

# Rapport

## Olje på vann 2018: Analyse av residue, sot og røykgasser fra in situ brenning.

Revidert utgave

**Forfatter(e)**

Liv-Guri Faksness

Daniel Krause



SINTEF Ocean AS

Postadresse:  
Postboks 4762 Torgarden  
7465 Trondheim  
Sentralbord: 46415000Foretaksregister:  
NO 937 357 370 MVA

# Rapport

## Olje på vann 2018: Analyse av residue, sot og røykgasser fra in situ brenning.

### Revidert utgave

RAPPORTNR	PROSJEKTNR	VERSJON	DATO
OC2018 A-096	302003820	Revidert	2018-11-05

#### FORFATTER(E)

Liv-Guri Faksness  
Daniel Krause

#### OPPDRAGSGIVER(E)

Kystverket og NOFO

#### OPPDRAGSGIVERS REF.

Jan Willie Holbu og Hans Jensen

#### ANTALL SIDER:

43

#### GRADERING

Åpen

#### GRADERING DENNE SIDE

Åpen

#### ISBN

978-82-7174-342-0

#### SAMMENDRAG

Under årets Olje-på-vann øvelse (OPV) ble det planlagte programmet for in situ brenning redusert fra 6 til to forsøk på grunn av for mye vind. De to brenneforsøkene ble gjennomført den 13. juni, 2018, på Frigg-feltet i Nordsjøen, med hhv Oseberg 200 °C+ og ULSFO.

SINTEF, i samarbeid med Maritime Robotics og Universitetet i Bergen, gjennomførte en omfattende monitorering under forsøkene som inkluderte karakterisering brenne-residuene, og av røykgasser og sotpartikler fra droner og på sjøoverflaten. Univ. i Bergen målte potensialet for yrkeshygenisk eksponering av personell, men disse resultatene rapporteres ikke her.

De initielle resultatene fra røykgassmålingene indikerer at det produseres lave konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> (< 1.2 ppm) og NO<sub>x</sub> (< 2.1 ppm) under brenningen av begge oljene. De høyeste CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene som ble målt lå mellom 200 og 400 ppm (over antatt bakgrunnsnivå) og maksimalt CO-nivå ble målt til 12-14 ppm. Målingene fra dronene viste at røyken ble dominert (>90%) av partikler mindre enn 2.5 µM (PM<sub>2.5</sub>).

Brenneeffektiviteten ble forsøkt estimert på flere måter. Som en foreløpig antagelse kan man estimere en BE for Oseberg mellom 54 og 80% og en BE for ULSFO på mer enn 57%. Det er imidlertid stor usikkerhet i disse dataene pr. i dag. Black Carbon (BC) basert på mengde karbon og PM<sub>2.5</sub> i røyken ble estimert til 10% for Oseberg og 11% for ULSFO ut fra olje brent.



#### UTARBEIDET AV

Liv-Guri Faksness

*L.G. Faksness*

#### KONTROLLERT AV

Per S. Daling

*Per S. Daling*

#### GODKJENT AV

Mimmi Throne-Holst

*Mimmi Throne-Holst*

# Innholdsfortegnelse

<b>1</b>	<b>Innledning</b> .....	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>Materialer og metoder</b> .....	<b>4</b>
2.1	Innsamlede data og prøvemateriale .....	4
2.2	Prosessering av prøver .....	6
2.2.1	Filterprøver .....	6
2.2.2	Oljeprøver .....	6
2.3	Fysikalske analyser .....	7
<b>3</b>	<b>Resultater</b> .....	<b>8</b>
3.1	Temperatur og heat-flux .....	10
3.2	Gassmålinger i røyken .....	11
3.3	Partikulært materiale i røyken .....	12
3.4	Partikulært materiale nær sjøoverflate .....	14
3.5	Sotfilter .....	15
3.6	Beregning av Black Carbon .....	16
3.7	Oljeprøver og residue .....	17
3.7.1	Fysisk karakterisering av utgangsoljer og brenne-residue .....	17
3.7.2	Kjemiske analyser av residue .....	18
3.7.3	Kjemisk analyse av overflateprøver fra sjø .....	21
3.8	Estimering av brenneeffektivitet .....	22
3.8.1	Basert på oppsamlet mengde residue .....	22
3.8.2	GC-analyse av residue .....	22
3.8.3	Gassmålinger og heat-flux .....	23
<b>4</b>	<b>Oppsummering</b> .....	<b>24</b>
<b>5</b>	<b>Referanser</b> .....	<b>25</b>
<b>A</b>	<b>Vedlegg A GC kromatogram av residue</b> .....	<b>26</b>
<b>B</b>	<b>Vedlegg B Kjemisk sammensetning av sot residue og sotprøver</b> .....	<b>29</b>
<b>C</b>	<b>Vedlegg C Oversikt over komponenter analysert i sot og residue</b> .....	<b>41</b>
<b>D</b>	<b>Vedlegg D Carbon Partitioning Calculations</b> .....	<b>42</b>
D.1	Estimating Black carbon .....	42
D.2	Estimating amount burned oil .....	43
D.3	Beregningsmetode brenneeffektivitet .....	43

## 1 Innledning

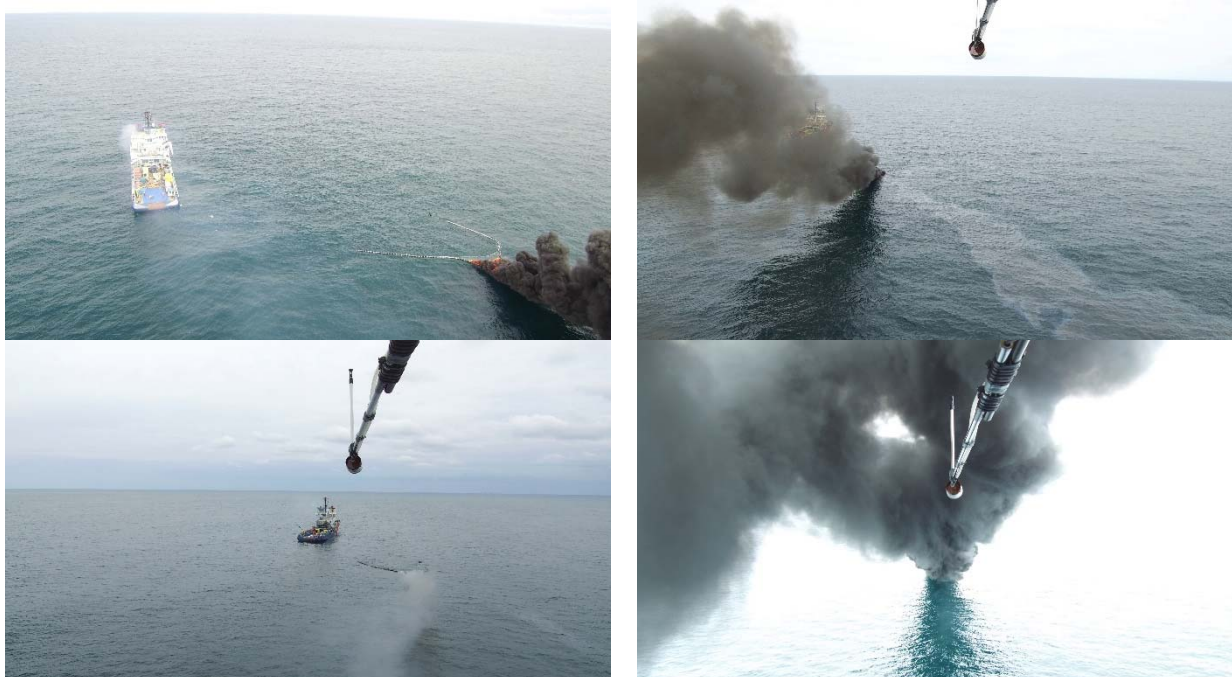
Under årets Olje-på-vann øvelse (OPV) ble det planlagte programmet for in situ brenning (ISB) redusert fra 6 til to forsøk på grunn av for mye vind. De to brenneforsøkene ble gjennomført den 13. juni, 2018, på Friggfeltet i Nordsjøen, med hhv Oseberg 200 °C+ og ULSFO. Forholdene under de to forsøkene er kort oppsummert i Tabell 1.1. Informasjonen er hentet fra NOFO's loggskjema (NOFO, 2018) og mer detaljer er gitt der. Det var et kort tidsrom med rolige vindforhold til gjennomføring av brenneforsøkene, og spesielt andre ISB med ULSFO fikk begrenset tid for gjennomføringen.

Tabell 1.1 Oppsummering av brenneforsøkene. Vind og bølgehøyde fra M/S "Strilborg".

Olje	Utslippsvolum	Antent kl	Slukket kl	Kommentar
Oseberg 200+	6 m <sup>3</sup>	10:22	11:05	Vind målt ved antenne var 6.8 m/s, men den løyet i løpet av brannen. Signifikant bølgehøyde 1.1 m. Sjøtemperatur 10.6 °C (fra MOB-båt)
ULSFO	5.8 m <sup>3</sup>	18:12	19:00	Vind målt ved antenne var 4,3 m/s og 6,7 m/s da brannen slukket. Signifikant bølgehøyde 1.2 m. Sjøtemperatur 10.7 °C (fra MOB-båt)

SINTEF, i samarbeid med Maritime Robotics og Universitetet i Bergen, gjennomførte en omfattende monitorering under forsøkene som inkluderte karakterisering brenne-residuene, og av røygasser og sotpartikler fra droner og på sjøoverflaten. Universitetet i Bergen målte potensialet for yrkeshygenisk eksponering av personell, men disse resultatene rapporteres ikke her.

Bilder fra video tatt fra drone 1 under brenneforsøkene er vist i Figur 1.1.



Figur 1.1 Bilder fra video fra drone 1: De to øverste bildene er fra ISB av Oseberg, mens de to nederste fra ISB av ULSFO.

## 2 Materialer og metoder

### 2.1 Innsamlede data og prøvemateriale

En oversikt over de innsamlede dataene fra droner og MOB-båter er gitt i Tabell 2.1. Drone 1 ble operert fra M/S "Strilborg" og drone 2 fra O/V "Utvær". De yrkeshygeniske målingene ved Universitetet i Bergen ble gjennomført fra MOB-B ("mann-over-bord-båt") og MOB-S ble brukt av SINTEF til innsamling av øvrige data.

Tabell 2.1 Oversikt over data samlet inn fra droner og MOB-båter

Parameter	Drone 1	Drone 2	MOB-S	MOB-B
Partikkelstørrelse				
PM 1, 2.5, 4, 10 og total	X		X	X
PM 2.5		X		
Sot på filter (til bla PAH)	X	X		
NO <sub>x</sub>	X			
SO <sub>2</sub>	X			
CO	X			
CO <sub>2</sub>	X			
GPS	X	X	X	X
Video	X	X	X	
Vind	X	X		
Temperatur	X	X		
Heat flux			X	
Sot på sjø (PAH)			X	
TVOC/BTEX				X
Filter/kullrør (PAH)				X
Residue			X	

Figur 2.1 viser Drone 1 like før avgang fra "Strilborg", og i Figur 2.2 har Pyrodronen akkurat droppet ignitorboksen i oljeflaket.



Figur 2.1 Drone 1 klar til avgang med monitoreringsutstyr for bl.a. partikkelstørrelse og røykgasser.

En liste over prøvene som ble tatt av SINTEF under OPV er gitt i Tabell 2.2. Det ble tappet oljeprøver da utpumping til sjø startet, men man var usikre på om de var representative for utslippet, slik at prøvene av ULSFO og Oseberg 200°C+ mottatt i forkant av øvelsen ble analysert sammen med residuene.

Tabell 2.2 Oversikt over oljeprøver, residue, sotfilter og overflateprøver (pad).

SINTEF ID	Olje	Prøve	Prøvebeskrivelse
2018-4052	Oseberg 200+	Oljeprøve	Mottatt i forkant av OPV
2018-5303	Oseberg 200+	Oljeprøve	Tatt under utpumping til sjø
2018-5303-S1	Oseberg 200+	ISB residue	Tatt på sjø i lense
2018-5303-S2	Oseberg 200+	ISB residue	Skrapet av flere kuler etter at lensa var tatt på dekk
2018-5303-S3	Oseberg 200+	ISB residue	Skrapet av en kule etter at lensa var tatt på dekk
2018-5303-S8	Oseberg 200+	ISB residue	Fra nett i container (fra NOFO, ca 5 L)
2018-3881	ULSFO	Oljeprøve	Mottatt i forkant av OPV
2018-5304	ULSFO	Oljeprøve	Tatt under utpumping til sjø
2018-5304-S1+S2	ULSFO	ISB residue	Tatt på sjø i lense, "tynn prøve"
2018-5304-S3	ULSFO	ISB residue	Tatt på sjø bak lensa
2018-5304-S4	ULSFO	ISB residue	Tatt på sjø i lense, klumper
2018-5304-S5	ULSFO	ISB residue	Samlet opp fra sjø av Utvær (200 mL)
2018-5304-S6+S7	ULSFO	ISB residue	Fra lense etter at den var tatt på dekk
2018-5304-S8	ULSFO	ISB residue	Fra skjørt på lense etter at den var på dekk
2018-5304-S11-S13	ULSFO	ISB residue	Samlet opp fra sjø av "Utvær" (fra KyV, 3 x 1L)
2018-3941	Oseberg 200+	Sotfilter # 1	Drone 1: Opened 10:26, closed 11:02
2018-3965	Oseberg 200+	Sotfilter # 25	Drone 2: Start 10:24, end 10:35
2018-3954	Oseberg 200+	Sotfilter # 14	Drone 2: Start 10:49, end 11:00
2018-3942	ULSFO	Sotfilter # 2	Drone 1: Opened 18:17, closed 19:01
2018-3955	ULSFO	Sotfilter # 15	Drone 2: Start 18:16, end 18:27
2018-3956	ULSFO	Sotfilter # 16	Drone 2: Start 18:38, end 18:49
2018-3943	Bakgrunn	Sotfilter # 3	Not opened or exposed (Strilborg)
2018-3964	Bakgrunn	Sotfilter # 24	Not opened or exposed (Utvær)
2018-5303-S4	Oseberg 200+	Pad sjø	Fra MOB-S, kl. 10:44:40 (Pos. 59,99105; 2,405413)
2018-5303-S5	Oseberg 200+	Pad sjø	Fra MOB-S, kl. 10:53:20 (Pos. 59,98791; 2,414697)
2018-5303-S6	Oseberg 200+	Pad sjø	Fra MOB-S, kl. 11:07:45 (Pos. 59,98242; 2,443395)
2018-5303-S7	Oseberg 200+	Pad sjø	Fra MOB-S, kl. 11:01:58 (Pos. 59,98465; 2,427298)
2018-5304-S9	ULSFO	Pad sjø	Fra MOB-S, kl. 18:53:40 (Pos. 59,99305; 2,366919)
2018-5304-S10	ULSFO	Pad sjø	Fra MOB-S, kl. 18:58:00 (Pos. 59,98914; 2,361192)



Figur 2.2 Umiddelbart etter at Pyrodrone har droppet ignitor-boksen på oljeflaket (Oseberg).

## 2.2 Prosessering av prøver

En oversikt over de analyserte prøvene og analyseparameterne er gitt i Tabell 2.3. Valg av prøver til analyse ble basert på innledende analyser av residue på GC/FID.

Tabell 2.3 Oversikt over analyserte prøver og analyseparametre.

SINTEF ID	Olje	Prøvebeskrivelse	GC/FID	GC/MS	Tetthet	Viskositet	Vanninnhold
2018-4052	Oseberg	Mottatt i forkant av OPV	x	x	x	x	
2018-5303-S1	Oseberg	Tatt på sjø i lense	x	x	x	x	x
2018-5303-S2	Oseberg	Skrapet av flere kuler	x	x	x	x	
2018-5303-S8	Oseberg	Fra nett i container (fra NOFO)	x	x	x	x	
2018-3881	ULSFO	Mottatt i forkant av OPV	x	x	x	x	
2018-5304-S1	ULSFO	Tatt på sjø i lense, "tynn prøve"	x	x	x	x	x
2018-5304-S3	ULSFO	Tatt på sjø i lensa, klumper	x				
2018-5304-S4	ULSFO	Tatt på sjø bak lensa, klumper	x	x	x	x	
2018-5304-S6	ULSFO	Fra lense etter at den var tatt på dekk	x	x	x	x	
2018-5304-S8	ULSFO	Fra skjørt på lense etter at den var på dekk	x				
2018-5304-S11	ULSFO	Samlet opp fra sjø av "Utvær" (fra KyV)	x	x	x	x	
2018-3941	Oseberg	Filter: Drone 1: Kl 10:26 til 11:02		x			
2018-3942	ULSFO	Filter: Drone 1: Kl. 18:17 til 19:01		x			
2018-3943	Bakgrunn	Filter: Not opened or exposed (Strilborg)		x			
2018-5303-S4	Oseberg	Pad med sot på sjø, MOB-S, kl. 10:44		x			
2018-5303-S5	Oseberg	Pad med sot på sjø, MOB-S, kl. 10:53		x			
2018-5303-S6	Oseberg	Pad med sot på sjø, MOB-S, kl. 11:07		x			
2018-5303-S7	Oseberg	Pad med sot på sjø, MOB-S, kl.11:01		x			
2018-5304-S9	ULSFO	Pad med sot på sjø, MOB-S, kl. 18:53		x			
2018-5304-S10	ULSFO	Pad med sot på sjø, fra MOB-S, kl. 18:58		x			

### 2.2.1 Filterprøver

For oppkonsentrering av sot under brenningen, ble filterkassetter (Cat. No. 225-1713) med PTFE filter (37 mm, 2.0 µm) koblet på en pumpe med en flow på 2 L/min. Både Drone 1 og Drone 2 hadde samme oppsett. Filtrene ble veid før og etter forsøkene for å bestemme sot produsert under ISB.

Etter veiing av filter med sot, ble filteret overført til et glassrør (20 mL) med teflontopp. Diklormetan (DCM, 10 mL) og internstandarder for kvantifisering av totale hydrokarboner (THC) og PAH ble tilsatt for en eventuell senere analyse på GC/FID (THC) og gasskromatograf med massespekter (GC/MS, PAH). For å ekstrahere ut sotpartiklene fra filteret ble røret rystet kraftig (Vortex i 10 sekunder) etterfulgt av ultralydbad i 30 minutter. Løsningsmiddelet ble dekantert over i et 40 mL glassrør, og ekstraksjon av filteret ble gjentatt to ganger med hhv 10 og 5 mL DCM, Vortex i 10 sekunder og ultralyd i 15 minutter. Løsningen ble filtrert over et GF/C filter for å fjerne partikler og oppkonsentrert til ca 1 mL.

