

# Rapport

## Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer

Oljevern 2015-WP048

**Forfatter(e)**

Kristin R. Sørheim

Per S. Daling og Frode Leirvik



*Sjøtest med MS Strilborg i Hammerfest (23-25 mai, 2016). Foto: SINTEF*

SINTEF Ocean AS

Postadresse:  
Postboks 4762 Sluppen  
7465 Trondheim

Sentralbord: 464 15 000

ocean@sintef.no  
www.sintef.no/ocean  
Foretaksregister:  
NO 937 357 370 MVA

# Rapport

## Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer

Oljevern 2015-WP048

RAPPORTNR	VERSJON	DATO
OC2017 A-125	3.0	2017-06-12

**EMNEORD:**Mekanisk dispergering;  
Deflektordyse;  
Høykapasitet  
dysemanifold;**FORFATTER(E)**Kristin R. Sørheim  
Per S. Daling and Frode Leirvik**OPPDRAKSGIVER(E)**

NOFO

**OPPDRAKSGIVERS REF.**

Hans V. Jensen

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

18 + 4 vedlegg

**GRADERING**

Unrestricted

**GRADERING DENNE SIDE**

Unrestricted

**ISBN**

978-82-7174-300-0

**SAMMENDRAG**

Dette prosjektet har vært en del av NOFOs Teknologiutviklingsprogram Oljevern 2015: *WP-048 Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer*. Hovedmålsetningen med prosjektet har vært å kunne utvikle og teste ut enkle kostnadseffektive løsninger med høy behandlingsskapasitet for å redusere potensiell miljøskade av tynne oljefilmer på sjø. Ulike konsept for mekanisk dispergering primært med tanke på utslipp fra lette råoljer og kondensat ble utviklet og testet til dette formålet bestående av:

- En dysemanifold med høykapasitet vanddosering som kan plasseres i baugen på beredskapsfartøy etter samme prinsipp som dagens dispergeringssystem
- Konstruksjon av deflektordyse (nebb) montert på FiFi-monitor med formål å generere en høykapasitet vertikal vannstråle ned på sjøoverflaten for å bryte opp en oljefilm

Konseptet ble testet ut i fullskala forsøk under NOFO OPV 2016 som demonstrerte at mekanisk dispergering med høykapasitet vanddosering har et potensial til å kunne bryte opp en oljefilm i tidlig fase ved utslipp av en lett råolje eller kondensat.

**UTARBEIDET AV**

Kristin R. Sørheim

**KONTROLLERT AV**

Ivar Singsaas

**GODKJENT AV**

Mimmi Throne-Holst



# Historikk

---

<b>VERSJON</b>	<b>DATO</b>	<b>VERSJONSBEKRIVELSE</b>
1.0	2017-04-07	Draft
2.0	2017-04-19	Draft oppdatert
3.0	2017-06-12	Final etter kommentarer fra NOFO

---

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Introduksjon og målsetting .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Fagaktiviteter .....</b>	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Teoretisk evaluering av konsept og innledende tester av ulike dyser.....</b>	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Konstruksjon av prototyper for mekanisk dispergering.....</b>	<b>6</b>
<b>5</b>	<b>Installasjon og funksjonalitet av prototyper på MS Strilborg .....</b>	<b>7</b>
5.1	Test av deflektordyse (nebb) .....	7
5.2	Test av manifold for høykapasitet vanddosering.....	8
5.3	Test av manifold for lav- og høy dosering av dispergeringsmiddel .....	10
5.4	Potensielle forbedringer av prototyper .....	10
5.4.1	Høykapasitet dysemanifold .....	10
5.4.2	Deflektordyse.....	10
<b>6</b>	<b>Testing av prototyper i fullskala under OPV 2016 .....</b>	<b>11</b>
<b>7</b>	<b>Videre testing i SINTEF tårnbasseng - Høsten 2016 .....</b>	<b>13</b>
7.1	Testing med dyse under reelle feltbetingelser .....	13
7.2	Beregninger og effekt av forvitningsgrad på dråpestørrelser .....	15
<b>8</b>	<b>Konklusjon og anbefalinger.....</b>	<b>17</b>
8.1	Konklusjon.....	17
8.2	Anbefalinger.....	17
<b>9</b>	<b>Referanser.....</b>	<b>18</b>

## BILAG/VEDLEGG

---

**Vedlegg A Project memo: Testing of high volume spray treatment of thin oil films**

---

**Vedlegg B Prosjektnotat: Konstruksjon av prototyper - teknisk beskrivelse**

---

**Vedlegg C Prosjektnotat: Sjøtest i Hammerfest på MS Strilborg**

---

**Vedlegg D Project memo: High volume nozzle treatment of thin oil films**

---

## 1 Introduksjon og målsetting

Dette prosjektet har vært en del av NOFOs Teknologiutviklingsprogram Oljevern 2015: *WP-048 Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer*. Prosjektet har vært finansiert av NOFO hvor også partnere i prosjektet har bidratt finansielt med hver sin egenandel. Jason Engineering AS har vært underleverandør til SINTEF i dette prosjektet.

Hovedmålsetningen med prosjektet har vært å kunne utvikle enkle kostnadseffektive løsninger med høy behandlingsskapasitet for å redusere potensiell miljøskade av tynne oljefilmer på sjø. Et konsept for mekanisk dispergering med bruk av høykapasitet vanddosering er utviklet til dette formålet ved blant annet å benytte eksisterende pumpesystem for FiFi-monitors (kanoner) og brannslukkingsanlegg på dagens offshore/beredskapsbåter og større kystvaktfartøy. Hovedleveransen i dette prosjektet har vært å utvikle og teste prototyper for mekanisk dispergering av tynne oljefilmer bestående av følgende utstyrspakker:

- i. En høykapasitets dysebom (manifold) med vanddosering som kan plasseres i baugen (foran) på beredskapsfartøy etter samme prinsipp som dagens dispergeringssystem på beredskapsfartøy
- ii. Konstruksjon av deflektordyse (nebb) som kan monteres på FiFi-monitor

Begge prototyper som nevnt ovenfor ble utviklet og konstruert i samarbeid med Jason Engineering AS. Prototypene ble installert på MS Strilborg (statlig slepebåt) og testet i fullskala (sjøtest) i Hammerfest uten oljefilm i forkant av NOFOs olje-på-vann (OPV) i juni 2016. Utstyret ble testet under OPV 2016 med eksperimentelle utslipp av en lett råolje/kondensat Åsgard Blend. Eksperimentene under OPV 2016 ble utført som en del av Petromaks 2 programmet (2014-2017): "*Formation and behaviour of thin oil films and evaluation of response methods including HSE*", heretter kalt TOF-prosjektet. En egen feltrapport fra disse eksperimentene er blitt utarbeidet (Daling et al., 2017). I tillegg har det blitt utført laboratorietesting av samme type dyse som ble benyttet under OPV 2016, hvor hensikten var å gjøre systematiske tester av dråpestørrelsesfordeling i vannsøylen etter behandling av oljefilmen med høykapasitet vanddosering. I TOF-prosjektet ble tynne oljefilmer definert som filmer fra potensielle utslippsscenarioer med initiale filmtykkelse fra  $> 5$  til  $< 200-300 \mu\text{m}$ , dvs. filmtykkelse som kan ha potensiale for miljøeffekter på f.eks. sjøfugler (French et al., 1997). Dette gjenspeiler fargekoder 3 og 4 i henhold til Bonn Oil Appearance Correlation (BAOAC), Lewis, 2007. Se også nettsiden: [http://www.bonnagreement.org/site/assets/files/3952/current-status\\_report\\_slutt-19jan07.pdf](http://www.bonnagreement.org/site/assets/files/3952/current-status_report_slutt-19jan07.pdf)

Delleveranser underveis i dette prosjektet har også vært utarbeidelse av norsk - og engelskspråklige prosjektnotater som beskriver ulike testinger av konsept og dyser i laboratoriet, tekniske beskrivelser av prototyper fra Jason Engineering AS, samt erfaringer fra sjøtesten. Disse prosjektnotatene foreligger som vedlegg til denne rapporten. En kort sammendrag fra fagaktivitetene i prosjektet samt prosjektnotatene er gitt i kapitlene under.

## 2 Fagaktiviteter

Følgende fagaktiviteter har blitt utført i dette prosjektet, inkludert planlegging og tilrettelegging av disse aktivitetene:

- Teoretisk evaluering av konsept og innledende tester av ulike dyser i SINTEF minitårn og tårnbasseng som grunnlag for valg av dyse til prototype. Denne aktiviteten ble utført som en del av TOF-prosjektet (Vedlegg A)
- Konstruksjon av prototyper for mekanisk dispergering i fullskala tilpasset MS Strilborg (Vedlegg B)
- Installasjon og funksjonalitet av prototyper i felt i forkant av OPV 2016 (sjøtest i Hammerfest) (Vedlegg C)
- Fullskala felttest av prototyper (OPV 2016). Se egen feltrapport (Daling et al., 2017)

- Videre testing i SINTEF tårnbasseng av dyse installert på høykapasitet dysemanifold på MS Strilborg for utfyllende dokumentasjon av dråpestørrelser og nedtrengning av dråper ved reelle operative betingelser (Vedlegg D)

I henhold til opprinnelige prosjektplan var det planlagt testing av prototype for dysemanifold i testbassenget hos Kystverket i Horten. Denne aktiviteten utgikk da den eksisterende plattformen i testbassenget hadde for liten bevegelsehastighet til ønsket formål. Jason Engineering AS gjennomførte også beregninger og evaluering av dette testkonseptet og kom fram til at det ble for utfordrende å konstruere en bevegelig plattform til ønsket formål basert på tilgjengelig ressurser. En vurdering for bruk av den eksisterende plattformen ble gjort basert på:

- Akselerasjon og mot-akselerasjons krefter som må til for å oppnå ønsket hastighet større enn 2 knop på den bevegelige plattformen
- Leveranse av tilstrekkelig vannmengder innpå dysemanifolden festet på bevegelig plattform
- HMS: Risikoen for at en bevegelig plattform som benytter den skinnegangen som går langs bassengkanten lett kan spore av ved små skjevbelastninger

Med basis i dette ble det derfor foreslått å omdisponere midlene til videre uttesting for å dokumentere effektiviteten til samme type dyse og doseringsbetingelser som var relevant under fullskala forsøk i felt. Disse testene ble utført i SINTEF tårnbasseng med fokus på nedtrengning av dråper i vannsøylen og dråpestørrelsesfordeling. Dette innebar et vesentlig forbedret forsøksoppsett enn de innledende konsepttestene i SINTEF minitårn og tårnbasseng som ble gjennomført som en del av TOF-prosjektet, se kapittel 3 og Vedlegg A. Sentrale forbedringene inkluderte bruk av sentrifugalpumpe med tilstrekkelig vannleveranse med kapasitet opp til 600 l /min per dyse samt bruk av instrumentering (LISST-måling) for å fremskaffe dokumentasjon av dråpestørrelsesfordelingen og nedtrengningsdybde.

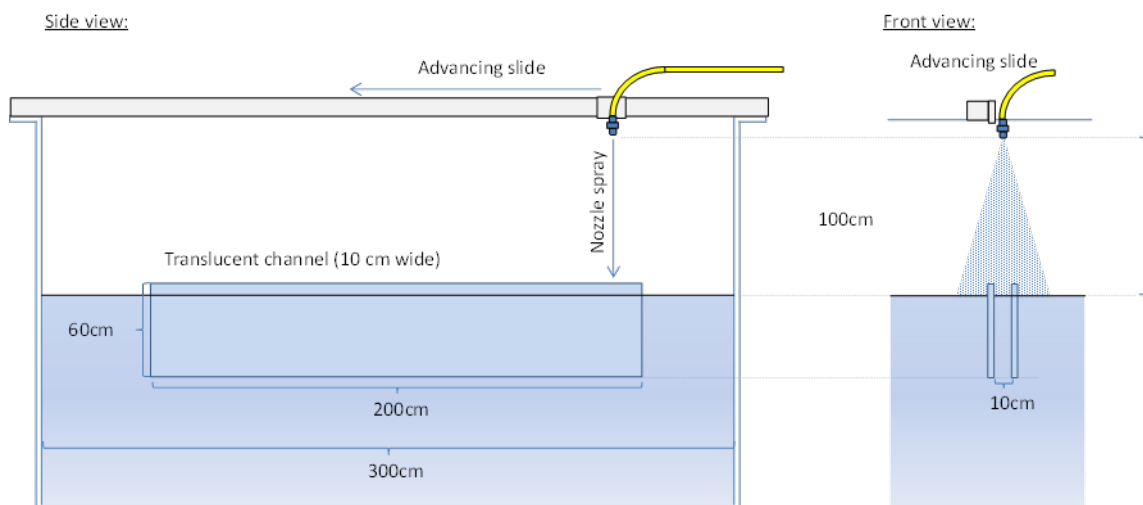
### 3 Teoretisk evaluering av konsept og innledende tester av ulike dyser

Konseptevaluering og innledende tester av ulike dysetyper ble utført som en del av TOF-prosjektet (Vedlegg A). Målsettingen var å undersøke potensiale med å bruke høykapasitet vanddosering fra dyser for mekanisk dispergering en tynn oljefilm på sjø. Denne aktiviteten inkluderte:

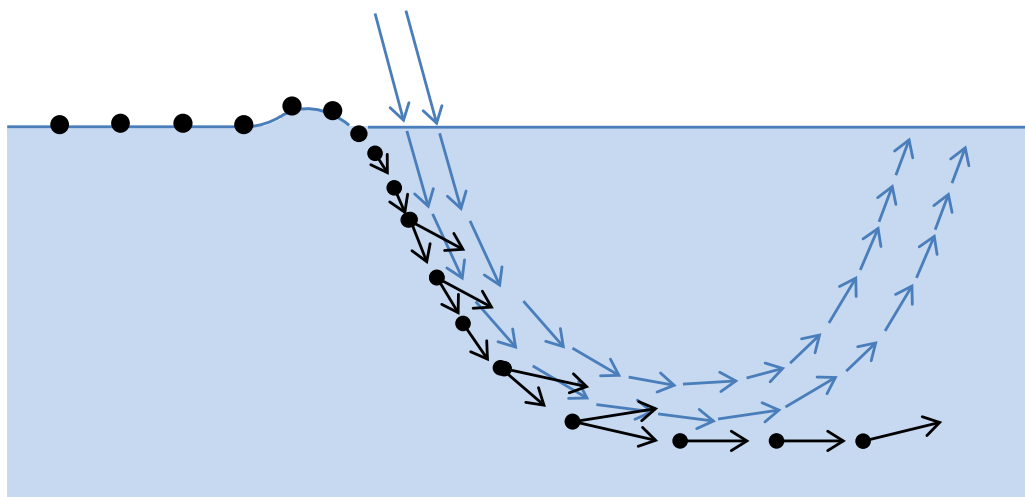
- Teoretisk evaluering av konseptet av en vertikal vannstråle (Johansen, 2015, "*Mechanical dispersion of thin oil films with plunging water jets*")
- Evaluering av flere type dyser hvor 7 av de minste dysene med ulike størrelser og vinkler ble testet i SINTEF i minitårn for måling av dråpestørrelsesfordeling etter behandling av en oljefilm med vanddosering. De 4 av største dysene ble deretter testet i SINTEF tårnbasseng
- Forsøk i SINTEF tårnbassenget for å dokumentere nedtrengningsgraden av dråper med ulike innstillinger av titlingsgrad (skråstilling), hastighet og vinkel på dysene
- Vurdering av vanntrykk inn på dysene
- Vurdering av dysetype

En skisse av forsøksdesignet i tårnbassenget er gitt i Figur 3-1, hvor en dyserigg på en linjeføring (slide) er montert med formål å kunne bevege dysen over vannoverflaten med hastighet opp mot 6 knop. Det ble for enkelhetens skyld benyttet ~3 mm polyetylenkuler isteden for olje til disse forsøkene. Videoopptak dokumenterte interaksjon mellom plastkulene og vannstrømmen fra dyse. Forsøksoppsettet viste at plastkulene dykket ned i forkant av nedslagsfeltet av vannstrømmen fra dysen før de passerte gjennom bobleskyen som ble generert av turbulensen fra selve vannstrømmen, se skjematisk skisse i Figur. Både hastighet og skråstilling (titling) var viktige parametere for å minimalisere oppkonsentrasjon av "olje" i forkant av dysens nedslagsfelt. Nedtrengning av "olje" oppsto likevel i forkant av nedslagsfeltet som vist i Figur 3-2. Eksempler på "snapshot" av disse videodokumentasjonen er vist i vedlegg A (se Figur 3.1 til Figur 3.8 i Vedlegg A)

Basert på de innledende testene ble det besluttet å velge dysetypen "Veetjet 750" med spredningsvinkel på 25° for konstruksjon av prototype for fullskala dysemanifold, se kapittel 4.



Figur 3-1 Skjematisk tegning av testoppsettet i tårnbassenget.



Figur 3-2 Skjematisk illustrasjon og fotodokumentasjon av plast (polyetylen) kuler som interagerer med vannstrømmen fra dysen.

#### 4 Konstruksjon av prototyper for mekanisk dispergering

Jason Engineering AS har i samarbeid med SINTEF gjennom dette prosjektet konstruert prototyper både for mekanisk og kjemisk dispergering bestående av:

- Komplett konteinerbasert system som inkluderer både en høykapasitet dysemanifold for mekanisk dispergering samt dispergeringsmanifolder for både høy - og lavdosering av dispergeringsmiddel iht. NOFOs krav til fartøy som har installert utstyr for dispergering
- Deflektordyse (nebb) som kan koples til og tilpasses FiFi-monitor ombord på beredskapsfartøy

Det ble i en tidlig fase bestemt at MS Strilborg skulle benyttes som plattform for testing under OPV 2016 samt at det også var et krav om at det skulle være et fartøy som også hadde utstyr for påføring av dispergeringsmiddel. I og med at MS Strilborg ikke var utstyrt med nødvendig dysesystem for påføring av dispergeringsmiddel konstruerte Jason Engienering AS derfor et komplett konteinerbasert system som besto av både en høykapasitet vann dysemanifold for mekanisk dispergering, samt dispergeringsmanifolder for både høy- og lavdosering av dispergeringsmiddel. Formålet er å kunne transportere og installere en slik 10 fot konteiner på et beredskapsfartøy som ikke har fast installert utstyr for dispergering ombord. Den

tekniske beskrivelsen av utstyret er gitt i Vedlegg B. For operative tester av utstyret i fullskala ble konteineren med manifold og deflektordysen installert ombord på MS Strilborg som lå ved kai i Hammerfest 23-25 mai 2016. Det var viktig å teste ut kapasiteten til utstyret i forkant av OPV 2016 som foregikk i perioden 12-14 juni 2016. Sjøtøsten ble utført uten olje/oljefilm, hvor hensikten var å dokumentere parametere som kapasitet/vannleveranse/vanntrykk fra både dysemanifolden og deflektordysen. Et eget prosjektnotat for sjøtøsten i Hammerfest (Vedlegg C) og kapittel 5. Figur 4-1 viser det konteinerbaserte systemet og deflektordyse til FiFi-monitor.



Figur 4-1 Venstre: Konteiner basert system for både mekanisk - og kjemisk dispergering. Høyre: Deflektordyser.

## 5 Installasjon og funksjonalitet av prototyper på MS Strilborg

SINTEF utførte sammen med Jason Engineering AS sjøtøst av prototyper som ble installert på MS Strilborg i perioden 23-25 mai 2016. Deflektordysen (nebb) ble montert og tilpasset FiFi-monitor på MS Strilborg, samt installering av kontainer bestående av et komplett fullskala baugmontert høykapasitet dysebom (manifold) for mekanisk dispergering, og en høy -og lavdosering manifold for dispergeringsmiddel. Observasjonene under sjøtøsten ble dokumentert visuelt både med foto og video fra kamera montert på selve fartøyet, samt dokumentasjon fra MOB-båt som var plassert på siden og foran fartøyet (Vedlegg C). Krav til HMS ble i varetatt ombord, hvor personell fra SINTEF og Jason Engineering AS fikk gjennomført sikkerhetsrunde samt gjennomgåelse av Sikker Jobb Analyse (SJA) med ansvarlig personell og kaptein ombord på fartøyet. Krav til dokumentasjon og sjekklister fra SINTEFs interne prosedyrer ble også gjennomgått og utført i forkant av sjøtøsten og gjort kjent for personell fra både SINTEF og Jason Engineering AS.

### 5.1 Test av deflektordyse (nebb)

Målsetningen med å montere en deflektordyse (nebb) til FiFi-monitoren ombord på MS Strilborg var om mulig å kunne oppnå en best mulig vertikal flat og energirik vannstråle som skal treffe sjøoverflaten med hensikt å knuse opp en potensiell tynn oljefilm. Det var viktig at deflektordysen kunne danne en sammenhengene vannstråle slik at energien til vannstrålen ikke går tapt eller reduseres før den treffer vannoverflaten. En teoretisk betraktning for å nyttiggjøre en høykapasitet vertikal vannstråle som potensiale for å bryte opp en tynn oljefilm ble utredet i TOF-prosjektet (Johansen, 2015, Vedlegg A).

Det ble benyttet en deflektordyse med en spredningsvinklet på  $15^\circ$  under sjøtøsten, hvor fartøyet hadde en fart opp til 10 knop. Ved full vannleveranse på  $3600 \text{ m}^3/\text{time}$  ble dessverre ikke spredningsmønsteret helt homogent fordelt som forventet, slik at vannstrålen ble omtrent delt i to over nedslagsfeltet på ca. 15-20 m i diameter. Test med deflektordysen med full vannleveranse så dermed ut til å redusere nedfallstrykket til vannstrålen betraktelig, slik at effektiviteten av en slik vandosering reduseres. Det ble derfor besluttet å utføre forsøk uten bruk av deflektordysen som da ble demontert fra FiFi-monitoren. Test uten



deflektordyse med full vannleveranse viste seg å ha en langt større kapasitet og dannet en energirik vannstråle som traff sjøoverflaten. Figur 5-1 viser vannstråle med og uten deflektordyse. Det ble i tillegg lagt ut torv /bark for å simulere en slags oljefilm/flak på sjøen, og dette flaket ble fullstendig oppløst med den energirike vannstrålen som traff sjøoverflaten med et nedslagsfelt ca. 50 m fra skutensida. Det ble også foreslått å skru ned mer av rekkverket rundt monitoren for lettere å kunne justere og kontrollere nedslagsfeltet til vannstrålen på en bedre måte.



Figur 5-1 Venstre: Spraymønster av deflektordyse montert på FiFi monitor med todeling og redusert vannstråle. Høyre: Spraymønster på FiFi-monitor uten deflektordyse med et nedslagsfelt ca. 50 m fra skutensida.

### Konklusjon

På grunn av redusert effektivitet og observert todeling vannstrålen med bruk av deflektordyse ble det besluttet å ikke benytte deflektordysen under de eksperimentelle forsøkene med tynn oljefilm i forbindelse med OPV 2016. Forsøk uten bruk av deflektordyse koplet til FiFi-monitoren resulterte i en mer energirik vannstråle enn forøket med deflektordyse montert, og denne løsningen uten bruk av deflektordyse ble derfor valgt under OPV 2016.

### 5.2 Test av manifold for høykapasitet vanddosering

Systemet som ble laget for høykapasitet vanddosering for mekanisk dispergering av en oljefilm hadde en kapasitet opp til ca. 1000 m<sup>3</sup>/time med et vanntrykk opp til 5-6 bar med totalt 38 dyser tilkopleet av type "Veejet 750". Denne dysetypen har en spredningsvinkel på 25° med en kapasitet på 0,4 m<sup>3</sup>/min. per dyse. Total påføringsbredde ca. 16-18 m. Forsøkene ble utført opptil 10 knop på fartøyet, og manifolden var plassert ca. 1 m over sjøoverflaten. Imidlertid var eksisterende vanntilførsel fra brannpumpene på MS Strilborg under sjøtesteten begrenset til ca. 250-300 m<sup>3</sup>/time, noe som var lavere enn ønsket, og det ble testet ut ulike varianter med antall dyser og manifold (Vedlegg C) for å sjekke spraymønsteret og nedfallsfeltet etter påføring samt kapasiteten til dysene. Figur 5-2 viser den baugmonterte manifolden med dysesystemet tilkopleet. En kort oppsummering fra sjøtesteten er gitt i dette kapittelet. Testmatrisen besto av følgende forsøksserie:

- To manifolder med 38 dyser
- To manifolder med 19 dyser -blending av annenhver dyse
- En manifold med 10 dyser - blending av annenhver dyse
- En manifold med 10 dyser plassert ytterst på manifold
- En manifold med 10 dyser plassert innerst på manifold



Figur 5-2 *Manifold (baugbom) med dyser for høykapasitet vanddosering for mekanisk dispergering - installert foran på fartøyet.*

### Oppsummering

Den eksisterende vanddoseringen fra brannpumper ombord på fartøyet hadde en kapasitet på 250-300 m<sup>3</sup>/time, noe som var i underkant av ønsket vanntrykk for å kunne oppnå optimal energi /skjærhastighet med bruk av maksimalt antall 38 dyser, dvs. opp til 19 dyser kan koples til på hver manifold på begge sider av baugen. Blending av annenhver dyse med 1 m avstand mellom hver dyse medførte høyere vanntrykk som var ønskelig, men systemet fungerte ikke optimalt da det også ble generert en frisone på ca. 20 cm mellom hver dyse hvor vannstrålen ikke vil kunne treffe en potensiell oljefilm. Det ble også forsøkt å blende dyser til ønsket vanntrykk på 4-5 bar med bruk av kun 10 dyser om gangen, men den observerte påføringsbredden på 5-6 m ble vurdert som et for lite nedslagsfelt for en operativ behandling med hensyn på å planlegge de eksperimentelle utslippene av en oljefilm under OPV 2016. I tillegg ble det også erfart at ved bruk av 10 dyser plassert i ytterkanten på manifolden at bommen løftet seg opp, og forsøket ble da stoppet med det samme. Bommen ble deretter festet for å unngå en slik hendelse på nytt, og denne erfaringen var viktig å ta med seg videre til fullskala forsøk med oljefilm.

Etter inspeksjon på MS Strilborg i Hammerfest ble det klart at det ikke var så høy vannleveranse tilgjengelig som ønsket. De fleste fartøy med FiFi-2 anlegg har ekstra brannuttak (4-8 stk.) hvor høykapasitetsmanifolden kan koples til vannet fra FiFi pumpene. Disse har mye større kapasitet enn det som var tilfellet på MS Strilborg hvor brann overrisslingspumpene ble brukt til vannleveransen. Dette medførte utfordringer for å få tilgang til ekstra vanntrykk og ble forsøkt løst ved at det ble laget en ekstra manifold med 4 tommer slanger inn på manifolden, med fire uttak og ekstra brannslanger som ble kopleet på en ekstern pumpe (ballastpumper) som videre ble kopleet inn på rørgaten til brannledningen. Dette ga en vannleveranse på totalt 550 m<sup>3</sup>/time som tilsvarte en økning av vanntrykket til dysene fra ca. 2,1 bar til 3-3,5 bar.

### Konklusjon

Sjøtesten ga et godt grunnlag for en optimal vanddosering fra manifolden i forkant av fullskala forsøk med utslipp av oljefilm under OPV 2016. Testene viste at det var mest optimalt å bruke alle 38 dysene for mekanisk dispergering i fullskala forsøk da dette ga størst påføringsbredde selv om vanntrykket inn på manifolden ikke var optimalt. For å få en økt vannleveranse ble det bestemt å supplere vanntilførsel fra ballastvann ombord på MS Strilborg som ble tilkopleet under de eksperimentelle forsøkene med utslipp av oljefilm. Dette ble en løsning som fungerte under OPV 2016 (kapittel 6).

### 5.3 Test av manifold for lav- og høy dosering av dispergeringsmiddel

Doseringssystemet for påføring av dispergeringsmiddel består både av en høy- og lavdoseringsmanifold med en kapasitet på henholdsvis 120 l/min og 30 l/min. Dette systemet var ikke på plass ombord på MS Strilborg fra før og ble derfor installert sammen med manifold for mekanisk dispergering som et komplett kontainerbasert system (se kapittel 5.2). Testing av dette dispergeringssystemet er også beskrevet i Vedlegg C, inkludert fotodokumentasjon. Tester ble utført fra 0-14/15 knop (maksfart) på fartøyet. Formålet var å dokumentere effektiv påføringsbredde ved ulike påføringshastigheter, samt å studere spraymønstret og nedslagsfeltet i forhold til baugbølge (Figur 5-3). Det ble benyttet sjøvann til disse testene uten bruk av dispergeringsmiddel.



Figur 5-3 Spraymønster av dispergeringsbom (høy og lavdosering, sett fra MOB båt).

#### Konklusjon

Systemet for høy- og lavdosering for påføring av dispergeringsmiddel fungerte tilfredsstillende i forhold til båtens baugbølger. Det var ingen spesielle merknader eller observasjoner under sjøtesten, og utstyret var klar til bruk i fullskala eksperimentene under OPV 2016.

### 5.4 Potensielle forbedringer av prototyper

#### 5.4.1 Høykapasitet dysemanifold

Det ble under sjøtesten valgt å benytte 25° dyser for å få mest mulig nedblanding i vannmassen, og disse dysene ble da brukt under feltforsøket (OPV 2016). Det kunne vært bedre overlapp i nedslagsfeltet mellom dysene, f.eks. vil dyser med 50° spredning og en vinkel på ca. 10° kunne gi en større overlapp i samme område som skissert i Figur 1.7 i Vedlegg B, men da på bekostning av noe mindre nedtregning av vannet.

#### 5.4.2 Deflektordyse

Jason Engineering AS har i ettertid foreslått forbedringer av deflektordysen fra å være et såkalt lukket nebb til en prototype som er åpen i bunnen for å kunne styre og samle vannstrålen til et bredere nedslagsfelt som vist i Figur 2.5 i Vedlegg B. Dette konseptet kunne bli testet ut i en planlagt testtrigg med vannkapasitet opp til ca. 2500 m<sup>3</sup>/time hos Jason Engineering AS.

Personell fra Jason Engineering AS observerte også andre utfordringer ved montering av deflektordysen under sjøtesten i Hammerfest. Deflektordysen var ikke enkel å montere på MS Strilborg og det samme kan forventes på andre fartøy da monitorene er så store at de ofte stikker utenfor rekkverket. Formen på plattformen og rekkverk på MS Strilborg ga utfordringer for å få justere monitoren i en mest gunstig vinkel ned mot sjøoverflaten. Andre fartøy har forskjellige løsninger på plassering av FiFi-monitor som kan være en bedre løsning enn for MS Strilborg.

## 6 Testing av prototyper i fullskala under OPV 2016

Forsøk med et konsept for mekanisk dispergering med bruk av høykapasitet dysebom og energirik vannstråle fra FiFi-monitor inkludert et system for påføring av lavdosering dispergeringsmiddel ble utført i fullskala eksperimenter med utslipp av tynn oljefilm fra Åsgard Blend. Feltforsøket ble utført som en integrert del av NOFOs OPV 2016, hvor eksperimentelle utslipp av testoljen ble utført i forbindelse TOF-prosjektet, se egen feltapport (Daling et al., 2017) og Paper (Daling et al., 2017.) som beskriver forsøksoppsett og resultater. I tillegg ble det også studert eksponering av lettflyktige komponenter med fokus på benzen som en del av et doktorgradsarbeid i TOF-prosjektet (Gjesteland et al., 2017). SINTEF var delaktig i planlegging i forkant av feltforsøket sammen med NOFO. Planleggingen inkluderte både HMS og risikovurdering utført i samarbeid med NOFO samt planlegging av eksperimentelle forsøk med NOFO og Jason Engineering AS samt andre relevante aktører/deltagere under OPV 2016. Plan for feltforsøk for eksperimentelle utslipp av Åsgard Blend er gitt i Daling og Sørheim, 2016. HMS-plan og risikovurderinger er en del av NOFOs dokumentasjon.

En serie på 3 eksperimentelle utslipp (3 x 10 m<sup>3</sup> betegnet som TOF 3.1, 3.2 og 3.3) med lettolje/kondensat Åsgard Blend ble utført. Se Figur 6-1 for utslippsarrangementet fra kystvaktfartøyet "KV Sortland".

- TOF 3.1: Utslipp av referanseflak uten behandling (dag 1, ikke-brytende bølger, < 5m/s vindhastighet)
- TOF 3.2: Utslipp med behandling av flak med påføring av lavdoserende dispergeringsmiddel etterfulgt av høykapasitet vanddosering fra dysebom (dag 1, ikke-brytende bølger, < 5m/s vindhastighet)
- TOF 3.3: Utslipp og behandling med vanddosering fra FiFi-monitor 3 til 4 timer etter utslipp (dag 2, brytende bølger, > 5m/s vindhastighet).

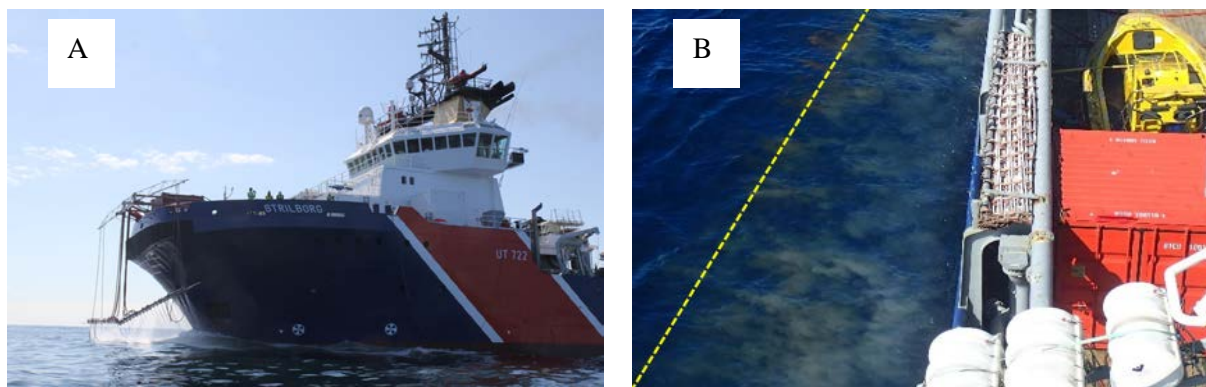


Figur 6-1 Utslippsarrangement for utslipp av Åsgard Blend fra KV Sortland fra feltapport gitt i Daling et al., 2017.

### Lavdosering dispergeringsmiddel & høykapasitet vanddosering fra dysebom

Det ble påført lavdosering dispergeringsmiddel 0,5-1 time etter utslipp (TOF 3.2) etterfulgt av høykapasitet vanddosering fra dysebom ca. 0,5 -1 time etter behandling av dispergeringsmiddel (Figur 6-2). Dette viste seg å være en effektiv operativ strategi for å dispergere flaket ned i vannmassen. Bilder fra IR (infrarød) kamera og målinger av oljekonsentrasjoner i vannsøylen ble utført like etter påføring av dispergeringsmiddel som indikerte at størstedelen av arealet av den tykkeste oljen hadde blitt brutt opp og

raskt dispergert som små dråper (70 - 100  $\mu\text{m}$ ). Dette indikerer at selv meget lave dispergeringsmiddel-til-olje-forhold (DOR 1: 300 til 1: 400 til det tykkeste olje) var tilstrekkelig til å dispergere denne lette råoljen. Bare en tynn oljefilm var tilbake etter at flaket hadde blitt behandlet med dispergeringsmidlet. Optimal dispergering ble oppnådd ved å kombinere baugbom for lavdosering dispergeringsmiddel etterfulgt av kunstig turbulens med høykapasitet vanddosering hvor MS Strilborg beveget seg med en hastighet på 8 - 12 knop gjennom flaket. Denne strategien vil kunne gi et betydelig redusert persistens (levetid) av denne type lette råoljer / kondensat på havoverflaten i rolig værforhold.



