



Københavns Lufthavne A/S

Måling og karakterisering af partikler fra fly og kørende materiel i Københavns Lufthavn

**Projekt nr.: 112-21152
Målinger udført i 2012 - 2014**

Kontakt

Afdeling: Luft- & Miljøteknik
Projektleder: Karsten Fuglsang
Telefon: 43 26 71 48 / 22 69 71 48
E-mail: kfu@force.dk
Web: www.force.dk
Park Allé 345, 2605 Brøndby

Resumé

Målingerne på handlingkøretøjet (push-back traktor) blev gennemført som planlagt, herunder både størrelsesfordelinger og SEM/EDX samt separation af partikelantallet i hhv. flygtige og ikke-flygtige partikler. Målingerne viste følgende:

- Partiklerne fra push-back traktoren består vægtmæssigt langt overvejende af kulstof (90-95 %) og oxygen (3-8 %) og i mindre grad af silicium (1-2 %) og fluor (0,5 %). Dette tilskrives, at man i nogle smøremidler tilsætter fluorerede forbindelser i form af teflon for at opnå de tilsigtede egenskaber for produktet.
- Størstedelen af partikelantallet i udstødningen blev fundet at være i partikelstørrelsen 50-150 nm. Dette tyder på, at den forholdsvis lange opholdstid i udstødningssystemet på push-back traktoren foranlediger, at de primære partikler agglomererer til større partikler, inden de emitteres.
- Ved brug af thermodenuder blev der fundet en andel af fordampelige partikler (hvoraf hovedparten forventes at være smøreoliepartikler) på 35 %, når partikelkoncentrationen i udstødningen fra push-back traktoren blev målt efter partikelantal og 49 %, når partikelkoncentrationen blev målt efter masse.
- Der blev ikke fundet detekterbare mængder af svovl i partiklerne fra push-back traktoren.

Målingerne på flymotor blev gennemført med ændringer. Målingerne blev foretaget som en 20 minutters punktmåling på en Auxiliary Power Unit (APU) på en Airbus A330 tilhørende SAS i stedet for - som planlagt - at blive udført som en langtidsmåling med og uden thermodenuder på en hovedmotor. Målingerne blev foretaget uden brug af thermodenuder, da der ikke kunne afsættes flytid til en fuld undersøgelse. Der blev bestemt både størrelsesfordelinger og taget SEM/EDX analyser. Målingerne på flymotorerne viste, at:

- Kildebestemmelse ikke var mulig, da der ikke blev fundet barium i partiklerne fra flyet. Dette umuliggjorde brugen af barium til at identificere kilden.
- Størstedelen af partikelantallet i udstødningen fra APU'en blev fundet at være i størrelsesintervallet 7-30 nm.
- Svovlindholdet i partiklerne var signifikant. Det vægtmæssige indhold af svovl var 3-5 % i de ultrafine partikler (< 100 nm), og 1-2 % i partiklerne i området 100-400 nm.

Målinger på forpladsen blev foretaget uden brug af thermodenuder. Der blev bestemt størrelsesfordelinger og udført SEM/EDX analyser på summen af flygtige og ikke-flygtige partikler. Målinger på køretøj med og uden partikelfilter blev foretaget som planlagt (størrelsesfordelinger). Målingerne på forpladsen viste, at:

- Størstedelen af partikelantallet på forpladsen blev fundet at være i størrelsesintervallet 7-30 nm.
- Mængden af svovl i partiklerne målt på forpladsen, sammenholdt med det store antal af partikler < 30 nm indikerer, at størstedelen af partiklerne på forpladsen stammer fra flymotorer.
- Koncentrationen varierede mellem ca. 2×10^3 og 1×10^5 partikler/cm³ med en gennemsnitlig koncentration på $3,15 \times 10^4$ partikler/cm³, målt i perioden fra den 1. - 6. maj 2014. De målinger, der løbende udføres med CPC (Condensation Particle Counter) på forpladsen, viser for samme periode $1,30 \times 10^4$ partikler/cm³. Forskellen mellem måleresultaterne fra de to instrumenter tilskrives primært forskellen i sampling højde, og sekundært, at de to måleprincipper er forskellige. Koncentrationsvariationerne følger hinanden nøje i hele måleperioden.

Målingerne af filtereffektiviteten er udført ved måling på et dieselpartikelfilter monteret på en snerydnings-traktor. Målingerne er udført før og efter partikelfilter med henblik på at bestemme filterets effektivitet.

- Filteffektiviteten på det undersøgte partikelfilter var 67 % bestemt efter partikelantal af faste (ikke-flygtige) partikler.
- Andelen af flygtige forbindelser i partiklerne blev målt til at være 6-9 % højere efter filteret. Dette stemmer godt overens med, at filteret fjerner en del af de faste kerner, men filteret kan ikke i lige så høj grad reducere de flygtige stoffer, som derfor vil udgøre en større andel efter filteret.

Analyse af massefraktioner af elementer blev bestemt ved EDX for alle lokaliteter på følgende fem partikel-fraktioner: 28-54 nm; 54-92 nm; 92-155 nm; 160-260 nm; 260-380 nm.

FORCE Technology

4. juli 2014

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Karsten Fuglsang".

Karsten Fuglsang
F&U Koordinator

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Thomas Rosenørn".

Thomas Rosenørn
PhD, projektleder

Indholdsfortegnelse

Resumé	2
1 Indledning	5
1.1 Formål.....	5
2 Beskrivelse af målestederne	6
2.1 Målepakke 1 og 4 – CPHs autoværksted – Push-back traktor og filtereffektivitet	6
2.2 Målepakke 2 – SAS hangar - Flymotor	7
2.3 Målepakke 3 - Forplads - kildebestemmelse	8
3 Målingernes udførelse.....	8
3.1 Målemetode.....	8
4 Resultater	11
4.1 Målepakke 1 – CPH autoværksted - Push-back traktor	11
4.2 Målepakke 2 - SAS hangar - Flymotor	14
4.3 Målepakke 3 – Forplads - kildebestemmelse.....	17
4.4 Målepakke 4 – CPH autoværksted – filtereffektivitet	21

1 Indledning

FORCE Technology har for Københavns Lufthavne A/S ved Peter Schøn udført måling af luftkvalitet i udeluften ved Københavns Lufthavne A/S. Målingerne er udført i 2012 - 2014.

1.1 Formål

Hovedformålet med målingerne var todelt. For det første blev det forsøgt at klarlægge, hvor stor en del af partiklerne på lufthavnens forplads, der består af carbon og hvor stor en del, der består af svovl (sulfat). For det andet forsøges det at bestemme, hvor meget af hver af de to komponenter, der kan tilskrives de to forskellige hovedkilder (flymotorer vs. handling køretøjer).

