



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

LowCarbon Brændkammer

MUDP-rapport

Juni 2017

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

René Lyngsø Hvidberg,
Jes Sig Andersen,
Kjeld Vang, Peter K.
Sørensen, Bente Eskerod,
Ole Hansen,
Søren Nørgaard Bertel

ISBN: 978-87-93614-07-9

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

Indhold	3
Forord.....	4
Sammenfatning og konklusion	5
Summary and conclusion	8
1. Indledning til LowCarbon Brændkammer projekt	11
2. Litteraturstudie og metode til måling af black carbon	13
2.1 Litteraturstudie omkring black carbon	14
2.2 Kortlægning af måle- og analysemetoder	31
2.3 Valg af målemetode.....	39
3. Black Carbon fra danske brændeovne	43
3.1 Målekampagnens omfang og resultater	44
3.2 Sammenligning mellem ICCI målinger og LowCarbon Brændkammer målinger	71
4. Udvikling af retningslinjer og LowCarbon model-brændkammer.....	75
4.1 Fra ideudvikling til færdigt model-brændkammer.....	76
4.2 Måling og resultater af model-brændkammer samt retningslinjer	79
4.3 Øvrige BC reduktionsmetoder	88
4.4 Indikatorer på BC udledningen	92
5. Formidlingsaktiviteter i projektperioden.....	99
Referencer	100
Bilagsoversigt.....	102

Forord

Dette projekt er udført af en projektgruppe bestående DAPO, Skamol A/S og Teknologisk Institut, Sektionen for Biomasse og Forbrændingsteknologi. Projektet er medfinansieret af Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationspulje og er udført i perioden 2015 til 2017.

Projektets overordnede formål har været at mindske udledningen af black carbon fra fremtidige moderne brændeovne. For at kunne mindske udledningen har delformålene været; at udvikle en passende måleprocedure og -metode til måling af black carbon fra brændeovnsrøg, at fremstille et sæt anbefalinger og retningslinjer for fremtidige brændkamre for reduceret black carbon udledning, at udvikle et model-brændkammer for at verificere retningslinjerne, samt at finde indikatorer på black carbon udledningen ud fra de mest gængse målte emissioner benyttet i dag.

Rapportens indhold er nødvendigvis ikke et udtryk for Miljøstyrelsens holdninger, men styrelsen har støttet projektet, fordi man finder dets målsætning væsentlig og interessant.

Sammenfatning og konklusion

Projektets overordnede formål har været at mindske udledningen af black carbon fra fremtidige moderne brændeovne. For at kunne mindske udledningen har delformålene været; at udvikle en passende måleprocedure og målemetode til måling af black carbon fra brændeovnsrøg, at fremstille et sæt anbefalinger og retningslinjer for fremtidige brændkamre for reduceret black carbon udledning, at udvikle et model-brændkammer med mindre udledning end eksisterende ovne, samt at finde indikatorer på black carbon udledningen ud fra de mest gængse målte emissioner benyttet i dag, såsom på gasserne CO og OGC, men også på filterfarven opsamlet.

Det indlagte litteraturstudie i projektet har haft til hensigt at øge forståelsen for black carbon udledningen i bred forstand for klimaet, da den tilgængelige litteratur omkring black carbon fra brændeovnsrøg er meget begrænset. Litteraturstudiet har bekræftet, at black carbon er et komplekst emne med mange dimensioner. Omfanget af udledningskilder er stort og berører alle former for forbrænding, hvad enten der er tale om fossil afbrænding, biobrændsel eller afbrænding af biomasse. I litteraturen beskrives, at definitionen på black carbon kan kortes ned til en *”ideel lysabsorbende substans sammensat af kulstof”* (Petzold et al, 2013). Selve dannelsen beskrives herunder og er fra Bond et al (2013).

”Black carbon dannes under forbrænding af kulstofbaseret brændstof, når der ikke er nok ilt tilstede for fuldstændig forbrænding. Dannelsen kan ske til trods for tilstrækkelig tilført ilt. Hvis ikke ilten bliver mixet korrekt ind i flammerne, kan forbrændingen lokalt mangle ilt i forbrændingsprocessen. Hvis forbrændingstemperaturen ellers forbliver høj, og ilten tilføres og mixes korrekt ind i flammerne kan disse kulstofpartikler elimineres ved iltning inden de forlader forbrændingskammeret. Hvis ikke - dannes partiklerne.”

Der har tidligere været forsket meget i black carbon, og blandt andet Petzold et al (2013), og Bond et al (2013) antyder, at black carbon er den 2. største klimaparameter næst efter drivhusgassen CO₂. Det gør black carbon til en betydningsfuld parameter, som partnerne i dette projekt derfor har haft til hensigt at undersøge og forsøge at reducere i forbrændingsprocessen. Klimpåvirkningerne ang. koncentrationen af black carbon i atmosfæren giver ikke kun en lokal opvarmning omkring partiklerne, men kan også have påvirkning på vores nedbør, skyformering, ændring i cirkulationsmønstre, og kan aflejres vådt eller tørt på sne og is. En sænkning af partikeludledningen indeholdende black carbon vil ikke kun have positiv indvirkning på vores klima, men vil også bidrage til en reduktion af de sundhedsrelaterede effekter associeret med partikeludledningen.

Et af projektets mål var at udvikle en ny måleprocedure og vælge en tilhørende målemetode til måling af black carbon, da der ikke på nuværende tidspunkt findes en sådan procedure eller metode for brændefyring. Måleproceduren/-protokollen er en kombination af de to mest kendte forbrændingsprocedurer inden for brændeovnsfyring – den fælles europæiske norm EN13240 og den norske partikelopsamlingsmetode NS3058/59. Den nyudviklede måleprocedure kombinerer de to metoder med forskellige brændselsmængder og varierende lufttilsætninger. Dette for at blive klogere på, i hvilke fyringssituationer den største udledning sker, hvordan de enkelte ovne med forskelli-

ge lufttilsætningsprincipper og forskelligt design håndterer udledningen, og dermed hvor man i fremtiden kan sætte ind for at mindske denne udledning.

Målemetoden valgt i dette projekt til at bestemme black carbon udledningen er en termisk-optisk analysetilgang (NIOSH870-protokol), hvor partikelmasse fra de forskellige fyringssituationer er blevet opsamlet på filtre og efterfølgende analyseret. Denne analysemetode giver to fraktioner pr. filteranalyse; Elemental Carbon fraktion (omtalt EC) og Organic Carbon fraktion (omtalt OC). Før-omtalte litteratur anbefaler, at den fremtidige afrapportering vedrørende black carbon omtales korrekt og afhænger af den benyttede målemetode. Dette skyldes, at de forskellige målemetoder benytter forskellige tekniske tilgange, som derfor kræver den korrekte afrapportering for bedre at kunne sammenligne forskellige studier. I daglig tale er begreberne BC (Black Carbon), sod, EC (Elemental Carbon), eBC (equivalent Black Carbon) og rBC (refractory Black Carbon) alle synonymmer for den mest ildfaste og lysabsorberende komponent af kulstofholdige forbrændingspartikler, selvom de underliggende målemetoder er forskellige. Den termisk-optiske analysemetode valgt i dette projekt udnytter black carbons og elemental carbons fælles kemiske egenskaber, hvorfor den analyserede - og afrapporterede mængdeangivelse i dette projekt omtales elemental carbon (EC) (Petzold et al, 2013), mens black carbon benyttes som en mere overordnet terminologi.

I projektet er der udført en omfattende målekampagne med målinger fra otte moderne danske brændeovne, som alle er målt efter den udviklede måleprocedure. Målingerne er blevet udført af personer med godt kendskab til den enkelte ovn, samtidig med at der er benyttet samme type brændsel og tilnærmelsesvis samme fugtighed for alle ovnene. Alt dette for at eliminere usikkerheder/parametre og for at sikre, at de efterfølgende resultater blev skabt på baggrund af de aktuelle ovnes egenskaber og ikke et udtryk for den menneskelige påvirkning eller pga. brændsels- eller fugtvariation. Analyseresultaterne fra målekampagnen er i dette projekt afrapporteret som EC omregnet til *justeret partikulær udslipsandel* i enheden [g/kg(tørstof)]. Denne enhed er i brændeovnsbranchen gængs kendt fra den norske partikelopsamlingsmetode (NS3058/59) og benyttes som adgangskrav for brændeovne solgt på både det norske og danske marked. Analyseresultaterne på de otte ovne er ud over black carbon (afrapporteret som EC) også sammenholdt med de øvrige emissioner målt, OC, CO og OGC.

Tilsammen giver dette et omfattende datasæt af resultater, men isoleret set er den enkelte fyringssituation pr. ovn kun foretaget én gang, hvorfor resultaterne bør benyttes med forsigtighed. For at kunne analysere de mange forskellige data, kræver det forståelse for de parametre, som spiller ind på den aktuelle forbrænding eller resultatet deraf. Selvom påvirkningen af den menneskelige faktor, brændselstypen og fugtigheden er forsøgt minimeret, er der stadig et utal af kombinationsmuligheder for, hvilke øvrige fysiske parametre på den enkelte ovn, der har indflydelse på det aktuelle resultat. Derfor har det været nødvendigt i analysen at se på fællestræk ved ovnene fra målekampagnen, som var mest almindelige, for derefter at isolere disse parametre i den efterfølgende analyse. Analysen viste, at mindst følgende fire parametre har stor betydning for udledningen af den analyserede EC; (1) lufttilsætning op igennem gløderne under brændslet, (2) for kraftigt rudeskyl, (3) stål som en del af røgvenderpladeopbygningen, (4) og glat overfladestruktur på isoleringsmaterialet i brændkammeret. Ovnene i målekampagnen med disse fire parametre havde størst EC udledning. Desuden viste resultaterne, at det ikke var muligt at sammenligne forskellige brændkammergeometrier.

Indeholdt i målekampagnen var også en tredelt fyringscyklus for at få afklaret, hvornår den største del af EC udledningen sker. Resultaterne viste, at den største *absolutte udledning* sker i den mest stabile fase af forbrændingen (midterste del af forbrændingsfasen). For de øvrige emissioner målt, som gasserne CO og OGC, er den stabile del af forbrændingen den fase med mindst udledning af

disse, hvorfor resultatet fra EC-udledningen er modsat den almindelig forståelse for den typisk reneste periode i en forbrændingscyklus. Det er samtidig den længste periode målt, hvor der er størst flammeudvikling. Litteraturen understregede, at dannelsen af black carbon sker i flammer, hvis ilten ikke mixes korrekt ind i flammerne. Denne erfaring kan derfor tyde på, at selvom forbrændingen på de øvrige emissionsparametre er pæne i den midterste del af forbrændingsfasen, kan der udvikles mere for en optimal lufttilførsel til bålet. Perioden med den største *relative EC udledning* – udledning pr. minut – sker i opstartsfasen (de første 10 minutter i forbrændingscyklusen) med størst ufuldstændig forbrænding. Samtidig er perioden også den med de højeste øvrige emissioner, blandt andet fordi temperaturen ikke er tilstrækkelig. Fasen med den mindste udledning sker efter flammerne er brændt ud. Resultaterne fra målekampagnen mandede ud i anbefalinger og retningslinjer for, hvilket parametre der har betydning for at udvikle et brændkammer med reduceret black carbon udledning. Der er opstillet et sæt retningslinjer indeholdende 17 punkter, som branchen kan benytte sig af til udvikling af de fremtidige brændeovne.

Et andet af projektets mål var udvikling af et optimeret brændkammer med henblik på reduktion af black carbon. Brændkammeret er blevet designet med alle de reducerende tiltag analysegangen viste. Derudover har brændkammeret været igennem 36 CFD simuleringer med henblik på optimering af luftflows og endelig konstrueret som et fysisk LowCarbon Brændkammer. Brændkammeret er blevet testet på lige fod med de øvrige otte ovne i målekampagnen. Succeskriteriet opsat inden designfasen begyndte var, at ovnen skulle producere resultater, der var bedre end gennemsnittet af de otte øvrige ovne fra målekampagnen – ikke kun på dets EC udledning, men også på de øvrige målte emissioner (i alt EC, OC, CO, OGC og virkningsgrad). Resultaterne fra det udviklede LowCarbon Brændkammer har vist sig at overgå projektets forventninger. Ud fra gennemsnitsværdierne viste resultaterne en 100% succesrate – altså bedre end gennemsnittet på alle ovenstående nævnte parametre. En dybere analyse for alle fem parametre (EC, OC, CO, OGC og virkningsgrad), for alle ni testede ovne og alle fem fyringssituationer – alt i alt 225 situationer, blev ovnen kun overgået 14 gange. Dette giver en succesrate på 94%. I gennemsnit er de fire emissionsparametre reduceret 63% i forhold til målekampagnen, mens virkningsgraden er hævet med hele 5%, hvilket er et meget tilfredsstillende resultat.

De samlede resultater fra dette projekt er derfor mange; Den øgede viden for branchen og de øvrige partnere involveret i projektet er essentiel for at kunne ændre på tingenes nuværende og fremtidige situation. Den viden er benyttet til at udvikle en ny måleprocedure og vælge en velegnet målemetode til evt. fremtidig brug for test af black carbon fra brændeovne. Ud fra målekampagnens resultater har projektet kunnet opsætte 17 anbefalinger og retningslinjer for reducerende black carbon tiltag. Anbefalingerne og retningslinjerne er blevet verificeret ved et nydesignet LowCarbon Brændkammer med en gennemsnitlig emissionsreducing på 63%, men også en forøget virkningsgrad på 5%. I alt opnår den nydesignede ovn en succesrate på 94% på i alt 225 evaluerede/undersøgte parametre. Projektet har ved EC/OC analysen og tilhørende fotos af filtrerne fundet en visuel sammenhæng mellem tilsværtningsgraden og den analyserede mængde EC fra analyselaboratoriet. Dette kan få stor værdi for branchen i deres tidlige udviklingsfaser af nye produkter, såfremt black carbon bliver en fremtidig emissionsparameter. Der blev ikke fundet en sammenhæng mellem black carbon og de øvrige gasser målt, CO og OGC, men der er fundet en mulig sammenhæng mellem udledningstidspunkter for den analyserede mængde OC fra filtrerne og den løbende målte THC (total hydro carbon-forbindelser) i røggassen, som kan være nyttig viden til fremtiden.

Alt dette kan benyttes til at forstå, hvilket parametre der har indflydelse på black carbon udledningen fra brændeovne. Målingerne på den udviklede ovn viste ikke kun reduceret EC-udledning, men også reduceret OGC- og CO-udledning, som måles i dag, hvorfor viden herfra i stor grad kan benyttes til at udvikle mere miljørigtige brændeovne i fremtiden.

Summary and conclusion

The overall aim for the project has been to minimize emissions of black carbon from future modern wood stoves. To minimize the emissions the partial aims have been; to develop a suitable measurement protocol and measurement method for black carbon measurements from wood stove smoke; to present a set of recommendations and guidelines for future fire boxes; to develop a model-fire box with less emissions emitted than for existing wood stoves; as well as finding indications for black carbon emissions from the today most common measured emissions, such as CO and OGC, but also from the color of particulate matter on the filters collected.

The incorporated literature study in the project has had the purpose to gain knowledge about black carbon emissions in a broad understanding for the climate impact, because the literature regarding black carbon from wood stove smoke are very limited. The literature study has confirmed that black carbon is a complex subject with many dimensions. The extent of emission sources is great and influences every kind of combustion processes regarding fossil fuels, biofuels or biomass burning. In the literature, the definition on black carbon can be cut down to “*an ideally light-absorbing substance composed of carbon*” (Petzold et al, 2013). The formation itself is described below from Bond et al (2013).

“Black carbon is produced during the combustion of carbon-based fuels when oxygen is insufficient for complete combustion. The formation can happen even if adequate oxygen is supplied overall. If the oxygen is not well mixed into the flames, poor-oxygen zones can occur. If the combustion exhaust is kept hot, and if sufficient oxygen is well mixed with the flame product, these carbon particles may be eliminated by oxidation reactions before they leave the combustion chamber. Otherwise, they are emitted.”

Black carbon has previously been well investigated and Petzold et al (2013) and Bond et al (2013) implies that black carbon is the second largest climate factor next after the greenhouse gas CO₂. That makes black carbon a significant parameter, which the partners in this project have had the intention of examining and trying to reduce in the combustion process. Climate impacts regarding concentrations of black carbon in the atmosphere does not only affect a local warming around the particles but can also have an effect on precipitation, cloud formations, changing of circulation patterns, and can be deposited wet or dry on snow and ice. A reduction of the particle emissions containing black carbon particles will not only have a positive impact on our climate, but also contribute to a reduction of the health related effects associated with particle emissions in general.

One of the partial aims was to develop a new measurement protocol and to choose an associated measurement method to measure black carbon, because of the current lack of such a protocol and method for wood stove stoking. The measurement protocol is a combination of the two current most well-known protocols for wood stove stoking; the common European standard EN13240 and the Norwegian method NS3058/59. The newly developed protocol combines the two protocols with different quantities and various air settings. This was done to gain knowledge of under which combustion settings the largest emission happens, how the different stoves with different air supplies and different designs handles the emission, and thereby how to prevent the emission in the future.

The measurement method chosen in this project to determine the black carbon emission has a thermal-optical approach (NIOSH870 protocol), where particular mass from different combustion cycles has been collected on filters and later analyzed. The outcome of the analysis gives two fractions per analysis; an Elemental Carbon fraction (EC) and an Organic Carbon fraction (OC). The literature recommends that a future reporting value regarding black carbon is correctly referred to and depends of the measurement method used. This is recommended because the different methods use different technical approaches, which requires a correct reporting to enable a better comparison to other studies. Today, the terms BC (Black Carbon), soot, EC (Elemental Carbon), eBC (equivalent Black Carbon) and rBC (refractory Black Carbon) are all synonyms of the most refractory and light-absorbing component of carbon-based combustion particles, even though the underlying methods are different. The thermal-optical approach chosen in this project takes advantages of both black carbon's and elemental carbon's chemical properties, why the analyzed and reported values in this project is referred to as elemental carbon (EC) (Petzold et al, 2013), while black carbon is used as a more overall terminology.

The project has completed a thorough measurement campaign with measurements from eight modern Danish wood stoves, which all have been tested with the developed protocol. The measurements have been conducted of personal with thorough knowledge of the different stoves. Furthermore, there have been used the same wood species and roughly same moisture content of the wood for all of the measurements. These precautions have been made to eliminate uncertainties/parameters to insure that the results were caused upon the stoves properties and not influenced by the various human factor, the wood species or the moisture content of the wood. The analysis results from the measurement campaign in this project is reported as EC recalculated to adjusted particulate emissions [g/kg (dry matter)]. This unit is well known in the wood stove trade, originate from the Norwegian standard (NS3058/59), and is used as admission requirement for wood stoves sold on both the Norwegian and Danish marked. The analysis results from the eight stoves are, besides black carbon (as EC), also compared with other emissions measured, such as OC, CO and OGC.

Altogether, this gives a comprehensive dataset, but isolated this only gives one test cycle per stove, why the results should be used with caution. In order to analyze the results a certain amount of understanding about the different parameters, which influences the combustion or the results from it, is required. Even though the influences from the human factor, the wood species and the moisture content of the wood are minimized, there are still plenty of other physical parameter, which could have an influence on the results from the tested stoves. Therefore, it has been necessary in the analysis process to look at the measurement campaign stoves' common features and isolate those analysis results. The results showed that at least the following four parameters have a larger influence for the EC emission; (1) Air supply up through the ember beneath the fuel, (2) too powerful air wash, (3) steel as a part of the flue baffle set up, (4) and a smooth lining structure in the fire box. The stoves with all above-mentioned parameters had the largest EC emissions. Furthermore, the analysis showed that it was not possible to compare different fire box geometries.

Part of the measurement campaign was a split analysis of a single test cycle to determine, when the biggest amount of EC emission in a cycle is emitted. The results from the split analysis showed the biggest *absolute* emission happened in the most stabile phase of the combustion (middle phase of the combustion). In this phase both CO and OGC emissions are the lowest emission phases and therefore the EC emissions are opposite of the todays measured emissions. It is at the same time the longest period measured with the biggest flame development. The literature stated that black carbon is produced in flames if the oxygen is not correctly mixed into the flames. This experience could mean even though the combustion from the other emissions measured are low in the stabile phase, there is more work to be done regarding an optimal air supply to the fire. The period the largest

relative EC emission – emission per minute – is in the kindling phase of the burn cycle (first ten minutes after refueling) with the largest incomplete combustion. This period is also the period with the largest amount of the other measured emissions, partly because of the lack of temperature. The phase with the lowest amount of EC emissions happens after the flames has burn out. The results from the measurement campaign ended up with a set of recommendations and guidelines for which parameters that have an influence for developing a wood burning fire box with reduced black carbon emission. The guidelines contain 17 bullets, which can be useful for the trade organization (DAPO) in the development process for future wood burning stoves.

Another partial aim for the project was the development of an optimized fire box with reduced black carbon emissions. The fire box was designed with all the reducing initiatives found in the analysis from the campaign. Furthermore, the fire box has had run 36 CFD simulations for an optimized air flow and finally physically build as a LowCarbon Fire Box. The fire box was tested as the other stoves from the measurement campaign. The success criteria for the fire box's results was determined before the fire box was designed and it had to deliver results better than the mean values from the measurement campaign – not only for reduced EC emissions, but also for the other measured emissions (in total EC, OC, CO, OGC and energy efficiency). The results from the developed LowCarbon Fire Box exceeded our expectations. Compared to the mean values the results showed a 100% success rate. A deeper analysis for all five parameters (EC, OC, CO, OGC and energy efficiency), for all nine stoves and all five different burn cycles – in total 225 situations, the fire box was only passed 14 times, which give a success rate for 94%. In average, the four emission factors are reduced 63% compared to the campaign stoves, and at the same time, the energy efficiency is raised 5%, which is a very satisfying result.

The compiled results from this project are therefore many; The increased knowledge for the trade organization and the other partners in the project is essential to change the current and future situation regarding black carbon emissions from wood stoves. The knowledge collected is used for the development of a new measurement protocol and to choose a suitable measurement method for perhaps future use for test of black carbon from wood stoves. From the measurement campaign results, the project has developed 17 recommendations and guidelines for reduced black carbon initiatives. The newly designed LowCarbon Fire Box with an average 63% emission reduction has verified the recommendations and guidelines, and furthermore increased the energy efficiency 5%. In total, the new fire box has a success rate at 94% for 225 examined situations. From the EC/OC analysis and associated pictures from the filters, the project has found a visual correlation between the colors on the collected particle mass and the raw analyzed EC value from the analysis laboratory. This may have great value for the trade organization in their early future development processes if black carbon at some point will be a future emission demand. It was not possible to find a correlation between the EC emission and the other emissions measured, CO and OGC, but the project found a possible correlation between the time for the OC emissions emitted and the THC (total hydrocarbons) in the burn cycle, which also may be useful in the future.

All above is useful to understand which parameters that influences on black carbon emissions from wood stoves. The results from the developed stove not only showed reduced EC emissions but also reduced OGC- and CO-emissions, which are current emission demands, why knowledge from this project very much can be used to develop more eco-friendly wood stoves in the future.

1. Indledning til LowCarbon Brændkammer projekt

Black carbon er et emne, som tilegner sig mere og mere opmærksomhed i forskningsverdenen, hos interesseorganisationer og hos myndigheder vedrørende klimadebatten. Derfor har DAPO (brancheforeningen for danske brændeovne og pejse), Skamol (producent af blandt andet isoleringsmateriale vermiculite) og Teknologisk Institut med støtte fra Miljøstyrelsens Udviklings- og Demonstrationspulje undersøgt black carbon udledningen fra danske brændeovne. Kort fortalt har formålet har været at mindske black carbon udledningen fra fremtidige brændeovne. Delformålene har været at udvikle en måleprocedure og vælge en velegnet målemetode til måling af black carbon fra brændeovnsrøg, at udvikle et sæt retningslinjer og anbefalinger til nye brændkamre for reduceret udledning, at bygge et model-brændkammer på baggrund af retningslinjerne med lavere black carbon udledning end eksisterende brændeovne, og slutteligt at finde en sammenhæng mellem black carbon og nuværende målte emissioner, så som gasserne CO og OGC, men også at finde en sammenhæng mellem farven på filtrene af den opsamlede partikelmasse og den analyserede mængde målt.

Herunder en kort gennemgang af projektets arbejdsplaner og faserne igennem projektet. I projektet er Black Carbon (herefter forkortet BC) målt på analyselaboratorie som Elemental Carbon (heretter forkortet EC), hvorfor udledningen i denne afrapportering omtales som EC.

Viden om BC er essentielt for at kunne forstå og forbedre den nuværende situation. Et indlagt litteraturstudie i arbejdsplan 2 (AP2) har haft til hensigt at klarlægge dels dets oprindelse, udledningskilder samt konsekvenserne af BC for klimaet. Derudover har det klarlagt de i dag tilgængelige måle-, analyse- og afrapporteringsmuligheder af BC. Ud fra litteraturstudiet blev der valgt, hvilken måleprocedure/-protokol samt målemetode, der sidenhen blev benyttet til projektets målekampagne. Grundlaget for valget var, at protokollen og metoden var letgenkendeligt fra nuværende testprotokoller og overkommelig at måle med under test. Derudover skulle der ikke benyttes for omkostningstungt udstyr, så også brændeovnsproducenterne i deres udviklingsfase i egne laboratorier i fremtiden kan benytte metoden for deres nyudviklede modeller – og dermed ikke kun i prøvningsøjemed.

En større målekampagne i den efterfølgende arbejdsplan 3 (AP3) har haft til formål at teste et antal varierende og moderne brændeovne på det danske marked for blandt andet deres BC udledning, men også nuværende emissionsudledning, såsom gasserne CO og OGC. Det efterfølgende analysestudies formål var at belyse, hvilke parametre der spillede ind i udledningen af BC fra de udvalgte brændeovne. Erfaringerne draget fra målekampagnen og analysestudiet udmundede i anbefalinger til udvikling af fremtidige brændkamre i arbejdsplan 4 (AP4) for reduceret BC udledning i forhold til de i målekampagnen testede brændeovne. Projektets udviklede anbefalinger og retningslinjer blev verificeret ved et nyt fremstillet model-brændkammer, som har undergået den samme måleprocedure og de samme analyser som de øvrige brændeovne i målekampagnen. Slutteligt blev projektet løbende formidlet igennem arbejdsplan 5 (AP5) for interessenter og i faglige forskningsmiljøer – dels som conferenceoplæg, på faglige seminarer, ved standardiseringsmøder m.v.

Nærværende rapport er opdelt direkte i de aktuelle arbejdspakker og de underliggende aktiviteter heri, hvilket derfor også afspejler projektets kronologiske rækkefølge.

2. Litteraturstudie og metode til måling af black carbon

Arbejdspakke 2 er opdelt i 3 aktiviteter; selve litteraturstudiet af BC, en kortlægning af de tilgængelige måle- og analysemetoder, samt valg af den endelige målemetode til dette projekt.

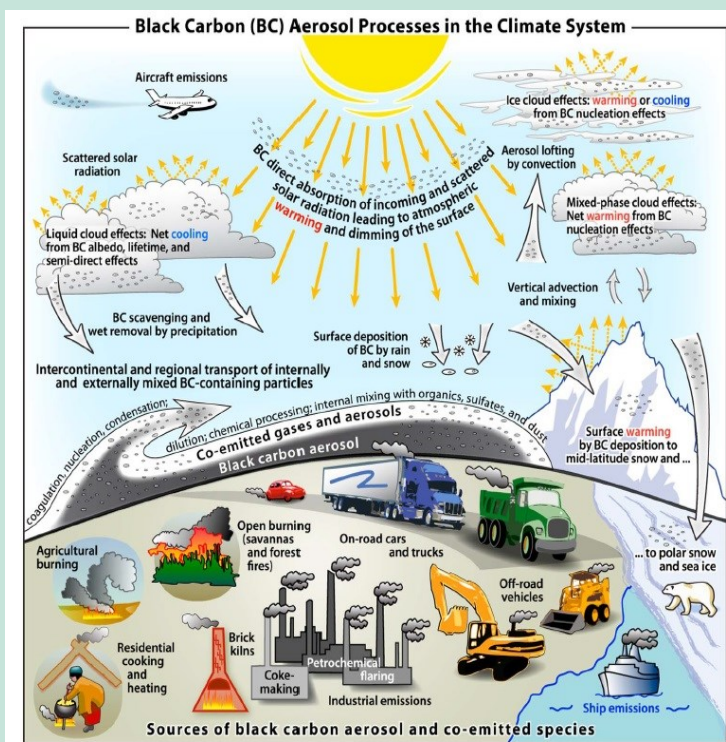
Det grundige litteraturstudie er ikke specifikt angående BC fra brændeovnsrøg, men mere BC i en bred forstand, da forskningen og målekampagner omkring brændeovne og BC er meget begrænset. Formålet er at give et helhedsindtryk over, hvor mange udledningskilder der i virkeligheden er, og hvilke konsekvenser disse har på vores klima. Kortlægningen af de tilgængelige måle- og analysemetoder giver et overblik over, dels hvor kompliceret BC er at måle, dels hvad der i et relativt beskedent projekt som dette MUDP projekt er realistisk inden for den økonomiske ramme til rådighed. Den forudgående grundige research ligger til grund for, hvad der i projektet vælges som dels måleprocedure (fyringsmetode), dels som målemetode (opsamling og analysemetode af BC). Her kombineres forskningsverdenen og brændeovnsverdenen til en fælles metode, som giver et indblik i brændeovnens ydelsesspektrum, samt en realistisk tilgængelig målemetode i en skorsten med forholdsvis høj partikelkoncentration i forhold til de mere almindelige atmosfæriske emissionsmålinger.