### 2.2.2 Oljeprøver

Oljeprøvene (70-90 mg) ble veid inn og fortynnet til 10 mL med diklormetan (DCM). Ekstraktet (800 µL) ble overført til et GC-glass og tilsatt interne standarder for en eventuell senere kvantifisering av totale hydrokarboner og PAH. En såkalt screening-analyse av ekstraktene ble gjort på GC/FID (gasskromatograf med flammeionisasjons-detektor) for å få en indikasjon på mulige forskjeller i brenneeffektiviteten på de

ulike residuene. Videre ble utvalgte prøver analysert på GC/MS (gaskromatograf med massespektrometer) for kvantifisering av semi-volatile komponenter (SVOC), inkludert PAH. Noen av de innsamlede residueprøvene er vist i Figur 2.3.



Figur 2.3 Residue fra ISB av Oseberg til venstre og fra ULSFO til høyre. De to nederste bildene er residue mottatt fra NOFO (ca 5L Oseberg) og Kystverket (3 x 1L)

## 2.3 Fysikalske analyser

Viskositet og tetthet ble målt i utgangsoljen og ISB-residuene. Det ble gjort et temperatur-sweep for viskositeten fra ca 80 til -3 °C (1 grad/minutt) ved skjær 10/s.

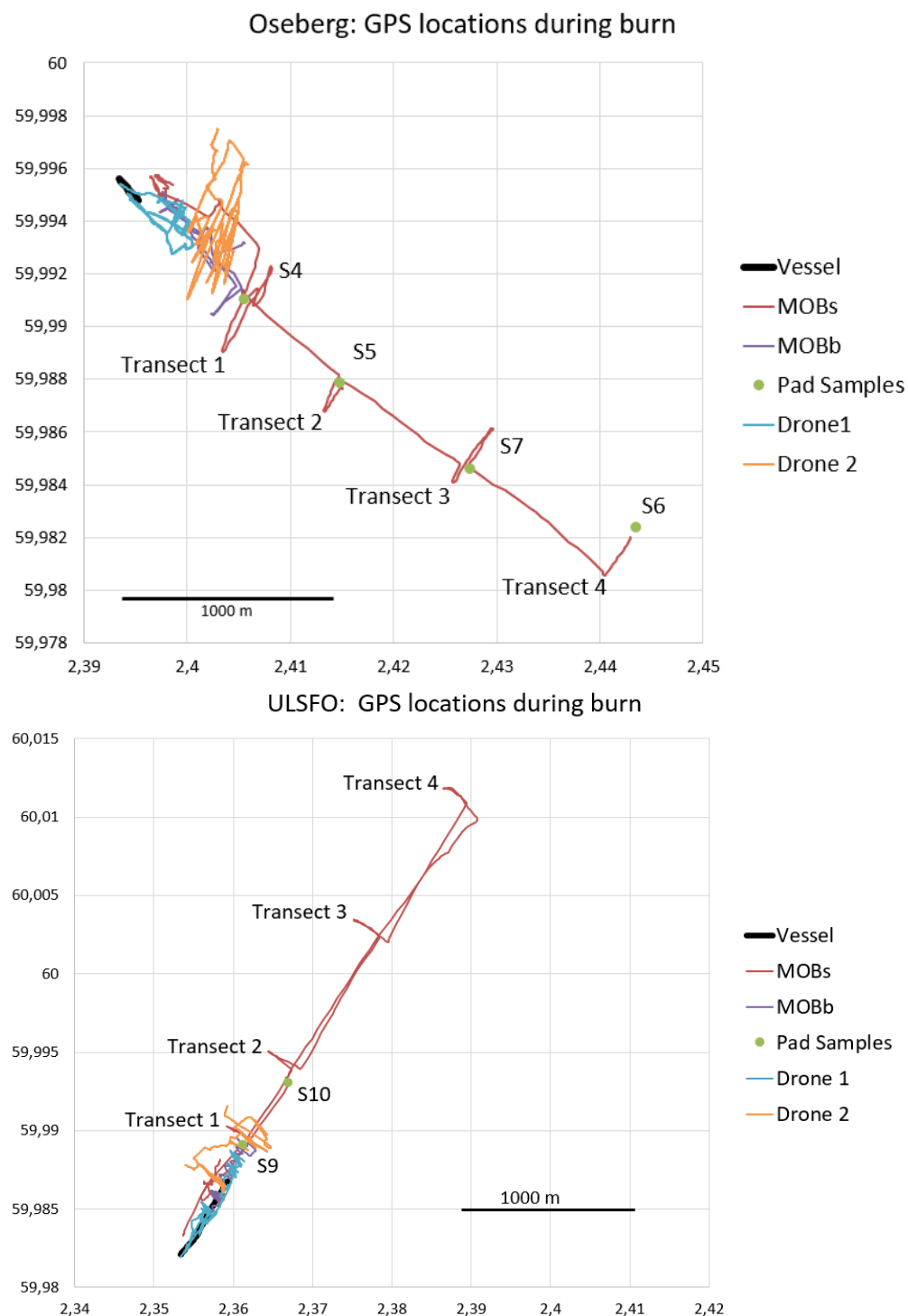
På grunn av residuenes høye viskositet, ble tettheten målt ved 80 °C og deretter omregnet til 15 °C.

Vanninnholdet ble først målt ved bruk av Karl-Fisher-titrator, men det så ut som at oljen ikke løste seg helt. Vannet ble derfor forsøkt utfelt ved tilsetning av emulsjonsbryter (Alcopol) og oppvarming til 50 °C.



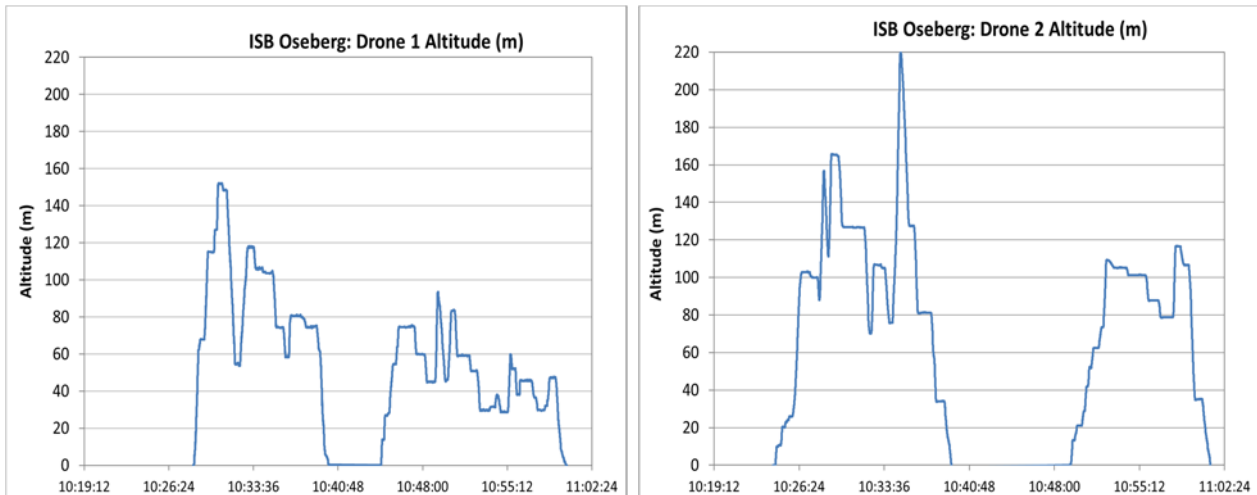
### 3 Resultater

Alle fartøyer, samt dronene, var utstyrt med GPS. Skisser over de ulike enhetenes posisjoner under hhv ISB 1 (Oseberg) og ISB 2 (ULSFO) er vist i Figur 3.1.

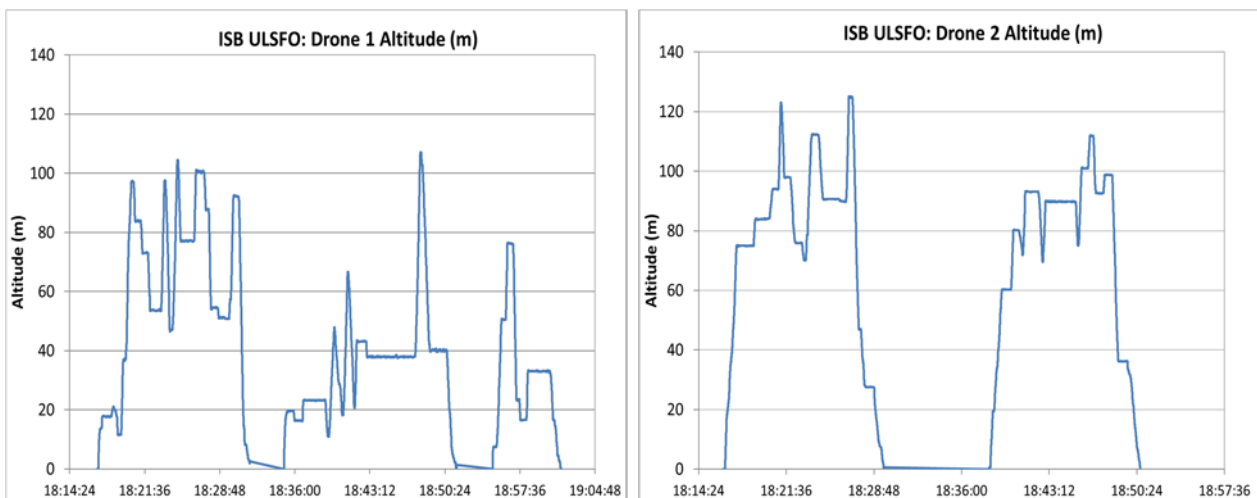


**Figur 3.1** Skisse over de ulike enhetenes posisjoner under ISB av Oseberg (brant fra kl 10:22 til 11:05) og ULSFO (brant fra kl. 18:12 til 19:00). X og y-akse angir hhv lengde- og breddegrad. Lokasjon og ID for prøvetakning av overflateprøver på sjø er markert (pad samples). Transect 1 er nærmest brannen og transect 4 lengst unna (MOB-S krysset på tvers under røykplumen fire ganger i løpet av måleperioden).

Figur 3.2 og Figur 3.3 viser flyhøyden for de to dronene under brenningen. Figurene viser at drone 2, som monitorerte fra ca 400 til 800 m fra brannen, fløy litt høyere enn drone 1 som monitorerte i nærheten (til ca 400 m).



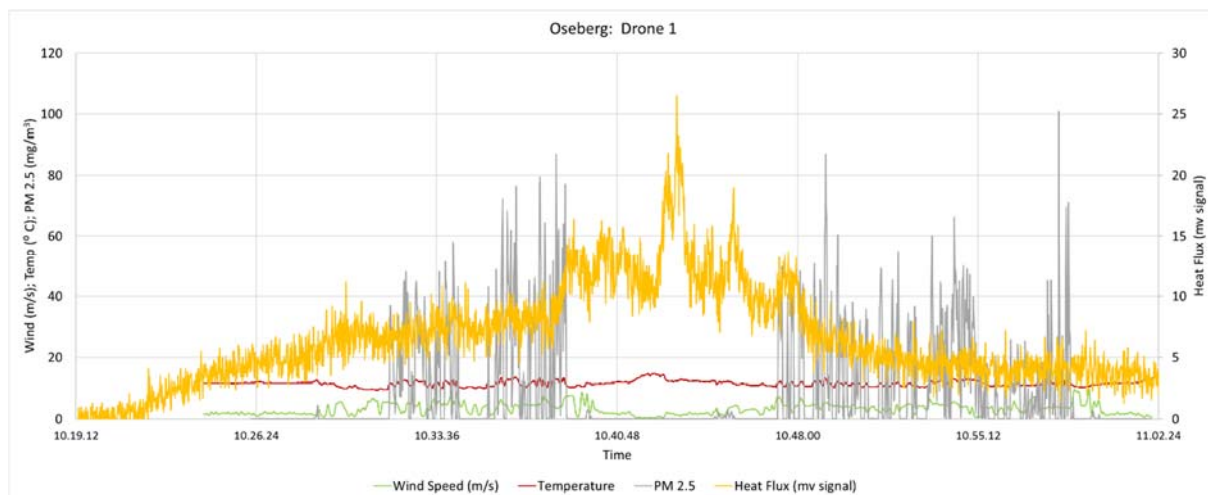
Figur 3.2 Flyhøyde for drone 1 (venstre) og drone 2 (høyre) under måling i røyk-plumen under ISB av Oseberg (10:22-11:05). Avgang og landing indikeres når høyden er 0 m.



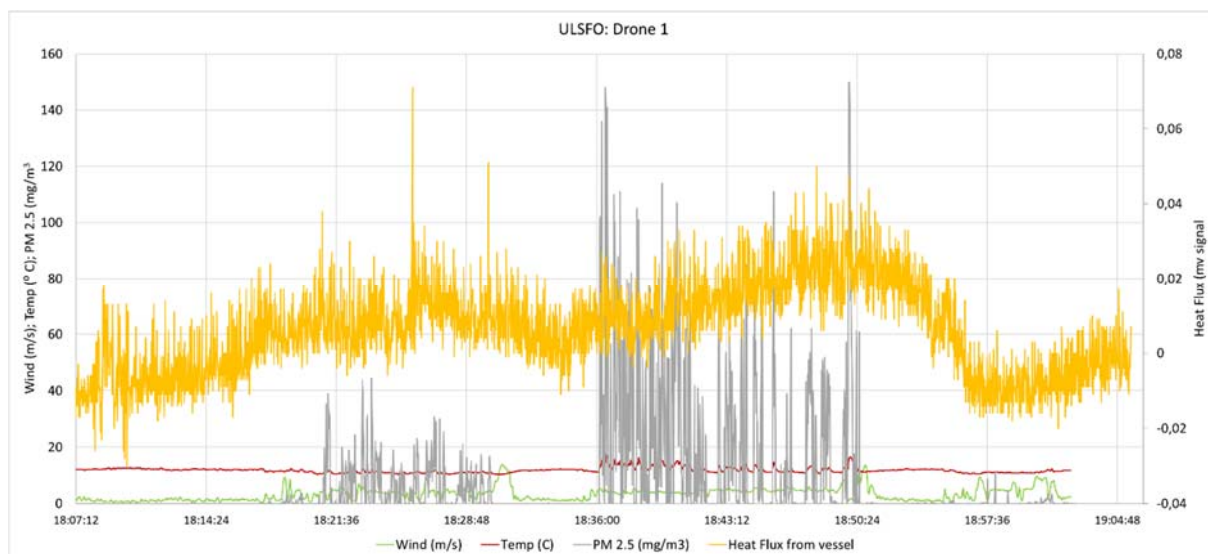
Figur 3.3 Flyhøyde for drone 1 (venstre) og drone 2 (høyre) under måling i røyk-plumen under ISB av ULSFO (18:12-19:00). Avgang og landing indikeres når høyden er 0 m.

### 3.1 Temperatur og heat-flux

Dronene hadde sensorer for bl.a. vind og temperatur, og de monitorerte dataene fra drone 1 under begge ISB er vist i Figur 3.4 og Figur 3.5. I tillegg er heat flux-målingene tatt med. Måler for heat-flux var plassert på akter styrbord på "Strilborg".



Figur 3.4 Vind, temperatur og PM 2.5 fra drone 1, samt heat flux fra sensor på "Strilborg", registrert under ISB av Oseberg.



Figur 3.5 Vind, temperatur og PM 2.5 fra drone 1, samt heat flux fra sensor på "Strilborg", registrert under ISB av ULSFO.

### 3.2 Gassmålinger i røyken

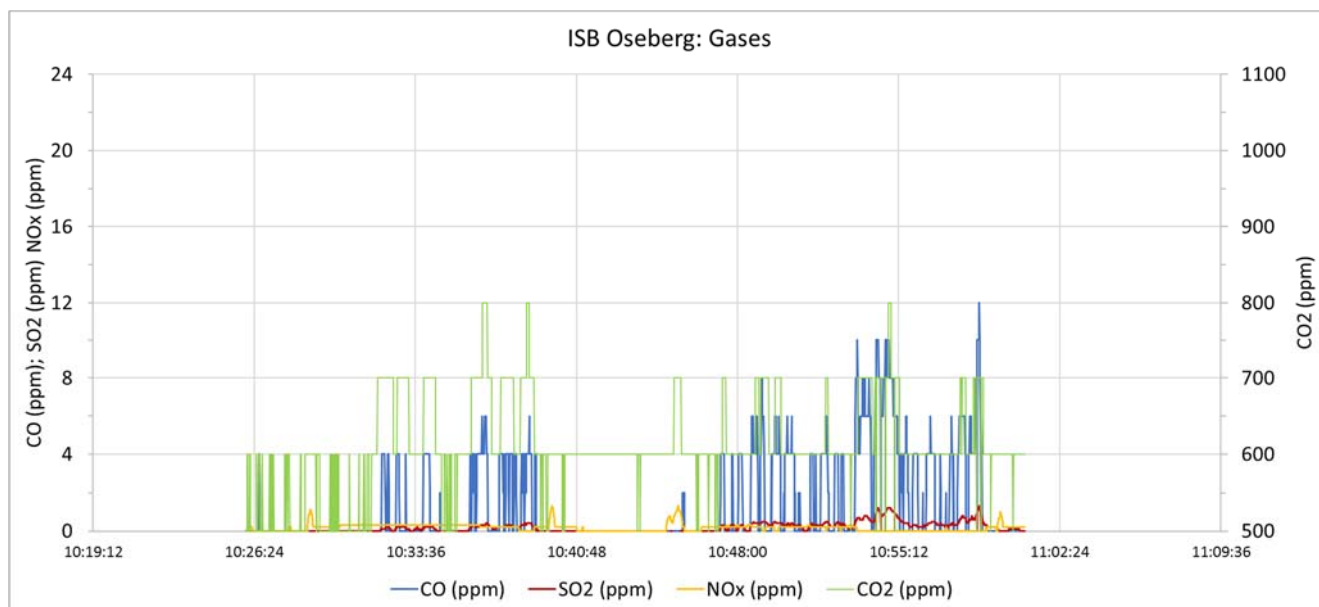
Som vist i Tabell 2.1, drone 1 var utstyr med gass-målere for CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> og SO<sub>2</sub>. Gassmålingene under ISB er vist i Figur 3.6 (Oseberg) og Figur 3.7 (ULFSO), og illustrerer variasjonen i gasskonsentrasjonene avhengig av hvor i røykplumen dronen befant seg.