Opgaven er opdelt i tre hovedmålepakker (målepakke 1 - 3) og én supplerende målepakke (målepakke 4). De tre hovedmålepakker vil tilsammen forsøge at belyse de ovennævnte problemstillinger, og den supplerende målepakke vil måle effektiviteten af et partikelfilter monteret på en nyindkøbt traktor tilhørende CPH (målepakke 4).

2 Beskrivelse af målestederne

2.1 Målepakke 1 og 4 – CPHs autoværksted – Push-back traktor og filtereffektivitet

Målingerne blev foretaget den 13. maj 2014 ved CPHs autoværksted. Køretøjerne var placeret uden for porten og måleudstyret placeret indenfor. Dette blev gjort af hensyn til autoværkstedets ansatte (minimering af udstødningsgas) og af hensyn til udstyret (temperatur, regn og vind).



Figur 1. Push-back traktor samt måleudstyr (venstre side) ved CPH autoværksted

Filtertesten blev udført den 13. maj 2013 ved måling med henholdsvis uden et dieselpartikelfilter monteret på en snerydningstraktor. Målemetoden er beskrevet i afsnit 3.1. Der blev anvendt for-tyndingsudstyr og thermodenuder som vist i Figur 4 og 5.

2.2 Målepakke 2 – SAS hangar - Flymotor

Målingerne på flymotoren blev - efter længere tids forhandling og et par forsøg - udført som målinger på en auxiliary power unit (APU) på en airbus A330 udlånt af SAS. Målingerne blev foretaget den 12. december 2013 på standpladsen for motortest foran hangarene tilhørende SAS.

For at kunne udføre målingerne, var det nødvendigt at løfte udstyret samt to personer op til udstødningen på APU enheden.



Figur 2. Udtagning af partikler med sample probe ved udstødningen fra APU'en på en Airbus A330.

2.3 Målepakke 3 - Forplads - kildebestemmelse

Målinger på forpladsen blev foretaget den 1. - 6. maj 2014 fra CPHs eksisterende målestation mellem gate B2 og gate B4. Udstyret var opsat inde i målestationen, og sampling proben var ført ud gennem skuret i arbejdsøjde med sampling inlet 1,5 meter over terrænen, se Figur 3.



Figur 3. Målestation på forpladsen ved B4.

3 Målingernes udførelse

3.1 Målemetode

Måling af partikler ved brug af Electrical Low Pressure Impactor (ELPI)

ELPI-instrumentet klassificerer partiklerne efter deres aerodynamiske diameter i intervallet 7 - 10.000 nm i 12 størrelses grupper, som vist i tabellen på næste side. De opsamlede partiklers fysisk-kemiske egenskaber kan efterfølgende karakteriseres ved kemisk analyse og deres morfologi og elementar-komposition kan analyseres ved hjælp af f.eks. SEM (Scanning Electron Microscopy) kombineret med EDX (Energy Dispersive X-ray spectrometry). Hvis man ønsker mere information om partiklernes beskaffenhed kan dette opnås ved brug af FIB (Focused Ion Beam) til at skære i partiklerne og undersøge deres indre morfologi og struktur.

ELPI-instrumentet måler partiklerne ved at give dem en elektrisk ladning og efterfølgende lade dem passere gennem de 12 impaktor-trin, som hver især er forbundet til et elektrometer med høj præcision. Hvert trin i impaktoren er forsynet med en aluminiumsfolie, som bruges til den efterfølgende analyse med undtagelse af det sidste trin, hvor partikler under 28 nm fanges på et filter. Omregningsfaktorer baseret på kalibreringer anvendes til at omregne de målte strømstyrker til koncentrationer.

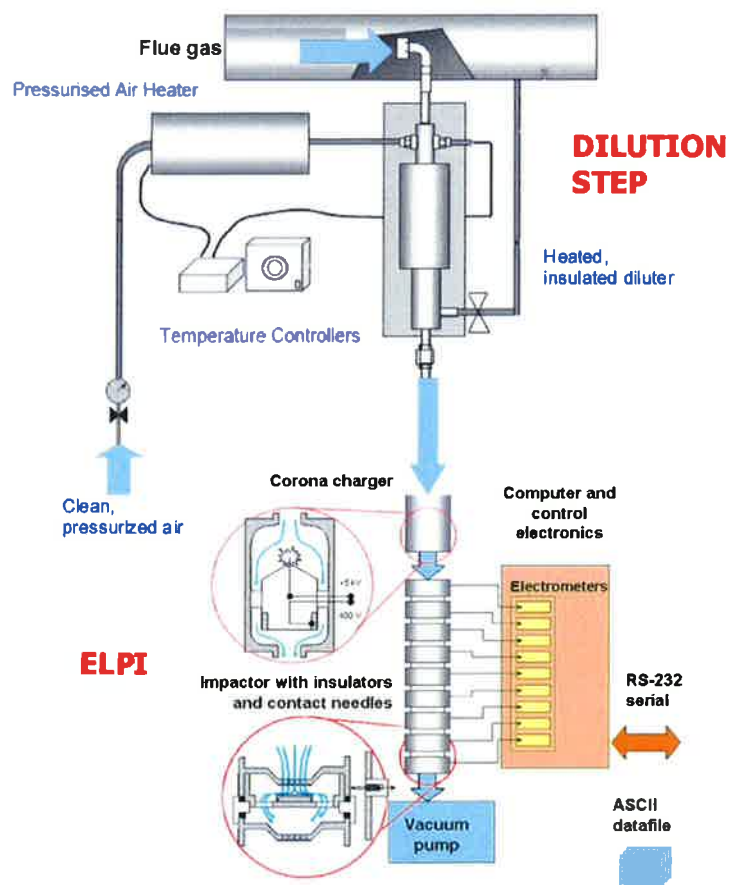
Impactor stage	diameter interval (nm)	Real-time measurement	SEM analysis
Filter	7 - 28	+	-
1	28 - 54	+	+
2	54 - 92	+	+
3	92-155	+	+
4	160- 260	+	+
5	260-380	+	+
6	380- 610	+	+
7	610-950	+	+
8	950 -1590	+	+
9	1600-2400	+	+
10	2400-4000	+	+
11	4000-9900	+	+
12	> 9900	-	-

Tabel 1 De 12 størrelsesgrupper, som partikler klassificeres efter i ELPI-instrumentet. Partiklerne klassificeres efter deres aerodynamiske diame-ter i intervallet 7 - 10.000 nm. I tabellens sidste kolonne er vist, hvilke trin der kan analyseres ved brug af SEM/EDX og med fed er markeret, hvilke der analyseres i dette studie.

