



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Forprojekt om rensning af brænderøg for partikler

Miljøprojekt nr. 1705, 2015

Titel:

Forprojekt om rensning af brænderøg for partikler Per Holm Hansen, PHX innovation ApS

Redaktion:**Udgiver:**

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

År:

2015

ISBN nr.

978-87-93352-17-9

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	5
Indledning	6
Konklusion og sammenfatning	7
Summary and Conclusion	8
1. Testoplæg	9
2. Teknologistudie	10
3. Test objekter	12
3.1 Fyringsudstyr	12
Brændeovn:	12
Skorsten:	12
Røgsuger:	12
3.2 Testede elektrofiltre	13
3.2.1 Ökotupe:	13
3.2.2 RUFF-KAT:	14
3.2.3 APP Residential ESP:.....	15
3.3 Instrumentliste	16
4. Metoder og testforhold	17
4.1 Målepunkter	18
5. Målinger uden filter	19
5.1 Partikelmasse	19
5.2 Partikelantal	20
6. Målinger med filter	21
6.1 Partikelmasse	21
6.1.1 Målinger med filter	21
6.1.2 Målinger med filtre, tilskudsluft og røgsuger	22
6.1.3 Målinger med filtre og røgsuger	23
6.1.4 Oversigt, målinger på partikelmasse.....	24
6.2 Partikelantal	25
6.2.1 Målinger med filter	25
6.2.2 Filtre med tilskudsluft og røgsuger	26
6.2.3 Filtre med røgsuger	27
6.2.4 Oversigt, målinger på partikelantal.....	28
6.3 Iagttagelser ved måling af partikelantal	29
6.4 Partikelmåling i fortyndingskanal.....	30
7. Kilde/referencer	32
Bilag 1: Målinger på brændeovn uden og med røgsuger.	33
Bilag 2: Målinger på brændeovn med filter 1	34

Bilag 3:	Målinger på brændeovn med filter 2.....	35
Bilag 4:	Målinger på brændeovn med filter 3.....	36
Bilag 5:	Målinger med tilførsel af rumluft før filter	37

Forord

Denne rapport er udført på baggrund af en forundersøgelse, der er foretaget af PHX innovation. Forundersøgelsen omhandler test af elektrostatiske filtre monteret på en skorsten fra en brændeovn. Forundersøgelsen er lavet med tilskud fra Miljøministeriets program for miljøteknologi, og Force Teknologi har været underleverandør i form af ekspertise, knowhow og erfaring.

Forundersøgelsen skal vise effekten på masse og antal af partikler i røggassen fra en brændeovn med et elektrostatisk filter monteret i toppen af skorstenen fra en brændeovn, med og uden elektrisk røgsuger, samt en eventuel effekt ved tilførsel af tilskudsluft, der afkøler røgen før filteret.

Vi har i denne undersøgelse primært koncentreret os om filtrenes effektivitet i filtrenes oprindelige udformning samt de af fabrikanten specificerede driftforhold og elektrodespænding.

Der er ikke medtaget undersøgelse og vurdering af problematikken ved montage, rensning og bortskaffelse af de ophobede partikler.

Indledning

Der har tidligere været lavet et dansk miljøprojekt omkring elektrofiltres effektivitet til at fjerne de partikler, der dannes efter en forbrænding i en ældre, ikke svanemærket, brændeovn:

(Kilde/Reference 1). Denne rapport er tilgængelig på Miljøministeriets hjemmeside.

Det danske miljøprojekt viste, at der ikke er tilstrækkelig stor effekt fra filtrene til at fjerne de uønskede partikler fra røgen og da filtrene samtidig dengang var kostbare at købe var konklusionen, at elektrofiltre endnu ikke var interessante for forbrugeren.

Der findes også en udenlandsk rapport, hvor der er udført test på elektrofiltre, og her viser testresultatet en højere effektivitet for elektrofiltre på brændeovne. Rapporten er udført af Technologie- und Förderzentrum i 2010 (Kilde/reference 2), og er offentlig tilgængelig.

PHX innovation vil efterprøve funktionen af disse filtre. Efterprøvningen vil blive udført med en nyere, svanemærket, brændeovn og i kombination med en elektrisk røgsuger for at sikre stabilt skorstenstræk.

Det blev besluttet at teste tre filtre. Udbuddet af elektrofiltre til brændeovne blev undersøgt med henblik på at indkøbe to filtre til test. Vi havde et filter i vores besiddelse. Det filter er identisk med et af de filtre, der blev anvendt i det tidligere omtalte danske miljøprojekt. Det blev fra starten besluttet, at dette filter skulle være det ene af tre filtre, der skulle testes.

Der findes ingen danske producenter af denne type filtre, så derfor skulle der kigges i andre europæiske lande, hvor der findes udvikling inden for dette område. I vores overvejelser indgik hvilke typer filtre der skulle testes. Der findes forskellige udførelser af filtrene og filter opbygningen kan have stor betydning for effektiviteten. Vi har valgt at teste tre forskellige konstruktioner, hvor den interessante forskel primært ligger i udførelsen, elektrodespænding, og længden af elektroden. Alle test udføres med den spænding som fabrikanten har specificeret.

De tre filtre er: Ökotupe, RUFF-KAT og APP Residential ESP.

Tidligere tests af elektrofiltre har indikeret, at der dannes flere partikler efter filteret ved forbrænding på en ældre, ikke svanemærket brændeovn, når røgen afkøles i den frie luft. Vi har derfor valgt at gennemføre en ekstern test af det bedste af de indkøbte elektrofiltre i en fortyndingskanal ved Teknologisk Institut (TI). Ved denne test kan vi dels direkte sammenligne antallet af partikler før og efter filteret, samt antallet af partikler i fortyndingskanalen simultant.

Den eksterne test er vigtig idet, at hvis der dannes flere partikler pga. kondensering, når røgen afkøles, kan dette betyde at en løsning med elektrofiltre ikke er en miljømæssig og helbredsmæssig korrekt løsning. Testen, samt resultaterne fra denne, omtales separat sidst i rapporten.

Konklusion og sammenfatning

Forsøgene i denne test viser at elektrofiltrene har en høj effektivitet over for fjernelse af partikelantal i størrelsen fra 10 nm til 400 nm, samt for fjernelse af partikelmasse. Afhængig af filtertype/konstruktion kan virkningsgraden forbedres, når det anvendes i kombination med en røgsuger. Den største stabilitet i effektiviteten blev opnået, når der er en elektrisk røgsuger monteret.

Testen viser at effektiviteten af filtrene falder ved at tilføje friskluft før filteret på to filtertyper: Ökotupe og RUFF-KAT. Tilførsel af friskluft øger den samlede røggas volumen. Dette medvirker at hastigheden på røgen øges forbi det aktive område i elektrofilteret, og den effektive tid, som hver partikel opholder sig i partikelfilterets spændingsfelt mindskes. Derved reduceres antallet af partikler, der når at blive ladet. Det er ikke tilfældet på det tredje filter, APP Residential ESP, og det kan måske skyldes, at filteret har en større diameter, hvilket sænker røghastigheden i det aktive filter areal.

Antallet af partikler stiger lidt ved målinger med røgsuger. Dette kan skyldes flere ting. På grund af det lidt øgede og stabile træk er der en bedre forbrænding i brændeovnen. En bedre forbrænding giver flere små partikler, og færre store partikler. Den bedre forbrænding giver samtidig en højere temperatur i skorstenen. Dette kan betyde, at der ikke kondenseres så mange af de større partikler. Når dette er tilfældet, er der ikke så mange af de større partikler som de små partikler kan agglomerere med og der vil derfor være flere små partikler til stede. Den højere røggastemperatur der er, når der er røgsuger på, kan have en negativ indflydelse på partiklernes resistivitet. Resistiviteten på en partikel falder ved øget temperatur og dette kan have betydning for, hvor mange partikler der sætter sig fast på røgrøret.

Det kan konkluderes, at RUFF-KAT filteret falder uden for de to andre filtre med ringere effektivitet. Da filteret principielt er opbygget som Ökotupe filteret, må det skyldes at det har en væsentlig kortere udfældningselektrode og partiklernes opholdstid i det aktive filterområde derfor er kortere og dermed bliver der ladet færre partikler. APP Residential ESP filteret har også en kort centerelektrode, men har til gengæld et område med øget diameter, hvor der sidder flere korte elektroder. I dette område sænkes røggashastigheden, og da der er flere elektroder, kan der lades flere partikler i det område.

Den samlede konklusion på projektet er:

- En røgsuger forbedrer forbrændingsforholdene uanset skorstenens effektivitet, og sikrer derved bedre forhold for anvendelse af elektrofilter, idet filtrene er følsomme over for de mange partikler og kondenserbare tjærestoffer, der kommer fra en dårlig forbrænding.
- Filtrene Ökotupe og APP Residential ESP har generelt en meget høj effektivitet over for reduktion af emissionen af både mht. partikelmasse og partikelantal.
- Testen med tilførsel af friskluft før filtrene viser at tilførsel af tilskudsluft ikke umiddelbart reducerer antallet af partikler. Men teoretisk bør det reducere emissionen af partikelmasse, fordi en større del af de kondenserbare stoffer kondenserer til partikler inden elektrofilteret, idet røgen nedkøles, men det kræver yderligere målinger i en fortyndingskanal at vise, om dette er tilfældet.
- Den eksterne test med afkøling af røggas i en fortyndingskanal viser at der ikke dannes flere partikler efter et elektrofilter når røggassen kondenserer.

Summary and conclusion

This test shows that electrostatic filters have a high efficiency in removing particulate mass and particle numbers in size from 10 nm to 400 nm.

Depending on the filter type or filter design, the efficiency can be improved when used in combination with a chimney fan. The greatest stability in efficiency was achieved when there is a mechanical chimney fan mounted.

The efficiency of the filters decreases when adding fresh air before two of the filter types: Ökotupe and RUFF-KAT. Adding fresh air increases the total fluegas volume. This increases the velocity of the smoke passing the active area of the electrostatic precipitator and thereby shortens the effective time, each particle stays active area. This causes fewer particles to be charged. This is not the case with the 3rd filter, APP Residential ESP, and it is assumed to be because of the construction of the filter with an increased diameter which decreases the velocity of the smoke.

The number of particles increases slightly when testing with a chimney fan. This can be caused by several things. Due to the slightly increased and stable draft, there is a better combustion in the stove. A better combustion increases the number of small particles and decreases the number of larger particles. The better combustion also causes a higher fluegas temperature in the chimney. The higher temperature causes fewer of the large particles to condensate, leaving a greater number of smaller particles unable to agglomerate with the larger particles. The higher flue gas temperature also has a negative influence on the particles resistivity. The resistivity decrease with increasing temperature, and this may have an affect on how many particles that stick to the chimney.

The RUFF-KAT filter has a lower efficiency than the two other filters. Because the RUFF-KAT filter is basically constructed as the Ökotupe filter the reason for this must be because the RUFF-KAT filter has a significantly shorter discharge electrode causing the residence time of particles in the active filter area to be shorter, and thereby charging a lower number of particles.

The APP Residential ESP filter has a short center electrode, but also has an area with increased diameter where a number of shorter electrodes is mounted. In this area the fluegas has a lower velocity, and because there are several shorter electrodes many particles will be charged in the area too. This causes the APP Residential ESP filter to have a high efficiency with a short electrode.

The overall conclusion of the project are:

- A chimney fan improves combustion conditions regardless of the chimney efficiency, ensuring better conditions for the use of an electrostatic filter, which is sensitive to the many particles and condensable tars caused by a poor combustion.
- The Ökotupe and APP Residential ESP filters generally have a very high efficiency in reducing emissions of both particulate mass and particle number.
- The test with adding fresh air before the filters shows that this not immediately reduces the amount of particles. But theoretically this may reduce the emissions of particulate matter, because a larger portion of the condensable substances condense into particles inside the electrostatic filters, but it requires additional testing in a dilution tunnel to show if this is the case.
- The result of the external delution tunnel test shows that no additional particles are generated after the ESP filter when the fluegas is cooled down below condensation temp.