Målingene fra begge ISB indikerer at konsentrasjonsnivåene av NO<sub>x</sub> og SO<sub>2</sub> var lave, dvs lavere enn 2.1 ppm for NO<sub>x</sub> og lavere enn 1.2 ppm for SO<sub>2</sub>.

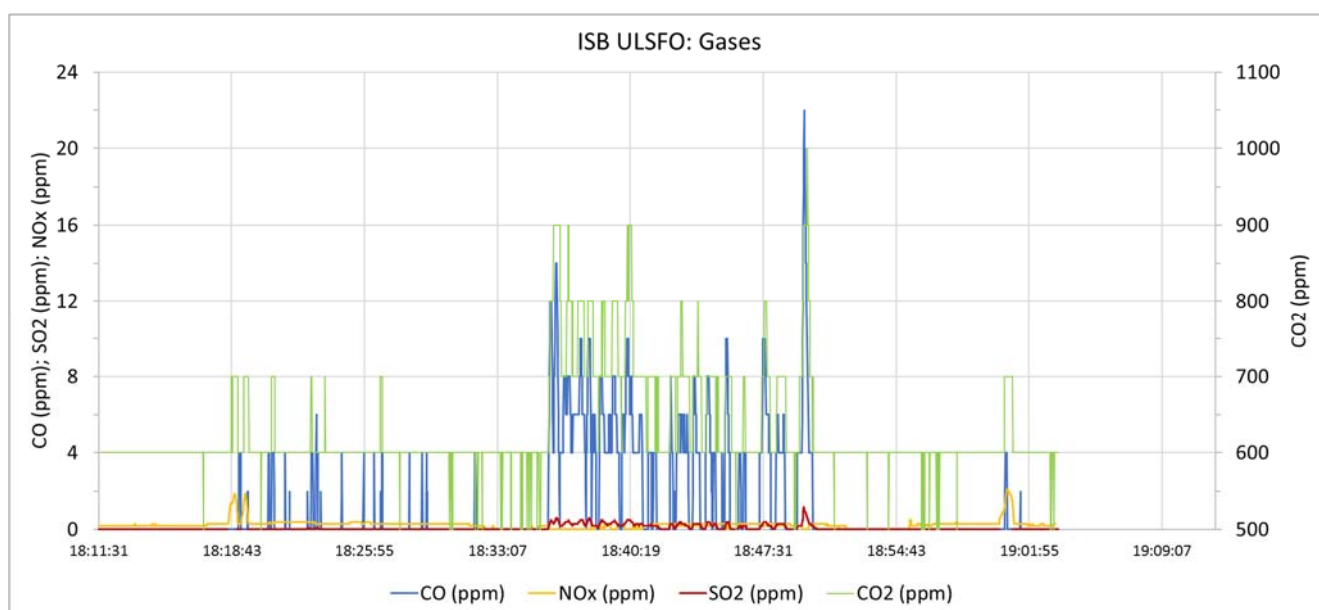
Bakgrunnsnivået for CO<sub>2</sub>-sensoren var 523 ppm, dvs litt høyere enn i lufta (ca 400 ppm). Under ISB av Oseberg ble maksimalt målt CO<sub>2</sub>-nivå 800 ppm (dvs ca 280 ppm over bakgrunn), mens høyeste CO-konsentrasjon ble målt til 12 ppm mot slutten av brannen. Økende CO-konsentrasjon indikerer dårligere forbrenningseffektivitet. Maksimalt CO<sub>2</sub>-nivå under ISB av ULFSO var 900 ppm (dvs ca 380 ppm over sensorens bakgrunnsnivå), bortsett fra en "spike" på 1000 ppm, som kan ha sammenheng med at dronen returnerte til "Strilborg" for batteribytte. I denne "spiken" ble også maksimalt CO-nivå målt til 22 ppm, ellers var høyeste CO-konsentrasjon 14 ppm.

NO<sub>x</sub>-konsentrasjonen er på samme nivå som målt under små-skala laboratorieforsøk i konkalorimeter (Faksness et al., 2018), mens man målte høyere SO<sub>2</sub>-konsentrasjon i laboratorieforskene enn i felt ( $9 \pm 3$  ppm), riktignok med en annen ULFSO-batch. Også målt CO-konsentrasjonen i lab-forskene var høyere ( $86 \pm 29$  ppm). Høyere CO-konsentrasjon er som forventet, da ISB i liten skala (ca 100 mL olje, 1 cm filmtykkelse) i lab forventes å ha dårligere brenneeffektivitet. En medvirkende årsak til de høyere konsentrasjonene kan også være resultatene var basert på kontrollerte lab-forsøk hvor alle målinger ble gjennomført for hele røykplumen og eksakt mengde brent olje,

Det mest refererte prosjektet når det gjelder gassmålinger under ISB er feltforsøkene gjort under NOBE (The Newfoundland offshore burn experiment) som ble gjennomført i august 1993 med ISB av 29 og 48 m<sup>3</sup> olje (Fingas et al., 1995a og b). Det ble der rapportert at de målte konsentrasjonene av CO, SO<sub>2</sub> og NO<sub>x</sub> var lavere enn deteksjonsgrensen, og ble antatt å være på bakgrunnsnivå, men at SO<sub>2</sub> trolig fantes i en "acid aerosol form" som ikke kunne detekteres med deres online måleinstrumenter. CO<sub>2</sub> ble målt rundt brannene og de høyeste konsentrasjonene ble detektert på bakken og ikke i røyken. De så at CO<sub>2</sub>-nivået økte raskt ved antennelse og holdt seg forholdsvis høyt til brannen slukket. CO<sub>2</sub>-plumen beveget seg langs bakken og gassen hadde sin egen plume som var forskjellig fra selve røyk-plumen. I følge Fingas et al. (1995b), ble konsentrasjonsnivået av CO<sub>2</sub> i luftprøvene målt 200-600 ppm (over bakgrunnsnivå) under de to brannene, dvs omtrent samme konsentrasjonsnivå som målt under våre forsøk (ca 300 - 500 ppm).



Figur 3.6 Røykgasser målt under ISB av Oseberg (gass-sensorer på drone 1). x-aksen angir tidspunkt (ISB fra 10:22 til 11:05). CO<sub>2</sub>-konsentrasjon er vist på høyre y-akse.



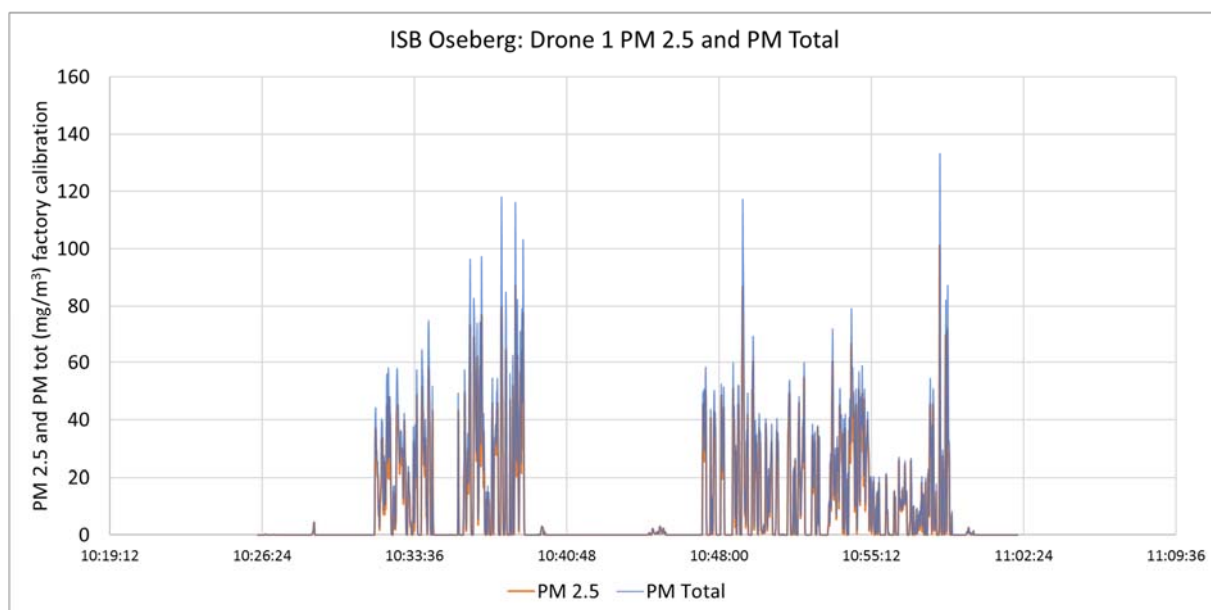
Figur 3.7 Røykgasser målt under ISB av ULSFO (gass-sensorer på drone 1). x-aksen angir tidspunkt (ISB fra 18:12 til 19:00). CO<sub>2</sub>-konsentrasjon er vist på høyre y-akse.

### 3.3 Partikulært materiale i røyken

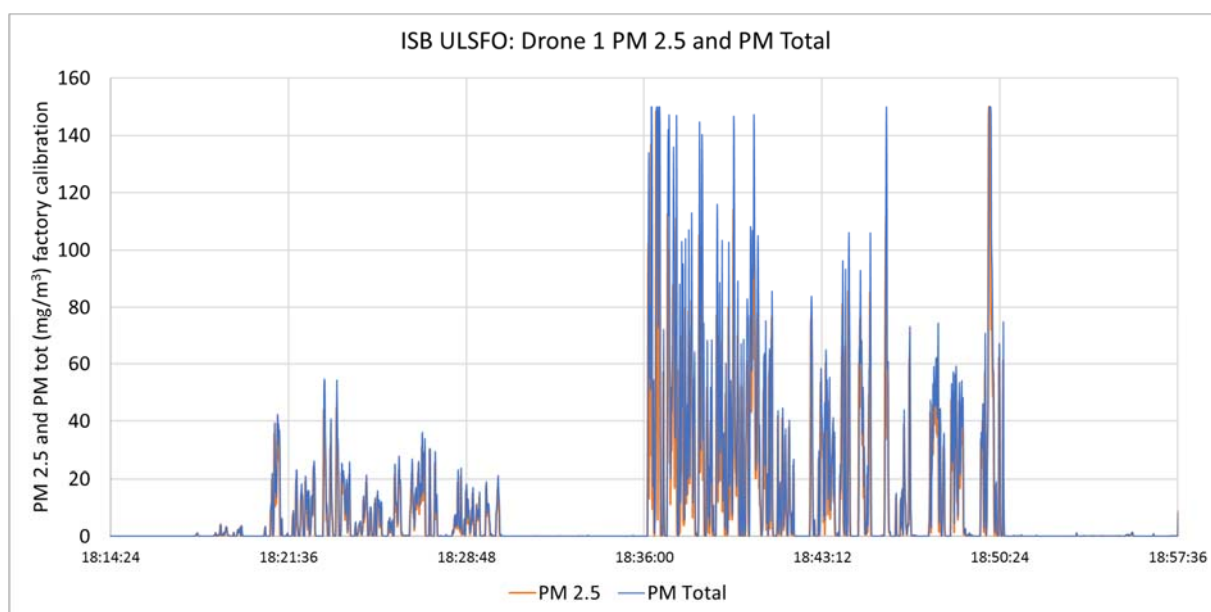
Sotpartikler i røyken ble monitorert både med DustTrak på drone 1 (PM1, 2.5, 4, 10 og totalt) og Sidepack på drone 2 (PM2.5) i begge forsøkene. En oversikt over dronenes monitoreringsområde er indikert i Figur 3.1 og flyhøyde i Figur 3.2 og Figur 3.3.

Målingene fra drone 1 viste at partikkelfordelingen i røyken var dominert (> 90%) av partikler mindre enn 2.5 µm (PM 2.5) under store deler av monitoreringsperioden. Dette er forsøkt illustrert i Figur 3.8 for ISB av Oseberg og Figur 3.9 for ULSFO. Figur 3.10 viser PM2.5-målingene fra begge dronene under ISB av

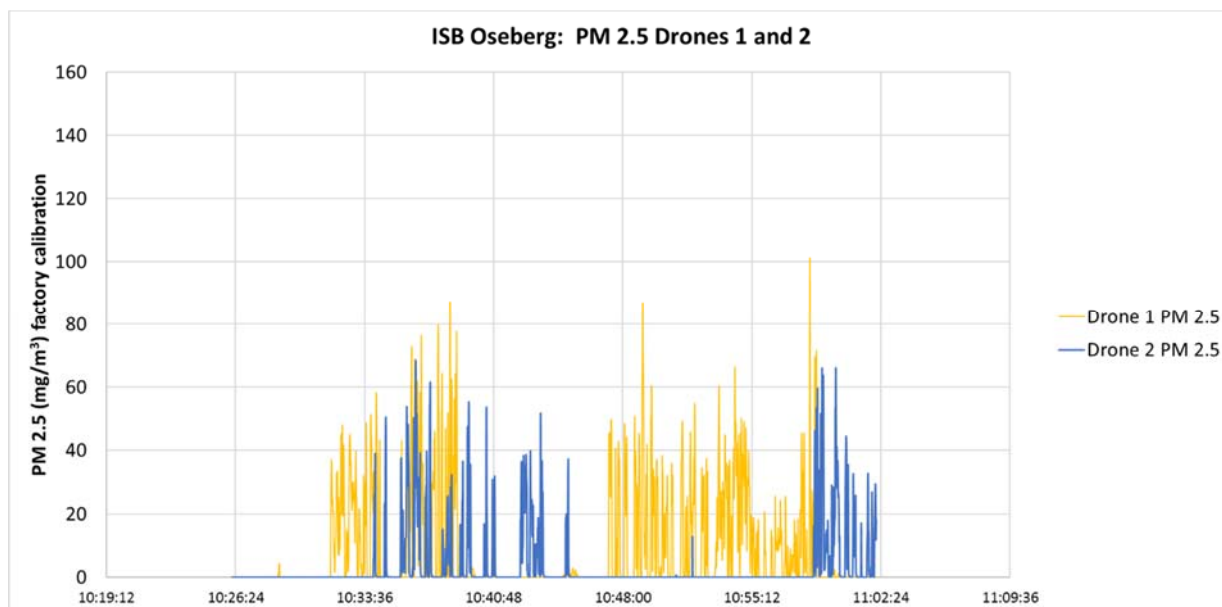
Oseberg, og indikerer at nivået av partikler var litt høyere i nærheten til brannen enn lenger ut i plumen. Tilsvarende målinger for ULSFO er vist i Figur 3.11. Ved sammenligning av Figur 3.10 og Figur 3.11, kan det se ut som at det er monitorert noe høyere partikkelkonsentrasjon under ISB av ULSFO enn av Oseberg.



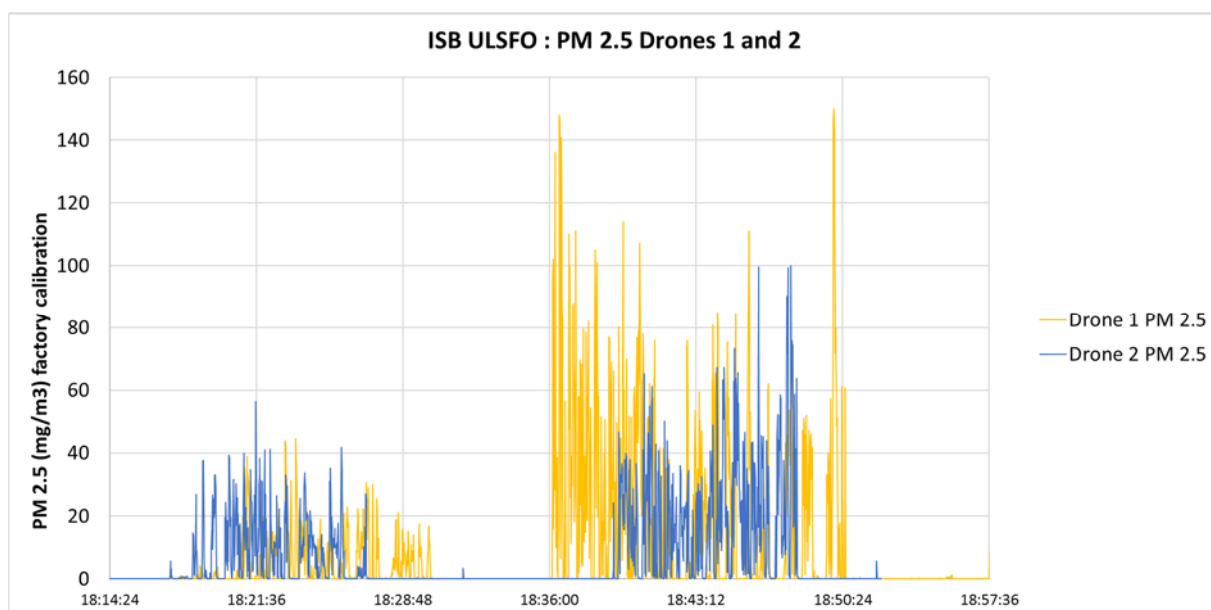
Figur 3.8 Partikulært materiale (PM 2.5 og total PM) målt med DustTrak fra drone 1 under brening av Oseberg (10:22-11:05). Målingene fra DustTrak er beregnet etter såkalt "factory calibration", dvs at de reelle konsentrasjonene er ca 2.4x lavere.



Figur 3.9 Partikulært materiale (PM 2.5 og total PM) målt med DustTrak fra drone 1 under brening av ULSFO (18:12-19:00). Målingene fra DustTrak er beregnet etter såkalt "factory calibration", dvs at de reelle konsentrasjonene er ca 2.4x lavere.