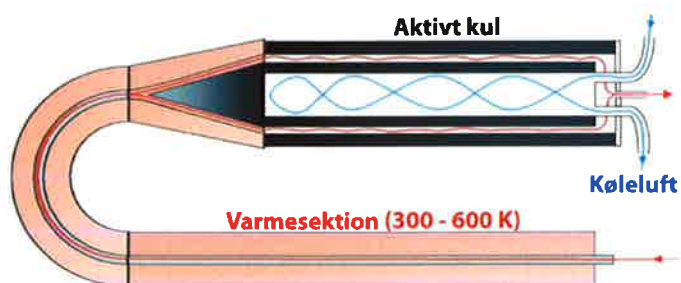
Resultater fra ELPI målinger er typisk angivet som antalskoncentration som funktion af størrelse (opdelt i 12 størrelsesgrupper). Massekoncentrationer kan beregnes ud fra den målte antalskoncentration og størrelsesfordelingen, hvis partiklernes densitet er kendt eller antages. Når der forekommer et meget stort antal partikler i intervallet < 100 nm, bliver antalsmålingen på de store partikelfraktioner (> 2,5 µm) for usikker til, at der kan foretages en omregning til massekoncentrationen af de store partikler. Dette skyldes, at ganske få store partikler vil vægte ganske meget i forhold til de mindre fraktioner. I denne rapport er koncentration efter masse, areal og volumen følgelig beregnet ud fra det målte antal af partikler mindre end 2,0 µm.

Massen er beregnet under anvendelse af en anslået densitet på 1 g/cm³. SEM-EDX analysen, som foretages på udtagne prøver med de fem nederste trin fra ELPI impaktoren, viser elementarkompositionen fra atomnummer 5 (bor) og opefter. Aluminium vil som udgangspunkt ikke være omfattet, da opsamlingsmaterialet i ELPI som standard er aluminiumsfolier. Detektionsgrænsen er for hvert grundstof ca. 0,1 % w/w.

Figur 4 viser opstillingen anvendt til måling før og efter dieselpartikelfilter. Tør, HEPA-filtreret trykluft blev tilsat fortyndingsenhederne, således at det samlede fortyndingsforhold var 1:100, og således at vanddugpunktet var mindre end 2 °C. Det første fortyndingstrin er opvarmet til 120 °C.



Figur 4. Opstilling til måling og opsamling af partikler i udstødningsgas. På tegningen er det opvarmede fortyndertrin vist. Denne blev ved målingen efterfulgt af identisk, ikke-opvarmet fortyndertrin.



Figur 5. Skematisk oversigt over den anvendte thermodenuder fra Dekati.

Ved hjælp en thermodenuder (Figur 5), som kan sættes ind imellem fortyndingsudstyret (Figur 4) og ELPI, kan det måles, hvor stor en andel af partiklerne, der består af semi-volatile forbindelser. Partiklerne behandles i en varmesektion hvor semi-volatile stoffer vil fordampe til gasfasen, hvorefter aerosolen føres gennem en nedkølet adsorptionsenhed indeholdende aktivt kul, hvor de fordampede stoffer stripes fra gasfasen inden måling i partikeltælleren (ELPI).

4 Resultater

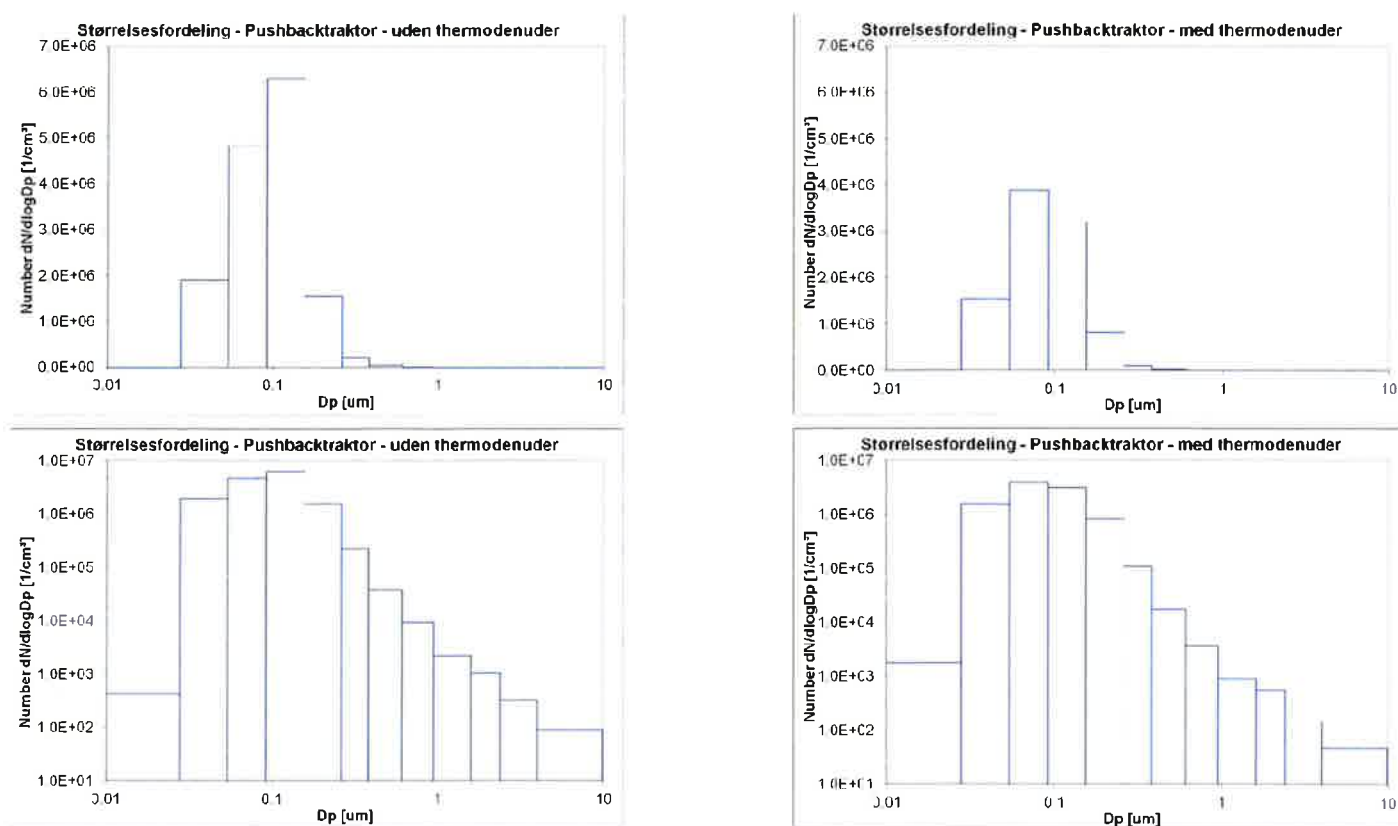
I dette afsnit vil resultaterne for hver enkelt målepakke kort blive beskrevet. Resultaterne er beskrevet separat for hver målepakke.

4.1 Målepakke 1 – CPH autoværksted - Push-back traktor

Måleresultaterne er vist nedenfor.