Figur 6-2 A: MS Strilborg med påføring av høykapasitet vanddosering fra dysemanifold 0.5 - 1 time etter påføring av lavdosering dispergeringsmiddel.  
B: Visuell effekt fra kunstig turbulens etter vanddosering som danner en lysebrun sky ("plume") av dispergert olje langs siden av og bak fartøyet (Daling et al., 2017).

Høykapasitet vanddosering fra dysebom ble ikke testet som en frittstående responsteknologi under OPV 2016 på grunn av både logistiske årsaker og værvindu, se også TOF feltrapport (Daling et al., 2017). I midlertidig viste forsøkene fra tårnbassenget (se kapittel 7), hvor det ble benyttet tilsvarende dyse og prøvebetingelser som i felt, at dette systemet har et potensial til å være en effektiv metode for dispergering av forvitret olje med viskositeter mindre enn 150 til 250 mPa.s uten bruk av dispergeringsmidler.

### Høykapasitet vanddosering fra FiFi-monitor

Utslipp av TOF 3.3 flaket ble behandlet med høykapasitet vannstråle fra FiFi-monitor på MS Strilborg (Figur 6-3). Flaket hadde forvitret på sjøen i 3-4 timer under brytende bølger før det ble besluttet å gjennomføre denne behandlingen med FiFi monitor. Denne metoden ble derfor ikke testet under optimale forhold som ideelt sett ville vært påføring kort tid (innen 1-1.5 time) etter utslipp under ikke-brytende bølger (< 5 m/s vindhastighet). Under dette forsøket hadde oljen begynt å danne en "løs" (halvstabil) emulsjon med viskositet på ca. 330 mPa.s ved skjærhastighet  $10 \text{ s}^{-1}$  ( $13^\circ\text{C}$ ) som ble ansett for å være en høyere viskositet enn det som er optimalt for effektiv vanddosering. Ikke desto mindre viste forsøket at høykapasitet vanddosering har et potensial for å kunne redusere varighet på sjøoverflaten av utslipp av denne type lette råoljer / kondensat. Smale band ("windrows") av forvitret olje ble observert på sjøoverflaten bestående av forholdsvis tykk og løs emulsjon. Denne emulsjonen ble brutt opp til mindre deler til såkalte "granulater" ved effekten av vanddosering fra FiFi-monitor. I tillegg ble det også her observert lysebrun "plume" (sky) av dispergert olje i vannmassene, og konsentrasjoner av dispergert olje 10 til 30 ppm (parts per million) med oljedråpediameter på 100-120  $\mu\text{m}$  ble målt i tverrsnitt av vannsøylen ca. 10-15 minutter etter vanddoseringen.

Forsøk i tårnbassenget og teoretiske beregninger (se kapittel 7.2) tilsier at høykapasitet vanddosering er forventet å være effektivt for oljer med viskositeter opp til 250 mPa.s. (ved  $10 \text{ s}^{-1}$ ). Prediksjoner av oljeemulsjonens viskositet vha. SINTEF Oil Weathering Model (OWM) (også kalt oljeforvittringsmodell) viser at denne viskositetsgrensen ble nådd ca. 1-1.5 time etter utslippet under disse værforholdene, og at vanddoseringen optimalt sett derfor burde vært utført innen denne perioden etter utslippet. Oljedråper i størrelsesorden 70-100  $\mu\text{m}$  ansees som stabil dispersjon (Lunel, 1995). Disse modellberegningene (kapittel 7.2) viste at slike dråpestørrelser oppnås ved viskositeter under 250 mPa.s.



Figur 6-3 Vanndosering fra FiFi-monitor på MS Strilborg (dronevideo ved Maritime Robotics og ©Finnish Border Guard / SYKE (Daling et al., 2017).

### Konklusjon

Prototype som ble utviklet for mekanisk dispergering ved bruk av høykapasitet vanndosering fra baugmontert dysemanifold fungerte i kombinasjon med systemet for lavdosering (påføring) av dispergeringsmiddel fra utslipp av lette råoljer /kondensater. Høykapasitet vanndosering fra FiFi-monitor var også lovende metode for å bryte opp oljefilm, selv om ikke forsøket ble utført under optimale forhold, og ble benyttet på forvitret olje som hadde begynt å emulgere. Deflektordysen ble ikke brukt da utstyret ikke fungerte optimalt under sjøtesten i Hammerfest.

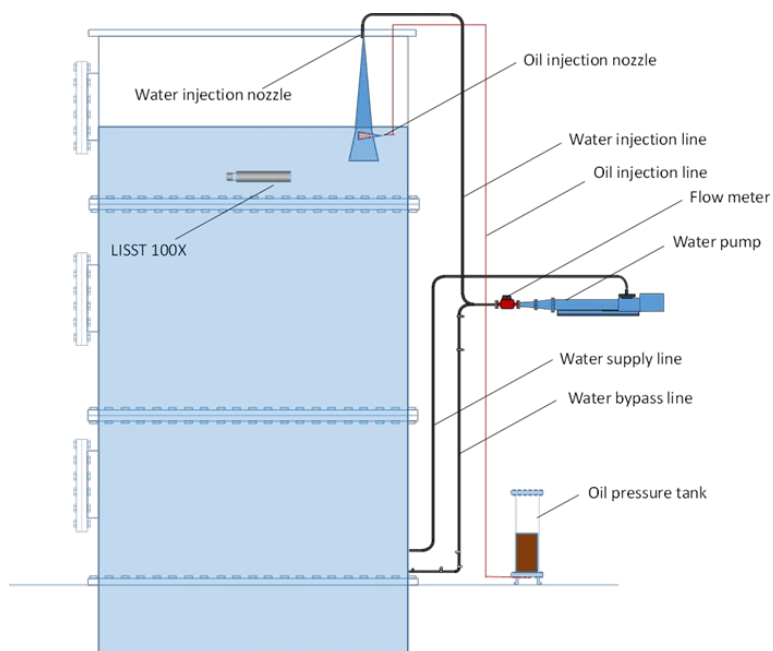
Det operative vinduet for mekanisk dispergering vil være noe begrenset, og er avhengig av at viskositeten til oljen/emulsjon ikke er for høy ( $< 250 \text{ mPa}\cdot\text{s}$ ) for å kunne oppnå effektiv dispersjon i vannsøylen med generering av oljedråper i størrelsesorden  $70\text{-}100 \mu\text{m}$ . Ett sett med anbefalinger for videre dokumentasjon er gitt i Daling et al., 2017 som inkluderer videre felttesting både i forbindelse med NOFO OPV og /eller bruk produsertvann for mer operative uttesting av høykapasitet vanndosering fra både FiFi-monitor og dysemanifolden under rolige værforhold med ikke-brytende bølger.

## 7 Videre testing i SINTEF tårnbasseng - Høsten 2016

### 7.1 Testing med dyse under reelle feltbetingelser

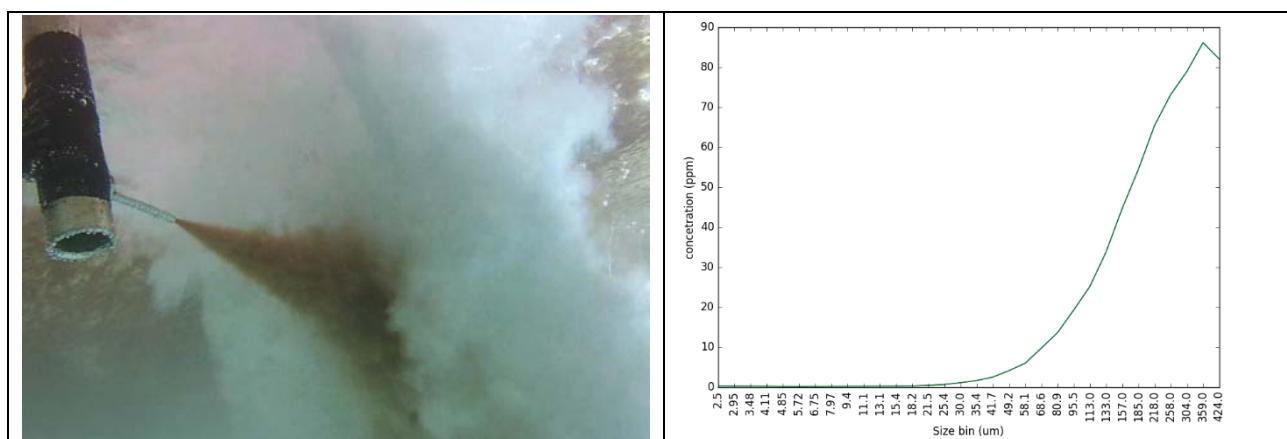
Basert på de innledende forsøkene i SINTEFs tårnbasseng fra TOF-prosjektet (våren 2015) som beskrevet i kapittel 3 (Vedlegg A), ble det valgt å introdusere olje som store dråper ( $300\text{-}400 \mu\text{m}$ ) som skytes inn vannstrømmen 10 cm under vannoverflaten istedenfor at dysen beveger seg. Oljen ble injisert kontinuerlig over 1 minutt for å få tilstrekkelige oljekonsentrasjoner i vannsøylen. Dette modifiserte testkonseptet fjernet mye av kompleksiteten i eksperimentene sammenlignet med behandling av en overflateolje med en bevegelig dyse. Dette ble ansett som et relevant testoppsett siden oljen representert som plastkuler i de innledende forsøkene dukket ned foran nedslagsfeltet som dråper og ble utsatt for vannstrømmen ca. 10 cm under overflaten (se kapittel 3 og Figur 3-2).

For i størst mulig grad å gjenskape forsøksbetingelser med vanndosering fra dysemanifold og erfaringer fra felt ble det utført videre testing av dette konseptet i SINTEF tårnbasseng med tilsvarende dysetype "Veejet 750" som ble installert på høykapasitet dysemanifold på MS Strilborg. Målsetningen med disse forsøkene i tårnbassenget var å gi en mer utfyllende dokumentasjon av dråpestørrelser og nedtrengning av oljedråper ved de reelle operative betingelsene i felt med MS Strilborg under OPV 2016. Dette ble utført ved å variere vanngjennomstrømming for en å dokumentere en vellykket behandling av tynne oljefilmer samt å teste effekten av vanndoseringen ved å variere dysehøyden over vannoverflaten. Skisse av test oppsett i tårnbassenget er vist i Figur 7-1.



Figur 7-1 Skjematisk testoppsett for dysetesting i SINTEF tårnbasseng (6 meter høy sylindrisk tank med diameter på 3 meter).

Det ble testet vanngjennomstrømminger på 200, 300 og 400 l/min inn på dysen som er relevante for operasjonell anvendelse, hvor 300 liter/min vann per dyse ble benyttet under fullskala feltforsøket. Høyden på dysen over vannoverflaten ble variert med 0,5, 1,0 og 1,5 m testet med vanngjennomstrømmingene som nevnt ovenfor. Åsgard Blend ble benyttet som testolje. Oljedråpene ble dannet ved å injisere oljen gjennom en 1,5 mm dyse med en hastighet på 1 l/min, og ble deretter injisert i vannstrømmen ca. 10 cm under vannoverflaten. Dråpestørrelsesfordelingen av de genererte oljedråpene ble målt ved å injisere oljen gjennom en dyse som var plassert i bunnen av tårnbassenget (Johansen et al., 2013). Figur 7-2 viser oljedråper som injiseres i vannstrømmen samt dråpestørrelsesfordelingen til disse dråpene før behandling med vanddosering. Dråpestørrelsesfordeling etter behandling med høykapasitet vanddosering er gitt i Figur 7-3.

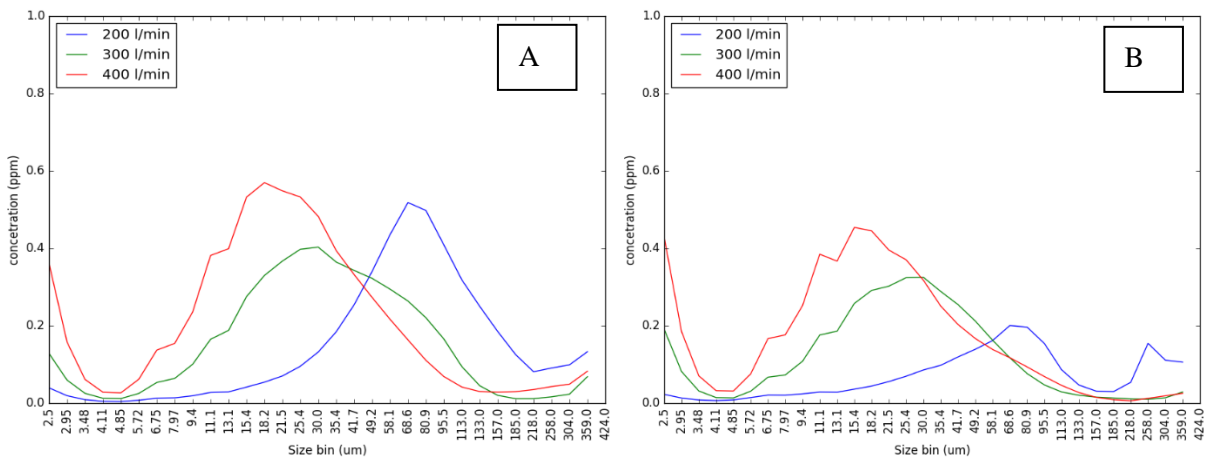


Figur 7-2 Oljedråper injisert inn vannstrømmen 10 cm under overflaten i tårnbassenget, samt dråpestørrelsesfordeling av disse oljedråpene før behandling målt med LISST 100 X.

### Oppsummering resultater fra testing i tårnbasseng

Eksperimentene i tårnbassenget ble gjennomført for å studere oppbrytning av dråper hvor strømningshastigheten av vannstrålen gjennom dysen og høyden på dysen over vannflaten ble brukt som variabler. Fersk olje av Åsgard Blend ble sprøytet inn i vannstrålen under overflaten med median

dråpestørrelse (d50) på 360  $\mu\text{m}$  (se Figur 7.2). Dråpestørrelsesfordelingen etter behandling ble målt som vist i Figur 7-3.



Figur 7-3 Dråpestørrelsesfordeling ( $\mu\text{m}$ ) etter behandling med vanngjennomstrømning på 200, 300 og 400 l/min ved å variere høyde på dysen til 0,5 m (A) og 1 m (B) over vannflaten i tårnbassenget.

Mengden overflateolje etter behandlingen ble kvantifisert, samt at beregnet prosentandel oljedråper i vannsøylen ble brukt som et mål på behandlingseffektivitet. Forsøkene viser at konseptet med høykapasitet vanddosering fra denne type dyse har et potensial for å bryte opp en oljefilm til mindre dråper så lenge strømningshastigheten til vannstrålen er tilstrekkelig høy (minimum 300-400 l/min). Det ble ikke observert signifikante forskjeller i behandlingseffektiviteten ved å variere høyden (0,5-1,5 m) på dysen over vannflaten. Høyde på dysene over sjøoverflaten er imidlertid antatt å være viktig for robustheten av konseptet siden volumet av vann per meter bredde behandles vil avta med økende høyde. Virkningen av vinden vil også øke med høyden. Det er derfor anbefalt at operativ høyde på dysene bør holdes mellom 1 og 1,5 meter.

Resultatene fra testene i SINTEF tårnbasseng er oppsummert i Tabell 7-1.

Tabell 7-1 Effekt av vanngjennomstrømning inn på dyse basert på et "gjennomsnitt" med ulike høyder på dysene (0,5-1,5 m) over vannoverflaten med fersk Åsgard Blend i SINTEF tårnbasseng

Vannstrømningshastighet (l/min)	Behandlings-effektivitet (%)	Median dråpestørrelse (d50 $\mu\text{m}$ )
400	75	14
300	70	30
200	23-46	70

## 7.2 Beregninger og effekt av forvitningsgrad på dråpestørrelser

Forsøkene i tårnbassenget som beskrevet i kapittel 7.1 ble gjort med injeksjon av en fersk Åsgard Blend med lav viskositet (1 mPa.s v/13°C). En økning i dråpestørrelser og reduksjon av behandlingseffektivitet bør forventes med økende forvitring på sjø, men dette har ikke blitt systematisk uttestet. Utviklingen av dråpestørrelsen (d50) som funksjon av oljens viskositet er imidlertid blitt beregnet ved hjelp av modifisert "Weber ligning" (Wang and Calabrese, 1986) verifisert for utblåsninger (undervannsutslipp), se også nærmere beskrivelse i Vedlegg A og D. Ved å koble disse beregningene av dråpestørrelser opp mot prediksjoner av oljeemulsjonens viskositet ved forvitring på sjøen vha. SINTEF OWM (Johansen, 1991), kan dråpestørrelser ved høykapasitet vanddosering beregnes som funksjon av oljens viskositet ved



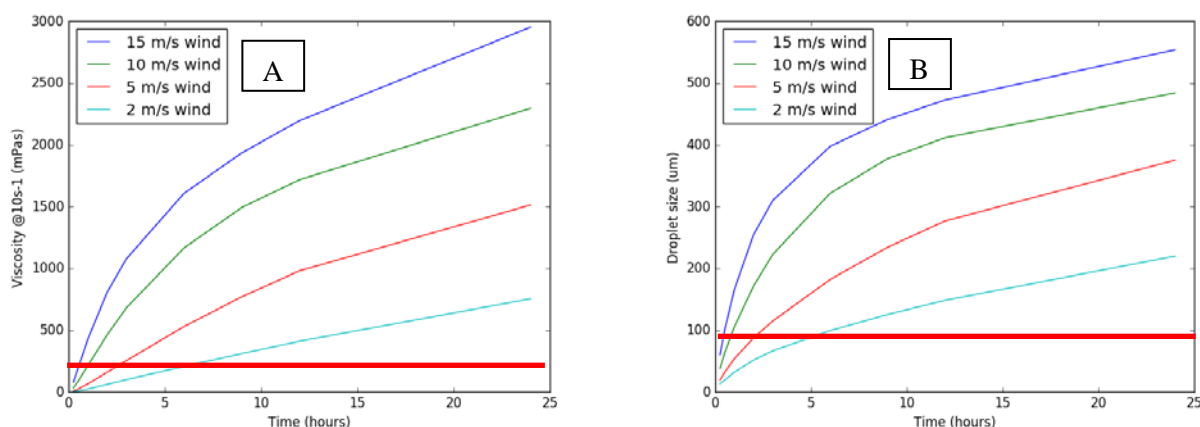
forvitring på sjøen. Det bør bemerkes at disse beregningene er ikke blitt dokumentert eksperimentelt /empirisk, men bør kunne betraktes som en indikasjon på forventet utvikling av midlere dråpestørrelse med økende viskositet ved forvitring av en olje på sjø. Det anbefales derfor at dette valideres gjennom fremtidige laboratorieforsøk som beskrevet i kapittel 7.1 på et større utvalg av oljer med ulike viskositeter for å oppnå en mer robust dokumentasjon på operative tidsvindu for mekanisk dispergering ved høykapasitet vanddosering fra baugmontert dysemanifold eller FiFi monotorer

### Beregning av dråpestørrelser via SINTEF OWM av forvitret Åsgard Blend

I et av forsøkene (betegnet som TOF 3.3, se kapittel 6) under OPV 2016 ble Åsgard Blend forvitret i 3-4 timer ved brytende bølger (6-7 m/s vindhastighet) før behandling med høykapasitet vanddosering fra FiFi-monitor (Daling et al., 2017). Viskositeten av olje/emulsjon ble målt til 330 mPa.s ved skjærhastighet  $10 \text{ s}^{-1}$  like før vanddosering, som igjen ga dråpestørrelser i området 100-120  $\mu\text{m}$  etter behandling.

SINTEF OWM ble benyttet for å predikere utvikling av viskositeten til forvitret Åsgard Blend. Predikert tetthet og viskositet fra forvitningsmodellen ble brukt som inngangsdata til modifisert "Weber ligning" (beskrevet i Vedlegg A og D) for beregning av dråpestørrelser. Prediksjonene ble gjort med utslippsrate  $10 \text{ m}^3$  i 6 minutt, tilsvarende utslippsrate av Åsgard Blend under OPV 2016 (Daling et al., 2017). Figur 7-4 A og B viser henholdsvis predikerte viskositeter (ved  $10 \text{ s}^{-1}$ ) og beregnede dråpestørrelser ( $d_{50}$ ) av forvitret Åsgard Blend over 24 timer ved ulike vindhastigheter.

Det bør bemerkes at oljeemulsjon har noe høyere viskositet enn det den modifiserte "Weber ligningen" for beregning av dråpestørrelse ( $d_{50}$ ) er validert for, og beregningene må derfor kun ansees som en indikasjon.



Figur 7-4 A: Predikerte viskositeter (skjærhastighet  $10 \text{ s}^{-1}$ ) for Åsgard Blend hvor rød ledelinje viser viskositetsgrense  $< 250 \text{ mPa.s}$  for effektiv dispergering med høykapasitet vanddosering. B: Beregnede dråpestørrelser ( $d_{50}$ ) basert på predikerte viskositeter og tetthet, hvor rød ledelinje viser maksimum dråpestørrelser ( $< 100 \mu\text{m}$ ) for effektiv behandling.

### Oppsummering

For å generere oljedråper ( $d_{50}$ )  $< 70\text{-}100 \mu\text{m}$  (se rød ledelinje i Figur 7-4 B) for optimal effektivitet med påføring av høykapasitet vanddosering for en forvitret olje av Åsgard Blend, bør viskositeten til olje/emulsjon være mindre enn 150-250 mPa.s for mekanisk dispergering, dvs.  $< 5\text{-}6$  timer ved 2 m/s vindhastighet, og tilsvarende 2-3 timer ved 5 m/s.

Beregningene indikerer at potensialet med påføring av høykapasitet vanddosering for å bryte opp en oljefilm til mindre dråper for effektiv behandling ( $d_{50}$ )  $< 70\text{-}100 \mu\text{m}$ ) er derfor knyttet til en tidlig fase (dvs. timer etter utslipp) av lette råoljer /kondensat i rolig værforhold. Dette ble også dokumentert i felt.

## 8 Konklusjon og anbefalinger

### 8.1 Konklusjon

Det har blitt utviklet og testet prototyper for mekanisk dispergering som en del av NOFOs Teknologitvklingsprogram Oljevern 2015: *WP048 Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer*, hvor målsetningen har vært å kunne utvikle enkle kostnadseffektive løsninger med høy behandlingsskapasitet for å redusere potensiell miljøskade av tynne oljefilmer på sjø. Jason Engineering AS har i samarbeid med SINTEF konstruert prototype deflektordyse (nebb) som kan monteres på FiFi-monitor for å oppnå en høykapasitet vannstråle og et konteinerbasert system for høykapasitets dysebom (manifold) med vanddosering som kan plasseres i baugen (foran) på beredskapsfartøy etter samme prinsipp som dagens dispergeringsystem på beredskapsfartøy. Testing av prototyper har vært gjort i fullskala forsøk ved både installasjon og sjøtesting på MS Strilborg uten oljefilm og ved fullskala feltforsøk med testoljen Åsgard Blend under NOFO OPV 2016 som også har vært en del av Petromaks 2 TOF-prosjektet.

Resultater og erfaringer fra fullskala feltforsøk under OPV 2016 (Daling et al., 2017) har demonstrert at mekanisk dispergering av tynn oljefilm har et potensial hvor 10 m<sup>3</sup> av en lett råolje/kondensat (Åsgard Blend) ble sluppet ut under rolig værforhold (ikke-brytende bølger, < 5 m/s vindhastigheter). Under OPV 2016 ble oljefilmen behandlet med lavdosering dispergeringsmiddel etterfulgt av høykapasitet vanddosering fra dysemanifold som viste god behandlingseffektivitet. Forsøk med høykapasitet vannstråle fra FiFi-monitor (uten deflektordyse) ble utført på en olje/emulsjon av Åsgard Blend som hadde forvitret og emulgert i 3-4 timer under brytende bølger (> 5 m/s vindhastigheter). Dette var ikke optimale forsøksbetingelser, men vi fikk likevel demonstrert at konseptet var lovende for å kunne knuse opp en oljefilm /emulsjon til mindre "granulater".

Tidsvindu for effektiv mekanisk dispergering er relativt kort og er avhengig viskositeten til oljeflaket. Størst potensiale med høykapasitet vanddosering er derfor knyttet til en tidlig fase etter utslipp av lette råoljer eller kondensat i rolig værforhold ved ikke-brytende bølger. Forsøkene med konseptet for mekanisk dispergering med høykapasitet vanddosering har vist at viskositeter for en olje/emulsjon bør være mindre enn 150-250 mPa.s for få oppnå optimal dispersjon av oljedråper i vannsøylen på 70-100 µm.

### 8.2 Anbefalinger

Videre testing av konseptet anbefales både i laboratoriet med systematiske forsøk av flere oljetyper for å bedre kunne estimere operativt tidsvindu for ulike oljetyper. Videre anbefales supplerende feltforsøk for å dokumentere den operative kapasiteten av begge konseptene /prototyper både separat og i kombinasjon under rolig værforhold. Feltesting kan gjennomføres på f.eks. oljefilm fra produsertvann eller mer dedikerte eksperimentell utslipp med ulike oljer (f.eks. lette kondensat eller raffinerte destillater) i forbindelse med NOFO OPV (2018). Dette for å få et bedre grunnlag og robusthet for å kunne operasjonalisere og ta i bruk denne metodikken i oljevernaksjoner med utslipp av slike lette råoljer/kondensat/ diesel-oljer under rolig værforhold.

I tillegg har Jason Engineering AS foreslått forbedringer av deflektordysen fra å være et såkalt lukket nebb til å være åpen i bunnen for å kunne styre og samle vannstrålen til et bredere nedslagsfelt. Prototypen kunne blitt videre uttestet i en planlagt testtrigg hos Jason Engineering AS med vannkapasitet opp til 2500 m<sup>3</sup>/time.

## 9 Referanser

- Daling, P.S. Leirvik F, Pettersen, T.A 2016: Sjøtest av dispergeringsutstyr på MS Strilborg. Prosjektnotat WP 048- Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer (Vedlegg C)
- Daling, P.S and K.R. Sørheim, 2016: Field plan for testing and monitoring of Thin Oil Films (TOF) experiment during NOFO OPV-2016. Petromaks 2 TOF Project memo. June 2016, SINTEF, 102007603-6
- Daling, P.S, Lewis, A., Sørheim, K.R., Gjesteland, I. 2017: Full-scale field testing of thin oil films from releases of light crude oil at sea. TOF-project. SINTEF report. 2017:00030. ISBN: 978-82-21-40670-8. Unrestricted
- Daling, Per S, Lewis, Alun., Leirvik F, Pettersen T-A , Krause D, Ramstad S and Kristin Rist Sørheim 2017: Light Crude Oil Slicks Behaviour and Effect of Response Options during Full-scale Field Experiments. *AMOP – Paper 2017*, accepted.
- French, D., M. Reed, S. Feng, K. Jayko, S. Pavignano, H. Rines, T. Isaji, S. Puckett, A. Keller, F. French, III, D. Gifford, E. Howlett, J. McCue, G. Brown, E. MacDonald, J. Quirk, S. Natzke, B. Ingram, R. Bishop, and M. Welsh, 1997. *The CERCLA Type A Natural Resource Damage Assessment Model for Coastal and Marine Environments (NRDAM/CME)*, Vol. I. Report to Office of Environmental Affairs, Washington, D.C., December 1992, Contract No. 14-01-0001-91-C-11.
- Gjesteland, I, B.E. Hollund, J. Kirkeleit, P. Daling, Bråtveit 2017: Oil spill field trial at sea: Measurement of Benzene exposure. *Annals of Work Exposure and Health*. Paper accepted, 2017
- Johansen, Ø. 2015: Mechanical dispersion of thin oil films with plunging water jets. Petromaks 2 TOF Project memo (Vedlegg A)
- Johansen, Ø., Brandvik, P.J, Farooq, U., 2013. Droplet Breakup in subsea oil releases- Part 2 Predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants. *Marine Pollution bulletin* 73 (2013) 327-335
- Johansen, Ø. 1991. Numerical modelling of physical properties of weathered North Sea crude oils. DIWO-report no. 15. IKU-report 02.0786.00/15/91. Open.
- Leirvik, F., Johansen, Ø. Krause, D. 2015: Testing of high volume spray treatment of thin oil films. Project memo D5-3. Petromaks 2 TOF (Vedlegg A)
- Leirvik, F, Daling P.S, Sørheim K.R 2017: High volume nozzle treatment of thin oil films. Project memo WP 048- Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer (Vedlegg D)
- Lunel, T. 1995: Understanding the mechanism of dispersion through oil droplet size measurements at sea. Pp. 240 – 285 in *"The Use of Chemicals in Oil Spill Response"*, ASTM STP 1252, P. Lane Ed.
- Lewis, A. "Current status of the BAOAC (Bonn Agreement Oil Appearance Code)", <http://www.bonnagreement.org/site/assets/files/3952/current-status-report-final-19jan07.pdf>. Report to Bonn Agreement, and the Netherlands North Sea Agency Directie Noordzee, 2007.
- Rasmussen, C, Daling, P.S, Sørheim, K.R 2016. Konstruksjon av prototyper. Prosjektnotat WP 048- Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer (Vedlegg B)
- Wang, C.Y., and Calabrese, R.V., 1986. Drop breakup in turbulent stirred-tank reactors. *Part II: relative influence of viscosity and interfacial tension*. *AIChE J.* 667-676

## **Vedlegg A**

**Project memo: Testing of high volume spray treatment of  
thin oil films**

SINTEF Materialer og kjemi  
SINTEF Materials and Chemistry  
Address:  
Postboks 4760 Sluppen  
NO-7465 Trondheim  
NORWAY

Telephone: +47 73593000  
Telefax: +47: 73597043

info.mk@sintef.no  
www.sintef.no/mk  
Enterprise /VAT No:  
NO 948 007 029 MVA

# Project memo D 3-5

## Testing of high volume spray treatment of thin oil films

**VERSION**

2.0

**DATE**

2016-02-26

**AUTHOR(S)**

Frode Leirvik, Øistein Johansen and Dan Krause

**CLIENT(S)**Statoil, Eni Norge, ENGIE, Shell, Total, BP Norge, Centrica,  
Research Council of Norway**CLIENTS REF.**Anja Haugerud, Ole Hansen,  
Jannecke A. Moe, Gunnhild Bækken,  
Ingvild Skaare, Per M. Sævik, Morten  
Løkken, Andreas Q. Nielsen**PROJECT NO.**

102007603-3

**NO. OF PAGES AND APPENDICES:**

31 incl. 2 appendices

**ABSTRACT**

As part of the Thin Oil Films project a series of tests have been performed in the SINTEF Tower basin and in the SINTEF Minitower. The tests have been performed to investigate the potential for use of spray nozzles to disperse thin oil films on the sea surface into the water column. This project memo summarizes the testing in the Tower basin. In the Mini tower experiments droplet size distribution was measured after treatment with water jets. An attempt has been done to use the modified Weber equation for calculating droplet sizes based on physical input parameters from the Minitower experiments and measured droplet sizes.

**PREPARED BY**

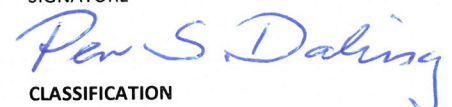
Frode Leirvik

**APPROVED BY**

Per S. Daling

**PROJECT MEMO NO.**

D3-5

**SIGNATURE****SIGNATURE****CLASSIFICATION**

Unrestricted

# Document history

---

VERSION	DATE	VERSION DESCRIPTION
1.0	2015-10-26	Draft

---

2.0	2016-02-26	Final
-----	------------	-------

# Table of contents

<b>A</b>	<b>Mechanical dispersion of thin oil films with plunging water jets (Johansen, 2015)</b> .....	<b>3</b>
<b>B</b>	<b>Mini Tower results and observations</b> .....	<b>3</b>
<b>1</b>	<b>Introduction</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Experimental setup</b> .....	<b>4</b>
	2.1 Tower basin experiments.....	4
	2.2 Minitower experiments .....	6
<b>3</b>	<b>Results and discussions</b> .....	<b>7</b>
	3.1 Nozzle type.....	7
	3.2 Water pressure .....	8
	3.3 Tilting angle .....	10
	3.4 Particle trajectories and velocities.....	11
	3.5 Minitower experiments .....	12
	3.6 Modelling of droplet size .....	14
<b>4</b>	<b>Conclusions from the experiments</b> .....	<b>18</b>
<b>5</b>	<b>References</b> .....	<b>18</b>
<b>A</b>	<b>Mechanical dispersion of thin oil films with plunging water jets (Johansen, 2015)</b> .....	<b>19</b>
<b>B</b>	<b>Mini Tower results and observations</b> .....	<b>27</b>

## APPENDICES

---

<b>A</b>	<b>Mechanical dispersion of thin oil films with plunging water jets (Johansen, 2015)</b>
<b>B</b>	<b>Mini Tower results and observations</b>

---

## 1 Introduction

As part of the Thin Oil Films project a series of tests have been performed in the SINTEF Tower basin. The tests have been performed to investigate the potential for use of spray nozzles to disperse thin oil films on the sea surface into the water column. Initial tests were performed with treatment of actual thin oil films in the Tower basin. As the oil slick is treated with the spray systems air bubbles are also formed in the water. The oil concentrations formed from the thin films were small compared to the air concentrations in the water. Air bubbles also deposited onto the optics of the instrumentation, making measurements difficult. Dilution of the already low oil concentrations in the large tank also contributed to the difficulties. It was therefore decided to abandon documentation with real oil in the large setup. The large test tank was only used for mechanistic studies of oil slick / spray interaction. To enable photo documentation of the interaction between the spray and the surface water, polyethylene granulate was chosen to represent the oil slick. A smaller tank (SINTEF mini tower) were chose for quantitative work with thin oil films.

## 2 Experimental setup

### 2.1 Tower basin experiments

Tests have been performed in the SINTF tower basin. This is a 6 meter high cylindrical tank with a diameter of 3 meters. A motorised slide was placed on top of the tank, enabling movement of the spray nozzle across the tank. The tank was filled with seawater to the desired height below the nozzle. In initial tests a shallow frame was placed in the surface below the advancing spray system. A few experiments were performed with oil in this frame. It was soon clear that the oil was pushed below this frame and out of the treatment area. It was also concluded that studies of the energy input to the surface was difficult with one single nozzle as the energy input were allowed to dissipate sideways. This is thought not to be the case in a system with multiple nozzles. A 10 cm wide translucent channel was therefore introduced below advancing spray system. Introduction of the channel allowed better documentation of the mechanisms of oil/spray interaction. A schematic drawing of the experimental setup is shown in Figure 2.1.