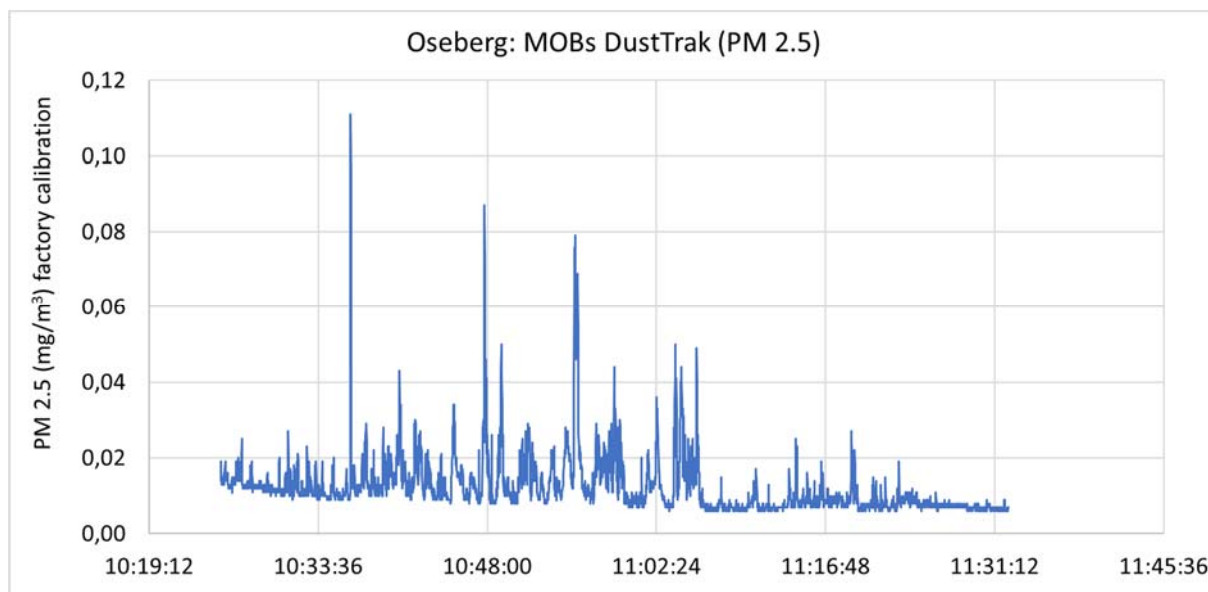
Figur 3.10 Partikulært materiale (PM<sub>2.5</sub>) målt med DustTrak fra drone 1 og SidePack fra drone 2 under brenning av Oseberg (10:22-11:05). Målingene er beregnet etter såkalt "factory calibration", dvs at de reelle konsentrasjonene er ca 2.4x lavere.



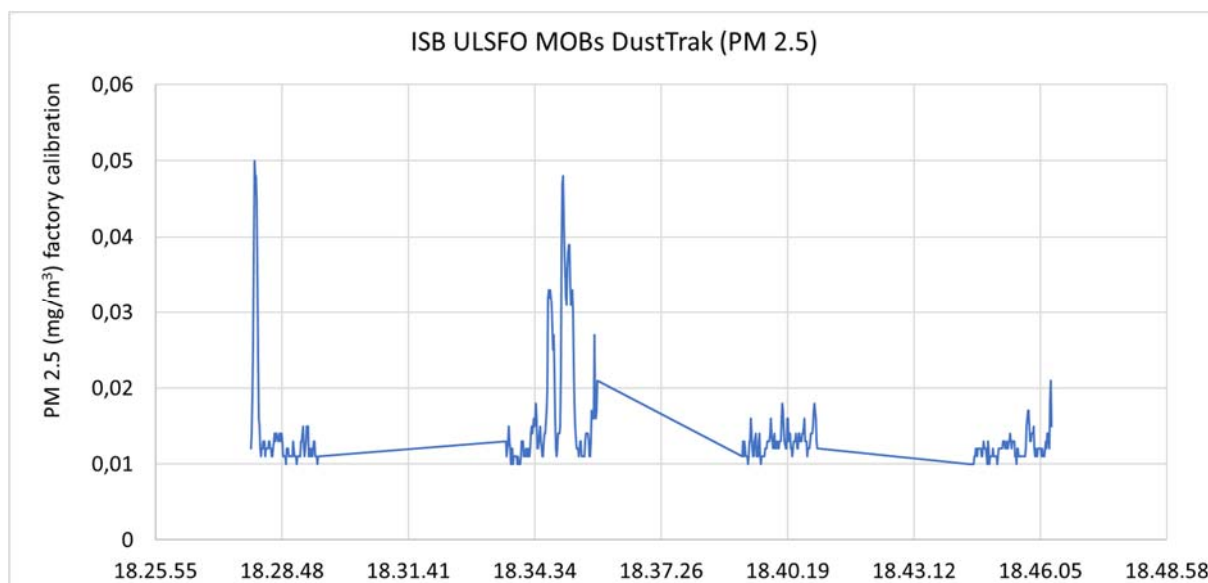
Figur 3.11 Partikulært materiale (PM<sub>2.5</sub>) målt med DustTrak fra drone 1 og SidePack fra drone 2 under brenning av ULSFO (18:12 – 19:00). Målingene er beregnet etter såkalt "factory calibration", dvs at de reelle konsentrasjonene er ca 2.4x lavere.

### 3.4 Partikulært materiale nær sjøoverflate

MOB-S var utstyrt med en DustTrak som monitorerte partikulært materiale like over sjøoverflaten. Figur 3.1 viser MOB-båtens posisjoner under de to brannene. PM<sub>2.5</sub> er vist i Figur 3.12 fra ISB av Oseberg og Figur 3.13 for ULSFO, og som det kan sees er konsentrasjonsnivået svært lavt. I røykplumen var den målte konsentrasjonen mer enn ca 300x høyere enn ved sjøoverflaten.



Figur 3.12 Partikulært materiale (PM<sub>2.5</sub>) målt med DustTrak fra MOB-S under brenning av Oseberg (10:22-11:05) like over sjøflaten. Målingene er beregnet etter såkalt "factory calibration", dvs at de reelle konsentrasjonene er ca 2.4x lavere



Figur 3.13 Partikulært materiale (PM<sub>2.5</sub>) målt med DustTrak fra MOB-S under brenning av ULSFO (18:12-19:00) like over sjøflaten. Målingene er beregnet etter såkalt "factory calibration", dvs at de reelle konsentrasjonene er ca 2.4x lavere

### 3.5 Sotfilter

Mengde oppsamlet sot på filtrene er gitt i Tabell 3.1. Sot ble bare detektert i målbar mengde på de to filtrene fra drone 1 som fløy i plumen nærmest brannen. Det var kun på disse to filtrene man kunne se sotpartiklene, noe som også illustreres i Figur 3.14 hvor filtrene etter ekstraksjon er vist. I følge SidePack-målingene (PM 2.5) ble det også med drone 2 detektert partikulært materiale i plumen. Det er derfor trolig at det var problemer med pumpen under målingene fra drone 2 slik at luft/røyk ikke ble pumpet gjennom filtrene. Dataene fra drone 1 kombinert med PM<sub>2.5</sub>-målingene fra drone 2 ble brukt for å estimere antatt



mengde sot i den delen av plumen som drone 2 opererte under begge brannene. Gravimetrisk mengde sot på filter var ca 10x høyere i forsøkene gjort i kalorimeter i lab (Faksness et al., 2018).

Resultater fra de kjemiske analysene er gitt i avsnitt 3.7.2.

Tabell 3.1 Gravimetrisk analyse: Mengde sot på filter fra droner (i mg). Gravimetriske verdier for drone 1, estimerte verdier for drone 2 (hele brannen).

SINTEF ID	Olje	Prøve	Prøvebeskrivelse	Mengde sot (mg)	Estimert mengde sot (mg)
2018-3941	Oseberg 200+	Sotfilter # 1	Drone 1: Opened 10:26, closed 11:02	0,13	
2018-3965	Oseberg 200+	Sotfilter # 25	Drone 2: Start 10:24, end 10:35	0	0,12*
2018-3954	Oseberg 200+	Sotfilter # 14	Drone 2: Start 10:49, end 11:00	0	
2018-3942	ULSFO	Sotfilter # 2	Drone 1: Opened 18:17, closed 19:01	0,32	
2018-3955	ULSFO	Sotfilter # 15	Drone 2: Start 18:16, end 18:27	0	0,21*
2018-3956	ULSFO	Sotfilter # 16	Drone 2: Start 18:38, end 18:49	0	
2018-3943	Bakgrunn	Sotfilter # 3	Not opened or exposed (Strilborg)	0	
2018-3964	Bakgrunn	Sotfilter # 24	Not opened or exposed (Utvær)	0	

\*) Sotmengde under hele brannen estimert fra PM2.5 og data fra drone 1



Figur 3.14 Ekstraherte filter. Filter 1 og 2 (lengst til venstre) ble brukt på Drone 1 under ISB av hhv Oseberg 200+ og ULSFO i sot-plumen nærmest brannen. Beskrivelse av filtrerne er gitt i Tabell 3.1.

### 3.6 Beregning av Black Carbon

Black carbon (BC) er den lysabsorberende delen av fine partikler (PM2.5), mens den lysreflekterende delen av PM2.5 defineres som organic carbon (OC). Sot er summen av BC og OC (Miljødirektoratet, 2017). Det totale utslippet av BC til luft i Norge i 2011 var 5100 tonn (Aasestad, 2013), hvorav 12 % var fra olje og gassindustrien og 18 % fra innenriks sjøfart og fiske.

BC kan beregnes ut fra mengde olje brent, men her har vi ikke helt eksakte tall på det, slik at BC ble estimert fra mengde C og PM2.5 i røyken. Mer detaljer om beregningsmetode og resultater er gitt i Vedlegg D. Ut fra disse beregningene ble BC for Oseberg estimert til 9.7% og for ULSFO ble BC estimert til 10.7 % av olje brent.

In situ brenning ble brukt som en av responsmetodene i Gulf of Mexico i 2010, og det ble der estimert at 42,000 tonn olje ble brent. NOAA estimerte at det ble frigjort mellom 600 og 2,100 tonn BC til atmosfæren i løpet av de 9 ukene responsaksjonen varte og at det utgjorde ca 4 % at den totale mengden brent (NOAA, 2011). I følge Buist et al. (2013) har laboratorie- og felttester indikert at sotproduksjonen er omtrent 2-20% av mengde olje brent.

Fra laboratorietester i konkalorimeter (Faksness et al., 2018) ble BC beregnet ut fra mengde sot samlet opp på filter og mengde olje brent, og BC produsert ble beregnet til 107 g BC/kg olje for ULSFO (10.7%) og for en Oseberg Blend fersk olje til 83g BC/kg olje (8.3%) brent. Disse resultater er basert på kontrollerte lab-forsøk hvor alle målinger er gjennomført for hele røykplumen og eksakt mengde brent olje. Dette viser at våre estimat for BC fra OPV er i overensstemmelse med forsøkene gjort i konkalorimeteret.

### 3.7 Oljeprøver og residue

#### 3.7.1 Fysikalsk karakterisering av utgangsoljer og brenne-residue

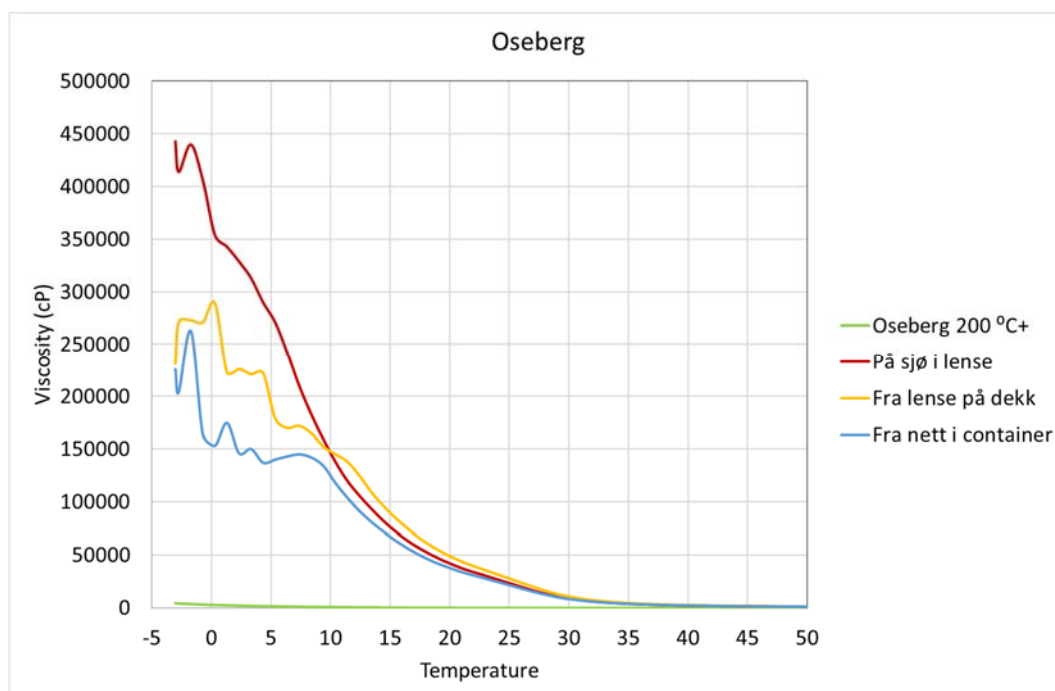
Tetthet og viskositet ble målt på utgangsoljene og utvalgte residue-prøver (Tabell 3.2). Tettheten ble målt ved 80 °C og deretter omregnet til 15 °C. Tettheten var mindre enn 1 for alle residue, slik at de bør holde seg flytende.

Det var en utfordring å måle vanninnholdet pga konsistensen på residuene, særlig for ULSFO hvor vanninnholdet varierte fra 3 til 17%. Gjennomsnittlig vanninnholdet beregnet til 9% i residue fra Oseberg og 8% i residue fra ULSFO.

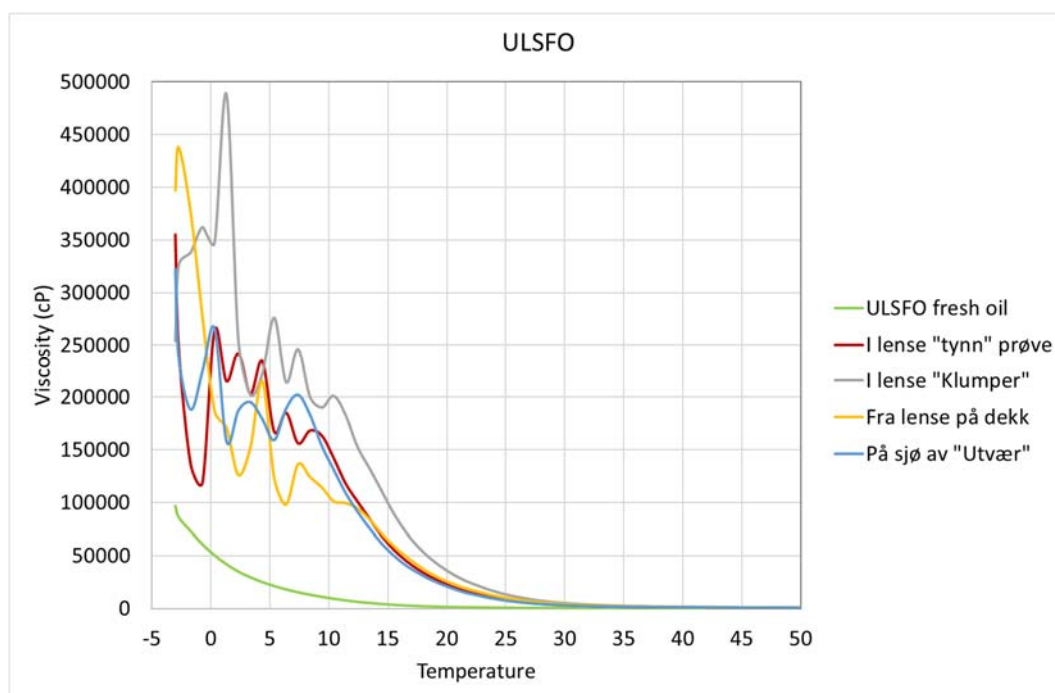
*Tabell 3.2 Tetthet, vanninnhold og viskositet for utgangsoljene og ISB-residuene. Viskositeten er gitt for 10 °C fra temperatur-sweep.*

SINTEF ID	Olje	Beskrivelse	Tetthet 15°C	Vanninnhold i %	Viskositet t= 10 °C
2018-4052	Oseberg	Mottatt i forkant av OPV	0,891		750
2018-5303-S1		Tatt på sjø i lense	0,969	9	138000
2018-5303-S2		Fra flere kuler på dekk	0,971		
2018-5303-S3		Skrapet av en kule på dekk	0,969		145000
2018-5303-S8		Fra nett i container	0,969		118000
2018-3881	ULSFO	Mottatt i forkant av OPV	0,917		9030
2018-5304-S1		På sjø i lense, "tynn" prøve	0,944	8	142000
2018-5304-S4		På sjø i lense, "klumper"	0,949		201000
2018-5304-S6		Fra lense på dekk	0,948		101000
2018-5304-S11		På sjø fra "Utvær"	0,945		131000

Temperatur-sweep for viskositeten ble gjort fra 80 °C ned til -3 °C. Viskositeten fra begge forsøkene holdt seg stabil fra 80 til ca 40 grader, slik at Figur 3.15 og Figur 3.16 viser sweep fra 50 °C og lavere. Som det kan sees fra figurene får man måletekniske problemer med rheometeret når temperaturen kommer ned mot 10 °C og lavere, noe som skyldes at residuenes stivnepunkt blir for høyt når måletemperaturen synker. Oljen stivner når stivnepunktet blir mer enn 10-15 °C høyere enn vanntemperaturen. I Tabell 3.2 er viskositet fra temperatur-sweep gitt ved 10 °C, og resultatene indikerer at det er mindre variasjon i viskositeten i de ulike residue-prøvene for Oseberg enn for ULSFO.



Figur 3.15 Temperatur-sweep for viskositet (cP) fra -3 til 50 °C for Oseberg, målt ved skjær 10/s.



Figur 3.16 Temperatur-sweep for viskositet (cP) fra -3 til 50 °C for ULSFO, målt ved skjær 10/s.

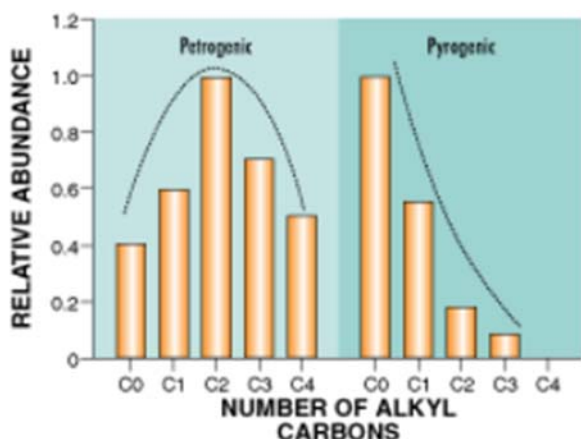
### 3.7.2 Kjemiske analyser av residue

GC kromatogrammene av utgangsoljene og residuene er gitt i Vedlegg A (Figur A 1 til Figur A 4 for Oseberg og i Figur A 5 til Figur A 11 for ULSFO). Alle kromatogrammer er normalisert mot C25. Ved å sammenligne kromatogrammene fra ISB-residuene med utgangsoljene visuelt, kan det se ut som at brenningen har påvirket n-alkanene opp til ca C27-C28 i begge oljene, men at n-alkaner ned til C11 er detektert i de fleste residuene.