2.1 Litteraturstudie omkring black carbon

I de seneste årtier har flere og flere forsket og udgivet litteratur omkring emnet BC. I 2013 udgav Petzold et al. en anbefaling til brug for de fremtidige terminologier og betegnelser om netop BC relateret forskning og litteratur, da disse er meget essentielle for den videre bearbejdning og sammenligning, når det handler om måling af -, analyse af – og afrapportering af BC. Grundlæggende dannes BC i flammer og udledes som biprodukt i forbrændingsprocessen ved ufuldstændig forbrænding af fossilt brændsel, biobrændsel og biomasse (Bond et al, 2013). Dette betyder, at de potentielle udledningskilder er mange og emissionerne fra de enkelte kilder kan være veldokumenterede i visse situationer, men kan ligeledes være behæftet med stor usikkerhed i andre situationer, hvor manglende viden eller dokumentation forlægger – hvad for så vidt både angår selve udledningen, men også konsekvenserne af det udledte BC.

I daglig tale i brændeovnsbranchen er BC endnu ikke en velkendt emissionsparameter, men kommer ubevidst ind under paraplyen, når der tales om partikler og sod. I det seneste årti er der sket rigtig meget positivt inden for de danske brændeovne og for udledning af de kondenserbare bestanddele, som hydrocarbon-forbindelser, men også på partikel-siden. Dette grundet mere viden og forståelse for forbrændingen, samt en række tekniske og intelligente løsninger. Dog går der formentlig ikke mange år, før BC kan blive en emissionsparameter, som brændeovnsfabrikanter skal tage højde for i deres udviklingsarbejde. Blandt andet har U.S. EPA i deres seneste kravskærpelse (U.S. EPA RIA, 2015) benævnt BC som en af de vigtige emissionsparametre, men da der ikke foreligger en specifik testprocedure for måling og afrapportering af BC i brændeovnsrøg, indgår skærpelsen i den allerede målte og afrapporterede partikulære masse. Ligeledes er organisationen International Cryosphere Climate Initiative (ICCI) i skrivende stund opsat på at finde den rette målemetode og få fastsat grænseværdier ind i de frivillige mærkningsordninger, i første omgang den nordiske miljømærkeordning Svanemærkeordningen (ref. Jes Sig Andersen, Teknologisk Institut).

Brændeovnene er dog langt fra ene om udledningen af BC. Globalt set er der mange andre kilder, som er medvirkende til udledning af partikler og BC, med skov- og steppebrande samt fladeafbrænding af rester fra landbrugsafgrøder blandt de globalt vigtigste kilder (UNEP, 2011). BC har de seneste år fået større opmærksomhed politisk og blandt interesseorganisationer og er udråbt til at være den 2. største klimaparameter i klimadebatten næstefter kuldioxid (CO_2) (Bond et al., 2013). I modsætning til de velkendte drivhusgasser kuldioxid (CO_2) eller metan (CH_4), der opholder sig lang tid i atmosfæren, før de nedbrydes og er til ugunst for Jordens klima i en stor årrække, har BC en mere kortsigtet tidshorisont. BC opholder sig i ren form kort tid i atmosfæren med en vurderet levetid fra få dage til uger (Bond et al. 2013). Den korte levetid i atmosfæren betyder, at der næsten er øjeblikkelig klimapåvirkning fra udledningstidspunktet (UNEP, 2011). Det gør BC til en vigtig brik i klimadebatten og har potentiale for god nær-fremtidsstrategi, da reduktion af BC forholdsvis hurtigt bidrager positivt for vores klimaudvikling eller som minimum kan sænke tempoet på udviklingen.



FIGUR 1
OVERSICHT OVER DE MANGE GLOBALE KILDER DER BIDRAGER TIL UDLEDNING AF BC. SAMTIDIG VISER DEN PROCESSERNE, SOM KONTROLLERER FORDELINGEN AF BC I ATMOSFÆREN OG DENS ROLLE I KLIMASYSTEMET (BOND ET AL., 2013).

Figur 1 beskriver hele BC problematikken med udledningskilder og påvirkninger (Bond et al., 2013). Processerne i denne figur er hele omdrejningsnøglen i forståelsen af og kompleksiteten bag BC, hvorfor selve litteraturstudiet omkring BC handler om at forstå denne figur. Først og fremmest er det vigtigt at få en forståelse for, hvad BC er for en størrelse, og hvordan det bliver dannet i forbrændingsprocessen. Derudover er det vigtigt at forstå, at der er rigtig mange udledningskilder globalt set, hvor afbrænding af træ i aflukkede brændkamre blot er en lille brik i det store puslespil. Samtidig dog også en brik som i fremtiden formentlig kan gøres mere kontrollerbar med den bedre viden og udbredelse af intelligente

forbrændingsteknikker. Sidst - men ikke mindst er det interessant information, hvordan udledningen af BC med stor sandsynlighed har en medvirkende rolle i den øgede globale opvarmning i atmosfæren, afsmeltningen af sne og is på jorden, samt ændringsmønstre i nedbør, cirkulation, skydannelsesprocesser. Studiet vil ydermere kort berøre mulige helbredseffekter af BC.

2.1.1 Black carbon kompleksitet

På baggrund af udtalelsen "kulstof-arter er de mindst forståelige og sværeste at karakterisere af alle aerosoler" (Petzold et al., 2013), så er det ikke uforståeligt, at der i den tilgængelige litteratur er usammenhængende og ikke-sammenfaldende begreber omkring definitioner, egenskaber, terminologi, målemetoder og afrapportering af BC. Dette kom man et skridt nærmere i 2013, hvor Bond et al. (2013) oplyste de unikke fysiske egenskaber for BC, og Petzold et al. (2013) og Lack et al. (2013) tilsluttede sig debatten angående anbefalede fremtidige terminologier, udspecificering af målemetoder og afrapportering af værdier.

BC er ikke en ny faktor, der pludselig er dukket op. Den menneskeskabte udledning har fundet sted siden tidernes morgen ved de åbne ildsteder, og afbrænding af fossile brændsler startede for alvor i industrialiseringen. Det er et udtryk for den delmængde af de udledte partikler, som forskningen har fundet særlig essentiel for klimadebatten, og dermed en af de mange konsekvenser vi må bøde for, for den måde vi lever vores teknologiske liv på i dag. Derfor forefindes denne forbrænding i

mange processer på Jorden – nogle under kontrollerede forhold, andre under mere lavpraktiske og ukontrollerede forhold og endeligt ved naturlige ikke-menneskeskabte forhold.

2.1.1.1 Dannelse og egenskaber

Definition på BC kan kortes ned til *en ideel lysabsorberende substans sammensat af kulstof* (Petzold et al., 2013). Dannelsen sker hovedsageligt ved ufuldstændig forbrænding af kulstofholdigt materiale, ved dehydrering af sukker eller ved opvarmning af træ uden tilstrækkeligt med ilt til stede. Dannelse kan dog også ske selv ved høje temperaturer, hvor pyrolysegasserne frigives og den kemiske struktur opløses og svind af hydrogen- og/eller iltatomer sker (Petzold et al., 2013). Udledningen kan derfor ske i mange faser i en forbrænding. Dog er det først i nyere tid, at forskere delvist har fundet ud af sammenhængen mellem udledningen og klimapåvirkningerne. For at blive klogere på selve dannelsen af BC beskrives kernen i dannelsen herunder fra Bond et al. (2013):

”Black carbon dannes under forbrænding af kulstofbaseret brændstof, når der ikke er nok ilt tilstede for fuldstændig forbrænding. Dannelsen kan ske til trods for tilstrækkelig tilført ilt. Hvis ikke ilten bliver mixet korrekt ind i flammerne, kan forbrænding lokalt mangle ilt i forbrændingsprocessen. Hvis forbrændingstemperaturen ellers forbliver høj, og ilten tilføres og mixes korrekt ind i flammerne kan disse kulstofpartikler elimineres ved iltning inden de forlader forbrændingskammeret. Hvis ikke - dannes partiklerne”.

Kombinationen af de unikke fysiske egenskaber nævnt tidligere, der skal være til stede, for at der er tale om BC, er følgende (Bond et al., 2013):

- 1) Stærk absorber af det visuelle lys (MAC¹ på mindst 5m²g⁻¹ ved bølgelængde på $\lambda=550\text{nm}$. Ingen anden substans i atmosfæren har så høj en lysabsorption pr. enhed masse i så store mængder.)
- 2) Ildfast med en fordampning/kogepunkt nær 4000K
- 3) Eksisterer som en enhed af små sfærer i størrelsen 10-50nm i diameter
- 4) Uopløselig i vand og andre velkendte organiske opløsningsmidler som fx acetone.

Derudover har Petzold et al. (2013) opstillet en 5. egenskab, som også gør sig gældende:

- 5) Grafit-lignende struktur indeholdende en stor fraktion af sp²-bundede carbon atomer.

Til trods for den høje aktualitet på området og den store litteraturmængde til rådighed, er der pga. den inkonsekvente definition for den partikulære måleteknik udgivet flere publikationer, som refererer til samme egenskaber, men angivet ved andre termer og omvendt. Ligeledes refererer publikationer til forskellige egenskaber med samme lignende navne (Petzold et al., 2013). Mange af målemetoderne kan også hurtigt blive påvirket af tilstedeværelsen af andre kemiske forbindelser. Der kan være op imod 80% afvigelse mellem de forskellige målemetoder benyttet, hvor der er størst forskel mellem aerosoler med lav BC fraktion (Bond et al., 2013). Dog er den største udfordring på nuværende tidspunkt, at der ikke er tekniske værktøjer til rådighed med mulighed for at måle alle specifikke egenskaber samtidig (Petzold et al., 2013). Termerne hænger sammen med målemetoden, hvorfor konsekvent afrapportering af værdier er essentielle for sammenligning med andre målinger foretaget.

Når man dykker ned i litteraturen, bliver man mødt af et hav af forskellige fagudtryk, hvorfor det er med at holde tungen lige i munden, når det handler om at differentiere de forskellige størrelser og betydninger (følgende udtryk er et udpluk fra brugte kilder, se kildelisten); black carbon (BC), elemental carbon (EC), organisk carbon (OC), refractory black carbon (rBC), elemental black carbon

¹ MAC - Mass-specific absorption cross section. Se afsnit 2.2 for forklaring

(eBC), equivalent Black Carbon (EBC), brown carbon (BrC), lys absorberende carbon (LAC), mass absorption cross section (MAC, MAE og MAC_{BC}), sod og mange flere.

Som et eksempel på uoverensstemmelser mellem terminologi og afrapportering er målestudier foretaget både som målinger i atmosfærisk luft og målinger direkte ved udledningskilden. Disse målestudier bygger på forskellige målemetoder, hvorfor man ikke direkte kan sammenligne resultaterne, da forudsætningerne ikke er ens. Målestudierne foretaget direkte ved udledningskilden stammer typisk fra termisk-optiske målemetoder, mens målinger i atmosfæren stammer fra optiske målinger (Petzold et al., 2013).

2.1.1.2 Nuværende og fremtidige anbefalede terminologier

Ud over BC, hvis terminologi er opremset tidligere, er der herunder udvalgte terminologier beskrevet af Petzold et al. (2013) som et udtryk for de historiske og nuværende udtryk benyttet i litteraturen omkring BC.

- *Sod eller sod-kulstof* (soot-carbon eller C_{soot}): Partikler der indeholder kulstof med morfologiske og kemiske egenskaber typisk fra sodpartikler fra forbrænding af fossile brændsler. Består næsten udelukkende af kulstof og mindre mængder af hydrogen og ilt.
- *Organisk Carbon – OC*: Komponenter, hvor kulstof er kemisk bundet med hydrogen eller andre komponenter som O, S, N, P, Cl m.fl.
- *Elemental Carbon – EC*: Kulstoffoldig fraktion af partikulær masse, der er stabil op til 4000K. Kan kun blive til gas ved tilførsel af ilt ved temperaturer over 340°C. Det forventes at være inaktivt og stabilt ved atmosfæriske forhold og uopløseligt i hvilket som helst opløsningsmiddel.
- *Refractory Black Carbon – rBC*: Kulstoffoldig fraktion af partikulær masse, som er uopløselig og fordamper kun ved temperaturer omkring 4000K.
- *Light-absorbing Carbon – LAC*: Kulstoffraktion af de atmosfæriske aerosoler, som stærkt absorberer lyset i det synlige spektrum.
- *Brown Carbon – BrC*: Lysabsorberende organisk kulstof i atmosfæriske aerosoler af varierende oprindelse fra forbrænding, som fremkommer mere brunt end sort. Den brune forekomst associeres med absorption over hele det visuelle spektrum.
- *Mass-specific Absorption Cross section – MAC*: Refereres også ofte til *Mass Absorption Efficiency* – MAE og står for lysabsorptionen per masse og angives i enheden m^2g^{-1} . Denne koefficient er essentiel for massebestemmelsen og varierer signifikant over tid og sted, afhænger af udledningskilde og transformation under transport m.m. Denne koefficient antager, at BC er det eneste lysabsorberende partikulære stof tilstede, hvorfor mineraler og ikke-BC lysabsorberende partikulære masse (så som brown carbon, BrC) ikke skal medregnes eller alternativt korrigeres for. Til at tage højde for fx brown carbon benyttes Ångström eksponenten: α_{ap} for specifikke bølgelængder. BC ligger typisk med en α_{ap} mellem 1.0-1.5, mens organisk carbon-indeholdende partikler kan vise en stor lysabsorption i det blå til ultraviolette spektrum med en α_{ap} op til 7 og uden for det synlige spektrum. I nyere undersøgelser konkluderes det, at medmindre de ikke-BC absorberende komponenter (som OC, BrC eller mineraler) bidrager med mere end 40% af den totale absorption, kan en mængdeangivelse af de forskellige komponenter ikke afledes (Petzold et al., 2013).

I daglig tale er begreberne BC, sod, EC, eBC og rBC synonymer for den mest ildfaste og lysabsorberende komponent af kulstoffoldige forbrændingspartikler, selvom de underliggende målemetoder er forskellige. Derfor anbefalede Petzold et al. (2013), at der for fremtiden blev benyttet nedenstående terminologier og angivelser afhængig af metoden benyttet til at fastslå mængden.

- *Total Carbon – TC*: Angiver den totale partikulære masse i luftbårne partikler.
- *Black Carbon – BC*: Når der tales om målemetode, er BC en brugbar beskrivelse vedrørende lysabsorberende kulstoffoldige substanser i atmosfæriske aerosoler. Dog for mængdeangivelse anbefales det at bruge de underliggende bestemmelser. I mangel af målemetode, kan BC bruges som en beskrivende terminologi, hvis der refereres til substanser, der deler samme karakteristika som BC, specielt kulstoffoldig sammensætning kombineret med dens lysabsorberende egenskaber. Ved analyse og afrapportering anbefales det at bruge

den mere specifikke underliggende terminologi, som refererer til den benyttede målemetode.

- *Equivalent Black Carbon - EBC*: Udtryk og masseenhed, som skal benyttes i stedet for BC, når der tales resultater fra optiske absorptionsmetoder. Afrapporteringen skal ske med et passende MAC til at konvertere lysabsorptionskoefficienten til massekoncentration. Ved afrapportering af massekoncentrationen (EBC), er det meget vigtigt at identificere MAC-værdien brugt til konverteringen og at udspecificere fremgangsmetoden til at separere potentielle bidrag fra Brown Carbon (BrC) eller mineraler.
- *Elemental Carbon – EC*: Skal benyttes i stedet for BC vedrørende data fra metoder, som specifikt afrapporterer kulstofindholdet i kulstofholdigt materiale. Dette er specielt adresseret til metoder, der benytter *evolved carbon*, *aerosol mass spectroscopy* og data fra *Raman Spectroscopy*, som refererer til den grafitlignende struktur i kulstofatomerne.
- *Refractory Black Carbon – rBC*: Skal benyttes i stedet for BC vedrørende målinger udledt fra *laser-induced particle incandescence* - hvidglødende tilstandsmetoder. Indtil nu benyttes om disse metoder rBC, erBC eller RC og bør blive skiftet ud med udelukkende rBC. Metoderne benytter den termiske stabilitet af den kulstofholdige masse og behøver lysabsorptionseffektiviteten af det analyserede stof.
- *Soot – Sod*: Sod er en brugbar betegnelse for partikulær masse udledt fra ufuldstændig forbrænding.

Det gør det heller ikke mindre komplekst, at de strikse definitioner og termer ikke er så praktiske brugbare, da partikulær masse næsten aldrig vil forekomme i ren form (BC) i atmosfæriske aerosoler, men altid vil forekomme som et variabelt mix af partikulære forbindelser med forskellige materielle egenskaber (Petzold et al., 2013). Ligeledes gør kompleksiteten omkring levetiden, transporten af de luftbårne partikler, typer af udledningskilde, placering af udledningskilde på de forskellige breddegrader, sæsonvariation, højdemæssig udvikling i atmosfæren etc. det meget vanskeligt at estimere både emissionsværdier, massekoncentrationer og konsekvenserne af disse. Derfor anbefales det, at allerede mixede og ældede partikler indeholdende fraktioner af BC, som typisk måles i atmosfæren, ikke længere skal kaldes "*black carbon partikler*" eller "*sodpartikler*". Derimod skal de betegnes som "*BC -indeholdende partikler*" ("*BC-contained particles*") (Petzold et al., 2013). Når disse måles højt i atmosfæren er de så langt fra deres oprindelige tilstand, at de ikke længere kan associeres med en specifik udledningskilde. Afrapportering af BC forbindelserne målt bør refereres som rBC, EC eller EBC fraktioner afhængig af målemetoden benyttet.

2.1.1.3 Black carbon ud fra to forskellige klassificeringer

Som nævnt er den rene form af det dannede BC en lille størrelse omkring 10-50nm (Bond et al., 2013), men kan også være helt ned til under 10nm (Petzold et al., 2013). Hvis ikke det dannede BC mixes allerede i selve forbrændingsprocessen med andre komponenter, kan mix ske i atmosfæren op til få timer efter dannelse. Globale modeller forudsiger mix indenfor 1-5 dage i forskellige højder (Bond et al., 2013). Det mixede materiale danner små grupperinger indeholdende sulfater og organisk materiale som en hinde uden om kernen af BC. Den samlede dannelse af BC-indeholdende partikelmasse kaldes *total carbon* (TC) og deles typisk ind i 3 fraktioner oplistet herunder.

- Ikke-organisk materiale (IC) – sulfater og salte
- Organisk materiale (OC) – herunder brown carbon.
- 3. fraktion, som hidtil oftest omtalt BC, sod, elemental carbon (EC) eller refractory black carbon (rBC).

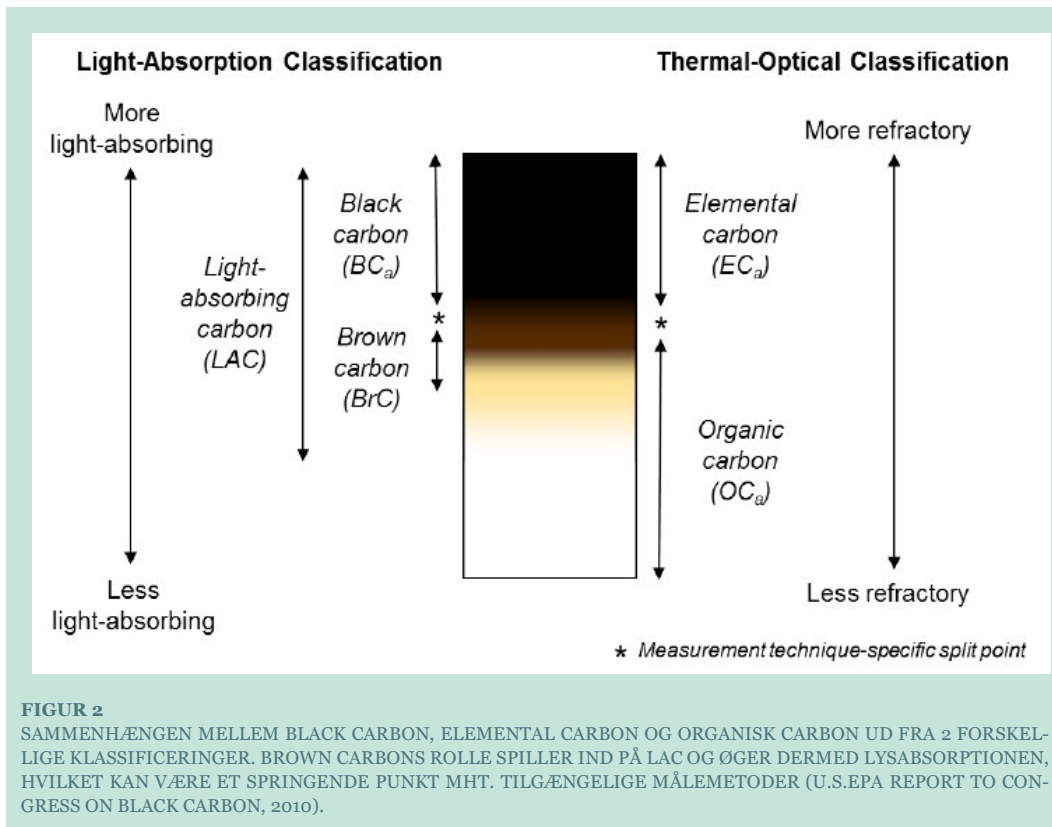
På *Figur 2* betragtes sammensætningen af BC indeholdende partikulær masse (TC) ud fra to klassifikationer – ved lysabsorption og ved termisk-optisk klassifikation. Til venstre illustreres jo mørkere stof, jo mere absorberer stoffet lysets stråling. BC er mørkt og derfor mest lysabsorberende. Organisk materiale er "farveløst", og absorberer derfor ikke lysets stråler. Overgangsperioden fra "farveløst" til mørkt kaldes brown carbon pga. de brunlige nuancer. Alt det mørke materiale - BC og

overgangsmaterialet brown carbon, kaldes samlet for lysabsorberende carbon (LAC). Dermed kan opstilles følgende udsagn ud fra stoffets lysabsorberende egenskab:

- $LAC = BC + BrC$

Betragtes materialet derimod ud fra dets ildfasthed, altså en kemisk egenskab, er elemental carbon meget ildfast. Størstedelen af elemental carbon består af BC og er stabil op imod 4000K. Derimod er organisk carbon meget flygtig, som hurtigt kan fordampe ved lave temperaturer. Dette udnyttes ved forskellige målemetoder til at fjerne det organiske materiale, så kun det mest ildfaste materiale er tilbage og kan afrapporteres. Ud fra den betragtning kan derfor opstilles følgende:

- $TC = EC + OC$



Det vanskelige ved at adskille elemental carbon fra BC består i, at LAC også indeholder en del af det mørke brown carbon. Hvor stor en del denne udgør er ukendt på nuværende tidspunkt, men det er formentlig forskellig fra både brændsel og selve forbrændingsprocessen (U.S. EPA RIA, 2015). Samtidig er forskellen blandt andet grunden til, at man ikke direkte kan sammenligne de forskellige målemetoder, da metoderne betragtes ud fra to forskellige egenskaber.

Fuldstændig forbrænding af biomasse omdanner alt brændsel til CO_2 og H_2O med biproduktet varme. I praksis sker dette dog sjældent, hvorfor ufuldstændig forbrænding blandt andet resulterer i emissioner af varierende karakter som CO, VOCs, fine og ultrafine partikler herunder OC, BC, BrC (UNEP, 2011 og U.S. EPA RIA, 2015). Forskningsstudier har vist, at de store kilder i udledningen af BC også er store kilder af udledning af $PM_{2.5}$, hvorfor en reduktion af BC ligeledes vil give en reduktion af $PM_{2.5}$. Derimod vil en reduktion af $PM_{2.5}$ ikke altid give en reduktion af BC, da $PM_{2.5}$ kan indeholde store mængder af andre forbindelser som inorganisk materiale som salte, organisk og

brown carbon (UNEP, 2011). BC og den mest lysabsorberende del af organisk carbon (brown carbon) kan have store konsekvenser for vores klima i form af stigende temperaturer, is- og sneafsmeltning og forstyrrelser i nedbørmønstre, mens den mindre absorberende del af organisk carbon kan have den modsatte og positive effekt.

De ikke-lysabsorberende komponenter i det organiske materiale har en tendens til rettere at sprede lyset i stedet for at absorbere lyset, hvilket kan give en kølende effekt. EC/OC forholdet kan primitivt give et billede af, om kilden har et overvejende kølende potentiale (forhold under 1) frem for en potentiel opvarmende virkning (U.S. EPA RIA, 2015). Fossilt brændsel (som fx dieselaftbrænding i motorer) udleder et EC/OC forhold svarende til 1:1, hvorimod åben biomasseafbrænding udleder et EC/OC forhold svarende til 1:9 eller ratio 0,11 (U.S. EPA RIA, 2015). Tabel 1 illustrerer udvalgte udledningskilders OC/BC forhold, hvor det kan ses, at de fossile brændsler bidrager med stort set lige andele af OC og BC og dermed underbygger ovenstående, hvis elemental carbon (EC) ligestilles med black carbon (BC).

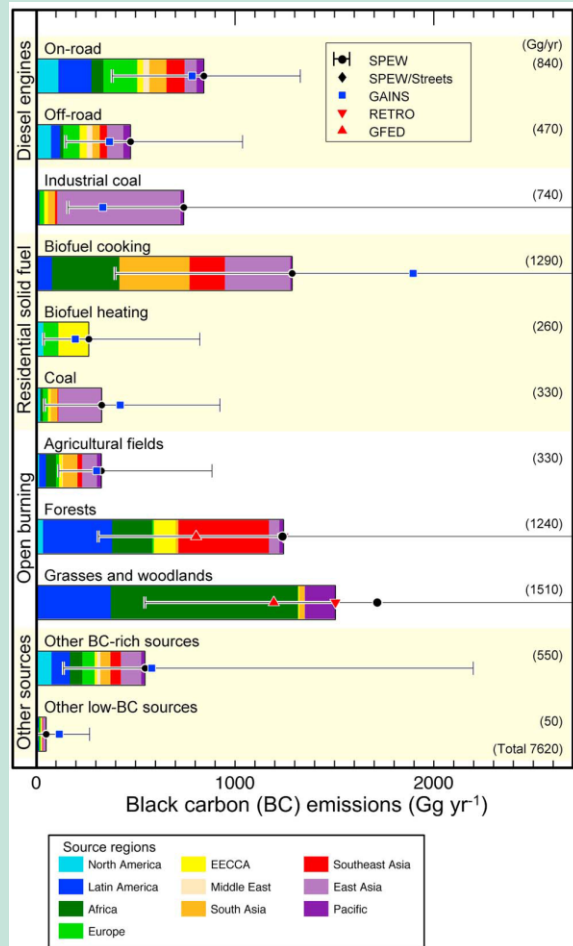
Source Category	BC (Gg)	OC (Gg)	OC/BC
Energy/Power	54	368	7
Industry	1,497	2,249	2
Transport/Mobile	1,340	1,447	1
Domestic/Residential	1,947	7,746	4
Open Biomass Burning	2,755	23,868	9
Waste	35	47	1
Totals	7,628	35,725	4.7

TABEL 1
UDVALGTE UDLEDNINGSKILDERS BC OG OC BIDRAG I FORBRÆNDINGSPROCESSEN (U.S. EPA REPORT TO CONGRESS ON BC, 2012).

En del af dette projekt er at undersøge, hvordan moderne optimerede brændeovne ligger på denne skala for at blive klogere på, hvordan udledningen fra brændeovnsrøg i forskellige afbrændingsmønstre påvirker klimaet. Brændeovnsproducenter forsøger i deres udvikling at kombinere brugervenlighed med en optimering af deres brændkamre og lufttilførsel, så det giver så ren en forbrænding som muligt for at overholde nuværende emissionskrav. Hvorvidt det forholder sig for udledningen af black carbon belyser analysen af målekampagnen senere i denne rapport fra *afsnit 3*. Mere om baggrunden for, hvorfor det er interessant netop at undersøge udledningen fra brændeovne ses under *afsnit 2.1.6*.