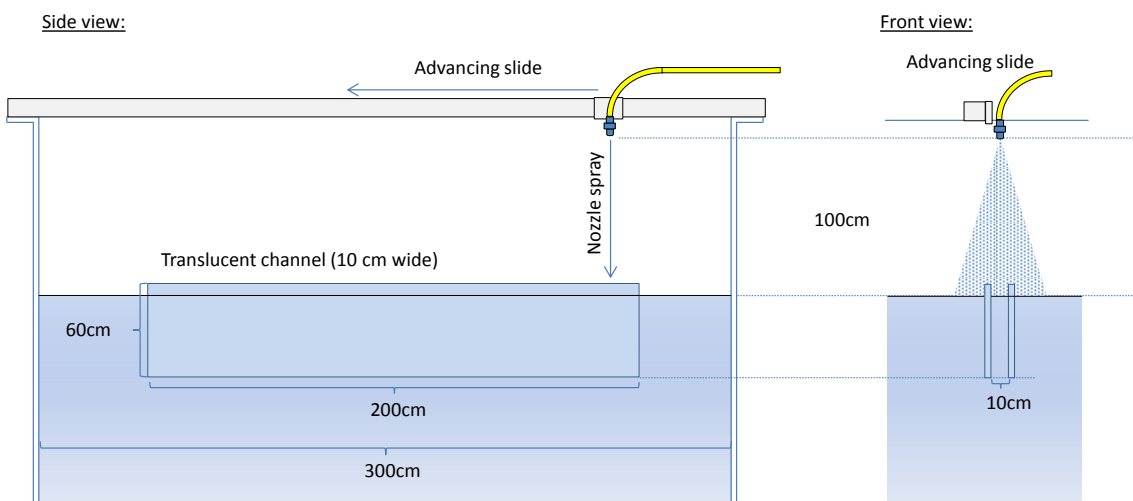


Figure 2.1 Scematic drawing of the experimental setup.

The speed of the motorised slide could be set and tests have been performed at advancing speeds of 50,100,150,200 cm/sec. The water for the spray system was drawn from the bottom of the 6 meter high tank. A centrifugal pump (Lowara FHS 32-200/40/P) was used to supply the nozzle with water. The pump was controlled with a Variable Frequency Drive (VFD). The pressure at the nozzle was read out manually with a manometer placed just prior to the nozzle. The VFD was used to adjust the pump performance to gain the



wanted pressure. The water flow rate is not measured but is given for a range of pressures in the nozzles spec sheets.

Four nozzles have been tried and visually assessed:

- Veejet 50500
- Veejet 25750
- FullJet 1HH-11W
- FullCone BS2352 T1

Only the Veejet 200 25° nozzle has been used in systematic studies in the tower basin. Some tests were also done with the larger Veejet 750 25° nozzle.

Some initial experiments were performed with treatment of a thin oil film. The goal was to try quantify the oil droplets formed after treatment with the LISST 100X from Sequoia Scientific. The LISST 100X is a laser diffraction based instrument for measurements of particle size distribution. The instrument does not distinguish between oil droplets and air bubbles. It was found that the concentration of air bubbles formed by the jet penetrating the surface was very high, totally over shadowing the low oil droplet concentrations. Oil droplets in the water column could also not be seen buy underwater cameras, and oil experiments could not be utilised for studies of entrainment or breakup studies in and around the jet. The systematic studies were performed with 3mm High Density Polyethylene (HDPE) particles rather than oil as these could easily be seen with cameras both over and under water. The HDPE particles have a density of ~0.95 g/ml. The size of 3mm is chosen for the particles to be visible for the underwater camera rather than to reflect the thickness of the thin oil films.

Three cameras were used to document the interactions between the floating particles and the advancing spray (Figure 2.2). The experimental matrix is shown in Table 2.1.

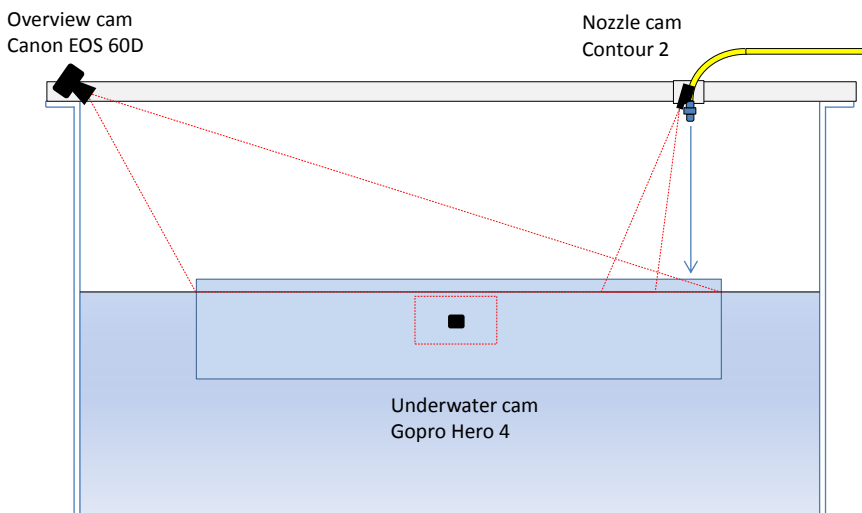


Figure 2.2 Cameras used to study interactions between particles and the advancing spray

*Table 2.1 Experimental matrix for the systematic testing with the Veejet 200 25° flat spray nozzle*

Advancing velocity (cm/sec)	Nozzle pressure (bar)	Corresponding nozzle flow (l/min)	Nozzle angle (°)
150	2	64	35
150	2	64	30
150	2	64	20
150	2	64	10
150	2	64	0
150	1	45	20
150	2	64	20
150	3	79	20
150	4	91	20
50	2	64	20
100	2	64	20
150	2	64	20
200	2	64	20

## 2.2 Minitower experiments

SINTEF's MiniTower experimental apparatus was modified to allow testing of water jet nozzles with rated discharge rates below 15 l/min. Water was pressurized with compressed air at 7 bars in a 20 liter tank. Pressure was monitored by a pressure gauge placed close to the nozzle and was regulated by a ball-valve. Measurements of penetration depth were made with a scale. A LISST-100X particle sizer was utilized to measure oil droplet size distributions in the water column. Photographs and video images were recorded of the water jets to aid with evaluating the extent of a resulting coherent water jet.

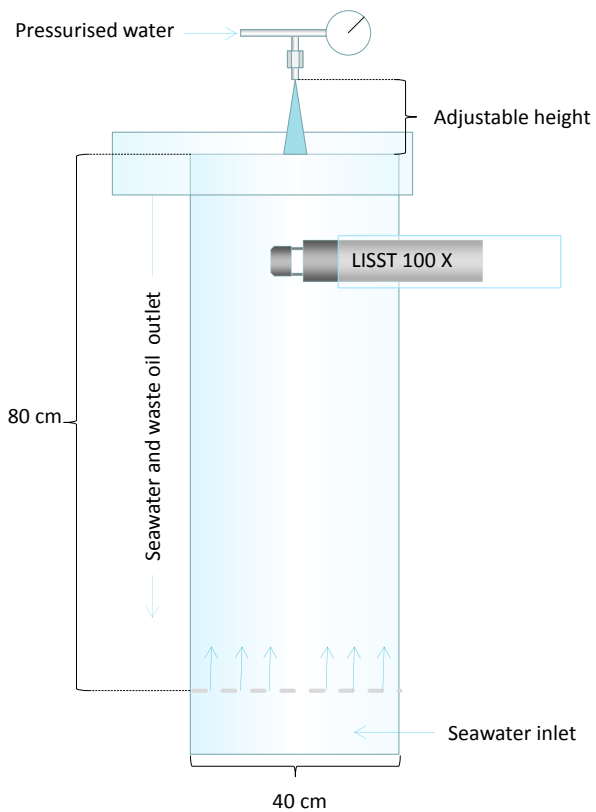


Figure 2.3 Experimental setup in the Minitower experiments

### 3 Results and discussions

#### 3.1 Nozzle type

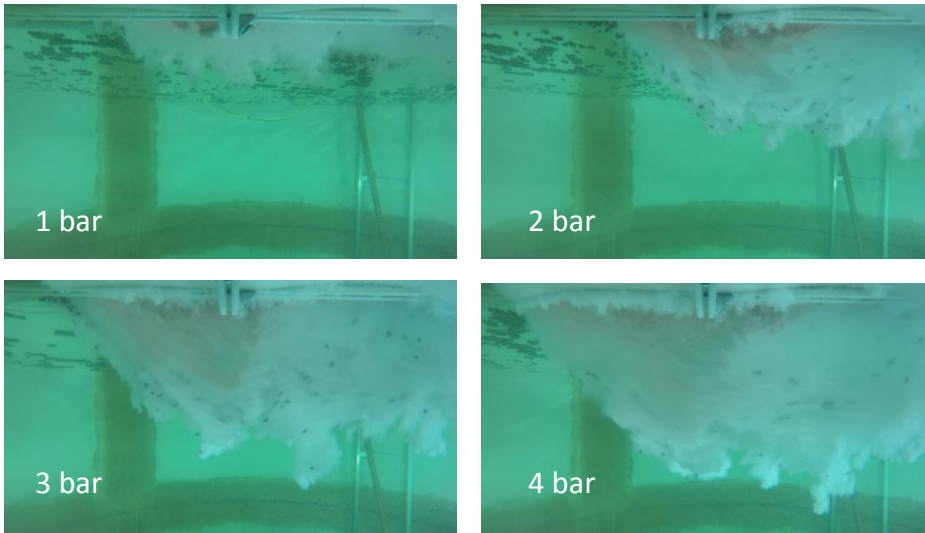
Several nozzle types were assessed visually. The nozzle types evaluated are listed below:

- Straight impinging jet
- Hollow cone nozzle
- Full cone nozzle
- Flat spray nozzles with varying angles
- Rotating jet

It was decided to only do testing with Flat spray nozzles with an angle of 20°.

### 3.2 Water pressure

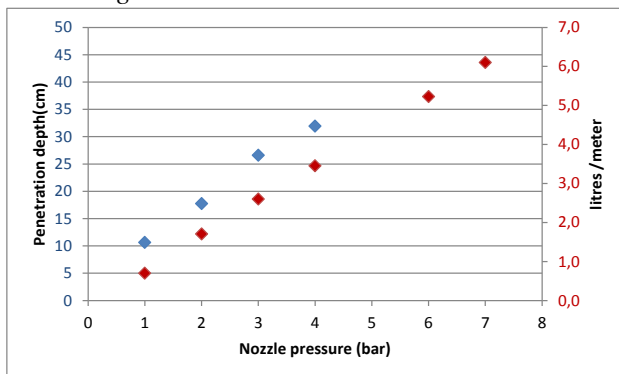
Tests were done at 1,2,3 and 4 bar with a fixed nozzle angle of 20° and an advancing velocity of 150cm/sec. Underwater images from the tests are shown in *Figure 3.1*.



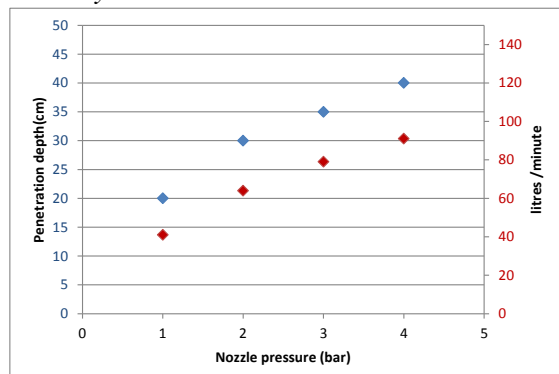
*Figure 3.1 Spraying of a slick of tracer particles at different pressures. Images are snapshots of underwater video.*

With increased pressure both the flow and the exit velocity from the nozzle increase. The increased flow and velocity give a higher penetration depth into the water. Penetration depth as a function of nozzle pressure is shown in Figure 3.2. With the 1bar pressure setting the tracer particles were only bobbing up and down in the water. As pressure was increased to 2 bar the tracer particles were moved down into the water in front of the jet and then into the turbulent bubble cloud. The tracer particles were continuously processed for 2,3 and 4 bar pressure settings.

*Advancing at 150 cm/sec*



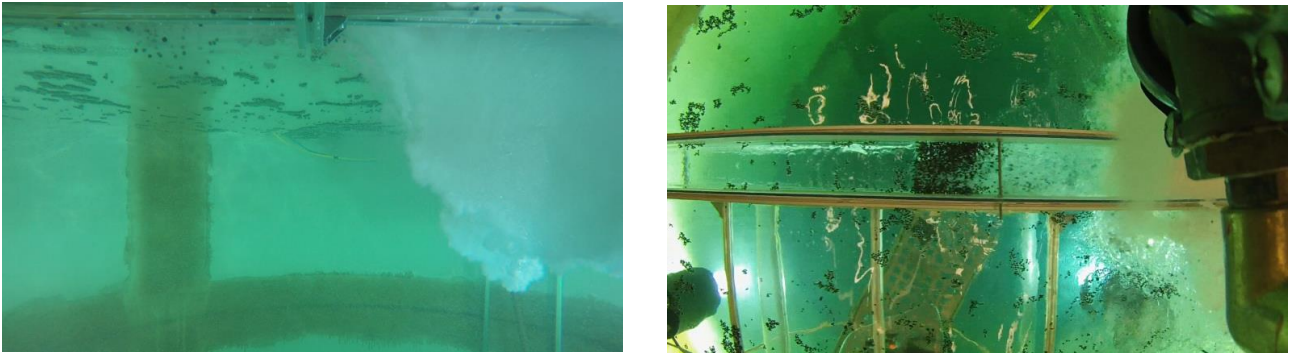
*Static system*



*Figure 3.2 Penetration depth (blue dots) for the jet at increasing pressures for an advancing system (left) and a static system (right). The red dots show the water application rate.*

### Advancing velocity

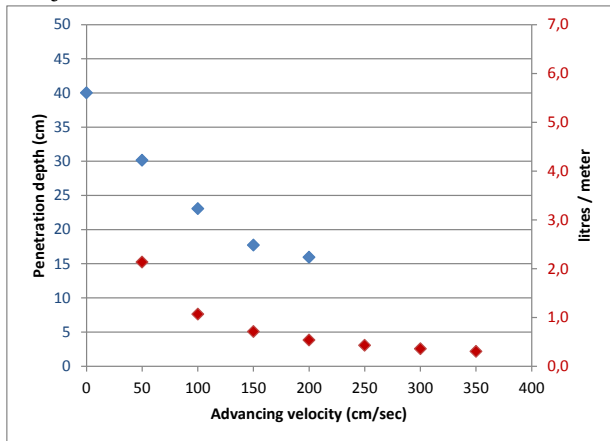
Advancing velocities of 50,100,150 and 200 cm/sec have been tested. Tests were performed with 2 bar water pressure and 20° nozzle angle. Tests show that a minimum advancing velocity is required. At velocities below 100cm/s the oil was pushed in front of the "bow wave" generated by the spray. As seen in *Figure 3.3* both surface- and submerged particles are pushed in front of the spray.



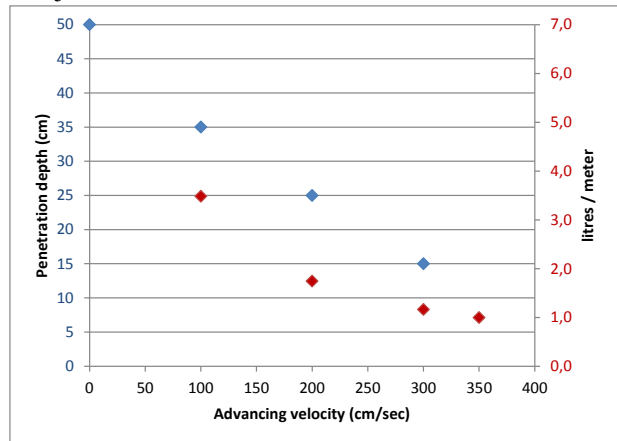
*Figure 3.3 50 cm/sec advancing velocity. Left image: submerged tracer particles pushed ahead of the jet. Right image: Camera mounted on nozzle show high concentration of tracer particles on the surface in front of the spray.*

As advancing velocity increase, the volume of water applied per meter travelled decrease. Figure 3.4 show the calculated litres of water applied per meter in the experiments (red dots). The litres /meter is compared to the observed penetration depth at increased advancing velocity (blue dots). The two curves seem to follow the same trend.

Veejet 25200



Veejet 25750



*Figure 3.4 Calculated litres of water applied per meter in the experiments (red dots). The litres /meter is compared to the observed penetration depth at increased advancing velocity (blue dots).*

### 3.3 Tilting angle

In initial tests with the spray nozzle perpendicular to the water surface the oil slick was pushed ahead of the impact area. This resulted in a thicker oil slick. It is assumed that keeping the slick as thin as possible all the way into the treatment area will enhance the chances of small droplet break-up. Tilting angles of the nozzles of 0°, 10°, 20°, 30° and 35° were tested. The up-concentration of the slick thickness was observed at tilting angles < 20°. The slick still pass through the spray but as higher thickness batches. An example of tracer particles concentrating at the leading edge of the spray is shown for 0° in Figure 3.5. Observed that there are few particles inside the bubble cloud. In the same figure a more continuous flow of particles passing into the bubble cloud is shown for a 20° tilting angle of the nozzle.

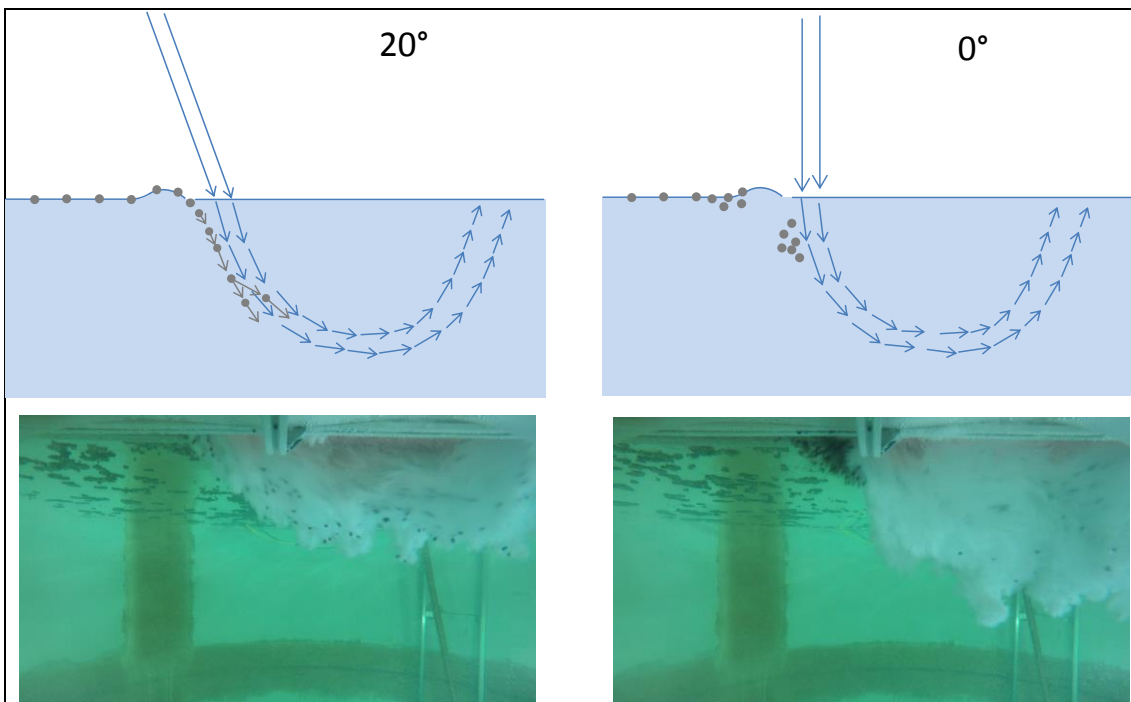


Figure 3.5 Particles concentrating at the leading edge of the spray at 0° tilting angle while a continuous "processing" of particles is observed at 20°.

The figure also shows that the penetration depth is lower for the angled spray. Another disadvantage with high spray angles is that the spray seems to bounce off the surface. This means loss of energy directed into the water. Higher nozzle angles also favour transportation of particles under the bubble cloud, rather than into the jet. This may cause poor droplet breakup.

### 3.4 Particle trajectories and velocities

For all settings tested the spray to some extent created a "bow wave". Given sufficient water pressure, advancing velocity and nozzle angle the tracer particles were not deflected by the spray. Underwater video show that most tracer particles are initially forced down in front of the high energy jet. Certain distances down tracer particles are gradually starting to be sucked into the high turbulence jet / bubble cloud. A few tracer particles have been observed to pass beneath the bubble cloud, not being subjected to the high acceleration. The majority of droplets are, however, "treated" in the high turbulence jet/ bubble cloud.

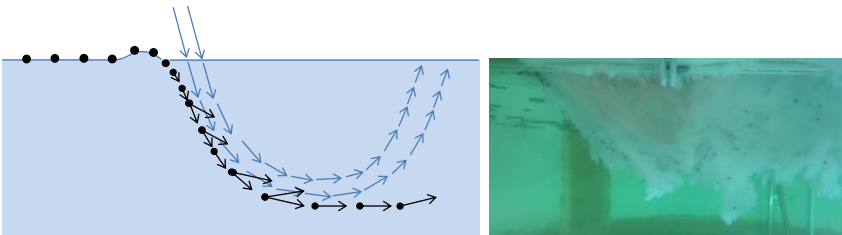


Figure 3.6 Typical particle trajectory observed in the experiments

Current measurements have been performed 5 cm under the bubble cloud and below. There were no downward directed currents recorded under the bubble cloud. Measurements were done with a propeller type current meter with a stated detection limit of 4 cm/sec. Due to the slow response time of the instrument measurements could just be performed under the bubble cloud from a static water jet.

For a few videos, it has been possible to identify particles through several video frames (Figure 3.7)



Figure 3.7 Particle pair moving down in front of the jet before accelerating into the high energy jet area.

As the video frame rate and the dimensions in the image are known, it has been possible to estimate the velocities of the droplets. The droplet pair shown in Figure 3.7 is moving with a speed of 30-40 cm/sec. The droplets in the example travelled downward in front of the jet at a constant speed for 5 video frames (0.2 seconds) before they accelerated into the jet / bubble cloud area.

The velocities inside the high-energy area are difficult to quantify with any degree of accuracy with the video equipment used. Motion blur can be used to estimate the velocity of the imaged particles. Figure 3.8 show how particles are elongated due to motion blur.

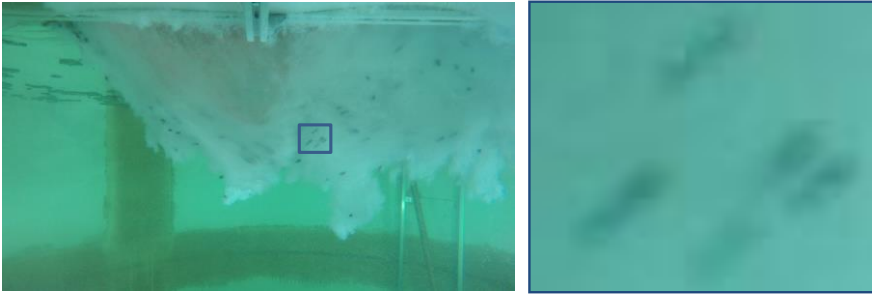


Figure 3.8 Elongation of particles used for a rough estimation of the particle velocity inside the turbulent area following the jet

The particles are elongated approximately 3 times in the direction of the velocity. The particles have a diameter of 3mm giving a travelled distance of 9 mm within the exposure time of the camera. Given a minimum shutter speed of 1/1000 seconds for the camera at the given light conditions the speed of the particles inside the bubble cloud is probably higher than 9 m/s.

### 3.5 Minitower experiments

Experimental conditions for the experiments performed in the minitower are given in Table 3.1. The droplet size distributions measured with the LISST 100X is shown in Figure 3.9. The peak droplet sizes for the experiments are given in the last column in Table 3.1.

Table 3.1 Results from the experiments with oil performed in the Minitower

	Nozzle angle	Pressure	Flow	Height	Nozzle diameter	Exit velocity	Peak droplet size
	(°)	(bar)	(l/min)	(cm)	(mm)	(m/s)	(µm)
JBF2124B1	30	5,5	15.5	14	4,0	21	53.7
JBF2124B1 moving	30	2,5	11.3	14	4,0	15	53.7
JBC1385B1	20	4	4.45	6	2,2	20	38.5
JBC1385B1 moving	20	4	4.45	14	2,2	20	32.7
JBC1385B1 Angled 31°	20	4	4.45	6	2,2	20	27.7
JBC2124 Angled 31°	20	4	14.3	6	4,0	19	27.7
JBC2124 Slight angle	20	4	14.3	12	4,0	19	27.7



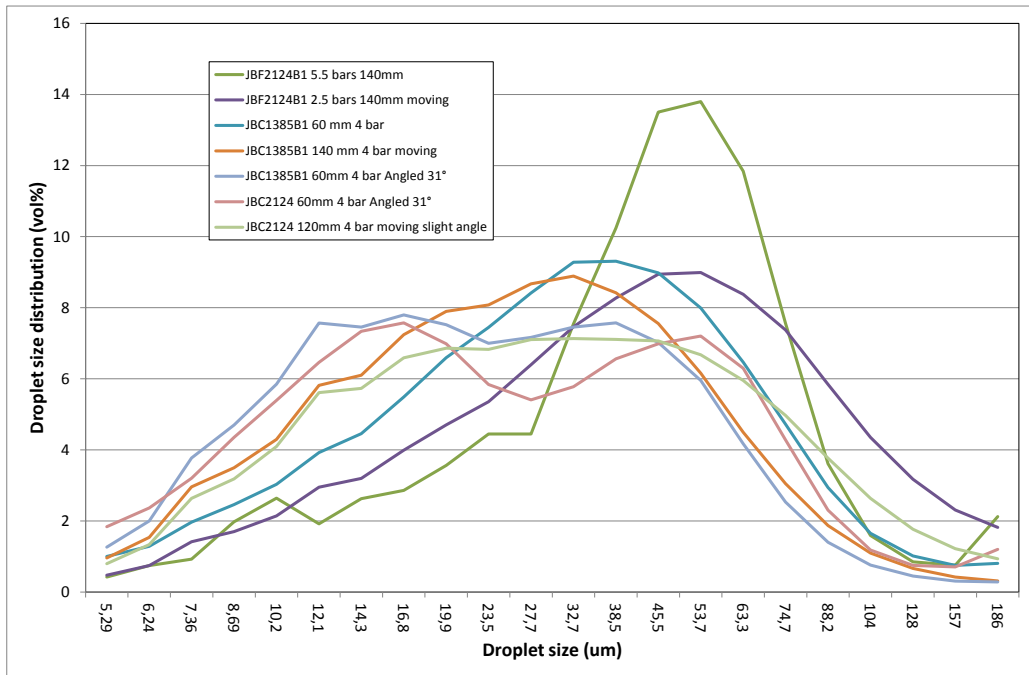


Figure 3.9 Recorded particle size distributions after treatment of oil in the Minitower experiments.

There have also been systematic studies of the relationship between nozzle pressures, nozzle heights and penetration depth in the mini tower. All results are listed in Table 3.2. All experiments listed in this table are with a non-moving nozzle. For comparison the static nozzle experiments from the larger scale basin is included in the same table, below.

Table 3.2 Penetration depths in Minitower and Tower basin experiments

	Nozzle spreading angle (°)	Nominal nozzle diameter (mm)	Nozzle Pressure (bar)	Height above water (mm)	Penetration Depth (m)	Flow (l/min)	Exit velocity* (m/s)
JBF2124B1	30	4	4	27	0,3	14,3	19
JBF2124B1	30	4	4	44	0,275	14,3	19
JBF2124B1	30	4	4	88	0,261	14,3	19
JBF2124B1	30	4	4	151	0,238	14,3	19
JBF2124B1	30	4	4	216	0,183	14,3	19
JBF2124B1	30	4	4	283	0,146	14,3	19
JBF2124B1	30	4	2	27	0,23	10,1	13
JBF2124B1	30	4	4	27	0,3	14,3	19
JBF2124B1	30	4	6	27	0,4	17,5	23
JBC2124	20	4	4	26	0,34	14,3	19
JBC2124	20	4	4	57	0,29	14,3	19
JBC2124	20	4	4	124	0,253	14,3	19
JBC2124	20	4	4	171	0,236	14,3	19
JBC2124	20	4	4	216	0,221	14,3	19
JBC2124	20	4	4	286	0,181	14,3	19
JBC2124	20	4	2	26	0,25	10,1	13
JBC2124	20	4	4	26	0,34	14,3	19
JBC2124	20	4	6	26	0,48	17,5	23
JBF1310B1	30	2	4	26	0,18	3,85	20
JBF1310B1	30	2	4	53	0,16	3,85	20
JBF1310B1	30	2	4	114	0,119	3,85	20
JBF1310B1	30	2	4	156	0,087	3,85	20
JBF1310B1	30	2	4	171	0,082	3,85	20
JBF1310B1	30	2	4	197	0,066	3,85	20
JBF1310B1	30	2	4	242	0,051	3,85	20
JBF1310B1	30	2	2	26	0,14	2,53	13
JBF1310B1	30	2	4	26	0,18	3,85	20
JBF1310B1	30	2	6	26	0,22	4,5	24
JBC1385B1	20	2,2	4	26	0,21	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	4	46	0,21	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	4	98	0,188	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	4	144	0,182	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	4	175	0,141	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	4	219	0,127	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	4	286	0,11	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	2	26	0,18	3,14	14
JBC1385B1	20	2,2	4	26	0,21	4,45	20
JBC1385B1	20	2,2	6	26	0,27	5,4	24
Veejet 250	25	8,7	1	500	0	41	11
Veejet 250	25	8,7	2	500	0,3	64	18
Veejet 250	25	8,7	3	500	0,35	79	22
Veejet 250	25	8,7	4	500	0,4	91	26
Veejet 750	25	16,4	1,4	500	0,5	209	16

### 3.6 Modelling of droplet size

Droplet size measurements were found difficult in the experiments with nozzle sizes relevant to field applications. The only droplet size data generated are for lower capacity nozzles in the smaller Minitower tank.

SINTEF have developed algorithms for calculation of droplet break-up of an oil slick subject to breaking waves (Johansen *et.al.*, 2015). The publication suggests the following equation for calculation of the number distribution of droplets formed from an oil slick subject to a breaking wave.

$$\frac{D}{h} = AWe^{-a} \left[ 1 + \frac{B}{A} \left( \frac{We}{Re} \right)^a \right] \quad (1)$$

Where:

D	Number distribution of droplets (m)
H	Slick thickness (m)
We	Weber number (-)
Re	Reynolds number (-)
a, A and B	Empirically determined constants

The experimental setup used in the development of the algorithms has similarity to the spray application studied in this project. Data generated in this project has been applied in equation (1), above. The constants (A, B and a) have been adjusted to fit the new dataset. To get a greater span in parameters for fitting the parameters experimental data from another project was included used using higher exit velocities to treat oils with a larger range of viscosity than the TOF-project. The data used to fit the model to the new application is shown in Table 3.3. The calculated mean volume distribution is plotted against peak size values measured with the LISST 100X in Figure 3.10. The constants in the equation is set to (a=0.38, A=2.9 and B=0.08).

Results plotted in Figure 3.10 are showing a logical trend. It should be noted that the data points are few and some of the parameters is not varying much between the experiments. The exit velocity from the nozzle is used as input to the equation. An impact velocity to the surface oil would probably be more correct. Attempts have been done with e.g. halving the impact velocity for the V-jet nozzles while keeping the settings for the straight impinging nozzles. This gives a much better match between measured and predicted values. It has also not been possible to measure the slick thicknesses properly with the current test setup. The algorithm has only been validated for experiments with relatively small nozzles and distances from the water surface. The validity for the calculations in a scaled up nozzle treatment system has not been proven in this project. The validation of the equation is also done for a limited number of tests. The calculations should therefore only be treated as indicative.

Table 3.3 Input values to the modified Weber scaling equation and calculated results

	1.5 mm tube** Grane crude	1.5 mm tube** Grane 150°C+ residue	1.5 mm tube** Grane 200°C+ residue	JBF2124B1 *	JBC 1385B1	JBC 1385B1*	JBC 2124 slight angle
Mean Droplet size (µm)	12.1	19.9	26.3	53.7	38.5	32.7	27.7
Exit velocity (m/s)	34	34	34	15	20	20	20
surface tension (N/m)	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02	0.02
Dynamic viscosity (Pa.s)	0.163	0.384	0.742	0.005	0.005	0.005	0.005
Density (kg/m <sup>3</sup> )	842	864	877	836	836	836	836
Slick thickness (m)	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002	0.0002
Weber number (-)	9734	9988	10138	1881	3344	3344	3344
Reynolds number (-)	35.1	15.3	8.0	501.6	669	669	669
Calculated mean droplet size (um) number distribution	16	19	21	34	25	25	25
Calculated mean droplet size (um) volume distribution	21	23	27	44	31	31	31

\*Moving nozzle

\*\*Results from the another project

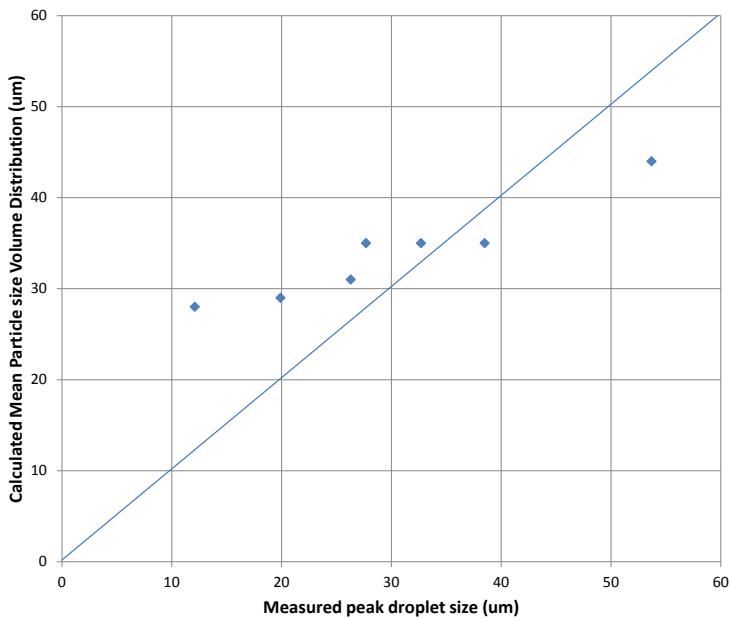


Figure 3.10 Calculated mean volume distribution plotted against peak size values measured with the LISST 100X.

As a demonstration of how the algorithm could be utilised, the equation has been used to predict mean volume distributions as a function of nozzle exit velocity, slick thickness and oil viscosity. The figures are meant only as an example of how a better validated algorithm could have been used.

Figure 3.11 shows the calculated mean volume distribution as a function of the nozzle exit velocity. Calculations have been done with an initial slick thickness of 200 $\mu\text{m}$  and with a viscosity of 30 mPa.s. The calculated droplet sizes indicate that for the given slick thickness and viscosity a nozzle exit velocity above 20m/s is required to produce droplets with a MVD below 50 $\mu\text{m}$ .