1. Testoplæg

Test forløbet blev fastlagt på et styregruppemøde for forundersøgelsen. Målet var at lave en testrækkefølge der under ensartede forhold skulle vise om der er forskel i rensningseffektiviteten på de 3 typer filtre, men da testforløbet blev igangsat kunne vi se at det grundlag med stor sandsynlighed ikke ville være tilstrækkeligt til at påvise filtrenes effektivitet, hvorfor vi valgte at udvide testporteføljen så hver test blev udført flere gange end oprindeligt påtænkt. Dette blev gjort for at udjævne den ustabilitet der kan være ved indfyringerne og som kan være forårsaget af brændet, indfyringstidspunkt, forbrændingstemperatur mm.

Hver testsekvens blev udført i en forsøgsrækkefølge således at der til hvert forsøg blev lavet flere på hinanden følgende fyringer. Først blev der lavet et antal fyringer uden filter og røgsuger, derefter et antal fyringer med røgsuger, et antal fyringer med filter, og et antal fyringer med filter og røgsuger - med og uden tilskudsluft. Ved at lave et antal fyringer som reference til hver test, kunne hver test ligge inden for samme dag og derfor så ens forhold som muligt.

Testene blev udført i eget laboratorium, og det naturlige træk lå imellem 12 og 14 Pa, hvilket er i overensstemmelse med brændeovnsfabrikanternes anbefalinger. For at kunne foretage målinger med røgsuger, og se en forskel måtte vi have et lidt højere undertryk i skorstenen, og valgte at sætte det til 20 pa. Det har i vore tidligere forsøg vist sig, at det ikke har signifikant indflydelse på antallet af partikler der kommer fra forbrændingen, når undertrykket i skorstenen øges fra 12 til 20 Pa. Ved de målinger, der er lavet under forsøg i denne rapport, har det heller ikke signifikant indflydelse på den forbrændte mængde træ i måleperioden.

Der blev anvendt asketræ som brændsel til alle test. Træet havde en fugtighed på 12-15%, og var med bark. Dette blev valgt, fordi det til en vis grad kunne relateres til det brændsel, der bliver anvendt af brugerne og derfor formentlig bedre afspejler de partikler, der kommer i praksis. Testene blev udført med respekt for den tyske standard (DINplus), men standarden blev ikke fulgt stringent. Det vigtigste i denne test er, at der blev genskabt samme forbrænding til hver test, således at resultaterne kunne sammenlignes.

Til fyringsreference blev det tilstræbt at holde en CO₂ værdi omkring 10% under forbrændingen, og bruge en CO₂ værdi på 3,5% som genfyringspunkt. Ved hver genfyring blev målepunktet for måleopstart af partikelmasse sat til et minut efter synlige flammer. Det blev så vidt muligt forsøgt at holde glødelaget i brændeovnen på et "normalt" niveau, dvs. hvis der skete en ophobning af glødelaget blev der taget noget væk, således at dette ikke bidrog til en forskel i målingerne.

2. Teknologistudie

Da der ikke findes mange elektrostatiske filtre i den størrelse der skal anvendes til brændeovne, er det nødvendigt at afdække og undersøge dels de produkter der findes, men også selve teknologien der ligger bagved.

Der findes meget dokumentation omkring elektrostatiske filtre, men det er gennemgående baseret på meget store anlæg på kraftværker og andre store fyringsanlæg. Selvom selve teknologien er den samme, er der stor forskel på konstruktion, teknisk opbygning, indbygningskrav, sikkerhed mm.

Med teknologistudiet har vi bidraget til at afdække hvilke parametre, der har størst indflydelse på effektiviteten, og hvordan det vil være muligt at nedskalere til den teknologi der allerede findes i større skala til de små udførelser, der skal bruges på husstands skorstene.

Et elektrostatisk filter fungerer ved, at der sidder en afladningselektrode og en udfældningselektrode. På de systemer der skal anvendes til brændeovne, vil afladningselektroden typisk være et kort eller langt stykke tyndt metal der er placeret i midten af skorstenen, og udfældningselektroden vil være indersiden af skorstensrøret.

Afladningselektroden påtrykkes en høj, ensrettet jævnspænding (her 20-30 kV), udfældningselektroden er jordforbundet. Når afladningselektroden påtrykkes spænding vil der skabes et elektrisk felt imellem afladningselektroden og udfældningselektroden som ioniserer gassen og partiklerne lades negativt. Partiklerne frastødes af opladningselektroden og tiltrækkes af udfældningselektroden og vandrer på tværs af gasstrømmen over mod udfældningselektroden. Her afsættes de under afgivelse af den elektriske ladning.

Der er flere parametre der har betydning for effektiviteten.

1. Spænding på afladningselektroden.
2. Udformningen på afladningselektroden.
3. Partikel størrelse.
4. Partikel resistivitet og røgtemperatur.

1. Spændingen på afladningselektroden bestemmer hvor kraftigt et felt der dannes imellem de to elektroder. Jo kraftigere feltet er, jo højere effektivitet. Et for kraftigt felt kan skabe overslag imellem elektroderne, og når der er overslag, er der kortvarigt efter ingen effekt på fjernelse af partikler. Den største effektivitet opnås ved den højest mulige spænding, uden at der kommer overslag.

2. Udformningen på afladningselektroden har stor indflydelse på feltets kraft, og derved filterets effektivitet. Det største felt opnås med en afladningselektrode, der har skarpe kanter der peger i retning imod udfældningselektroden.

3. Store partikler er nemmere at udskille end små partikler. Små partikler skal tilføres en stor kraft for at have energi nok til at komme på tværs af gasstrømmen til udfældningselektroden, dette skyldes den relativt ringe hastighed mod udfældningselektroden, og de når derfor ikke altid at blive opfanget, inden den forlader røggasrøret.

4. Partiklernes resistivitet er en meget vigtig faktor for muligheden for at kunne udskille partiklerne effektivt i et elektrofilter. Resistiviteten er partiklens evne til at lede en elektrisk strøm, også kaldet modstanden. Lav resistivitet gør, at en partikel er god til at lede en elektrisk strøm, og så kan den nemmere og mere effektivt udskilles i et elektrofilter. Resistiviteten for forbrændingspartikler afhænger først og fremmest af den kemiske sammensætning, herunder fugtindhold og temperaturen.

F.eks. har en partikel med højt kulstof indhold en lav resistivitet, så den er nem at lade, men mister også let sin ladning. Sådant en partikel kan have en tendens til at "hoppe" gennem filteret (blive ladet og afladet), og kan derfor være svært at udskille effektivt.

En partikel med højt kulstof indhold er let at lade (lav resistivitet), men mister også let sin ladning, så den har en tendens til at "hoppe" gennem filteret (blive ladet og afladet), derfor kan disse være svære at opfange. En partikels resistivitet er meget temperatur afhængig. Det er påvist at en partikel har højest resistivitet ved 110 - 150 °C, og ved både lavere og højere temperatur falder resistiviteten signifikant (Litteratur henvisning 3). Det er derfor vigtigt at røggassen er imellem disse temperaturer, når den passerer det elektrostatiske filter, for at opnå den bedste effektivitet.

Vi kan se ud fra dette teknologistudie, at der er flere parametre, der er vigtige for at opnå god effektivitet. Og det er vigtigt at optimere meget på et filter til brændeovne, da det kun er en begrænset længde af røgvejen, der kan bruges til rensningen.

3. Test objekter

3.1 Fyringsudstyr

Brændeovn: Varde Aura 2. Dette er en traditionel brændeovn i mellemstørrelsen med tertiærlufttilførsel til forbrændingen.
Brændeovnsdata: 5 kW (3-7 kW) \approx 30-105 m².
Røggasdata: 5,5 g/sek. ved 20°C, Røggas temp. 320°C, 11 Pa.
Prøvning efter EN 13240:2001 + A2:2004
Støvmåling efter DINplus Zertifizierungsprogramm.
Støvmåling iht. Metode DINplus : <20 mg/Nm³ ved 13% O₂ (max 75 mg/Nm³)



Skorsten: Standard u-isoleret sort skorsten. Ø150, Længde = 350cm.

Røgsuger: Specialbygget røgsuger der kan køre variabel motorhastighed og skabe et skorstenstræk på imellem 0 og 30 Pascal.

3.2 Testede elektrofiltre

3.2.1 Ökotupe:

Opbygget med en 1,5 meter lang afladningselektrode.

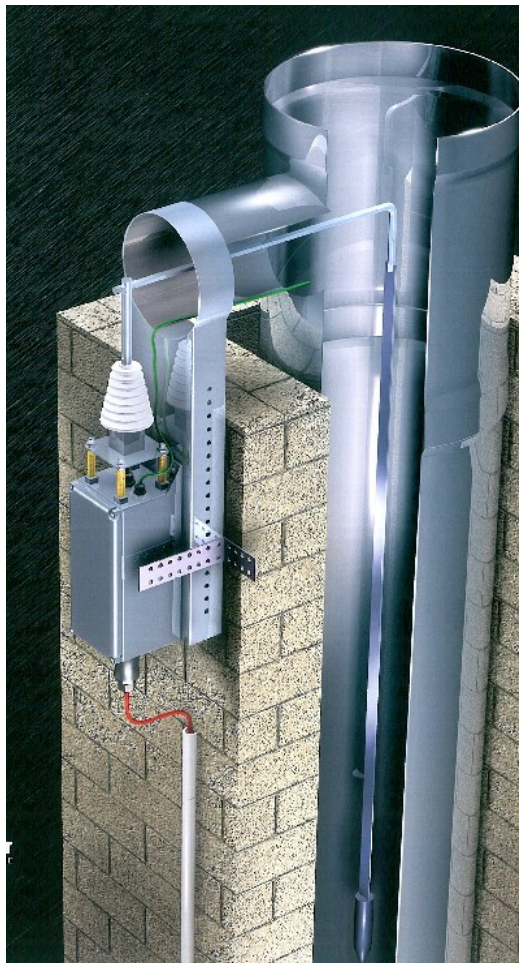
Monteres på toppen af en skorsten.

Elektrodespændingen på filteret er 24 kV under drift, og kan ikke ændres.

Firma: ÖkoSolve, Schmelziweg 2, 8889 Plons, Switzerland

Filteret har ifølge producenten en virkningsgrad på op til 95%.

Filter nr. 1 i testen



3.2.2 RUFF-KAT:

Opbygget med en 0,5 meter lang afladningselektrode.

Monteres på toppen, eller indskudt i røgrøret.

Elektrodespændingen på filteret er 26 kV under drift, og kan ikke ændres.

Firma: Schröder Abgastechnologie, Hemsack 11-13, 59174 Kamen

Filteret har ifølge producenten en virkningsgrad på 60 - 95%.

Filter nr. 2 i testen.



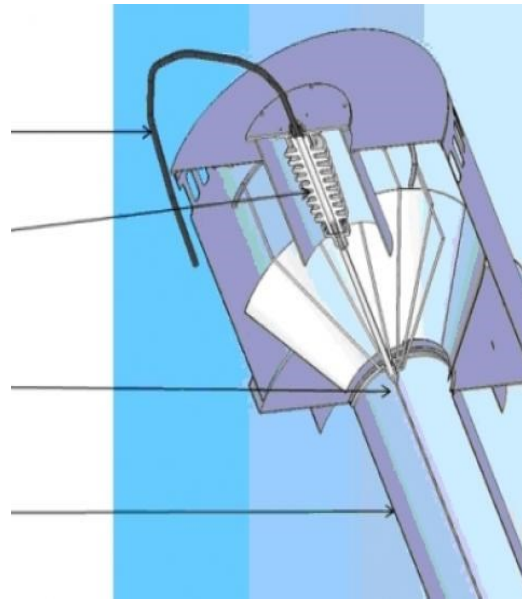
3.2.3 APP Residential ESP:

Opbygget med center afladningselektrode nederst, samt et antal perifere afladningselektroder øverst. Monteres på toppen af en skorsten.

