer knyttet til lav vanddybde samt havoverfladen.

EOS-analysen af et teoretisk LSFO-spild ved Store Hellefiskebanke i Grønland viste, at det er den store forekomst af sårbare organismer, der er udslagsgivende for valg af den miljømæssigt bedste bekæmpelsesmetode, frem for viden om de specifikke LSFOer benyttet i analysen. Det skal dog bemærkes, at styrken i EOS-analysen var begrænset af, at de foreliggende modeller ikke er udviklet til at simulere spredningen af LSFO-olierne ved et spild. **De eksisterende spredningsmodeller bør udbygges til også at inkludere LSFOer. Desuden bør det undersøges, om de eksisterende modeller kan udvides til også at inkludere stivnepunktet i modelberegningerne.**

EOS-analysen viste desuden, at der vil være store miljømæssige fordele ved at bekæmpe spild af LSFOer ved mekanisk oprensning og/eller *in-situ* afbrænding (operationelt er der dog generelt store udfordringer ved bekæmpelse af LSFOer). Yderligere ekspertvurdering skal inddrages i forhold til, om det vil være en miljømæssig gevinst at benytte kemisk dispergering. Ved kemisk dispergering fjernes olien fra overfladen, men blandes ned i vandsøjlen og kan have store implikationer for bl.a. fiskeriet efter rejer og fisk ved Store Hellefiskebanke.

Kemisk dispergering har en begrænset effekt (hvis overhovedet nogen) overfor LSFOer, og der kræves typisk højere doser eller successiv dispergering for at opnå en effekt. **De afledte miljøeffekter ved successiv dispergering mangler at blive kortlagt.**

Mekanisk oprensning omfatter mange forskellige teknikker. I forhold til LSFOer begrænses/umuliggøres konventionelle teknikker af emulsionsdannelse og af oliernes høje stivnepunkt og høje viskositet. En særlig udfordring ved mekanisk oprensning er LSFOernes dårlige adhæsion til og bevægelse

mod skimmerne. For at mekanisk oprensning skal være en mulig bekæmpelsesmetode, **bør der gennemføres flere studier med forskellige tilpasninger/andre skimmere, som kan være bedre egnet til opsamling af LSFOer.**

Afbrænding af LSFO-spild på havoverflade kan være en mulighed, især i de første timer/dage efter et spild og før olierne når at forvitre. Afbrænding af oliespild vil give luftforurening og metoden skal vurderes i forhold til afstand til omkringliggende natur, bygder og byer. Enkelte studier har vist, at afbrændingsresterne af LSFO sandsynligvis ikke synker. **Flere studier bør gennemføres for at styrke grundlaget for at vurdere afbrænding som bekæmpelsesmetode i forhold til spild af forskellige LSFOer samt forskellige forvitningsgrader af LSFOer.**

I takt med den forventede stigende skibstrafik i arktiske farvande **er der behov for at styrke vidensgrundlaget for de specifikke brændstoffer, som forventes benyttet i grønlandske farvande, med henblik på anbefalinger i forhold til bekæmpelse.**

Det nuværende vidensgrundlag indikerer, at spild af LSFOer på havet, kan have store og langvarige miljøeffekter, på grund af oliernes høje persistens i hav- og kystmiljøet samt den begrænsede mulighed for bekæmpelse med tilgængelige teknikker.

I projekterne omtalt her, er oliernes effekter på arktiske blåmuslinger og klørtang undersøgt, herunder akutte og kroniske effekter af naturlig og kemisk dispergeret olie. Undersøgelserne for akutte effekter viste, at fødeoptagelsesraten hos muslingerne blev hæmmet af CWF (for WRD og HDME50) og WAF (HDEM50). De akutte effekter var markante, og kroniske effekter blev fundet selv 7 dage efter muslingerne var blevet overført til rent vand. Undersøgelserne viste også, at fotosynteseaktiviteten på skudspidser af tang blev markant hæmmet af dispergeringsmidlet og kemisk dispergeret WRD.

Spild af LSFOer udgør en særlig stor risiko for havfugle, da olierne forbliver på havoverfladen, og selv en meget lille tilsøling af havfuglens fjerdragt kan være dødelig for havfuglene. I undersøgelserne blev det fastlagt for hvilken oliefilmstykkel, der sås skader på fjerdragten. Skaderne varierede for de forskellige olier. Effekstudierne på fuglefjer viste dog, at LSFO-eksponering ikke giver anledning til signifikant øgede effekter på fuglefjer sammenlignet med konventionelle olier.