Sammenholdt viser resultaterne, at den største del af massen fra push-back traktoren består af kulstof. De viser også, at størrelsesfordelingen, som forventet, skifter mod mindre partikler ved thermodenuder behandling. Dette sker primært ved fordampning af kulstofforbindelser, som kommer til udtryk ved, at massefraktionen af C (kulstof) er mindre for små partikler efter thermodenuderen.

Partiklerne fra push-back traktoren består vægtmæssigt langt overvejende af kulstof (90 – 95 %) og oxygen (3 – 8 %) og i mindre grad af silicium (1 – 2 %) og fluor (0,5 %). Da der ikke normalt tilsættes fluor-forbindelser til brændstof, tilskrives dette, at man i nogle smøremidler tilsætter fluorerede forbindelser i form af teflon for at opnå de tilsigtede egenskaber for produktet.

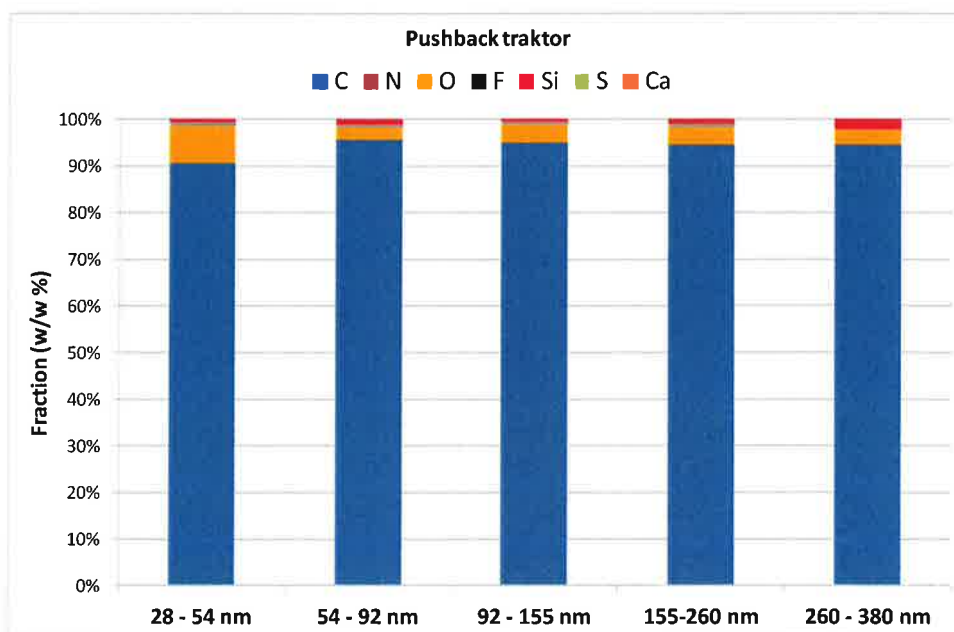


Figur 6. Partikel-antal-størrelses fordelinger målt med og uden thermodenuder efter push-back traktor. Venstre side er data målt uden thermodenuder. Højre side er efter thermodenuder. De øverste to grafer er på lineær skala. De nederste to grafer på logaritmisk skala.

Koncentration	Enhed	Sum af faste og Semi-volatile partikler (målt uden thermodenuder)	Faste partikler (målt med thermodenuder)	Fordampnet andel
Antal	1/cm ³	3,48 x 10 ⁶	2,27 x 10 ⁶	35 %
Masse (PM ₂)	mg/m ³	5,6	2,8	50 %
Areal	µm ² / cm ³	1,53 x 10 ⁵	8,30 x 10 ⁴	46 %
Volumen	µm ³ / cm ³	5,6 x 10 ³	2,82 x 10 ³	50 %

Tabel 2. Partikelkoncentrationer målt med og uden thermodenuder efter push-back traktor. Koncentrationerne er målt efter antal, diameter, areal, volumen og masse. Tabellen viser også, hvor stor en andel, der fordampes i thermodenuderen. Koncentration efter masse, areal og volumen er beregnet ud fra det målte antal af partikler mindre end 2,0 µm. Massen er beregnet under anvendelse af en anslået densitet på 1 g/cm³.

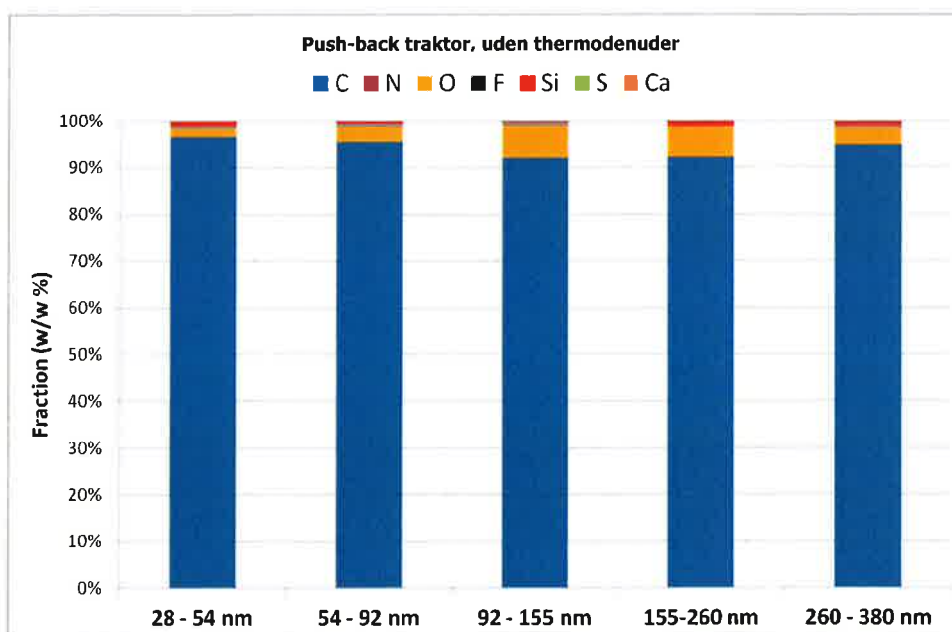
Figur 7 og Tabel 3 viser den målte fordeling af grundstoffer i udstødningen fra en push-back traktor målt på ikke-flygtige partikler. Figur 8 og Tabel 4 viser fordelingen af grundstoffer i udstødningen fra en push-back traktor målt på summen af flygtige og ikke-flygtige partikler.



Figur 7. Fordelingen af grundstoffer i udstødningen fra en push-back traktor målt på ikke-flygtige partikler (målt med thermodenuder). Grafen er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.

Element	28 - 54 nm	54 - 92 nm	92 - 155 nm	155-260 nm	260 - 380 nm
C	90.7	95.7	95.0	94.7	94.7
N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
O	8.0	2.7	4.1	3.6	3.0
F	0.5	0.5	0.5	0.6	0.0
Si	0.8	1.1	0.5	1.0	2.2
S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ca	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabel 3. Fordelingen af grundstoffer i udstødningen fra en push-back traktor målt på ikke-flygtige partikler. Tabellen er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.