2.1.2 Udledningskilder

Udledningskilderne til BC er som nævnt mange og varierer utrolig meget lokalt, da verden ikke er uniform mht. ens topografi, ens klima, ens ressourcer, ens teknologi og generelt dermed ens forudsætninger. Tilbage er vi ved *Figur 1*, hvor mange forskellige faktorer spiller ind. Opstillede klimamodeller vurderer imidlertid afbrænding af skov, savanne og afgrøde som den største faktor globalt. Andre dominerende udledningskilder afhænger af geografisk udledning. I Europa, Nordamerika og Latinamerika bidrager on-road og off-road dieseldrøjetøjer med omkring 70% af den totale emissionsudledning. I Asien og Afrika bidrager afbrænding af kul og biomasse mellem 60-80% af den totale emissionsudledning. Kul til opvarmning er ligeledes en meget stor del i Kina, det tidligere USSR og enkelte Østeuropæiske lande. Disse kategorier samlet udgør omkring 90% af den total emissionsudledning globalt, hvor skib- og flytrafik står for 9% og den sidste 1% går til andre kilder betegnet med lave BC emissioner (Bond et al., 2013).

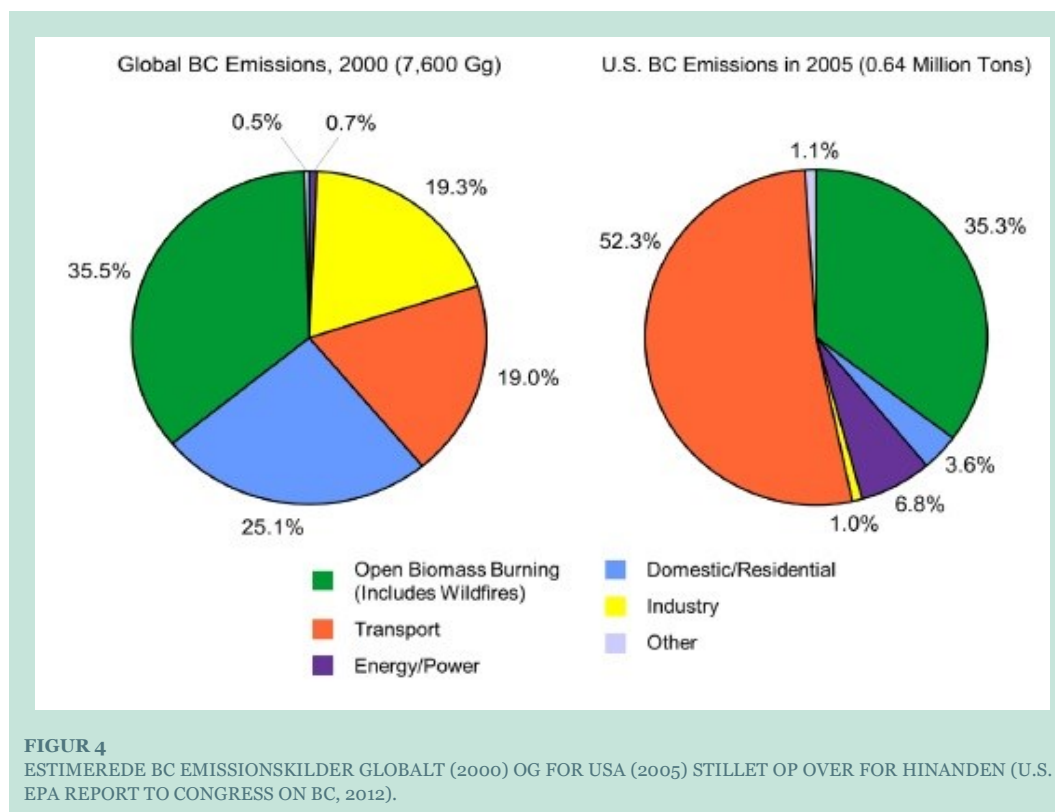


FIGUR 3
BC EMISSIONSUDLEDNING DELT UD PÅ OVERORDNEDE UDLEDNINGSKILDER SAMT OMRÅDESPECIFIKATION. BARERNE INDIKERER NIVEAU, MENS FARVERNE INDIKERER REGIONERNE GLOBALT (BOND ET AL., 2013).

hvor lidt over en 1/3 af de globale emissioner stammer fra åben afbrænding, 25% fra opvarmning og madlavning i husstande, 19% fra både hhv. transport og industri med afbrænding af kul. De sidste 1,2% kommer fra energiudvikling og andet. Hvis der udelukkende ses på USA med data fra 2005, som betegnes som et I-land, forekommer stadig store kontrollerede biomasseafbrændinger, mens der er relativt større udledninger fra transport end globalt set. Imidlertid kan det være svært at sætte biomassefyret kedler og brændeovne i en af kategorierne, men disse kunne indgå i de 3,6% for opvarmning af beboelse. Dog kan denne kategori også indeholde flere andre emitterende udledningskilder, såsom oliefyr, kulopvarmning m.fl. Dermed sagt at udledningen fra lukkede ildsteder må siges at være ganske lav ud af den totale BC udledning fra et så stort I-land som USA. Globalt set er denne andel meget større, hvis man medregner madlavning og opvarmning over åben ild eller primitive komfurer og bygninger, som også *Figur 3* understøtter.

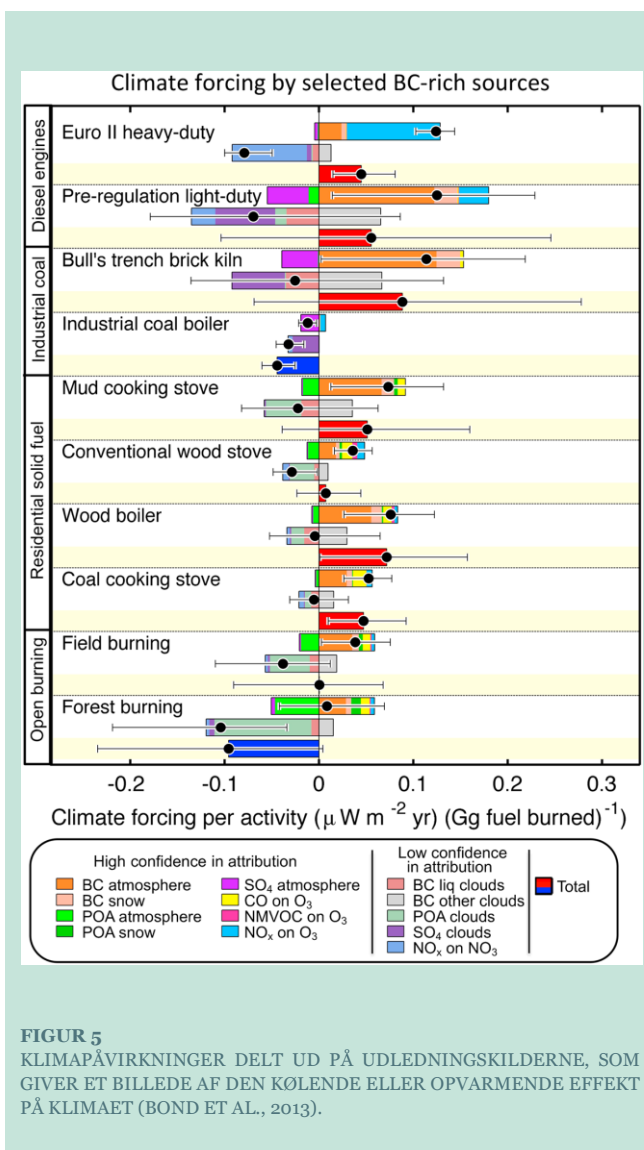
Dog er der i litteraturen forskellige bud på netop disse tal, da der benyttes forskellige modeller til at forudsige fordelingen og størrelserne. Her i *Figur 3* er afbilledet en estimeret fordeling af BC emissionsudledningen fra data fra år 2000 ud fra regionerne globalt. Her ses at afbrænding af biomasse på store områder, samt biomasse brugt til madlavning i u-lande er store udledningskilder af BC (ca. 4-5x bidraget fra biofuel heating). Ydermere bidrager transport både fra on-road og off-road køretøjer bredt globalt. Industrien giver også et stort bidrag med kulafbrænding, dog mest markant fra Østasien. I mindre grad bidrager biobrændsel til opvarmning. I udgivelsen *U. S. EPA Report to Congress on BC (2012)* er der ligeledes afbilledet en fordeling globalt. Fordelingen på *Figur 4* er dog ikke ens med *Figur 3*, hvorfor de ikke kan sammenlignes direkte, men set i lyset af sammenligningen mellem I-landet USA, så er dette en interessant figur, hvis man tager brændeovnsbillerne på.

Figur 4 illustrerer forskellen mellem den estimerede globale fordeling af udledningen af BC sammenholdt med udledningen i USA. Opgørelsen globalt er lavet med data fra år 2000,



Der er generelt stor forskel på, om forbrændingen af fast biomasse sker i åbne eller lukkede brændkamre, hvor temperaturen og lufttilførslen kan kontrolleres og sikrer den rette forbrænding. I det store hele kan man godt få svært ved at give moderne brændeovne en stor andel i den globale udledning af BC. Hvis man skal tro på, at en andel af de sidste 3,6% i USA i 2005 blandt andet skyldes brændeovne og kedler, så kan vi herhjemme trøste os med, at hvis Europa ser lignende ud, så har de danske brændeovne siden 2002 år mindsket partikeludledningen med en faktor 5 (Ingeniøren, 15. maj 2013). Ikke kun de danske producenter af brændeovne viser disse tendenser, men i takt med at kravene i europæiske lande med stor brændeovnefterspørgsel bliver strammere og strammere samt de ny-vedtaget ECDesign emissionsgrænser (MST, 2014), så er hele branchen af lukkede ildsteder (både pejseindsatse og brændeovne) på vej imod meget mere miljørigtig fyring kontra for blot få år siden, hvor dataene fra både *Figur 3* og *Figur 4* stammer fra.

Figur 5 underbygger påstanden om, at BC relateret udledning fra moderne (her benævnt konventionelle) brændeovne er lav ud af de opstillede udledningskilder globalt set. Hvor stor en del der kommer fra de enkelte kilder afhænger som sagt meget af, hvor man geografisk befinder sig. Ligeledes afhænger det af, hvilke klimamodeller der benyttes. Der er mange forskellige klimamodeller, som hver især tager højde for forskellige parametre, og der er forskellige usikkerheder på de enkelte parametre. Ydermere bygger mange af de eksisterende klimamodeller på data, der er helt tilbage fra år 2000 (Bond et al., 2013). Der er sket utrolig meget på teknologisiden inden for næsten alle områder i den industrialiserede del af verdenen, hvor alle emissionskrav løbende bliver skærpet, hvad enten der er tale om fossil- eller biomasseafbrænding. Mere om dette i senere *afsnit 2.1.4*.



FIGUR 5
KLIMAPÅVIRKNINGER DELT UD PÅ UDLEDNINGSKILDERNE, SOM GIVER ET BILLEDE AF DEN KØLENDE ELLER OPVARMENDE EFFEKT PÅ KLIMAET (BOND ET AL., 2013).

ste bare giver mindre troværdighedsniveau, pga. den manglende forskning, viden og forståelse på specielt BCs virkning på skydannelse. Værd at nævne til denne figur er, at der ikke kun medtages BC, men også forskellige andre emissionsparametre. Betragtet ud fra den opvarmende og kølende klimateffekt giver brick kilns (udbredt i U-lande til industriel afbrænding af kul) og dieselaftbrænding en stor opvarmende effekt, men også afbrænding af træ i brændekedler giver en opvarmende effekt. Åben biomasseafbrænding giver til gengæld en stor kølende effekt.

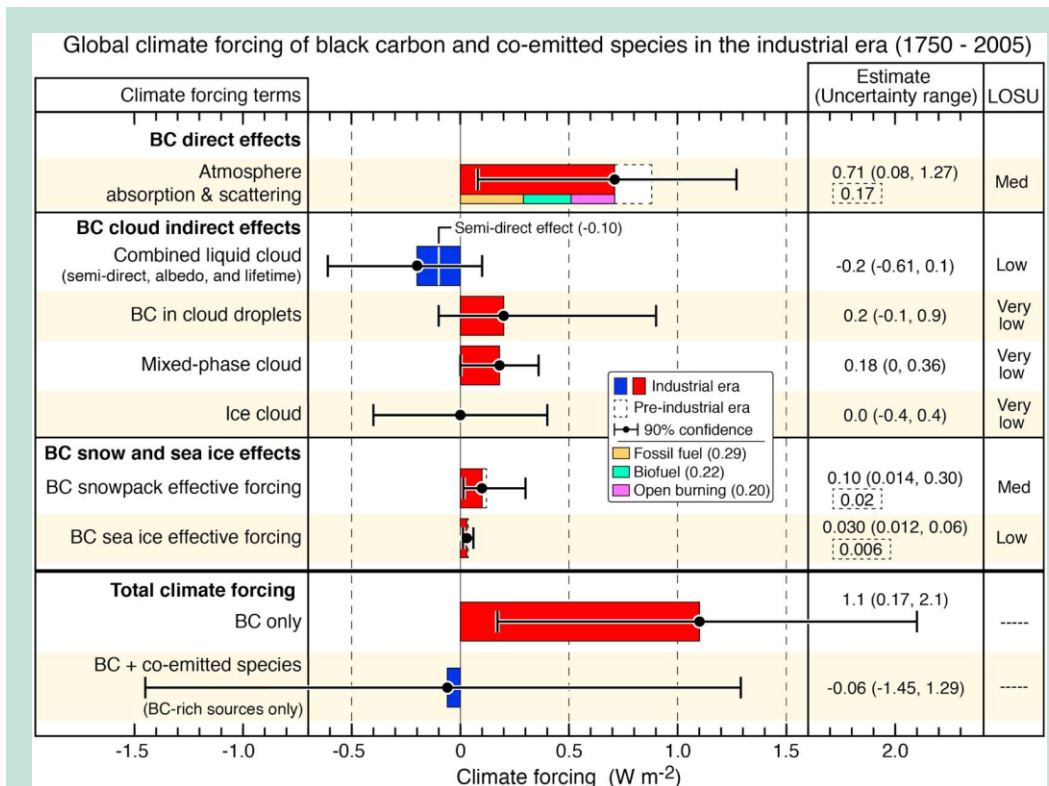
2.1.3 Black carbon påvirkninger

Forskerne er enige om, at BC er en stor spiller i den globale klimaopvarmning. Dog er der splittelse om, hvorvidt BC-indeholdende partikler *udelukkende* er skadelige for klimaet eller om denne også kan have positiv indvirkning på den ellers negative klimaændring, vi er på vej imod. Den lysabsorberende egenskab bidrager direkte til opvarmning, da den mørke farve gør, at den absorberer solens stråler og opvarmer den omkringværende atmosfære. Samspillet med de forskellige aerosoler i atmosfæren *kan* give anledning til øget skydannelse, som kan være til gavn for klimaet ved refleksi-

Figur 5 viser påvirkningerne på en lidt anden måde end de foregående figurer. Den oplister de forskellige udledningskilders påvirkning på den såkaldte *climate forcing*, som er et udtryk for forskellen i den indkomne solenergi Jorden modtager og den mængde energi Jorden stråler tilbage i rummet (Oss-foundation.us, 2015). Den menneskeskabte udledning af forskellige emissioner har siden industrialiseringen bidraget positivt til denne climate forcing, hvorfor vi får et varmere klima (altså negativ klimateffekt). BC-relaterede partikler har samme effekt og bidrager til opvarmningen (Bond et al., 2013). Hver overordnede udledningskilde er delt ind i tre barer, hvor den øverste bar dækker over grupperingen til venstre i informationsboksen nederst, midterste bar viser de midterste grupperinger, mens den nederste bar viser total påvirkning. Alt til højre for "0" giver et positivt bidrag til denne climate forcing (opvarmende effekt), mens alt til venstre giver et negativt bidrag til denne climate forcing (kølende effekt). Den øverste bar giver høj troværdighedsniveau, mens den midter-

on af solens stråling (Bond et al., 2013). Disse typer af refleksioner kan deles op i forskellige kategorier, som også kan være negative for klimapåvirkningerne. De rene, små, nydannede BC partikler er vandafvisende og dermed dårlig til dannelse af skyer. Ældning af BC partiklen øger størrelsen, og samlingen af det nu blandede materiale gør BC-indeholdende partikler mere opløselige og forøger dens vandoptagelse (Bond et al., 2013). Generelt er disse påstande/teorier om BCs virkning på skydannelse behæftet med stor usikkerhed, da det er forbundet med stor kompleksitet.

Mere sikkert er det dog, at partiklerne dannet fra forbrændingsprocessen mixes, bliver tungere, hvorefter det aflejres tørt eller vådt på Jordens overflade. I områder med sne og is kan aflejringen have negativ klimapåvirkning, ligesom transport over længere afstande til Arktis og andre isdækkede områder på den nordlige halvkugle bliver påvirket negativt af aflejringerne (Bond et al., 2013). Figur 6 giver et indblik i, hvordan disse tre effekter (BCs direkte effekter mht. absorption af stråling, BCs indirekte effekter på skydannelsesprocesser og BCs effekt på sne og is) bidrager til en positiv eller negativ climate forcing siden industrialiseringen. Nederst på figuren er BCs totale effekt på klimaet summeret sammen siden industrialiseringen ($+1,1 \text{ W m}^{-2}$), hvilket placerer BC som den 2. største klimaparameter næstefter kuldioxid ($\text{CO}_2 + 1,56 \text{ W m}^{-2}$), men omtrent på samme niveau med metan ($\text{CH}_4 + 0,86 \text{ W m}^{-2}$) (Bond et al., 2013). Derimod, hvis de andre BC relaterede emissionsparametre medtages – specielt det organiske carbon bidrag fra åben afbrænding af biomasse, gives der et total negativt bidrag til climate forcing ($-0,06 \text{ W m}^{-2}$) (Bond et al., 2013), hvilket er en kølende effekt. Tallene bygger på et konfidensniveau på 90%, hvilket er afbilledet som spredningen i de enkelte barer. I de efterfølgende afsnit beskrives de tre nævnte effekter, klimamodeller og sundhedsfaktorer.

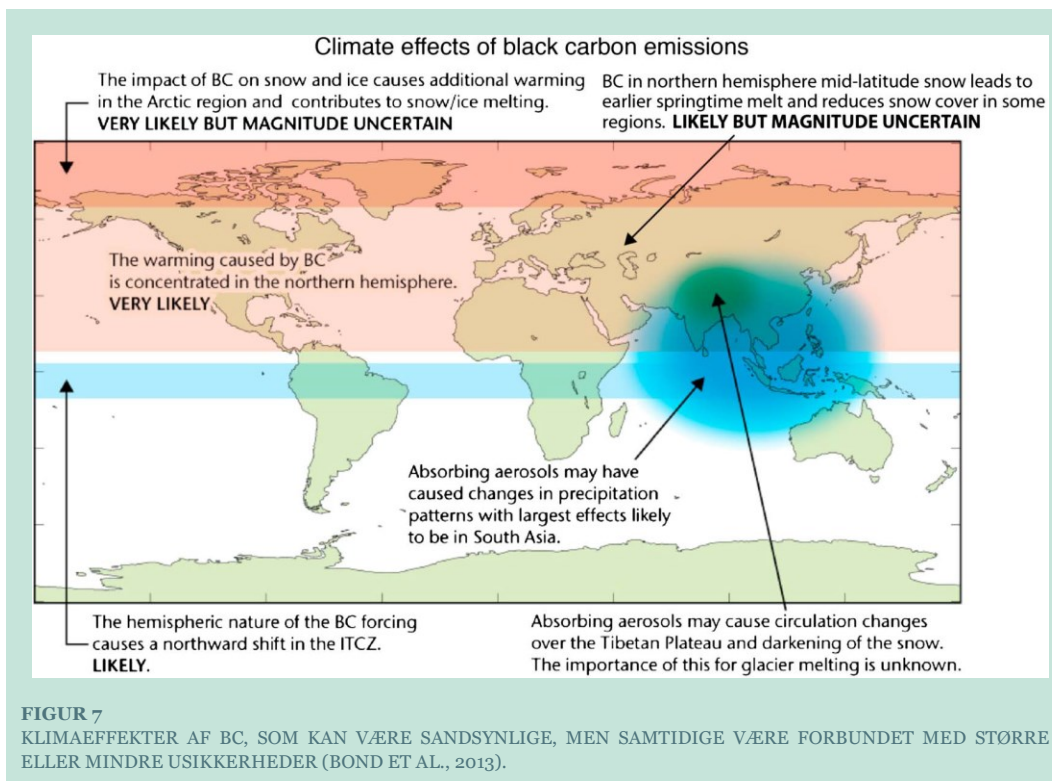


FIGUR 6
GLOBALE KLIMAPÅVIRKNINGER FRA INDUSTRIALISERINGEN TIL 2005. STØRST SES DEN DIREKTE STRÅLINGS-
PÅVIRKNING, MENS SKYDANNELSEPROCESSEN ER DELT MED BÅDE POSITIVE OG NEGATIVE BIDRAG, OG AF-
LEJRING PÅ SNE OG IS GIVER ET NEGATIVT BIDRAG (BOND ET AL., 2013).

2.1.3.1 Direkte strålingspåvirkning

BCs mørke farve har virkning på den direkte strålingspåvirkning. Den mørke farve absorberer solens stråler og opvarmer den omkringværende atmosfære. Den direkte strålingspåvirkning er den største af de klimaparametre, som BC partiklerne medfører og er med til at sænke planetens albedo (Bond et al., 2013). Ved lysabsorption i atmosfæren standses lysets stråling fra solen i stedet for at ramme Jorden, hvor strålingen normalt enten vil blive absorberet af Jordens overflade eller vil blive reflekteret tilbage i rummet af lyse overflader. Befinder partiklerne sig over skyerne, vil den reflekterede stråling fra skyerne blive absorberet af partiklerne frem for at blive sendt videre ud i rummet. Dette giver en øget opvarmning af vores atmosfære og kan have indflydelse på skydannelse generelt, kan ændre stor-skala cirkulationsmønstre specielt over Himalaya-bjergene, give øget overfladetemperature specielt på den nordlige halvkugle, give mindre snedække og kan have konsekvenser for nedbørsmønstre rundt omkring på Jorden, herunder specielt i Sydasiens, hvor monsunregnen menes at blive påvirket heraf (Bond et al., 2013 og UNEP, 2011).

Generelt har BC overvejende negative klimapåvirkninger, der vil være mere synlige i visse områder på Jorden. Som et eksempel har den direkte strålingspåvirkning specielt over Syd- og Østasien en strålingspåvirkning op til ca. 10 gange større end den samlede påvirkning globalt set (Bond et al., 2013). Globale klimapåvirkninger generelt set er et brugbart koncept, men hvad angår BC er koncentrationer og aflejring "rumligt forskelligartet". Dette gør, at klimapåvirkninger og klimaændringer fra aerosoler "agerer anderledes" i forhold til drivhusgassernes mere ensartede globale påvirkning. Figur 7 viser de nuværende klimateffekter, som menes at BC har indvirkning på. Her er det specielt den nordlige halvkugle, som bliver ramt af varmere klima og aflejringer på sne is. Derimod er den centrale del ramt af store nedbørsændringer og ændrede cirkulationsmønstre grundet den store absorbering. (Bond et al., 2013).



2.1.3.2 Indvirkning på skydannelse

Den øgede temperatur i atmosfæren fra den øgede direkte stråling kan være medvirkende til ændringer af dannelsen og strålingsegenskaber af regn og is-skyer. Dette giver i forskningsverdenen anledning til en vis splittelse, da det enten kan medføre (Bond et al., 2013):

- Forøgelse af reflektans og levetiden af varme skyer => kan bidrage til koldere klima.
- Eller reducerer skydannelse => kan bidrage til varmere klima.

Det er et meget vanskeligt område, da der mangler forskning og forståelse af BCs virkning på denne skydannelsesproces. Der er fire muligheder for at BC kan ændre skydækket, som også kan ses på *Figur 6* (Bond et al., 2013):

1. Ved forandring af vertikal temperaturen i atmosfæren. Dette kan give skyændringer, som kan være både positive eller negative for klimapåvirkningen.
2. Ved ændring af vand-skyer og levetiden af disse. Dette kan også være både positivt eller negativt for klimapåvirkningen.
3. Ændring af faseomdeling og nedbør i mix-fase skyer (dels is, dels væske), hvilket kan give en reduktion af skydække og dermed varmere temperaturer og derfor negativ klimapåvirkning.
4. Ændring af is-partikel koncentration. Dette giver også en både positiv og negativ klimapåvirkning.

Alle aerosolers påvirkning på skydannelse er forbundet med stor usikkerhed, og isolering af BCs virkning på skydannelse giver endnu større usikkerhed.

2.1.3.3 Aflejring på og afsmeltning af is og sne

Ved udledning af BC relaterede partikler føres partiklerne med vinden, og der sker en lokal og interkontinental transport væk fra udledningskilden og op i atmosfæren afhængig af vindforhold. Jo mere vind jo længere transport. Ved stillestående vejr bliver transporten mindre. Partiklerne fjernes fra atmosfæren igen enten våd (med nedbør) eller som tør aflejring på Jordens overflade, fordi partiklerne mixes og bliver tungere og falder til jorden. Dette er grunden til, at den gennemsnitlige levetid for BC partikler er ca. 1 uge, men kan variere alt efter dens påvirkninger fra den omkringværende atmosfære (Bond et al., 2013). Aflejres partiklerne på sneområder, sænkes sneens albedo (evne til at reflektere stråling). Den lille øjeblikkelige albedoeffekt ændrer og smelter snestrukturen, hvilket medfører en opvarmning af det lokale område, hvor partiklerne ligger (Bond et al., 2013). Kemisk analyse fra prøver af forårssne fra det meste af Nordamerikas og Russisk Arktis sne og i Grønland associeres med biomasseafbrænding.

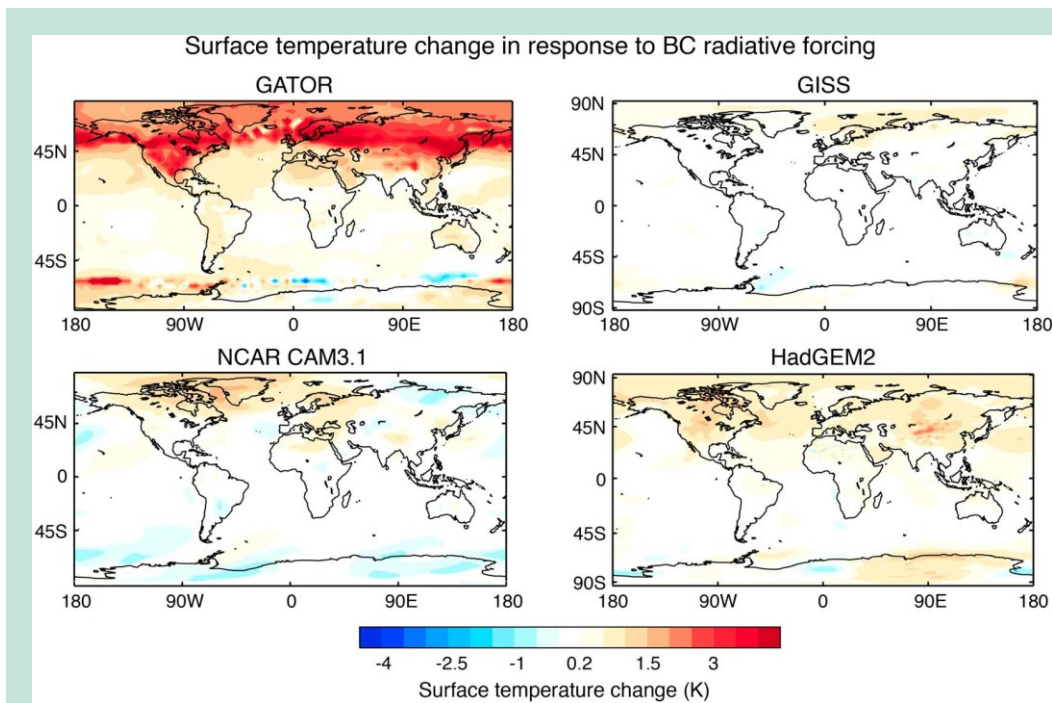
Fossilt brændsel spiller en prominent rolle i de høje breddegrader i det arktiske ocean og i Grønland om sommeren – trods trafikken er lav på Grønland – hvorfor indirekte at forurening fra Europa med høj koncentration har en stor rolle for Arktis om sommeren (Bond et al., 2013). BC aflejringer i glacielle områder kan også associeres til, at afsmeltningen fører til cyklusændringer i den naturlige vandbalance mht. vandforsyning til lokalområdet igennem sæsonen (Bond et al., 2013). Der er imidlertid bevis for, at BC koncentrationer på sne i Arktis, Europa og Nordamerika var større i starten og midten af det 20. århundrede end nu. Ydermere er snedækket mindsket med tiden, hvorfor BC på sne er faldende i mange regioner (Bond et al., 2013). Det opførte *Villum Research Center* i det nordlige Grønland skal blandt andet give mulighed for at nærstudere partikelmønstre og geografisk vandring til stor gavn for den nuværende forståelse (Ingeniøren, 30. februar 2015).