GC-kromatogrammene av de tre ISB-residuene av Oseberg er forholdsvis like. Det kan sees små forskjeller i det laveste kokepunktsområdet (ca 10-20 minutter på x-akse i kromatogrammene), og at prøven som er skrapet av lensa (Figur A 3) kan være litt mer avdampet enn de to andre prøvene. Det samme gjelder for residuene fra ISB av ULSFO. Også her er det små forskjeller som vises i det laveste kokepunktsområdet. Residuet som ble tatt som klumper bak lensa (Figur A 8) ser ut til å være mer påvirket enn de øvrige prøvene.

Mer detaljerte kjemiske data fra analyser av de semi-volatile komponentene (SVOC) i utgangsoljene, brenneresidue og sotprøver er gitt i Vedlegg B. En liste over de analyserte SVOC-komponentene, deres forkortelser, gruppering, samt fargekoder på gruppene er gitt i Vedlegg C.

Det var av interesse å se om man kunne identifisere typiske pyrogene PAH-mønstre i brenneresiduene og sotprøvene. Boehm og Saba (2008) har definert petrogene og pyrogene PAH som: Petrogene PAH dannes ved moderate temperaturer (100-300 °C) over tid og er assosiert med fossilt brensel (petroleum og kull). Pyrogene PAH dannes gjennom en rask forbrenning ved høy temperatur, dvs over 700 °C. Pyrogene PAH domineres av ikke-alkylerte PAH, mens petrogene PAH ofte har mer av de alkylerte PAH, som vist i Figur 3.17. I laboratoriestudier med ISB i konkalorimeter (Faksness et al., 2018) kunne man kjenne igjen et typisk pyrogent PAH-mønster i sotprøvene, mens man i residueprøvene hadde petrogene PAH-mønstre.



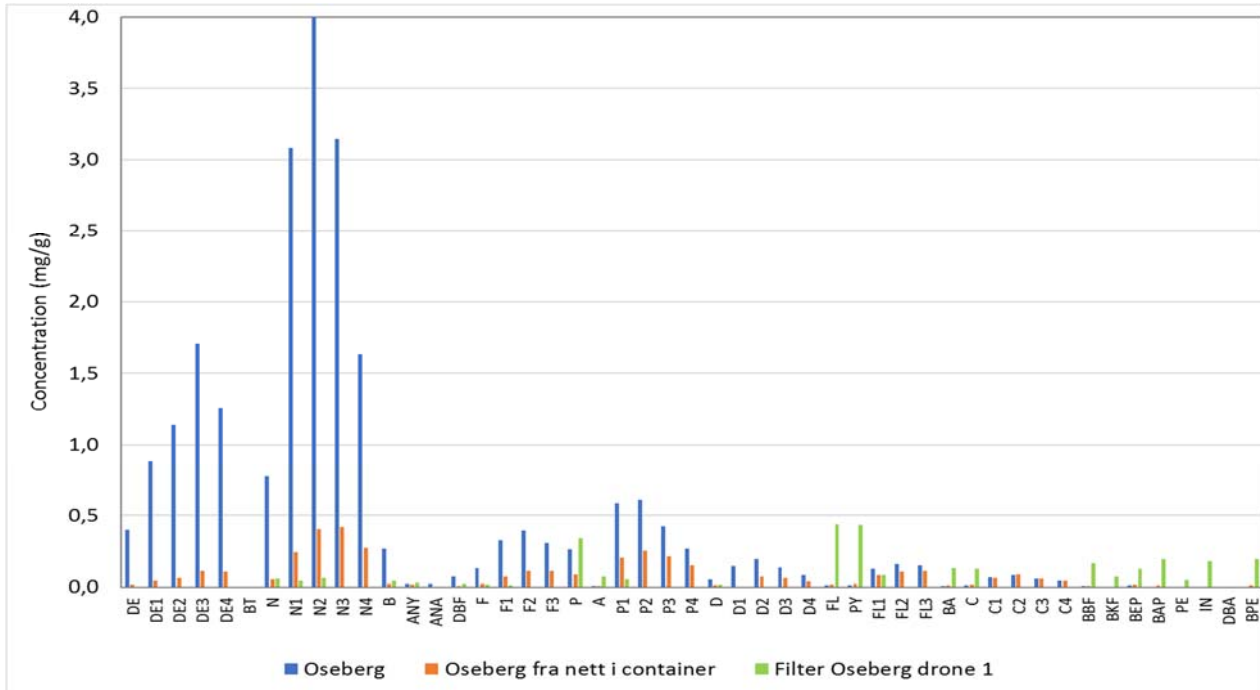
Figur 3.17 Eksempel på fordeling av alkylerte PAH dannet ved ulike temperaturer: Petrogene PAH til venstre og pyrogene PAH til høyre (Boehm and Saba (2008)).

Detaljert sammensetning av SVOC for utgangsoljer og residue er gitt i hhv. Tabell B 6 og Tabell B 7 for Oseberg og ULSFO, mens sotprøvene er gitt i Tabell B 8. Resultatene er sammenstilt i Figur 3.18 (Oseberg) Figur 3.19 (ULSFO), hvor utgangsoljens sammensetning er vist sammen med brenneresiduet og sotprøven.

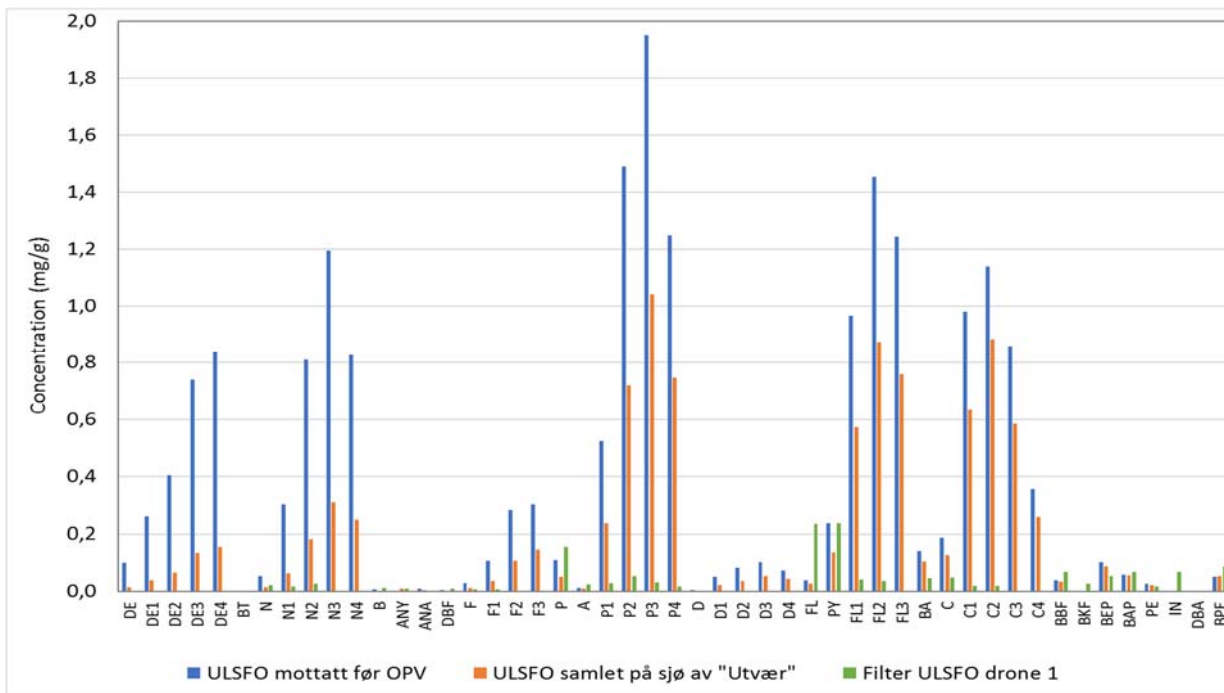
Som gitt i Tabell B 1 og Tabell B 2, de to utgangsoljene har svært forskjellig kjemisk sammensetning: Oseberg inneholder mer av de lettere komponentene, som naftalener, enn ULSFO (12 ppb vs 3 ppb), mens ULSFO har høyere konsentrasjoner av 2-3 ring PAH (4 vs 6 ppb) og 4-6 rings PAH (0.8 vs 8 ppb). Dette illustreres også ved at totalkonsentrasjon av SVOC i ISB-residuene reduseres med mer enn 80% for Oseberg og med ca 50% for ULSFO ved sammenligning med utgangsoljene.

Histogrammene for begge oljene (Figur 3.18 og Figur 3.19) viser at sotprøvene fra brenningen ikke har en typisk pyrogen profil med dominans av ikke-alkylerte PAH, men fremdeles en petrogen profil. Det ble målt mer sot på filteret fra ULSFO enn Oseberg (0.32 mg vs 0.12 mg), noe som var i overensstemmelse med DustTrak-målingene hvor mer partikulært materiale registrert under ISB av ULSFO. Ved kvantifisering av SVOC fra filtrene, indikerer resultatene at PAH-konsentrasjonene er lavere i sotpartiklene fra ULSFO enn

fra Oseberg. Imidlertid var sotkonsentrasjonen på filterene fra begge ISB lav, for eksempel ca 10x lavere under feltforsøket enn oppnådd i laboratoriet, slik at det blir større usikkerhet i analysene. Dette kan være en medvirkende årsak til at man ikke ser de samme trendene mhp pyrogent PAH-mønster som observert i lab-testene (Faksness et al., 2018).



Figur 3.18 SVOC i utgangsolje, brenneresidue og sotfilter fra ISB av Oseberg. Forkortelser på x-aks er gitt i Vedlegg C.

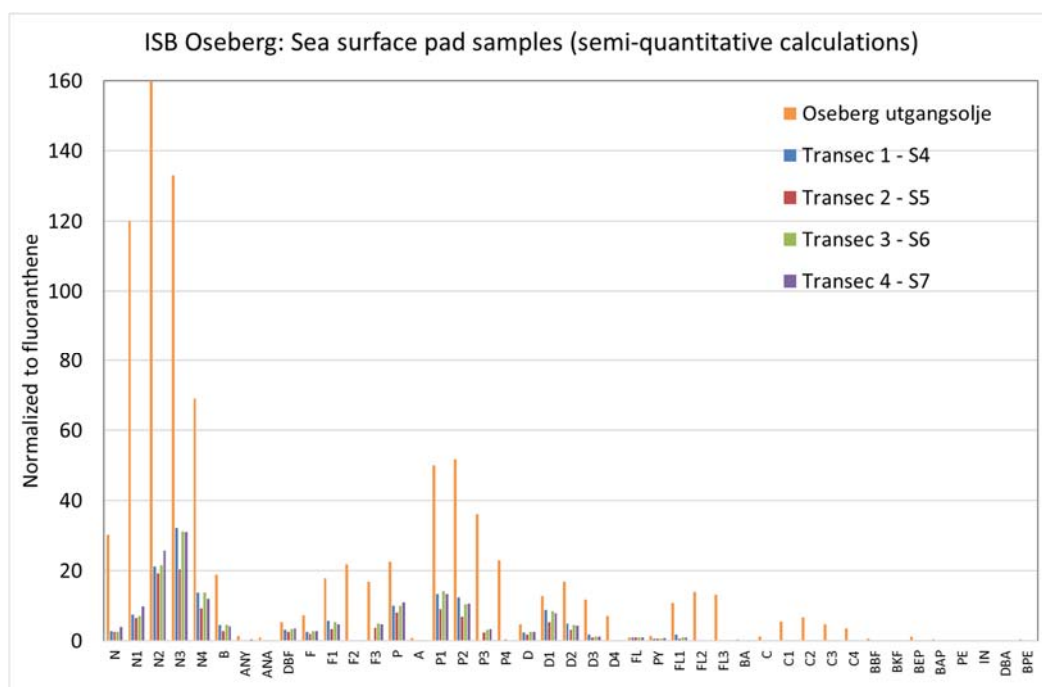


Figur 3.19 SVOC i utgangsolje, brenneresidue og sotfilter for ULSFO. Forkortelser på x-akse gitt i Vedlegg C.

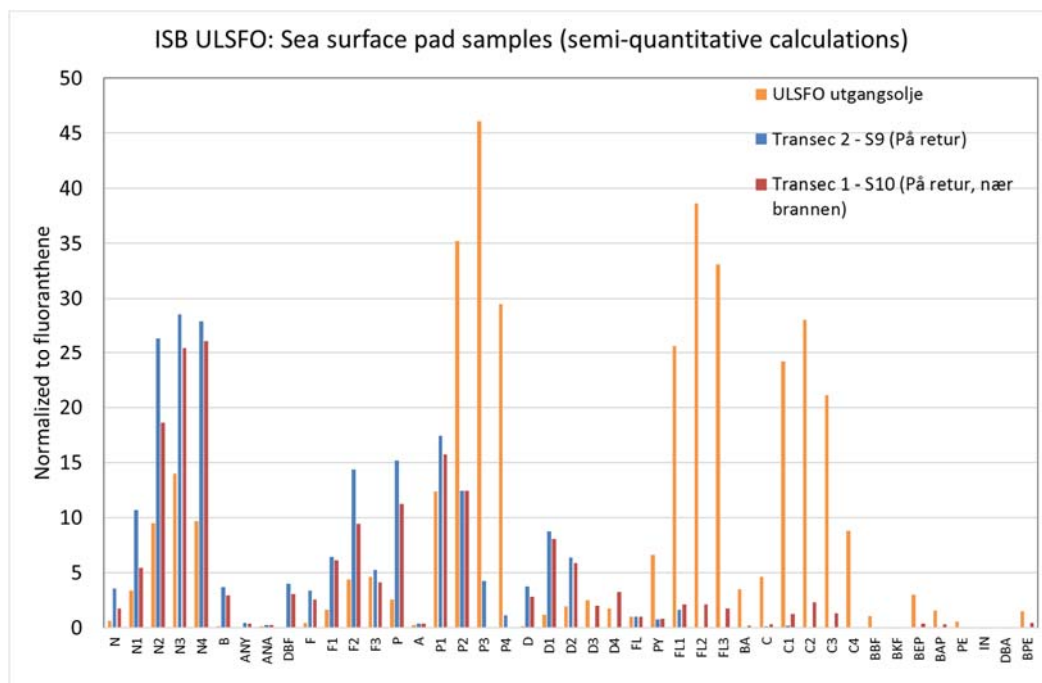
### 3.7.3 Kjemisk analyse av overflateprøver fra sjø

Det ble brukt teflon-pad for å ta overflateprøver fra sjøen fra MOB-S. Prøvene ble forsøkt tatt når man fikk en økning i partikulært materiale ifølge on-line DustTrak-målinger. Lokasjonen for de ulike pad-prøvene er vist i Figur 3.1. Den kjemiske sammensetningen fra pad-prøvene er gitt i Figur 3.20 (Oseberg) Figur 3.21 (ULSFO). Det er dessverre ikke mulig til å gi en eksakt kvantifisering av mengde sot på disse pad-ene, så resultatene er normalisert mot fluoranthene for å vise komponentfordelingen.

Fordelingen av komponenter indikerer at det er oljebaserte partikler som er monitorert, men det er usikkert om disse kommer fra sotnedfall eller sheen på sjøen da det relative innholdet av naftalener sammenlignet med de øvrige komponentene er høyere enn forventet i sot.



Figur 3.20 SVOC fordeling i pad-prøver fra sjøoverflaten under brenning av Oseberg, samt utgangsoljen. Komponentene er normalisert mot fluoranthene, og kan ikke sammenlignes med konsentrasjonene i Figur 3.18. Lokalisering av prøvetakningssted er vist i Figur 3.1. Transect 1 er nærmest brannen, mens transect 4 er lengst unna og indikerer hvor MOB-S har krysset på tvers under røykplumen.



Figur 3.21 SVOC fordeling i pad-prøver fra sjøoverflaten under brenning av ULSFO, samt utgangsoljen. Komponentene er normalisert mot fluoranthen, og kan ikke sammenlignes med konsentrasjonene i Figur 3.19. Lokalisering av prøvetakningssted er vist i Figur 3.1. Transect 1 er nærmest brannen, mens transect 4 er lengst unna og indikerer hvor MOB-S har krysset på tvers under røykplumen.

### 3.8 Estimering av brenneeffektivitet

#### 3.8.1 Basert på oppsamlet mengde residue

For Oseberg ble det oppgitt fra NOFO at 523 kg residue ble samlet i nettet, samt at man antok 300-400 liter lenselekkasje. Da lensa ble tatt opp på dekk etter brenning var det en del olje igjen på den, sannsynligvis ca 100 kg, dvs totalt ca 1000 kg residue igjen. Basert på disse antagelsene kan brenneeffektiviteten estimeres til ca 80% for Oseberg. Beregningen er vist i Vedlegg D.3.

For ULSFO er det usikkert hvor stor andel av residuet som egentlig ble samlet opp av "Utvær" da opptaket startet seint. Mengde residue fra "Utvær" ble estimert til 60 kg, samt at man estimerte ca 100 kg olje på lensa. Basert på disse antagelsene kan brenneeffektiviteten estimeres til < 95%, noe som er for høyt pga at man vet at en del av residuet ikke ble samlet opp.

#### 3.8.2 GC-analyse av residue

Som alternativ ble det forsøkt beregnet brenneeffektivitet basert både på GC/FID, gassmålinger og heat-flux. Det viste seg å være mer utfordrende enn forventet å beregne brenneeffektiviteten basert på disse parameterne.

Brenneeffektiviteten (BE) ble først forsøkt estimert ut fra GC-kromatogrammene ved å sammenligne residuene med utgangsoljen. Kvantifisering av de høyere n-alkanene (dvs fra C<sub>30</sub> til C<sub>34</sub>) indikerer at de også kan ha blitt påvirket av brenningen slik at den estimerte BE basert på denne metoden vil bli underestimert. Ut fra beregningene er det tydelig at BE for ULSFO (med mer tyngre komponenter) blir mer underestimert enn for Oseberg. Basert på denne metoden antyder beregningene en BE for Oseberg på 54±2% (4 prøver)

og for ULSFO  $49\pm 11\%$  (6 prøver). SINTEF har tidligere forslått å gjennomføre laboratorieforsøk med kontrollert avbrenning av olje til ulike brenneeffektiviteter for å etablere en kalibreringskurve basert på GC/FID og tetthet, og tror at dette vil gi oss et mer realistisk mål på BE.