Figur 8. Fordelingen af grundstoffer i udstødningen fra en push-back traktor målt på summen af flygtige og ikke-flygtige partikler. Grafen er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.

Element	28 - 54 nm	54 - 92 nm	92 - 155 nm	155-260 nm	260 - 380 nm
C	96.7	95.6	92.1	92.3	94.9
N	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
O	1.8	3.3	6.9	6.5	3.6
F	0.4	0.7	0.8	0.0	0.3
Si	1.2	0.5	0.2	1.2	1.1
S	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1
Ca	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabel 4. Fordelingen af grundstoffer i udstødningen fra en push-back traktor målt på summen af flygtige og ikke-flygtige partikler. Tabellen er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.

4.2 Målepakke 2 - SAS hangar - Flymotor

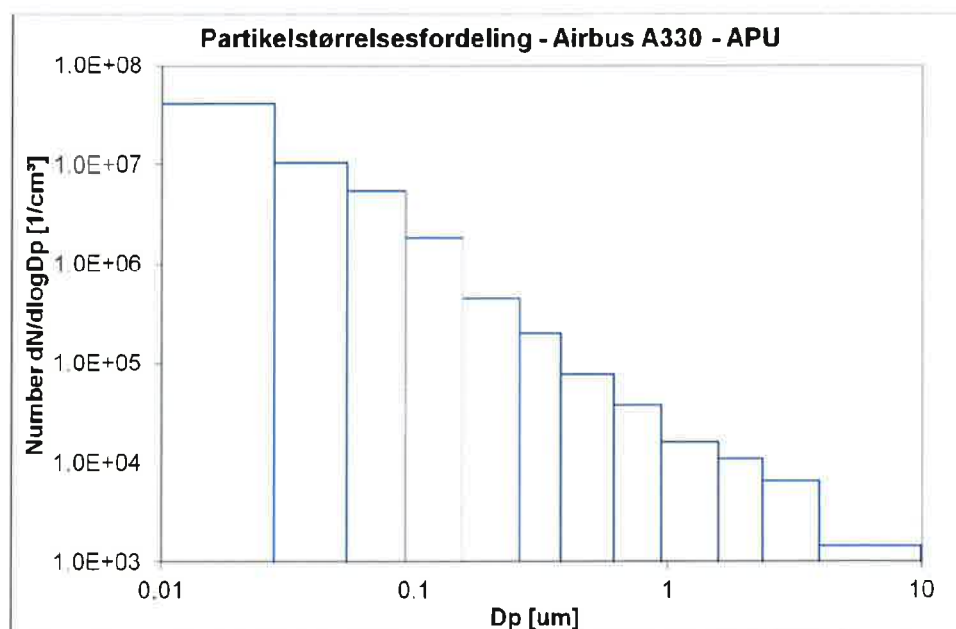
Målingerne efter flymotoren blev foretaget efter APU'en på en Airbus A330 på motor testpladsen foran de hangarer, SAS benytter ved service på fly. Da målinger direkte på hovedmotorerne viste sig at være meget komplicerede og ville kræve væsentlige ekstra investeringer (fra både SAS og fra CPH), blev det besluttet at foretage målingerne efter en APU, da en sådan enhed bruger samme brændstof og samme forbrændingsprincip som hovedmotorerne på flyet.

Af speciel interesse er fraværet af Barium (Ba) i partiklerne, som var en forudsætning for at kunne bruge Ba som tracer til kildeopsporing på forpladsen.

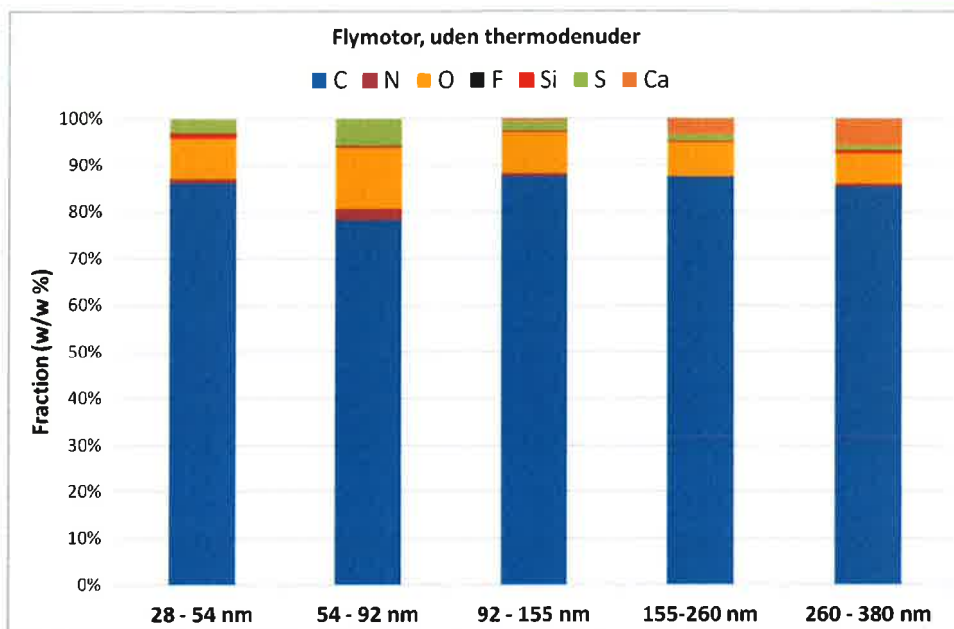
Tabel 5 og Figur 9 viser de målte resultater af partikkelkoncentrationer og størrelsesfordelinger. Figur 10 og Tabel 6 viser resultaterne fra elementaranalysen af ELPI-folierne.

Koncentration	Enhed	Sum af faste og semi-volatile partikler (målt med ELPI uden thermo-denuder)
Antal	1/cm ³	2,98 x 10 ⁷
Masse (PM ₂)	mg/m ³	15,3
Areal	µm ² / cm ³	1,75 x 10 ⁵
Volumen	µm ³ / cm ³	1,53 x 10 ⁴

Tabel 5. Partikelkoncentrationer målt direkte efter APU'en på en Airbus A330. Koncentrationerne er målt efter antal, diameter, areal, volumen og masse. Koncentration efter masse, areal og volumen er beregnet ud fra det målte antal af partikler mindre end 2,0 µm. Massen er beregnet under anvendelse af en anslået densitet på 1 g/cm³.



Figur 9. Antalsstørrelsesfordeling målt direkte efter APU'en på et Airbus A330 fly.



Figur 10. Fordelingen af grundstoffer i udstødningen fra APU'en på en Airbus A330 målt ved opsamling i ELPI impaktor og efterfølgende SEM/EDX. Grafen er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.