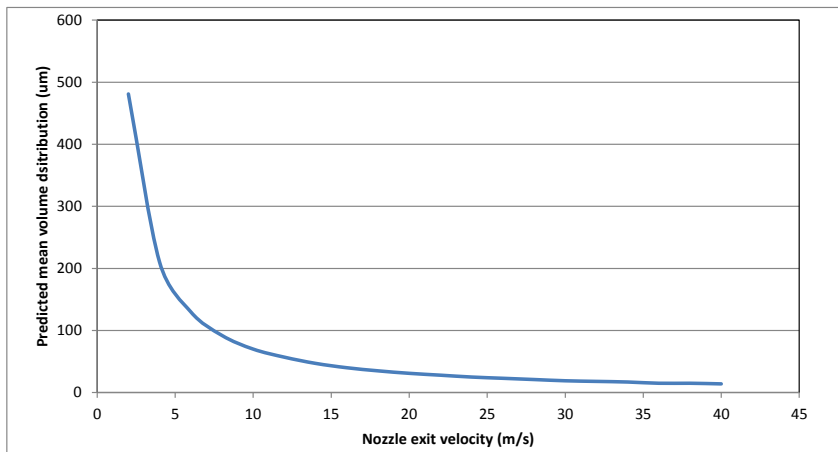


Figure 3.11 Calculated mean volume distribution as a function of nozzle exit velocity.

Figure 3.12 show calculated MVD as a function of viscosity for a range of initial thicknesses. A nozzle velocity of 20m/s is used in the calculations. The calculations indicate that for thin slicks MVDs below 50 $\mu\text{m}$  can be achieved even for viscosities of 1000 mPa.s. For slick thicknesses above 400  $\mu\text{m}$  higher nozzle exit velocities will be required, especially at viscosities above 200 mPa.s.

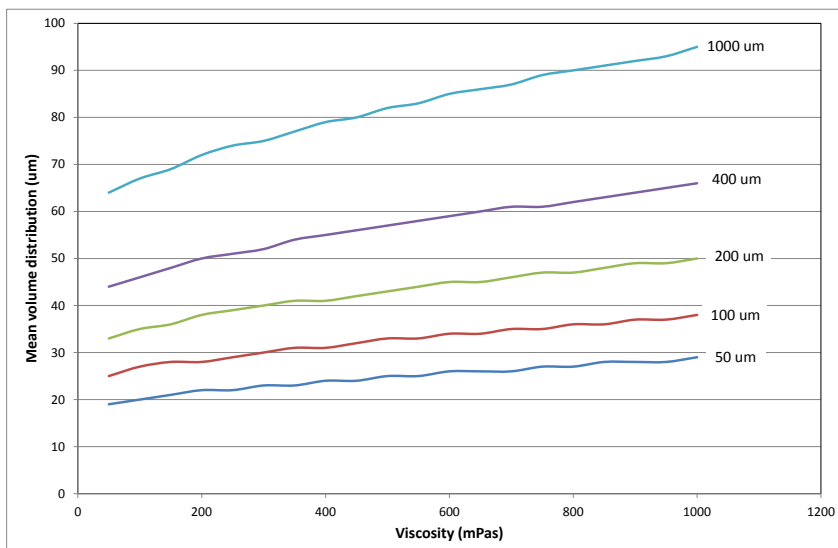


Figure 3.12 Calculated mean volume distributions as function of viscosity and slick thickness.

## 4 Conclusions from the experiments

### Nozzle capacity requirements

The theoretical calculations showed that exit flow velocities exceeding 20 m/s were necessary for sufficient droplet break-up ( $<30\ \mu\text{m}$ ). For the nozzle tested in this project this nozzle exit velocity requires pressures above 3 bar. It was also observed that driving pressures below 2 bar resulted in deflection of the oil in front of the application area.

### Application speed

Advancing velocities below 100 cm/sec, (2 knots) gave deflection of oil in front of the application area. Increased advancing velocities will give a lower water volume per meter travelled. A lowered penetration depth of the jet / bubble cloud into the water column was observed with increasing speed.

### Tilting angle

At tilting angles of the nozzles from  $0^\circ$  to  $20^\circ$  the oil was deflected in front of the spray area. The oil was allowed to pass through the spray, but was then concentrated to a higher oil thickness. Increasing tilting angles are assumed to reduce this up-concentration of oil.

### Prediction of droplet sizes

Droplet size measurements from the MiniTower were used to assess if the modified "Weber equation" could be used to calculate resulting droplet distributions after treating an oil slick with a water jet. Results were promising, but further studies should be required to further tune the constants in the equation and to validate the results. Additional work would also be required to find out whether results from the small-scale experiments in the Minitower would be valid also in larger scales.

## 5 References

G.D. Suci, O. Smigelschi, Size of the submerged biphasic region in plunging jet system, Chem. Eng. Sci. 31 (1976) 1217–1220.

Harby *et.al.*, An experimental study on bubble entrainment and flow characteristics of vertical plunging water jets (2014), Experimental Thermal and Fluid Science 57 (2014) 207–220

Johansen, *et.al.* Natural dispersion revisited, 2015,

## A Mechanical dispersion of thin oil films with plunging water jets (Johansen, 2015)

Author: Øistein Johansen, Trondheim 27. 02. 2015

### *Introduction*

This memo gives an overview of the major factors that are expected to affect the effectiveness of mechanical dispersion of thin oil films by plunging water jets. This concept has not yet been assessed under realistic conditions, but the general idea behind its application is as follows:

- turbulence generated by a plunging water will break the thin oil film up into small droplets
- down-flow generated by the jet will carry the droplets into the water column
- oceanic turbulence will keep the small droplets in suspension as in the case of chemical dispersion

We assume that the plunging water jets applied for this purpose will be planar jets with a 2D geometry, but the brief literature review we have conducted shows that round jets have been studied more frequently. We also assume that the jet will be moving horizontally relative to the oil covered sea surface (translating planar jet), but unfortunately, most studies reported in the literature are dealing with stationary jets.

For completeness we have also looked at two analogue cases, (1) fountains of heavy liquid released vertically upwards, and (2) oil containment by bubble curtains in crossflow. Analysis of fountains provide useful insight into the theory for the maximum penetration depth of plunging jets, while studies of bubble plumes in crossflow provides insight into the effect of towing speed (translation velocity). In the case of oil containment with bubble curtains, increasing the towing speed above a certain limit is known to cause breakdown of the oil barrier. On the other hand, a certain translation velocity might be needed to avoid deflection of the oil film by the lateral surface flow generated by the jet.

### *Plunging water jets and analogues*

Plunging water jets are commonly occurring in nature in e.g. waterfalls and breaking waves, and are in these cases causing significant air entrainment and release of air bubbles to the surface. In industry, the concept is used for aeration of various processes, like waste water purification – often in competition with other devices such as bubble plumes or curtains. With bubble plumes and curtains aeration is based on delivery of pressurised air, while in plunging water jets aeration is caused by “natural” air entrainment. In both cases, however, rising air bubbles will cause entrainment of ambient water which will generate lateral (or radial) flows at the sea water surface. A resembling flow pattern is observed in negative buoyant jets or fountains (Figure 1). This lateral surface flow is the rationale for using bubble curtains for containment of oil spills or deflection of sea ice (McClimans et al. 2013), but may prove to be a hindrance for the use of plunging water jets for mechanical dispersion of oil films (Nash and Johnson, 1981).

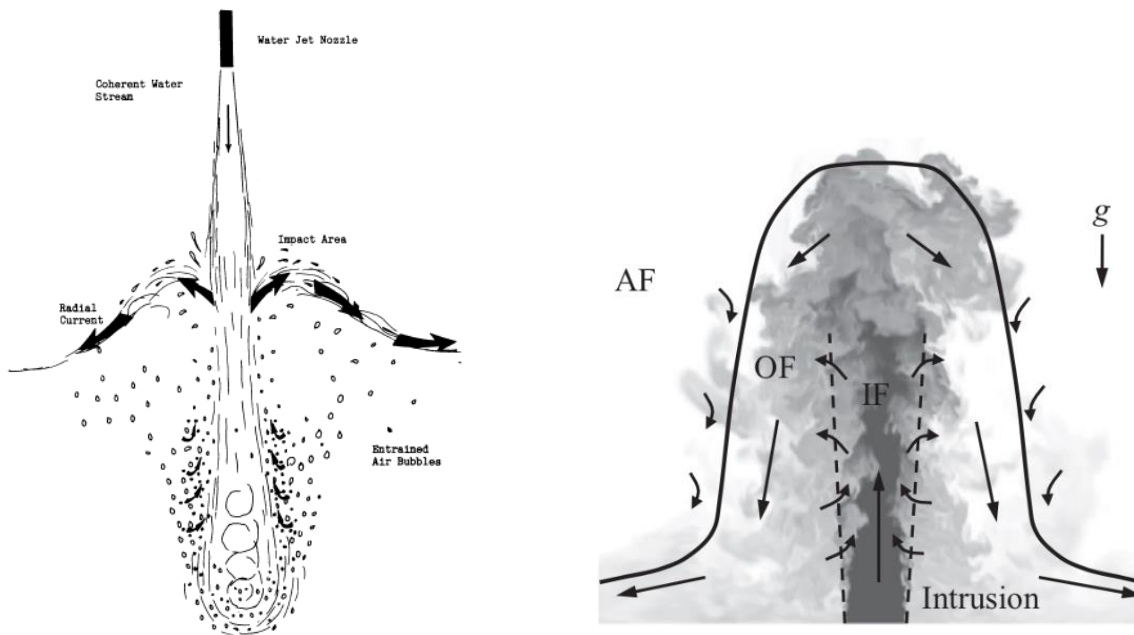


Figure 1. Plunging water jet (left) and its analogue, the negative buoyant jet (right). Nash and Johnson (1981) and Williamson et al. (2011).

Plunging jets are supposed to be coherent, but falling water jets may break up into a shower of droplets at a certain distance from the nozzle. The breakup length of round jets has been studied theoretically and experimentally, and is known to depend on a number of factors such as outlet velocity, flow characteristics (laminar or turbulent), nozzle geometry and jet disturbances (Skilone 2009). The mechanisms for breakup of planar jets have not been established to the same extent, but seem to differ significantly from what is found in round jets (Söderberg 1999). However, we presume that the stability of the jet to a certain extent be controlled by nozzle design or adjustments during application (flow rate, free fall height), so we will presume that the conditions for coherent jets are met, and not go into more detail with this aspect.

Thus, the major issues discussed in the present memo will be

- 1) penetration depth of the plunging jet
- 2) air entrainment rate into the water column
- 3) lateral flow generated at the sea surface by the returning air
- 4) effects of crossflow or movement of the jet (translation)

The first two issues will be discussed in the next chapter, while the two last will be dealt with in the subsequent chapter.

### *Air entrainment and penetration depth*

Air entrainment will require a certain minimum jet velocity in the order of 1 – 2 m/s (Brattberg and Chanson 1998). When this critical velocity is exceeded, air will be entrained by one of two mechanisms, i.e. either distortions or roughness on the surface of the jet bringing pockets of air into the water, or cavity formation at the sea surface by the intruding jet (see the “trumpet” in Figure 2).



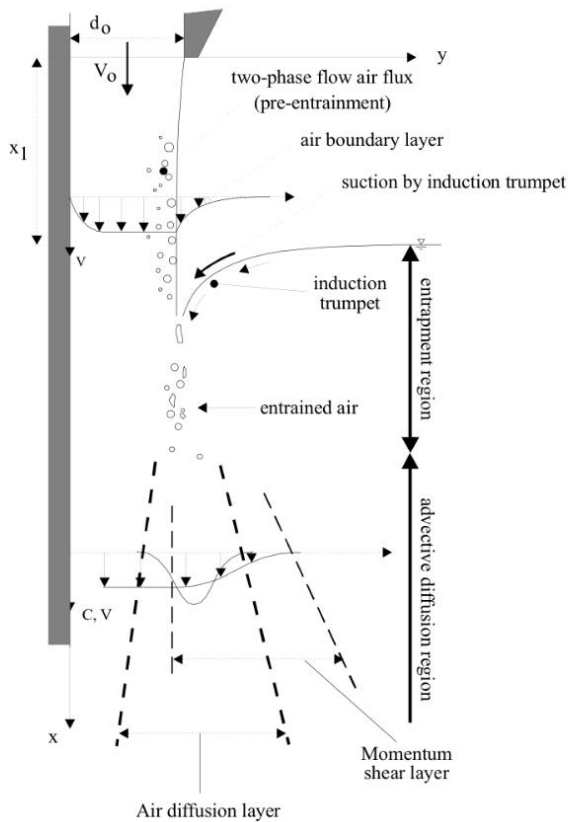


Figure 2. Sketch of a planar plunging water jet. From Brattberg and Chanson, 1998. The experiments were conducted with supported jet, which represents the half of a free falling jet. The thick vertical line shows the support.

The former mechanism is expected to dominate at relatively low jet velocities, while the latter is supposed to take over at larger velocities. In long jets, distortions of the plunging jet may cause the former mechanism to prevail at larger velocities (Ma et al. 2010).

The penetration depth of a plunging jet will depend primarily on two factors, the momentum flux  $M$  of the jet and the buoyancy flux  $B$  generated by entrainment of air bubbles. These entities are defined as  $M = V_w u$  and  $B = V_a g$ , where  $V_w$  and  $V_a$  are the water and air flow rates per unit width ( $\text{m}^2/\text{s}$ ),  $u$  ( $\text{m/s}$ ) is the exit velocity and  $g$  ( $\text{m/s}^2$ ) the acceleration of gravity. The penetration depth is given by the distance  $H$  (m) where the buoyancy will override the momentum. This distance may be found by dimensional analysis, implying  $H \sim M/B^{2/3}$  for planar jets. This equation can be expressed in non-dimensional terms as:

$$\frac{H}{b} = C R^{-\frac{2}{3}} Fr^{\frac{4}{3}}, \quad (1)$$

where  $C$  is a coefficient (probably in the order of 1) to be established experimentally,  $R = V_a/V_w$  and the Froude number  $Fr = u/(g b)^{1/2}$ , and  $b$  (m) is the thickness of the jet at the exit. With the relative entrainment rate  $R = 1$  and  $g$  replaced by the reduced gravity  $g'$  this equation corresponds to the equation derived in the same manner for plane fountains (Srinarayana et al. 2008).

Brattberg and Chanson (1998) studied air entrainment in supported planar plunging jets with 12 mm thickness and velocities in the range from 1.5 to 8 m/s. The experiments gave relative air entrainment rates  $R$  in the range from about 0.1 to 0.2. Supported jets provide entrainment on one side only (see Figure 2), and the corresponding values for free falling jets will be in the range 0.2 to 0.4. They determined two entrainment regimes, one a low velocities ( $< 4$  m/s) where the relative entrainment rate  $R$  increased with the Froude number a power of 1.8, i.e.  $R \sim Fr^{1.8}$ , and one for larger velocities where  $R$  increased linearly with  $Fr$

( $R \sim Fr$ ). In both regimes, they found a linear increase in the entrainment rate with increasing free fall height. The latter regime is probably of minor interest in the present context. For that regime, the following empirical equation gave the best fit to the data:  $= a(x/b - 1.04)(Fr' - 6.6)$ , where the empirical coefficient  $a = 0.00575$ ,  $x$  (m) is the free fall height,  $b$  (m) is the jet thickness, and  $Fr'$  is a modified Froude number,  $Fr' = (u - u_e)/\sqrt{gd}$ , accounting for the onset velocity for air entrainment  $u_e \approx 1$  m/s.

For velocities well above the onset velocity, this equation may be approximated by a simpler equation of the form

$$R = a \frac{x}{b} Fr. \quad (2)$$

By combining this equation with Eq. 1, we arrive at the following equation for the jet penetration depth:

$$\frac{H}{b} = C' \left(\frac{x}{b}\right)^{-\frac{2}{3}} Fr^{\frac{2}{3}}, \quad (3)$$

where the coefficient  $C' = Ca^{-\frac{2}{3}}$ . Presuming that  $C \approx 1$  and  $a \approx 0.006$ , the coefficient  $C'$  will be approximately 30.

Examples of air flow rates and penetration depths for water jets based on Eq. 2 and 3 are shown in Figure 3. The jet thickness (nozzle gap) is set to 4 mm, and the free fall height is varied from 20 to 80 mm ( $x/b = 5, 10$  and 20). The water flow rates are varied from 500 to 5000 L/min per meter width of the plane jet. The results demonstrate that at a given water flow rate, the air flow rate increases with increasing free fall height, while the penetration is reduced. At a water flow rate of 1000 L/min/m, the smallest free fall height (20 mm) gives an air flow rate of 500 L/min/m, while the largest (80 mm) gives an air flow rate near 2500 L/min/m. The corresponding penetration depths were 0.5 m for the smallest free fall height and 0.2 m for the largest. Since large penetration depths and small air entrainment rates may be preferable, the results shown in Figure 3 seem to imply that the nozzle outlet should be placed as close to the sea surface as possible for a given water flow rate. However, since the nozzle should be kept above the sea surface, a certain clearance must be used.

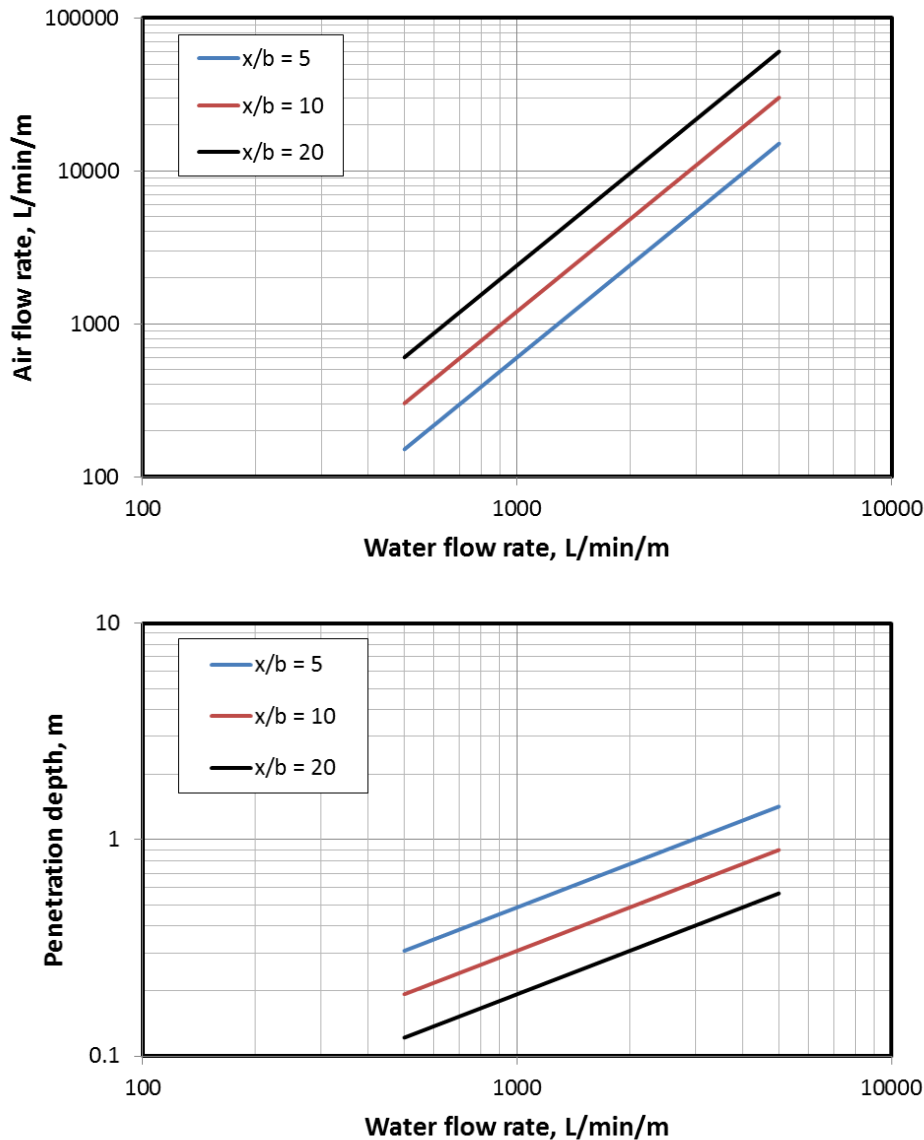


Figure 3. Airflow rates (top) and penetration depths (bottom) for planar water jets computed with Eq. 2 and 3 with different free fall heights  $x/b$ . The nozzle gap is chosen as  $b = 4$  mm.

### Translating jets – lateral surface flow and towing speed

Ledesma (2004) conducted laboratory studies of air entrainment due to translating round and planar jets. He noted that no data was found in the literature on air entrainment by translating jets of any kind prior to his study. His studies of translating round jets showed that air entrainment was enhanced by the translation. With translation speed increasing above a certain level (about 30 cm/s), air was entrained at jet velocities below the onset velocity for stagnant jets. With increasing translation velocities above this level, air entrainment increased from intermittent to continuous. The experiment was mainly concerned with entrainment mechanisms and did not provide measures of air entrainment rates or penetration depths. He also studied translating plane jets, but with main emphasise on details of the flow pattern in the vicinity of the impinging jet.

Thus, besides the findings that translation of the jet will influence the onset of air entrainment, these studies did not provide quantitative results on air entrainment rates and penetration depths. However, since increase translation velocities were found to enhance air entrainment we may expect a corresponding reduction in jet penetration depths. This seems to indicate that large translation velocities may be counter-productive for the purpose of breakup of thin oil films.

As indicated in the previous chapter, for stationary jets, entrained air bubbles will rise to surface and generate a lateral surface flow that will tend to push the oil film away from the plunging jet. This effect may be counteracted by moving the jet with a certain speed. Since this situation is analogue to a towed bubble curtain, we have used a 2D-bubble plume model that was developed in a study of oil containment with pneumatic barriers (Johansen and Brørs 2010) to assess the required towing velocities.

For pneumatic barriers, the maximum towing speed is the speed that exactly counteracts the surface velocity generated by the bubble plume. At a certain point upstream of the bubble curtain, the outflow will balance the current (Figure 4). As the crossflow increases, the stagnation point will move closer to the bubble curtain, and eventually the oil slick will break through the curtain, implying collapse of the barrier. For the plunging jet system that is considered here, the translation velocity must at least of this magnitude to avoid deflection of the oil by the lateral outflow. We will name this the critical towing speed to cover both cases.

Table 1 and Figure 5 shows critical towing speeds computed for pneumatic barriers with air flow rates and discharge depths corresponding to certain water flow rates with plunging jets. The connection between water flow rates, airflow rates and penetration depth is obtained from Figure 3 in the previous chapter. The nozzle gap is 4 mm and the free fall height is 40 mm ( $x/b = 10$ ).

As Figure 5 shows, the critical towing speeds are found to increase with increasing water flow rates. The red line shows a power law fit to the results given as  $U_C = 1.5 V_w^{2/3}$ , with the water volume flow in  $m^3/min/m$ .

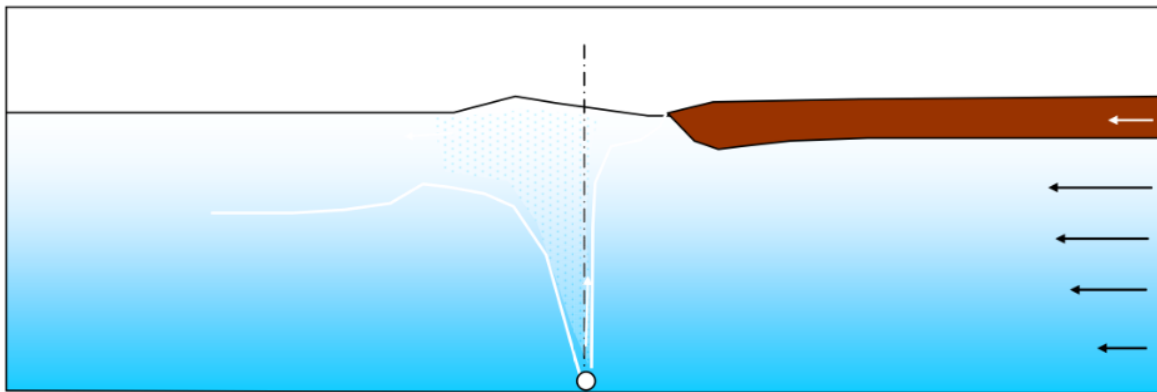


Figure 4. Sketch of a bubble curtain acting as an oil barrier. The oil slick (brown) is moved by the current from right to left, but the motion is counteracted by the surface flow generated by the surfacing entrained water. From Johansen and Brørs 2010.

Table 1. Air flow rates and penetration depths corresponding to certain water flow rates, together with minimum towing speed for avoiding deflection of surface oil.

Water flow, m <sup>3</sup> /min/m	Air flow, m <sup>3</sup> /min/m	Penetration depth, m	Towing speed, m/s
0.7	0.592	0.242	1.07
0.9	0.980	0.286	1.31
1.3	2.044	0.384	1.72
2.1	5.334	0.503	2.43
2.9	10.172	0.624	3.03
4.0	19.351	0.773	3.74
5.0	30.237	0.897	4.34

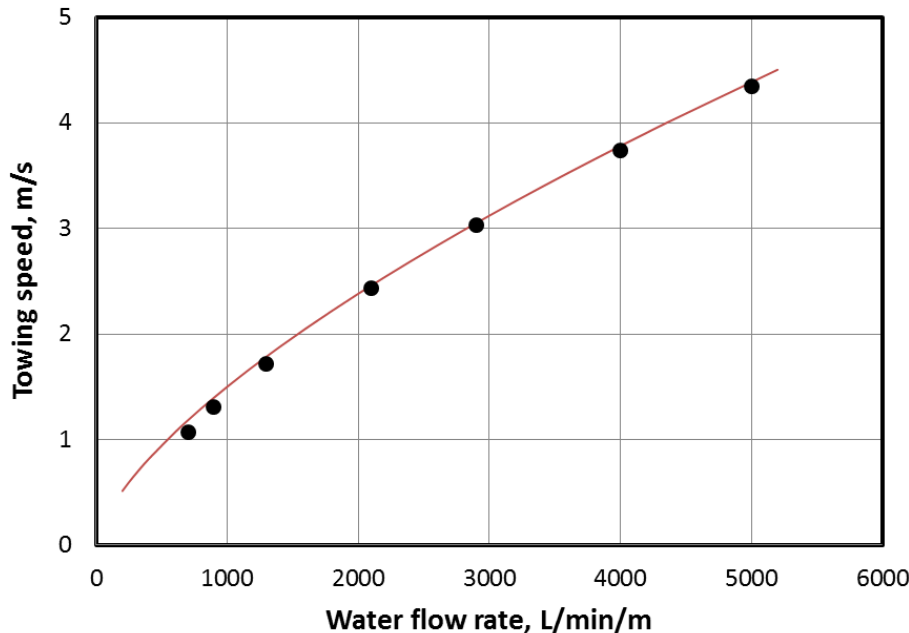


Figure 5. Critical towing speeds computed with a model for pneumatic barriers with air flow rates and penetration depths corresponding to the given water flow rates (see Table 1). The red line shows a power law fit to the data.

These findings, together with the findings reported by Ledesma (2004) seem to imply that large water volume flows may be counter-productive for breakup of thin oil films. While Ledesma (op cit.) found that air entrainment was enhanced by large towing speeds, Figure 5 shows that increasing water volume flows will require increased towing speeds to avoid deflection of the oil film by the lateral surface flow generated by the entrained air. Since the effect of towing speed on air entrainment is neglected in our calculations, the air entrainment for a given water flow rate is probably underestimated. We anticipate that these effects combined might cause a runaway effect when the water flow rates are increased above a certain level. Thus, we may conclude that since theoretical understanding of these issues are lacking, properly designed laboratory experiments will be required to determine criteria for optimal water flow rates and towing speeds for breakup of thin oil films by plunging water jets.

## References

- T. Brattberg and H. Chanson, 1981: Air entrapment and air bubble dispersion in two-dimensional plunging water jets. *Chemical Engineering Science*, 53, 4113-4127.
- T. McClimans, I. Leifer, S.H. Gjørund, E. Grimaldo, P. Daling and F. Leirvik, 2013: Pneumatic oil barriers: The Promise of Area Bubble Plumes. *J. Engineering for the Marine Environment*, 227, 22-38.
- Jan Van de Donk, 1981: Water aeration with plunging jets. Dutch Efficiency Bureau, Pijnacker, 182 pp.
- Ø. Johansen and B. Brørs, 2010: Oil spill containment by use of air bubbles – numerical simulations. SINTEF Report A15362, SINTEF, Trondheim, Norway, 15 pp.
- R. G. Ledesma, 2004: An experimental investigation on the air entrainment by plunging jets. PhD. Dissertation, University of Maryland, USA, 216 pp.
- J. Ma, A.A. Oberai, D.A. Drew, R.T. Lahey and F.J. Moraga, 2010: A quantitative sub-grid air entrainment model for bubbly flows plunging jets. *Computers & Fluids*, 39, 77-86.
- J. H. Nash and M. G. Johnson, 1981: Coherent, Plunging Water Jets for Oil Spill Control. *International Oil Spill Conference Proceedings: March 1981, Vol. 1981, No. 1*, 655-660.
- D.J. Skilon, 2009: Characterization of pre- and post-breakup liquid jets. Master Thesis in Nuclear Engineering. Pennsylvania State University, Department of Mechanical and Nuclear Engineering. 113 pp.
- N. Srinarayana, G.D. McBain, S.W. Armfield and W.X. Lin, 2008: Height and Stability of laminar plane fountains in a homogeneous fluid. *Int. J. Heat and Mass Transfer* 51, 4717-4727.
- D. Söderberg, 1999: Hydrodynamics of plane liquid jets aimed at applications in paper manufacturing. Doctoral thesis, Royal Institute of Technology, Department of Mechanics.
- N. Williamson, S.W. Armfield and Wenxian Lin, 2011: Forced turbulent fountain flow behaviour. *J. Fluid Mech.*, 671, 535-558.

## B Mini Tower results and observations

### *Purpose*

Generate empirical data to support the concept of dispersing a Thin Oil Film (TOF) with large-volume water jets operating at pressures at or below 7 bars. We define a TOF as a continuous oil film no greater than 200 microns thick. This pretesting phase was designed to focus subsequent experimentation that is planned for SINTEF's 42,000-liter TowerBasin.

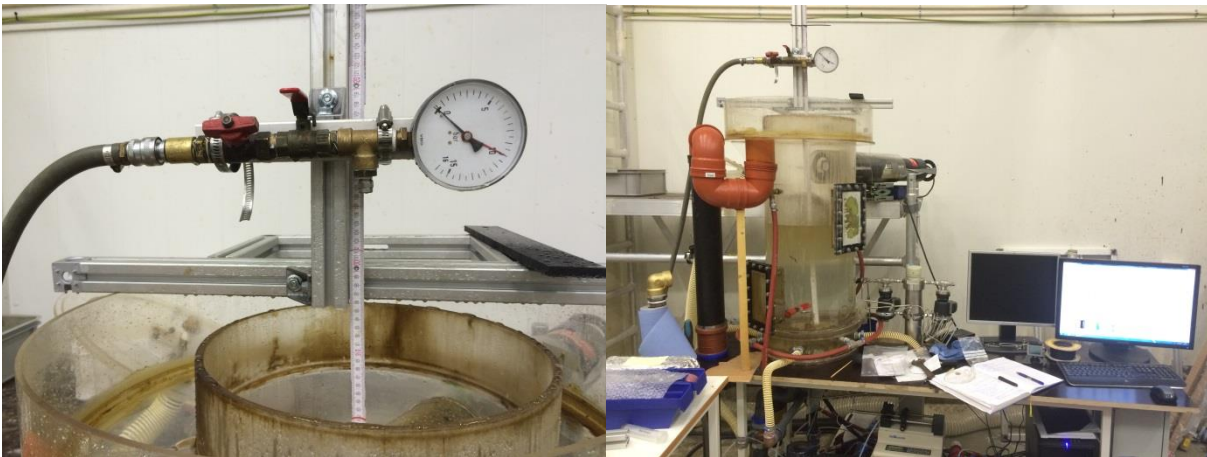
### *Scope of Work*

Conduct pre-testing of a selected array of water jet nozzles within the SINTEF MiniTower to evaluate:

1. Extent of coherent water jet
2. Penetration depth of water jet
3. Oil droplet size distribution of a water jet-dispersed Thin Oil Film (TOF)

### *Experimental Setup*

SINTEF's MiniTower experimental apparatus was modified to allow testing of water jet nozzles with rated discharge rates below 15 l/min. Water was pressurized with compressed air at 7 bars in a 20 liter tank. Pressure was monitored by a pressure gauge placed close to the nozzle and was regulated by a ball-valve. Measurements of penetration depth were made with a scale. A LISST-100X particle sizer was utilized to measure oil droplet size distributions in the water column. Photographs and video images were recorded of the water jets to aid with evaluating the extent of a resulting coherent water jet.



*Photographs of Experimental Setup*

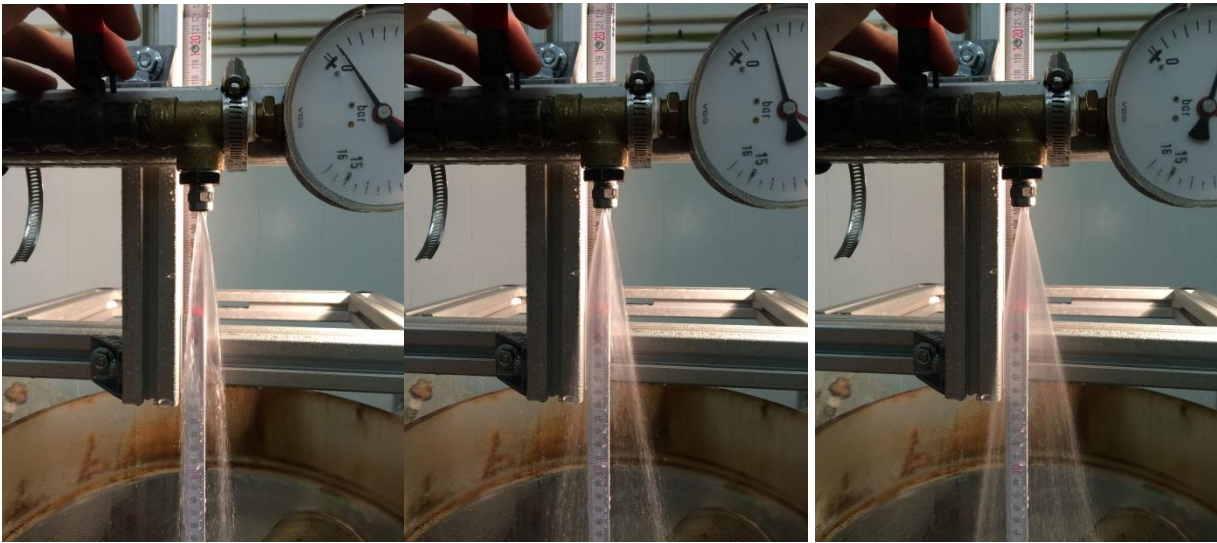
### Results

This section summarizes results of the pretesting. The following nozzles were evaluated:

Nozzle	Discharge Rate	Shape of Jet
JBC 1385 B1	3 l/min at 2 bars	20° flat fan
JBF 1310 B1	2.5 l/min at 2 bars	30° flat fan
JBC 2124	10 l/min at 2 bars	20° flat fan
JBF 2124 B1	10 l/min at 2 bars	30° flat fan
JBM 1310 B1	2.5 l/min at 2 bars	45° flat fan
JBC 1385 B1	2.5 l/min at 2 bars	60° flat fan

### Extent of Coherent Jet

Evaluation of the extent of the coherent jet (i.e., the distance from the nozzle where the jet no longer forms a sheet of water) was challenging. Under increasing pressure, the orifice of the flat fanned nozzles would generate undulating streams of jetted water that no longer took on the appearance of being a coherent jet. The most coherent jet observed was produced from nozzle JBC 1385 B1 at 1 bar. Several photographs follow to illustrate:



Water jets from nozzle JBC 1385 B1 at 1, 2, and 4 bars.