### 3.8.3 Gassmålinger og heat-flux

Beregningsmetode og usikkerheter for mengde olje brent basert på gassmålinger og heat-flux er gitt i Vedlegg D2. Det viste seg at det vil kreve en mer omfattende databehandling, trolig inkludert videopptak fra droner, for å finne "gode nok" transekter for å beregne brent mengde olje fra ISB av Oseberg. For ULSFO, to "gode" transekter ble identifisert og brukt til beregningene. Imidlertid vil det også her kreve en mer detaljert gjennomgang av dataene for å få en BE som representerer hele brenneperioden. Det er også antydning at CO<sub>2</sub>-sensoren trolig underestimerer mengde CO<sub>2</sub>-konsentrasjonen med ca 20 %, men dette er det ikke tatt høyde for i beregningene. De initielle beregningene estimerte at 3.3 m<sup>3</sup> ULSFO brente. Dette tilsvarer en BE på 57% for ULSFO.



## 4 Oppsummering

Under ISB av Oseberg 200 °C+ og ULSFO ble det generert et omfattende datamateriale, både fra målinger i røykplumen og fra selve residuet. I tillegg finnes det en del video- og bilder både fra LN-KYV og dronene som SINTEF ikke har hatt tilgang til. Dette vil kunne gi oss mer informasjon og dermed trolig også bedre estimat på for eksempel brenneeffektiviteten.

De initielle resultatene fra røykgassmålingene indikerer at det produseres lave konsentrasjoner av SO<sub>2</sub> (< 1.2 ppm) og NO<sub>x</sub> (<2.1 ppm) under brenningen av begge oljene. De høyeste CO<sub>2</sub>-konsentrasjonene som ble målt lå mellom 200 og 500 ppm (over antatt bakgrunnsnivå) og maksimalt CO-nivå ble målt til 12-14 ppm. Målingene fra dronene viste at røyken ble dominert (>90%) av partikler mindre enn 2.5 µM (PM2.5).

Black Carbon produsert av olje brent ble estimert basert på mengde karbon og PM2.5 i røyken og ble beregnet til 9.7% for Oseberg og 10.7% for ULSFO.

Tettheten for ISB-residuen fra begge oljene var mindre enn 1, dvs at de ikke synker. De kjemiske analysene av residuen viste at den totale PAH-konsentrasjonen ble redusert med mer enn 80% for Oseberg og ca 50% for ULSFO ved sammenligning med ubrent olje. Dette har også sammenheng med at utgangsoljen for Oseberg inneholder større andel komponenter med lavere kokepunkt, som for eksempel dekaliner og naftalener.

Brenneeffektiviteten ble forsøkt estimert på flere måter. For Oseberg finnes det mer informasjon om hvor mye residue som ble samlet opp, og ut fra disse antagelsene ble brenneeffektiviteten estimert til ca 80%. Ved å bruke GC/FID-analysene, ble BE estimert til 54%, men dette er trolig en underestimert. For å estimere BE ut fra gassmålingene og heat-flux, må det mer data-behandling til. Som en foreløpig antagelse kan man estimere en BE for Oseberg mellom 54 og 80%.

For ULSFO fikk man ikke samlet inn alt residuet, slik at en BE på om lag 95% er lite realistisk. Ved beregning fra GC/FID ble gjennomsnittlig BE estimert til 49%, noe som nok er litt for lavt. Videre ble gassmålingene og heat-flux brukt til å estimere en BE på 57%, men dette tallet er det også usikkerhet for. Som en foreløpig antagelse kan man estimere en BE for ULSFO på mer enn 57%.

SINTEF ønsker å foreslå videre arbeid basert på de innsamlede data og selve ISB-residuen etter å ha diskutert de foreløbige resultatene med NOFO og Kystverket.

## 5 Referanser

Boehm, P., T. Saba (2008). Identification and allocation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Exponent Environmental Forensics Notes 4/2008.

<http://announce.exponent.com/practice/environmental/ef/vol4/index.html> (downloaded 9.jan, 2018).

Buist, I. (2004). In situ burning for oil spills in ice-covered waters. Interspill, 2004, Presentation no. 469.

Buist, I., S.G. Potter, B.K. Trudel, S.R. Schelutt, A.H. Walker, D.K. Scholz, P.J. Brandvik, J. Fritt-Rasmussen, A.A. Allen, P. Smith (2013). In situ burning in ice-affected waters. State of knowledge report. Final report 7.1.1. The IOGP JIP Arctic Response Technology Oil Spill Preparedness.

[http://www.arcticresponsetechnology.org/wp-content/uploads/2013/10/Report-7.1.1-OGP\\_State\\_of\\_Knowledge\\_ISB\\_Ice\\_Oct\\_14\\_2013.pdf](http://www.arcticresponsetechnology.org/wp-content/uploads/2013/10/Report-7.1.1-OGP_State_of_Knowledge_ISB_Ice_Oct_14_2013.pdf)

Faksness, L.G. K. Storesund, D. Krause 2018. In situ brenning av olje: Analyse av røyk og residue. SINTEF rapport OC2018 A-019, ISBN 978-82-7174-330-7.

Fingas et al. (1995a). The Newfoundland Offshore Burn Experiment – NOBE. Proceedings of the 1995 International Oil Spill Conference, pp. 123-132.

Fingas et al. (1995b). The Newfoundland Offshore Burn Experiment: Further results of emissions measurement. In Proceedings of the 18<sup>th</sup> AMOP Technical Seminar, pp. 915-996.

Miljødirektoratet (2017). In situ brenning av råolje. Sett gjennom "klimabriller". Presentasjon av Bjørn Christensen, SINTEF Sealab 29.mai, 2017.

NOAA, 2011. NOAA researchers release study on emissions from BP. Deepwater Horizon controlled burns. [http://www.noaaneews.noaa.gov/stories2011/20110920\\_gulfplume.html](http://www.noaaneews.noaa.gov/stories2011/20110920_gulfplume.html) (downloaded 6.januar, 2018)

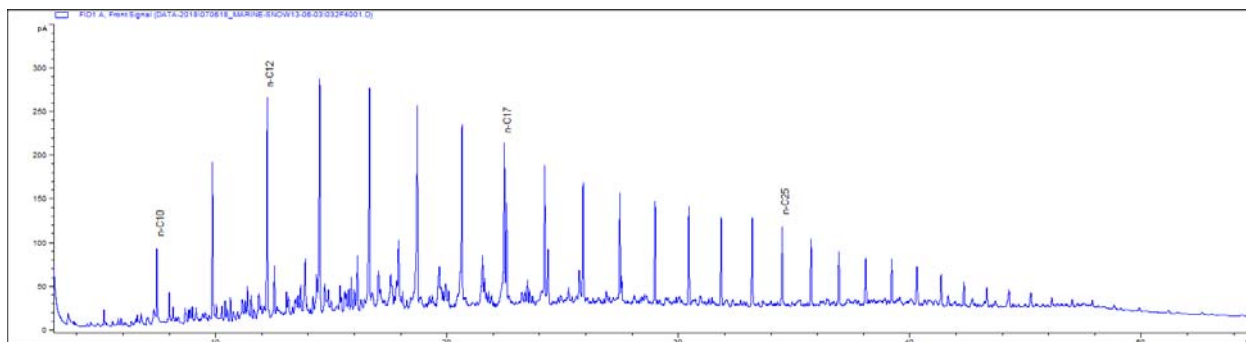
NOFO (2018). EDOCS-#31627-v1-Loggskjema\_OPV\_2018\_ISB\_forsøk. Oversendt i e-mail fra Ingrid Taban, den 21.juni, 2018.

Aasestad, K. (2013). Emmission of Black carbon and Organic carbon in Norway 1990-2011. Statistics Norway 13/2013.

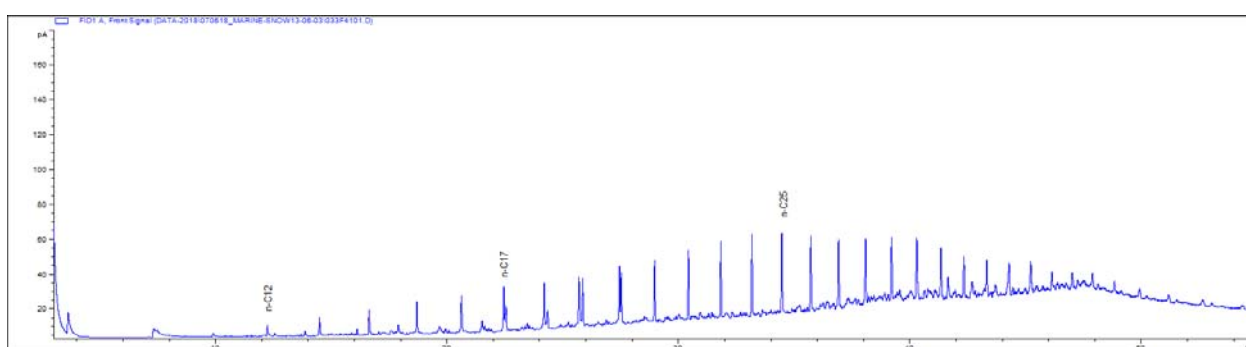
[https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/\\_attachment/107884?ts=13dfd568678](https://www.ssb.no/natur-og-miljo/artikler-og-publikasjoner/_attachment/107884?ts=13dfd568678)

(Downloaded 6.januar, 2018)

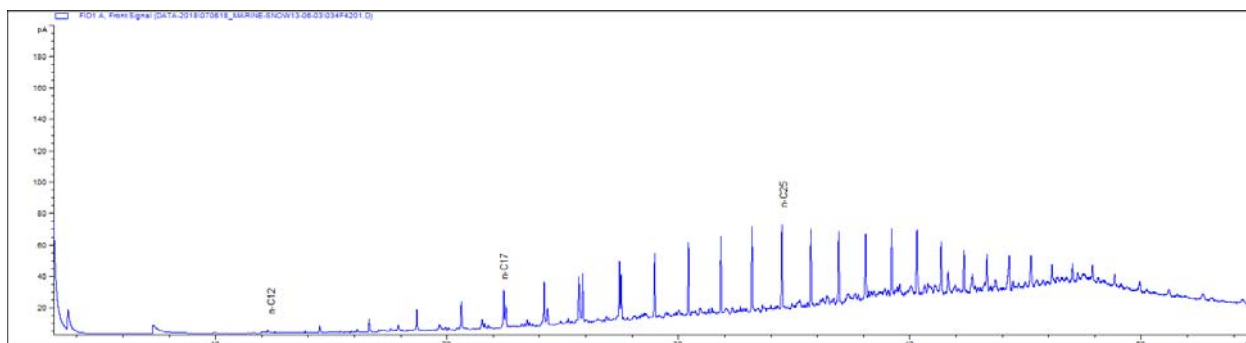
## A Vedlegg A GC kromatogram av residue



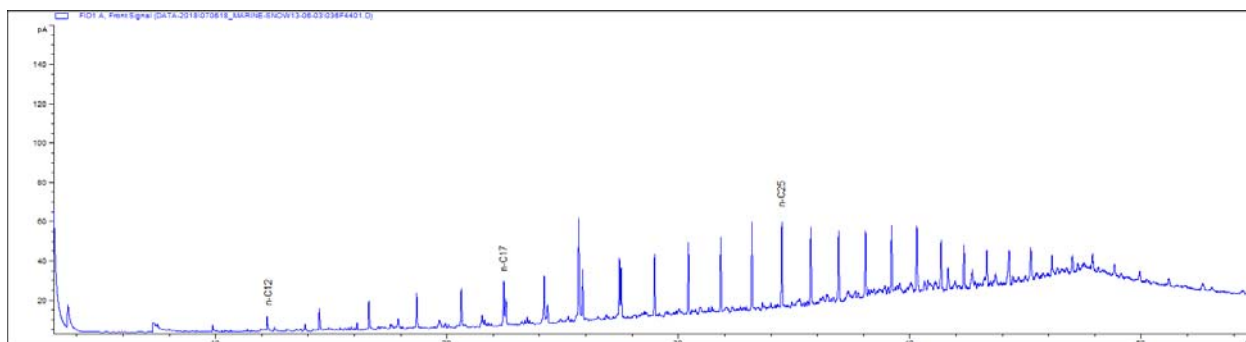
Figur A 1 Oseberg 200 °C+. (2018-4052)



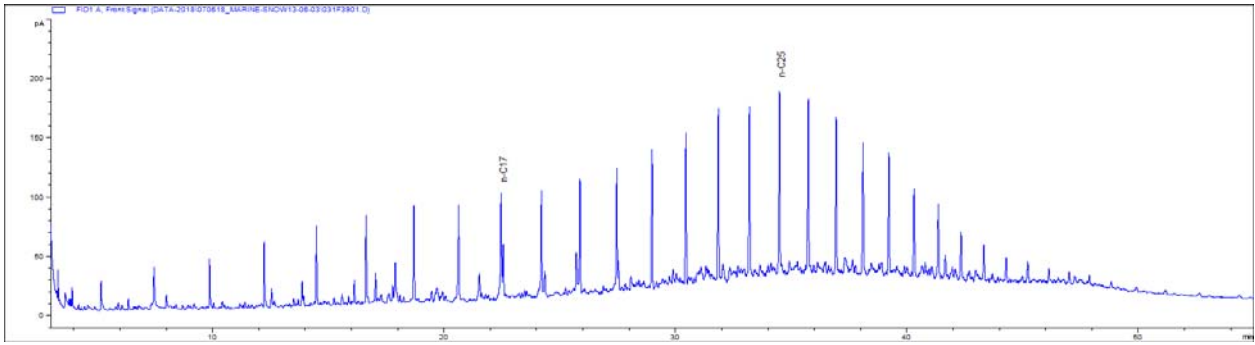
Figur A 2 Oseberg Burn 1. Samlet i lensa på sjøen (2018-5303-S1)



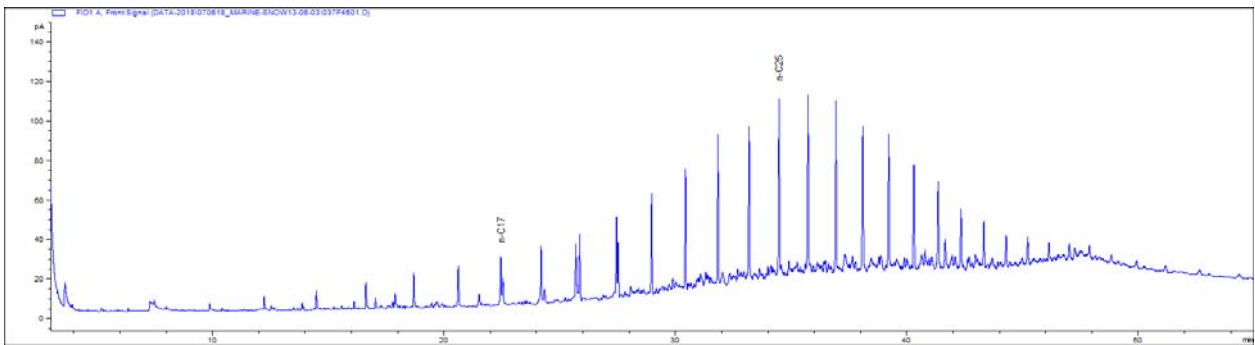
Figur A 3 Oseberg Burn 1. Skrapet av flere kuler på lensa på dekk (2018-5303-S2)



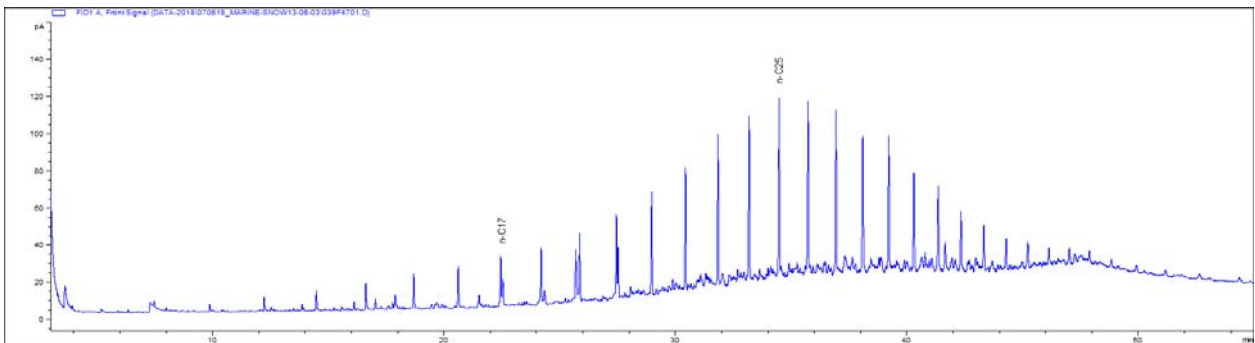
Figur A 4 Oseberg Burn 1. Prøve fra NOFO (tatt fra nettet ved veing i Stavanger) (2018-5303-S8)



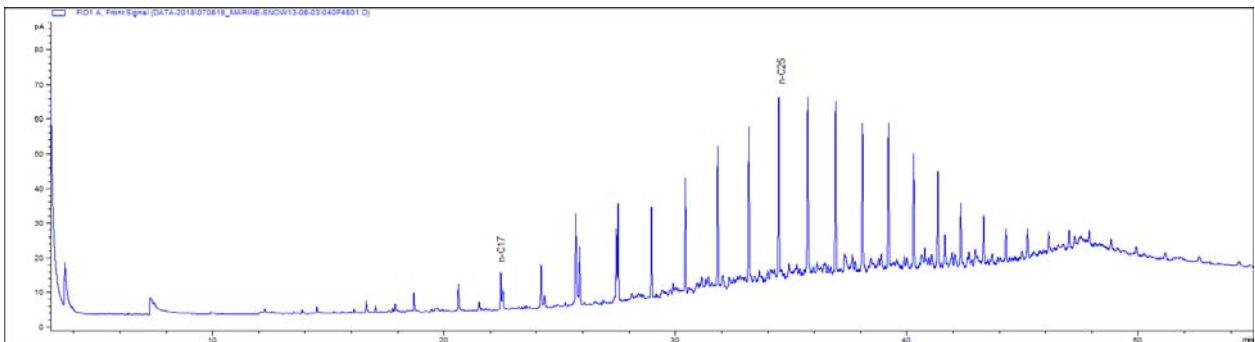
Figur A 5 ULSFO fersk olje (2018-3881).