Element	28 - 54 nm	54 - 92 nm	92 - 155 nm	155-260 nm	260 - 380 nm
C	86.4	78.5	87.7	87.5	85.6
N	0.7	2.3	0.6	0.0	0.5
O	8.6	13.0	8.8	7.3	6.4
F	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Si	1.2	0.4	0.3	0.3	0.7
S	3.1	5.8	2.1	1.6	1.1
Ca	0.0	0.0	0.5	3.3	5.7

Tabel 6. Fordelingen af grundstoffer i udstødningen fra APU'en på en Airbus A330 målt ved elementaranalyse vha. SEM/EDX. Resultaterne er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.

4.3 Målepakke 3 – Forplads - kildebestemmelse

Partiklerne på forpladsen blev målt over en periode på 5 døgn (1. maj kl. 13:03 – 6. maj kl. 13:02). Dette blev gjort for at sikre, at der var tilstrækkelig partikelmasse til at kunne udføre en kvantitativ bestemmelse af samtlige relevante elementer ved SEM/EDX analyse.

Tabel 7 og Figur 11 viser de målte resultater af partikelkoncentrationer og størrelsesfordelinger. Figur 12 viser en grafisk afbildning af de målte partikelkoncentrationer efter antal ved hjælp af ELPI instrumentet. Figur 13 sammenligner disse resultater med det målte partikelantal på forpladsen ved hjælp af CPC instrumentet i samme periode. Figur 14 og Tabel 8 viser elementaranalysen af ELPI-folierne fra forpladsen.

Forhåbningen med målekampagnerne var at kunne lave kildebestemmelse ved brug af Barium (Ba), men da massen af Ba for alle SEM/EDX målinger var under detektionsniveauet, var det ikke muligt at foretage den planlagte kildebestemmelse. Det blev derfor besluttet at kigge efter andre tracere. Svovl (S) blev udvalgt som en mulig kandidat.

(S) blev fundet i relativt høj koncentration i udstødningen fra fly, mens koncentrationen fra køretøjer lå under detektionsniveauet. FORCE Technology har ved tidligere kampagner undersøgt mængden af svovl i udendørspartikler og fundet, at koncentrationen af (S) i ultrafine partikler (partikler mindre end 100 nm) er meget lille. Dette betyder, at vi kan antage, at den største mængde af (S) i de ultrafine partikler på forpladsen stammer fra fly.

Analysen kompliceres dog yderligere af, at svovlkoncentrationerne på forpladsen er højere end koncentrationerne målt direkte fra APU'en. Dette indikerer, at en væsentlig andel af kulstoffet er fordampet i form af organiske, semi-volatile forbindelser fra partikelfasen. Dette stemmer fint overens med, at partikler fra flymotorerne skal opholde sig i en vis tid i atmosfæren fra de slippes ud, til de når målestedet. Partiklernes øgede alder understøttes yderligere af det højere indhold af Ilt (O) i partiklerne. Både Kulstof (C) og (S) ældes ved oxidering i atmosfæren. Da de fleste første og anden generationsprodukter har relativt lavt damptryk, kan de findes i partikelfasen.

Den stigende mængde af svovl i partikelfractionen < 100 nm – samt det, at overvægten af partiklerne på forpladsen findes i området < 50 nm - indikerer, at størstedelen af partiklerne stammer fra fly. Dette ses ved, at massefraktionerne af svovl samt ilt stiger, som funktion af alder (ultrafine partikler vokser som funktion af tiden gennem agglomeration og vil derfor ved samtidig fordampning af C-forbindelser give anledning til højere S-fractioner i partiklerne).

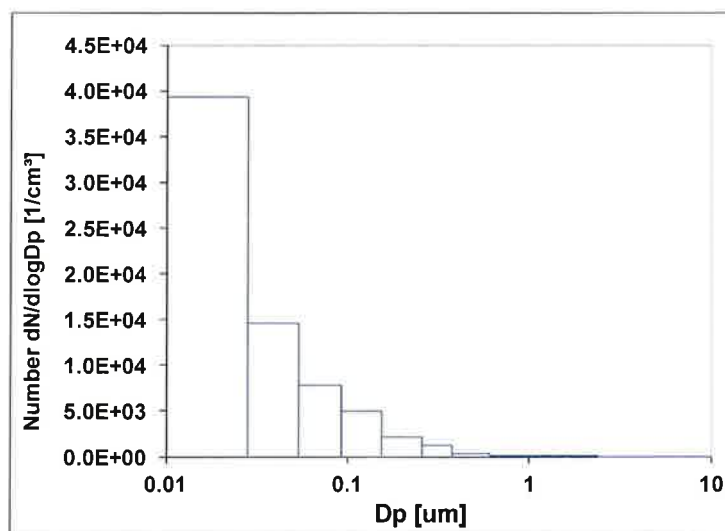
Som en del af målingerne blev den gennemsnitlige partikel antalskoncentration også bestemt. Koncentrationen varierede mellem ca. 2×10^3 og 1×10^5 (5 minutters middelværdier) med en gennemsnitlig koncentration på 3.15×10^4 partikler/cm³.

Koncentrationen varierede mellem ca. 2×10^3 og 1×10^5 partikler/cm³ med en gennemsnitlig koncentration på 3.15×10^4 partikler/cm³, målt i perioden fra den 1. - 6. maj 2014. De målinger, der udføres med CPC (Condensation Particle Counter) på forpladsen, viser for samme periode $1,30 \times 10^4$ partikler/cm³ (jf. Figur 13). Forskellen mellem resultaterne fra de to instrumenter tilskrives primært forskellen i sampling højde, og sekundært, at måleprincipperne er forskellige. Koncentrationsvariationerne følger hinanden nøje i hele måleperioden.