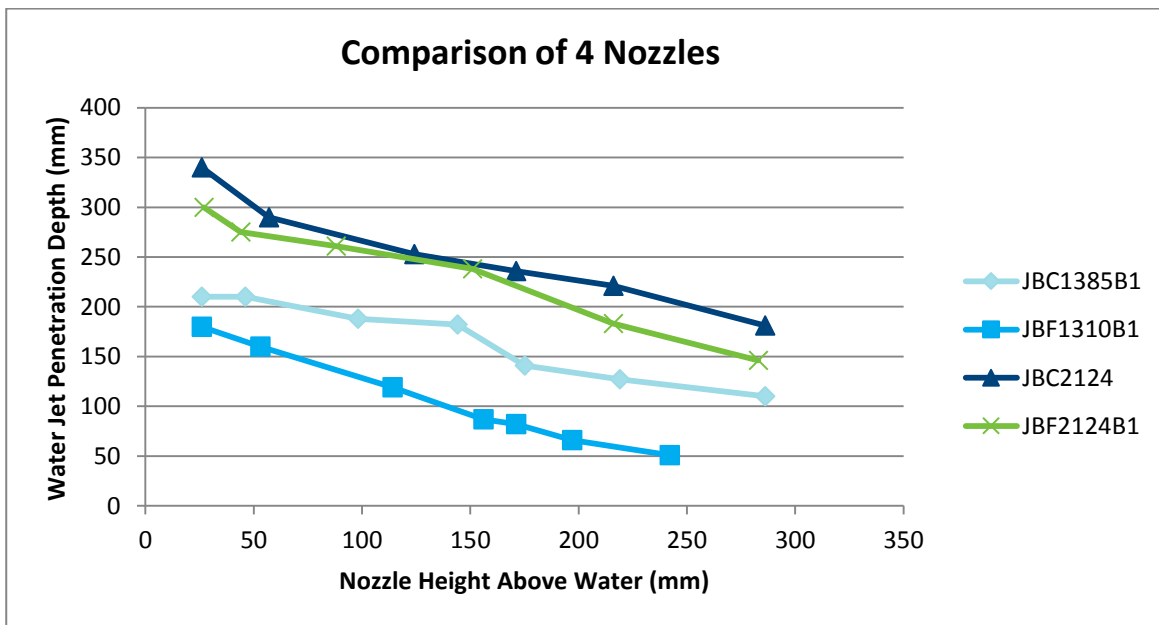
Water jets from nozzle JBF 2124 B1 at 1, 2, and 4 bars.

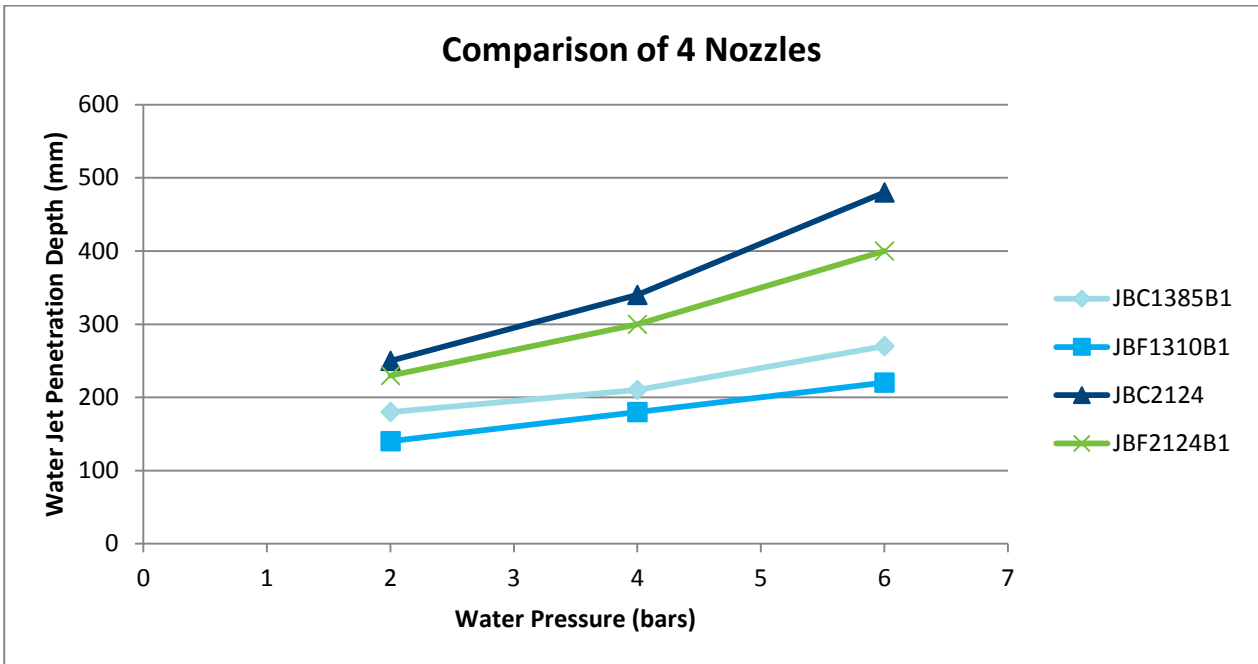
*Penetration Depth of Water Jet*

Penetration depth was evaluated as a function of three variables:

1. nozzle shape and discharge rate
2. distance of nozzle above water surface
3. pressure of water just prior to release from nozzle

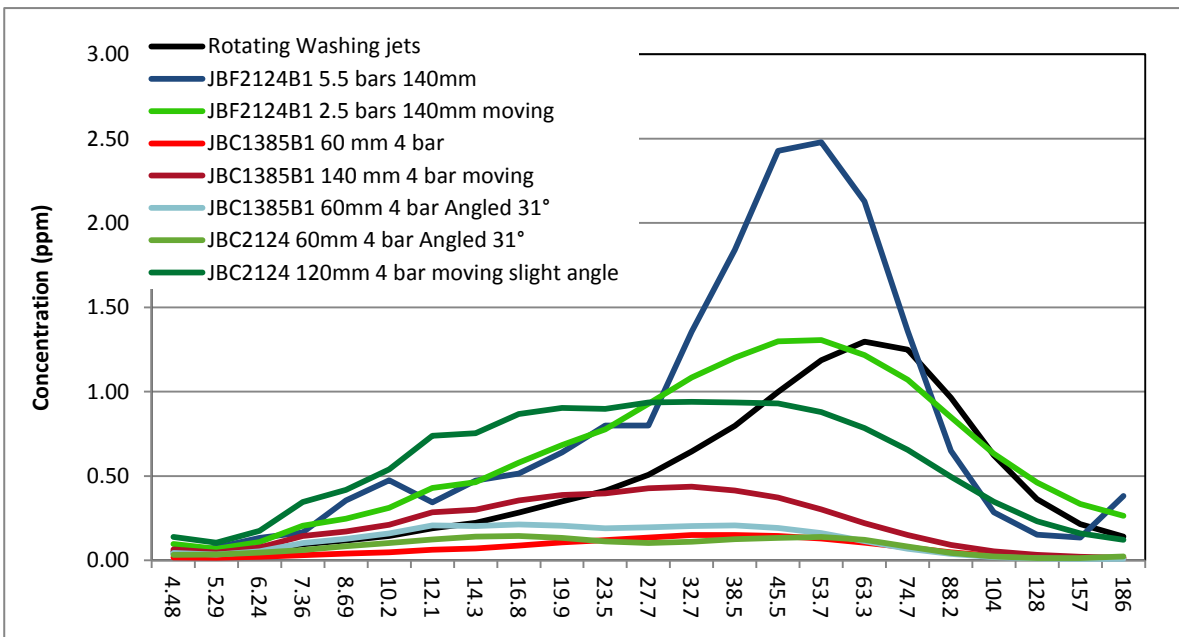
Below are two graphs presenting the collected data:





*Oil droplet size distribution of a water jet-dispersed Thin Oil Film*

The following graph presents oil droplet size distributions measured with the LISST-100X. Each distribution represents data that is average over a 30 second interval. Measurements were made by the LISST-100X every second. A 200-micron thick oil film of fresh Gjøa oil was produced on the surface of the water prior to dispersing with a water jet. Droplet size distributions presented below where the jet was indicated to be moving (by hand) involved oil films that were slight thinner.



## Conclusions

A summary of conclusions:

1. A coherent jet was not observed in the tested nozzles at operational pressures ranging from 4 to 7 bars.
2. Penetration depth of a water jet below the surface of the water decreases with increasing height of the nozzle above the water surface. Higher discharge rate nozzles penetrated the water more deeply. Narrower flat fan angles also produced greater penetration depth. The rate of decreasing penetration depth between these different nozzles as a function of nozzle height appeared to be very similar.
3. Increasing water jet pressure produced greater penetration depth. The rate of increasing penetration depth (with respect to increased pressure) was greater for higher discharge rate nozzles.
4. Water jets that were significantly positioned differently from a perpendicular position with respect to the water surface seemed to improve TOF contact with the water jet shear forces. Entrained air would be directed away from the area where the water jet contacts the surface of the water.
5. Sprinkled water droplets from a rotating nozzle onto a 200 micron-thick Gjøa TOF produced a mean volume droplet size diameter of approximately 63 microns. All of the tested water nozzles produced mean volume droplet size diameters less than 63 microns but larger than 20 microns.
6. The majority of the TOF remained at the surface of the water in the MiniTower after treatment. However, it should be noted that the area of treatment relative to the surface area was small. Additionally, very little effort was spent trying to thoroughly treat the TOF.

## **Vedlegg B**

### **Prosjektnotat: Konstruksjon av prototyper - teknisk beskrivelse**

# Konstruksjon av prototyper

## Akt. 3 Teknisk beskrivelse

WP 048- Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer

**VERSJON**  
1.0

**DATO**  
2016-10-31

**FORFATTER(E)**  
Claus Rasmussen (Jason Eng.), Per S. Daling og Kristin R. Sørheim (SINTEF)

**OPPDRAGSGIVER(E)**  
NOFO

**OPPDRAGSGIVERS REF.**  
Hans V. Jensen

**PROSJEKTNR**  
102011551-2

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**  
17, inkludert 1 vedlegg

### SAMMENDRAG

Jason Engineering har konstruert et komplett konteinerbasert system med både høykapasitet vann dysemanifold, samt dispergeringsmanifolder for både høy - og lavdosering av dispergeringsmiddel iht. NOFOs krav til fartøy som har installert utstyr for dispergering. I tillegg har Jason Eng. konstruert en deflektordyse (nebb) som kan koples/tilpasses til Fi-Fi - 2 systemet ombord på fartøy.

SINTEF har sammen med Jason Eng. utført sjøtest av dispergeringsutstyr inkludert deflektordyse ombord på MS Strilborg i forkant av OPV 2016, referer til eget prosjektnotat for Akt. 6 (Produktoptimalisering /installasjon)

Dette prosjektnotatet omhandler en teknisk beskrivelse av utstyret.



**UTARBEIDET AV**  
Claus Rasmussen (Jason Eng) og SINTEF

**GODKJENT AV**  
Per S. Daling

**PROSJEKTNOTAT NR**  
Versjon 1.0

**SIGNATUR**



**SIGNATUR**



**GRADERING**  
Fortrolig

# Historikk

---

<b>VERSJON</b>	<b>DATO</b>	<b>VERSJONSBEKRIVELSE</b>
1.0	2016-10-31	Oversendes NOFO

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Beskrivelse av konteinerbasert dispergering - og høykapasitets dysebom .....</b>	<b>4</b>
1.1	Beskrivelse av 10 fot transportabel konteiner .....	5
1.2	Utstyret i 10 fot transportabel konteiner .....	7
1.3	Beskrivelse av høykapasitet dysebom .....	8
1.3.1	Dysebom- Forbedringer og erfaringer fra OPV 2016.....	9
<b>2</b>	<b>Beskrivelse av deflektordyse (nebb) .....</b>	<b>11</b>
2.1	Deflektordyse (nebb)- Erfaringer fra Sjøtest Hammerfest 2016.....	12
2.1.1	Forbedringer og utfordringer med deflektordyse (nebb) .....	12
<b>A</b>	<b>Vedlegg Standard Spray Nozzles.....</b>	<b>15</b>

## 1 Beskrivelse av konteinerbasert dispergering - og høykapasitets dysebom

Jason Engineering har konstruert en 10 fot transportabel konteiner med utstyr for både dispergering (dispergeringsmanifolder for høy - og lavdosering) og høykapasitetsdysebom manifold for vanddosering. Formålet er å kunne transportere og installere en slik konteiner på et beredskapsfartøy som ikke har fast installert utstyr for dispergering ombord. Figur 1.1 viser dette konteinerbaserte dispergeringsutstyret som ble installert og testet på MS Strilborg i forkant av OPV 2016, og ble utprøvd under selve øvelsen i forbindelse med det pågående prosjektet Petromaks 2 "Thin Oil Films" (TOF). Utslipp av Åsgard Blend ble brukt som testolje. Figur 1.2 viser anlegget sett fra kai montert på MS Strilborg.

Konteineren er utstyrt med opphengsarmer montert på utsiden som skal bære selve dispergeringsbommen, hvor manifoldene for dispergering- og høykapasitetsbommen henger i et tau som kan heves og senkes i forhold til vannflaten. Bærekonstruksjonen kan skyves fremover ca. 2,5 m for bedre plassering i forhold til baugen før manifoldene blir senket i posisjon. Konteineren er delvis isolert og har varmekabler installert der hvor det står en 1000 liter IBC (Intermediate Bulk Container) dagtank plassert for lagring av dispergeringsmiddel eller eventuelt vann for testing eller spyling av systemet etter bruk av dispergeringsmiddel/væske.

Konteineren kan lett koples opp mot større mengder dispergeringsmidler lagret på fartøyet i faste tanker, eller lagret i egne IBC dagtanker.



*Figur 1.1 Konteinerbasert dispergeringsutstyr (baugmontert dysebom for både høykapasitet vanddosering og dispergeringsmanifolder for høy og lav-dosering av dispergeringsmiddel) oppstilt på MS Strilborg klar til bruk.*





Figur 1.2 Anlegget sett fra kai rigget opp med manifolder og opphengsarmer i fremre posisjon, god posisjon for dispergering langt fremme foran baugen.

### 1.1 Beskrivelse av 10 fot transportabel konteiner

Figur 1.3 viser 10´ (fot) transportabel konteiner sett fra utsiden med opphengsarmer som skal skyve dispergeringsutstyret frem foran baugen for enkelt å kunne senke dispergerings/vann manifoldene ned foran baugen på fartøyet.



Figur 1.3 Transportabel konteiner (10 fot) sett fra utsiden.

1. Konteineren er en standard 10' L2831 x B2344 x H2376.
2. Opphengsarmer montert på siden av konteineren med feste for bærebomme til manifoldene og avstivning i front for å unngå vridning i opphengsarmene. Opphengsinnfestingen på konteineren må være demonterbar da det ikke er lov å frakte konteiner med fastmontert utstyr på utsiden av konteineren, kun i forbindelse med forskning ellers må der følgebil med.

Forbedring: Et vinsjesystem for å kjører opphengsarmene fram og tilbake vil være en forbedring, for enklere håndtering under opp og ned rigging, samt håndtering under drift.

3. Demonterbare avstivere for å holde bærebommene til manifoldene i posisjon under kjøring.

Forbedring: Under en snuoperasjon under feltforsøket (OPV 2016) kom enden av den ene manifolden ned i sjøen, og på grunn av ekstra belastning bøyd den ene avstiveren seg. Avstiver bør forsterkes for eksempel med større diameter på røret/staket.

Figur 1.4 viser opphengsarmer for 10 fot konteineren. På opphengsarmene er det montert 10 stk. 90° bender som skal lede brannslangene i en mer rett linje mot manifoldene. Det kunne med fordel ha vært påsveiset en krave for lettere å kunne føre brannslangene gjennom denne og gi beskyttelse mot kanten av 90° bendet for å unngå å skade slangene.



Figur 1.4 Opphengsarmer for 10 fot transportabel konteiner.

## 1.2 Utstyret i 10 fot transportabel konteiner

Oversikt over utstyr i konteineren er gitt som følger (se også Figur 1.4):

1. Hydraulikk aggregat. Kapasitet: 8 L/min 160 bar for kjøring av vinsjene og for styring av ventilene til høy og lav dosering av dispergeringsmiddel.
2. Dispergeringspumpe: Type Grundfos CRN10-05 4 Kw motor, 12 m<sup>3</sup>/h, med frekvensomformer.
3. 2 stk. hydrauliske aktuatorer for å velge høy eller lav dosering eller begge, utstyrt med manuelle ventiler for styrbord eller babord dispergering.
4. Kontrollsystem med radiostyring av det hydrauliske anlegget, hvor radiostyringen kontrollerer aktivatorene i åpen/lukke posisjon, vinsjene til manifoldene opp/ned, samt styring av start/stopp kontroll for dispergeringspumpe.
5. En IBC konteiner 1000 liter brukes som dispergeringstank (dagtank). Det er også mulig å hente dispergeringsmiddel fra egne tanker eller IBC-konteinere på dekk med slanger, og heller bruke IBC konteineren som skylletank med vann for å rense/spyle systemet etter dispergering. Dette for å unngå søl av dispergeringsmiddel på dekk med tanke på sikkerhet da det blir veldig glatt ved søl på dekk. HMS: God rengjøring ved håndtering av dispergeringsmiddel er nødvendig.
6. Der er plass for diverse utstyr når anlegget ikke er i bruk, for eksempel lagring av vinsjene til manifoldene, hydraulikk og dispergerings slanger, samt diverse verktøy og reservedeler.



Figur 1.4 Utstyr i 10 fot transportabel konteiner.

### 1.3 Beskrivelse av høykapasitet dysebom

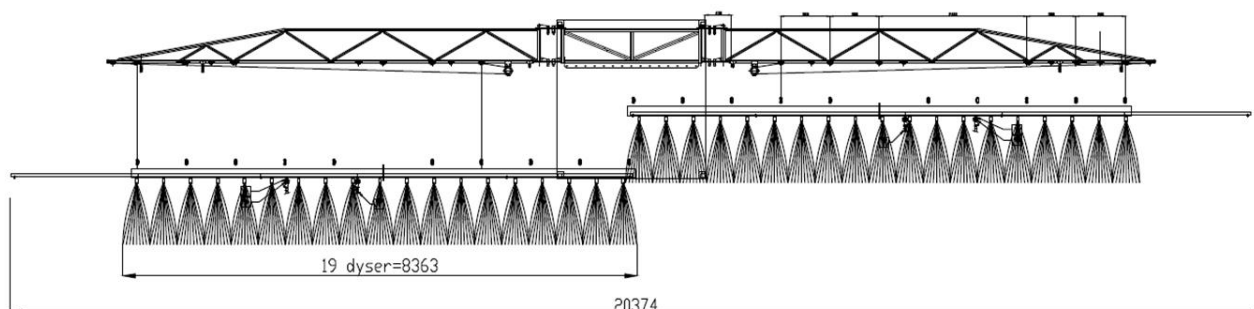
Figur 1.5 viser en skisse av høykapasitet dysebom for både vanddosering samt påføring av lav - og høydosering av dispergeringsmiddel. Figur 1.6 viser dysebom installert på MS Strilborg fra Sjøtest med vanddosering i Hammerfest, mai 2016.

Teoretisk kapasitet for høykapasitet dysebom er gitt som følger:

- Trykk opp til: 5-6 bar
- 0,4 m<sup>3</sup> / min. per dyse
- 2 x 19 dyser
- 15-17 m<sup>3</sup> /min.
- Ca. 1000 m<sup>3</sup> / time

Innstallering av manifold på MS Strilborg:

- Brannpumper kapasitet: ca. 300 m<sup>3</sup> / time + ballastpumpe gir totalt et trykk på 550 m<sup>3</sup> / time
- Bemerk: Med dagens system på MS Strilborg var ikke mulig å benytte Fi-Fi pumpene for å oppnå høyere vanntrykk



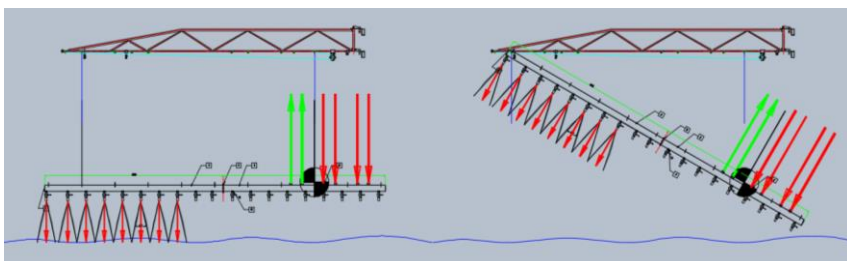
Figur 1.5 Skjematisk tegning av høykapasitet dysebom: Lengde 16-18 m.



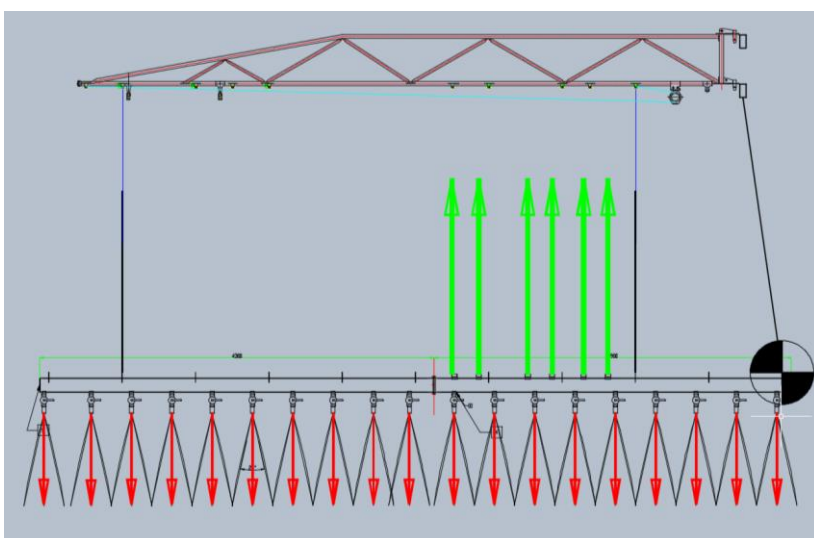
Figur 1.6 Høykapasitet dysebom installert på MS Strilborg (fra Sjøtest i Hammerfest mai, 2016).



Foreslått tiltak: Hvis alle brannslanger flyttes på mellom av opphengslinene til manifolden og bruker en ekstra line fra det første opphengspunktet, vil dette kunne gi et bedre forhold med hensyn på slike reaksjonskrefter (se skisse Figur 1.9).



Figur 1.8 Skisse som viser dagens posisjon av brannslanger tilkopleet til manifold.



Figur 1.9 Skisse som viser forslag til mer optimal plassering av brannslangenens tilkopleing mot manifold for å unngå risiko for "løft" av manifold.

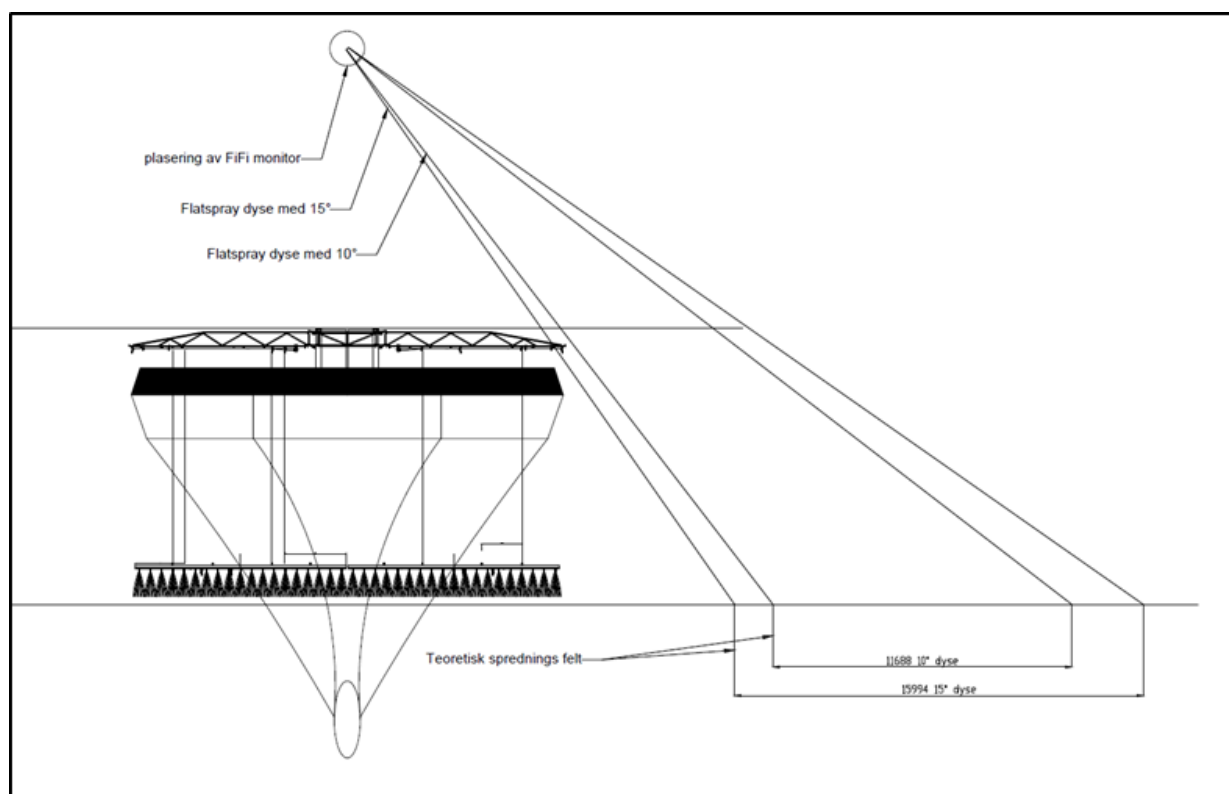
Det er utfordringer med vannmengden til høykapasitetsmanifolden. Slik som det ble gjort på MS Strilborg ble det veldig mange meter med brannslanger, men det kan tilrettelegges med en fast installasjon frem i baugen med uttak til slangene, da blir det kun slanger som skal ned til manifolden som skal håndteres.

## 2 Beskrivelse av deflektordyse (nebb)

Målsetningen med å utvikle og installere en deflektordyse (nebb) koplet til Fi-Fi anlegget var å oppnå en flatere vannstråle og dermed et bredere nedslagsfelt av vannstrålen som treffer oljefilmen. Figur 2.1 viser prototyper av slike deflektordyse "nebb" utviklet av Jason Eng. Figur 2.2 viser en skjematisk tegning av teoretisk spredningsfelt med ulike spredningsvinkler på henholdsvis 10 og 15°.



Figur 2.1 Prototyper deflektordyse "nebb"



Figur 2.2 Skjematisk tegning av teoretisk spredningsfelt med ulike spredningsvinkel på 10 og 15°.

## 2.1 Deflektordyse (nebb)- Erfaringer fra Sjøtest Hammerfest 2016

Sjøtesten i Hammerfest i mai 2016 viste at ved full vannleveranse (ca. 3600 m<sup>3</sup> /time) ble det generert et spredningsmønsteret som ikke var homogent fordelt over nedslagsfelt (ca. 15-20 m bredde). Nedslagsfeltet fikk en "to-delning" med noe mindre vannmengder på midten. Det virket også som at nebbet reduserte selve nedfallstrykket av vannstrålen. Med basis i erfaringen fra sjøtesten ble deflektoren demontert, og det ble gjort en tilsvarende test uten deflektordyse. Test uten deflektor viste en langt større effektivitet og energi på overflaten sammenlignet med bruk av deflektor (se også eget prosjektnotat for Sjøtest i Hammerfest, Akt.6). Figur 2.3 viser testing med og uten deflektordyse "nebb" under sjøtestingen i Hammerfest.



Figur 2.3 Sjøtesting i Hammerfest mai, 2016. Testing med installert deflektor (venstre) og uten deflektordyse (høyre).

Nebbet hadde altså ikke den positive effekten som Jason Eng. hadde håpet på. Figur 2.4 viser at det ble en deling av strålen og et vakuum i midten som gjør at strålen ikke fikk den ønskede effekten.

### 2.1.1 Forbedringer og utfordringer med deflektordyse (nebb)

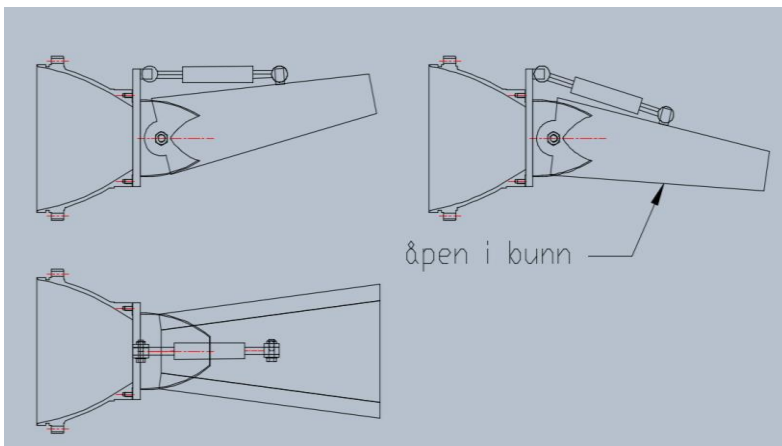
Foreslått forbedringer: Jason Eng. ser for seg å kunne endre deflektordysen fra å være et lukket nebb til å lage et nebb som vist i Figur 2.5 som kun trykker på strålen og sider som kan styre/samle strålen til et bredere nedslagsfelt. Dette er enklere å få til i en teststasjon hvor Jason Eng. er i gang med et større anlegg for testing opp til ca. 2500 m<sup>3</sup>/h hvor det er en mulighet for en slik testing når denne står ferdig.

Jason Eng. ser også flere utfordringer med et slikt deflektordyse (nebb) etter Sjøtesten i Hammerfest i mai 2016. Et slikt nebb er ikke så enkelt å bytte ut eller monterer på alle fartøy, da det ikke er sikkert det går an å komme til på enden av monitoren, da de ofte er så store at de stikker ut over rekkverket. Plattformen og rekkverket som vist i Figur 2.6 på MS Strilborg er også et problem, da det gir utfordringer for å få monitoren i en gunstig posisjon i nedover justering. Rekkverket kan bygges om så det blir demonterbart, men selve plattformen er det ikke så enkelt å gjøre noe med da kan bli et problem å få monitoren i en posisjon som gir et optimalt nedslagsfelt ikke så langt fra skutesiden. Her tenkes det på de som er montert oppe på styrehuset, andre fartøy har forskjellige løsninger på plassering, som kan være en bedre løsning, men ofte en mindre type monitor som ikke er så høyt montert.





Figur 2.4 Deflektordysen (nebbet) - Deling av vannstrålen som ikke ga ønsket effekt.



Figur 2.5 Foreslått endringer i konstruksjon av deflektordyse (nebb).



Figur 2.6 Plattform og rekkverk på MS Strilborg.

#### Ekstra vannmengde Fi-Fi anlegget:

Etter inspeksjon på MS Strilborg i Hammerfest ble det klart at det ikke var så høy vannleveranse tilgjengelig som ønsket. De fleste fartøyer i dag med Fi-Fi-2 anlegg har ekstra brannuttak (4-8 stk.) hvor høykapasitetsmanifolden kan koples til vannet fra Fi-Fi pumpene. Disse har mye større kapasitet enn det som var tilfellet på MS Strilborg hvor brannpumpene /overrisling ble brukt til vannleveransen. Dette medførte utfordringer for å få tilgang til ekstra vanntrykk og ble forsøkt løst ved at det ble laget en ekstra manifold (se Figur 2.7) med 4 tommer slanger inn på manifolden, med fire uttak og ekstra brannslanger som ble koplet på en ekstern pumpe (ballastpumper) som videre ble koplet inn på rørgaten til brannledningen. Dette ga noe høyere kapasitet på vannmengden. Vanntrykket øket fra ca. 2,1 bar med ca. 0,8 bar til ca. 3 bar på dysene, men dette var ikke tilstrekkelig for å kunne tilføre ønsket kapasitet på 500-600 liter per dyse ved 5 bar trykk.



Figur 2.7 Ekstra manifold koplet på ballastpumpe for å øke vannmengden og kapasitet.

## A Vedlegg Standard Spray Nozzles

Tabell A.1: Tabell for dyse 50°

**C VeeJet™ SPRAY NOZZLES, STANDARD SPRAY**

**FLAT SPRAY NOZZLES**

**PERFORMANCE DATA**

\*At the stated pressure in psi.