Vedrørende giftighed, indikerer resultaterne, at der under arktiske forhold sandsynligvis vil være en relativ lav akut toksicitet af LSFOer, da indholdet af vandopløselige, biotilgængelige oliekomponenter, er begrænset. Imidlertid kan LSFOer med lavt stivnepunkt og produkter som marine gasolier forårsage akutte skadelige virkninger på organismer, hvis de spildes i havmiljøet.

Yderligere effekstudier med flere LSFOer bør gennemføres for at styrke vidensgrundlaget for øget forståelse af effekterne af LSFO-spild.

I forbindelse med PAME/EPPRs LSFO-projekt er der i den afsluttende projektrapport en række anbefalinger. En væsentlig anbefaling i PAME/EPPR-rapporten er et forslag om at skærpe definitionen af brændstof, der anvendes og transporteres i polare farvande (43.1.2 fra MARPOL Annex I) til kun at tillade destillat-typer i 'Polar code'-området. Baggrunden for forslaget er, at spild af destillat forventes at forårsage mindre og kortvarige skader på det arktiske miljø i tilfælde af spild, da destillater hurtigere fordamper, fortyndes og nedbrydes i havmiljøet. Ovennævnte forslag forventes desuden at reducere udledningen af sodpartikler (black carbon) til luften.

6 Referencer

Daling PS, L.G. Faksness TA & Pettersen 2021. WP-3 PAME – EPPR Methodology for screening properties of new Low Sulfur Marine Fuels. Selection of test parameters. SINTEF Project memo dated April 20, 2021

Faksness LG & Altin D 2017. WAF and toxicity testing of diesel and hybrid fuel oils. SINTEF report, OC2017-A122, work in progress.

Faksness LG, & Daling PS 2023. Summary report. Interlaboratory comparison of three low-sulfur marine fuel oils between laboratories in Canada, China, Sweden, USA and Norway. WP3 – PAME/EPPR characterization methodology. SINTEF report 2023:00369, ISBN 978-82-14-07790-2.

Faksness LG, Altin D, Faragher RJ & Sørheim KR. 2024a. Characterization of four new low sulphur marine fuel oils. WP 4 PAME/EPPR characterization methodology. SINTEF report 2024:00234, ISBN 978-82-14-07244-0.

Faksness, L.G., Sørheim KR, Altin D. 2024b. PAME – EPPR Methodology for screening properties of new Low Sulphur Marine Fuels. SINTEF Project Memo no. 302007754-A.

Fritt-Rasmussen, J, Boertmann, DM, Christensen, T, Clausen, DS, Gustavson, K, Wegeberg, S & Mosbech, A. 2020. Oliespild i grønlandske farvande, miljø-mæssige udfordringer og beredskab. Aarhus University, DCE – Danish Centre for Environment and Energy, 52 pp. Teknisk rapport Nr. 163.

Fritt-Rasmussen J, Reunamo A, Røyset JA, Bjerkemo OK, Gustavson K, Lassen P, Tonteri O, Wegeberg S & Jørgensen JS. 2023. Low Sulphur Fuel Oil (LSFO): Identification of environmental impacts in a cold marine environment. Nordic Council of Ministers, TemaNord report 58 s.

Fritt-Rasmussen J, Gustavson K 2025. Analyse af afledte miljøeffekter ved bekæmpelse af Low Sulphur Fuel Oil (LSFO) spild i havmiljøet ved brug af værk-tøjjet EOS (Environment & Oil Spill Response). Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 16 s. - [Teknisk rapport nr. 337](#)

Fritt-Rasmussen J et al. 2025 in prep. Damages on Arctic seabird feathers following exposure to Low Sulphur Fuel Oils.

Gustavson K et al. 2025a in prep. Acute toxicity of Low Sulphur Fuel Oils on Arctic coastal organisms.

Gustavson K et al. 2025b in prep. Chronic toxicity of Low Sulphur Fuel Oils on Arctic blue mussels.

Hellstrøm C. 2017. Weathering Properties and Toxicity of Marine Fuel Oils Summary Report. SINTEF report no- OC2017-A124.

Hellstrøm KC, Daling PS, Brønner U, Sørheim KR, Johnsen M & Leirvik F 2017. Memo report. Collection of memos. Report no. OC2017-A123

Holt HS, Frost BR, Dolva H, Berger S, Agurkyte G, Nilsen R, Kvamme B, Holbu JW, Dokken G & Jordheim O 2017. Test av skive-, børste- og adhesjonsopptaker i diesel- og hybridoljer. Kystverket 2017.