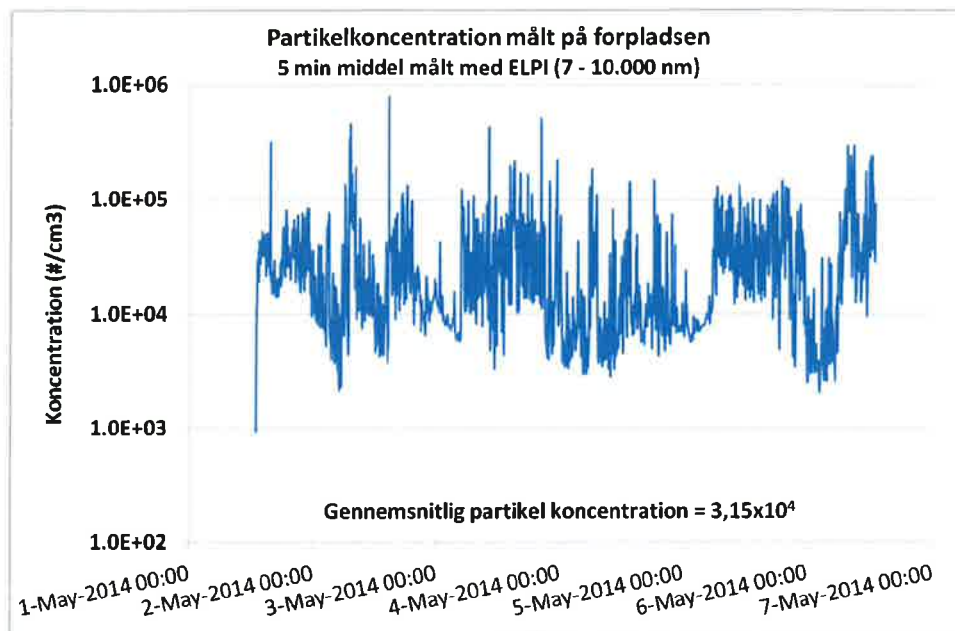
Den målte koncentration (i enheden partikler/cm³) er jf. afsnit 3.1 omregnet til masse (mg PM₂/m³) under antagelse af, at partiklernes gennemsnitlige densitet er 1 g/cm³. Den gennemsnitlige massekoncentration af PM₂ på forpladsen i perioden den 1. maj kl. 13:02 til den 6. maj kl. 13:02 blev herved beregnet til 30 µg/m³. Til sammenligning var den gennemsnitlige koncentration af PM_{2,5} målt ved hjælp af TEOM på CPH station øst 16,5 µg/m³. På CPH station vest var den målte koncentration af PM_{2,5} 6,1 µg/m³.

Koncentration	Enhed	Sum af faste og semi-volatile partikler (målt med ELPI uden thermodenuder)
Antal	1/cm ³	3,15 x 10 ⁴
Masse (PM ₂)	mg/m ³	0,030
Areal	µm ² / cm ³	380
Volumen	µm ³ / cm ³	29

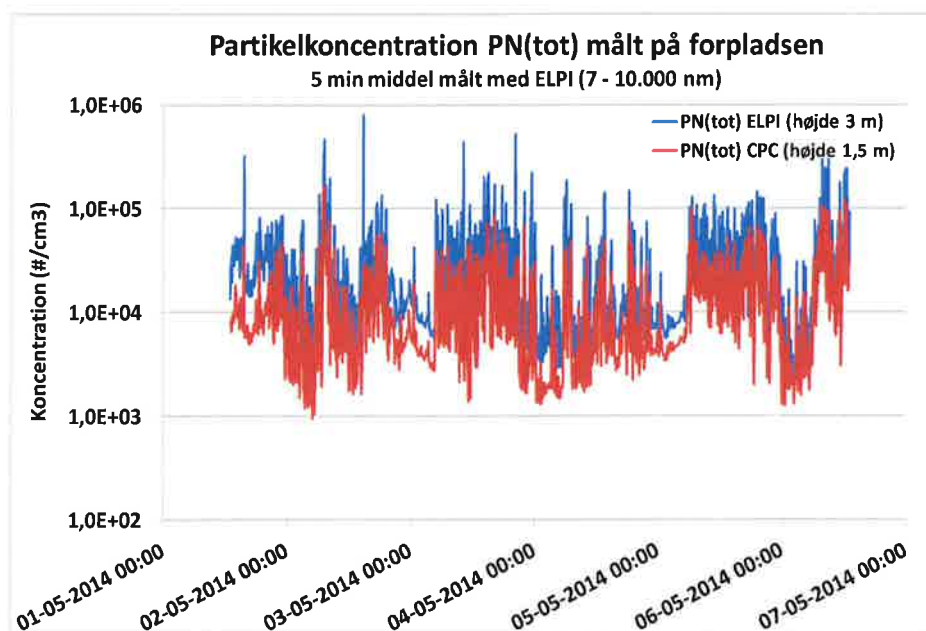
Tabel 7. Den gennemsnitlige partikelkoncentration målt på forpladsen mellem gate B2 og Gate B4 i perioden fra den 1. maj 2014 til den 6. maj 2014. Koncentrationerne er målt efter antal, areal, volumen og masse. Koncentration efter masse, areal og volumen er beregnet ud fra det målte antal af partikler mindre end 2,0 µm. Massen er beregnet under anvendelse af en anslået densitet på 1 g/cm³.



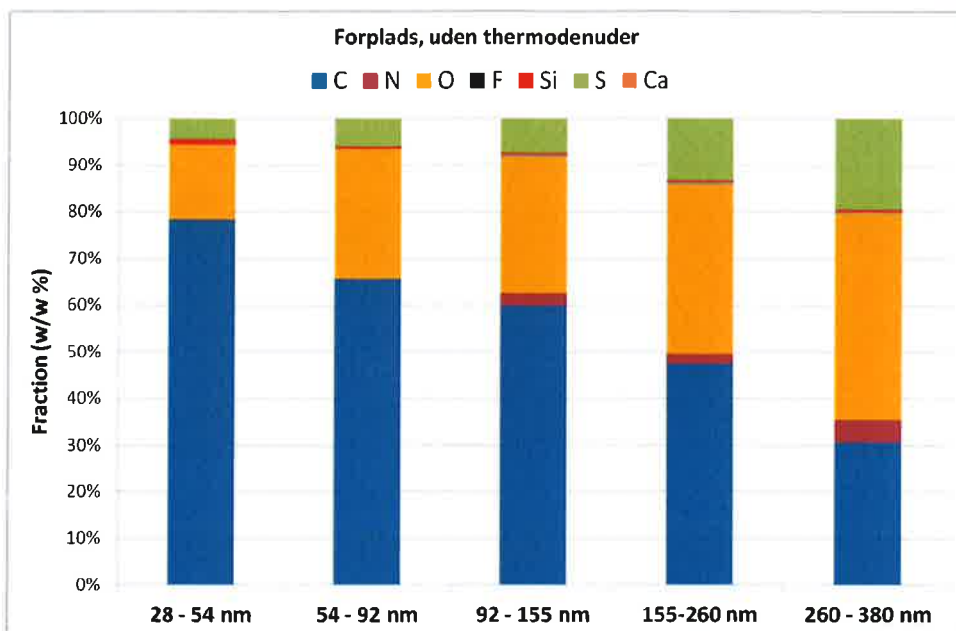
Figur 11. Den gennemsnitlige størrelsesfordeling efter partikelantal målt på forpladsen mellem gate B2 og Gate B4 i perioden fra den 1. maj 2014 kl. 13:02 til den 6. maj 2014 kl. 13:02.



Figur 12. Koncentration af partikler på forpladsen målt i perioden fra den 1. maj 2014 til den 6. maj 2014.



Figur 13. Sammenligning af målte koncentrationer af partikler på forpladsen med henholdsvis ELPI og CPC.



Figur 14. Fordelingen af grundstoffer målt på forpladsen mellem gate B2 og B4. Grafen er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.