Spray Angle at 40 psi	Nozzle Type/ Inlet Conn. (in.)									Capacity Size	Equiv. Orifice Dia. (in.)	Capacity (gallons per minute)*																Spray Angle (°)*			
	H-U			H-DU			U					Capacity (gallons per minute)*																Spray Angle (°)*			
	1/8	1/4	3/8	1/2	3/4	1/8	1/4	1	1-1/4			2	5	10	20	30	40	60	80	100	200	300	500	20	40	80	200				
65°				●	●						200	.343	7.1	10.0	14.1	17.3	20	24	28	32	45	55	71	60	65	67	69				
					●						250	.373	8.8	12.5	17.7	22	25	31	35	40	56	68	88	60	65	67	69				
					●						300	.409	10.6	15.0	21	28	30	37	42	47	67	82	106	60	65	67	69				
					●						400	.472	14.1	20	28	35	40	49	57	63	89	110	141	60	65	67	69				
								●	●		500	.528	17.7	25	35	43	50	61	71	79	112	137	177	60	65	66	68				
									●		580	.569	21	29	41	50	58	71	82	92	130	159	205	61	65	66	68				
										●	02	.035	.07	.10	.14	.17	.20	.24	.28	.32	.45	.55	.71	39	50	57	63				
										●	03	.043	.11	.15	.21	.26	.30	.37	.42	.47	.67	.82	1.1	40	50	56	62				
										●	04	.050	.14	.20	.28	.35	.40	.49	.57	.63	.89	1.1	1.4	42	50	56	61				
										●	05	.056	.18	.25	.35	.43	.50	.61	.71	.79	1.1	1.4	1.8	44	50	56	61				
									●	055	.059	.19	.28	.39	.48	.55	.67	.78	.87	1.2	1.5	1.9	44	50	56	61					
									●	06	.061	.21	.30	.42	.52	.60	.73	.85	.95	1.3	1.6	2.1	45	50	56	60					
									●	07	.068	.25	.35	.49	.61	.70	.86	.99	1.1	1.6	1.9	2.5	45	50	56	60					
									●	08	.071	.28	.40	.57	.69	.80	.98	1.1	1.3	1.8	2.2	2.8	45	50	56	60					
	●	●	●						●	10	.079	.35	.50	.71	.87	1.0	1.2	1.4	1.6	2.2	2.7	3.5	45	50	55	59					
	●	●	●	●					●	15	.094	.53	.75	1.1	1.3	1.5	1.8	2.1	2.4	3.4	4.1	5.3	45	50	55	59					
	●	●	●	●	●				●	20	.109	.71	1.0	1.4	1.7	2.0	2.4	2.8	3.2	4.5	5.5	7.1	45	50	55	59					
	●	●	●	●	●				●	30	.133	1.1	1.5	2.1	2.6	3.0	3.7	4.2	4.7	6.7	8.2	10.6	45	50	55	59					
	●	●	●	●	●				●	40	.153	1.4	2.0	2.8	3.5	4.0	4.9	5.7	6.3	8.9	11.0	14.1	46	50	54	59					
	●	●	●	●	●				●	50	.172	1.8	2.5	3.5	4.3	5.0	6.1	7.1	7.9	11.2	13.7	17.7	46	50	54	59					
	●	●	●	●	●				●	60	.188	2.1	3.0	4.2	5.2	6.0	7.3	8.5	9.5	13.4	16.4	21	46	50	54	59					
	●	●	●	●	●				●	70	.203	2.5	3.5	4.9	6.1	7.0	8.6	9.9	11.1	15.7	19.2	25	46	50	54	59					
	●	●	●	●	●				●	80	.217	2.8	4.0	5.7	6.9	8.0	9.8	11.3	12.6	17.9	22	28	45	50	53	58					
	●	●	●	●	●				●	85	.224	3.0	4.3	6.0	7.4	8.5	10.4	12.0	13.4	19.0	23	30	45	50	53	57					
	●	●	●	●	●				●	90	.230	3.2	4.5	6.4	7.8	9.0	11.0	12.7	14.2	20	25	32	45	50	53	56					
	●	●	●	●	●				●	100	.243	3.5	5.0	7.1	8.7	10.0	12.2	14.1	15.8	22	27	35	44	50	52	54					
	●	●	●	●	●				●	110	.255	3.9	5.5	7.8	9.5	11.0	13.5	15.6	17.4	25	30	39	45	50	53	54					
	●	●	●	●	●				●	120	.266	4.2	6.0	8.5	10.4	12.0	14.7	17.0	19.0	27	33	42	44	50	53	55					
	●	●	●	●	●				●	135	.282	4.8	6.8	9.5	11.7	13.5	16.5	19.1	21	30	37	48	45	50	52	55					
	●	●	●	●	●				●	150	.297	5.3	7.5	10.6	13.0	15.0	18.4	21	24	34	41	53	45	50	52	55					
	●	●	●	●	●				●	200	.343	7.1	10.0	14.1	17.3	20	24	28	32	45	55	71	46	50	52	55					
	●	●	●	●	●				●	250	.384	8.8	12.5	17.7	22	25	31	35	40	56	68	88	46	50	52	55					
	●	●	●	●	●				●	400	.472	14.1	20	28	35	40	49	57	63	89	110	141	46	50	52	55					
	●	●	●	●	●			●	●	500	.528	17.7	25	35	43	50	61	71	79	112	137	177	49	50	51	54					
	●	●	●	●	●			●	●	580	.569	21	29	41	50	58	71	82	92	130	159	205	49	50	51	53					
	●	●	●	●	●			●	●	750	.647	27	38	53	65	75	92	106	119	168	205	265	49	50	51	53					
	●	●	●	●	●			●	●	1000	.747	35	50	71	87	100	122	141	158	224	274	354	49	50	51	53					
	●	●	●	●	●			●	●	1500	.915	53	75	106	130	150	184	212	237	335	411	530	49	50	51	52					
	●	●	●	●	●			●	●	2000	1.056	71	100	141	173	200	245	283	316	447	548	707	49	50	51	52					



## **Vedlegg C**

**Prosjektnotat: Sjøtest i Hammerfest på MS Strilborg**

# Sjøtest av dispergeringsutstyr på MS Strilborg

## Hammerfest 23-25 mai, 2016

WP 048- Mekanisk dispergering av tynne oljefilmer

**VERSJON**

1.0

**DATO**

2016-06-29

**FORFATTER(E)**

Per S. Daling, Frode Leirvik og Thor-Arne Pettersen

**OPPDRAKSGIVER(E)**

NOFO

**OPPDRAKSGIVERS REF.**

Hans V. Jensen

**PROSJEKTNR**

102011551-2

**ANTALL SIDER OG VEDLEGG:**

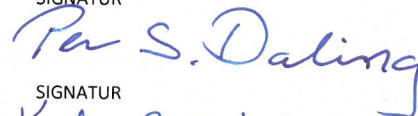
15 + 1 vedlegg

**SAMMENDRAG**

Jason Eng. har konstruert deflektor-dyse (nebb) som koples/tilpasses til Fi-Fi systemet på MS Strilborg i tillegg til en komplett fullskala baugmontert høykapasitet dysebom (manifold) som ble installeres på båten. I og med at MS Strilborg ikke er utstyrt med nødvendig spraysystem for dispergeringsmiddel (iht. NOFO-standard), har Jason Eng. konstruert et "komplett" konteinerbasert system med både høykapasitet vann dysemanifold, samt dispergeringsmanifolder for både høy- og lavdosering av dispergeringsmiddel. SINTEF har sammen med Jason Eng. utført sjøtesting av installerte dispergeringsutstyr ombord på MS Strilborg i forkant av OPV 2016.

**UTARBEIDET AV**

Per S. Daling

**SIGNATUR****GODKJENT AV**

Kristin R. Sørheim

**SIGNATUR****PROSJEKTNOTAT NR**

Versjon 1.0

**GRADERING**

Fortrolig

# Historikk

---

VERSJON	DATO	VERSJONSBESKRIVELSE
1.0	2016-06-29	



# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Ankomst / installasjon utstyr på MS Strilborg ved Polarbase (23 mai)</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Forberedelse før testing (24 mai morgen / formiddag)</b> .....	<b>4</b>
<b>3</b>	<b>Uttesting av deflektorer ("nebb") på Fi-Fi-monitor (etter lunsj 24 mai)</b> .....	<b>5</b>
<b>4</b>	<b>Uttesting av baugmontert manifold høykapasitet vanddosering</b> .....	<b>6</b>
4.1	Begge manifoldene - Alle 38 dyser (kl. 15:03- 15:20) .....	6
4.2	Begge manifoldene - Annenhver dyser blendes (totalt 19 dyser) (kl. 15:22- 15:30).....	7
4.3	Kun en manifold - Annenhver dyse blendet (totalt 10 dyser) (kl 15:35- 16:10) .....	8
4.4	Kun èn manifold – Annenhver dyse blendet (totalt 10 dyser) (kl. 17:20- 17:45) .....	9
4.5	Kun èn manifold – 10 dyser ytterst på manifold. (kl. 19:10- 19:30) .....	9
4.6	Kun èn manifold – 10 innerste dyser på manifold (kl. 19:50- 20:30) .....	9
4.7	Konklusjon – Høykapasitet vannmanifold .....	10
<b>5</b>	<b>Uttesting av dispergeringssystemet</b> .....	<b>11</b>
5.1	Start testing av høydoseringsbom (kl. 20:45- 21:00, 24 mai) .....	11
5.2	Testing av høydoseringsbom (kl. 08:45- 09:45, 25 mai) .....	11
<b>6</b>	<b>Testing av Fi-Fi-monitor uten deflektor (kl. 09:30 – 10:30, 25 mai)</b> .....	<b>12</b>
<b>7</b>	<b>Debriefing (før lunsj, 25 mai)</b> .....	<b>14</b>
<b>Vedlegg A</b>	<b>Plan for sjøtest av dispergeringsutstyr på MS Strilborg uke 21, 2016</b> .....	<b>15</b>

## 1 Ankomst / installasjon utstyr på MS Strilborg ved Polarbase (23 mai)

Jason-personell (Claus Rasmussen og Philip Hoffman) var ansvarlig for:

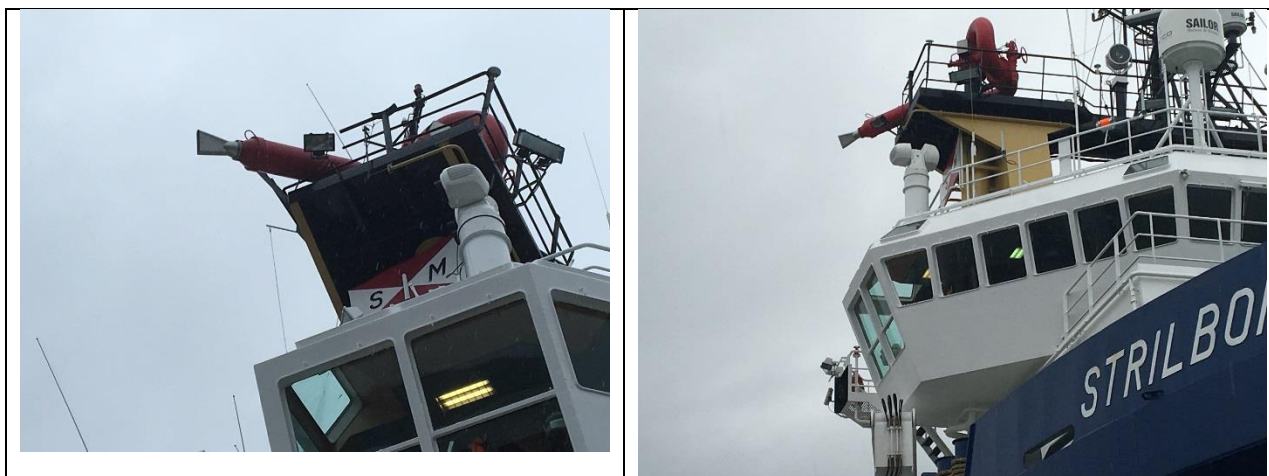
- Montering av deflektor på Fi-Fi-monitor (styrbord side). Deler av rekkverket rundt monitor ble tatt av for å få en brattere nedfallsvinkel på sjøen (se Figur 1).
- Installasjon av konteinerbasert dispergeringsutstyr (baugmontert spraybom for både høydosering med vann og dispergeringsmanifolder for høy- og lavdosering av dispergeringsmiddel iht. NOFO-standard, se Figur 2).

SINTEF-personell ankom senere på kvelden. Det ble gjennomført sikkerhetsrunde på båten (alarm/mønstringsstasjoner, rømningsveier etc.) med 1.styrmann ombord.

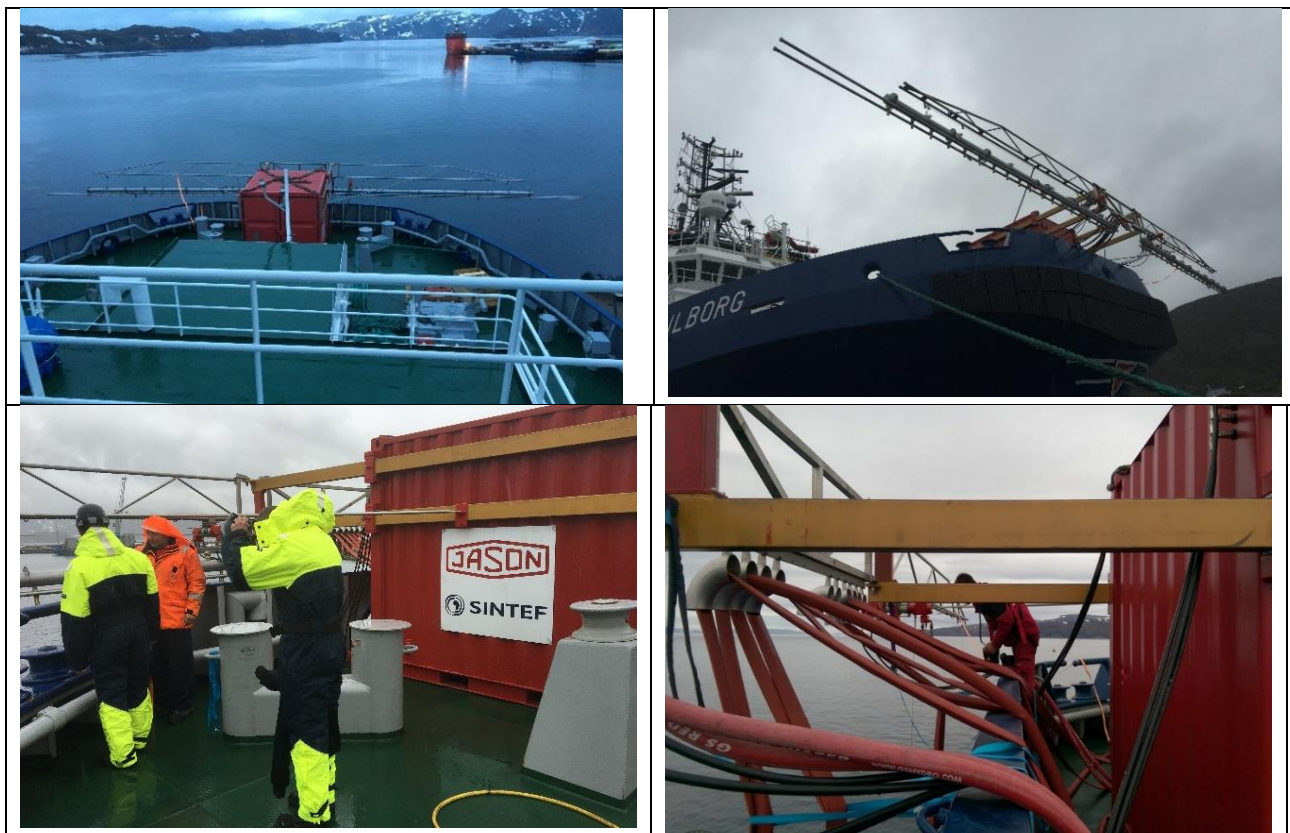
## 2 Forberedelse før testing (24 mai morgen / formiddag)

Ved frokost ble det holdt et orienteringsmøte med hele mannskapet om målsetting og forsøksplan for de ulike uttestingene.

SJA (Sikker Jobb Analyse) ble gjennomgått med kaptein, samt utfylling av skjemaer for sjekklister / personalopplysninger. Resten av formiddag gikk med til videre rigging av vannforsyning (brannslanger) til kontainer og montering av videokameraer på det baugmonterte dispergeringsutstyret. Vinkel på høykapasitet vannmanifold ble satt til 18° bakover i forhold til vertikal stilling mot sjøoverflaten.



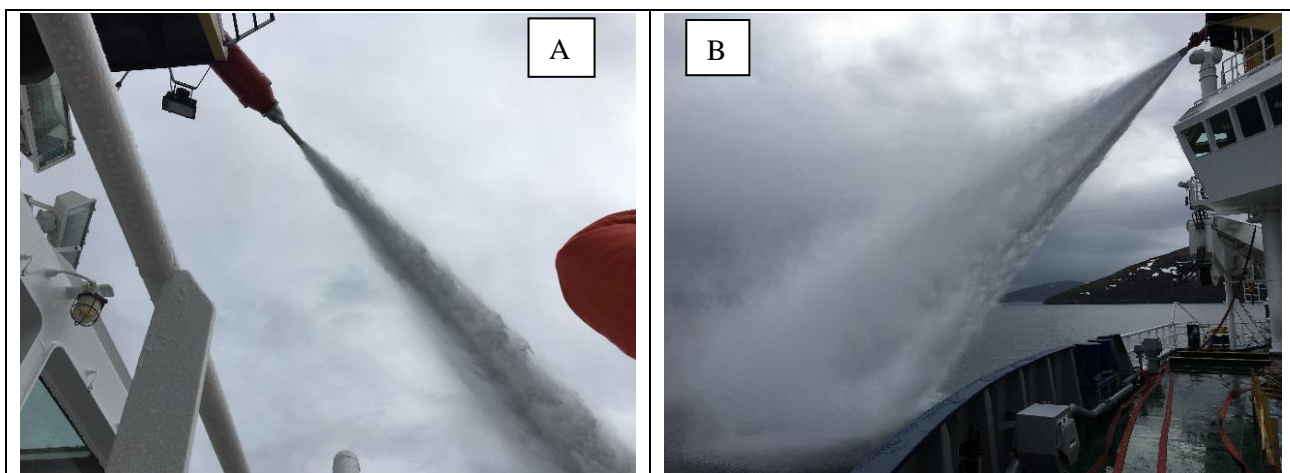
Figur1 T.v. Deflektor-dyse for montering på Fi-Fi-monitor.



Figur 2 Konteinerbasert dispergeringsutstyr (baugmontert dysebom for både høykapasitet vanddosering og dispergeringsmanifolder for høy og lav-dosering av dispergeringsmiddel).

### 3 Uttesting av deflektorer ("nebb") på Fi-Fi-monitor (etter lunsj 24 mai)

Kun en deflektor (versjonen med spredningsvinkel på 15°) ble testet. Målsettingen med deflektor var å få en mer flat vannstråle. Dette ble oppnådd (se Figur 3 A), men ved full vannleveranse (ca. 3600 m<sup>3</sup> /time) ble det generert et spredningsmønsteret som ikke var homogent fordelt over nedslagsfelt (ca. 15-20 m bredde, se Figur 3 B og Figur 4). Nedslagsfeltet fikk en "to-delning" med noe mindre vannmengder på midten. Det virket også som at nebbet reduserte selve nedfallstrykket av vannstrålen. Systemet ble testet opp til 10 knops fart (Figur 4).



Figur 3. Spraymønster av deflektor montert på Fi-Fi monitor. Statisk testing (uten fart).



Figur 4. Nedslagsfelt av deflektor montert på Fi-Fi monitor, testet opptil 10 knops fart.

#### **Konklusjon 24 mai:**

Det ble besluttet at uttesting av Fi-Fi monitor uten deflektor dyse burde gjennomføres neste dag.

#### **4 Uttesting av baugmontert manifold høykapasitet vandosering**

Selve systemet har en kapasitet på opptil ca. 1000 m<sup>3</sup>/time (ved 5-6 bar, og med totalt 38 dyser (type Vee Jet – 257500). Dette er en dyse med 25° spredningsvinkel, og med en kapasitet på ca. 0,4 m<sup>3</sup>/min. pr dyse ved 5-6 bar. Under testingen på Strilborg var imidlertid eksisterende vanntilførselen fra brannpumpe begrenset til ca. 300 m<sup>3</sup>/time. Høyde av manifold over sjøoverflaten ble satt til ca. 1 meter.

Det ble derfor testet ut ulike spraymønster med ulik antall dyser som beskrevet under.

##### **4.1 Begge manifoldene - Alle 38 dyser (kl. 15:03- 15:20)**

- Påføringsbredde: ca. 16 -18 m.
- Tilsvarte et vanntrykk på 1,5 bar (målt på dekk). Tilsvarende: 2,3 bar på dysene. Ut fra dysens spek. tilsvarende dette en total vannleveranse på 0,25 m<sup>3</sup> x 60 min x 38 dyser = 570 m<sup>3</sup>/time
- Fint spraymønster over hele bommen. Fin vinkel på dysene.
- Testet opptil ca. 10 knops fart.
- God overlapp mellom dysene, men for liten vannflow. Dette gir for lite energi / "skjær-krefter" mot vannoverflaten.
- Målt nedtrengning: ca. 10 cm.



Figur 5. Spraymønster av hele systemet, 38 dyser, testet opptil 10 knops fart.

#### 4.2 Begge manifoldene - Annenhver dyser blendes (totalt 19 dyser) (kl. 15:22- 15:30)

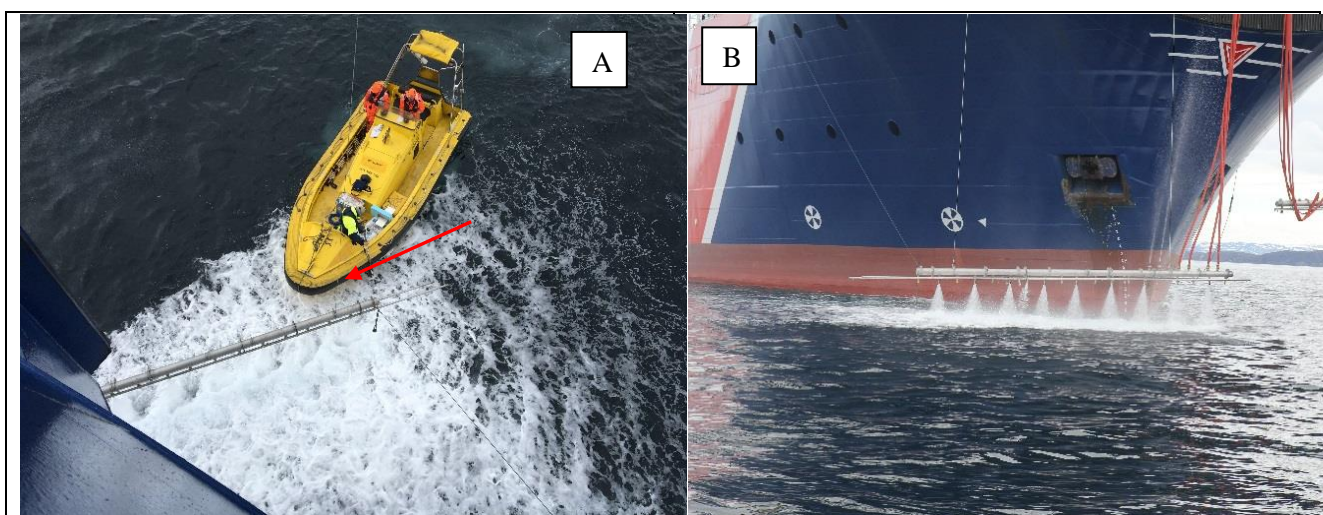
- Påføringsbredde: ca. 16 -18 m.
- Dette gav et vanntrykk på 2,1 bar på dekk. Tilsvarende: 2.9 bar på dysene Svarer til: ca. 0,28 m<sup>3</sup>/ min pr. dyse. Dette tilsvarer en total vannleveranse på 0,28 x 60 min x 19 dyser = 320 m<sup>3</sup>/time
- Svakhets: Ingen overlapp mellom dysene, ca. 20-30 cm "dødsone" mellom dysene (se Figur 6).
- Målt nedtrengning: ca. 20 cm.



Figur 6. Spraymønster av hele systemet, 19 dyser, testet opptil 10 knops fart.

#### 4.3 Kun en manifold - Annenhver dyse blendet (totalt 10 dyser) (kl 15:35- 16:10)

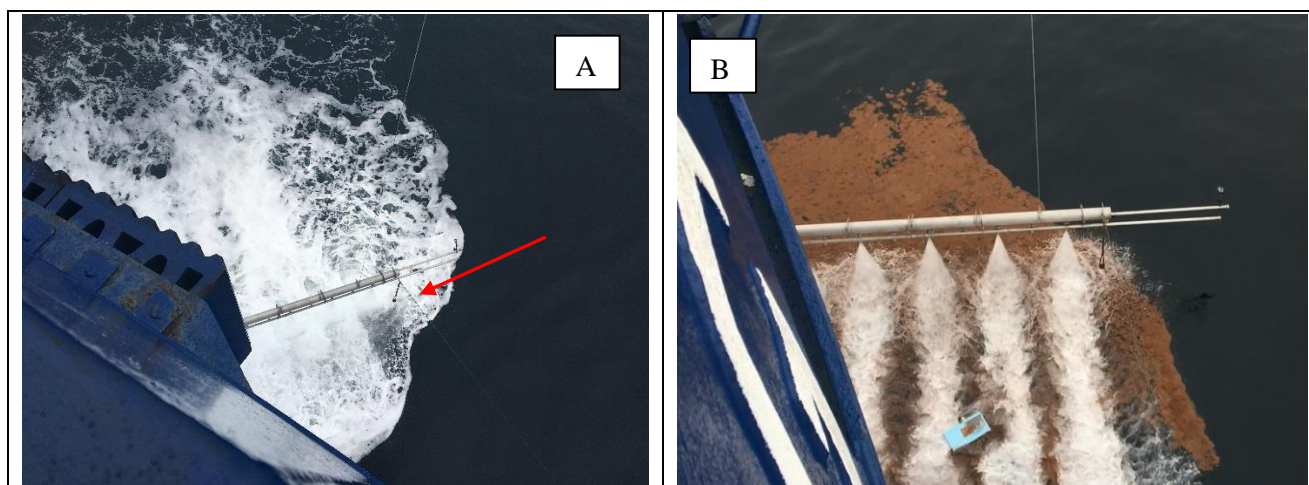
- Påføringsbredde: ca. 8 m (kun styrbord manifold, 4 brannslanger inn på manifold)
- Dette gav et vanntrykk på 4,0 bar på dekk. Tilsvarende: 4,8 bar på dysene. Svarer til: ca. 0,37 m<sup>3</sup>/ min pr. dyse. Dette tilsvarer en total vannleveranse på 0,37 x 60 min x 10 dyser = 225 m<sup>3</sup>/time
- Bom begynner på pendle. Line ble festet på enden av manifold (se rød pil, Figur 7 A). Dette gir ingen pendling, stabil manifold.
- Fint spraymønster over hele bommen. Fin vinkel på dysene.
- Ingen overlapp mellom dysene, ca. 10-20 cm "dødsone" mellom dysene.
- Målt kraft nedtrengning: ca. 30 cm (se Figur 7 B).



Figur 7. Spraymønster av 10 dyser (annenhver) kun på st.b manifold, måling av nedtrengning.

#### 4.4 Kun èn manifold – Annenhver dyse blendet (totalt 10 dyser) (kl. 17:20- 17:45)

- Påføringsbredde: ca. 8 m (kun styrbord manifold, annenhver dyse. Totalt 6 slanger inn på manifold).
- Dette ga et vanntrykk på 4,8 bar på dekk. Tilsvaret: 5,6 bar på dysene. Dette svarer til: ca. 0,4 m<sup>3</sup>/ min pr. dyse. Dette tilsvarer en total vannleveranse på 0,4 x 60 min x 10 dyser = 240 m<sup>3</sup>/ time.
- Spraybom /manifold) festet med line. Ingen pendling.
- Fint spraymønster over hele bommen. Fin vinkel på dysene.
- Ingen overlapp mellom dysene, ca. 20 cm "dødsone" mellom dysene.
- Målt kraft nedtrengning: ca. 35 cm (se Figur 8 A)
- Legger ut bark, kjører 2 x med 8 knop. Noe bark skyves i "dødsonen" mellom dysene (Figur 8 B)



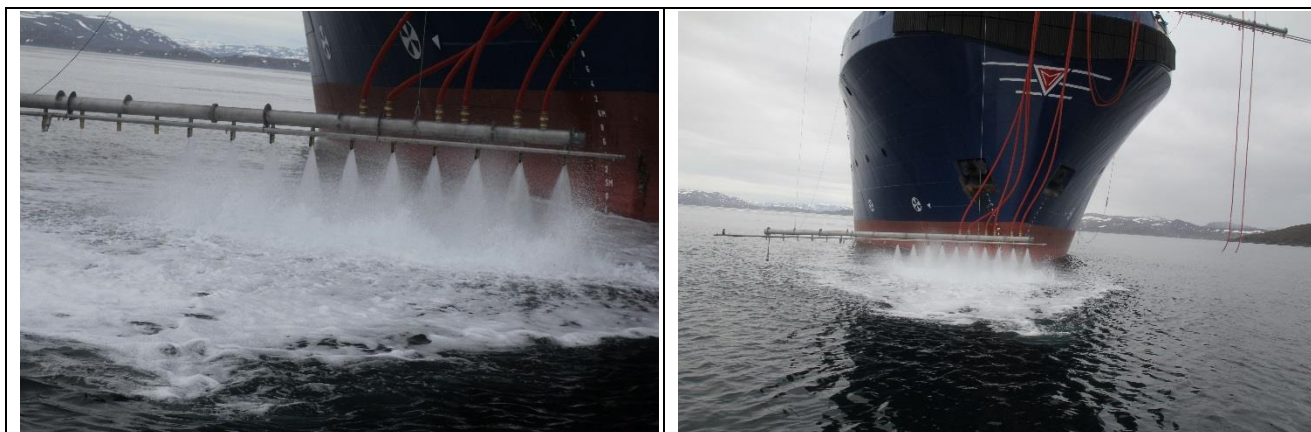
Figur 8. Spraymønster av 10 dyser (annenhver) kun på styrbord manifold, A: måling av nedtrengning. B: Testing ved 8 knop, påføring over område med bark. Dødsone på ca. 20 cm mellom dysene.

#### 4.5 Kun èn manifold – 10 dyser ytterst på manifold. (kl. 19:10- 19:30)

- Påføringsbredde: ca. 5 m. (kun styrbord manifold 10 ytterste dyser). Totalt 6 slanger inn på manifold).
- Dette ga et vanntrykk på 4,8 bar på dekk. Tilsvaret: 5,6 bar på dysene. Dette svarer til: ca. 0,4 m<sup>3</sup>/ min pr. dyse. Dette tilsvarer en total vannleveranse på 0,4 x 60 min x 10 dyser = 240 m<sup>3</sup>/ time)
- Manifold løfter seg (dokumentert på video). Forsøket stoppes umiddelbart.
- De 10 innerste dysene åpnes opp for neste forsøk.

#### 4.6 Kun èn manifold – 10 innerste dyser på manifold (kl. 19:50- 20:30)

- Påføringsbredde: ca. 8 m (kun styrbord manifold 10 innerste dyser er åpne). Totalt 6 slanger inn på manifold).
- Dette ga et vanntrykk på 4,8 bar på dekk. Tilsvaret: 5,6 bar på dysene Svarer til: ca. 0,4 m<sup>3</sup>/ min pr. dyse. Dette tilsvarer en total vannleveranse på 0,4 x 60 min x 10 dyser = 240 m<sup>3</sup>/ time.
- Stabil manifold. Holdes nede pga brannslangene.
- Vanskelig å få sett spraymønster fra dekk.
- Det rapporteres om fin overlapp mellom dysene, ingen "dødsone" mellom dysene.
- Målt kraft nedtrengning: > 40-05 cm (se Figur 9).
- Legger ut bark, kjører 2 x med 8 knop. Ingen indikasjon på at bark skyves mellom dysene (Figur 9).



Figur 9. Manifold med de 10 innerste dyser (5,6 bar på dysene svarer til ca. 400 L / min pr. dyse).

#### 4.7 Konklusjon – Høykapasitet vannmanifold

Følgende konklusjoner kan trekkes ut dra den erfaringen som er gjort under denne funksjonstesting av den baugmonterte manifold for høykapasitet vanddosering:

- Den eksisterende kapasitet med ca. 250 - 300 m<sup>3</sup> sjøvann /time fra båtens brannpumper som ble benyttet under denne testingen, er i underkant av hva vi ønsker for at dette systemet (38 dyser med en påføringsbredde på ca. 16 - 18 m) skal generere tilstrekkelig energi/ skjærhastighet til å kunne bryte ned en tynn oljefilm til små nok oljedråper som vil kunne fortynnes og brytes ned i vannmassene.
- Testingen viste at ved å blende av annenhver dyse (18 dyser med ca. 1 m avstand) vil gi et høyere trykk og mer energi på overflata, men gir samtidig en "dødsone" på ca. 20 cm mellom dysene (antar at manifolden er ca. 1 m over overflaten) som gjør at oljefilmen lett vil "smette" mellom gjennom denne "dødsonen". Dette er ikke ønskelig.
- Ved å blende av til man har ønsket trykk, dvs. 4-5 bar på ca. 10 dyser, med en påføringsbredde på 5-6 meter, vil dette gi for liten behandlingsskapasitet på de forsøkene med utslipp av tynne oljefilmer som systemet skal behandle under årets Olje-på-vann (OPV).
- Det ble diskutert mulighet for tilførsel av mer vann ved å koble til pumpe for ballastvann som vil gi en ekstra vannleveranse på ca. 250 m<sup>3</sup> sjøvann / time. Dersom dette lar seg løse vil en total leveranse på ca. 550 m<sup>3</sup> sjøvann gi et vanntrykk inn til manifold på ca. 3,0 – 3,5 bar på de 38 dysene. Dette antas vil være tilnærmet optimale betingelser for uttesting av hele systemet.
- Erfaringen vi gjorde med et trykk på opp mot 5 bar at manifolden kan løfte seg. Dette er ikke ønskelig. Det finnes imidlertid mulighet for å forhindre dette ved å feste en line på manifoldene på innsiden av vanninntaket
- Disse forsøkene gir et godt utgangspunkt og datagrunnlag for å designe de forsøkene i SINTEFs tårnbasseng, samt gjennomføring av feltforsøk for å designe optimal påføringsbetingelser tilpasset de tilgjengelige vannleveranser på Strilborg.



## 5 Uttesting av dispergeringssystemet

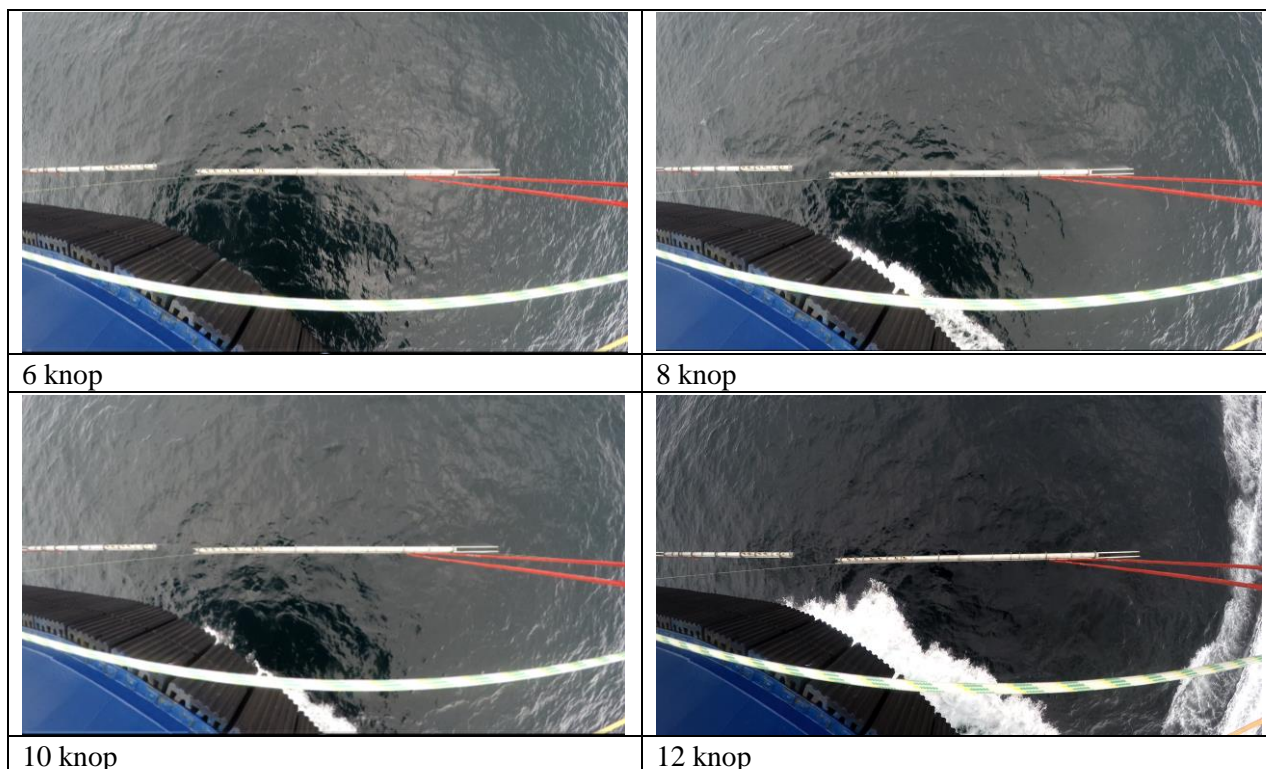
### 5.1 Start testing av høydoseringsbom (kl. 20:45- 21:00, 24 mai)

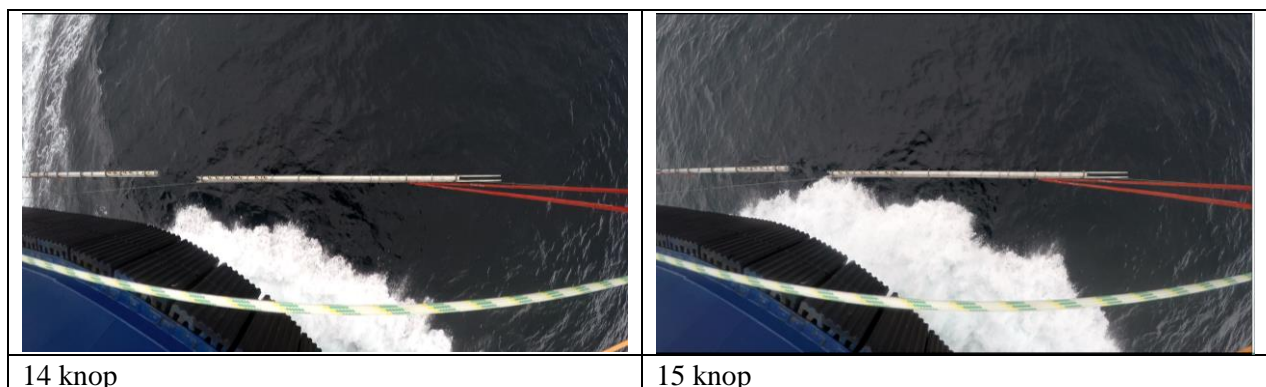
Spraysystemet for dispergeringsmiddel består av både høydoseringsmanifold (120 L/min) og lavdoseringsmanifold (30 L/min). Formålet er å få gjennomført en dokumentasjon av spraymønsteret og effektiv påføringsbredde ved ulike påføringshastigheter. Av spesiell interesse er å observere turbulensen i "spraysonen", samt vurdering av området hvor olje som treffer båtens baug vil kunne "skyves" inn i "spraysonen". Disse observasjonene dokumenteres visuelt (foto / video) av kamera montert på systemets bærebom, men også fra MOB-båt fra siden /foran Strilborg.