Jørgensen, KS, Kreutzer, A, Lehtonen, KK, Kankaanpää, H, Rytönen, J, Wegeberg, S, Gustavson, K, Fritt-Rasmussen, J, Truu, J, Kõuts, T, Lilover, MJ, Seiler, TB, Hollert, H, Johann, S, Marigómez, I, Soto, M, Lekube, X, Jenssen, BM, Ciesielski, TM, Wilms, LB, Högström, R, Pirneskoski, M, Virtanen, S, Forsman, B, Petrich, C, & Phuong-Dang, N, Wang, F. 2019. The EU Horizon 2020 project GRACE: integrated oil spill response actions and environmental effects. *Environmental Sciences Europe*, vol. 31, 1, 44. DOI: 10.1186/s12302-019-0227-8

Moldestad MØ & Daling PS 2006. Vurdering av forvitringsegenskapene til ulike Marine Gassoljer. Kriterier for fastsettelse av drivstoff kvalitet ut fra egenskaper ved et eventuelt utslipp. SINTEF report no. STF80MK A06170 (in Norwegian).

PAME & EPPR. 2024. Low sulphur- and ultra-low sulphur fuel oils used by ships in Arctic waters. Final report from work package I. oarchive.arctic-council.org/server/api/core/bitstreams/8dd208ea-cc5a-419b-82ec-37a296dae75a/content

PAME & EPPR. 2025 in prep. Low Sulphur Fuel Oils in the Arctic. Final report from joint PAME and EPPR project "Low Sulphur Fuels - Fate and Behaviour in Cold Water Conditions".

Shigenaka G 2014. Twenty-Five Years After the Exxon Valdez Oil Spill. – NOAA's Scientific Support, Monitoring, and Research. Seattle: NOAA Office of Response and Restoration. 78 pp.

Stogiannidis, E & Laane, R. 2015. Source characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons by using their molecular Indices: An overview of possibilities. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology*. Pp 49-132.

Sørheim KR, Daling PS, Cooper D, Buist I, Faksness LG, Altin D, Pettersen TA & Bakken OM. 2020. Characterization of low sulphur fuel oils (LSFO) – a new generation of marine fuel oils. Report no. OC2020 A-50 open- 112 pp.

Wegeberg S, Fritt-Rasmussen J, Gustavson K, Lilover MJ, Boertmann D, Christensen T, Johansen KL, Spelling-Clausen D, Rigét F, Mosbech A. 2024. EOS - Environment & Oil Spill Response. An analytic tool for environmental assessments to support oil spill response planning: Framework, principles, and proof-of-concept by an Arctic example. *Marine Pollution Bulletin*, vol. 199, 115948.

Wegeberg S, Rigét F, Gustavson K & Mosbech A. 2016. Store Hellefiskebanke, Grønland. Miljøvurdering af oliespild samt potentialet for oliespildsbekæmpelse. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 98 s. Videnskabeligrapport no. 216

Øksenvåg JHC, Pettersen TA, Leirvik, F. 2021. Ultra Low Sulphur Fuel Oils (ULSFOs) interactions with shoreline. SINTEF report no. OC2021 A-041, 57 pp.

MILJØEFFEKTER AF SPILD AF NYE LAVSVOVLTINDHOLDIGE SKIBSBRÆNDSTOFFER I DET ARKTISKE HAVMILJØ

De globale reguleringer om reduceret svovlindhold i skibsbrændstoffer, har medført et behov for en ny type brændstoffer med et lavt svovlindhold. Der eksisterer kun begrænset viden om mulige miljøeffekter og bekæmpelse af spild med disse nye lav svovlholdige olier (LSFO) i havmiljøet. Det overordnede formål med nærværende projekt er at udbygge vidensgrundlaget om mulige effekter og skader på arktiske marine organismer efter spild af LSFOer. I projektet er der gennemført en række laboratoriestudier af LSFOers effekter på udvalgte arktiske organismer under kontrollerede forhold. Resultaterne fra laboratoriestudierne er medtaget i en såkaldt EOS-analyse (Environment & Oil Spill Response analyse), hvor afledte miljøeffekter fra oliespild og relaterede bekæmpelsesmetoder er vurderet i forhold til mulige effekter og skader på forskellige arktiske organismegrupper. Vurderingen af LSFOerne er sammenholdt med konventionelle olietyper (bunkerolier, arktisk diesellole).