Elektrodespændingen på filteret er 31 kV under drift, men den kan varieres fra 0 til 35 kV.

Filteret er ikke kommercielt tilgængelig, og der er ikke produceret til kommercielt brug, så der findes ingen tal for effektivitet fra producenten.

Filter nr.3 i testen.



3.3 Instrumentliste

Partikkelmasse:	Wöhler SM500. Partikkelmassemåler.
Partikelantal:	TSI Nanoscan SMPS Nanoparticle Sizer model 3910. Partikelantalsmåler 10 – 400 Nm.
Røggas diluter:	Dekati DI-2000. Fortynding af røggasprøve til SMPS 1: 88.
CO ₂ , CO, O ₂ :	Hartman & Braun, Advanced Optima. Måling af CO ₂ , CO og O ₂ i røggas.
Fugtmåler:	Wöhler HBF 420. Fugtmåler til træ.
Trykmåler, skorsten:	Dweyr Magnesense model MS-021-LCS. Trykmåler +/- 50 Pa.
Temperatur:	Pt1000 temperaturmåler.
Sampler/Logger:	Agilent 34972A. Datalogger.

4. Metoder og testforhold

Testen er foretaget på en indendørs opbygget prøvestand. Prøvestanden er indrettet centralt omkring den brændeovn, der blev anvendt til testen, dels med henblik på nem tilgængelighed for observationer under test, samt med forskellige instrumenter, som er nødvendige for at måle på partikler, forbrændingsforhold, temperatur, mm.

Røgaftrækket fra brændeovnen er ført op under en ”emhætte”, hvorfra røgen bliver suget ud i det fri. Dette giver en fordel til forbrændingen når der testes uden røgsuger, idet trækket i skorstenen ikke påvirkes af vejr og vind og trækket derved stabiliseres væsentligt i forhold til skorstenens virkelige arbejdsforhold.

For at teste under korrekte og ens forhold måles der under testforløbet konstant på CO₂, CO og O₂, røggastemperatur og skorstenstræk i røgrøret 15 cm over brændeovnen. I toppen af skorstenen måles røggastemperatur samt partikelantal og partikelmasse. Alle måleparametre er logget og gemt.

Til partikelmåling er der anvendt to instrumenter, hvor begge måler efter elektrofilteret.

Der blev anvendt en partikelmassemåler, der måler partikelmassen pr. m³ røggas i en periode på 15 minutter.

Partikelantal måles direkte i skorstenen i størrelsen 10 til 400 nanometer, og det måles kontinuerligt under alle forsøg.

Alle måleresultater i rapporten er middelværdier af målinger foretaget over en måleperiode på 15 min.

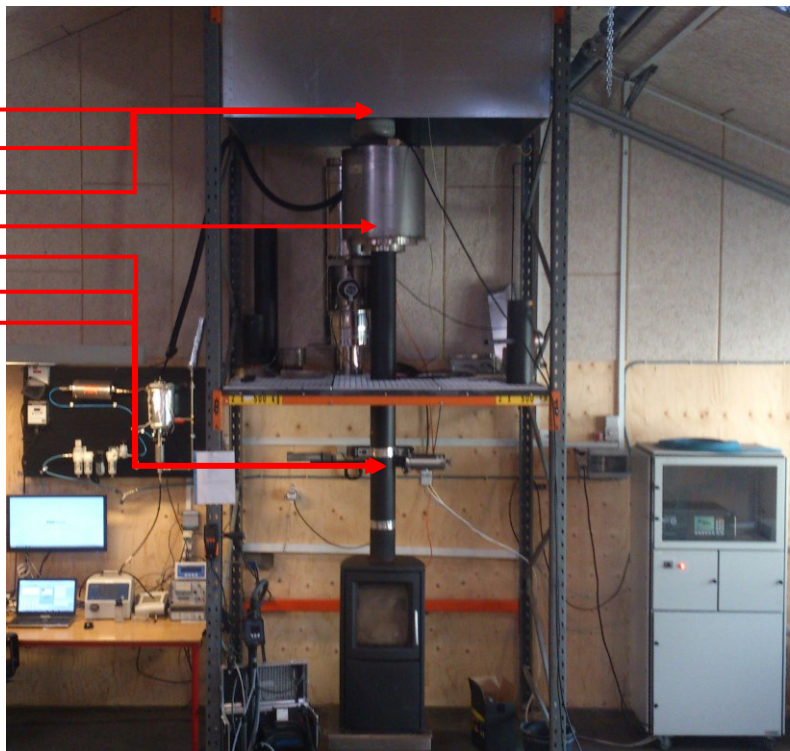
Målingerne er lavet i serier, således at der først er udført målinger på brændeovnen alene, derefter brændeovn med røgsuger, derefter brændeovn med hhv. filter 1 u/m røgsuger, filter 2 u/m røgsuger, filter 3 u/m røgsuger. Derudover er der på alle filtertest lavet test, hvor der tilføres tilskudsluft i form af rumluft før filteret for at undersøge om der ses en forandring, når røgen afkøles før den kommer til filteret.

Alle værdier er omregnet til referencetilstanden 13% O₂, hvilket betyder at alle værdier er direkte sammenlignelige.

4.1 Målepunkter

Testopstilling i testlaboratorie med målepunkter.

- Røggastemperatur: 6
- Partikelmasse: 5
- Partikelantal: 4
- Partikelfilter: 3
- CO₂, CO, O₂: 2
- Skorstenstræk: 2
- Røggastemperatur: 1



5. Målinger uden filter

Hvis man sammenligner målingerne foretaget uden filter, men med hhv. røgsuger og røgsuger med tilskudsluft, kan man derudaf udlede at røgsugeren har en positiv indflydelse på forbrændingen, og at tilskudsluft også har en indflydelse på den målte partikelkoncentration.

Røggastemperaturen ved de forskellige målinger er ret forskellig, hvilket kan være en medvirkende årsag til de forskelle der ses. Røggastemperaturen ved måling på brændeovn alene er temperaturen 110-120 °C i toppen af skorstenen, ved måling med tilskudsluft og røgsuger er røgtemperaturen imellem 50 og 60 °C, og med røgsuger imellem 130 og 140 °C. Det kan forklare, at tilskudsluft giver en højere af koncentration af partikelantal, idet mere tjærestof i røggassen kondenserer til partikler, når temperaturen er lavere. Dette medfører at målingerne ikke giver det helt korrekte billede af effekten af tilskudsluft.

Røgsugeren giver en hurtigere genantændelse og mere effektiv forbrænding og derved lavere emission i partikelmasse.

5.1 Partikelmasse

Diagram 1 viser at partikelmassen er højest fra en brændeovn uden røgsuger. Når der tilføres tilskudsluft og røgen fortyndes, falder partikelmassen som forventet. Med røgsuger og uden tilskudsluft er partikelmassen markant den laveste hvilket viser, at et stabilt skorstenstræk har en positiv indflydelse på forbrændingsprocessen.

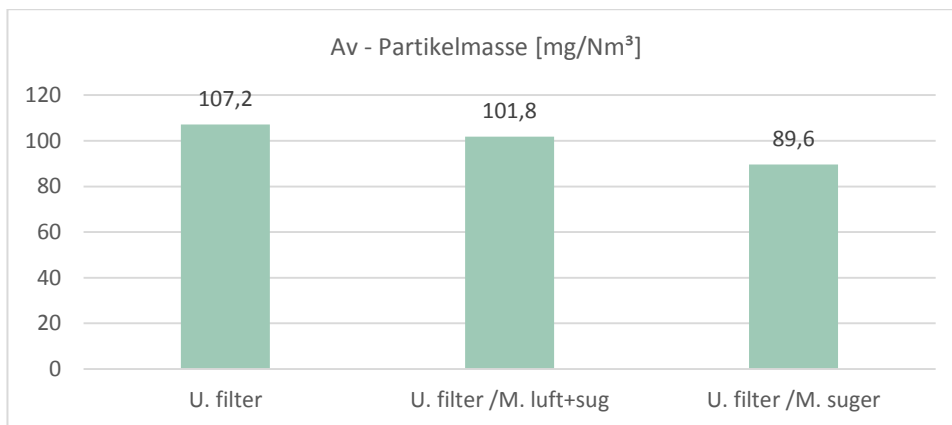


DIAGRAM 1 – PARTIKKELMASSE UDEN FILTER

5.2 Partikelantal

Diagram 2 viser partikelantallet målt i samme periode. Partikelantallet stiger til næsten det dobbelte, når der tilføres tilskudsluft.

Når der tilføres tilskudsluft afkøles røggassen til 50-60 °C i toppen af skorstenen, og det betyder at der sker en kondensering af dampene, der derved omdannes til partikler og medfører det øgede antal. Med røgsuger og uden tilskudsluft, er der også et større antal partikler end uden røgsuger. Dette kan skyldes den højere forbrændingstemperatur (dermed højere røggastemperatur på 130-140 °C i toppen af skorstenen), som danner flere små partikler.

Den højere temperatur kan medføre at flere salte fordamper, flere fine askepartikler rives med og der er færre store partikler til at kondensere på.

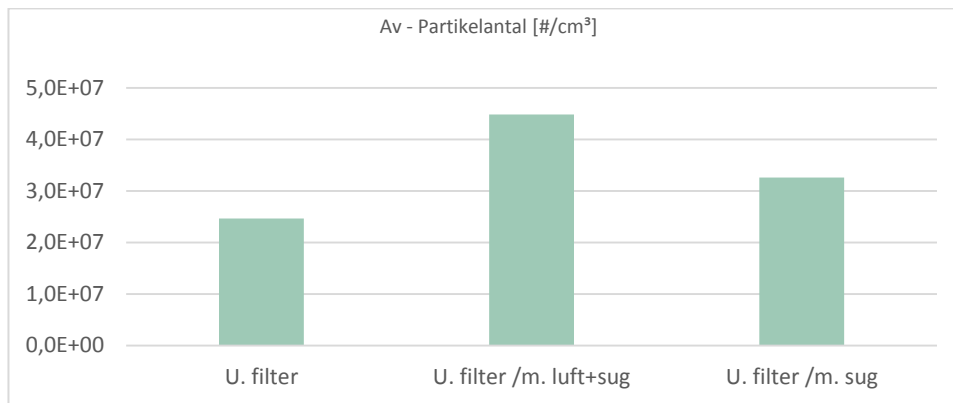


DIAGRAM 2 – PARTIKKELANTAL UDEN FILTER

6. Målinger med filter

6.1 Partikelmasse

6.1.1 Målinger med filter

I denne opstilling måles der partikelmasse i brændeovnsrøg fra brændeovn uden og med elektrofilter monteret på skorstenen.

Diagram 3 viser hvor meget partikelmasse der er i røgen hhv. uden filter, og med filter 1, 2 og 3. Det kan ses, at alle filtre tilbageholder partikler, men at filter 1 og filter 3 skiller sig ud ved at være bedre end filter 2.

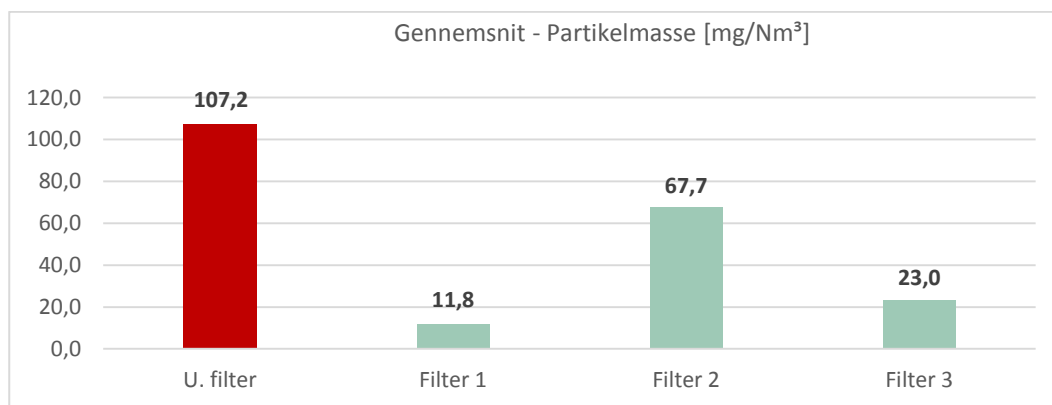


DIAGRAM 3 - GENNEMSITLIG PARTIKELMASSE UDEN OG MED FILTER

Diagram 4 viser i procent, hvor stor en andel af partikelmassen i procent, der er fjernet af filtrene i forhold til målingerne uden filter.