- Dispergeringssystemet ble startet opp, men ble stoppet pga. for lite vann i dispergeringstank, samt at videokamera begynte å gå ut på tid.
- Det ble besluttet å avslutte for dagen og fortsette neste morgen

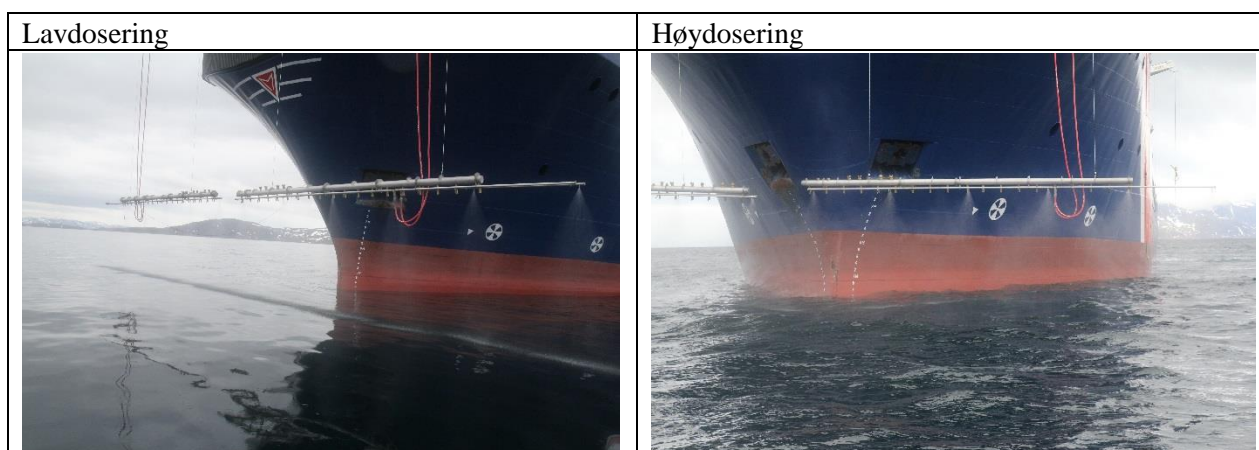
### 5.2 Testing av høydoseringsbom (kl. 08:45- 09:45, 25 mai)

- Oppstart med full dispergeringstank og nyladete batterier på videokamera.
- Vind: ca. 12 knop (6 m/s). Uttestingen skjer medvinds med ulike hastigheter (knop), se Figur 10 og Figur 11:
  - kl. 09:10: 0 knop
  - kl. 09:12: 2 knop
  - kl.09:13: 4 knop
  - kl. 09:14: 6 knop
  - kl. 09:16: 8 knop
  - kl. 09:18: 10 knop
  - kl. 09:19: 12 knop
  - kl. 09:20: 14-15 knop (maks fart).





Figur 10. Dokumentasjon av baugbølge og spraymønster fra manifold for høy og lavdosering av dispergeringsmiddel ved ulike påføringshastigheter (med vinden).



Figur 11. Spraymønster av dispergeringsbom (høy og lavdosering, sett fra lettbåt).

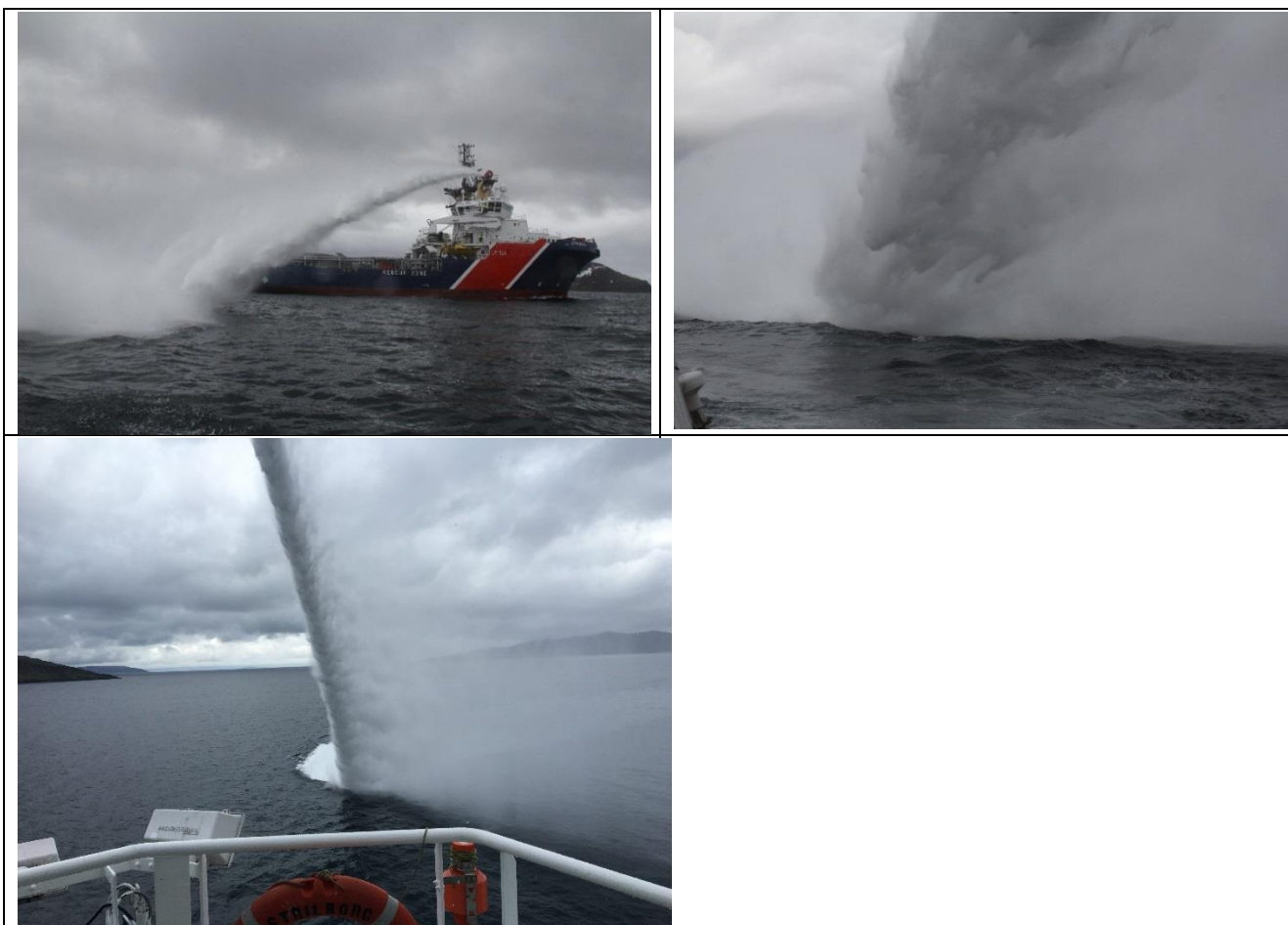
## 6 Testing av Fi-Fi-monitor uten deflektor (kl. 09:30 – 10:30, 25 mai)

Med basis i erfaringen dagen før med deflektor, ble deflektor demontert, og det ble gjort en tilsvarende test uten deflektor. Testene uten deflektor viste en langt større effektivitet og energi på overflaten, sammenlignet med bruk av deflektor. Nedslagsfeltet var ca. 50 m fra skutesiden (se Figur 12). Dette vil kunne reduseres ved at man før OPV vil skru ned noe mer av rekkverket rund monitor. Samtidig vil dette gjøre monitor med "manøvrerbar", og vil i større grad kunne "sveipe" over oljeflaket, og dermed oppnå et større nedslagsfelt.

Systemet ble testet opp til 10 knops fart (Figur 13). Det ble lagt ut et område med torv/bark. Styrmann traff dette "flaket" perfekt, og ble fullstendig oppløst.



Figur 12. Spraymønster på Fi-Fi monitor uten deflektor, nedslagsfelt ca. 50 m fra skutetida.



Figur 13. Testing av Fi-Fi monitor ved 10 knops fart

### **Konklusjon:**

Forsøket med Fi-Fi monitor uten deflektor viste svært lovende energi på sjøoverflaten. Systemet vil kunne optimaliseres ytterligere ved å fjerne noe mer av rekkverket rundt, og vil da kunne sveipe over oljeflaket i enda større grad.

## **7 Debriefing (før lunsj, 25 mai)**

Etter avslutning av forsøkene ble det holdt en oppsummering og en gjennomgang av de ulike forsøkene, med visning av en del "highlight" video opptak fra testingen. Det var god stemning, og ser fram til videre samarbeid med mannskapet på Strilborg under årets OPV 2016..

**Vedlegg A Plan for sjøtest av dispergeringsutstyr på MS Strilborg uke 21, 2016**

# Plan for sjøtest av dispergeringsutstyr på MS Strilborg uke 21, 2016

Telefaks: 73597043

Foretaksregister:  
NO 948 007 029 MVA

## SAKSBEHANDLER / FORFATTER

Per S. Daling

	BEHANDLING	UTTALELSE	ORIENTERING	ETTER AVTALE
<b>GÅR TIL</b>				
Kaptein på Strilborg (Steinar Are Ingebrigtsen /Tormod Jensen)	X			
Claus Rasmussen, Jason Eng.		X		
Ola Jordheim, Kystverket			X	
Hans Jensen, NOFO			X	
Kristin Rist Sørheim, SINTEF			X	
Thor-Arne Pedersen, SINTEF		X		
Frode Leirvik, SINTEF		X		

## PROSJEKTNR / SAK NR

1020115511-2

## DATO

2016-05-20

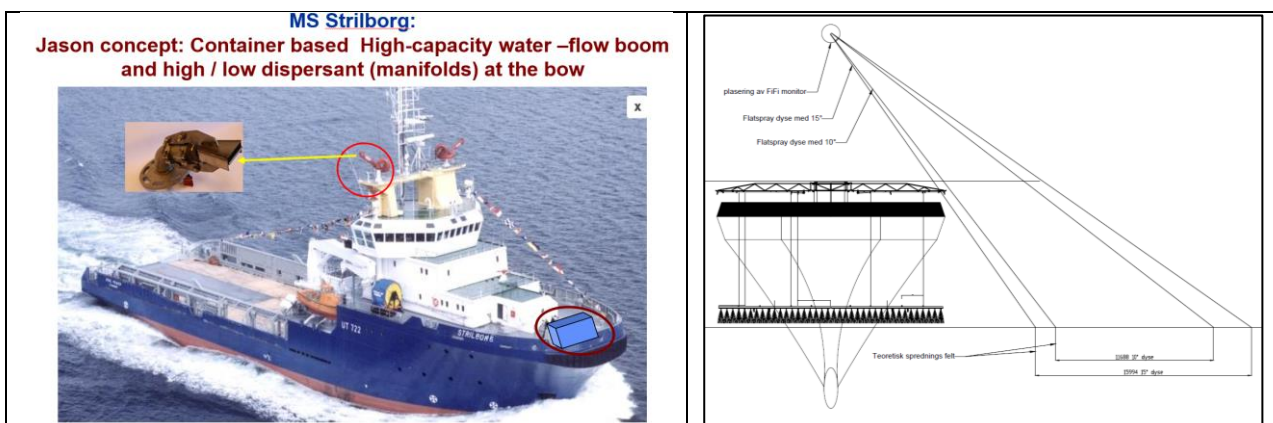
## GRADERING

Fortrolig

## 1 Bakgrunn

Dette notatet skisserer en plan for uttesting /funksjonstesting av dispergeringsutstyr som skal benyttes under årets Olje-på-vann øvelse (OPV 2016) i uke 24/25, og som skal opereres fra MS Strilborg.

Dette inkluderer uttesting av deflektorer for montering på Fi-Fi-monitor, samt konteinerbasert dispergeringsutstyr (baug-montert spraybom for både høydosering med vann og dispergeringsmanifolder for høy og lav-dosering av dispergeringsmiddel (se Figur 1).



Figur.1 T.v. Deflektor-dyse for montering på Fi-Fi-monitor. T.h.: skjematisk skisse av konteinerbasert dispergeringsutstyr (baug-montert bom for både høykapasitet vanddosering og dispergeringsmanifolder for høy og lav-dosering av dispergeringsmiddel).

## 2 Sjøtest – Hammerfest

Deflektor og det kontainerbasert dispergeringsutstyret vil etter plan bli installert av Jason Eng. på MS Strilborg, 23. mai. Selve uttestingen vil etter planen foregå i perioden 24-25 mai, 2016 (uke 21).

Jason Eng. og SINTEF har flere ganger tidligere gjennomført uttesting, kalibrering og funksjonalitetstesting av dispergeringsutstyr på fartøy, og vil i utgangspunktet følge standardprosedyrer (iht. NOFO-standard) for å dokumentere både spraymønster og den operasjonelle funksjonaliteten av utstyret ved ulike påføringshastigheter. Denne gangen er også andre prototyper som skal testes ut som innebærer en del operativ optimalisering / tilpassing av utstyret.

Det tas sikte på at uttestingen gjennomføres i ca. 2 dager, med noen turer ut på fjorden utenfor Hammerfest. I tillegg til at det gjøres målinger, video-dokumentasjon og observasjoner fra skutesiden / baugen på båten, vil det også være behov for å ha tilgang på en MOB-båt. Dette både for å legge ut bark/mose som "markør" og for å kunne dokumentere funksjonaliteten fra sjøoverflaten, turbulens og nedtrengningsdybde i vannmassene.

### 2.1 Uttesting av deflektorer ("nebb") PÅ Fi-Fi-monitor

Forsøksparameter / variable:

- To ulike deflektorer skal testes ut, med en spredningsvinkel på hhv. 10 og 15 grader, noe som skal gi et teoretisk nedslagsfelt på hhv. 12 og 15 m bredde (se Figur 1).
- Ulike vinkling ut fra skuteside (skrått bakover) og avstand fra skuteside.
- Ulike påføringshastighet: f.eks. 4, 6, 8, 10 og 12 knops fart.

### 2.2 Uttesting av baug-montert høykapasitet vandoserer

Selve systemet har en kapasitet på opptil ca. 1100 m<sup>3</sup>/time (ved 5-6 bar, og med totalt 38 dyser).

Pga. mulig begrenset tilgang på vann, vil det bli testet ut ulike spray-mønster med ulik antall dyser:  
Variable:

- Alle dyser (38 dyser), påføringsbredde: ca. 16 – 18 m.
- Annenhver dyser blendes (19 dyser) påføringsbredde: ca. 16 – 18 m.
- Teste kun en av bommene: (19 dyser).
- Blende av til at vi har 5-6 bar på dysene.
- Teste ulik vinkling på manifold (skrått bakover) og optimalisere påføringshøyde ved ulike påføringshastighet: f.eks. 4, 6, 8, 10 og 12 knops fart).

### 2.3 Uttesting av dispergeringssystemet

Dispergeringssystemet for bruk av dispergeringsmiddel består av både høydoserer-manifold (120 L/min) og lavdoseringsmanifold (30L/min).

Formålet er å få gjennomført en dokumentasjon av spraymønsteret og effektiv påføringsbredde ved ulike påføringshastigheter:

- Ved f.eks.: 1, 2, 4,6,8,10,12,14++ knops fart.
- Høydoserer (2 - 10 knop) og lav dosering (10+ knop).
- Med-vind / mot-vind

Av spesiell interesse er å observere turbulensen i "spraysonen", samt vurdering av området hvor olje som treffer båtens baug vil kunne "skyves" inn i "spray-sonen". Disse observasjonene bør kunne dokumenteres visuelt (foto / video) både fra fartøyet, men også fra MOB-båt fra siden /forkant av fartøyet. Det benyttes vann for denne uttestingen, og erfaringsmessig bør dette kunne gjennomføres i løpet av 2-3 timer.

Rapport fra felttestingen med Stril Barents i februar 2015 gjøres tilgjengelig som eksempel og må ikke distribueres.

## **Vedlegg D**

**Project memo: High volume nozzle treatment of thin oil  
films**



# Project memo

## Oljevern 2015 – WP 048 High volume nozzle treatment of thin oil films

Activity 2: Tower basin studies

**VERSION**

5.0

**DATE**

2017-02-17

**AUTHOR(S)**

Frode Leirvik, Per S. Daling and Kristin R. Sørheim

**CLIENT(S)**

NOFO

**CLIENTS REF.**

Hans V. Jensen

**PROJECT NO.**

102011551-2

**NO. OF PAGES AND APPENDICES:**

21

**ABSTRACT**

This project memo summarise the work related to the Activity 2: "Testing i SINTEF Testbasseng" in the on-going Oljevern 2015-WP 048 project where the potential for use of high volume water jets as a countermeasure against thin oil films was studied. The experiments were performed to investigate the potential of droplet formation by treating oil droplets with spray nozzles in the SINTEF's Tower Basin. The potential for droplet breakup has been studied at different water flow rates and at different nozzle heights above the water surface. Theoretical considerations have been done around the potential for droplet breakup as viscosity of the oil increase as it weathers on the sea surface.




**PREPARED BY**  
Frode Leirvik

**APPROVED BY**  
Kristin Rist Sørheim

**PROJECT MEMO NO.**  
1.0

SIGNATURE



SIGNATURE



**CLASSIFICATION**

Restricted

# Document history

---

<b>VERSION</b>	<b>DATE</b>	<b>VERSION DESCRIPTION</b>
1.0	2016-09-29	Includes suggested further work, time schedule and budget
2.0	2017-01-09	Updated version including results, discussion and conclusions from experimental work in the tower basin
3.0	2017-02-02	Predictions with weathering degrees relevant to the field experiment included
4.0	2017-02-15	Final version after QA
5.0	2017-02-17	Updated Final version after QA

# Table of contents

<b>1</b>	<b>Experimental setup.....</b>	<b>4</b>
1.1	Background for choice of experimental setup.....	4
1.2	Water and oil flow control.....	6
1.3	Documentation of particle sizes and concentrations in the water column.....	7
1.4	Measurement of the surface oil after treatment.....	7
<b>2</b>	<b>Evaluation and Results.....</b>	<b>9</b>
2.1	Documentation of flow rate vs. pressure.....	9
2.2	Droplet injection and breakup.....	10
2.3	Penetration and mixing depth.....	13
2.4	Oil remaining on the surface after treatment.....	16
2.5	Expected effect of weathering on mean droplet size.....	16
<b>3</b>	<b>Conclusions.....</b>	<b>20</b>
<b>4</b>	<b>References.....</b>	<b>21</b>

---

---

## 1 Experimental setup

### 1.1 Background for choice of experimental setup

The SINTEF Tower Basin is a 6 meter high tank with a diameter of 3 meters. Previous studies with water jetting have been performed in the Tower basin. In these experiments a moving spray nozzle was treating either a slick of oil or tracer particles on the surface. These experiments are described in detail in a project note from the project 102007603-3 PETROMAX Thin Oil Films. A brief description is given below. The setup for the experiments with the moving nozzle are shown in Figure 1.1. The nozzle was mounted on the slide of a belt driven linear unit. The nozzle could treat the surface at speeds up to 6 knots. The interaction between the spray and the surface tracer particles were documented.

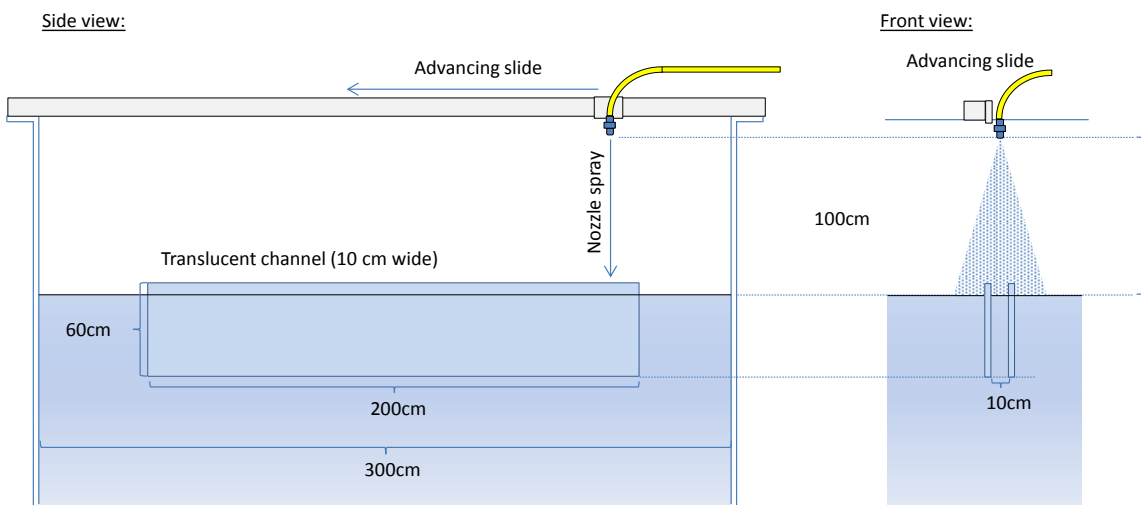


Figure 1.1 Experimental setup in the studies of tracer particle interaction with water jets.

About ~3 mm diameter polyethylene particles were used as tracer particles in these experiments. A high resolution Gopro camera was used to document the interaction between spray and particles. The video showed that the particles submerged prior to the jet from the spray. The particles then travelled down in the front of the bubble cloud formed from the jet. Particles then passed either into or under the bubble cloud at different depths (Figure 1.2).

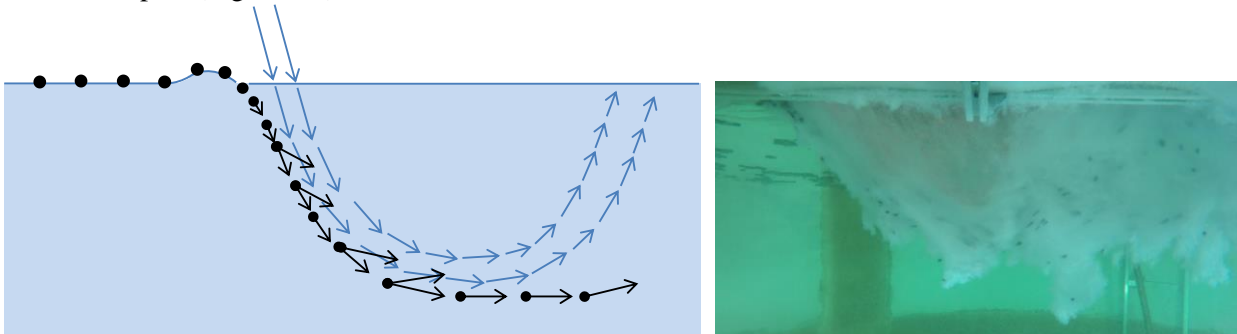


Figure 1.2 Schematic drawing and picture of tracer particle interaction with the water jet.

None of the previous studies produced sufficient data quality regarding droplet sizes and oil concentration in the water column. It was found that maintaining a uniform thin slick on such a small surface (0.1 – 2 m) was difficult. The concentrations in the water column when treating a very limited slick area were also below the detection limit of the instrumentation. It was decided to introduce the oil to a stationary water-jet as droplets 10 cm below the surface (see Figure 1.3). The oil was injected continuously for 1 minute, to get sufficient concentrations in the water column. This removed a lot of complexity from the experiments, compared to treating a surface slick with an advancing nozzle. This new approach is considered relevant, since the slick was observed to break up and submerge in front of the spray in the previous studies (see Figure 1.2). The oil is then introduced to the jet as droplets anyway.

The "Veejet 750" nozzle from "Spraying Systems inc" were used in the experiments. This is the same nozzle used on the prototype JASON high capacity nozzle boom. Experiments were done with 200, 300 and 400 l/min flowrates. These are flow rates relevant to application from an advancing vessel. In the Oil on Water exercise 2016 the vessel StrilBorg supplied the nozzle boom with enough water to give close to 300 l/min water per nozzle. The tests at the three flow rates were done with the nozzle at three heights above the water surface (0.5 m, 1m and 1.5 m).

A standard experiment was performed by injection water and oil at the same time. Then droplet sizes in the water column were measured with the LISST 100X. The oil was then confined in a smaller area on the surface and the volume was quantified. A typical time schedule for the measurements are given in Table 1.1

*Table 1.1 Time schedule for one water jetting experiment*

0-1 min	Water spray and Oil injection
1-4 min	Profiling with the LISST100X
4-6 min	Booming of surface oil
6-10 min	Ultrasound measurements of the oil thickness

The different steps of the procedure is described in the chapters below

## 1.2 Water and oil flow control

Water used for the treatment nozzle was pumped from the bottom of the tank with an auger pump. The water flow was measured with a positive displacement flow-meter from "Contoil". Initially, the water flow was routed back into the bottom of the tank. When the wanted flow rate was reached, the flow was routed to the treatment nozzle by a pneumatic three-way valve. The oil was injected from a pressure controlled tank. The oil flow was measured by a flow meter from "Digmesa". The oil could also be directed by a three way valve. Initially the flow was routed to a collection flask. As the oil flow rate was established, and water injection initiated the flow was routed to the injection line. Oil was injected at a flow rate of 1 l/min through a 1.5 internal diameter tubing. This gave injected oil droplets with a median droplet size of 360  $\mu\text{m}$ . The schematic drawing of the experimental design is shown in Figure 1.3.

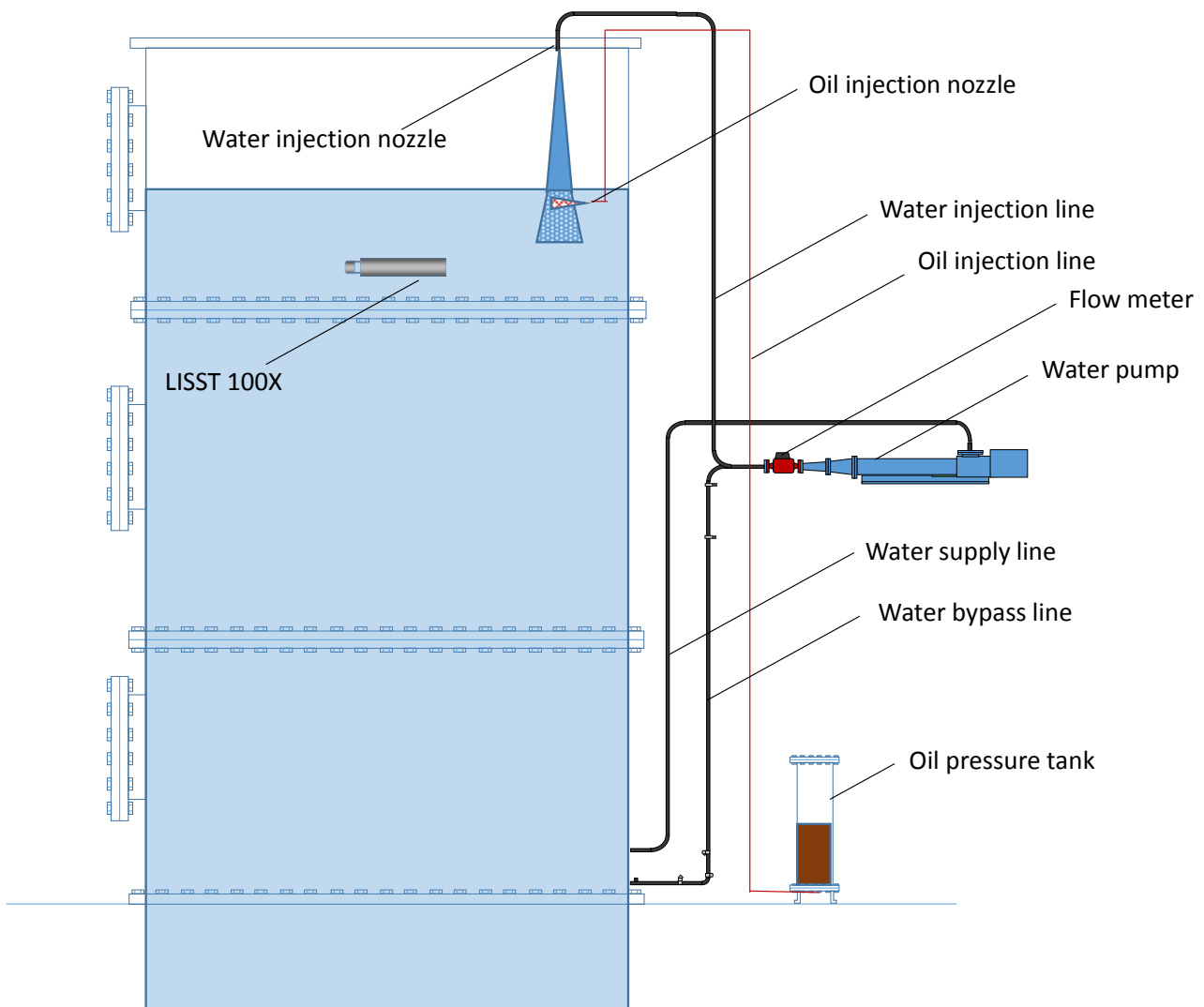


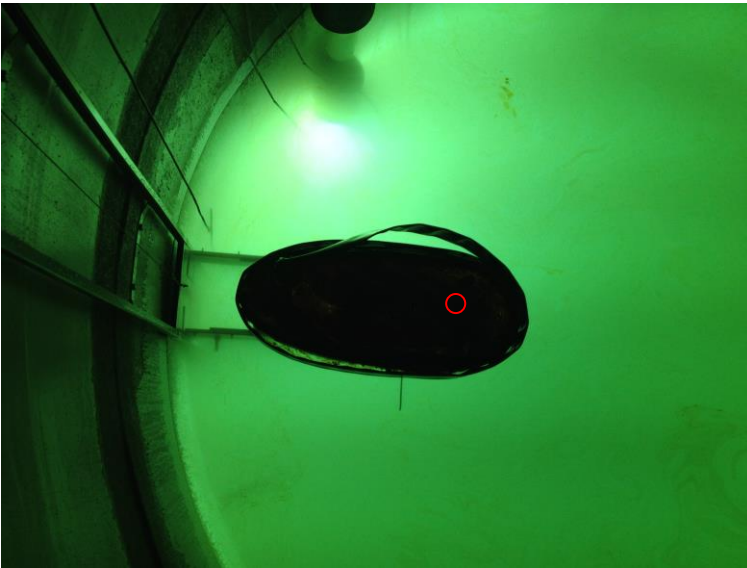
Figure 1.3 Schematic drawing of the experimental setup for the one experiment performed with a full scale nozzle and oil prior to the Oil on Water trial (2016).

### 1.3 Documentation of particle sizes and concentrations in the water column

After the 1 minute treatment time, oil and water injection were turned off. Profiling of the water column with the LISST100x instrument was started immediately. The LISST100X was mounted on a platform that could be winched up and down in the tank. A depth profile were done from the tank bottom to the water surface and down again. The total time for the upcast/downcast were approximately 3 minutes. The LISST instrument is equipped with a pressure gauge and is logging depth along with the size distribution data. Data was processed using Python 3.5. The LISST100X does not distinguish between oil droplets and air bubbles. Experiments were therefore also done without oil injection to document the influence of air bubbles on the results.

### 1.4 Measurement of the surface oil after treatment

After the profiling were done the surface oil was collected inside a "boom" made of a 4" lay-flat hose. Approximately 6 minutes after the end of the treatment the surface oil was confined within an area of approximately 0.1m<sup>2</sup>. The oil slick was then thick enough for the thickness to be measured with an ultrasonic transducer. A submersible 20MHz transducer from Olympus was used along with a US-Key pulser/receiver from LeCoeur Electronique to detect the slick thickness. The transducer were mounted on one of the instrument platforms of in the tower basin and were positioned 1-2cm below the oil layer.



*Figure 1.4 Surface oil confined by miniature boom system. The position of the ultrasonic sensor is indicated by the red circle. The sensor is submerged approximately 1-2 cm below the oil slick*

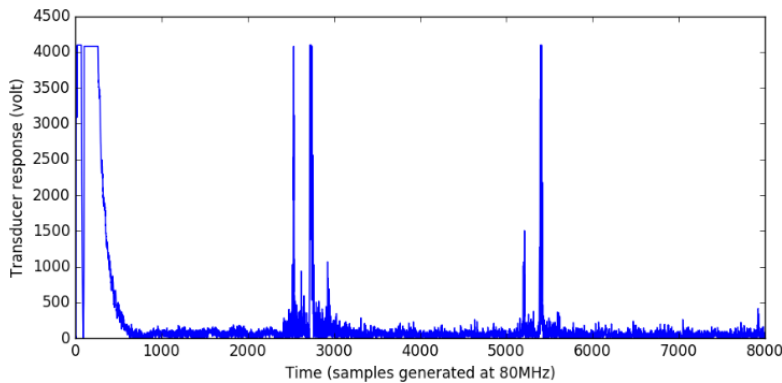


Figure 1.5 Example of signals from the ultrasonic sensor.

The US-Key pulser/receiver acquired data at a rate of 80 datasets/sec. The return signals were digitized at a sampling rate of 80 MS/s at 12 bits. Data from the ultrasonic sensor was processed using Python 3.5 to calculate the thickness. Figure 1.5 show the response from the sensor. The peaks at sample number ~2500 and 2800 are echoes from the oil/water and water/air interfaces respectively. The speed of sound in the oil has been measured in the laboratory to ~1850 m/s. As the speed of sound and the sampling frequency is known the slick thickness can be calculated.