Element	28 - 54 nm	54 - 92 nm	92 - 155 nm	155-260 nm	260 - 380 nm
C	78.0	65.4	59.6	46.8	30.1
N	0.0	0.0	2.7	2.0	4.8
O	15.8	27.6	28.8	35.8	43.4
F	0.0	0.0	0.4	0.4	0.3
Si	1.2	0.5	0.5	0.4	0.5
S	4.4	6.0	7.2	13.0	19.1
Ca	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Tabel 8. Fordelingen af grundstoffer målt på forpladsen mellem gate B2 og B4 målt ved elementaranalyse vha. SEM/EDX. Resultaterne er angivet i masse fraktion af den totale masse og opdelt som funktion af størrelse.

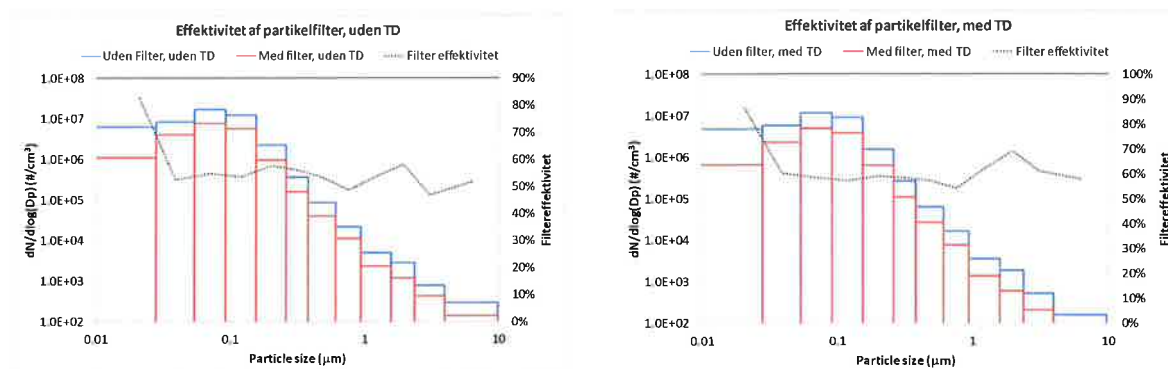
4.4 Målepakke 4 – CPH autoværksted – filtereffektivitet

Målingerne af filtereffektiviteten er udført ved måling på et dieselpartikelfilter monteret på en snerydningsstraktor. Målemetoden er beskrevet i afsnit 3.1. Der blev anvendt fortyndingsudstyr og thermodenuder som vist i Figur 4 og 5.

Effektiviteten af partikelfiltre måles typisk ved brug af den internationale "Particle Measurement Protocol" (PMP). Protokollen foreskriver, at man laver en varm fortynding efterfulgt af en kold fortynding og derved kun måler den faste kerne. Et alternativ til PMP protokollen er en kold fortynding efterfulgt af en thermodenuder (TD). Begge fremgangsmåder fjerner de flygtige stoffer og efterlader derved kun den faste kerne. Hvis man vælger at bruge kold fortynding samt en TD (som i disse forsøg), har man den fordel, at man meget nemt kan få resultater for både den flygtige samt den faste andel og for den faste andel alene.

Partikelfilterets effektivitet blev som vist i Figur 15 målt til at være mellem 50 % og 80 %, afhængig af partikelstørrelsen. Den gennemsnitlige fjernelseseffektivitet for de solide kerner blev målt til 67 % vægtet efter antal eller 59 % efter masse. Hvis man kigger på både de faste kerner og den flygtige del, blev filterets effektivitet målt til 62 % efter antal eller 56 % efter masse.

Andelen af semi-volatile stoffer i partiklerne blev målt til at være 6 - 9 % højere efter filteret. Dette stemmer fint overens med, at filteret fjerner en del af de solide kerner, men filteret fjerner ikke i lige så høj grad de semi-volatile stoffer, som derfor vil udgøre en større andel efter filteret.



Figur 15. Størrelsesfordelinger samt filtereffektivitet som funktion af partikelstørrelsen med (højre) og uden (venstre) thermodenuder (TD).

I Tabel 9 - Tabel 12 er resultatet af de målte koncentrationer vist efter det målte antal samt den beregnede koncentration efter areal, volumen og masse. Koncentration efter masse, areal og volumen er beregnet ud fra det målte antal af partikler mindre end 2,0 µm. Massen er beregnet under anvendelse af en anslået densitet på 1 g/cm³.

Koncentration	Enhed	Uden Partikelfilter (målt med thermodenuder)	Med partikelfilter (målt med thermodenuder)	Fjernet andel af ikke-fordampelige partikler
Antal	1/cm ³	9,40 x 10 ⁶	3,14 x 10 ⁶	67 %
Masse (PM ₂)	mg/m ³	7,9	3,2	59 %
Areal	µm ² / cm ³	2,21 x 10 ⁵	9,13 x 10 ⁴	59 %
Volumen	µm ³ / cm ³	7,93 x 10 ³	3,18 x 10 ³	60 %

Tabel 9. Effektiviteten af partikelfilteret overfor de faste kerner (ikke fordampelige partikler).

Koncentration	Enhed	Uden Partikelfilter (målt uden thermodenuder)	Med partikelfilter (målt uden thermodenuder)	Fjernet andel af såvel fordampelige som ikke-fordampelige partikler
Antal	1/cm ³	1,33 x 10 ⁷	5,03 x 10 ⁶	62 %
Masse (PM ₂)	mg/m ³	11,3	5,0	56 %
Areal	µm ² / cm ³	3,13 x 10 ⁵	1,40 x 10 ⁵	55 %
Volumen	µm ³ / cm ³	1,13 x 10 ⁴	5,05 x 10 ³	55 %

Tabel 10. Effektiviteten af partikelfilteret beregnet ud fra den målte sum af flygtige og faste partikler.

Koncentration	Enhed	Uden Partikelfilter (målt uden thermodenuder)	Uden partikelfilter (målt med thermodenuder)	Fordampelig andel før filter
Antal	1/cm ³	1.33 x 10 ⁷	9.40 x 10 ⁶	29 %
Masse (PM ₂)	mg/m ³	11.3	7.9	30 %
Areal	µm ² / cm ³	3.13 x 10 ⁵	2.21 x 10 ⁵	29 %
Volumen	µm ³ / cm ³	1.13 x 10 ⁴	7.93 x 10 ³	30 %

Tabel 11. Andelen af partikelkoncentrationen, der fordampes før traktorens partikelfilter.

Koncentration	Enhed	Med partikelfilter (målt uden thermodenuder)	Med partikelfilter (målt med thermodenuder)	Fordampelig andel efter filter
Antal	1/cm ³	5.03E+06	3.14E+06	38 %
Masse (PM ₂)	mg/m ³	5.0	3.2	36 %
Areal	µm ² / cm ³	1.40E+05	9.13E+04	35 %
Volumen	µm ³ / cm ³	5.05E+03	3.18E+03	37 %

Tabel 12. Andelen af partikelkoncentrationen, der fordampes efter traktorens partikelfilter.