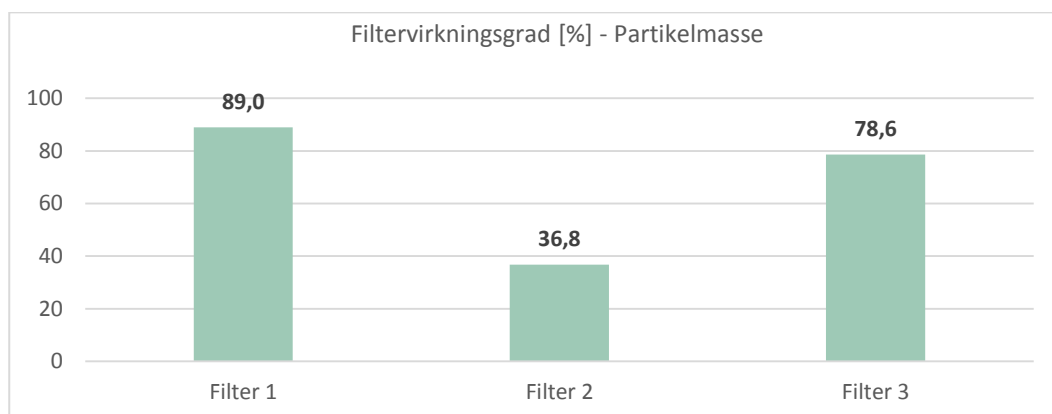


DIAGRAM 4 – FILTERVIRKNINGSGRAD FOR PARTIKELMASSE I PROCENT.

Filter 2 skiller sig ud, ved at have en dårligere virkningsgrad end de to andre filtre. Røggastemperaturen ved målepunktet efter filteret er imellem 110 og 120 °C.

6.1.2 Målinger med filtre, tilskudsluft og røgsuger

I denne opstilling måles der partikelmasse i brændeovnsrøg fra brændeovn uden elektrofilter, røgsuger og tilskudsluft, og med elektrofilter, røgsuger og tilskudsluft i skorstenen. Tilskudsluften tilføres ca. en meter før elektrofilteret og tages ind igennem et Ø50mm hul i skorstenen. Der er ikke måling på hvor stor luftmængde, der tilføres, der styres alene på at holde undertrykket lige over brændeovnen på 12 Pa.

Diagram 5 viser, hvor meget partikelmasse, der er i røgen hhv. uden filter med røgsuger og tilskudsluft, og med filter 1, 2 og 3 med tilskudsluft og røgsuger.

Diagram 6 viser, hvor meget partikelmasse, der fjernes i forhold til brændeovnsrøg uden filter. Der er stor spredning på effektiviteten, filter 3 er her bedst. Filterets udformning kan have stor betydning i denne test, da lufthastigheden for røgen igennem filteret er øget meget pga. den større samlede røgmængde. Udformningen på filter 3 med den større diameter ser ud til at være i stand til at "nå" at lade flere partikler trods den højere røggas hastighed der er med tilskudsluft. Røgtemperaturen ved prøvningsudtag er imellem 50 og 60 grader °C.

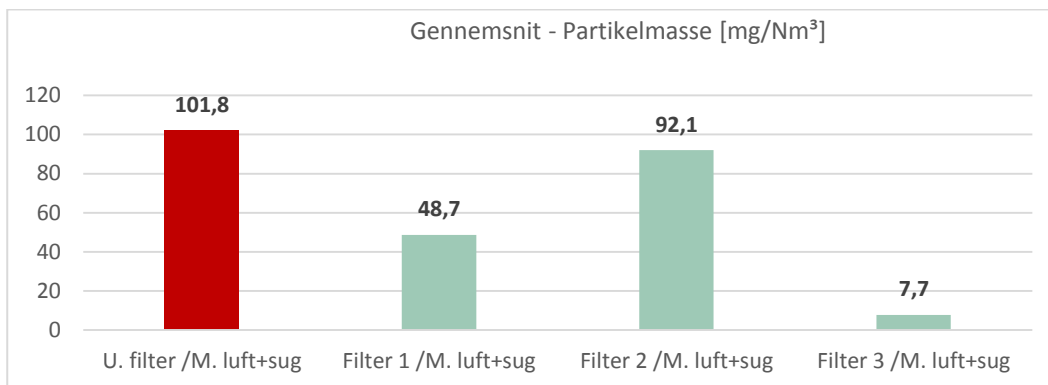


DIAGRAM 5 – GENNEMSNIT PARTIKELMASSE UDEN OG MED FILTER MED TILSKUDSLUFT OG RØGSUGER

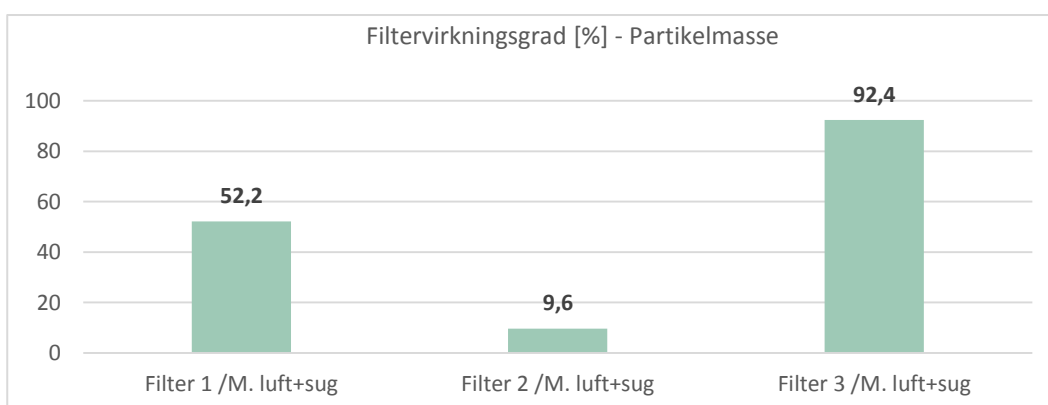


DIAGRAM 6 – FILTERVIRKNINGSGRAD FOR FILTER MED TILSKUDSLUFT OG RØGSUGER

6.1.3 Målinger med filtre og røgsuger

I denne opstilling måles der partikelmasse i brændeovnsrøg fra brændeovn med røgsuger, med og uden elektrofilter monteret i skorstenen.

Diagram 7 viser den masse af partikler der er i røgen hhv. uden filter, og med filter 1, 2 og 3. Det kan ses, at alle filtre har en god effektivitet, men at filter 1 og filter 3 skiller sig ud ved at være bedre end filter 2.

Diagram 8 viser filtervirkningsgraden i procent hvor meget partikelmasse der fjernes i forhold til brændeovnsrøg uden filter. De to af filtrene er lidt mere effektive end filter 2.

Røgtemperaturen ved prøvetagningen er imellem 130 og 140 °C.

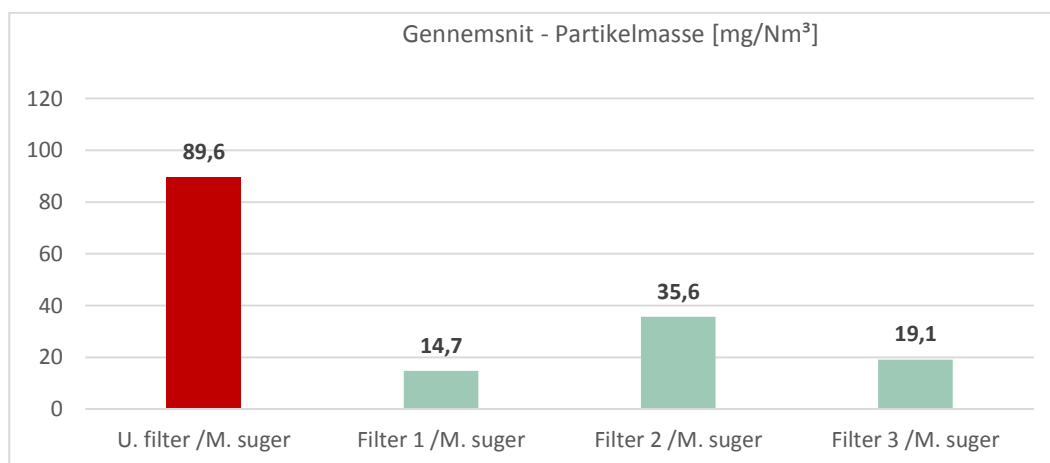


DIAGRAM 7 – GENNEMSNITS PARTIKELMASSE

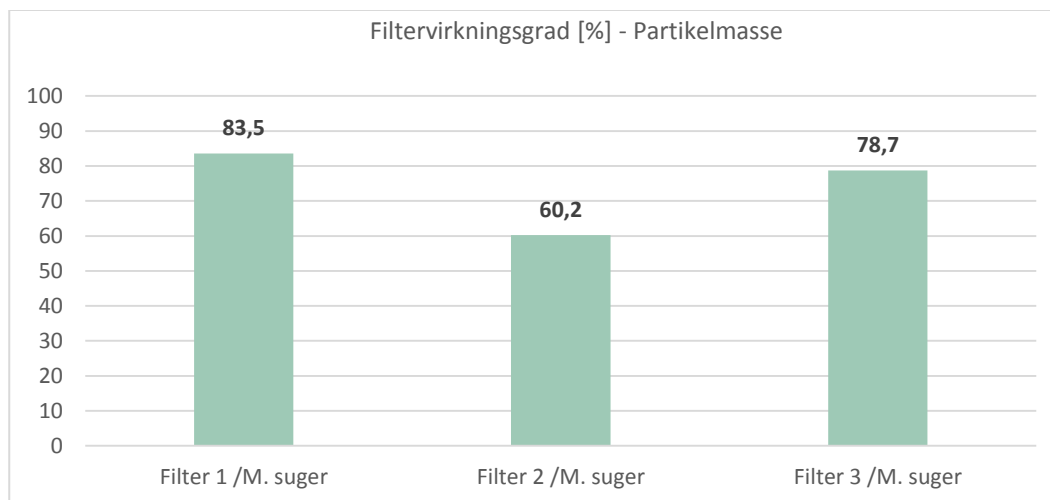


DIAGRAM 8 – FILTERVIRKNINGSGRAD

6.1.4 Oversigt, målinger på partikelmasse

I denne opstilling måles der partikelmasse i brændeovnsrøg fra brændeovn.

Diagram 9 viser det gennemsnitlige partikelmasse udslip i toppen af skorstenen ved de forskellige tests. Diagram 10 viser, hvor mange procent af den samlede partikelmasse de enkelte filtre reducerer partikelmassen med i toppen af skorstenen ved de forskellige tests.

Det ses, at filter 1 og 3 har en god effektivitet i at fjerne partikelmasse fra brændeovnsrøgen både i forsøg med og uden røgsuger. Filter 2 ligger lidt lavere i effektivitet.

Filter 1 har en høj effektivitet, undtagen ved tilførsel af tilskudsluft. Når der tilføres tilskudsluft øges røggasmængden, og derved også røggashastigheden, hvilket gør det sværere for filtrene at nå at lade partiklerne.

Når filter 1 og filter 2 har lavere effektivitet med tilskudsluft, og filter 3 har en bedre effektivitet med tilskudsluft må det bero på filter 3's udformning. Filter 3 har en forøgelse af diameteren ved elektroderne, hvilket formentlig sænker røggashastigheden, samt flere elektroder placeret i det område hvor diameteren er øget. Dette kan betyde at det når at oplade flere partikler og derfor har en større effektivitet.