The area of the slick was determined using Imagej for image analysis (example of the image in Figure 1.4). As the area and thickness were known the volume of surface oil could be determined.

The collection of surface oil took approximately 6 minutes. Figure 1.6 show the rise height of different size droplets in 6 minutes assuming Stokes rise velocities. The typical median droplet size distributions measured at different flow rates are represented by vertical lines in the figure (red - 400 l/min, green - 300 l/min and blue – 200 l/min). The droplets injected into the water jet had a recorded mean volume diameter of 360  $\mu\text{m}$  (yellow line).

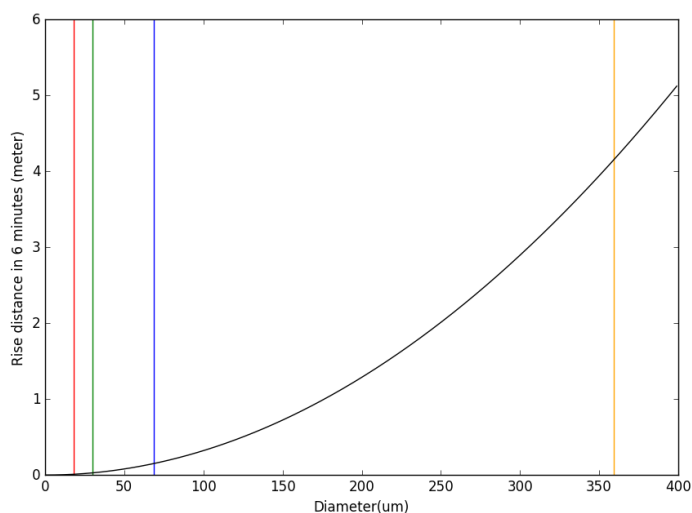


Figure 1.6 Theoretical rise distance in 6 minutes as function of droplet diameter. The vertical lines represent the typical median size measured at the different flow rates.



Theoretical rise distances are short for the droplets formed after treatment with the water jet. The droplets injected from the oil injection nozzle are comparably large, and have a much higher rise velocity. These droplets will rise over 4 meters in the 6 minutes it took before all surface oil were confined. It is also visually assessed that most of the oil surfaces during or immediately after the treatment. This means that most of the untreated droplets are on the surface at the end of the "booming", while most droplets formed during treatment is still in the water.

## 2 Evaluation and Results

### 2.1 Documentation of flow rate vs. pressure

The nozzle used in the testing was a "Veejet 750" flat spray nozzle from "Spraying systems inc". The relationship between water flow and pressure was documented by ramping up the flow with 50 l/min increments from 0-400 l/min. Flow was measured with the "Contoil flow meter" and the pressure was documented with a pressure transmitter mounted on a 2"-tee just prior to the nozzle. The flow rate is plotted against the pressure in Figure 2.1.

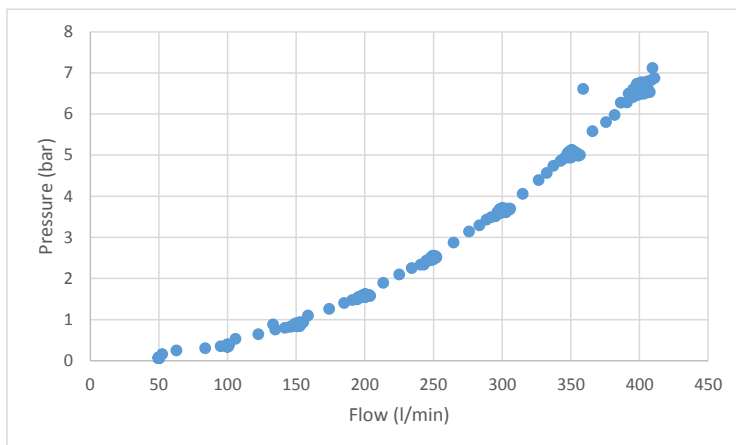


Figure 2.1 Pressure (bar) as a function of water flow (l/min) through the Veejet 750 nozzle

The documented pressure/flow relationship agrees good with similar data given in the data sheet for the nozzle.

## 2.2 Droplet injection and breakup

Droplets were injected into the water jet approximately 10 cm below the surface. The droplets were formed by injecting the oil into water at 1 l/min through a 1.5 mm nozzle. A separate experiment were performed with injection of oil through a nozzle in the bottom of the tower basin to document the size distribution of injected droplets. The droplet size distribution was measured with the LISST 100 X positioned 3 meters above the nozzle. The 3 meter distance was required to dilute the plume below the detection limit of the instrument. A peak droplet diameter of 360  $\mu\text{m}$  was recorded for the injected droplets. The droplet size distribution is shown along with an image of the injected droplet cloud in Figure 2.2.

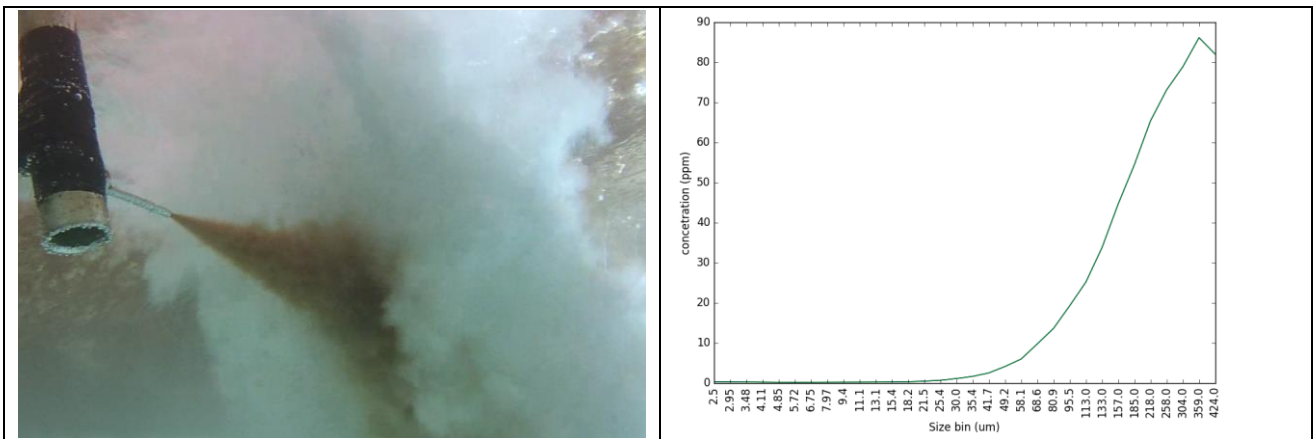


Figure 2.2 Oil droplets injected into the water jet in the tower basin experiments and the recorded droplet size distribution.

The oil was injected for 1 minute with a rate of 1 l/min. The exit velocity from the nozzle is 2.4 m/sec. The droplet velocity is going to decrease prior to entering the water jet. The droplets will, however, probably enter at velocities relevant for ships treating surface oil with a spray system. As seen in Figure 2.2, the droplet cloud is sprayed towards the jet perpendicularly. As indicated in Figure 1.2 some of the oil seems to move down along the front edge of the water jet before passing into the high energy area or passing below the bubble cloud.

The LISST 100X does not distinguish between oil droplets and air bubbles. Small air bubbles interfering with the measurements was therefore a concern. Measurements were performed both with and without oil injection to investigate the effect of water bubbles on the measurements. Figure 2.3 show a comparison between size distributions in these two experiments at 0.5 meter nozzle height and 400 l/min water flow.

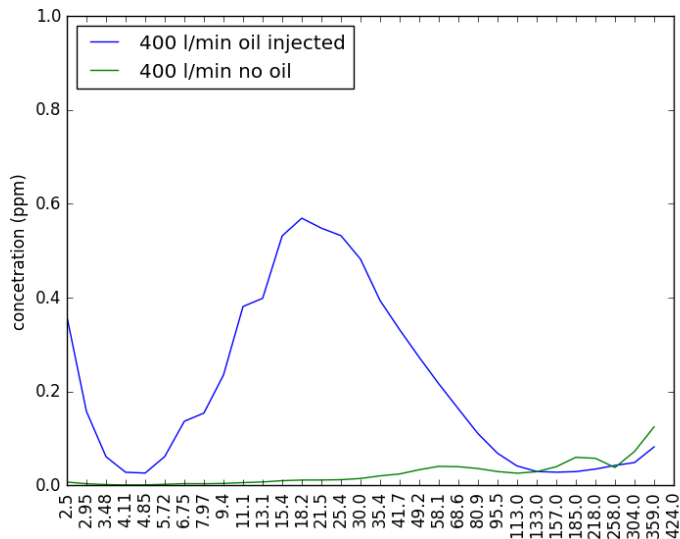


Figure 2.3 Size distributions with and without oil injection at 0.5 meter injection height and a nozzle flow of 400 l/min.

The experiment showed in Figure 2.3 is the one expected to have highest generation of air bubbles. The air concentrations are relatively low compared to the oil concentrations. Air concentrations were therefore only documented for the experiments with a 0.5 meter nozzle height.

Figure 2.4, Figure 2.5 and Figure 2.6 show comparisons between size distributions recorded in the experiments at 0.5, 1 and 1.5 meter nozzle height respectively.

The median droplet size recorded for the experiments with 0.5 and 1 meter treatment height are comparable. 400 l/min gave a 14 µm median droplet size. At 300 l/min the droplet size were 30 µm. Both droplet sizes will be small enough to be counted as permanently dispersed into the water column. At 200 l/min experiments at both heights gave a median droplet size of ~70 µm. 70 µm is a little larger than desired.

The experiments with a 1.5 meter treatment height have the same recorded median droplet sizes as experiments on 0.5 and 1 meter. The peaks appear broader and concentrations are lower. Results from measured surface oil does, however, not show higher concentrations for the experiments performed at 1.5 meter.

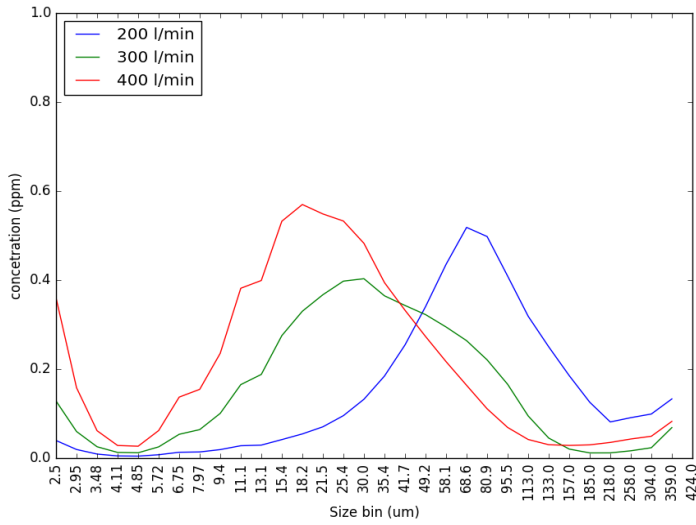


Figure 2.4 Recorded droplet size distributions ( $\mu\text{m}$ ) in the three experiments performed with a 0.5 meter nozzle height above the surface.

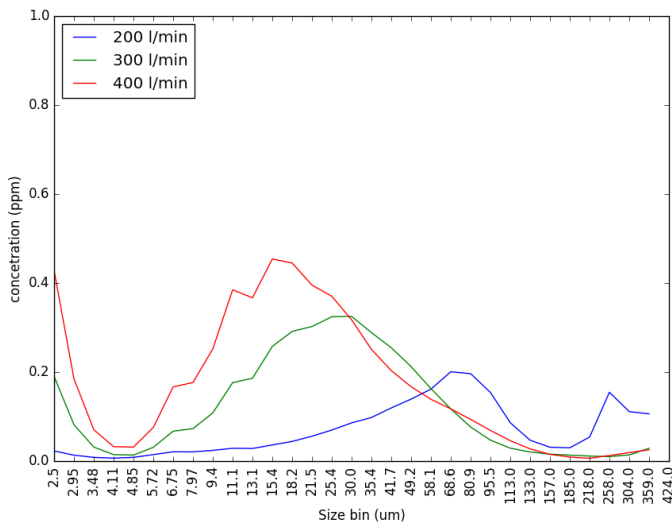


Figure 2.5 Recorded droplet size distributions ( $\mu\text{m}$ ) in the three experiments performed with a 1 meter nozzle height above the surface.

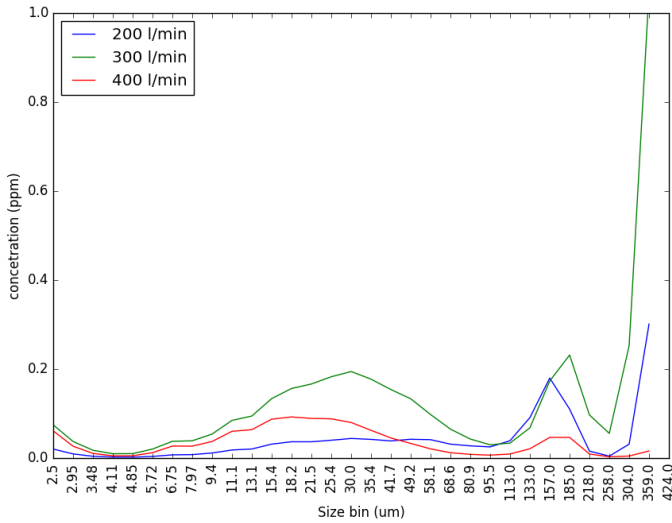


Figure 2.6 Recorded droplet size distributions ( $\mu\text{m}$ ) in the three experiments performed with a 1.5 meter nozzle height above the surface.

### 2.3 Penetration and mixing depth

During the ramp-up in flow/pressure the penetration depth of the bubble cloud was documented. This was done by mounting a camera on a graduated stick. As the camera was lowered through the bubbles the image was totally white. The camera was lowered through the bubble cloud until visibility was regained, and the depth was recorded. Penetration depth as function of flow rate is plotted in Figure 2.7.

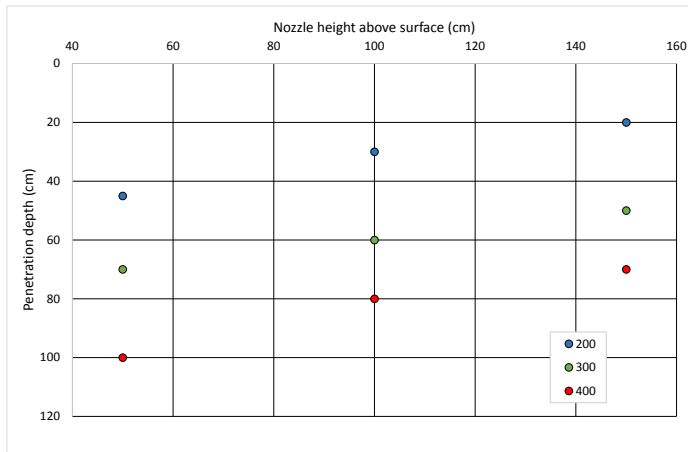


Figure 2.7 Penetration depth (cm) of the bubble cloud with varying nozzle flow (l/min) and nozzle height above the water surface (m)

A maximum penetration depth of 1 meter was recorded for 0.5 meter treatment height and 400l/min flow rate. Penetration depth increased with increasing flow rate probably due to an increasing impact velocity to the surface. Penetration depth decreased with increasing height. Probably because of lower volume of water per area treated.

After a standard treatment with the water jet, a vertical profile was taken with the LISST100X. In the figures below concentrations in all size bins are summed to give a total concentration. The total concentration is plotted against water depth in the tank. Figure 2.8, Figure 2.9 and Figure 2.10 show depth profiles for experiments at 0.5, 1 and 1.5 meter nozzle height respectively. To enable comparison between bubble penetration depth and droplet mixing depth, the penetration depths are indicated as horizontal lines in the figures. The highest concentrations are found mainly within the first meter. Droplets are, however, found all the way down to 5 meters, even for the 200 l/min experiments. Mixing depth does not seem to be limited or correlated to the depth of the bubble cloud. It should be noted that the water level was changed to achieve different treatment heights. This means the recorded maximum depth is different between the 0.5 ,1 and 1.5 meter experiments.

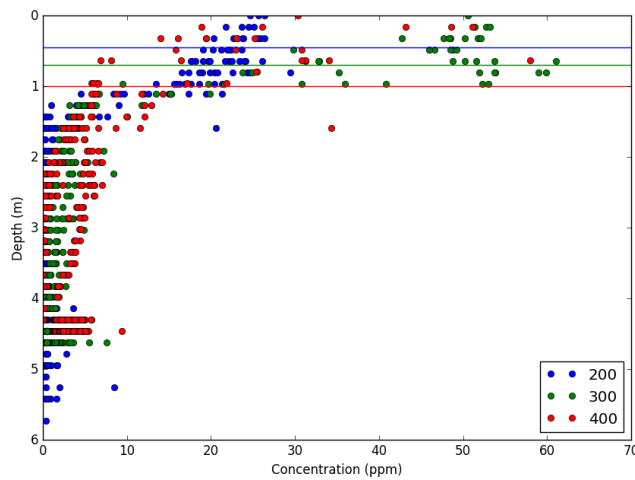


Figure 2.8 Droplet concentration as function of depth in the experiments with 0.5 meter nozzle height above water. The horizontal lines represent the bubble penetration depth.

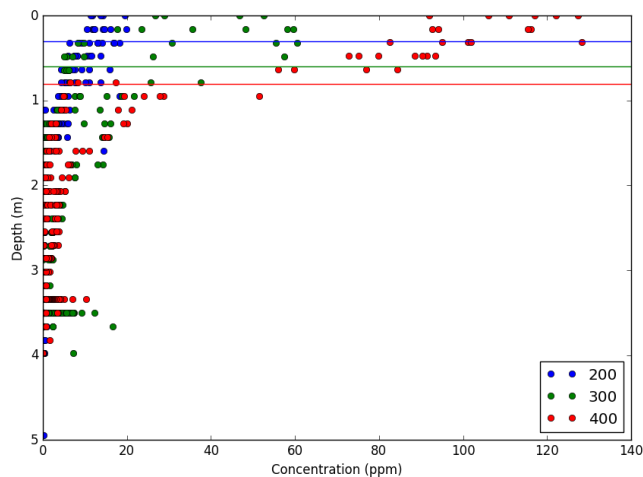
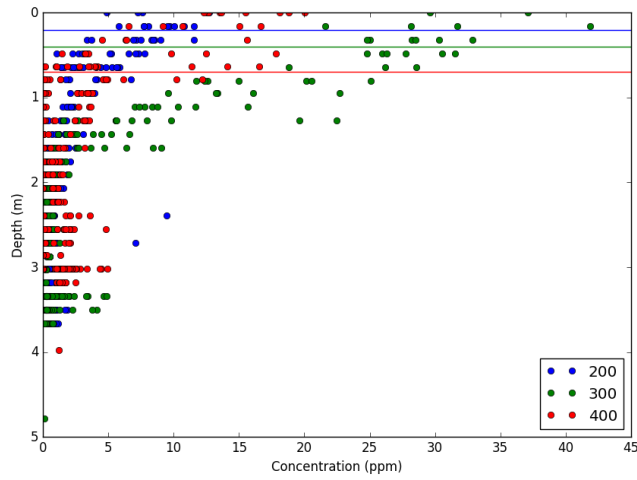


Figure 2.9 Droplet concentration as function of depth in the experiments with 1 meter nozzle height above water. The horizontal lines represent the bubble penetration depth.



*Figure 2.10 Droplet concentration as function of depth in the experiments with 1.5 meter nozzle height above water. The horizontal lines represent the bubble penetration depth.*

## 2.4 Oil remaining on the surface after treatment

Oil remaining on the surface after treatment was quantified by confining the oil and measuring the area and thickness. The methodology is described in chapter 1.4. Results are summarised in Figure 2.11.

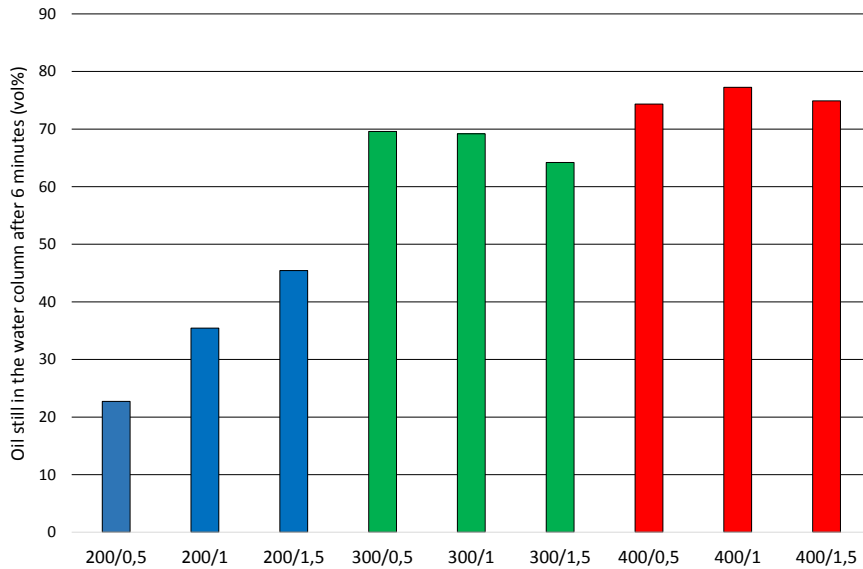


Figure 2.11 Percentage of injected oil still in the water column after experiments (~6 minutes).

Figure 2.1 show the percentage of oil not quantified on the surface (I.e. in still in the water column). This is used as a measure of the effectiveness of the treatment. The figure shows that there are a clear difference between the 200 l/min experiments and the two higher flow rates. The 400 l/min results also appear to be slightly better than the 300 l/min results. The results for 200 l/min flow rate at different nozzle heights may seem counterintuitive, as a larger application height seems to be favourable. The exit velocity is relatively small in the 200 l/min experiment. The continued acceleration of the water after leaving the nozzle due to gravity may be an explanation to the higher efficiency at higher elevation.

## 2.5 Expected effect of weathering on mean droplet size

As oil weather on the sea surface the physical properties of the oil will change due to evaporation and emulsification. Under calm weather conditions emulsification is slow and initial changes of the oil properties is mainly due to evaporative loss. As the oil evaporate the viscosity of the residual oil will increase. All tests described in this project note are performed on a crude oil with a viscosity close to 1 mPas. If the concept of high volume water jetting is going to be operationalised, it is important to know how the efficiency will change with weathering.

In a blowout from a clean cut pipe, a jet of oil is injected into water. The jet entrains the surrounding water which is mixed into the jet. The jet is diluted by the water and droplets are formed in the high turbulent transitional area between pure oil in the centre of the jet and pure water outside. In the experiments described in this project note, oil is injected from outside the water jet. The water jet will also entrain water from outside the jet. If we assume the injected droplets are captured by the entrained water, the droplet break-up should happen in the same kind of turbulence regime as in blowouts.

Previous studies have been done at SINTEF to enable prediction of median oil droplet sizes formed during an underwater blowout (Johansen *et. al.*, 2003 ). In the former SINTEF studies several equations were

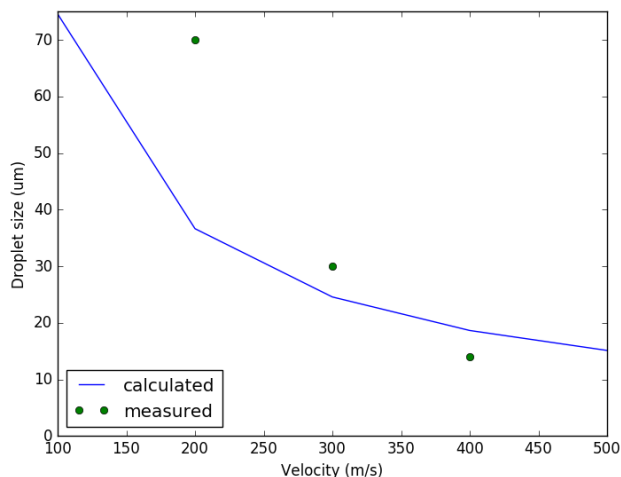


suggested for calculating the  $d_{50}$  (median droplet diameter). A semi-empirical equation described by Wang and Calabrese (1986) has been widely used in this work. The equation accounts for effects of both interfacial tension and viscosity on droplet formation:

$$d_{50}/D = A We^{-3/5} (1 + B Vi (d_{50}/D)^{1/3})^{3/5}$$

where A and B are empirical coefficients and  $Vi$  is the Viscosity number,  $Vi \equiv We/Re = \mu U/\sigma$ . The Weber number  $We = \rho U^2 D/\sigma$ , where  $\rho$  is the density of the oil,  $\sigma$  is the interfacial tension between oil and water (IFT), and  $U$  is the exit velocity. The Reynolds number is  $Re = \rho U D/\mu$ , where  $\mu$  is the dynamic viscosity of the oil.

In the experiments the only parameters varied are application height and flow rate ( $U$  in the equations for Reynolds- and Weber numbers). This study has not documented the relationship between the exit velocity from the nozzle, and velocities transferred into the upper water layer. To be able to use the Wang and Calabrese equation it is assumed  $U$  equals the exit velocity from the nozzle. *Figure 2.12* show calculated droplet sizes as function of release rate. It should be noted that the constants A and B in the equation are empirically derived to fit data from subsea blowouts. As expected the figure does not show a perfect fit between calculated and experimental data. The two datasets are, however, in the same size range, and surprisingly close for the highest release rates.



*Figure 2.12* Calculated droplet sizes used the equation for median droplet sizes from subsea blowouts, compared with recorded droplet sizes from the experiments.

The SINTEF Oil Weathering Model (OWM) (Johansen,1991) has been used to predict the changes of evaporation, density and viscosity of the Åsgard blend crude with time on the sea surface. Predictions were done using a terminal thickness of the spreading slick of 0.2 mm. The release conditions were set to 10 m<sup>3</sup> in 6 minutes. This is the release conditions during the Åsgard releases in the 2016 NOFO Oil on Water Field trials. The predicted density and viscosity from the OWM was used as input to the equation for calculation of droplet sizes. Viscosities for a shear rate of 1000 s<sup>-1</sup> was used as input to the model to account for the expected high shear inside the jet. The predicted viscosity and median droplet sizes are shown in Figure 2.13.

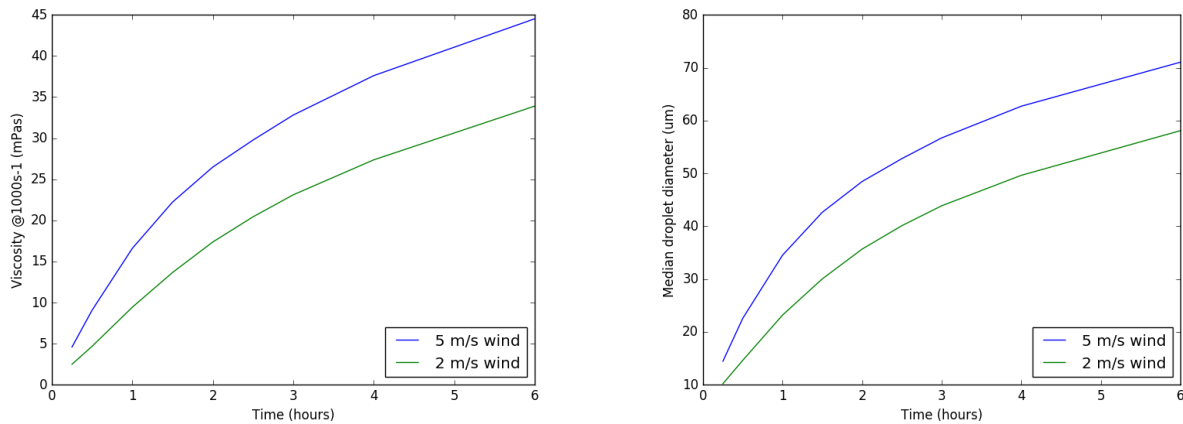


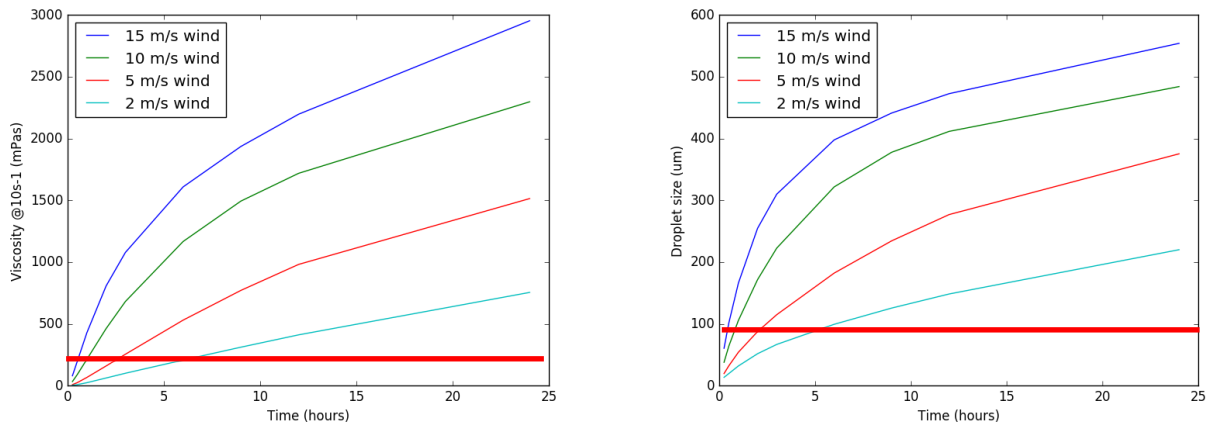
Figure 2.13 Left: Predicted viscosity (based on shear rate  $1000s^{-1}$ ) for non-emulsifying Åsgard blend with time on the sea surface using the SINTEF OWM. Right: Calculated median droplet diameter based on predicted viscosity and density.

There are assumptions made when adopting the equation for droplet diameter developed to work for subsurface blowouts. The calculated droplet sizes should therefore be considered purely indicative to the development of droplet diameter with weathering time.

The figure 2.13 (right) show that especially for the scenario with 2 m/s wind speed, droplet sizes remain small even after several hours of weathering on the sea surface. The scenario with 5 m/s wind speed has a faster increase in the calculated droplet size, but still has a time window of 2 hours with an expected droplet size below 50 µm.

In general, breaking waves start to occur at 5 m/s wind speed and a thin oil slick will start to naturally disperse into the water column. At this point water jetting of surface oil is no longer relevant.

In experiment 3.3 during the 2016 "NOFO oil on water field trial" the Åsgard Blend crude was weathered for 3-4 hours under breaking wave conditions (6-7 m/s wind) before treated with water jetting (flushing) using the firefighting monitors (Daling et al. 2017) . In general, for weathered surface oil / emulsions, the viscosity is most commonly reported at a shear rate  $10s^{-1}$ . In the experiment 3.3 the measured viscosity was 330 mPas (at shear rate  $10s^{-1}$ ) just prior the Fi-Fi water flushing, and that gave volume median diameter (vmd) oil droplets around 100 – 120 µm. In Figure 2.14 (right), the calculations of d50 (vmd) have been done over a longer weathering time frame to get indicative data on the effect of treatment with the high capacity flushing during the field trial. It should be noted that this introduce treatment of emulsified oil and at higher viscosities than the equation is validated for.



*Figure 2.14 Left: Predicted viscosity (based on shear rate  $10s^{-1}$ ) for the Åsgard blend with time on the sea surface using the SINTEF OWM. Right: Calculated median droplet diameter based on predicted viscosity and density.*

In Figure 2.14 (left), the predicted viscosity of emulsified oil are calculated for shear rate  $10s^{-1}$ . The figure shows that in order to generate median oil droplets ( $d_{50}$ ) below 70 – 100  $\mu m$ , this indicated that the viscosity have to be below 150 – 250 mPa.s (at shear  $10s^{-1}$ ). This indicate an effective "time window" of < 5-6 hours at 2 m/s wind and 2-3 hours for 5 m/s wind.

Figure 2.14 also demonstrate the very limited time window for use of water jetting at higher wind speeds. Natural dispersion of the surface oil at high wind speeds will also make treatment redundant.

### 3 Conclusions

The goal of this activity in the project has been to investigate whether treatment of thin oil slicks from a light crude oil with high volume water jets is feasible in a full scale systems. In this project note only a series of experiments in the SINTEF tower basin is described. These experiments were designed to study the potential for breaking oil into  $<70 - 100 \mu\text{m}$  droplets using a high capacity water jet. The flow rate through the treatment nozzle and the nozzle height above the water surface were used as variables in this study. The oil were sprayed into the water jet under the surface with an initial median droplet size of  $360 \mu\text{m}$ . The droplet size distribution of the oil formed after treatment with the water jet was measured. The amount of surface oil in the tank after the treatment were also quantified.

The concept appear to have a good potential for droplet breakup as long as flow rates are sufficient high.. Total oil injected minus quantified surface oil give oil still in the water column after ended experiment. The percentage of oil in the water is used as a measure of the treatment effectiveness. At flow rates of 300 l/min droplets formed had a median diameter of  $30 \mu\text{m}$  and approximately effectiveness was 70%. At flow rates of 400 l/min droplets formed had a median diameter of  $14 \mu\text{m}$  effectiveness was 75%. Treatment with a flow rate of 200 l/min gave larger than desired droplets ( $70 \mu\text{m}$ ), and 23-46% effectiveness.

Given sufficient flow rate, the droplet break-up and treatment efficiency were not affected much by altering the application height. Testing were done at 0.5, 1.0 and 1.5 meter nozzle height above the surface. A low treatment height is however thought to be important to the robustness of the concept. The volume of water per meter width treated will decrease with increased height. Effect of wind will also increase with height. It is recommended the operative treatment height should be kept between 1 and 1.5 meter.

All experiments have been done with injection of a fresh Åsgard blend. An increase in droplet size and decrease of treatment effectiveness should be expected with weathering on the sea surface. This has not been studied experimentally. The development of droplet size as function of weathering has, however been estimated using equations verified for sub surface oil blowouts. The calculations indicate droplet sizes below  $50 \mu\text{m}$  4-5 hours after the release at 2 m/s wind speed. These calculations have not been empirically verified for injection of oil into a water jet and should only be considered indicative for the expected development in median droplet size.

In this study oil is injected into the water jet from a distance of  $\sim 10 \text{ cm}$ , and at 10 cm depth below the surface. The transport of oil from the surface and into an advancing water jet has only been visually studied in former projects, and only using tracer particles (polyethylene spheres). How droplet breakup on the surface and transport into the jet may influence treatment efficiency or droplet sizes has not been studied in this project.

## 4 References

Daling, P.S., Lewis, A., Sørheim, K.R., 2017: Full-scale field testing of thin oil films from releases of light crude oil at sea. Draft SINTEF report

Johansen, Ø. 1991. Numerical modelling of physical properties of weathered North Sea crude oils. DIWO report no. 15. IKU-report 02.0786.00/15/91. Open.

Johansen, Ø., Brandvik, P.J, Farooq, U., 2013. Droplet Breakup in subsea oil releases- Part 2 Predictions of droplet size distributions with and without injection of chemical dispersants. Marine Pollution bulletin 73 (2013) 327-335

Wang, C.Y., Calabrese, R.V., 1986. Drop breakup in turbulent stirred-tank reactors. Part II: relative influence of viscosity and interfacial tension. AIChE J. 667-676



Technology for a better society

[www.sintef.no](http://www.sintef.no)