2.1.4 Klimamodeller

Da BC udslippet er midlertidigt og forskellig overalt på Jorden, er det vanskeligt at foretage globale målinger af BC koncentrationer. Sensorer i rummet til at observere emissionsniveauet har varierende begrænsninger, hvorfor man i modeller må give afkald på specifikke ting og dermed troværdighed. Estimerede globale koncentrationer må derfor baseres ud fra modeller, som er begrænset af grund-baserede fysiske observationer (AERONET), hvilket er måling af AAOD (absorption aerosol

optical depth - alle partikler) (Bond et al, 2013). Disse målinger er spredt rundt omkring globalt, men adskillelse af BC fra det andet organiske materiale og støv er endnu ikke modent nok. In-situ målinger er mere specifikke på BC og benyttes i forskellige modeller. Dog er der få observationer i lokale områder, hvor emissionerne er højest, hvorfor der er behov for systematisk viden, som kan implementeres i mere korrekte modeller. Viden omkring levetid og vertikal transport både nær kilden og væk fra kilden er endnu ikke udviklet (Bond et al, 2013).

Som nævnt tidligere rangerer klimamodellerne BC udledningens effekt på klimapåvirkninger som den 2. største individuelle varmepåvirkende faktor næst efter CO₂ (Bond et al., 2013). Det ændrer dog ikke på, at simuleringstudier og klimamodeller generelt består af enorme mængder af underliggende estimater og beregninger, som kan være behæftet med større eller mindre usikkerheder. Dertil hører mangel på forskning og viden omkring BCs virkning på dannelse af skyer, men som alligevel indgår i nogle af klimamodellerne. Beregninger bygger på formler, som overordnet inddeler de forskellige felter ud fra enkelte eller flere målinger, industrialiserede landes emissionsoplysninger eller brændselsoplysninger, feltmålinger under simulerede eller naturlige forhold, ud fra satellitbilleder af afbrændt areal for skovbrænde eller afgrødefrøbrænding (Bond et al., 2013). I Figur 8 ses et eksempel på, hvor stor spredning der er på et udpluk af tilgængelige klimamodeller. Afbilledet er den forventede temperaturstigning som en direkte afledning af BCs strålingspåvirkning. Der er ingen tvivl om, at der er meget forskel på de forskellige klimamodeller, da der er forskellige forudsætninger i de enkelte modeller. Derfor er det også tydeligt, at BC er et område, hvori der i fremtiden skal forskes mere, så man kan arbejde på at lave disse klimamodeller så korrekte som mulige med det tilgængelige målemateriale. Det kan dog være vanskeligt på grund af den geografiske udstrækning, omkostninger til måleudstyr, mangel på forståelse i visse processer etc.



FIGUR 8
KLIMAMODELLER OPSTILLET VED SIDEN AF HINANDEN GIVER ET GODT INDBLIK I, HVILKE KONSEKVENSER DE FORSKELLIGE FORUDSÆTNINGER I DE ENKELTE MODELLER HAR PÅ KLIMAPÅVIRKNINGERNE. AFBILLEDET ER TEMPERATURSTIGNINGEN SOM EN DIREKTE UDLEDNING FRA BC STRÅLINGSPÅVIRKNING (BOND ET AL., 2013).

2.1.5 Helbreds faktorer

Udledningen af BC har ikke kun konsekvenser for vores klima. Der har i den seneste tid været stor sundhedsdebat, hvorvidt partikeludledningen fra forbrænding bidrager negativt til vores helbred. Det er specielt de fine og ultra fine partikler, som forbindes med hjerte-kar-sygdomme og kan påvirke vores respiratoriske system og trænge ned i alveolerne og eventuelt passere over i blodbanen. I en nyere rapport (WHO, 2012) associeres BC med de epidemiologiske studier af både PM₁₀ og PM_{2,5}, da BC er en delmængde af de fine og ultra fine partikler. Dog er der ikke nok kliniske eller toksikologiske studier til at kunne adskille forskellige helbredseffekter i forhold til BC og partikelmasse (PM) i al almindelighed. Samtidig viser alle tilgængelige toksikologiske studier, at BC (målt som elemental carbon) ikke er en væsentlig direkte giftig komponent af de fine partikler, men det agerer som en bærer af forskellige kemiske komponenter, som kan være skadelige for den menneskelige krop, såsom lunger, immunforsvaret og muligvis blodcirkulationen. Derfor er arbejdsgruppen bag WHO-rapporten enige om, at en sænkning af PM_{2,5} udledningen indeholdende BC og andre forbrændingsrelateret komponenter burde lede til en reduktion af de sundhedsrelaterede effekter associeret med partikeludledningen. Samtidig anbefaler de, at PM_{2,5} fortsat skal være den primære måleangivelse i kvantificering af den menneskelige eksponering over for partikeludledningen og tilhørende sundhedseffekter (WHO, 2012).

2.1.6 Brændeovne og black carbon

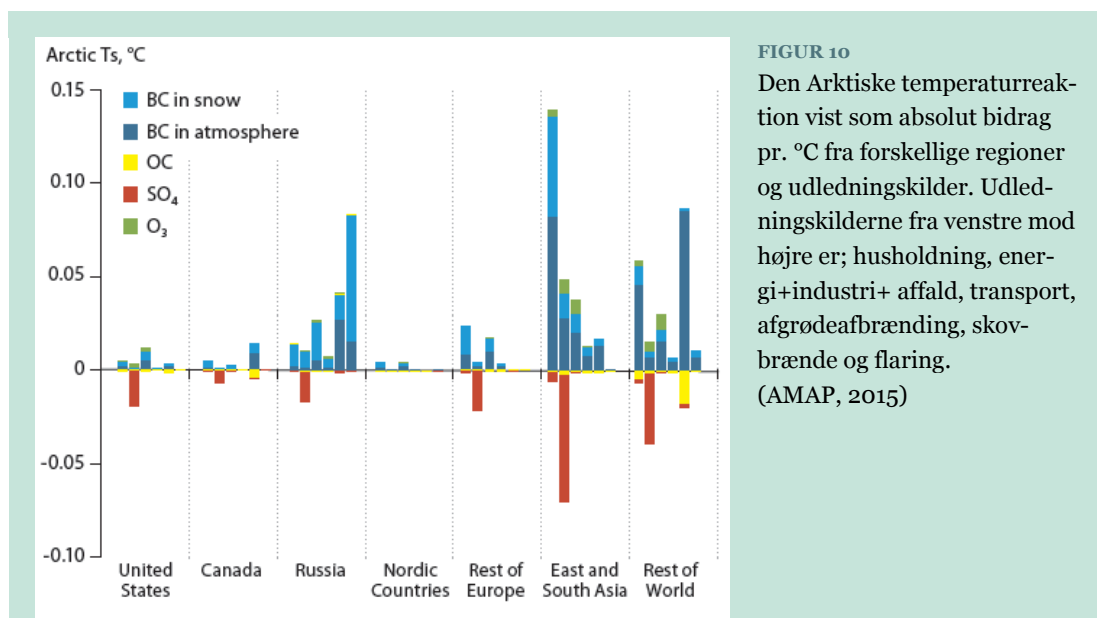
Biomasse er kendt som værende CO₂ neutral energikilde grundet CO₂ balancen for de optagne CO₂ emissioner i brændslets levetiden kontra de frigivne CO₂ emissioner ved afbrænding – så længe nybeplantningen følger skovningen. Blandt andet derfor gøres biomasse formentlig til en fremtidig eftertragtet energikilde til at sikre opfyldelse af klimamålene vedtaget under klimatopmødet i Paris 2015. Både ved fossil afbrænding og ved afbrænding af biomasse eller biobrændsel udledes der partikler af forskellig størrelse og sammensætning. Hvis det viser sig, at afbrænding af træ medfører stærkt forøgede mængder af sod (BC) i forhold til det fossile brændsel som træet erstatter, kan det medvirke til at udhule klimafordelen ved det CO₂ neutrale brændsel.

I de forrige afsnit opridses udledningskilder samt påvirkningerne deraf. Dette projekt omhandler specifikt udledningen fra brændeovne. BC er på nuværende tidspunkt ikke en emissionsparameter med egne grænseværdier eller tilhørende målemetode. Man kan ikke afvise at BC på et tidspunkt skulle blive en emissionsparameter, enten ud fra klima- eller sundhedshensyn, men det vil kræve både Europæisk standardisering af en fælles målemetode, indførelse af grænseværdier og herunder dragelse af en skillelinje til PM_{2,5}, som BC jo er en delmængde af. Det man blot skal huske er, at emissionskravene i dag er så skrappe, at producenterne på disse enheder arbejder dagligt med at optimere deres produkter for at opnå så lave emissioner som muligt. Derimod bliver ikke-testede enheder ved med at udlede emissioner på ikke-opdaterede og primitive ildsteder, som udleder mange gange mere BC end de moderne opdaterede enheder, som fx primitive cooking stoves eller primitive brick-kilns til industribrug i u-lande. Det kan flytte fokus fra de mest forurenende enheder, fordi der i disse lande ikke forelægger krav eller standarder til ildsteder. Brændeovne og biobrændselsanlæg fra i-lande kan gøres til "skurke", fordi der i forvejen testes på disse, hvorfor en emissionsgrænse er forholdsvis nem at implementere, såfremt man kan komme til enighed. Dermed forhøjes fokus på disse enheder kontra de større udledningskilder som fra industrien, fra dieselafbrænding eller fra primitive cooking stoves eller ældre brændekedler (se *Figur 5*).

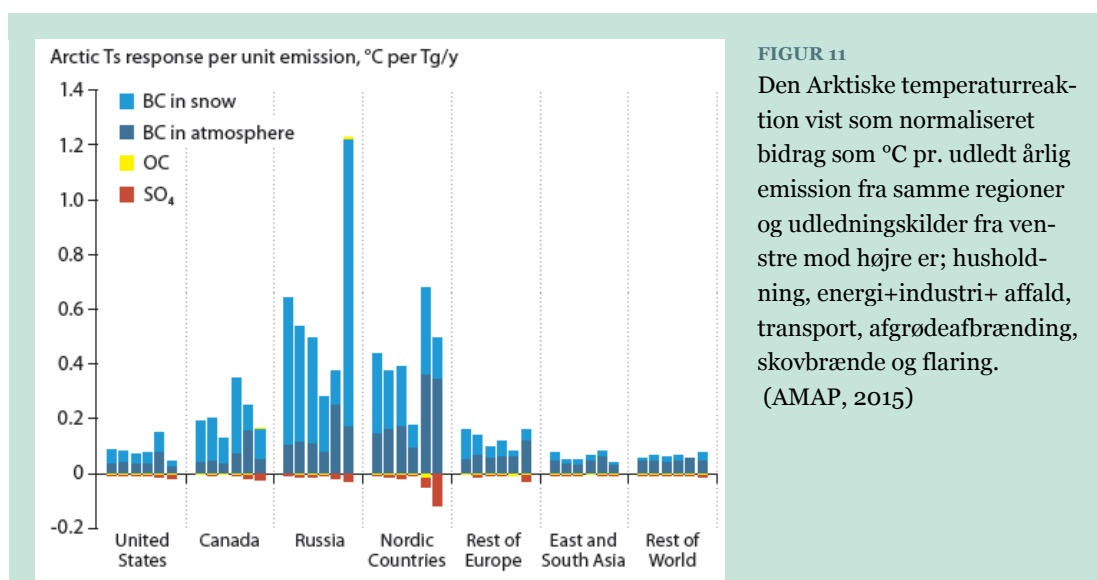
The diagram illustrates the transport pathways for Arctic pollution, specifically focusing on black carbon (BC) particles. It shows the Arctic region with the Polar Dome, Greenland, North America, and Eurasia. The pathways are numbered 1 through 9, showing how pollution from various sources (like fires and industrial activities) is transported into the Arctic region. Key features include the Tropopause, the Arctic sources polluting directly, and the slow descent into the polar dome. The diagram also shows the fast transport in the free troposphere and the slow mixing into the polar dome.

FIGUR 9
ILLUSTRATION OVER THE POLAR DOME, SOM VISER DE 9 TILGÆNGELIGE TRANSPORTVEJE TIL ARKTIS FOR BLANDT ANDET BC PARTIKLER. SPECIELT VEJ 3 ER INTERESSANT FOR EUROPA OG DE NORDISKE LANDE (AMAP, 2015).

29



Hvor *Figur 10* viser et lille absolut bidrag fra de nordiske lande, kan de forskellige emissioner påvirke Arktis på forskellig vis ud fra dels størrelsesordenen og transporten til Arktis, samt følsomheden af den Arktiske temperaturreaktion fra de forskellige regioner og udledningskilder. Denne følsomhed tager *Figur 11* højde for, og viser dermed et andet billede for de nordiske lande. Figuren viser det normaliserede bidrag i form af den Arktiske temperaturreaktion i °C pr. udledt årlig emission fra de samme regioner og udledningskilder som forrige figur. Det ses her, at det højeste normaliserede bidrag kommer fra flaring fra Rusland, mens Arktis samtidig er følsom over for de øvrige udledningskilder fra både Rusland og de nordiske lande, til trods for det absolutte bidrag fra de nordiske lande er meget lille. Betydningen af transportvej 3 – Low-level Transport (*Figur 9*) kan derfor have stor betydning for de nordiske landes bidrag af BC. Derfor kan brændeovne og biobrændselsanlæg fra husholdningen (og de øvrige udledningskilder) have en del at sige i forhold til det normaliserede forbrug og dermed et potentielt indsatsområde for nedbringelse af BC udslippet (AMAP, 2015).



2.2 Kortlægning af måle- og analysemetoder

Der findes i dag mange metoder til måling, analyse og afrapportering af BC som fremhævet i indledningen. Det vanskelige ved netop måling og analyse af BC er, at de 5 helt unikke fysiske egenskaber for BC oplistet i *afsnit 2.1.1.1* ikke på nuværende tidspunkt kan måles med et instrument. Alle nuværende metoder er defineret individuelt, og der er ingen universel accepteret målemetode. Dette gør, at der opstår usikkerheder ved sammenligninger, da det ikke er samme forudsætninger, som der måles efter. Derudover bør usikkerhederne omkring detektionsgrænser for mange metoder generelt tages i betragtning, da kulstofholdige partikler kan blive helt ned til 10nm eller mindre afhængig af deres oprindelse, og dermed ligge i grænselandet mellem molekyler og partikler. Specielt online måleudstyr kan ikke detektere så små partikler (Petzold et al., 2013). I Tabel 2 er oplistet de forskellige tilgængelige metoder, teknikker m.m., som er at finde i litteraturen (Petzold et al., 2013). De seks overordnede målemetoder med egenskaber og teknikker er beskrevet herunder, hvor der under hver metodebeskrivelse også er oplistet den afrapporterede værdi, den fremtidige anbefalede afrapporteringsværdi, samt fordele og ulemper vedrørende dette projekt. Udpluk af tilgængelige instrumenter til metoderne og de enkelte protokoller tilgængelige (fremgangsmetoder ved den enkelte analysemetode) kan findes i Tabel 2.

Property	Technique	Instrument	Reference	Reported value	Recommendation
Light absorption	Light absorption measurement	various in-situ and filter-based methods	Sheridan et al. (2005); Moosmüller et al. (2009)	Light absorption coefficient σ_{ap} ; mass concentration computed from σ_{ap} by applying a specific mass absorption cross-section MAC	report as σ_{ap} ; if reported as EBC, specify MAC used for the conversion from absorption into mass concentration
		Photoacoustic Spec. Aethalometer	Arnott et al. (2003)		
		MAAP	Hansen et al. (1984)		
		PSAP	Petzold and Schönherr (2004); Petzold et al. (2005)		
		COSMOS	Bond et al. (1999); Virkkula et al. (2005) Miyazaki et al. (2008)		
Refractory	Measurement of thermal radiation	SP2	Stephens et al. (2003); Schwarz et al. (2006); Kondo et al. (2011)	Mass concentration	report as rBC; specify means of calibration, size factor from thermal radi carbon mass, and the size-cut particles
		LII	Snelling et al. (2005); Chan et al. (2011)		
Chemical composition, carbon content	Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry	SP-AMS	Onasch et al. (2012)	Mass concentration	report as rBC
		various temperature protocols	IMPROVE; Chow et al. (1993)	Mass concentration	report as EC; specify temperature protocol the sample analysis
		various temperature protocols	IMPROVE; NIOSH; Peterson and Richards (2002); Chow et al. (2007a)	OC/EC mass fraction	
		SP-AMS	EUSAAR-2; Cavalli et al. (2010)	Mass concentration	report as EC
		SP-AMS	Spencer and Prather (2006)	OC/EC mass fraction	
Graphite-like microstructure	Raman spectroscopy	SP-AMS	Onasch et al. (2012)	Mass concentration	report as rBC, because technicals carbon that is evaporate incandescent conditions
		SP-AMS	Sze et al. (2001); Mertes et al. (2004); Sadezky et al. (2005); Iyer et al. (2007)	Mass concentration	report as EC; specify means of calibration
Particle morphology	Electron microscopy	TEM	van Poppel et al. (2005); Tumulva et al. (2010)	Structural information	not applicable

TABLE 2
 SKEMATISK OPSTILLING AF DE TILGÆNGELIGE MÅLEMETODER INKL. TEKNIKKER, INSTRUMENTER, PROTOKOLLER, AFRAPPORTERINGSSENHED OG SAMTIDIG DEN ANBEFALEDE AFRAPPORTERINGSSENHED (PETZOLD ET AL. 2013).

2.2.1 Evolved carbon

Den mest benyttede metode til måling af BC er ved *evolved carbon* (3. række i *Tabel 2*), som er en separering af organisk carbon og elemental carbon ved opsamlet partikulær masse på filtre. Analysen har en kombineret termisk og gas-analyse tilgang, som opvarmer filtrene i forskellige trin, som har betydning for processerne og resultaterne. Teorien bag er, at metoden udnytter den termiske modstand af den elementale carbons del af kulstofholdig masse, som er stabilt op imod 4000K, mens organisk materiale er flygtigt ved samme høje temperaturer. Opvarmningens formål er derfor at fordampe det organiske materiale væk i omgivelser uden ilt tilstede. For høje temperaturer kan derimod gøre, at noget af det organiske materiale forkuller, hvorfor pyrolysekorrektionen skal oplyses, så resultaterne kan korrigeres herfor. Korrektionen er dog afhængig af protokollen (hvilken fremgangsmetode eller referencemetode der benyttes ved analysen). Samtidig kan det også frigive noget af det elementale carbon for hurtigt (Petzold et al., 2013). Når det organiske materiale er fordampet, tilsættes ilt i processen, hvor det elementale materiale frigives og bliver til gas. Denne iltning sker ved temperatur over 340°C, hvorefter forgasningen af de analyserede aerosoler kan måles som CO₂ ved infrarød absorption eller ved CH₄ med FID (flamme ioniseringsdetektor) (Petzold et al., 2013). Selvom de forskellige udviklede protokoller stemmer godt overens med, at hele massen separeres og adskilles i en EC og OC fraktion, varierer fraktionerne meget i de forskellige analytiske protokoller. En optimering af disse temperaturer og tidsintervaller kan mindske usikkerhederne af måleresultaterne (Bond et al., 2013).

Afrapporteret værdi:

- Massekoncentration af OC og EC.

Anbefalet afrapportering:

- Bør afrapporteres som EC, men husk at specificere temperaturer og pyrolysekorrektionen benyttet. Herudover skal oplyses, hvilken sample størrelse der er brugt sammen med total filterstørrelse og flowhastighed.

Fordele for projekt:

- Omkostningslet (omkring 300-400kr. pr. filteranalyse).
- Velkendt håndtering af opsamlingsudstyr ved måling.
- Kendt filterteknik.
- Kendt analyselaboratorie fra andre projektsammenhænge.

Ulemper for projekt:

- Lang responstid.
- Omstænding filterhåndtering ang. transport til analyselaboratorie.
- Risiko for overfyldte filtre ved for høj flowhastighed.
- Ligeledes risiko for at få for lille en mængde på filtrene og dermed ikke opfylde detektionsgrænser ved for lav flowhastighed.

2.2.2 Light Absorption

Light absorption eller lysabsorptionsmålinger (1. række i *Tabel 2*) referer til BC relaterede partiklers optiske egenskaber. Her udnyttes viden blandt andet oplyst i *Figur 2*, hvor BCs lysabsorberende egenskaber måles. De tilgængelige instrumenter varierer og kan både involvere in-situ og filterbase-rede metoder. Igen kan henvises til *Tabel 2* for de relevante instrumenter. Fælles for metoderne benyttet er, at værdien opnået er lysabsorptionskoefficienten σ_{ap} , hvilken er den enhed som benyttes ved enhver måling af lysabsorberende partikler med optisk teknik. Dog er der ingen aftalt fælles reference for at måle denne lysabsorptionskoefficient, grundet den store usikkerhed ved de forskellige metoder (Petzold et al., 2013). Den bedste kandidat for måling af atmosfæriske observationer er photoacoustic spectroscopy. For at opnå en massekoncentration af den målte lysabsorptionskoefficient σ_{ap} udnyttes sammenhængen $[BC] = \sigma_{ap} \times MAC^{-1}$, hvor $[BC]$ er det lysabsorberende carbon massekoncentration, og MAC (Mass Absorption Cross section) refererer også til MAE (Mass Absorp-

tion Efficiency) i enheden m^2g^{-1} . MAC værdien varierer meget, men er meget vigtig. MAC skal tage højde for, at der er lysabsorberende partikulær masse tilstede, hvorfor ikke-lysabsorberende organisk materiale såsom Brown Carbon skal ekskluderes eller korrigeres for. Korrektion af non-BC lysabsorberende art kan bestemmes ved hjælp af Ångström eksponenten λ_{ap} ved en specifik bølglængde (Petzold et al., 2013).

Afrapporteret værdi:

- Lysabsorptionskoefficient σ_{ap} . Ved at dividere med MAC fås massekoncentrationen.

Anbefalet afrapportering:

- Bør afrapporteres som lysabsorptionskoefficienten σ_{ap} .
- Hvis der afrapporteres som massekoncentrationen EBC (Equivalent Black Carbon), så skal man huske at udspecificere MAC værdier brugt til at omdanne lysabsorptionen til massekoncentrationen.

Fordele for projekt:

- Flere tilgængelige og anerkendte metoder.
- Hurtig responstid.
- Ved måling af biomasseafbrænding i brændeovne kan producenter få oplysninger om, specifikt hvornår i en cyklus, BC udslippet forekommer og dermed udvikle mere specifikt på at minimere denne udledning.

Ulemper for projekt:

- Omkostningstungt nyt udstyr.
- Usikkerheder ved forskellige metoder.
- Ukorrekt anvendt MAC værdi kan være misvisende for massekoncentrationen.

2.2.3 Laser-induced incandescence

En anden hyppig og nyere målemetode er måling af BC ved hjælp af laser detektion ved *laser-induced particle incandescence* (2. række i *Tabel 2*). Denne metode udnytter også, at BC er ildfast og først fordamper op imod 4000K (i iltfri atmosfære), hvorefter den termiske stråling måles. Metoden er afhængig af instrumenterne benyttet (se *Tabel 2* for instrumenter og referencer til protokoller) kan der måles enten på enkelte eller flere partikler af gangen. De enkelte partikler (målt med single particle soot photometer, SP2) eller grupper af partikler (laser induced *incandescence*, LII) bestråles med laserlys, som forårsager en opvarmningstemperatur omkring fordampning og dermed gør partiklerne hvidglødende. Under opvarmningen fordamper alt det organiske carbon og tilbage er det ildfaste materiale. Denne tilstand med hvidglødende partikler ved meget høj temperatur resulterer i re-emission i form af termisk stråling. Herefter kan den ildfaste fraktion, refractory black carbon (rBC), bestemmes (Bond et al., 2013). Benyttes instrumentet SP2 måles og aflæses initialt størrelse og belægningsinformationer om den enkelte partikels indeholde af rBC. Dog har metoden sine begrænsninger, da den først opfanger kulstofpartikler med en størrelse større end 80nm og op til 700nm. Den store usikkerhed ved den målte masse ved denne metode er at kalibrere instrumentet efter opgivelsesatmosfærens rBC indhold (Bond et al., 2013).

Afrapporteret værdi:

- Massekoncentration ved metoderne SP2 og LII, mens masseforholdet af OC og rBC fås ved metoden SP-AMS.

Anbefalet afrapportering:

- Bør afrapporteres som rBC ved SP2 og LII. Samtidig skal kalibreringsmetode oplyses, omdannelsesfaktoren brugt til at omdanne den termiske stråling til carbon masse i den hvidglødende tilstand, samt sample størrelse brugt til analysen.
- For SP-AMS bør der afrapporteres som rBC.

Fordele for projekt:

- Online måling med initial responstid.

- Flere tilgængelige og anerkendte metoder.
- Ved måling af biomasseafbrænding i brændeovne kan producenter få indblik i, hvornår i en afbrændingscyklus den organiske og elementale fraktion forekommer og dermed udvikle brændkammer og lufttilførsel specifikt på at mindske disse stadier af fraktionerne i forbrændingscyklussen.
- Ved initial responstid skal der ikke yderligere laboratorieanalyse til, som vil forlænge og fordyre afrapporteringen.

Ulemper for projekt:

- Meget omkostningstungt nyt udstyr (\$550.000-600.000 for SP-AMS, 150.000\$ for SP2).
- Manglende viden ang. håndtering og opsætning af udstyr.
- Partikelstørrelse-begrænsning, da de helt små nydannede og endnu ikke mixede partikler dermed ikke måles med.

2.2.4 Raman Spectroscopy

Raman Spectroscopy er en metode (4. række i *Tabel 2*), som er meget sensitiv overfor strukturmæssig udformning af kulstofatomer i aerosolpartikler (Petzold et al., 2013). Analysemetoden kan oplyse om, hvilke kemiske og strukturmæssige informationer omkring det analyserede materiale på eller i en prøve. Det gøres ved at belyse prøven med en enkelt farve, hvorefter der analyseres på den måde lyset interagerer med prøven. Dermed kræver det i dette tilfælde, at der skal samples på filter, hvorefter metoden bruges til at analysere, hvilke kemiske dele filteret består af. I andre sammenhænge kan metoden derfor også analysere en rumlig prøve (Raman Spectroscopy, Web). Metoden er god til tvetydige identificerede kulstofholdige partikler med grafit-lignende struktur, og i og med at der stor lighed mellem grafit-lignende struktur og stærk lysabsorberende egenskaber, er metoden relevant til analyse af BC indeholdende partikler. Med den rette kalibrering, kan metoden benyttes til bestemmelse af grafit-lignende kulstof i atmosfæriske partikelmålinger (Petzold et al., 2013). God til strukturidentifikation, men begrænsende i mængdebestemmelse med nutidens teknologi. Ydermere er der begrænsninger i Raman-spektret, bredder, intensitet og typer af materiale. Dog er tilgangen til kortlægningen lovende for mængdemæssigt anvendelse af Raman Spectroscopy for massekoncentrationsmåling (Petzold et al., 2013).

Afrapporteret værdi:

- Massekoncentration.

Anbefalet afrapportering:

- Bør afrapporteres som EC. Samtidig er det vigtigt at kalibreringsmetoden benyttet udspecificeres.

Fordele for projekt:

- God til at identificere korrekt struktur i massekoncentrationen.

Ulemper for projekt:

- Ingen online data.
- Lang responstid.
- Afrapportering i total massekoncentration.
- Omkostningstungt nyt udstyr med begrænsninger på mange punkter eller omkostningstunge analyseomkostninger.

2.2.5 Aerosol mass spectroscopy

Aerosol mass spectroscopy er en metode (3. række i *Tabel 2*), som benytter enkelt partikel laser afsmeltning for kemisk analyse af de enkelte aerosole partikler. De faktiske målinger er ioniserede kulstof-klynger i masse-spektret; C^+ , C_1^+ , C_2^+ etc. (Petzold et al., 2013). Metoden er målrettet den elementære kemiske sammensætning af partiklerne. Sod partikel aerosol masse spektrometri (SP-AMS) og aerosol time-of-flight masse spektrometri (ATOFMS) er de mest avancerede repræsentanter ved denne metode. SP-AMS metoder benytter en kombination af først laser-induced incandescence for bearbejdning, som opvarmer og fordamper de opsamlede partikler, hvorefter massespek-

trometri benyttes for detektion og massebestemmelse af de ladede kulstof-klynger (Petzold et al., 2013). Grundet tekniske stadier i analysearbejdet, er det ikke fuldt besvaret, om SP-AMS skal klassificeres med SP-2 teknologi eller enkelt partikel laser afsmeltning (Petzold et al., 2013).

Afrapporteret værdi:

- Massekoncentration OC og rBC massefraktion for SP-AMS.
- Massekoncentration OC og EC massefraktion for ATOFMS.

Anbefalet afrapportering:

- For SP-AMS metode, bør afrapporteringen ske som rBC massefraktion, fordi teknikken opfanger kulstof fordampet ved hvidglødende omstændigheder.
- For ATOFMS bør afrapporteringen ske som EC massefraktion.