Filter 2 har den laveste effektivitet i alle forsøg, og det bemærkes at ved forsøget, hvor der tilføres tilskudsluft, har filter 2, ligesom ved partikelantal, den dårligste effekt. Igen må det bero på filterets udformning og dermed evne til at nå at lade partikler ved den øgede røggashastighed der vil være på grund af den øgede røgmængde.

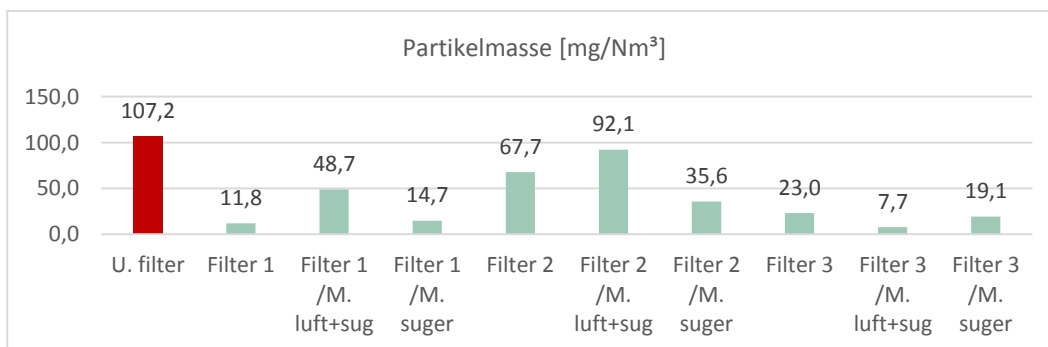


DIAGRAM 9 – UDSLIP AF PARTIKELMASSE

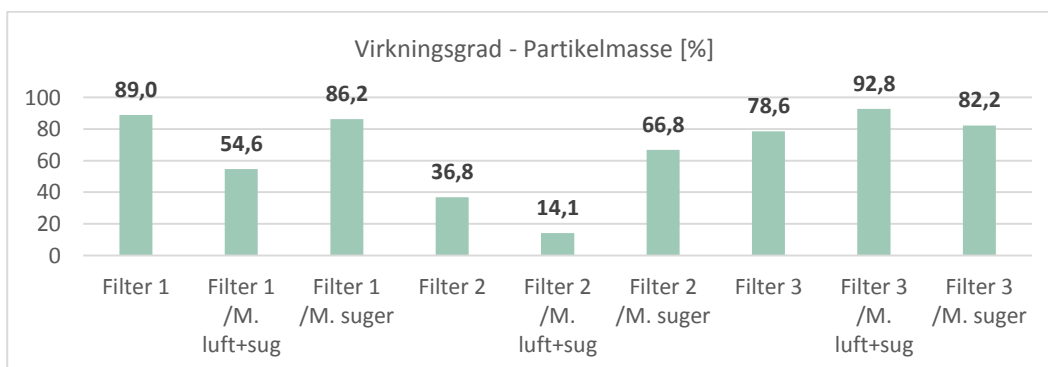


DIAGRAM 10 – FILTER EFFEKTIVITET, PARTIKELMASSE

6.2 Partikelantal

6.2.1 Målinger med filter

I denne opstilling måles der partikelmasse i brændeovnsrøg fra brændeovn uden og med elektrofilter monteret i skorstenen.

Diagram 11 viser det gennemsnitlige udslip af antal partikler (10-400 nm) i toppen af skorstenen ved de forskellige tests.

Diagram 12 viser, hvor mange procent af det samlede partikelantal de enkelte filtre reducerer partikelantallet med i toppen af skorstenen ved de forskellige tests.

Det kan ses at alle filtre har en funktion, men at filter 1 og filter 3 skiller sig ud ved at være klart bedre end filter 2.

De 2 bedste filtre, filter 1 og filter 3, har en effektivitet på over 90%.

Røggastemperaturen ved prøvetagningen er imellem 100 og 110 °C.

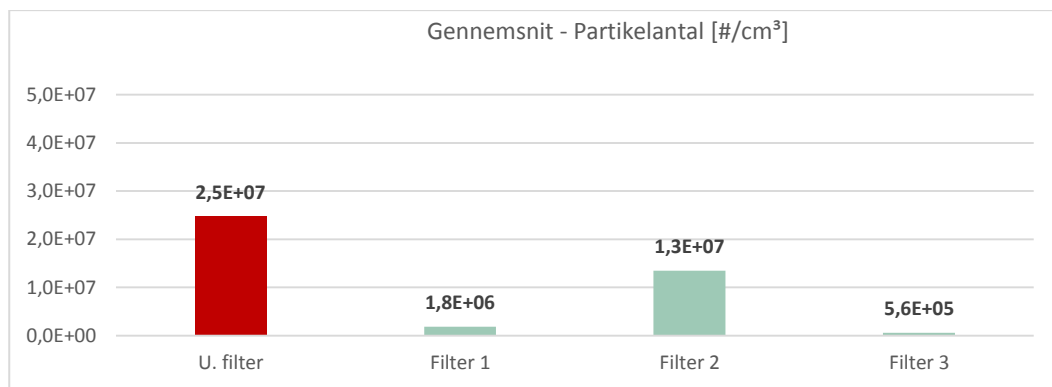


DIAGRAM 11 - GENNEMSNITLIGT PARTIKELANTAL UDEN OG MED FILTER

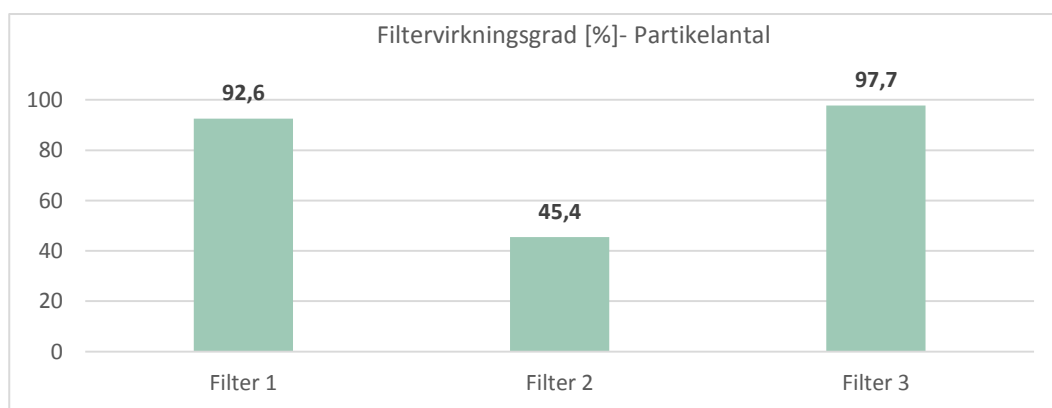


DIAGRAM 12 - PROCENT FORBEDRING I FORHOLD TIL UDEN FILTER

6.2.2 Filtre med tilskudsluft og røgsuger

I denne opstilling måles der partikler i brændeovnsrøg fra brændeovn uden elektrofilter, røgsuger og tilskudsluft, og med elektrofilter, røgsuger og tilskudsluft i skorstenen. Tilskudsluften tilføres ca. en meter før elektrofilteret og tages ind igennem et Ø 50mm hul i skorstenen. Der er ikke måling på hvor stor luftmængde der tilføres, der styres alene på at holde undertrykket lige over brændeovnen på 12 Pa.

Diagram 13, viser hvor mange partikler (10-400nm) der er i røgen hhv. uden filter med røgsuger og tilskudsluft, og med filter 1, 2 og 3 med røgsuger og tilskudsluft.

Diagram 14 viser i procent, hvor mange partikler der fjernes i forhold til brændeovnsrøg uden filter. Det overordnede billede er det samme som ved test med filter alene, dog med en lavere virkningsgrad ved især filter 2, men også filter 1. Filterets udformning kan have stor betydning i denne test, da luft hastigheden for røgen igennem filteret er øget meget pga. den større samlede røgmængde. Udformningen på filter 3 ser ud til at være i stand til at "nå" at lade flere partikler ved den højere hastighed.

Røgtemperaturen ved prøveudtagning er imellem 50 og 60 °C.

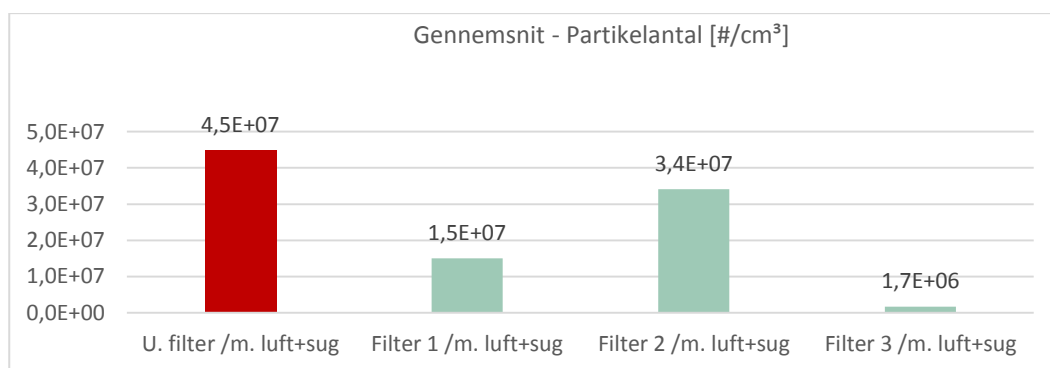


DIAGRAM 13 - GENNEMSNIT PARTIKELANTAL UDEN FILTER OG MED FILTER MED RØGSUGER OG TILSKUDSLUFT

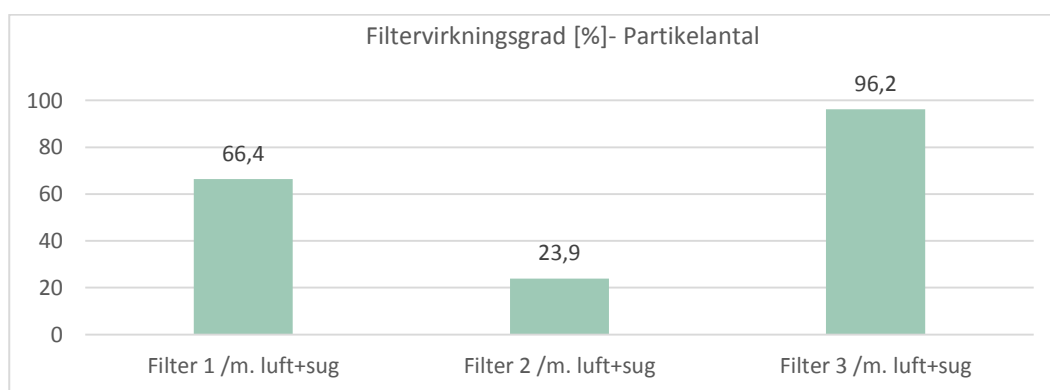


DIAGRAM 14 - PROCENT FORBEDRING I FORHOLD TIL UDEN FILTER/MED RØGSUGER OG TILSKUDSLUFT

6.2.3 Filtre med røgsuger

I denne opstilling måles der partikler i brændeovnsrøg fra brændeovn med røgsuger, med og uden elektrofilter monteret i skorstenen.

Diagram 15 viser, hvor mange partikler (10-400 nm) der er i røgen hhv. uden filter, og med filter 1, 2 og 3. Det kan ses, at alle filtre har en god funktion, men at filter 1 og filter 3 skiller sig ud ved bedre end filter 2.

Diagram 16 viser i procent, hvor mange partikler der fjernes i forhold til brændeovnsrøg uden filter. Filter 1 og filter 3 er væsentligt mere effektive end filter 2.

Røggasttemperaturen ved prøveudtagning er imellem 130 og 140 °C.