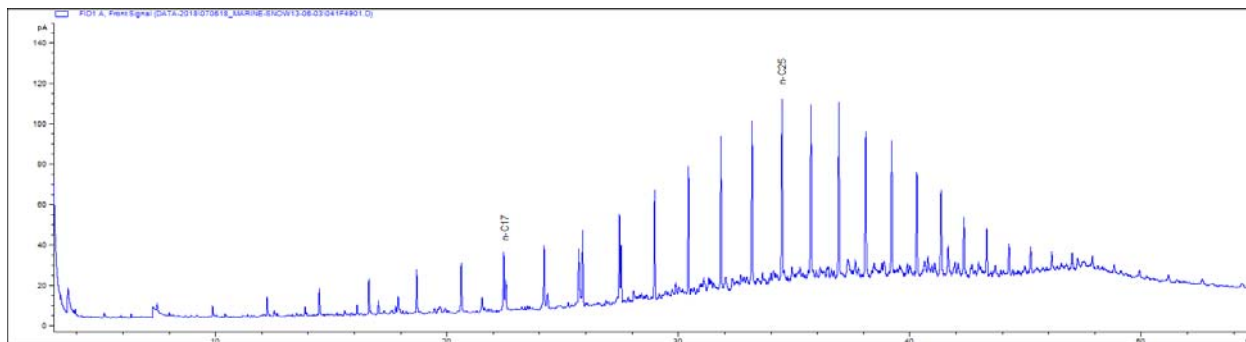
Figur A 6 ULSFO Burn 2. Residue ("tynn" prøve) tatt på sjø i lense (2018-5304-S1).



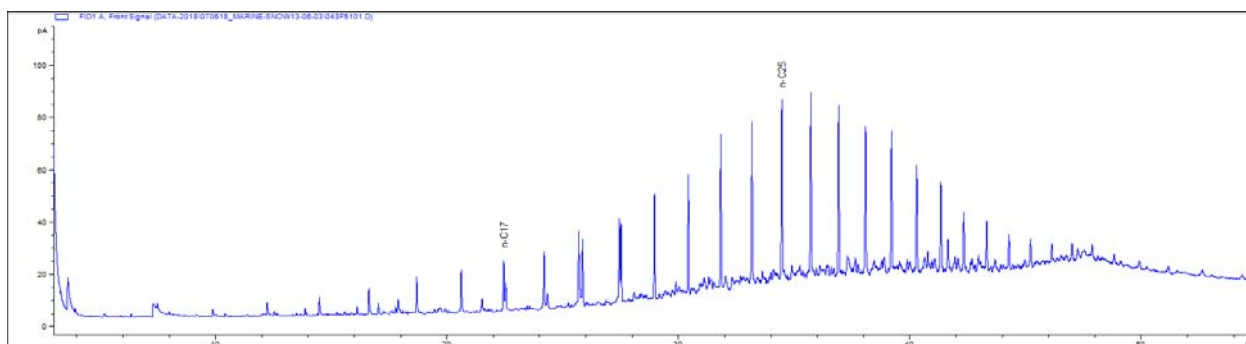
Figur A 7 ULSFO Burn 2. Klumper tatt i lense (2018-5304-S3)



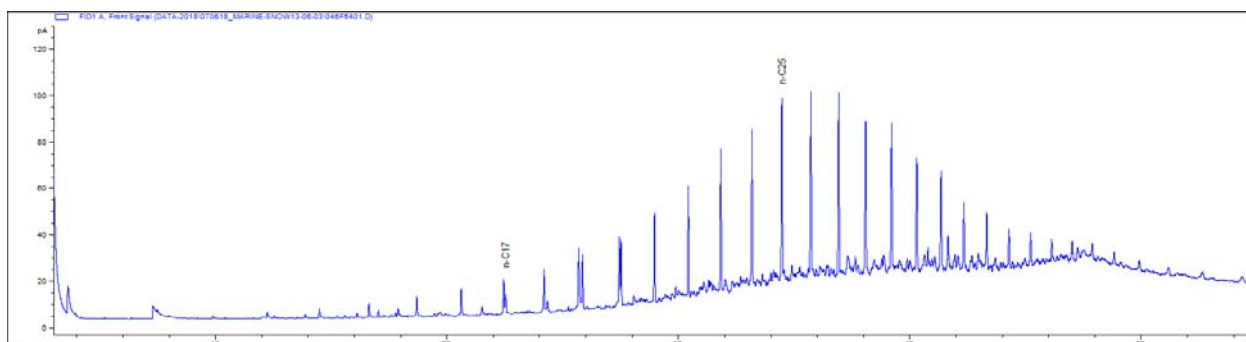
Figur A 8 ULSFO Burn 2. Klumper tatt bak lense (2018-5304-S4)



Figur A 9 ULSFO Burn 2. Skrapet av kuler på lensa på dekk (2018-5304-S6)



Figur A 10 ULSFO Burn 2. Skrapet av skjørt på lense på dekk (2018-5304-S8)



Figur A 11 ULSFO Burn 2. Samlet opp av Utvær (fra Kystverket, 3/3) (2018-5304-S13)

## B Vedlegg B Kjemisk sammensetning av sot residue og sotprøver

**Tabell B 1** Kjemisk sammensetning av utgangsolje og ISB residue Oseberg (i g analytt/kg olje).

Test ID	2018-4052-S1	2018-5303-S1	2018-5303-S2	2018-5303-S3	2018-5303-S8
Oseberg	mottatt før OPV	tatt på sjø i lense	skrapet av flere kuler	Skrapet av en kule	Fra nett i container
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
Sum SVOC	23,1	3,95	4,08	3,93	3,85
Decalins	5,39	0,29	0,18	0,30	0,33
Naphthalenes	12,6	1,40	1,22	1,39	1,39
2-3 ring PAH	4,30	1,58	1,85	1,57	1,46
4-6 ring PAH	0,77	0,67	0,82	0,67	0,66

**Tabell B 2** Kjemisk sammensetning av utgangsolje og ISB residue ULSFO (i g analytt/kg olje).

SINTEF ID	2018-3881-S1	2018-5304	2018-5304-S1	2018-5304-S4	2018-5304-S6	2018-5304-S11
ULSFO	mottatt før OPV	Under utpumping til sjø	på sjø i lense - "tynn prøve"	på sjø bak lense - klumper	fra lense på dekk	samlet på sjø av "Utvær"
	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg	g/kg
Sum SVOC	19,8	20,7	9,99	10,8	11,3	9,69
Decalins	2,34	2,57	0,51	0,32	0,74	0,40
Naphthalenes	3,18	3,44	0,88	0,76	1,13	0,82
2-3 ring PAH	6,39	6,66	3,24	3,53	3,77	3,27
4-6 ring PAH	7,87	8,01	5,36	6,20	5,64	5,20

**Tabell B 3** Kjemisk sammensetning av sotprøver samlet opp på filter under brenning. Resultatene er gitt i g analytt/kg sot. Mengde sot er bestemt gravimetrisk.

	2018-3941	2018-3942	2018-3943
	Filter Oseberg drone 1	Filter ULSFO drone 1	Filter Bakgrunn
	g/kg	g/kg	g/kg
Sum SVOC	2,95	1,48	0,02
Decalins	ND	ND	ND
Naphthalenes	0,16	0,06	0,01
2-3 ring PAH	0,61	0,35	0,01
4-6 ring PAH	2,18	1,06	ND
Vekt sot (mg)	0,13	0,32	ND

**Tabell B 4** *Kjemisk sammensetning av pad-prøver tatt på sjø under ISB av Oseberg. Har ingen kvantitativ mengde av sot på pad slik resultatene er normalisere mot fluoranthene. Utgangsoljen er også tatt med. I tillegg er PM2.5 fra DustTrak-målinger på MOB-S er tatt med. Lokasjoner er gitt i Tabell 2.2 og Figur 3.1.*

Oseberg	2018-4052-S1 Oseberg mottatt før OPV	2018-5303-S4 Transect 1	2018-5303-S5 Transect 2	2018-5303-S7 Transect 3	2018-5303-S6 Transect 4
Sum SVOC	152	114	161	152	156
Decalins	0,00	0,05	0,08	0,00	0,07
Naphthalenes	77,5	58,2	82,6	77,5	76,3
2-3 ring PAH	70,6	53,2	75,3	70,6	76,0
4-6 ring PAH	3,50	2,70	2,94	3,50	3,27
PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> )		6,1	5,5	5,7	3,0

**Tabell B 5** *Kjemisk sammensetning av pad-prøver tatt på sjø under ISB av Oseberg. Har ingen kvantitativ mengde av sot på pad slik resultatene er normalisere mot fluoranthene. Utgangsoljen er også tatt med. I tillegg er PM2.5 fra DustTrak-målinger på MOB-S tatt med. Lokasjoner er gitt i Tabell 2.2 og Figur 3.1.*

ULSFO	2018-3881-S1 ULSFO mottatt før OPV	2018-5304-S9 ULSFO Transec 2	2018-5304-S10 ULSFO Transec 1
Sum SVOC	208	182	953
Decalins	0,07	0,02	36,6
Naphthalenes	96,9	77,4	522
2-3 ring PAH	107	90,4	328
4-6 ring PAH	3,69	14,3	65,8
PM2.5 (µg/m <sup>3</sup> )		6,7	9,5

Tabell B 6 SVOC-analyser av utgangsolje og residue fra ISB av Oseberg (i g analytt/kg olje)

Oseberg	2018-4052-S1 mottatt før OPV g/kg oil	2018-5303-S1 tatt på sjø i lense g/kg oil	2018-5303-S2 skrapet av flere kuler g/kg oil	2018-5303-S3 Skrapet av en kule g/kg oil	2018-5303-S8 fra nett i container g/kg oil
Decalin	0,40	0,02	0,01	0,01	0,02
C1-decalins	0,89	0,04	0,02	0,03	0,04
C2-decalins	1,14	0,05	0,03	0,05	0,06
C3-decalins	1,71	0,11	0,06	0,10	0,11
C4-decalins	1,26	0,08	0,08	0,10	0,11
Benzo(b)thiophene	ND	ND	ND	ND	ND
Naphthalene	0,77	0,05	0,06	0,05	0,05
C1-naphthalenes	3,08	0,23	0,16	0,22	0,24
C2-naphthalenes	4,02	0,40	0,32	0,39	0,41
C3-naphthalenes	3,14	0,42	0,39	0,42	0,42
C4-naphthalenes	1,63	0,30	0,29	0,30	0,27
Biphenyl	0,27	0,02	0,02	0,02	0,02
Acenaphthylene	0,02	0,02	0,04	0,02	0,02
Acenaphthene	0,02	ND	ND	ND	ND
Dibenzofuran	0,07	0,01	0,01	0,01	0,01
Fluorene	0,13	0,02	0,03	0,03	0,02
C1-fluorenes	0,32	0,07	0,07	0,07	0,07
C2-fluorenes	0,39	0,12	0,13	0,12	0,11
C3-fluorenes	0,31	0,11	0,13	0,11	0,11
Phenanthrene	0,26	0,09	0,11	0,09	0,09
Anthracene	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
C1-phenanthrenes/anthracenes	0,59	0,22	0,25	0,21	0,20
C2-phenanthrenes/anthracenes	0,61	0,27	0,30	0,27	0,25
C3-phenanthrenes/anthracenes	0,42	0,22	0,25	0,23	0,21
C4-phenanthrenes/anthracenes	0,27	0,16	0,21	0,14	0,15
Dibenzothiophene	0,05	0,01	0,02	0,01	0,01
C1-dibenzothiophenes	0,15	0,05	0,05	0,05	ND
C2-dibenzothiophenes	0,19	0,08	0,09	0,08	0,07
C3-dibenzothiophenes	0,14	0,07	0,08	0,07	0,06
C4-dibenzothiophenes	0,08	0,04	0,05	0,04	0,04
Fluoranthene	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Pyrene	0,02	0,02	0,03	0,02	0,02
C1-fluoranthrenes/pyrenes	0,12	0,08	0,10	0,09	0,08
C2-fluoranthrenes/pyrenes	0,16	0,11	0,13	0,11	0,10
C3-fluoranthrenes/pyrenes	0,15	0,11	0,13	0,10	0,11
Benz(a)anthracene	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Chrysene	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02
C1-chrysenes	0,07	0,06	0,07	0,06	0,06
C2-chrysenes	0,08	0,08	0,10	0,09	0,08
C3-chrysenes	0,06	0,06	0,07	0,06	0,06
C4-chrysenes	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04



Oseberg	2018-4052-S1 mottatt før OPV g/kg oil	2018-5303-S1 tatt på sjø i lense g/kg oil	2018-5303-S2 skrapet av flere kuler g/kg oil	2018-5303-S3 Skrapet av en kule g/kg oil	2018-5303-S8 fra nett i container g/kg oil
Benzo(b)fluoranthene	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Benzo(k)fluoranthene	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(e)pyrene	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02
Benzo(a)pyrene	ND	0,01	0,02	0,01	0,01
Perylene	ND	ND	ND	ND	ND
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	ND	0,01	0,01	0,01	0,01
Dibenz(a,h)anthracene	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(g,h,i)perylene	ND	0,01	0,02	0,01	0,01
Sum alle	23,1	3,95	4,08	3,93	3,85
Decalins	5,39	0,29	0,18	0,30	0,33
Naphthalenes	12,6	1,40	1,22	1,39	1,39
2-3 ring PAH	4,30	1,58	1,85	1,57	1,46
4-6 ring PAH	0,77	0,67	0,82	0,67	0,66

ND: Not detected

**Tabell B 7 SVOC-analyser av utgangsolje og residue fra ISB av ULSFO (i g analytt/kg olje)**

Oseberg	2018-3881-S1 mottatt før OPV g/kg oil	2018-5304-S1 på sjø i lense - "tynn prøve" g/kg oil	2018-5304-S4 på sjø bak lense - klumper g/kg oil	2018-5304-S6 fra lense på dekk g/kg oil	2018-5304-S11 samlet på sjø av "Utvær" g/kg oil
Decalin	0,10	0,02	0,01	0,02	0,01
C1-decalins	0,26	0,04	0,03	0,06	0,04
C2-decalins	0,40	0,07	0,04	0,11	0,07
C3-decalins	0,74	0,19	0,11	0,29	0,13
C4-decalins	0,84	0,19	0,13	0,26	0,16
Benzo(b)thiophene	ND	ND	ND	ND	ND
Naphthalene	0,05	0,02	0,02	0,02	0,02
C1-naphthalenes	0,30	0,07	0,05	0,09	0,06
C2-naphthalenes	0,81	0,20	0,16	0,27	0,18
C3-naphthalenes	1,19	0,34	0,29	0,43	0,31
C4-naphthalenes	0,83	0,25	0,25	0,32	0,25
Biphenyl	0,01	ND	ND	ND	ND
Acenaphthylene	ND	0,01	0,01	0,01	0,01
Acenaphthene	0,01	ND	ND	ND	ND
Dibenzofuran	ND	ND	ND	ND	ND
Fluorene	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
C1-fluorenes	0,11	0,04	0,04	0,04	0,03
C2-fluorenes	0,28	0,12	0,11	0,13	0,11
C3-fluorenes	0,30	0,15	0,16	0,17	0,15
Phenanthrene	0,11	0,05	0,05	0,06	0,05
Anthracene	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
C1-phenanthrenes/anthracenes	0,52	0,23	0,25	0,28	0,24
C2-phenanthrenes/anthracenes	1,49	0,75	0,77	0,84	0,72
C3-phenanthrenes/anthracenes	1,95	1,04	1,15	1,20	1,04
C4-phenanthrenes/anthracenes	1,25	0,68	0,79	0,83	0,74
Dibenzothiophene	ND	ND	ND	ND	ND
C1-dibenzothiophenes	0,05	0,02	0,02	0,03	0,02
C2-dibenzothiophenes	0,08	0,04	0,04	0,04	0,04
C3-dibenzothiophenes	0,10	0,06	0,06	0,06	0,05
C4-dibenzothiophenes	0,07	0,04	0,05	0,05	0,04
Fluoranthene	0,04	0,02	0,03	0,03	0,03
Pyrene	0,24	0,13	0,16	0,15	0,14
C1-fluoranthrenes/pyrenes	0,96	0,53	0,66	0,62	0,57
C2-fluoranthrenes/pyrenes	1,45	0,92	0,99	0,96	0,87
C3-fluoranthrenes/pyrenes	1,24	0,85	0,89	0,72	0,76
Benz(a)anthracene	0,14	0,10	0,12	0,11	0,10
Chrysene	0,19	0,13	0,15	0,14	0,13
C1-chrysenes	0,98	0,67	0,80	0,73	0,63
C2-chrysenes	1,14	0,90	1,15	1,00	0,88
C3-chrysenes	0,86	0,60	0,71	0,64	0,58
C4-chrysenes	0,36	0,26	0,29	0,27	0,26

Oseberg	2018-3881-S1 mottatt før OPV g/kg oil	2018-5304-S1 på sjø i lense - "tynn prøve" g/kg oil	2018-5304-S4 på sjø bak lense - klumper g/kg oil	2018-5304-S6 fra lense på dekk g/kg oil	2018-5304-S11 samlet på sjø av "Utvær" g/kg oil
Benzo(b)fluoranthene	0,04	0,03	0,04	0,04	0,03
Benzo(k)fluoranthene	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(e)pyrene	0,10	0,08	0,10	0,09	0,09
Benzo(a)pyrene	0,06	0,05	0,06	0,06	0,05
Perylene	0,03	0,02	0,03	0,02	0,02
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	ND	ND	ND	ND	ND
Dibenz(a,h)anthracene	ND	0,02	ND	ND	ND
Benzo(g,h,i)perylene	0,05	0,05	0,06	0,05	0,05
Sum alle	19,8	9,99	10,8	11,3	9,69
Decalins	2,34	0,51	0,32	0,74	0,40
Naphthalenes	3,18	0,88	0,76	1,13	0,82
2-3 ring PAH	6,39	3,24	3,53	3,77	3,27
4-6 ring PAH	7,87	5,36	6,20	5,64	5,20