Fordele for projekt:

- Online måling med initial responstid.
- Flere tilgængelige og anerkendte metoder.
- Ved initial responstid skal der ikke yderligere laboratorieanalyse til, som vil forlænge og fordyre afrapporteringen.
- Ved måling af biomasseafbrænding i brændeovne kan producenter få indblik i, hvornår i en afbrændingscyklus den organiske og elementale fraktion forekommer og dermed udvikle brændkammer og lufttilførsel specifikt på at mindske disse stadier af fraktionerne i forbrændingscyklussen.

Ulemper for projekt:

- Meget omkostningstungt nyt udstyr (\$550.000-600.000 for SP-AMS).
- Manglende viden ang. håndtering og opsætning af udstyr.

2.2.6 Electron microscopy

Electron microscopy kan benyttes til at analysere opsamlet partikelmasse på fx filtre og kan karakterisere partikel-morfologien og mikrostrukturen af partiklerne (5. række i *Tabel 2*). Metoden er dog meget begrænset af det krævende arbejde med klargøring af prøver og dataanalysearbejde. Nyere avanceret computernikker muliggør dog avanceret billedeproces, som sørger for automatisk at karakterisere morfologien af tusindvis af partikler på et filter (Petzold et al., 2013).

Afrapporteret værdi:

- Strukturinformation.

Anbefalet afrapportering:

- N/A – ingen massebestemmelse kun formbestemmelse.

Fordele for projekt:

- God til at identificere korrekt struktur i partiklerne opsamlet.

Ulemper for projekt:

- Uden en massebestemmelse, vil denne metode ikke være til gavn for projektet.

2.2.7 Opsummering omkring litteratur og målemetoder

Efter denne gennemgang er vi igen tilbage ved den første figur i indledningen omhandlende BC udledningskilder og cyklus, *Figur 1*. BC er et stort og kompliceret emne, men et emne med stor interesse for forskere verden over, da forskning indtil nu har konkluderet BC som den 2. mest betydningsfulde parameter for vores klimapåvirkninger. Dette skal tages alvorligt og uden tvivl gøres noget ved. Udledningskilderne er dog mange, og de enkelte udledningskilders evne til at sænke udledningen begrænses af teknologier, finansiering, ukontrollerbare naturlige fænomener, folks uvidenhed om de klimatiske påvirkninger ved afbrænding af enten fossile-, biobrændsler eller biomasse etc. Problematikker ang. korrekte måle- og analysemetoder kommer til udtryk i litteraturen, hvilket vanskeliggør sammenligninger med tidligere forskningsstudier omkring BC. Disse problematikker er imidlertid taget til efterretning fremadrettet, hvor der i nyeste litteratur er anbefalede terminologier og metoder ang. disse.

Koncentrationen af BC-indeholdende partikler er meget lokalbetinget omkring udledningskilden, hvorfor den indsamlede information fra globale forskningsstudier – både fra atmosfæriske og in-situ målinger med varierende forudsætninger og mange estimater fra lande med og uden dokumentation, ligger til grund for de mange klimamodeller. Dermed må det siges, at der er stor usikkerhed forbundet med de tilgængelige klimamodeller og ligeledes variation blandt dem imellem, da de opsatte forudsætninger er essentielle for udfaldet. Koncentrationen af BC-indeholdende partikler i atmosfæren giver ikke kun en lokal opvarmning omkring partiklerne, men kan også have påvirkning på vores nedbør, skyformering, ændring i cirkulationsmønstre, og kan aflejres vådt eller tørt på sne og is – specielt omkring Arktis. Dog kan den ufuldstændige forbrænding – specielt ved afbrænding af biomasse, indeholdende mere organisk carbon, som kan have en positiv virkning på skydannelsen og dermed skabe flere skyer til gavn for et køligere klima. Indvirkningen på skydannelse er endnu et emne, som kræver mere dybdegående forskning for at forstå BCs indvirkning på Jordens klima. En sænkning af partikeludledningen indeholdende BC vil ikke kun have positiv indvirkning på vores klima, men vil også bidrage til en reduktion af de sundhedsrelaterede effekter associeret med partikeludledningen.

2.2.7.1 Standardisering nødvendig

Som det tydeligt fremgår af gennemgangen ovenfor befinder BC-emnet, og herunder elemental og organisk carbon mv. sig stadig undervejs på rejsen fra eksperimentel forskning til industriel anvendelighed. Det er helt symptomatisk at forskere og universiteter tilgår emnet fra hver sin vinkel og ender ud med forskellige metoder og termer. Hvis der skal være en fremtid indeholdende grænseværdier for BC, både for emissioner og for immissioner, kræves en form for standardisering, så antallet af målemetoder indsnævres. I kraft af BCs karakter af at være et grænseoverskridende problem, er det utroligt vigtigt at standardiseringen koordineres af den internationale standardiseringsorganisation ISO, så man ikke ender med, som ellers så ofte set før, at USA (ANSI standardisering) og Europa (CEN standardisering) at have vidt forskellige metoder. Dette er særlig vigtigt ud fra en Nordisk og Europæisk vinkel, idet USA indtager førerrollen inden for forskning af BC, ligesom det lader til at være U.S. EPA mere bevidst om betydningen af BC, end de tilsvarende Europæiske miljøagenter. Det er i den forbindelse et åbent spørgsmål om BC som emne betragtet, kan bære en selvstændig standardisering, eller om BC skal pakkes ind sammen med standardisering af partikelmåling generelt (som EPA's nuværende konklusion).

2.2.8 Anbefalet valg af målemetode:

Der er ingen tvivl om, at en online-metode med initial aflæsning for brændefyring vil være at fortrække – hvad enten der er tale om laser teknik ved høje temperaturer eller optiske metoder. Dog er der desværre temmelig store omkostninger ved anskaffelser af sådan udstyr. En SP2 (single particle

soot photometer) eller SP-AMS (soot particle Aerosol mass spectrometer) vil være at fortrække, så forløbet kan nærstudies og opdeles i organiske og elementale fraktioner og tages højde herfor i udviklingsfasen af fremtidige brændkammerdesigns. For dette projekt vil dette udstyr være utænkeligt - ikke kun pga. økonomien i dette projekt, men også fra producenterens synspunkt, da udstyret også er for omkostningstungt i de små virksomheder til deres udvikling. Indsamlet tilbud på disse instrumenter løber op i hhv. \$150.000,- og \$550-600.000. Dog for et mindre avanceret instrument som PAX (Photoacoustic extinctionometer) er prisen \$35.000-40.000. Tilsvarende på et Athalometer af modellen AE33, som kan måle ved op til syv bølgelængder, ligger prisen på ca. €25.000. Opsamling på filtre og videre analyse vha. evolved carbon metoder er den mest benyttede metode i den hidtidige forskning for måling af elemental carbon til en nogen anden pris (priser på under 400kr. pr. filteranalyse). Filteranalysen er dog en langsommelig proces og kræver et forarbejde i form af forvarmning af filtre inden der opsamles, men da økonomien spiller en stor rolle i det hele taget, er der ikke noget at sige til, at det er en populær metode.

For dette projekt vil denne metode godt kunne give et udmærket billede af udledningen fra de prøvede ovne i AP 3 og AP4 (målekampagnen af danske brændeovne, se *afsnit 3.1*, samt målinger på det udviklede model-brændkammer, se *afsnit 4.2*) sammenlignet med andre målte emissionsparametre målt under samme test. Dog i og med at metoden bygger på en filteranalyse af et udsnit af den totale partikelmasse, kan opsamlingsmetode give udfordringer i udviklingsprocessen af fremtidige brændkammerdesigns. Til sammenligning kan udledningen ved en online målemetode aflæses initialt, hvorved man i en udviklingsfase er mere bevidst omkring udledningstidspunkter i en typisk forbrændingscyklus (opstart, stabil fase eller udbrændingsfasen), hvilket i fremtiden kan være med til at mindske udledningen af BC, blandt andet ved hjælp af mere intelligent ilttilførsel, udformning af brændkammer og andre betydende faktorer.

2.3 Valg af målemetode

Projektet har til formål at studere de fysiske egenskaber ved moderne danske ovne, som kan have betydende indflydelse på deres emissionsegenskaber, hvad angår BC. De fysiske egenskaber er primært brændkammerets geometri og udformning samt luftsystemets indretning, men også graden af isolering af brændkammeret kan spille en rolle. Målekampen og det efterfølgende analysestudie ang. kampagnen i AP 3 skal ligge til grund for, hvilke af disse fysiske parametre, som påvirker denne emissionsudledning til brug for fremtidige brændkamre. Ud fra litteraturstudiet omkring BC og de undersøgte målemetoder er der af primært økonomiske grunde valgt, at målemetoden omhandler opsamlet partikelmasse på quartz-filtre, hvorefter partikelmassen sendes til laboratorieanalyse. For projektet og for producenternes skyld ville det have været mere optimalt med en online målemetode, hvad enten der ville være tale om optisk- eller laserteknik. Dette ville have givet et bedre overblik over emissionsudledningen i selve forbrændingscyklussen og samtidig givet initial responstid. Dog har der ikke været ressourcer nok i dette projekt til at kunne anskaffe sådan måleudstyr. Derfor er der valgt at opsamle partikelmasse på filtre, hvorefter den efterfølgende analyse indbefatter metoden *evolved carbon*, hvor partikelmassen separeres i en elemental carbon (EC) og en organisk carbon (OC) fraktion. Analyselaboratoriet bliver Sunset Laboratory B.V., som benytter den termisk-optiske analysemetode NIOSH870 (Sunset Laboratory, 2015). Selve målemetoden for at opsamle partikelmassen på filtrene, samt en redegørelse for de overvejelser der har ligget til grund for målemetoden til dette projekt, bliver beskrevet herunder.

2.3.1 Formål for testmetode

Formålet med testmetoden til målekampen er, at den på en kontrolleret, reproducerbar og samtidig virkelighedsnær måde skal kunne bruges til at kortlægge emissionerne af EC og OC fra det pågældende brændkammer, med mindst mulig aftryk fra selve metoden. Det har været centralt at kunne kontrollere afsætningen af partikelmasse på filtret, da den efterfølgende analysemetode er følsom over for overbelastning. Formålet er at tilsværtningen af filtrene helst skal kunne indplaceres på en gråtoneskala. Hvis filtret er kulsort og lagtykkelsen samtidig er stor, går analyseinstrumentet i mætning, og præcisionen af målingen falder til under et acceptabelt niveau på omkring 5-7%. Denne kritiske grænse ligger konservativt sat på omkring $30\mu\text{g}/\text{cm}^2$ (jf. Pavlos Panteliadis, Sunset Lab.)

2.3.2 Gængs praksis og forskelle mellem de to standarder

I testsammenhæng er der to forskellige udbredte testprincipper; Norske metode (ref. NS3058-1 og -2) og den Europæiske metode (ref. EN13240). Kort fortalt benytter den Norske metode en anden skorsten, brændsel og fyringsmønster end den Europæiske metode. Den Norske metode benytter en 4,5 meter høj isoleret skorsten med naturligt træk, mens den Europæiske metode benytter sig af en 1,8 meter høj isoleret målesektion som skorsten med fast mekanisk træk på 12Pa. Desuden benytter den Norske metode grantræ som brændsel lagt i et tremmemønster i stedet for birke- eller bøgetræ som brændsel, hvilket er gældende i den Europæiske metode. Den Norske metode benytter sig af 4 forskellige afbrændingshastigheder fra lav afbrændingshastighed på under 1,25kg/h med nedjusteret spjældindstilling til over 2,8kg/h, hvor spjældindstillingen er fuld åben. Der måles partikelemissioner i den afkølede røggas i en fortyndingstunnel, hvor den partikulære masse kombineret med afbrændingshastigheden vægtes efter en normalfordelingskurve (ref. NS 3059). Dette er anderledes i forhold til den Europæiske metode, som leverer emissioner og nyttevirkning efter en optimal spjældindstilling jf. producentens anvisninger med 3 fyringer i træk efter ovnen er i en stationær situation, hvoraf de to bedste kan udvælges. Dette vil sige, at der ikke måles på optænding eller umiddelbare påfyring, men først når det ønskede glødelag er tilstede i ovnen og ovnen er varmet godt igennem. I modsætning til den Norske test, opsamles partiklerne i EN prøven i den varme røggas direkte i målesektionen. Man siger, at disse stadig er på gasform, da de ikke har haft mulig-

hed for kondensere, som de har i fortyndingstunnellen ved den Norske metode pga. den store opblanding. Dermed afrapporteres partiklerne efter den Norske metode som justeret partikulær udslopsandel [g/kg(tørstof)] (jf. NS3058-2) og for den europæiske metode som støv i enheden [mg/Nm³] (jf. CEN/TS15883). Lidt forsimplet kan man sige, at den Norske metode er optimal set ud fra en miljøsynsvinkel, fordi metoden *stresser* en ovn over hele dens karakteristisk inkl. *misuse conditions*. Omvendt er den Europæiske metode optimal set ud fra en industrisynsvinkel, idet metoden er indrettet efter at returnere lave emissionsværdier, der udelukkende er baseret på den rene faststof fraktion.

Måling af BC-indeholdende partikler befinder sig endnu på et overvejende eksperimentelt stadium, stadig fjernt fra en egentlig målestandard. Forskellige universiteter benytter forskellige måle- og tilhørende analysemetoder, hvoraf nogle måler i realtid, andre ved hjælp af massebestemmelse pr. prøveperiode. Teknologisk Institut har sammen med SINTEF Energi i Norge, SP - Statens Prøvningsanstalt i Sverige og University of Eastern Finland (UEF) erfaringer i eksperimentel måling af EC og OC efter den Norske metode (svagt tilrettet). Metoden er forholdsvis velegnet og let at benytte, men kan kritiseres for at være noget på afstand af den måde brændeovne i almindelighed fyres. Valget af den tilnærmede Norske metode var begrundet med, at det var forholdsvis enkelt at inkorporere måling af EC og OC i det frivillige Nordiske Svanemærke, men det har også spillet ind, at disse målinger først blev udført i et samarbejde bestående af SINTEF Energi og UEF. Den efterfølgende analyse for indhold af EC og OC er sket ved termisk-optisk metode, som den valgt til den aktuelle for dette projekt. Til måling af koncentrationer af EC og OC i udemiljøet, har en arbejdsgruppe under CEN/TC264 i august 2011 udgivet en teknisk rapport; CEN/TR 16243, som kan danne grundlag for efterfølgende egentligt standardiseringsarbejde. Den metode de anbefaler i rapporten er ligeledes massebestemmelse ved udfældning af PM massen på filtre af quartz, for efterfølgende analyse ved hjælp af termisk-optisk metode.

2.3.3 Overvejelser, optioner og valg af testmetode

Som allerede nævnt skal testmetoden være kontrolleret, reproducerbar og virkelighedsnær. I vores overvejelser har det i videst muligt omfang gået igen, enten at udelukke eller fiksere variabler, så man kan have tiltro til at de variationer, der fremkommer ovnene imellem, primært kan tilskrives ovnens egne egenskaber, snarere end testmetodens eller den person der fyrer. Heri indgår også en grundig skriftlig instruks til den person, der skal betjene ovnen under målingerne.

Brænde: Blandt de oplagte valgmuligheder; Birk, bøg og gran har vi valgt birk som testbrændsel, fordi det er et ret udbredt brændsel, både ved typeprøver og blandt forbrugere - og så er birk er forholdsvis let at antænde. Prøveklods tilvirket af 50x50 mm gulvstrøer (Norske metode) blev fra-valgt, fordi det er et atypisk brændsel, der sjældent eller aldrig benyttes af forbrugere. Vi har valgt, at barken skal slås af for at eliminere vilkårlighed i andelen af brænde, der er dækket af bark (ellers fra 0-100%), for derved at sikre et homogent prøvebrændsel. Som den mængde brænde der skal anvendes, har vi valgt at teste ved både den mængde brændsel fabrikanten anbefaler i sin vejledning, 100%, (idet det formodes at ovnens luftsystem er optimeret til afbrænding af netop den mængde), og så at teste ovnene ved en brændselsmængde på 150% af den anbefalede mængde, for at simulere typisk brug hos forbrugerne. Ligeledes er det fastlagt for at stresse ovnenes luftsystem med en grad af *overload*.

Spjæld: Der tillades de første 3-5 minutter til at få ilden ordentligt etableret, hvori primær spjæld eller en evt. opstartsanordning må benyttes, ligesom lågen må holdes på klem. Senest efter de 5 minutter er udløbet skal ovnen fungere udelukkende på forbrændingsluften, herunder også tertiær luftforsyning. Det har været et udvælgelseskriterium, at en ovn der indgår i projektet skal være af

nyere konstruktion, og herunder skal have tertiær luftforsyning (lufthuller i bagvæggen over brændslet).

Der måles ved to forskellige spjældindstillinger, nemlig spjæld 50% åbent og 100% åbent. Andelen defineres lineært ud fra spjældgrebets fysiske vandring imellem lukket og 100% åbent. Prøve ved lavlast er bevidst fravalgt, fordi lavlast godt kan være problematisk at reproducere ensartet, og gerne medfører forhøjede PM belastninger. Alt dette er kendt stof, men bidrager ikke særskilt til at kunne påvise en eventuel sammenhæng mellem en ovns fysiske egenskaber og dens emissioner af EC og OC. I anden sammenhæng, eksempelvis ved kortlægning af en ovns emissioner, er det naturligvis vigtigt at måle lavlast med.

Røgtræk: Valget har stået imellem anvendelse af fast røgtræk på 12Pa som under typeprøven til CE-mærke (EN13240), og så naturligt røgtræk, sådan som det benyttes under det Norske miljøprøve. Vi har valgt fast røgtræk på 12 Pa for at udelukke den variable faktor, der ligger i at NS røgtrækket ofte kan variere en del.

Måleperiode og fyringsmønster: Valget har stået imellem enten måling i 30 minutter som under typeprøven til CE-mærke, eller måling over hele perioden, som under NS prøven. Det oplagte valg er at måle i hele perioden, dog fraregnet et par minutter til sidst i perioden af hensyn til filterskift. I tillæg hertil opdeles en af målingerne i delperioder for at kunne påvise delbidragene til emissioner fra de tre funktionelle perioder; Optænding og udtørring, stabil pyrolyse og udbrænding. Yderligere måles en måling inklusiv emissionsbidraget over optændingen for at få belyst, hvor stor rolle dette bidrag spiller, i forhold til en gængs målecyklus. Som optændingsmetode benyttes den såkaldte *Top-Down metode*, der anbefales af MST. Som fyringsmønster benyttes optænding, mellemfyring og fire sekventielle målinger, hvorunder de to valgte spjældindstillinger og de to valgte brændemængder kombineres. Mellemfyringen har til formål at normalisere grundglødelaget forud for de egentlige målinger, idet det er uvist, hvilken kvalitet grundglødelag Top-Down optændingen afleverer. Der måles ikke EC og OC under mellemfyringen.

Start- og stopkriterier er defineret som et todimensionelt vindue, der giver et vist råderum til at kunne fastsætte eksakte kriterier, der passer til den enkelte ovn. Som overordnet målsætning har vi haft, at en del af udglødningsfasen skulle måles med, men ikke mere end at der stadig var energi nok i gløderne til at kunne antænde den efterfølgende påfyring. Samtidig med at der opsamles partikelmasse på filtre på de udvalgte cyklusser (som sendes til videre analyse for EC og OC fraktionsopdeling), måles der sideløbende andre emissioner, så disse kan sammenholdes med EC og OC fraktionerne i det efterfølgende analysestudie. Dette studie forsøger at belyse ovnenes fysiske egenskaber med emissionsudledningen. Derudover kan det om muligt oplyse om andre emissionsindikatorer, der leder til et højt niveau af BC-indeholdende partikler i en forbrændingscyklus. Dette kan hjælpe branchen i dens udviklingsfase i produktion af nye brændkamre til at reducere udslippet af BC-indeholdende partikler.

Tabel 3 giver et overblik over målekampagnens testdage.

TABEL 3
OVERBLIK OVER MÅLEKAMPAGNENS TESTDAGE.

Dag 1	BC	Dag 2	BC
Opstilling af ovn, klargøring af prøvestand, filtre, brænde (se ark 1-4)		Måling over optænding og forfyring (se ark 4+5)	1
Måling over optænding og forfyring (se ark 4+5)		Mellemfyring ca 20-30 min (se ark 4+5)	
Mellemfyring ca. 20-30 min (se ark 4+5)		Måling ved halv spjæld og 100% brænde (se ark 4+6)	1
Måling ved halv spjæld 100% brænde (se ark 4+6)		Måling ved halv spjæld og 150% brænde (se ark 4+6)	1
Måling opdelt i tre delperioder (se ark 4+8)	3	Måling ved fuld spjæld og 100% brænde (se ark 4+7)	1
		Måling ved fuld spjæld og 150% brænde (se ark 4+7)	1

Måleprocedure vedhæftes som *Bilag 01*.

3. Black Carbon fra danske brændeovne

AP 3 omhandler målekampagnen på otte moderne brændeovne samt en analyse af disse måleresultater. Målekampagnen benytter den udviklede måleprocedure og valgte målemetode udarbejdet i AP2. Resultaterne herfra skal udmunde i anbefalinger til fremtidige brændkamre samt en validering af disse, ved opbygning af et model-brændkammer i AP4. Afsnittet er bygget op således, at forudsætninger for målingerne kommer først, hvorefter resultaterne af målingerne følger og slutteligt en perspektivering til tidligere BC måleprogrammer.

3.1 Målekampagnens omfang og resultater

3.1.1 Ovn- og måleparametre for målekampagne

Målingerne til denne målekampagne er foretaget i Teknologisk Instituts Energilaboratorie (ELAB). ELAB er et akkrediteret prøvningslaboratorie godkendt af den danske akkrediteringsmyndighed DANAK (TEST reg. No 300), som til dagligt benyttes til typeprøvningerne ved godkendelse af nye brændeovne, pejseindsatse, pilleovne, biobrændselsanlæg m.fl. efter gældende standarder, samt til andre nationale test (bl.a. NS 3058/59), som laboratoriet ligeledes er akkrediteret til. Dette betyder, at laboratoriet råder over de fornødne måleinstrumenter til måling af de emissioner, der stilles krav til i de standarder laboratoriet er akkrediteret til at kunne udføre. Samtidig bliver laboratoriet benyttet til udviklingsarbejde i andre projektsammenhænge, hvorfor personale i laboratoriet både har erfaring med de gængse standardiserede opgaver samt udviklingsarbejdet i udviklingen af nye produkter. Der benyttes den i AP2 udviklede måleprocedure til måling på otte udvalgte ovne. Valget omkring de testede enheder er truffet i samarbejde mellem Teknologisk Institut og DAPO. Derudover har der i overvejelserne omkring måleproceduren været lagt vægt på, at prøvningspersonerne (blandt DAPOs medlemmer) har haft stor erfaring med at fyre generelt, samt erfaring med den enkelte ovn og dens spjælds-systemer. Prøvningspersonerne til de otte ovne har (med lidt øvelse hjemmefra i egne laboratorier) kunne følge den udviklede prøvningsguide til fyring efter den udviklede procedure.

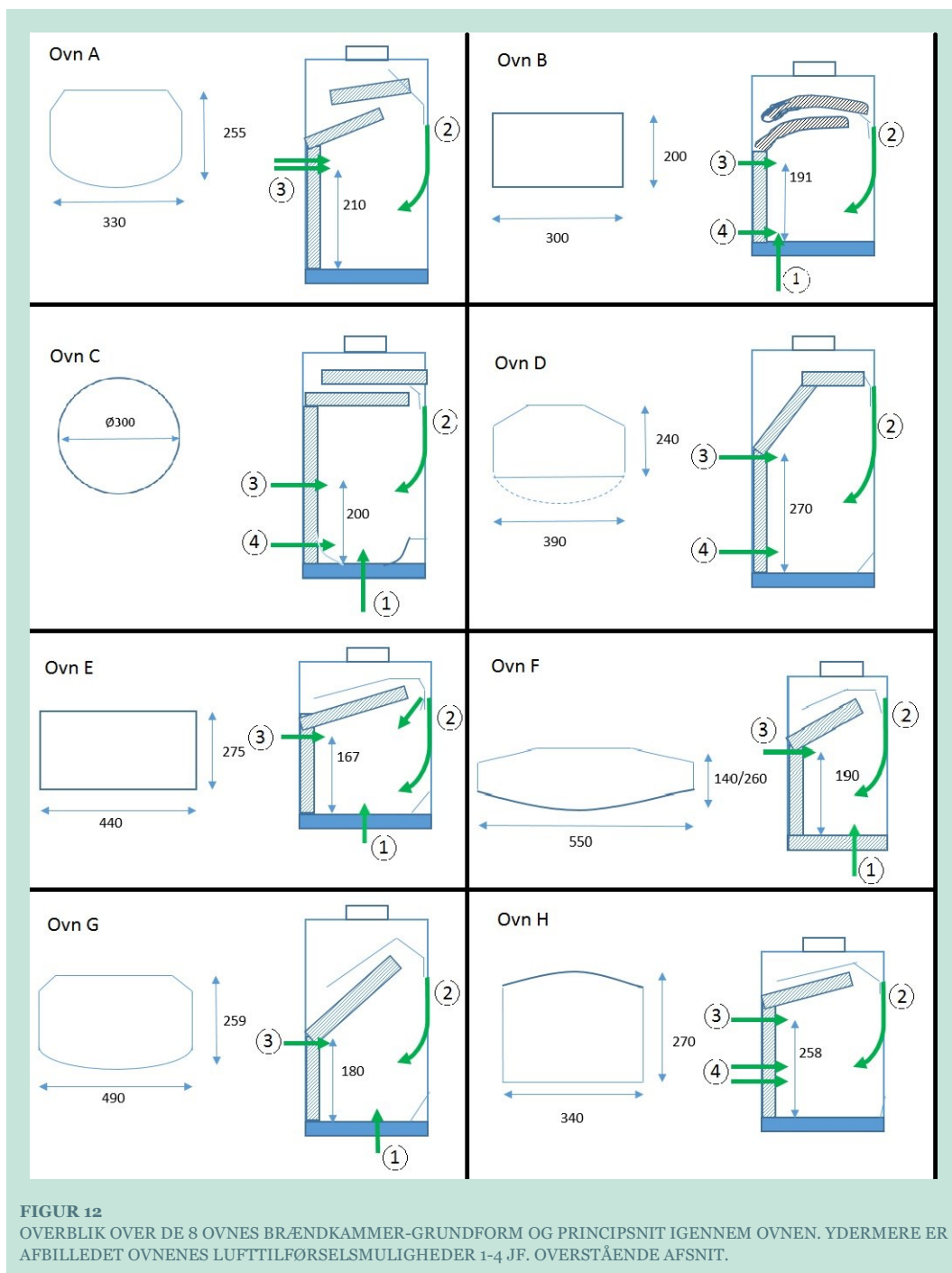
Måleproceduren har fundet sted i efteråret 2015 i oktober og november over seks uger, hvor den enkelte prøvningsperson inden de endelige målinger har haft mulighed for at afprøve den udviklede måleprocedure på forhånd på de udvalgte ovne, og dernæst været i laboratoriet til de endelige målinger. Se *Bilag 01* for en gennemgang af metoden og omfanget. I og med at alle de endelige målinger er foretaget det samme sted med de samme forudsætninger til udstyr, da er de mest basale usikkerheder elimineret, hvorfor resultaterne fra de otte ovne ses som fuldt ud brugbare til den videre analyse. Ydermere er alle målingerne foretaget af DAPOs medlemmer overvåget af den samme prøvningsperson fra ELAB for at sikre ensartede instrukser og ensartede fyringsmønstre.

Parametrene til de otte valgte ovne har været, at der skulle være forskellig brændkammergeometri, forskellig lufttilførsel (dog alle med tertiær lufttilførsel), forskellig indvendig overflade samt udelukkende ovne uden sideglas. I det følgende forklares lufttilførselsmulighederne med begreberne:

- 1-Primærluft:** Lufttilførsel som tilføres fra bunden af brændkammer op igennem bålet. Typisk regulerbar.
- 2-Sekundærluft:** Lufttilførsel som rudeskyl ned langt frontruden, som dels holder glasset rent og samtidig er bålet primære forbrændingsluft. Typisk regulerbar.
- 3-Tertiærluft:** Lufttilførsel tilført fra bagvæggen og tilfører flammerne ekstra luft til at antænde uforbrændte gasser, der måtte være over bålet. Typisk konstant tilførsel, men kan også være regulerbar over samme spjæld som sekundærluften.
- 4-Pilotluft:** Ekstra mindre lufttilførsel, som tilfører konstant luft til bålet. Typisk placeret i bunden for at kunne antænde bålet i opstartsfasen ved genfyring.