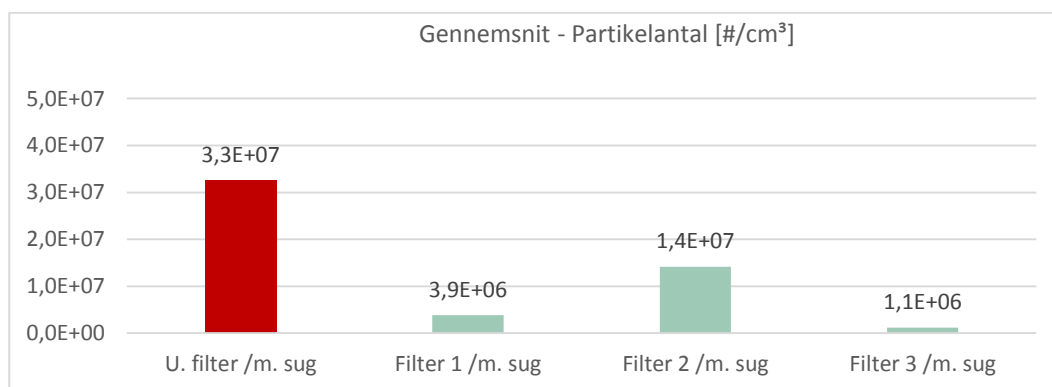


DIAGRAM 15 - GENNEMSNIT PARTIKELANTAL MED RØGSUGER, UDEN OG MED FILTER

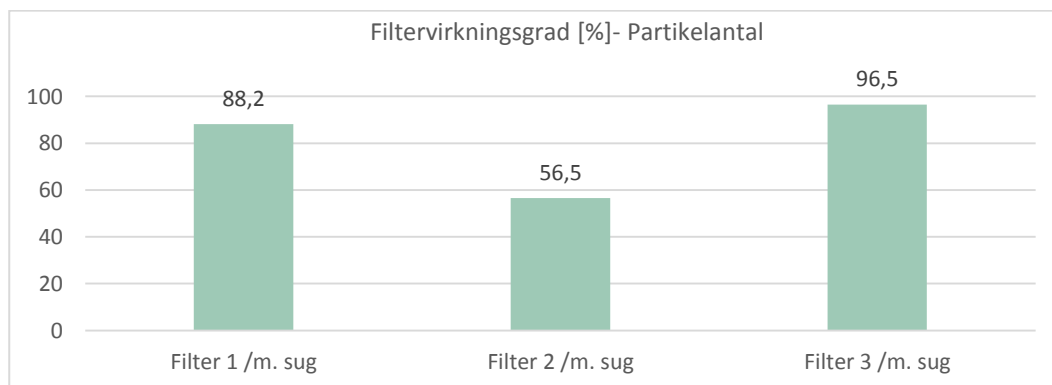


DIAGRAM 16 - PROCENT FORBEDRING I FORHOLD TIL UDEN FILTER MED RØGSUGER

6.2.4 Oversigt, målinger på partikelantal

Filter 1, Ökotupe, har en høj effektivitet, undtagen ved tilførsel af tilskudsluft. Når der tilføres tilskudsluft øges røggasmængden, og derved også røggashastigheden, hvilket gør det sværere for filteret at nå at lade partiklerne.

Filter 2, RUFF-KAT, har den laveste effektivitet i alle forsøg, og det kan konstateres at ved forsøget hvor der tilføres tilskudsluft, øges antallet af partikler med næsten 40%.

Filter 3, APP Residential ESP, har en høj effektivitet i at fjerne partikler fra brændeovnsrøgen i alle forsøg.

Når filter 1 og filter 2 er dårlige med tilskudsluft og røgsuger, og filter 3 er på niveau med effektiviteten uden tilskudsluft må det bero på filterets udformning. Filter 3 har en forøgelse af diameteren ved elektroderne, hvilket sænker hastigheden, samt flere elektroder placeret i det område hvor diameteren er øget. Dette kan betyde, at filter 3 når at oplade flere partikler og derfor har en større effektivitet.

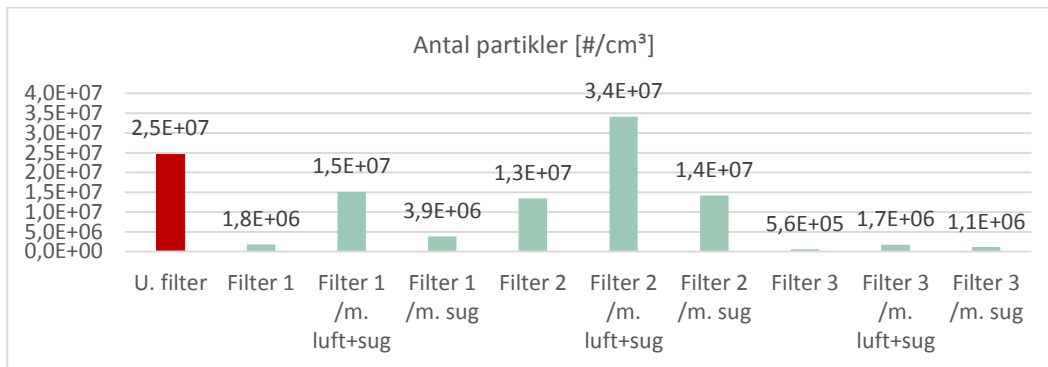


DIAGRAM 17 – SAMLET OVERSIGT FOR PARTIKELANTAL

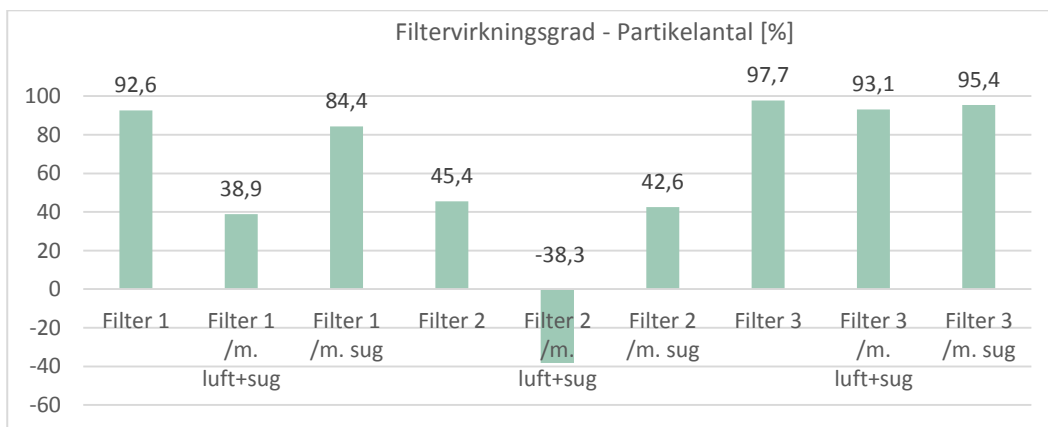


DIAGRAM 18 - SAMLET OVERSIGT FOR PARTIKELANTALS REDUKTION I %. ALLE % VÆRDIER ER I FORHOLD TIL BRÆNDEOVN UDEN RØGSUGER OG UDEN FILTER.

6.3 Iagttagelser ved måling af partikelantal

Vi havde en teori om, at når der er 20 Pa undertryk i skorstenen, forbrændes der mere træ end når der er 12 Pa. Da der er en hurtigere forbrænding er temperaturen ved prøveudtagningen højere, hvilket også kan have indvirkning på partikelantal og gennemsnitsstørrelse i det målte størrelsesområde.

Vi kan se, at den afbrændte masse træ er næsten ens. Vi kan desuden se, at der udledes et marginalt større antal partikler ved 20 Pa end ved 12 Pa (med/uden røgsuger). Den forbrændte mængde træ er i den 15 minutters måleperiode.

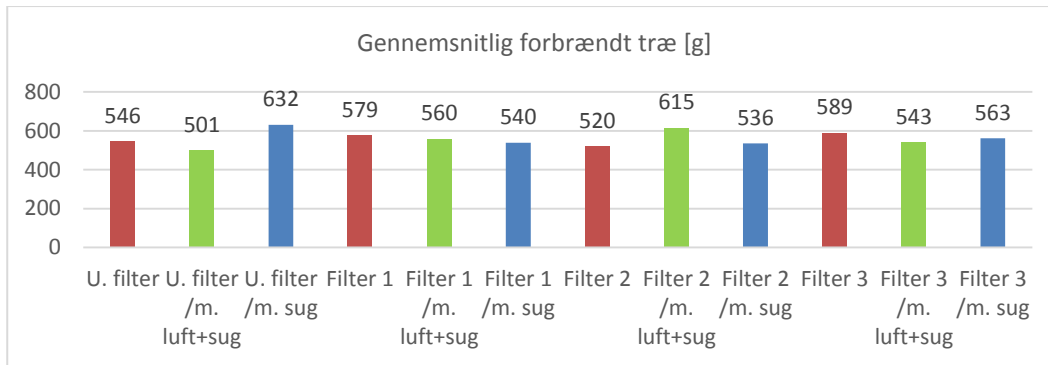


DIAGRAM 19 – GENNEMSNIT AF MASSEN AF AFBÆNDT TRÆ I MÅLEPERIODERNE

Det ses at gennemsnitsstørrelsen på partiklerne er den samme ved hhv. 12 Pa og 20 Pa (uden/med røgsuger), så vi kan konstatere, at den højere forbrændingstemperatur ikke ændrer på størrelsesfordelingen.

Dog er gennemsnitsstørrelsen ved filter 3 noget lavere. Da virkningsgraden er god på filter 3 kan det skyldes, at de flere små partikler ikke kan nå at blive udskilt, fordi de bevæger sig langsommere i horisontal retning, eller fordi at når der fjernes flere større partikler så falder gennemsnitsstørrelsen.

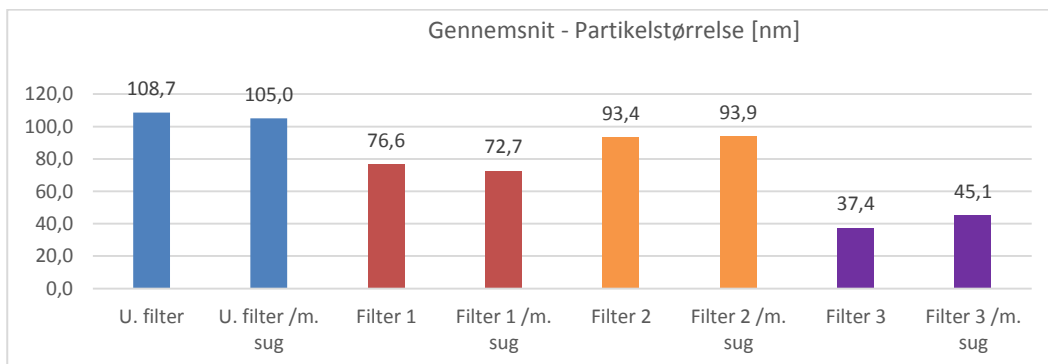


DIAGRAM 20 – GENNEMSNITLIG PARTIKEL STØRRELSE I ALLE TEST

6.4 Partikelmåling i fortyndingskanal.

De test der er udført på eget laboratorium viser, at elektrostatiske filtre har en god effekt i forhold til at fjerne partikler fra brændeovnsrøg.

Men da en tidligere udførte testrapport (Litteraturhenvisning 1) viser, at når røgen kondenserer, fordi den afkøles, kan der dannes partikler som ikke var til stede da røgen passerede elektrofiltret, og det derfor vil øge antallet af partikler, der er efter elektrofilteret. Det forsøg blev udført med en ældre, ikke svanemærket, brændeovn.

For at efterprøve dette, valgte vi som en afsluttende del af projektet, at få udført en to-dages test ved Teknologisk Institut i Århus, da de dels har faciliteter til testen, men også ekspertisen og erfaringen med målinger af partikler i fortyndingskanal.