ND: Not detected

**Tabell B 8** SVOC-analyser av sotfilter (i mg analytt/g sot)

	2018-3941	2018-3942	2018-3943
	Filter Oseberg drone 1	Filter ULSFO drone 1	Filter Bakgrunn
	mg/g sot	mg/g sot	mg/g sot
Decalin	ND	ND	ND
C1-decalins	ND	ND	ND
C2-decalins	ND	ND	ND
C3-decalins	ND	ND	ND
C4-decalins	ND	ND	ND
Benzo(b)thiophene	ND	ND	ND
Naphthalene	0,06	0,02	ND
C1-naphthalenes	0,04	0,02	ND
C2-naphthalenes	0,06	0,03	0,01
C3-naphthalenes	ND	ND	ND
C4-naphthalenes	ND	ND	ND
Biphenyl	0,04	0,01	ND
Acenaphthylene	0,03	0,01	ND
Acenaphthene	ND	ND	ND
Dibenzofuran	0,02	0,01	ND
Fluorene	0,02	0,01	ND
C1-fluorenes	0,01	0,01	ND
C2-fluorenes	ND	ND	ND
C3-fluorenes	ND	ND	ND
Phenanthrene	0,34	0,16	ND
Anthracene	0,07	0,02	ND
C1-phenanthrenes/anthracenes	0,05	0,03	ND
C2-phenanthrenes/anthracenes	ND	0,05	ND
C3-phenanthrenes/anthracenes	ND	0,03	ND
C4-phenanthrenes/anthracenes	ND	0,02	ND
Dibenzothiophene	0,02	ND	ND
C1-dibenzothiophenes	ND	ND	ND
C2-dibenzothiophenes	ND	ND	ND
C3-dibenzothiophenes	ND	ND	ND
C4-dibenzothiophenes	ND	ND	ND
Fluoranthene	0,44	0,23	ND
Pyrene	0,43	0,24	ND
C1-fluoranthrenes/pyrenes	0,08	0,04	ND
C2-fluoranthrenes/pyrenes	ND	0,04	ND
C3-fluoranthrenes/pyrenes	ND	ND	ND
Benz(a)anthracene	0,13	0,04	ND
Chrysene	0,13	0,05	ND
C1-chrysenes	ND	0,02	ND
C2-chrysenes	ND	0,02	ND
C3-chrysenes	ND	ND	ND
C4-chrysenes	ND	ND	ND
Benzo(b)fluoranthene	0,16	0,07	ND

	2018-3941	2018-3942	2018-3943
	Filter Oseberg drone 1	Filter ULSFO drone 1	Filter Bakgrunn
	mg/g sot	mg/g sot	mg/g sot
Benzo(k)fluoranthene	0,07	0,03	ND
Benzo(e)pyrene	0,13	0,05	ND
Benzo(a)pyrene	0,19	0,07	ND
Perylene	0,05	0,02	ND
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	0,18	0,07	ND
Dibenz(a,h)anthracene	ND	ND	ND
Benzo(g,h,i)perylene	0,19	0,09	ND
Sum alle	2,95	1,48	0,02
Decalins	ND	ND	ND
Naphthalenes	0,16	0,06	0,01
2-3 ring PAH	0,61	0,35	0,01
4-6 ring PAH	2,18	1,06	ND

ND: Not detected

**Tabell B 9** *Kjemisk sammensetning av pad-prøver tatt på sjø under ISB av Oseberg. Har ingen kvantitativ mengde av sot på pad slik resultatene er normalisere mot fluoranthene. Utgangsoljen er også tatt med. Lokasjoner er gitt i Tabell 2.2 og Figur 3.1*

Oseberg	2018-4052-S1	2018-5303-S4	2018-5303-S5	2018-5303-S7	2018-5303-S6
	Oseberg utgangsolje g/kg oil	Transec 1 - S4 g/kg oil	Transec 2 - S5 g/kg oil	Transec 3 - S6 g/kg oil	Transec 4 - S7 g/kg oil
Decalin	2,71	ND	0,01	0,02	0,02
C1-decalins	6,03	ND	0,03	0,05	0,06
C2-decalins	7,76	ND	ND	ND	ND
C3-decalins	11,6	ND	ND	ND	ND
C4-decalins	8,53	ND	ND	ND	ND
Benzo(b)thiophene	ND	ND	ND	ND	ND
Naphthalene	30,1	2,86	2,59	2,66	3,91
C1-naphthalenes	120	7,47	6,52	7,05	9,85
C2-naphthalenes	170	21,3	19,3	21,6	25,7
C3-naphthalenes	133	32,1	20,5	31,2	31,0
C4-naphthalenes	69,0	13,7	9,29	13,7	12,1
Biphenyl	18,9	4,52	2,83	4,49	4,16
Acenaphthylene	1,47	0,34	0,29	0,34	0,41
Acenaphthene	1,08	0,14	0,15	0,17	0,20
Dibenzofuran	5,37	3,16	2,55	3,31	3,58
Fluorene	7,21	2,66	2,00	2,71	2,75
C1-fluorenes	17,9	5,67	3,44	5,36	4,74
C2-fluorenes	21,7	ND	ND	ND	ND
C3-fluorenes	17,0	ND	3,72	5,02	4,74
Phenanthrene	22,5	10,0	7,99	10,0	11,1
Anthracene	0,79	0,27	ND	ND	ND
C1-phenanthrenes/anthracenes	50,0	13,4	9,15	14,1	13,3
C2-phenanthrenes/anthracenes	51,9	12,4	6,85	10,4	10,6
C3-phenanthrenes/anthracenes	36,2	ND	2,42	3,16	3,46
C4-phenanthrenes/anthracenes	22,9	ND	0,53	ND	ND
Dibenzothiophene	4,69	2,46	1,87	2,55	2,65
C1-dibenzothiophenes	12,8	8,89	5,32	8,55	7,98
C2-dibenzothiophenes	16,9	4,89	3,10	4,61	4,39
C3-dibenzothiophenes	11,8	1,76	0,99	1,21	1,21
C4-dibenzothiophenes	7,03	ND	ND	ND	ND
Fluoranthene	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
Pyrene	1,42	0,71	0,56	0,70	0,75
C1-fluoranthrenes/pyrenes	10,8	1,79	0,69	1,12	0,95
C2-fluoranthenes/pyrenes	13,9	ND	ND	ND	ND
C3-fluoranthenes/pyrenes	13,2	ND	ND	ND	ND
Benz(a)anthracene	0,52	ND	0,12	0,20	0,19
Chrysene	1,24	ND	0,07	0,07	0,06
C1-chrysenes	5,62	ND	0,28	0,18	ND
C2-chrysenes	6,70	ND	ND	ND	ND
C3-chrysenes	4,73	ND	ND	ND	ND

Oseberg	2018-4052-S1 Oseberg utgangsolje g/kg oil	2018-5303-S4 Transec 1 - S4 g/kg oil	2018-5303-S5 Transec 2 - S5 g/kg oil	2018-5303-S7 Transec 3 - S6 g/kg oil	2018-5303-S6 Transec 4 - S7 g/kg oil
C4-chrysenes	3,48	ND	ND	ND	ND
Benzo(b)fluoranthene	0,71	ND	ND	ND	ND
Benzo(k)fluoranthene	0,18	ND	ND	ND	ND
Benzo(e)pyrene	1,27	ND	ND	ND	ND
Benzo(a)pyrene	0,40	ND	ND	ND	ND
Perylene	0,09	ND	ND	ND	ND
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	ND	ND	ND	ND	ND
Dibenz(a,h)anthracene	ND	ND	ND	ND	ND
Benzo(g,h,i)perylene	0,48	ND	ND	ND	ND
Sum alle	953	152	114	156	161
Decalins	36,6	ND	0,05	0,07	0,08
Naphthalenes	522	77,5	58,2	76,3	82,6
2-3 ring PAH	328	70,6	53,2	76,0	75,3
4-6 ring PAH	65,8	3,50	2,70	3,27	2,94

**Tabell B 10** *Kjemisk sammensetning av pad-prøver tatt på sjø under ISB av ULSFO. Har ingen kvantitativ mengde av sot på pad slik resultatene er normalisere mot fluoranthene. Utgangsoljen er også tatt med. Lokasjoner er gitt i Tabell 2.2 og Figur 3.1*

ULSFO	2018-3881-S1 ULSFO mottatt før OPV	2018-5304-S9 Transec 2 - S9	2018-5304-S10 Transec 1 - S10
Decalin	0,19	0,02	0,02
C1-decalins	0,51	0,05	ND
C2-decalins	0,79	ND	ND
C3-decalins	1,44	ND	ND
C4-decalins	1,63	ND	ND
Benzo(b)thiophene	ND	ND	ND
Naphthalene	0,60	3,54	1,72
C1-naphthalenes	3,36	10,6	5,45
C2-naphthalenes	9,47	26,3	18,6
C3-naphthalenes	14,0	28,5	25,5
C4-naphthalenes	9,65	27,9	26,1
Biphenyl	0,14	3,71	2,94
Acenaphthylene	ND	0,46	0,35
Acenaphthene	0,10	0,28	0,25
Dibenzofuran	0,09	4,00	3,06
Fluorene	0,44	3,34	2,58
C1-fluorenes	1,65	6,42	6,09
C2-fluorenes	4,35	14,3	9,41
C3-fluorenes	4,62	5,22	4,10
Phenanthrene	2,59	15,2	11,2
Anthracene	0,25	0,36	0,36
C1-phenanthrenes/anthracenes	12,3	17,4	15,7
C2-phenanthrenes/anthracenes	35,2	12,5	12,5
C3-phenanthrenes/anthracenes	46,1	4,22	ND
C4-phenanthrenes/anthracenes	29,5	1,14	ND
Dibenzothiophene	0,12	3,74	2,78
C1-dibenzothiophenes	1,20	8,73	8,02
C2-dibenzothiophenes	1,96	6,36	5,87
C3-dibenzothiophenes	2,48	ND	1,99
C4-dibenzothiophenes	1,72	ND	3,26
Fluoranthene	1,00	1,00	1,00
Pyrene	6,64	0,75	0,80
C1-fluoranthrenes/pyrenes	25,6	1,61	2,14
C2-fluoranthrenes/pyrenes	38,6	ND	2,13
C3-fluoranthrenes/pyrenes	33,1	ND	1,77
Benz(a)anthracene	3,47	ND	0,19
Chrysene	4,60	0,12	0,34
C1-chrysenes	24,1	0,21	1,27
C2-chrysenes	28,1	ND	2,28
C3-chrysenes	21,1	ND	1,29
C4-chrysenes	8,79	ND	ND
Benzo(b)fluoranthene	1,09	ND	ND



ULSFO	2018-3881-S1	2018-5304-S9	2018-5304-S10
	ULSFO mottatt før OPV	Transec 2 - S9	Transec 1 - S10
Benzo(k)fluoranthene	ND	ND	ND
Benzo(e)pyrene	2,98	ND	0,39
Benzo(a)pyrene	1,55	ND	0,29
Perylene	0,54	ND	ND
Indeno(1,2,3-c,d)pyrene	ND	ND	ND
Dibenz(a,h)anthracene	ND	ND	ND
Benzo(g,h,i)perylene	1,51	ND	0,40
Sum alle	389	208	182
Decalins	4,56	0,07	0,02
Naphthalenes	37,0	96,9	77,4
2-3 ring PAH	145	107	90,4
4-6 ring PAH	203	3,69	14,3

ND: Not detected

**C Vedlegg C Oversikt over komponenter analysert i sot og residue.**

	Compound	Abb	
GC/MS-analyse			
	Decalins	Decalin C1-decalins C2-decalins C3-decalins C4-decalins	DE DE1 DE2 DE3 DE4
Naphthalenes	Naphthalene	N	
	C1-naphthalenes	N1	
	C2-naphthalenes	N2	
	C3-naphthalenes	N3	
	C4-naphthalenes	N4	
2-3 ring PAHs	Benzo(b)thiophene	BT	
	Biphenyl	B	
	Acenaphthylene	ANY	
	Acenaphthene	ANA	
	Dibenzofuran	DBF	
	Fluorene	F	
	C1-fluorenes	F1	
	C2-fluorenes	F2	
	C3-fluorenes	F3	
	Phenanthrene	P	
	Anthracene	A	
	C1-phenanthrenes/anthracenes	P1	
	C2-phenanthrenes/anthracenes	P2	
	C3-phenanthrenes/anthracenes	P3	
	C4-phenanthrenes/anthracenes	P4	
	Dibenzothiophene	D	
	C1-dibenzothiophenes	D1	
	C2-dibenzothiophenes	D2	
	C3-dibenzothiophenes	D3	
	C4-dibenzothiophenes	D4	
	4-6 ring PAHs	Fluoranthene	FL
		Pyrene	PY
		C1-fluoranthrenes/pyrenes	FL1
C2-fluoranthrenes/pyrenes		FL2	
C3-fluoranthrenes/pyrenes		FL3	
Benz[a]anthracene		BA	
Chrysene		C	
C1-chrysenes		C1	
C2-chrysenes		C2	
C3-chrysenes		C3	
C4-chrysenes		C4	
Benzo[b]fluoranthene		BBF	
Benzo[k]fluoranthene		BKF	
Benzo[e]pyrene		BEP	
Benzo[a]pyrene		BAP	
Perylene		PE	
Indeno[1,2,3-c,d]pyrene		IN	
Dibenz[a,h]anthracene	DBA		
Benzo(g,h,i)perylene	BPE		
GC/FID	Screening total hydrokarbon (THC, C10-C36)		

## D Vedlegg D Carbon Partitioning Calculations

### D.1 Estimating Black carbon

For both ISB 1 and 2 black carbon emission rates were calculated by balancing the amount of carbon present in the fuel burned (oil) versus the smoke. When oil, which is made up of approximately 85% carbon, is burned the carbon will be partitioned into portions of CO<sub>2</sub>, CO and smoke particulate (black carbon). A complete combustion will generate no CO or smoke particulate. A poor combustion will be oxygen starved and generate smoke particulate and CO. By converting the measured amounts of CO<sub>2</sub>, CO and smoke particulate (PM 2.5) in the smoke plume to masses of carbon, we can calculate the emission factors for each. The conversions from volumetric measurements to mass involved using the standard gas law equation for both CO<sub>2</sub> and CO. The PM 2.5 measurement was corrected using the gravimetric data from the particulate filter. Due to a lag in sensor response for the CO<sub>2</sub> sensors, the latter portion of data from long drone flight transects through the smoke plume were selected.

For ISB 1 (Oseberg 200+) two flight transects through the smoke plume were selected, which based on the heat flux record of the burn were collected at different stages of the ISB.

Tabell D 1 Carbon partitioning calculations from ISB of Oseberg. Two transects selected.

	ISB1F2 10:36-10:37	Mass/m <sup>3</sup>	Mass of C/m <sup>3</sup>	% of carbon in smoke plume	BC emitted per mass of fuel
PM2,5	15,6 mg/m <sup>3</sup> (corrected)	0,016 g	0,016 g	12,0 %	10,2 %
Excess CO <sub>2</sub>	220 ppmv	0,41 g	0,113 g	86,3 %	
CO	4,5 ppmv	0,005 g	0,002 g	1,8 %	
			0,130	Total C in grams/m <sup>3</sup>	
	ISB1F2 10:54-10:55	Mass/m <sup>3</sup>	Mass of C/m <sup>3</sup>	% of carbon in smoke plume	BC emitted per mass of fuel
PM2,5	12,4 mg/m <sup>3</sup> (corrected)	0,012 g	0,012 g	10,8 %	9,2 %
Excess CO <sub>2</sub>	192 ppmv	0,36 g	0,10 g	85,6 %	
CO	7,9 ppmv	0,009 g	0,004 g	3,5 %	
			0,115	Total C in g/m <sup>3</sup>	
0,0673	ISB1 Average Heat Flux 10:22-11:05				
0,0445	ISB1 Heat Flux 10:54-10:55				
0,0817	ISB1 Heat Flux 10:36-10:37				

For ISB 2 (ULFSO Fresh) two flight transects that well defined the diameter of the smoke plume, both vertical and horizontal, were selected during the portion of the ISB where the highest heat flux was recorded. The data from those two were very similar and were averaged.

Tabell D 2 Carbon partitioning calculations from ISB of ULSFO.

	ISB2F2 18:44 - 18:46	Mass/m <sup>3</sup>	Mass of C/m <sup>3</sup>	% of carbon in smoke plume	BC emitted per mass of fuel
PM2,5	13,2 mg/m <sup>3</sup> (corrected)	0,013 g	0,013 g	12,6 %	10,7 %
Excess CO <sub>2</sub>	174 ppmv	0,33 g	0,09 g	84,9 %	
CO	5,2 ppmv	0,006 g	0,003 g	2,5 %	
			0,105	Total C in g/m <sup>3</sup>	

## D.2 Estimating amount burned oil

Measuring the rate of smoke particulate (PM 2.5), CO<sub>2</sub> and CO generated as a volume per time (and then converted to mass) was conducted for ISB2. The later drone flight transects of ISB2 better defined the dimensions of the smoke plume cross sectional area, which enabled a calculation of the total amount of smoke being emitted per unit of time. By also including carbon partitioning calculations a burn rate of oil can be inferred. So far, a satisfactory set of transects that well define the smoke plume cross-sectional geometry for ISB 1, has not been identified. Additional analysis of the data set may yet yield that information.

For ISB 2 (ULFSO Fresh) two different transects (horizontal and vertical), which also had very similar average concentrations of PM<sub>2.5</sub>, CO<sub>2</sub> and CO indicated that the smoke plume diameter was 70 meters. This yields a smoke plume cross-sectional area of 3,850 m<sup>2</sup>. Multiply that by the average wind speed at the time of 4.2 m/s yields a smoke volume passing the measuring transects of 16,200 m<sup>3</sup>. By taking the average measurements of PM<sub>2.5</sub>, CO<sub>2</sub>, and CO and converting to mass for each a total emission factor per unit time was generated (0.213 kg of PM 2.5, 5.28 kg of CO<sub>2</sub> and 0.1 kg of CO per second). Then by balancing the amount of carbon burned to that that was detected yields a calculated burn rate of 1.99 kg of oil per second (during the period when the transects were conducted). By using the heat flux record of the ISB, this preliminary calculation indicates that 3,300 m<sup>3</sup> of UFLSO burned. However, two areas of the calculation should receive additional attention: 1) the sensor lag for CO<sub>2</sub> appears to under report the amount of CO<sub>2</sub> by approximately 20% (based on use of this same sensor where the feed rate of fuel was known); and 2) confirm that there is a linear response in the amount of oil burned relative to the measured heat flux.

## D.3 Beregningsmetode brenneeffektivitet

Metoden baserer seg på at man vet omtrent hvor mye residue som er igjen etter brenning.

Formelen for brenneeffektivitet (BE) er

$$\% \text{ BE} = ((\text{mengde olje til ISB} - \text{mengde ISB residue}) / \text{mengde olje til ISB}) * 100\%$$

For Oseberg:

Ca 6000 L olje i lensa før brenning (1 kg: 6000 L \* 0,891 kg/L = 5346 kg)

Antar at det er ca 1000 kg igjen av oljen etter brenning:

523 kg residue (nett veid av NOFO)

Ca 100 kg på lensa etter brenning

Ca 400 L (dvs 360 kg) lenselekkasje (estimat i logg (NOFO, 2018))

Dersom man korrigerer for tetthet:

$$\text{BE} = ((5346 - 983) / 5346) * 100\% = 82\%$$

Eventuelt uten å ta hensyn til tetthetskorrigering:

$$\text{BE} = ((6000 - 1000) / 6000) * 100\% = 83\%$$

Det er en del usikkerhet i alle ledd, slik at ca 80% BE vil være et "godt nok" estimat.