DAPO har tilkendegivet, at de udvalgte ovne holdes anonyme både internt og for offentligheden, hvorfor ovnene i denne rapport er benævnt med bogstaver fra A til H. Rækkefølgen ovnene er testet i er ligeledes vilkårlige i forhold til navngivningen. *Figur 12* er principskitser over brændkammerareal og snit igennem ovnene brugt til kampagnen. Cirklerne med tal markerer typen af lufttilførselsmulighed jf. forrige afsnit. Som det ses, har alle ovne sekundær- og tertiærlufttilførsel. Enkelte ovne har konstant tilført pilotluft (ovn B, C, D og H). Ydermere har fem ud af de otte ovne primærlufttilførsel. Tre ud af disse benytter kun primær lufttilførslen som en opstarts-anordning (brugt

under TopDown – filter 4), og i øvrigt kun benyttes til at få gang i bålet ved merfyring. Ovn C og ovn G benytter primærlufttilførsel som en fast del af forbrændingsluften under alle fyringerne. Ovn C dog med en mindre luftmængde end ovn G.



Som beskrevet under *afsnit 2.3* er der valgt at benytte en almindelig 1,8m målesektion (EN13240) med fast røgtræk på 12Pa. På denne målesektion er der udtaget røggas, som igennem varmeslanger og kølesystemer er ført til analyseinstrumenter, som afrapporterer følgende emissioner:

- Initial CO₂ koncentration i % (kuldioxid).

- Initial CO koncentration i ppm og % (kulmonoxid eller kulilte).
 - o Omregnes til % ved 13% O₂.
- Initial THC koncentration i ppm (total hydro carbon forbindelser).
 - o Omregnes til OGC mgC/Nm³ tør gas ved 13% O₂ (organic gasous compounds).
- Opsamling af partikulær masse, PM, på quartzfiltre (primær- og backupfilter).
 - o Opsamlet efter NS standard i fortyndingstunnel ved isokinetisk udsugning (middel­hastighed omkring 5-6m/s) med formindsket dyse­størrelse (5,9mm) og sænket udsuget volumen for at forhindre overload af PM på filtre.
 - o Udsugningsflow omkring 0,5m³/h.
 - o Opsamlet på ca. 104mm quartzfiltre med et eksponeringsområde på 91mm.
 - o Primærfiltre er analyseret af Sunset Laboratory, Holland og af­rapporteret som EC [µg/cm²] og tilsvarende OC [µg/cm²].
 - o De analyserede værdier af EC og OC er i nærliggende rapport omregnet til justeret partikulær udslipsandel [g/kg(tørstof)] for at kunne relatere mængderne til nuværende af­rapporteringsenheder for brændeovne.

Derudover af relevante informationer er der målt følgende:

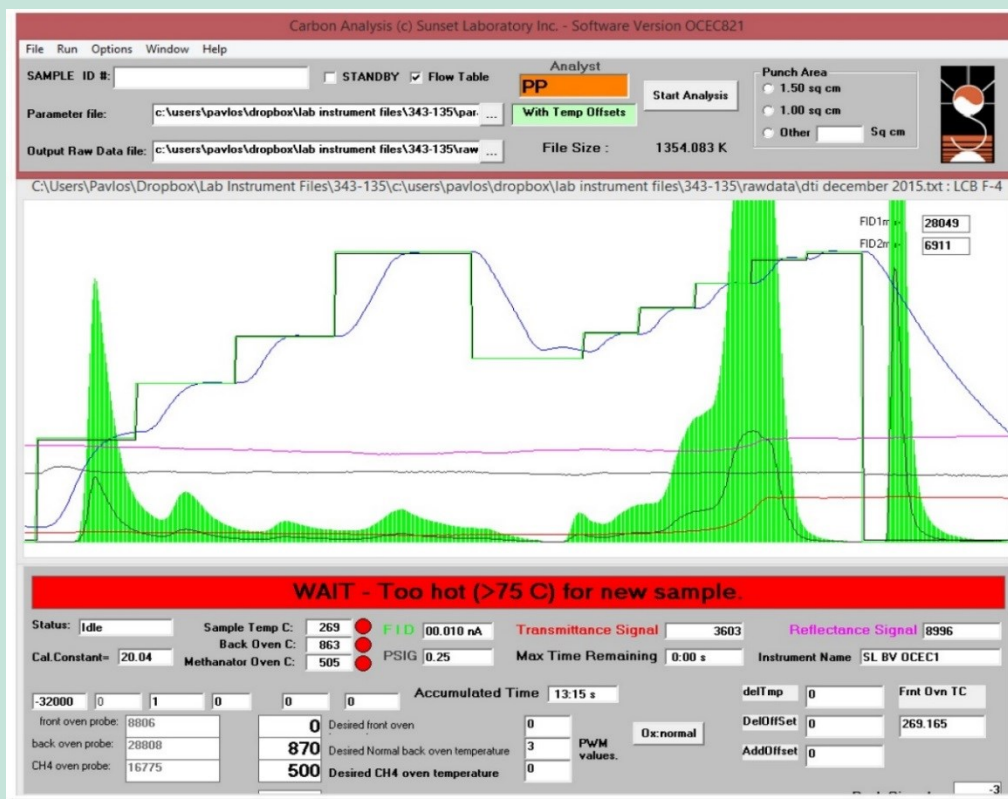
- Røggastemperatur i °C.
 - o Udtaget i sugepyrometer jf. EN13240 og af­rapporteret som middel røggastempe­ratur ved 20°C rumtemperatur.

Til hver fyring er der foretaget målinger med samme type brændsel fra det samme ”brændetårn” for at sikre, at brændslet var ensartet. Brændslet benyttet er af typen birk. Der er desuden taget fugtprøver af brændslet til hver prøvedag, som viser et relativt ensartet fugtindhold mellem 14,4-17,9%. Fugtprocenten de enkelte dage er benyttet i respektive beregninger.

3.1.2 Analyse hos Sunset Laboratory

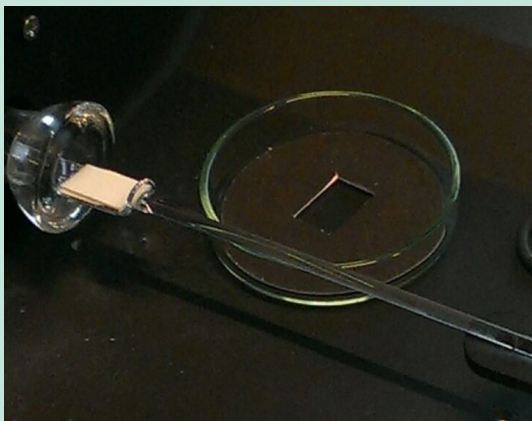
I AP 2 blev det besluttet at benytte sig af opsamlet partikelmasse på quartz-filtre, for derefter at sende filtrene til analyse hos Sunset Laboratory. Sunset Laboratory har specialiseret sig i at analysere opsamlet partikelmasse efter den termisk-optiske målemetode beskrevet i *afsnit 2.2.1* som benytter sig af NIOSH870 protokollen (Sunset Laboratory, 2014) til at af­rapportere en Elemental Carbon fraktion (EC) samt en Organic Carbon fraktion (OC). EC-fraktionen sidestilles jf. *afsnit 2.1.1.3* med BC indholdet på filtrene. Kort fortalt bliver den opsamlede partikelmasse på quartz-filtrene analyseret i et instrument, som ved forskellige temperatursteps og i forskellige atmosfærer afgiver enten organisk carbon (OC) eller elemental carbon (EC), som registreres ved hjælp af hhv. en FID (flamme-ioniseringsdetektor) og med laserteknik. Disse temperatursteps kan ses som en grafisk af­bildning af analysen af filter F-4 på *Figur 13*. Grundet økonomiske begrænsninger i projektet er der kun foretaget analyse på primærfiltrene af de 64 opsamlingsudtag. De resterende 64 backupfiltre er ikke sendt til analyse. Dette vil samlet set give en mindsket OC-fraktion, da OC har en tendens til også at sætte sig på backup filtret (jf. erfaringer fra sideløbende IVL projekt). EC-fraktionen er dog begrænset på backup filtret, hvorfor det er acceptabelt til laboratoriebrug kun at analysere primærfiltret (jf. Heikki Lamberg fra UEF – University of Eastern Finland).

Dette projekt omhandler BC, hvilket i denne analyse sidestilles med EC, og dermed går det vigtigste ikke tabt i dette projekt ved at fravælge analysen af backupfiltrene.



FIGUR 13

SCREEN SHOOT FRA ANALYSELABORATORIET SUNSET LABORATORY OVER FILTERANLYSE AF FILTER F-4. TIL VENSTRE FOR MIDTEN SES FRIGIVELSEN (GRØN MASSE) AF ORGANISK CARBON I ILTFRI ATMOSFÆRE VED 4 TEMPERATURSTEPS. TIL HØJRE FOR MIDTEN SES FRIGIVELSE AF ELEMENTAL CARBON (OGSÅ SOM GRØN MASSE) I SVAG HELIUM ATMOSFÆRE VED YDERLIGERE 5 TEMPERATURSTEPS.



BILLEDE 1

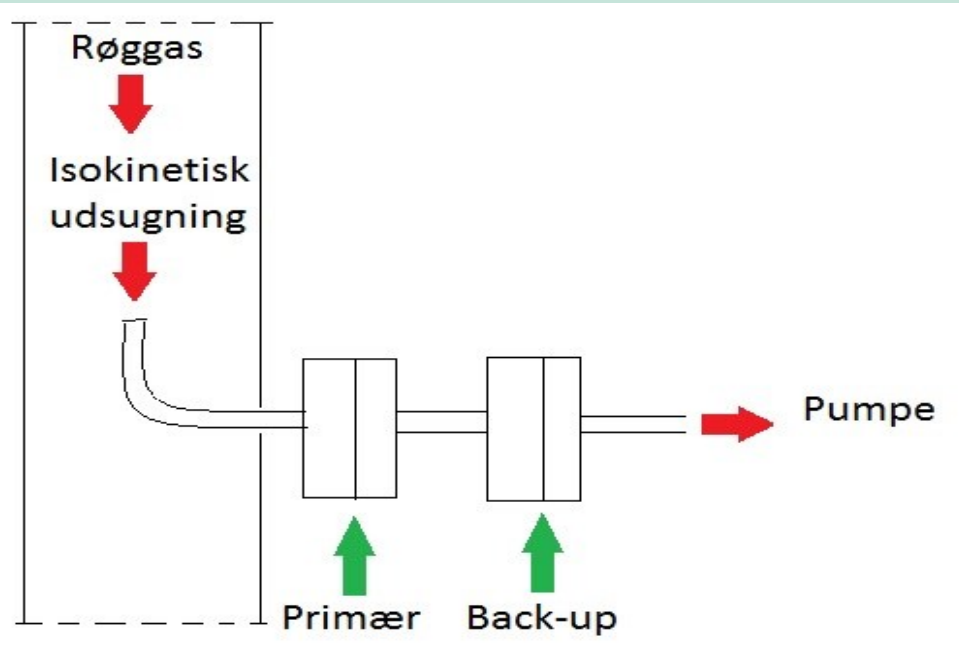
PRØVEUDTAG EFTER ENDT EC/OC ANALYSE FRA SUNSET LABORATORY.

På Billede 1 ses et eksempel på et prøveudtag fra et vilkårligt quartz-filter (ikke fra nærværende projekt). Et rektangel på 1,0x1,5cm trykkes ud fra hvert filter og indføres i analyseapparatet. Billedet illustrerer en afsluttet prøve, hvor alt partikkelmasse er brændt af under analysen.

3.1.3 Udfordringer ved partikeludtagning

Ved normal partikelmåling efter NS metoden (jf. NS3058-I og II) benyttes filterholderen illustreret på Figur 14 - dog med glasfiber-filtre. Der samples i den afkølede røggas i fortyndingstunnel vha. af en pumpe og afslutningsvis igennem en gasmåler, som måler den udsugende volumen (både forsimplet beskrivelse og figurtegning). Dernæst håndteres, tørres og vejes glasfiber-filtrene jf. NS3058 og endelige partikelmasse afrapporteres ned til nærmeste 0,1mg efter samling. Der er i dette projekt forsøgt at håndtere quartz-filtrene på præcis samme måde som glasfiber-filtrene, dog med den tilføjelse, at filtrene er forbagt ved høj temperatur jf. analysestandarden fra Sunset Laboratory. Herunder en gennemgang af håndteringen af filtrene:

- Filtre bagt ved 815°C i 2 timer (step-vis op i temperatur)
- Flyttet over i glaspetriskåle med pincet
- Tørret i eksikator i minimum 1 døgn med låg (akkrediteret biomasselaboratorie BLAB)
- Vejet direkte efter tørring på egnet vægt i temperaturstyret rum (BLAB)
- Fragtet til ELAB i glaspetriskåle
- Håndteret forsigtig med pincet og placeret i filterholder
- Opsamling af partikelmasse ved at suge igennem filtre fra den fortyndede røggas
- Håndteret forsigtig igen efter sampling med pincet over i glaspetriskåle
- Tørret i samme eksikator uden låg i minimum 1 døgn for at uddrive den smule fugt der måtte være fra røggassen (BLAB)
- Vejet igen direkte efter tørring (BLAB)
- Vægt før og efter angiver den opsamlede masse på filtrene
- Pakket og sendt til Sunset Laboratory i selvsamme glaspetriskåle
- Analyseret for EC/OC fraktion



FIGUR 14

FORSIMPLET FIGUR OVER PARTIKELHOLDEREN FOR UDSUGNINGEN AF PARTIKELMASSEN PÅ DE 2 QUARTZ-FILTRE (SOM LEVER OP TIL ANALYSENS ANBEFALEDE TYPE AF FILTERMATERIALE). PRIMÆRFILTRET OPTAGER DE FLESTE PARTIKLER OG AFSÆTTES SOM MØRK MASSE PÅ OVERFLADEN. BACKUPFILTRET OPSAMLER DEN MASSE, DA MÅTTE GÅ IGennem PRIMÆRFILTRET. FOR DETALJERET FIGUR OVER BENYTTET PARTIKELUDTAG SE NS3058-2 FIGUR 1.

Det har vist sig, at quartz-filtrene opfører sig anderledes end glasfiber-filtrene, som normalt benyttes til denne partikelopsamlingsmetode. Det har samtidig vist sig, at vi ikke er de eneste, som er stødt på dette problem. Her kan som fx nævnes NPL ("Study into the loss of material from filters used for collecting particulate matter during stack emissions monitoring") og en artikel fra EPA ("Investigation of Filter Media for Use in the Determination of Mass Concentrations of Ambient Particulate Matter"). Tabel 4 illustrerer afvejningsresultaterne fra primær- og backupfiltrenes opsamlede masse jf. håndteringsproceduren beskrevet i tidligere afsnit.

Ovn	Filter	1	2	3	4	5	6	7	8
		100%klods 50% spjæld - 10min	100%klods 50% spjæld - Pyrolyse	100%klods 50% spjæld - Udglødning	TopDown	100%klods 50% spjæld	150%klods 50% spjæld	100%klods 100% spjæld	150%klods 100% spjæld
A	Primær	0,4	0,6	0,3	0,7	1,1	1,7	0,5	1,1
	BU	0,6	0,4	0,8	0,5	0,2	0,6	1,4	1,3
	Total	1,0	1,0	1,1	1,2	1,3	2,3	1,9	2,4
B*	Primær	0,7	-2,2	2,7	0,5	0,6	1,5	2,6	0,4
	BU	-1,4	0,3	3,2	0,1	0,2	0,3	4,0	0,2
	Total	-0,7	-1,9	5,9	0,6	0,8	1,8	6,6	0,6
C	Primær	1,6	-0,2	0,6	1,3	-0,3	0,6	0,8	1,3
	BU	2,0	0,6	2,0	-0,1	0,3	0,4	0,3	0,2
	Total	3,6	0,4	2,6	1,2	0,0	1,0	1,1	1,5
D*	Primær	0,6	-11,7	8,5	0,4	0,6	2,3	1,3	4,7
	BU	0,6	-2,3	9,7	1,1	-2,3	4,6	0,3	-1,2
	Total	1,2	-14,0	18,2	1,5	-1,7	6,9	1,6	3,5
E	Primær	0,1	0,0	0,7	1,7	0,9	1,3	0,7	0,8
	BU	1,5	1,1	0,4	0,3	0,0	0,5	0,8	0,4
	Total	1,6	1,1	1,1	2,0	0,9	1,8	1,5	1,2
F	Primær	0,4	0,2	1,9	3,1	0,4	2,3	0,6	1,6
	BU	0,7	0,3	1,4	0,3	0,3	0,2	0,4	0,3
	Total	1,1	0,5	3,3	3,4	0,7	2,5	1,0	1,9
G	Primær	0,1	0,3	0,2	3,5	1,1	1,5	0,7	1,9
	BU	0,5	0,9	0,4	0,4	0,4	0,3	0,4	0,1
	Total	0,6	1,2	0,6	3,9	1,5	1,8	1,1	2,0
H	Primær	0,4	0,5	0,5	0,9	0,9	1,5	0,9	1,6
	BU	0,3	0,5	0,5	0,2	0,5	0,3	0,7	-0,4
	Total	0,7	1,0	1,0	1,1	1,4	1,8	1,6	1,2

TABEL 4
OPSAMLET MASSE I MILLIGRAM [MG] PÅ BÅDE PRIMÆR OG BACKUP FILTRE VED MÅLEKAMPAGNEN. OVNENE ER AFBILLEDET SOM BOGSTAVER FRA A TIL H I RÆKKERNE OG DERMED ANONYME. DE 8 PARTIKELUDTAG ER AFBILLEDET SOM TAL 1 TIL 8 I KOLONNERNE.

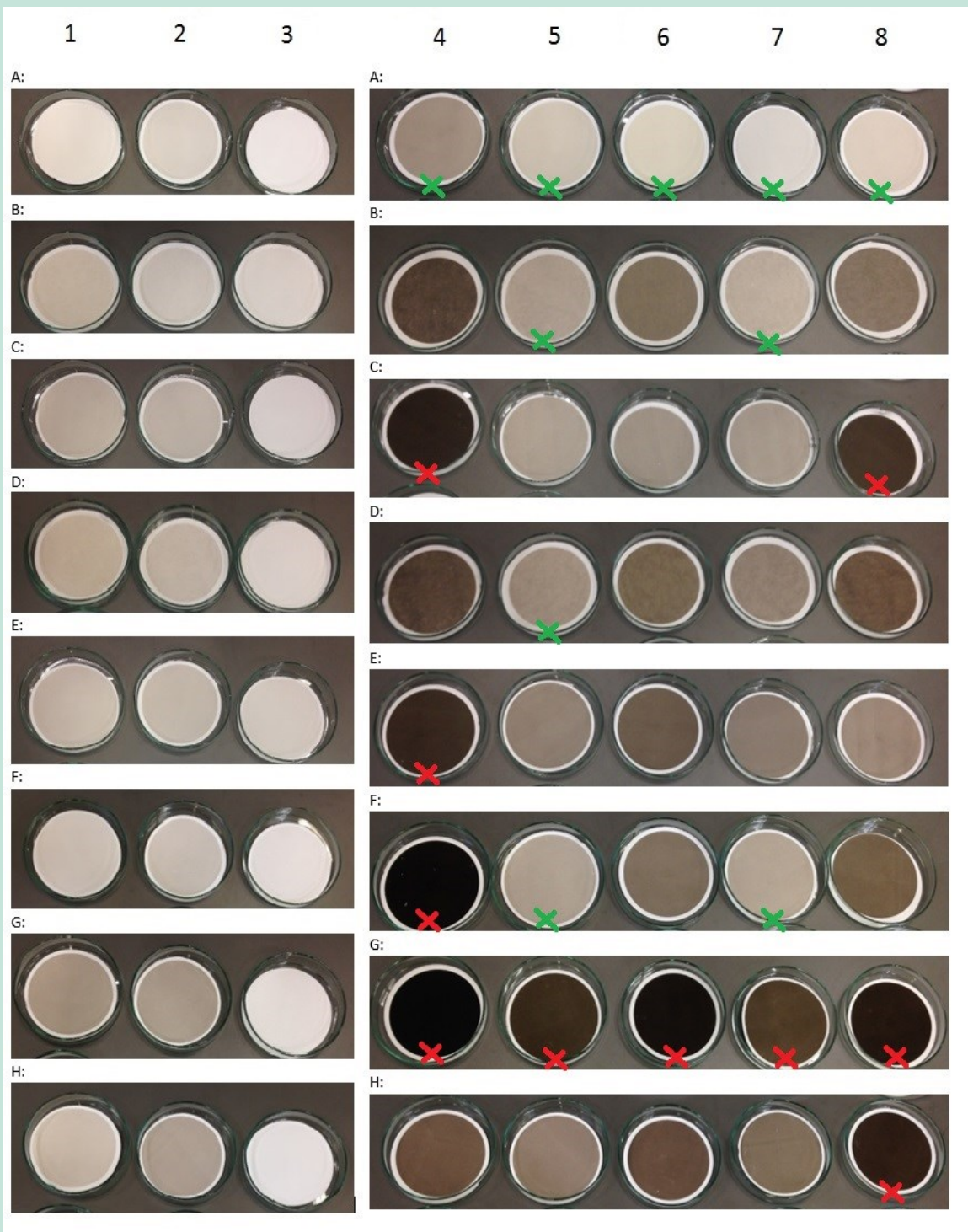
I Tabel 4 ses den opsamlede partikelmasse i milligram [mg] på både primær og backup filtrene for ovnene A til H i de forskellige fyringssituationer 1 til 8. Ved generel partikeludtagning efter denne metode på glasfiberfiltre (jf. NS3058) vil størstedelen af partikelmassen afsættes på primærfiltret, mens en lille fraktion vil afsættes på backup filtret. Massen fra de to filtre adderes derefter og afrapporteres den partikulære masse ved hjælp af den udsugede volumen og brændselsmængde som en "Justeret partikulær udslipsandel g/kg" (inkl. bidrag fra sonde fra acetoneskyl). Dog har det ikke været tilfældet i dette projekt med quartz-filtrene. Hver ovn har været igennem præcis samme fyringer, og dermed burde ovnenes bidrag danne et ens mønster ved de forskellige fyringssituationer.

Det har vist sig, at den opsamlede masse har været helt forskellig. I nogle situationer er der negativ masseudtag, andre situationer med mere på backupfiltret til trods for, at backupfiltret ikke har haft synlig partikelmasse på sig, og primærfiltret har været helt mørkt. De røde tal på figuren viser et udsnit af de masse mængder, som virker uforklarlige eller urealistiske. Da der ikke er sammenhæng mellem tidspunkter for uforklarlige udfald eller ud for specifikke ovne, men derimod ud for hver ovn, kan data fra før/efter vejningerne ikke benyttes til at bestemme den samlede partikelmængde opsamlet på filtrene. Dermed kan der kun benyttes data fra de øvrige emissioner målt under kam-

pagnen, samt analyseresultater fra Sunset Laboratory, som opgiver en OC- og en EC-fraktion. Tilsammen giver disse ikke et korrekt billede af den totale partikulære masse opsamlet på filtrene og er derfor ikke repræsentativ eller proportional for den opsamlede partikelmasse, men kun den opsamlede EC og OC. Dette skyldes, at visse fraktioner ikke er repræsenteret i analysen. Analyselaboratoriet har haft selvsamme udfordringer med uforklarlige filtervejninger med quartz-materiale. For at kunne få både en EC/OC analyse og en PM måling ud fra samme fyringssituation vil dette kræve to prøveudtag på samme tid på hver sine filtertyper (jf. Pavlos Panteliadis, Sunset Laboratory). Det er først erfaret efter målekampagnen og er derfor ikke udført i dette projekt. Usikkerhedsberegning (se *Bilag 02*) fra sideløbende andet projekt med tilsvarende mønster konkluderer, at usikkerheden ved en opsamlet masse på 2,0mg er 1,03mg (95% konfidensinterval) – altså 51% usikkerhed. Da størstedelen af målingerne er i det område eller under, kan vi dermed ikke benytte de vejede resultater af den totale partikelmængde til noget. Udfordringerne vedrørende vejeresultaterne og dermed udeblivelse af den total partikulære masse er dog ikke udslagsgivende for, om de øvrige analyseresultater er brugbare.

3.1.4 Visuelle resultater

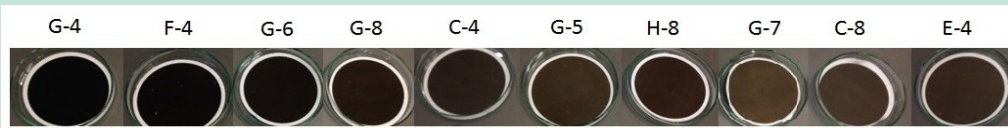
Billede 2 illustrerer de visuelle resultater fra målekampagnen (64 filtre). De otte primærfiltre til hver ovn er blevet fotograferet inden afsendelse til analyselaboratorie for at se, om der måtte være en mulig visuel sammenhæng og analyseresultaterne af EC- og OC-fraktionerne. De otte ovne, ovn A til H, har været igennem præcis samme fyringssituationer ud fra den opstillede måleprocedure. Derfor kan de enkelte rækker sammenlignes ovnene imellem for alle fyringssituationer, og de enkelte kolonner kan sammenlignes ovnene imellem for de enkelte fyringssituationer. Filter 1, 2 og 3 er sampling fra den samme fyringscyklus blot faseopdelt. Denne type udtag blev besluttet i AP 2, da projektet ikke har adgang til online måling af BC. Dermed har der været en vis usikkerhed omkring, hvornår i forbrændingscyklussen EC-OC vil blive udledt. Denne information kan benyttes under udviklingen af nye brændeovne og luftsystemer. Filter 1+2+3 kan tilsammen tilnærmelsesvis sammenlignes med filter 5, da fyringsmønster, brændelsesmængde og spjældindstillinger er ens i de to fyringer. Filter 1 er udsuget i opstartsfasen, filter 2 er fra pyrolysefasen, mens filter 3 er fra udglødningsfasen jf. *Bilag 01*. Filter 4+5+6+7+8 er partikeludtag over en hel forbrændingscyklus hver fra ilægning til udbrænding. Hvad man her skal huske er, at hver ovn er forskellig, hvorfor samplingsperioden afhænger af den enkeltes ovns evne til at brænde træet af med den prædefinerede spjældindstilling.



BILLEDE 2

VISUELLE RESULTATER FRA DE 8 PRØVEUDTAG (FILTER 1 TIL 8) TAGET I LØBET AF MÅLEKAMPAGNEN PÅ DE 8 OVNE (OVN A TIL OVN H). KRYDSENE PÅ FILTRENE 4-8 ANGIVER EN TOP TI OVER DE FILTRE MED STØRST EKSPONERING AF MÅLT EC PÅ SIG (RØDE KRYDSE) OG DE TI FILTRE MED MINDST EKSPONERING (GRØNNE KRYDSE).

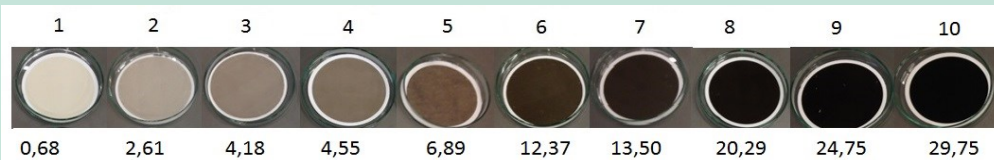
Resultaternes visuelle farve viser sig at have en god sammenhæng med mængden af EC-fraktionen (oplyst i enheden $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) opsamlet på filtret. BC er visuelt sort og fra teorien stærkt lysabsorberende materiale. Resultaterne stemmer godt overens med jo mørkere opsamlet masse jo større indhold af EC og dermed BC. Dermed kan det visuelle billede godt indikere, om hvorvidt ovnen producerer en større eller mindre BC fraktion. Dog er de forskellige filter taget ud fra forskellige træmængder og opsamlingsperioder. Derfor kan den *beregnete* mængde EC i enheden g/kg godt variere, da belastningen på filtrene afhænger af brændselsmængden og den udsugede volumen målt. Den beregnede værdi kan derfor gøre det muligt at sammenligne ovne og filtre med hinanden, da der er taget højde for variableerne. Det kan blandt andet ses på filtrene G-5 og G-7, som minder rigtig meget om E-4's filterfarve til trods for at der er dobbelt så meget beregnet EC g/kg på filter G-5 end på filter E-4. *Billede 3* afbilder en top 10 med de største målte EC fraktioner (i enheden $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) opsamlet på filtrene i rækkefølge. Her kan det godt anes, at den sorte farve aftager gradvist.



BILLEDE 3

DE TI FILTRE MED STØRST EC-FRAKTION JF. EC/OC ANALYSEN. STØRSTE FRAKTION SES FRA VENSTRE MOD HØJRE.

Omvendt giver de mest lyse filtre ligeledes den mindste målte EC-fraktion. Disse kan ses som de grønne krydser på Billede 2. En afbildning på *Billede 4* af EC-fraktioner (i enheden $\mu\text{g}/\text{cm}^2$) fra mindste til største fraktioner.