Vi valgte desuden til den eksterne test, at medtage det udstyr vi har anvendt til forsøg i vores eget laboratorium: Brændeovnen (nyere svanemærket), filter nr. 1 (Ökotupe), måleudstyret for at måle simultant med TI's måleudstyr. På den måde kunne vi få en yderligere verificering af vores instrumenter og målemetoder.

Målinger udført den 15/9 er udført på røggas med slukket elektrofilter. Målinger udført den 16/9 er udført på røggas med tændt elektrofilter.

Herunder er indsat den konklusion Teknologisk Institut har skrevet til testen.

Teknologisk Institut

6. Konklusion

Der er i alle partikelmålinger målt antal partikler i kondenserende kanal ved ca. 30 °C både med og uden elektrostatiske filtre i måleområdet 14-638 nm.

Den gennemsnitlige reduktion af antal nanopartikler er 57% med et elektrostatiske filter opsat i brændeovnsrøg.

Den gennemsnitlige reduktion af den totale partikelmasse er ca. 90% med elektrofilter i forhold til uden elektrofilter.

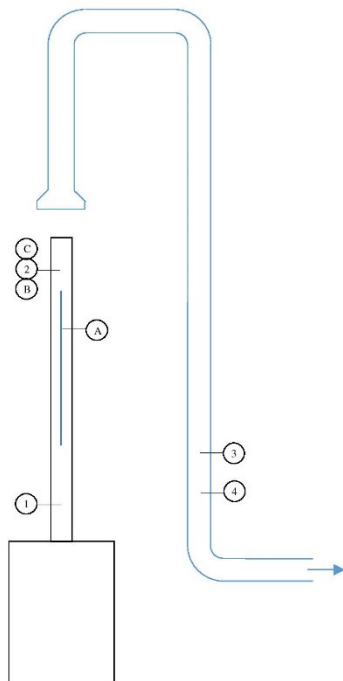
Det konkluderes derfor at målingerne viser en betydelig reduktion (57%) af nanopartikler i området 14-638 nm i kondenseret brændeovnsrøg efter et elektrostatiske filter og en stor reduktion (90%) af partikelmassen efter et elektrostatiske filter.

Testen viser, at der ikke dannes flere partikler efter et elektrofilter. At tidligere test har indikeret dette kan skyldes, at elektrofiltrene under testen har været placeret for tæt på brændeovnen, og røgen derved har været meget varm. Det kan også skyldes at testene var udført med en ældre brændeovn med dårligere forbrænding og dermed langt større emission af tjærestoffer, der er kondenseret efter elektrofilteret i fortyndingskanalen.

2.1. Procedure

- Fyring: efter fyringsmønster i EN13240, dog med naturligt træk i målesektion.
- Måling af røgtemperatur efter EN13240.
- Måling af støv og OGC efter DINplus metoden.
- Brænde: 2 x 6 prøver med birketræ og 3 prøver med asketræ.
- Støvprøver: Opsamlingstid fra 3 og indtil 33 minutter efter påfyring.
- Partikler: Målt kontinuerligt under hele prøven.
- Udstyr: Se afsnit 3.

2.2. Prøveopstilling:



Figur 1: Opsætning (schematisk) og flow

1. Støvmåling, CO, CO₂, THC (OGC) og røgtemperatur før elektrofilter.
 2. Støvmåling og røgtemperatur efter elektrofilter.
 3. Partikelmåling, størrelsesfordeling.
 4. Partikelmåling, antal.
- A. Elektrofilter, OekoTube
B. PHX innovation, Wöhler SM500 partikelmasse måler.
C. PHX innovation, TSI SMPS 3910 partikeltæller 10-400nm.

7. Kilde/referencer

1.

Schleicher, O., Fuglsang, K., Wåhlin, P., Rørdam Olesen, H., Klenø Nøjgaard, J. og Bjerrum, M.: Test of technologies for flue gas cleaning and combustion improvement for existing residential wood burning appliances. Danish Ministry of Environment, Environmental Protection Agency. Environmental Project No. 1393. 2011

<http://www2.mst.dk/udgiv/publications/2011/11/978-87-92779-55-7.pdf>

2.

Kiener, S., Turowski, P., Hartmann, H., Schmoeckel, G.: Bewertung kostengünstiger Staubabscheider für Einzelfeuerstätten und Zentralheizungskessel. Technologie- und Förderzentrum. Berichte aus dem TFZ 23, Straubing, September 2010.

http://www.tfz.bayern.de/mam/cms08/festbrennstoffe/dateien/23_bericht.pdf

3.

Kjell Porle, Steve L. Francis, Keith M. Braburn: Electrostatic Precipitators for industrial applications. 2005 by Rehva. ISBN 2-9600468-1-1.

4.

DIN CERTCO: DINplus Certification scheme for room heaters according to DIN EN 13240. September 2011.

http://www.dincertco.de/media/dincertco/dokumente_1/certification_schemes/Raumheizer_Room_heater_DINplus_certification_scheme.pdf

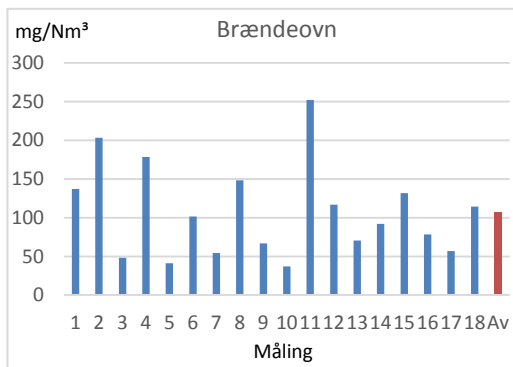
Bilag 1: Målinger på brændeovn uden og med røgsuger.

BEMÆRK: Skala på den lodrette akse i bilagsdiagrammer kan variere.

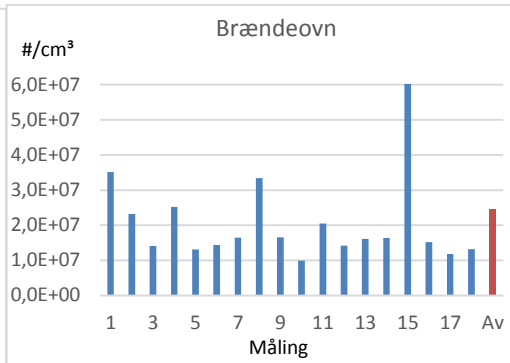
AV = Gennemsnitsværdi

UDEN RØGSUGER (12 PA)

Partikelmasse

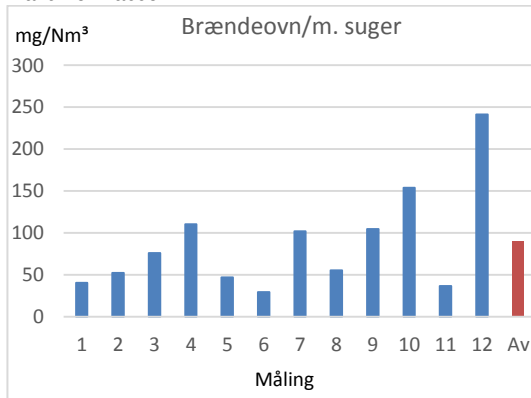


Partikelantal

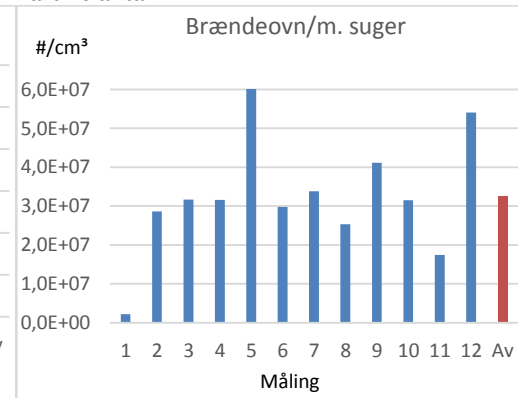


MED RØGSUGER (20 PA)

Partikelmasse



Partikelantal



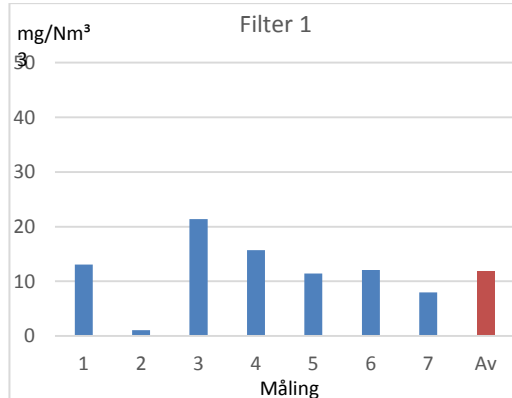
Bilag 2: Målinger på brændeovn med filter 1

BEMÆRK: Skala på den lodrette akse i bilagsdiagrammer kan variere.

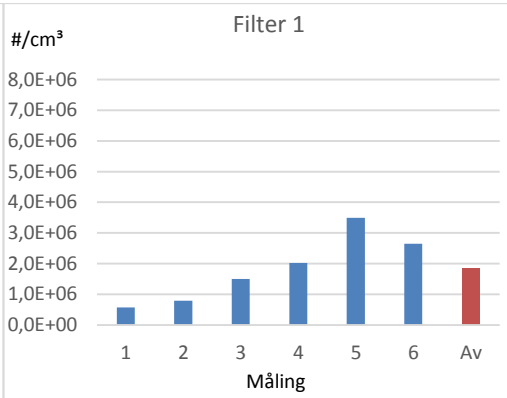
AV = Gennemsnitsværdi

UDEN RØGSUGER (12 PA)

Partikelmasse

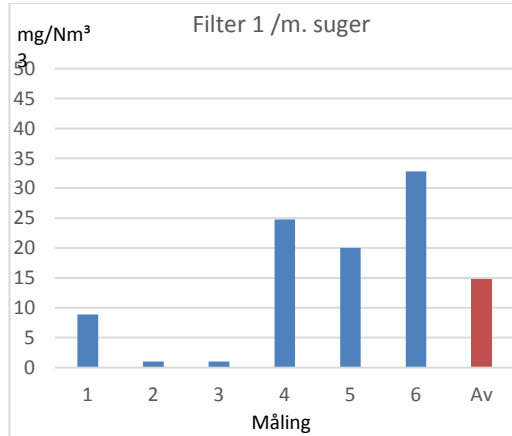


Partikelantal

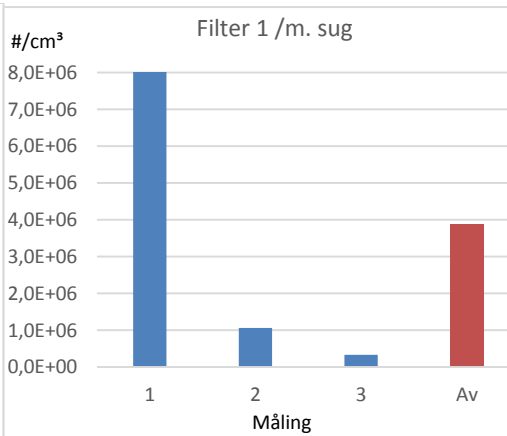


MED RØGSUGER (20 PA)

Partikelmasse



Partikelantal



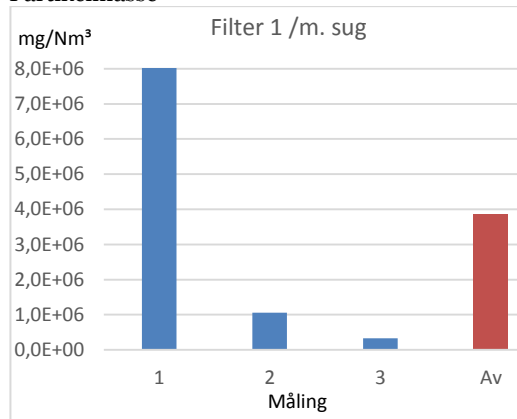
Bilag 3: Målinger på brændeovn med filter 2

BEMÆRK: Skala på den lodrette akse i bilagsdiagrammer kan variere.