BILLEDE 4

VISUEL AFBILDNING AF MINDSTE EC FRAKTION TIL STØRSTE EC FRAKTION MÅLT VED ANALYSEN I ENHEDEN $\mu\text{G}/\text{CM}^2$

Ud fra et visuelt perspektiv er det muligt tilnærmelsesvis at opstille en form for farveskala fra hvid til sort, hvor den sorte ende på skalaen indeholder den største målte fraktion af EC ned imod den mindste fraktion. Dog kan den beregnede EC mængde i g/kg godt variere - altså er det ikke altid jo mørkere jo større beregnet mængde g/kg, da det afhænger af brændselsmængden og den tid der er samlet over – se mere om dette under *afsnit 4.4.3*. Andre har også eksperimenteret med simpel udtag af partikelmasse fra røggas, hvor en sodplet fra røggassen kan placeres på en foruddefineret farveskala og dermed indikere, hvor mange mg/m³ partikler røgen indeholder afhængig af farve og antal suge-pump (se *Bilag 03*).

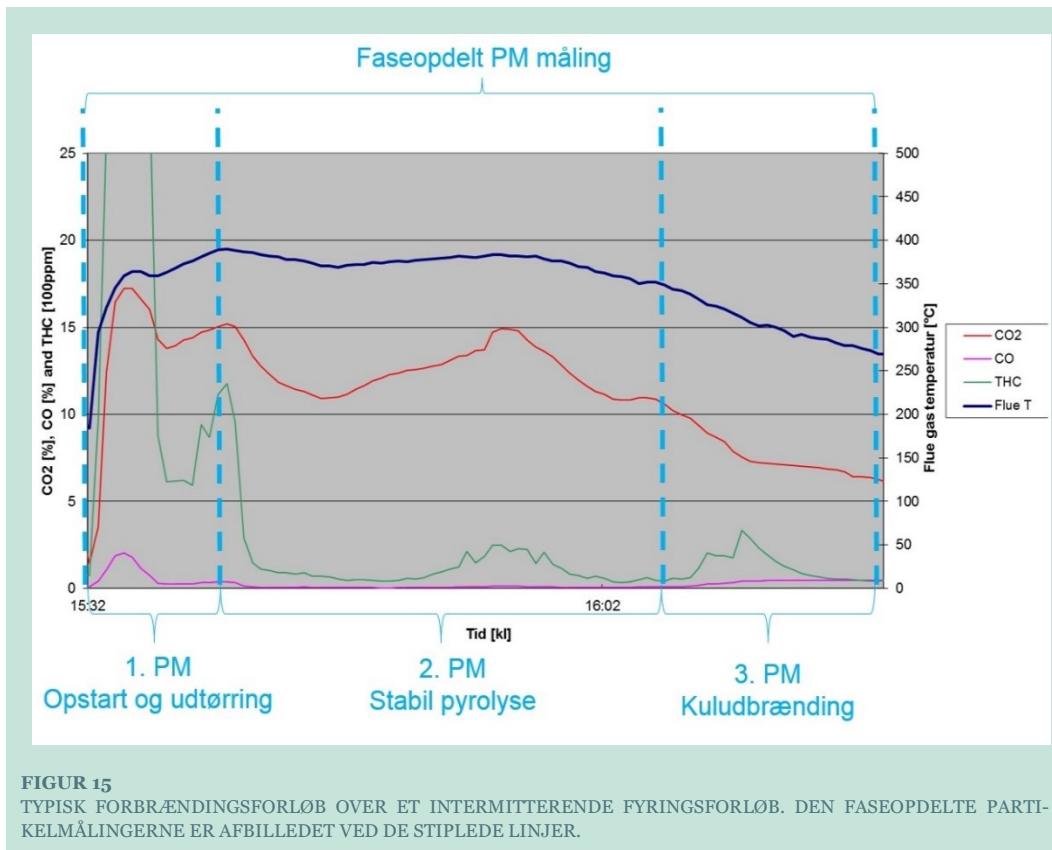
3.1.5 Resultater fra faseopdelt fyring (filter 1-3)

Som tidligere beskrevet er den 3-delte fyring lavet for at se, hvornår i forbrændingsfasen udledningen forgår på de forskellige ovne i mangel på en online målemetode. Jf. måleproceduren er målingen foretaget ved en fyring med 100% brændsel (den enkelte ovns optimerede brændselsmængde

foretaget ved CE-mærke godkendelsestesten efter standarden EN13240). Desuden er det bestemt, at ovnene efter maksimum 3-5 minutter skal nedjusteres til 50% af den tilgængelige forbrændingsluft (sekundærlufttilførsel).

- Filter 1:** Målt de første 10 minutter – opstartsfasen.
Filter 2: Målt de efterfølgende 17-45 minutter – pyrolysefasen.
Filter 3: Målt de sidste 6-13 minutter – udglødningsfasen/kuludbrænding.

Filter 2 og 3's udsugede periode varierer, da filterskiftet mellem filter 2 og 3 er foruddefineret jf. måleproceduren (se *Bilag 01*) ved de to parametre CO₂ og CO niveau. Ligeledes er stopkriteriet for afslutning af måling 3 foruddefineret af to andre parametre, CO₂ og røgtemperatur. Se *Figur 15* for en grafisk afbildning af, hvornår i forbrændingsforløbet filterskiftet har fundet sted.



Figur 16 og Figur 17 viser fordelingen af EC og OC i de tre faser målt under fyringen på de otte ovne. De to grafer på hver figur viser hhv. den absolutte EC/OC udledning over hele fyringen, og EC/OC bidraget delt op relativt på tiden. Dermed kan ses i hvilken fase den største udledning pr. minut sker og sammenholde det mod hele fyringens forløb. *Figur 16* illustrerer EC-udslippet for den faseopdelte fyring. Den øverste afbildning på figuren viser de absolutte EC-bidrag i de tre perioder i %, hvor der ikke er taget højde for måleperiodens varighed. Den nederste afbildning viser EC bidraget pr. minut, hvor udledningen ses relativt i stedet for absolut. Her ses størstedelen af udslippet forekommer i opstartsfasen (første 10 minutter) for de fleste ovne, næstmest i pyrolysefasen (efterfølgende stabil fase) og det mindste bidrag forekommer i udglødningsfasen. Hvis det sammenholdes med teorien, så giver det god mening, at BC opstår i flammer ved ufuldstændig forbrænding fremprovokeret af lokal iltunderskud. Det er meget logisk, at der i opstartsfasen efter

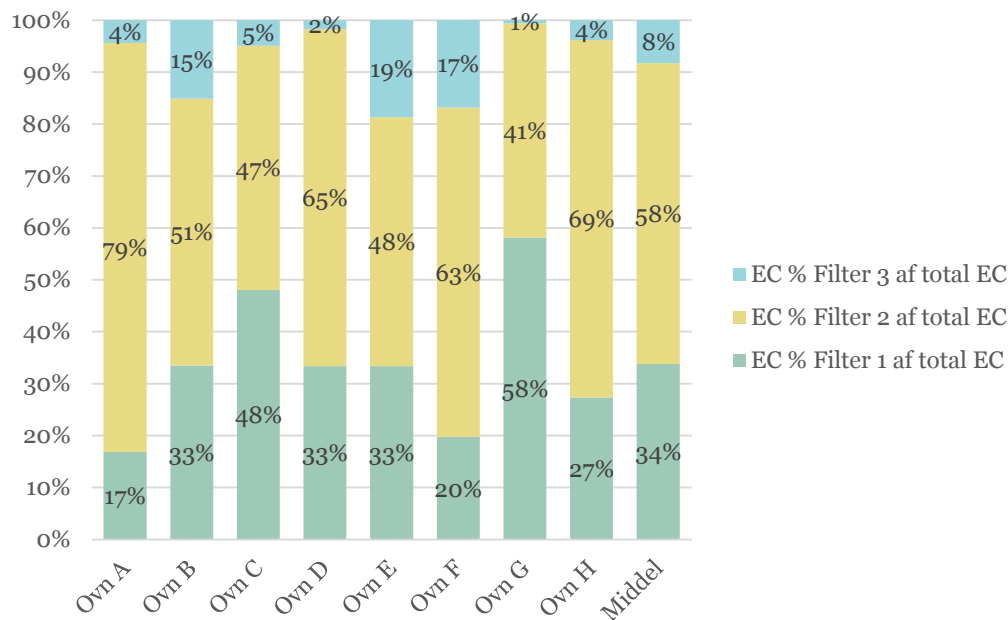
pålægning af træ er ufuldstændig forbrænding, da der går tid før flammerne kommer tilstrækkeligt i gang og dermed får dannet høje nok temperaturer til at kunne brænde alle de frigivne gasser af.

I pyrolysefasen er der mere eller mindre stabile flammer, men det er alment kendt for branchen, at der undervejs kan opstå en mindre periode med lidt mere synlig røg, hvor temperaturen samtidig toppe i denne fase. Denne periode *kan* skyldes, at der i forløbet bliver frigivet flere gasser fra træets kerne, som giver højere temperaturer. Den større afgasning *kan dermed* kræve mere ilt end tilgængeligt for at kunne brænde rent netop i denne periode. Derfor kan denne fase derfor have et mindre eller større tidsforløb med iltunderskud, som giver ekstra EC-bidrag. I den sidste del af forbrændingsfasen, udglødningsfasen, er der ikke temperatur eller gasser nok til at nære en flamme, hvorfor EC bidraget er mindst her. Som det ses på specielt ovn E og F er EC-bidraget større i udglødningsfasen end de andre. Dette kan skyldes tidspunktet for det forudbestemte filterskift. Tidspunktet for filterskiftet mellem 2. og 3. filter er defineret i måleproceduren ud fra, hvornår CO₂ niveauet peaket i slutningen af forbrændingen og CO emissionerne stiger. Når disse krydser hinanden er der valgt jf. måleproceduren at skifte filter. For ovn C, E og F's tilfælde var der stadig få flammer i et af træstykkerne (jf. notater under fyring) på tidspunkt for filterskift, hvorfor det kan være grunden til et større EC udledning på specielt ovn E og F.

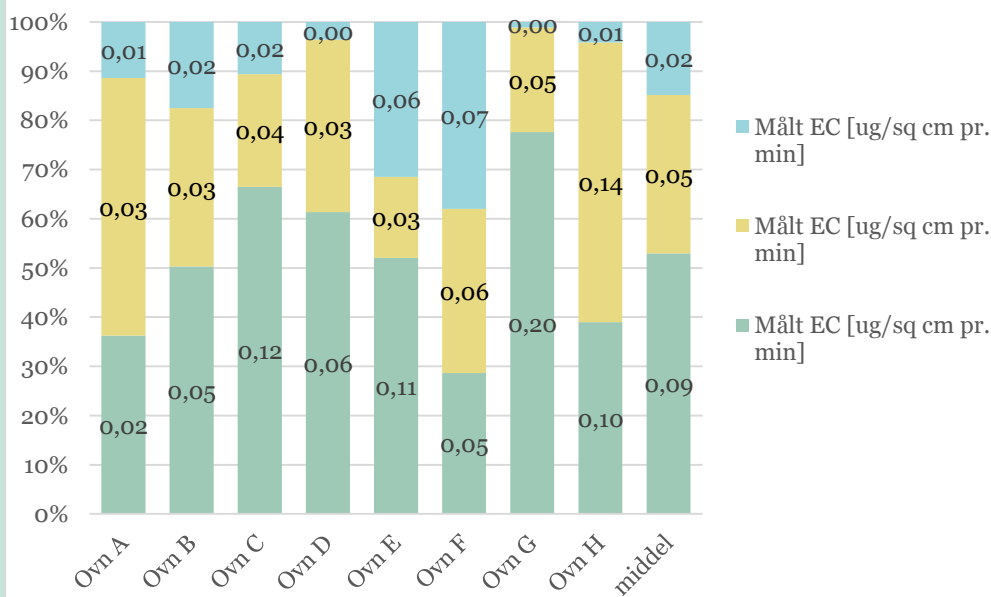
Ved at betragte udledningen i absolutte tal i stedet for relativt på tid byttes om på opstarts- og pyrolysefasen, da pyrolysefasen er mellem 2 og 4 gange længere end opstartsfasen, hvorfor der midlet på de otte ovne udledes 58% af EC-udledningen i den mere stabile fase, mens 34% udledes i opstartsfasen og kun 8% i udglødningsfasen.

Samlet set er perioden med størst EC-bidrag dermed opstartsfasen (0,09ug/cm²/min), som midlet over de otte ovne udleder næsten dobbelt så meget EC pr. minut end den stabile fase (0,05ug/cm²/min) og omkring 4,5 gange så meget pr. minut som udglødningsfasen (0,02ug/cm²/min). Figur 17 illustrerer tilsvarende OC-udslippet for den faseopdelte fyring. Igen viser den nederste afbildning OC-bidraget pr. minut, mens den øverste viser det absolutte udslip for de tre faser og dermed ikke tager højde for fasernes varighed. Som for EC-bidraget sker OC-bidraget (middel ud fra de 8 ovne) mest i opstartsfasen, hvorimod den næststørste fase er udglødningsfasen. Den midterste stabile fase har den mindste udledning pr. minut. Dette mønster ligner rigtig meget mønsteret for udledning af de uforbrændte kulbrinte-forbindelser (THC - Total hydrocarbon-forbindelser [PPM], som omregnes til mgC/nm³ ved 13% O₂). Afsnit 4.4 dykker dybere ned i de øvrige emissionsparametre, om der kan findes en korrelation mellem de i projektet målte emissioner. Modsat EC-udslippet leverer ovnene flere OC-emissioner i opstartsfasen både pr. minut og absolut. Pr. minut leverer ovnene (middelværdi) hhv. knap 6 gange og 2 gange større OC-bidrag i opstartsfasen og udglødningsfasen kontra pyrolysefasen. Dette er et tydeligt billede af, at OC-bidraget ligeledes udledes ved ufuldstændig forbrænding. Ydermere har OC et større bidrag i udglødningsfasen end EC, som ikke har et stort bidrag, når flammerne er gået ud.

Absolut EC udledning under fyringsproces (filter 1-3)



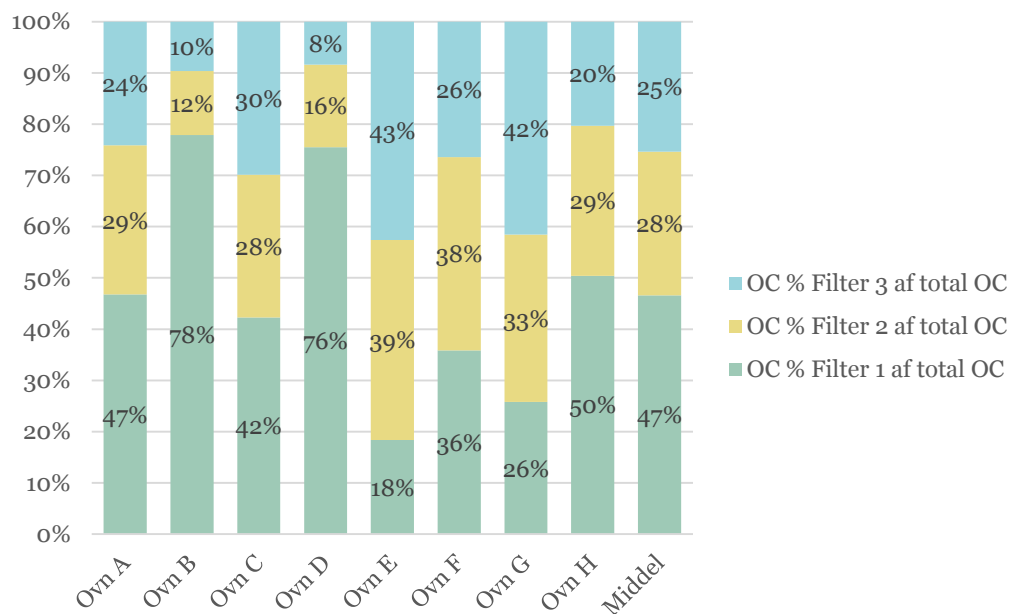
Relativt EC bidrag pr. minut under fyringsproces (filter 1-3)



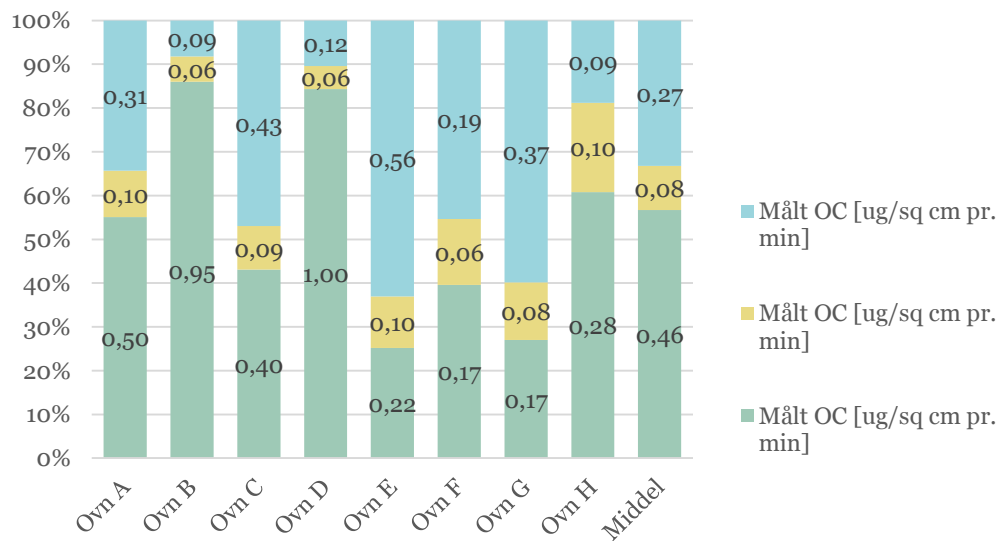
FIGUR 16

DE TRE FILTRES EC-BIDRAG FRA DE OTTE OVNE HHV. SOM ABSOLUT UDLEDNING (ØVERSTE GRAF) OG RELATIVT SOM MÅLT EC PR. MINUT (NEDERSTE GRAF) I DE TRE FASER I FORBRÆNDINGSPROCESSEN. VÆRDIERNE YDERST TIL HØJRE ER MIDDELVÆRDIER AF ALLE 8 OVNE.

Absolut OC udledning under fyringsproces (filter 1-3)



Relativt OC bidrag pr. minut under fyringsproces (filter 1-3)



FIGUR 17

DE TRE FILTRES MÅLTE OC-UDLEDNING FRA DE OTTE OVNE HHV. SOM ABSOLUT UDLEDNING (ØVERSTE GRAF) OG RELATIVT SOM MÅLT OC PR. MINUT (NEDERSTE GRAF) I DE TRE FASER I FORBRÆNDINGSPROCESSEN. VÆRDIERNE YDERST TIL HØJRE ER MIDDELVÆRDIER AF ALLE 8 OVNE.

3.1.6 Resultater af de forskellige fyringssituationer

Herunder et overblik og korte overvejelser ang. træmængde og luftmængde for de forskellige fyringssituationer 4-8. Se i øvrigt *Bilag 01* for måleprocedure og øvrige tanker gjort under udviklingen:

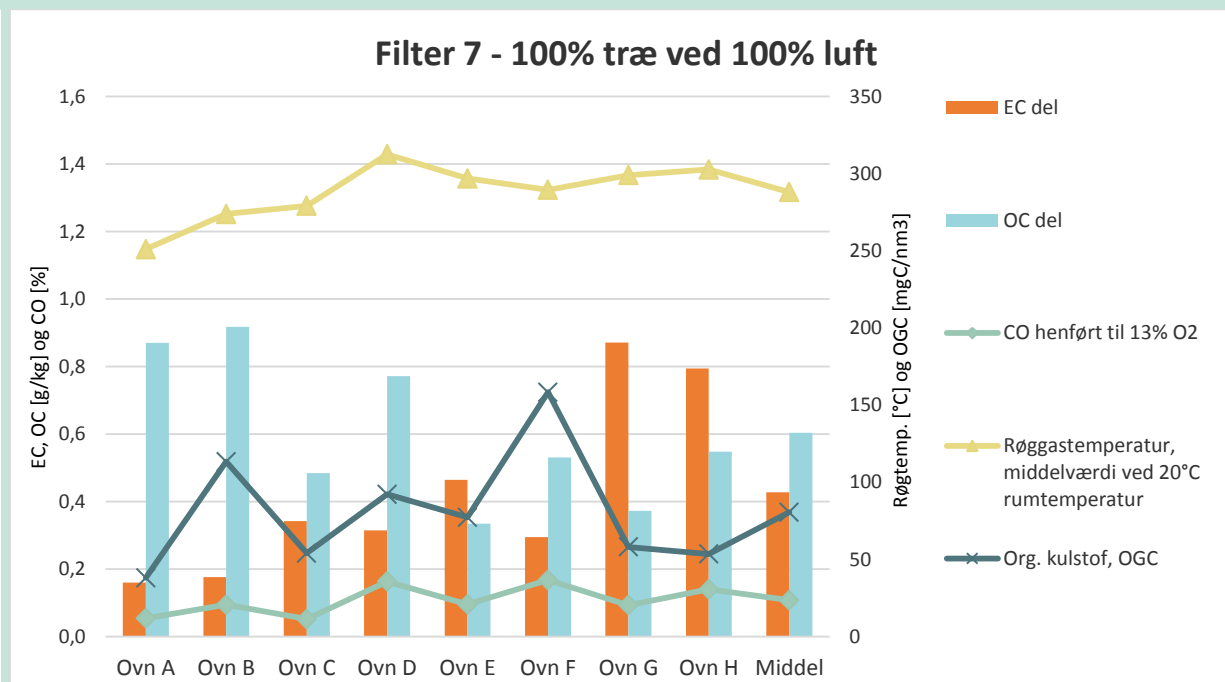
- Filter 4:** *Topdown optænding*
- Op til 100% træ (2-3stk) + 1 kg små pinde ovenpå og antændt i toppen (jf. Miljøstyrelsens anbefaling, MST WEB).
 - Der er tilladt at benytte enten 100 eller 50% luft eller at skrue ned løbende jf. fabrikantens anvisning.
- Filter 5:** *100% træ og 50% luft*
- Træmængden er beregnet ud fra ovnens optimale træmængde ud fra fabrikantens anbefaling. Forbrændingsluften er senest efter 3-5 minutter reduceret ned til 50% ud fra spjældvandrings fysiske tilgængelige vandring.
 - Denne fyringssituation er den, som nærmer sig mest en typeprøve - både mht. træmængde og lufttilførsel. Der kan dog være afvigelser fra ovn til ovn.
- Filter 6:** *150% træ og 50% luft*
- Den daglige brug hos den private forbruger begrænses typisk ikke til fabrikantens anbefalede træmængde og dermed ovnens optimale afbrændingsmængde. Derfor er det forsøgt at imitere en forbrugsoverload med kun 50% tilgængelig luft.
- Filter 7:** *100% træ og 100% luft*
- Der benyttes den anbefalede mængde træ med 100% forbrændingsluft tilsat.
 - Mere luft giver højere temperatur, og kombinationen mellem højere temperatur og mere luft vil typisk give lavere emissioner (kan dog også have modsat effekt afhængig af design og luftsystem). Konsekvenserne er typisk lavere virkningsgrad (energieffektivitet) og større ydelse (kW).
- Filter 8:** *150% træ og 100% luft*
- Samme overload af brændkammer imiteres og ydermere øges luftmængden tilsat bålet.

Måleproceduren er designet til at illustrere EC i forskellige brugssituationer, hvilket er med til at presse ovnenes design og tilgængelige luftsystemer. De øvrige emissioner, som er målt med under måleperioden er derfor ikke et udtryk for ovnenes emissionsudledning i optimale situationer. Størstedelen af de testede ovne lever op til svanemærkets skrappe emissionskrav. *Tabel 5* og *Figur 18* angiver de beregnede resultater på én af fyringssituationerne for de enkelte fyringer på de målte ovne. For de øvrige fyringssituationer henvises til *Bilag 04*. Det skal siges, at alle disse fyringer er lavet lige efter hinanden på samme dag, hvorfor der ikke er gentagende målinger af disse målinger. Det statistiske grundlag er derfor meget lille. Alle de foretagne målinger er medtaget i tabellerne. Efter hver tabel er der en grafisk afbildning af, hvordan EC- og OC-fraktionen fordeles sammen med de øvrige emissionsparametre CO (kulilte emissionen) og OGC (organic gaseous compounds, C_xH_y), samt røgtemperaturen.

TABEL 5

SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 7 (100% TRÆ 100% LUFT)

	Brændsel	Vægt pr. TC	Forbrug	Røggastemp	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambda	Just. Part. EC del	Just. Part. OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	2,00	1,15	1,42	251	8,4	0,05	38	2,4	0,16	0,87
Ovn B	2,00	1,36	1,49	274	9,2	0,09	113	2,2	0,18	0,92
Ovn C	2,00	1,28	2,03	279	7,8	0,05	54	2,6	0,34	0,48
Ovn D	3,00	1,80	1,89	313	8,4	0,16	92	2,4	0,31	0,77
Ovn E	2,00	1,80	1,86	297	7,2	0,10	77	2,8	0,46	0,33
Ovn F	2,00	1,36	1,82	289	9,3	0,17	158	2,2	0,29	0,53
Ovn G	2,00	1,84	2,21	299	8,2	0,09	58	2,5	0,87	0,37
Ovn H	2,00	1,12	1,56	303	8,3	0,14	53	2,4	0,79	0,55
Middel		1,46	1,78	288	8,3	0,11	81	2,4	0,43	0,60

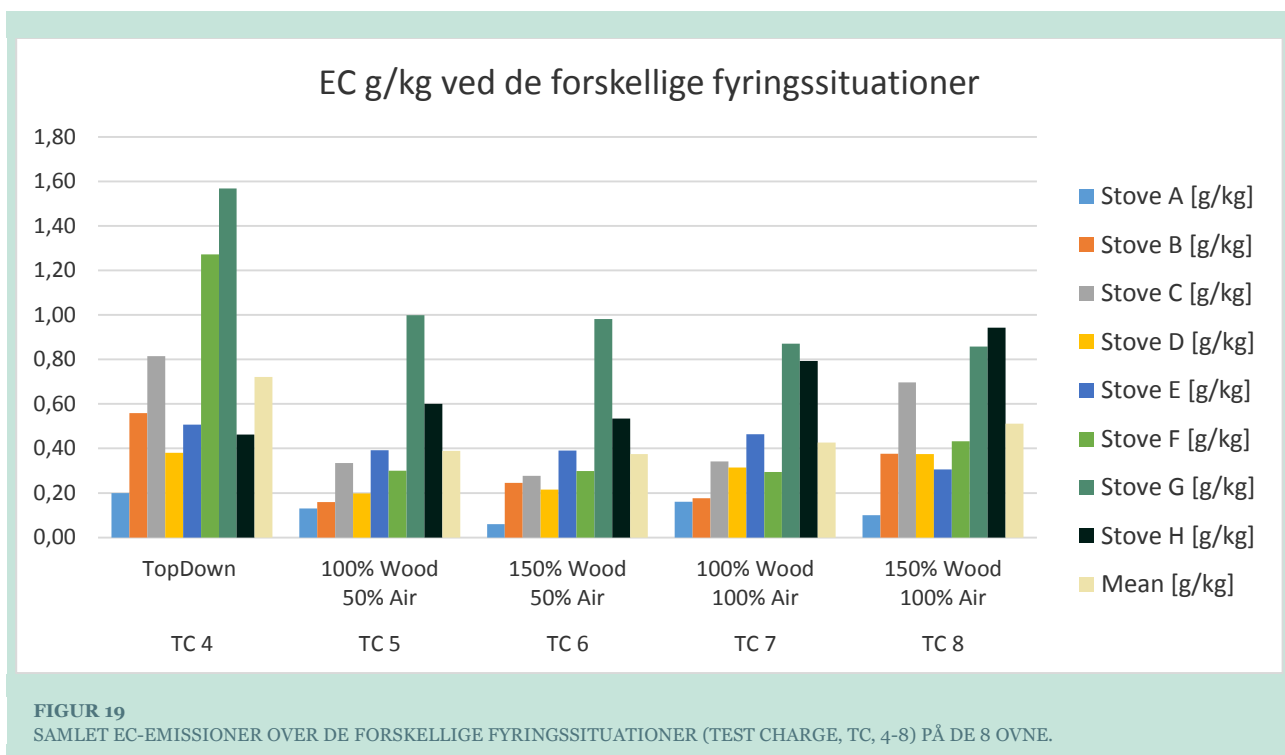


FIGUR 18

SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 7 (100% TRÆ 100% LUFT)

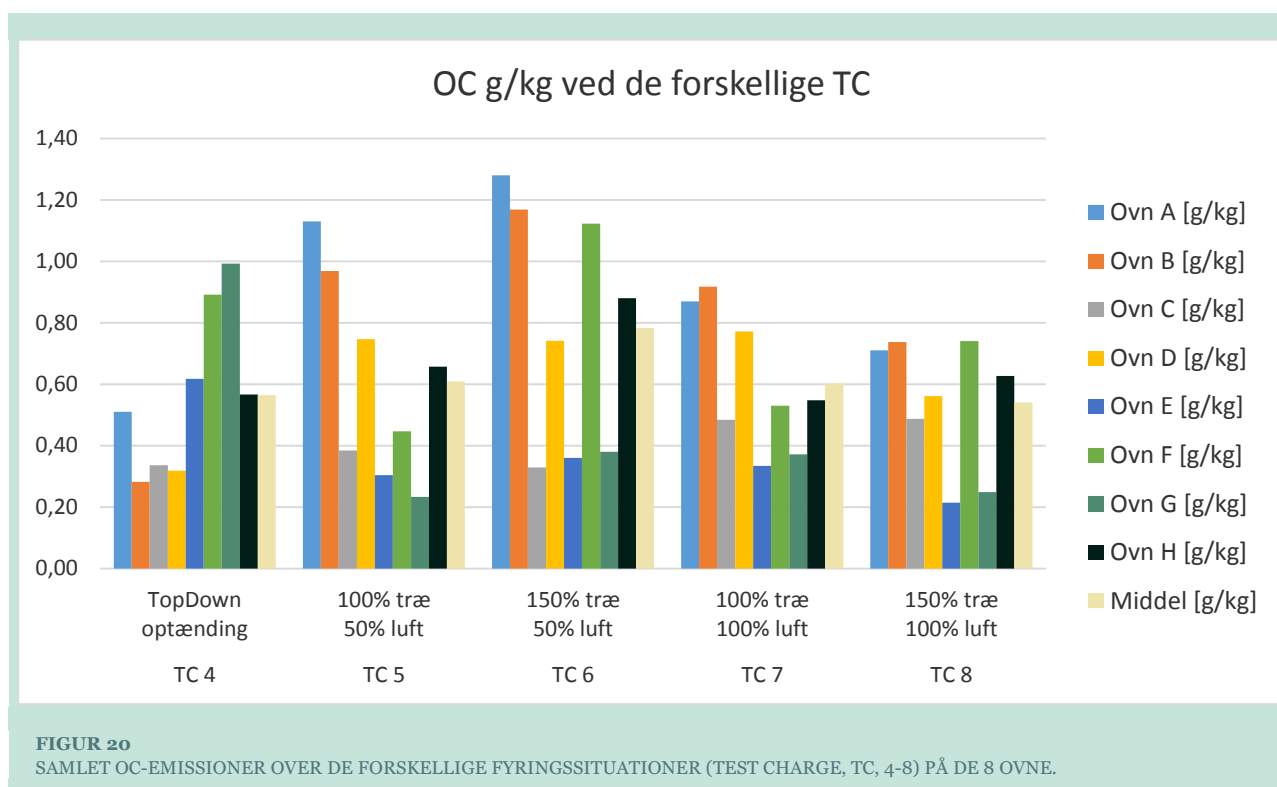
3.1.6.1 EC indhold i fyringer

Figur 19 viser de samlede EC-emissioner for de enkelte ovne i de forskellige fyringssituationer. Der er stor forskel på analyseresultaterne i de forskellige fyringssituationer ovnene imellem. Optændingen har samlet set den største EC udledning, også selvom der er benyttet den anbefalede optændingsmetode. Dette skyldes den store overflade, som afgasser uden at kunne blive brændt ordentligt af på grund af den manglende temperatur i brændkammeret. På de øvrige emissioner (Bilag 04) kan det ses, at ovnene A-D godt kan kontrollere emissionerne trods den manglende temperatur, mens de resterende 4 ovne E-H har forhøjet emissioner i forhold til de andre. Dog er der ikke altid en sammenhæng mellem få andre emissioner og lavt EC-emission. Hvis der ses bort fra optændingen (test charge, TC 4) og ses på de andre fyringer, da stiger EC-emissionen svagt i takt med mere luft og mere brændsel (TC 7 og 8), hvorimod de øvrige emissioner falder jo mere luft bålet bliver tilført. Hvis der igen ses bort fra optændingen, så giver filter 6, hvor brændkammeret er overloadet med træ og kun tilført 50% luft, forventeligt høje øvrige målte emissioner, mens gennemsnittet af EC-emissionerne er det laveste. Set i lyset af de øvrige målte emissioner, virker de øvrige emissioner og EC-emissionerne til at være modstridende i forhold til hinanden. Dog skal man huske, at resultaterne er meget individuelle. Disse mere dybdegående sammenligninger mellem EC og OC i forhold til de øvrige målte emissioner vil foregå senere i projektet under afsnit 4.4.