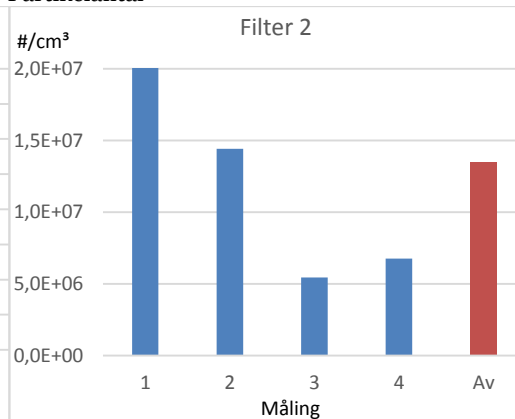
AV = Gennemsnitsværdi

UDEN RØGSUGER (12 PA)

Partikelmasse

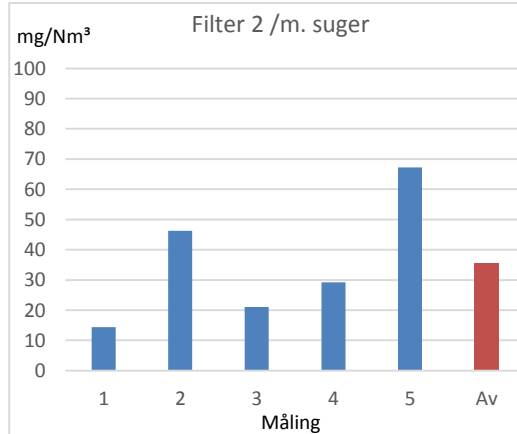


Partikelantal

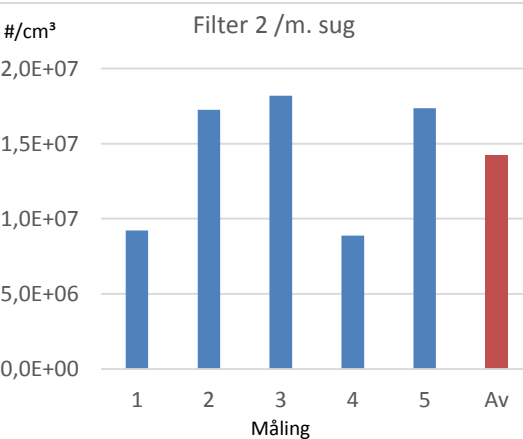


MED RØGSUGER (20 PA)

Partikelmasse



Partikelantal

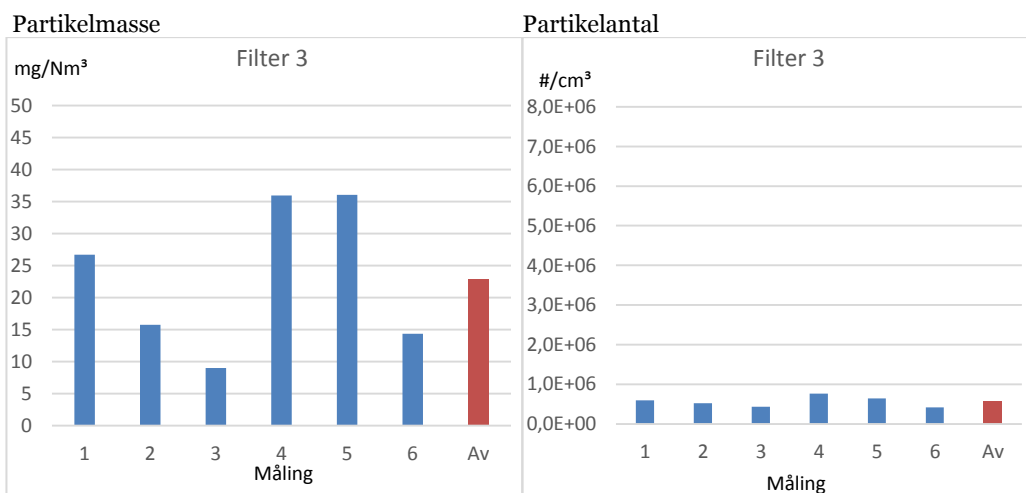


Bilag 4: Målinger på brændeovn med filter 3

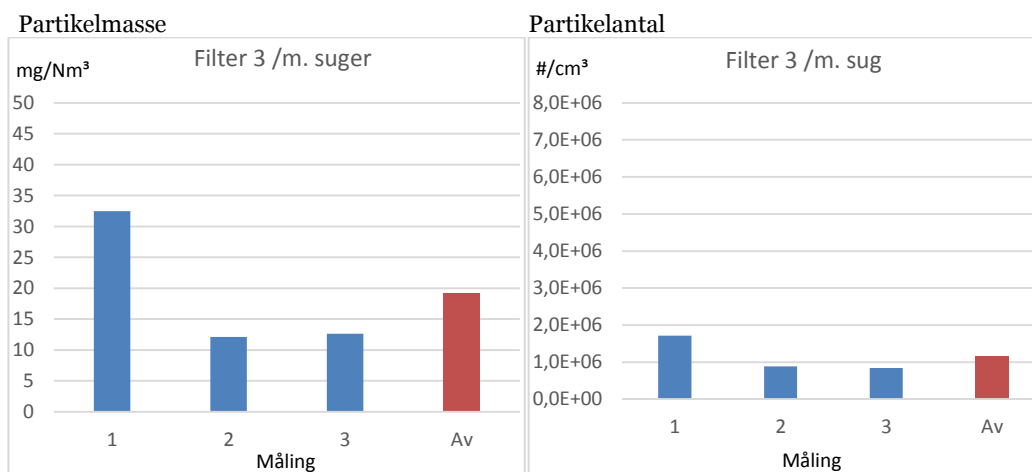
BEMÆRK: Skala på den lodrette akse i bilagsdiagrammer kan variere.

AV = Gennemsnitsværdi

UDEN RØGSUGER (12 PA)



MED RØGSUGER (20 PA)



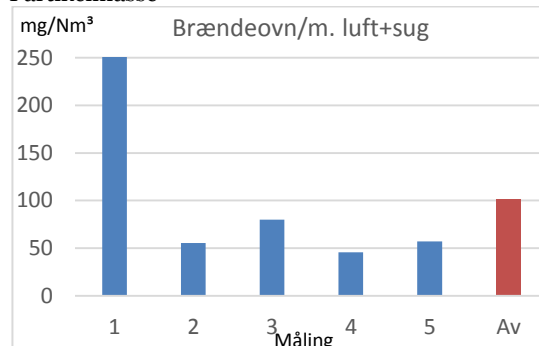
Bilag 5: Målinger med tilførsel af rumluft før filter

BEMÆRK: Skala på den lodrette akse i bilagsdiagrammer kan variere.

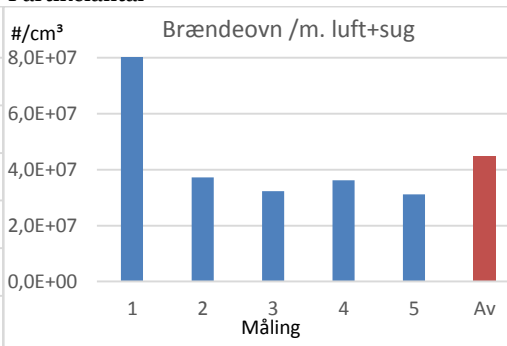
AV = Gennemsnitsværdi

BRÆNDEOVN

Partikelmasse

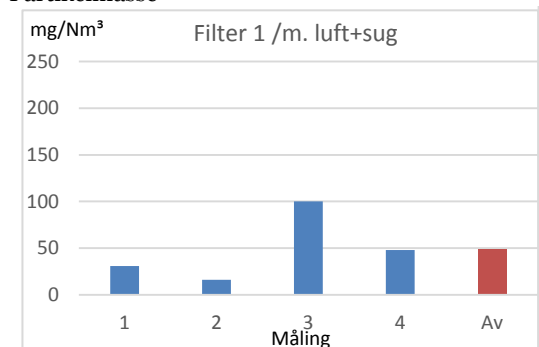


Partikelantal

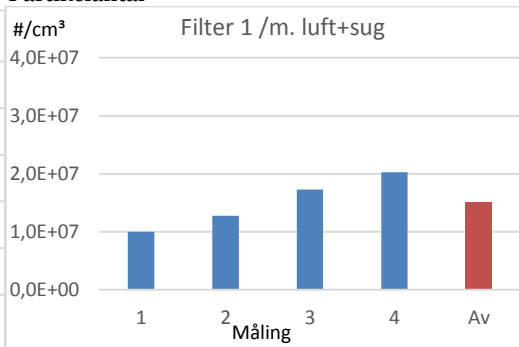


FILTER 1

Partikelmasse

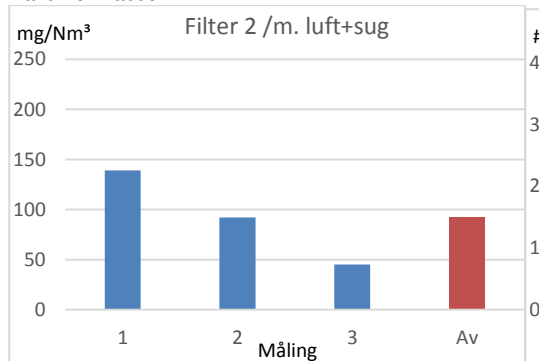


Partikelantal

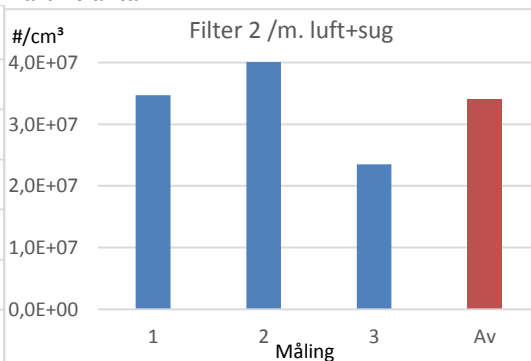


FILTER 2

Partikelmasse

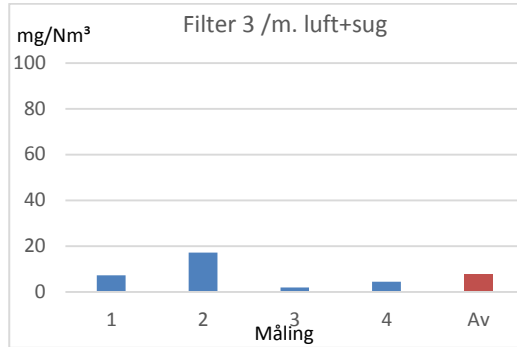


Partikelantal

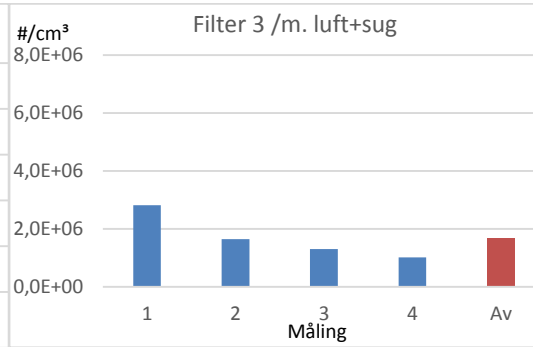


FILTER 3

Partikkelmasse



Partikelantal



Forprojekt om rensning af brænderøg for partikler

Forundersøgelsen omhandler test af elektrostatiske filtre monteret på en skorsten fra en brændeovn. Forundersøgelsen er lavet med tilskud fra Miljøministeriets program for miljøteknologi, og Force Technology har været underleverandør i form af ekspertise, knowhow og erfaring.

Forundersøgelsen skal vise effekten på masse og antal af partikler i røggassen fra en brændeovn med et elektrostatisk filter monteret i toppen af skorstenen fra en brændeovn, med og uden elektrisk røgsuger, samt en eventuel effekt ved tilførsel af tilskudsluft, der afkøler røgen før filteret.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

www.mst.dk