3.1.6.2 OC indhold i fyringer

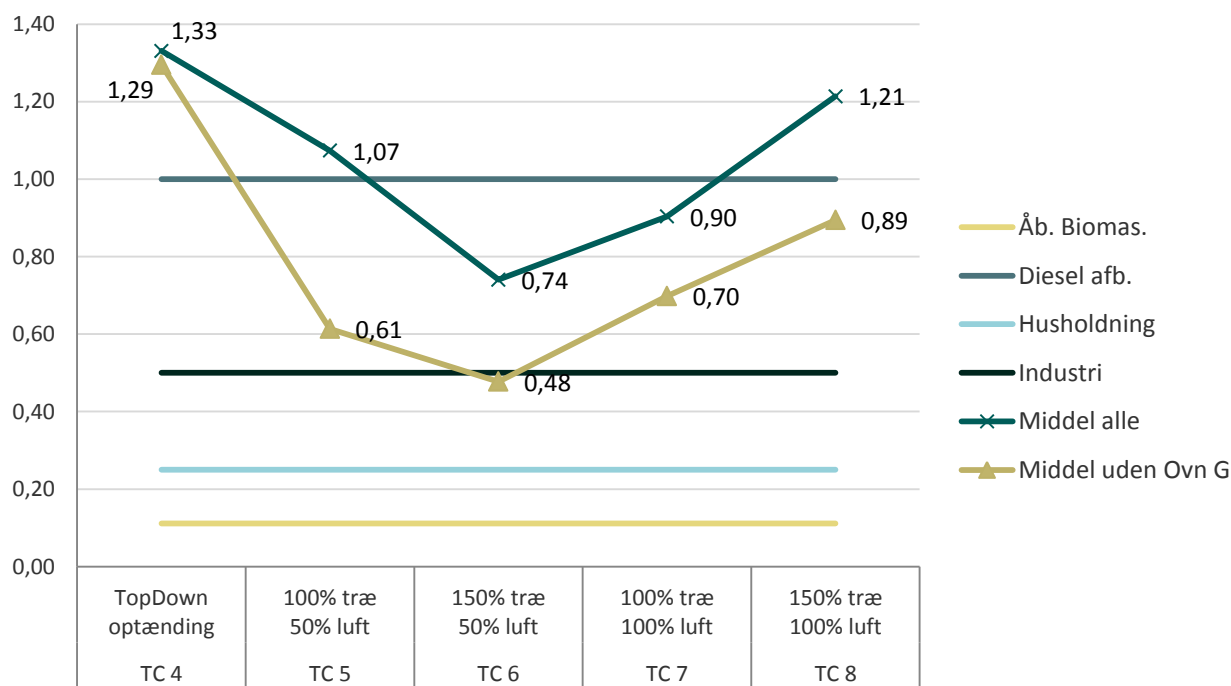
Figur 20 viser de samlede OC-emissioner for de enkelte ovne i de forskellige fyringssituationer. I og med, at der er tale om biomasseafbrænding er det forventeligt, at OC-emissionerne er større end EC-emissionerne. Dog er dette billede ikke entydigt for hver ovn. Enkelte ovne har som forventet et højt indhold af OC og et relativt lavt indhold af EC. Andre ovne viser det modsatte mønster.



3.1.6.3 EC/OC ratio i fyringer

Figur 21 viser den gennemsnitlige EC/OC ratio over de forskellige fyringssituationer sammenlignet med andre udledningsskilder. Her kan ses, at den laveste ratio og dermed højeste OC-emission i forhold til EC-emission er i fyringssituationen med overload af brændsel i forhold til en lille mængde tilført luft, mens den højeste ratio fås i optændingsfasen og i fyringssituationen med stor mængde brændsel og stor mængde luft. Næste afsnit kommer nærmere ind på mulige grunde til, at billedet ser ud som det gør. En af grundene kan formentlig skyldes lufttilførslen af primær luft til bålet, som på de pågældende ovne er en del af forbrændingsluften. Figuren har derfor fået tilføjet datapunkter, hvor ovn G er udtaget, som er en af de ovne med fast primærtillførsel som forbrændingsluft. Disse resultater afslører, at Ovn G trækker hele gennemsnittet af fyring 5-8 op, hvorfor EC/OC ratioen forskydes nedad og dermed en større overvægt af OC-emissioner frem for EC-emissioner.

Ovnenes samlede gennemsnit af EC/OC ratio ved de forskellige fyringssituationer sammenlignet med andre udledningsskilder



FIGUR 21

SAMLET GENNEMSNIET AF EC/OC RATIO I DE FORSKELLIGE FYRINGSSITUATIONER (TEST CHARGE, TC, 4-8) PÅ DE 8 OVNE SAMMENLIGNET MED ANDRE UDLEDNINGSKILDER. DET SES OGSÅ, AT OVN G ER MED TIL AT TRÆKKE HELE GENNEMSNIET OP PGA. DEN STORE EC-UDLEDNING.

3.1.7 Påvirkningsfaktorer ved brændefyring

For at kunne fortolke resultaterne fra målekampagnen er det vigtigt at forstå, at generelle resultater fra intermitterende brændeovnsfyring (træ, som brændes ned til gløder for derefter at gentage pålægning) indeholder mange parametre, hvorfor udfaldet på både EC, OC og for de øvrige emissionsparametre kan være vanskelige at determinere. For at opretholde en god forbrænding generelt kræves minimum disse tre ting: temperatur, turbulens/opblanding og opholdstid. Brændeovnsfyring er ikke kontinuerlig fyring, som fx fyring i en pilleovn eller et pillefyr, hvor brændsel løbende bliver tilført og forbrændingsluften løbende reguleres. Dermed opretholdes flammerne og sikrer en forholdsvis stabil temperatur og stabil emissionsudledning. Fyring fra brændeovne kræver noget større brændsel, hvilket giver en større frigivelse af emissioner i svingende temperaturer i brændkammeret. Derfor er der altid større emissionsudledning i opstartsfasen og i nedglødningsfase frem for den mere stabile fase i midten af forbrændingsforløbet. Tabel 6 og Tabel 7 giver et overblik over, hvilke forskellige parametre, der kan have en stor eller mindre rolle i resultaterne.

TABEL 6
MULIGE GRUNDE MED LILLE PÅVIRKNING I FORHOLD TIL DETTE PROJEKT.

Hvilke parametre, der kan spille ind	Hvorfor er det interessant	Influencer på:
Brændslets type og fugtindhold	Kan have stor betydning, men i dette projekt er der ens brændselstype i samme fugtområde (16%±1,9).	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner.
Prøvningsperson	Er typisk den største faktor for brændeovnsfyring, men i dette projekt er der brugt erfarne personer, som kender ovnenes egenskaber og lufttilførsel.	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner.
Håndtering af filtre	Ens håndtering og forbehandling af alle filtre, men løbende håndtering kan give en lille forskel.	EC-OC analysen.
Acetone skyl	Filterholder skyllet med acetone (C ₃ H ₆ O) før hver prøvningsdag.	EC analysen. Kan give kunstig højt EC-fraktion, da kulstof indgår i skylning.
Skorsten og isokinetisk udsugning af partikler på filtre igennem fortyndingstunnel	For brugbare resultater kræves ens trækforhold og løbende kontrol med udsugningshastigheden for alle 64 prøver.	EC-OC analysen. Betydning for størrelsen/mængden af partikler opsamlet på filtrene.

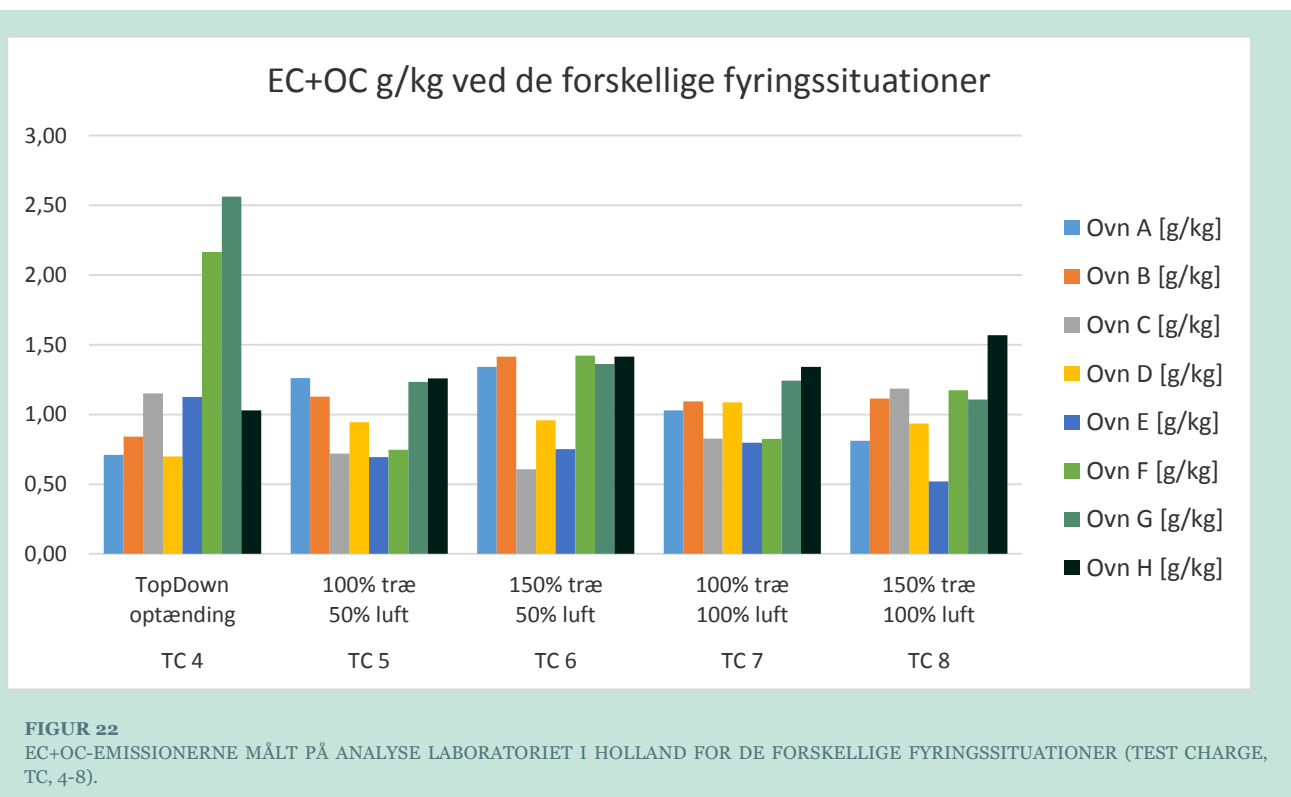
TABEL 7
MULIGE GRUNDE MED STOR PÅVIRKNING I FORHOLD TIL DETTE PROJEKT

Hvilke parametre, der kan spille ind	Hvorfor er det interessant	Influencer på:
Placering af træ	Få cm for tæt eller for lang afstand fra fx pilothuller i bagvæggen eller fra brændestykkerne imellem kan give store udslag i forbrændingsforløbet.	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner
Brændselsmængde og brændselsstørrelse	Flere stykker træ eller længere stykker træ giver større overflade, og der skal derfor mere luft til for at kunne håndtere afgasningen.	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner
Luftsystemer	Hele forbrændingen afhænger af, hvor bålet får tilført sin luft fra, hvad enten der er tale om primær-, sekundær-, tertiær-, eller pilotlufttilførsel. Alle 4 lufttilførsler har hver sin funktion for forbrændingen.	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner
Luftkanaler	Modstande i kanaler kan begrænse luftmængde og flow til forbrændingen	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner
Luftløbe til forbrændingsluft (rudeskyl)	Mellemrum og tilgængelig luftmængde imellem luftkanal og rude (typisk) afgør hastigheden og retning af forbrændingsluften	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner
Brændkammeropbygning	Alle nedenstående kan spille ind på forbrændingen: - grund-facon, - volumenforhold, - isolering af brændkammer, - overfladestruktur, - røgvenderplader, herunder materiale, afstande imellem og røggasvandring.	Røgtemperatur, EC-OC analysen og øvrige emissioner
Filteranalyse	I projektet indgår kun analyse af primærfiltre af økonomiske grunde.	EC-OC analysen. Kan give skævt billede af EC-OC forholdet, da OC også har tendens til at sætte sig på backup filtre. Det giver i dette projekt et for lavt OC indhold.

Tabeller giver et indblik i, at det kan være vanskelig at determinere de egentlige grunde til, at der er så stor forskel mellem de enkelte ovnes resultater – både i forhold til de forskellige fyringssituationer, men også sammenlignet med hinanden. Derudover skal en meget vigtig pointe nævnes, nemlig at det statistiske fyringsgrundlag pr. ovn er meget lille. De følgende resultater dækker over fyringssituationer fra ovnene, som kun afprøvet én gang. Derfor er det logisk, at usikkerhederne er meget store. Et almindeligt fyringsgrundlag pr. ovn (jf. almindelig typeprøvning) dækker som regel over tre test charges med samme træmængde og luftindstilling.

3.1.8 Isolerede parametre med betydning for BC udledningen

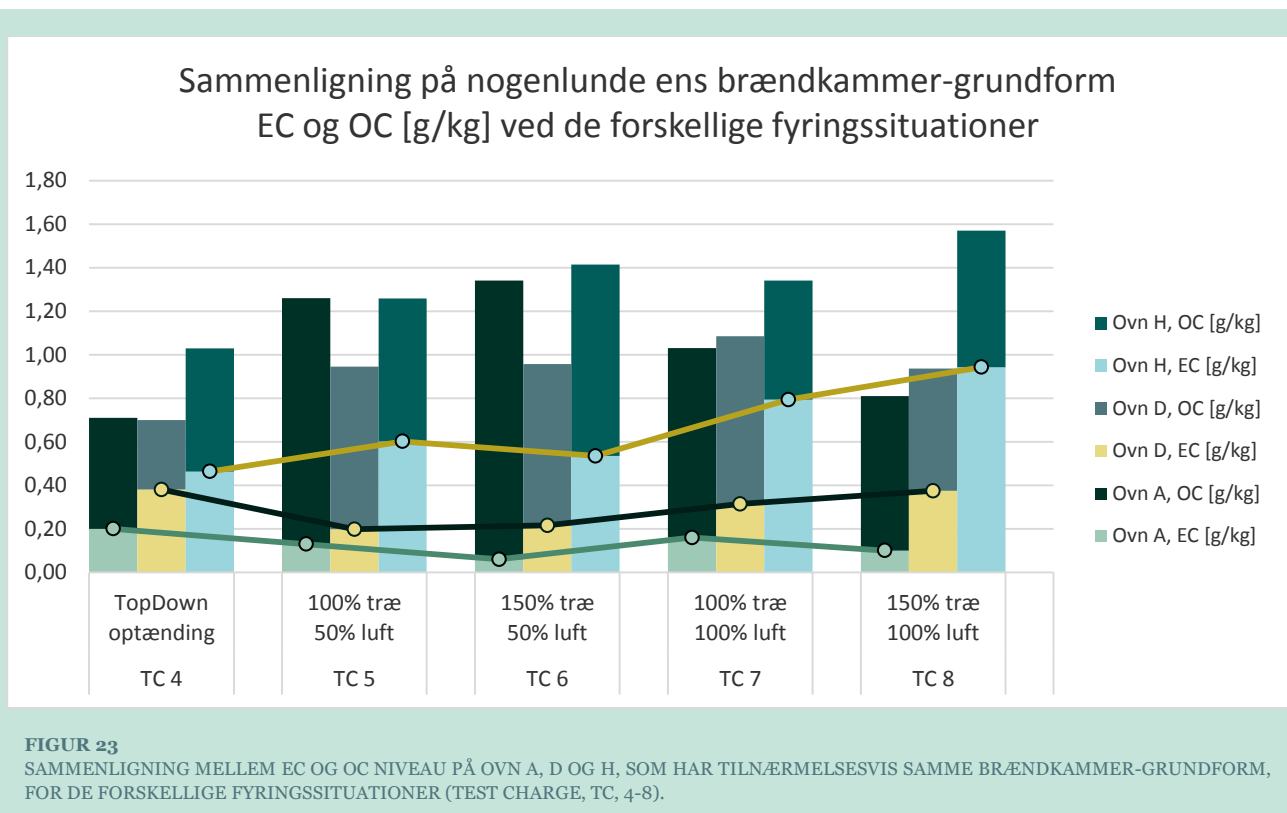
For at finde ud af grunden til EC og OC emissionsudledningen på de enkelte ovne, kan der ud fra ovenstående overblik drages mange sammenligninger på kryds og tværs. Ud fra de forrige afbildninger, da kan det godt være vanskeligt at se, om selve udformningen af brændkammer kan have indvirkning på resultaterne. Udformningen generelt set har meget at sige, men ud fra de mange parametre der spiller ind på samme tid, da kan det være vanskelig at drage direkte konklusioner. *Figur 22* viser den totale målte EC+OC-emission ud fra analysen i Holland. Det er disse tal, som man skal huske ikke giver et korrekt billede på den total PM-udledning, som tidligere beskrevet grundet analysens måleprincip. Derimod viser figuren, at ovnene op imod hinanden set i lyset af analysen, udleder tilnærmelsesvis samme niveau af EC+OC. Der er blot stor forskel på, om det der er en overvægt af EC eller OC for de enkelte ovne.



Projektet omhandler primært udledningen af BC, hvorfor vi primært vil se på EC delen i de næste sammenligninger. Der er i det efterfølgende udvalgt enkelte punkter, som kan be- eller afkræfte virkningen på udledningen EC-emissionerne.

3.1.8.1 Brændkammergeometri

For at starte et sted vil vi undersøge, om brændkammer-grundformen har samme tendens for udfaldet af EC- og OC-emissionerne. Generelt kan siges, at brændkammergeometrien har stor betydning for både opholdstid og turbulensen, der skal være tilstede for god forbrænding. Derfor er sammenligning på Figur 23 gjort imellem 3 ovne, som har tilnærmelsesvis ens brændkammer-grundform og størrelse. De er alle svagt rektangulære med en buet front eller en buet bagvæg. Kolonnerne viser de tre ovne sammenlignet, hvor den nederste del er EC-fraktionen og ovenpå er OC-fraktionen. Linjerne imellem fremhæver EC-fraktionerne for de enkelte ovne. Det ses umiddelbart, at ovnen A og D ligger i nogenlunde samme niveau med hinanden, hvor ovn A generelt har et lidt højere OC niveau og et lidt lavere EC niveau end ovn D. Ovn H har derimod ved alle fyringssituationer et noget højere EC niveau end de to andre ovne og et OC niveau imellem de to andre.

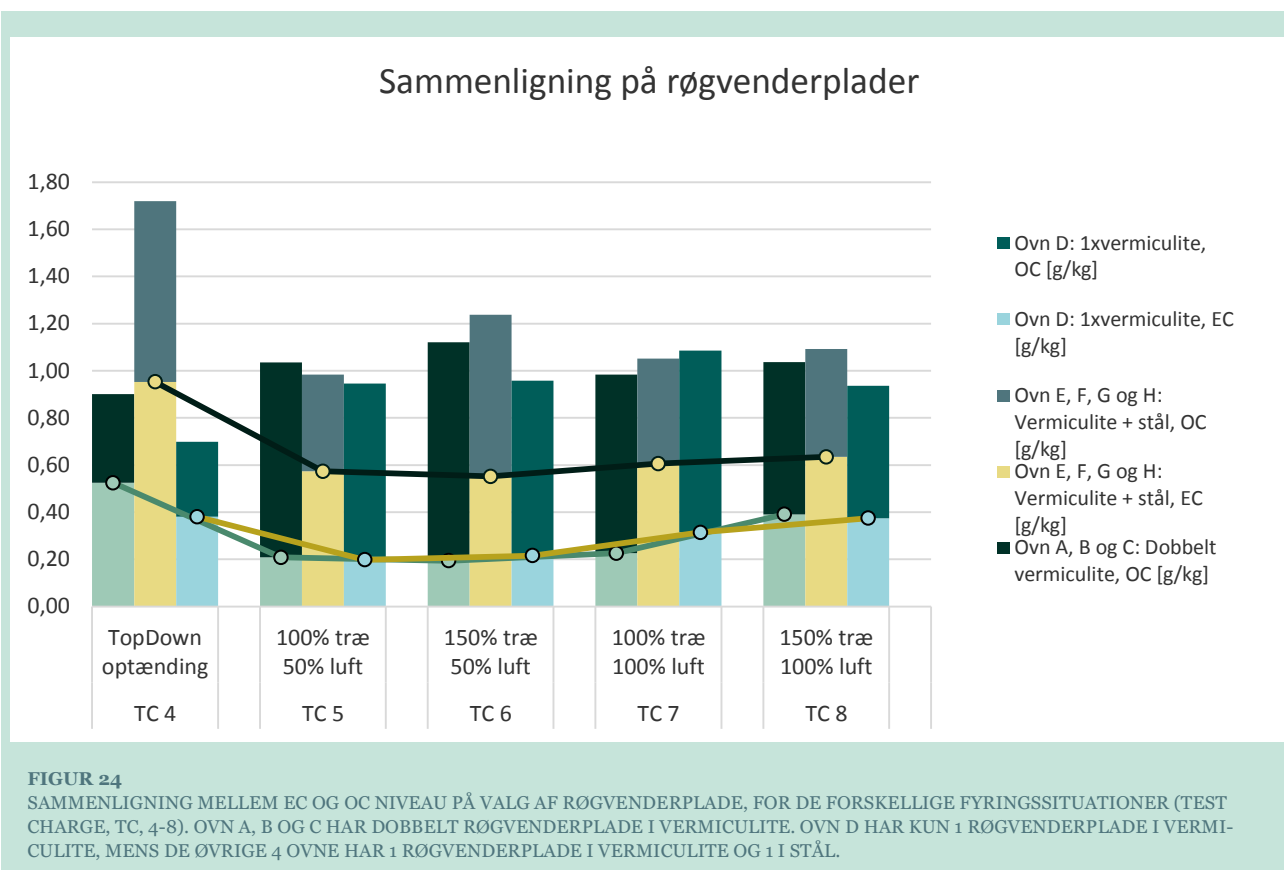


Da der ikke umiddelbart er sammenfald mellem forholdsvis *ens* brændkammer-grundform, da vil det ikke være validt at sammenligne *forskellige* brændkammer-grundform, som projektet ellers havde store forventninger til, da forskellen i resultaterne ligeså vel kan skyldes andre parametre.

3.1.8.2 Røglederplade

En sammenligning mellem *typen* af og *antal* af røglederplader kan derimod godt have sammenfald. En røglederplade er betegnet som toppen af brændkammeret, som røggassen skal passere, inden den ledes videre ud i skorstenen. Jo længere vandring i ovnen jo større opholdstid, og jo flere forhindringer jo mere turbulens. Det er dog ikke altid en fordel at lave en stor vandring eller mange forhindringer, da forhindringer giver modstand og dermed besværliggør røgen i at komme ud hos den endelige forbruger i form af dårligt skorstenstræk. Derimod er den lange vandring med til at afkøle røggassen, så mere varme fordeles omkring ovnen (og stuen den står i), og dermed ryger varmen ikke direkte ud igennem skorstenen. Det gør, at træets energi udnyttes bedre for en bedre

virkningsgrad og dermed bedre fyringsøkonomi. Røggasvandringen er derfor meget essentielt for opbygningen af en ovn, da ovnen på den ene side skal give god brugervenlighed (mindre modstand giver færre røggener ved åbning af lågen), men også udnytte træets energi og leve op til høje krav til virkningsgrad (nationale krav og krav ved mærkningsordninger). De høje krav til virkningsgrader kan derfor godt komme på tværs af brugervenlighed, hvilket kan gå ud over slutbrugerens opfattelse af den enkelte ovn. Ovn A, B og C har alle to røgvenderplader udført i isoleringsmaterialet vermiculite, som røgen skal passere, inden røgen ledes ud i skorstenen. Ovn D har udelukkende én skrå røglederplade, som leder op til en vandret røgvenderplade, som ligger øverst, hvorefter røgen ledes ud i skorsten. Der er dog ikke en ekstra ovenpå, som på de andre ovne, hvorfor denne kun betegnes som én røgvenderplade. Ovnene E, F, G, og H har alle en skrå røgvenderplade i vermiculite, som går ud omkring glasset, hvorefter der er yderligere én røgvenderplade i stål, som røgen skal forbi, inden den ledes ud i skorstenen. Umiddelbart viser *Figur 24*, at en ekstra røgvenderplade i stål giver lavere OC-emissioner, hvorimod der er ved alle fyringssituationerne er højere EC-udledning end ved dobbelt og enkelt lag vermiculite. Der er stor sammenfald mellem enkelt eller dobbelt lag vermiculite både på EC- og OC-emissionerne, som begge ligger meget tæt på hinanden.

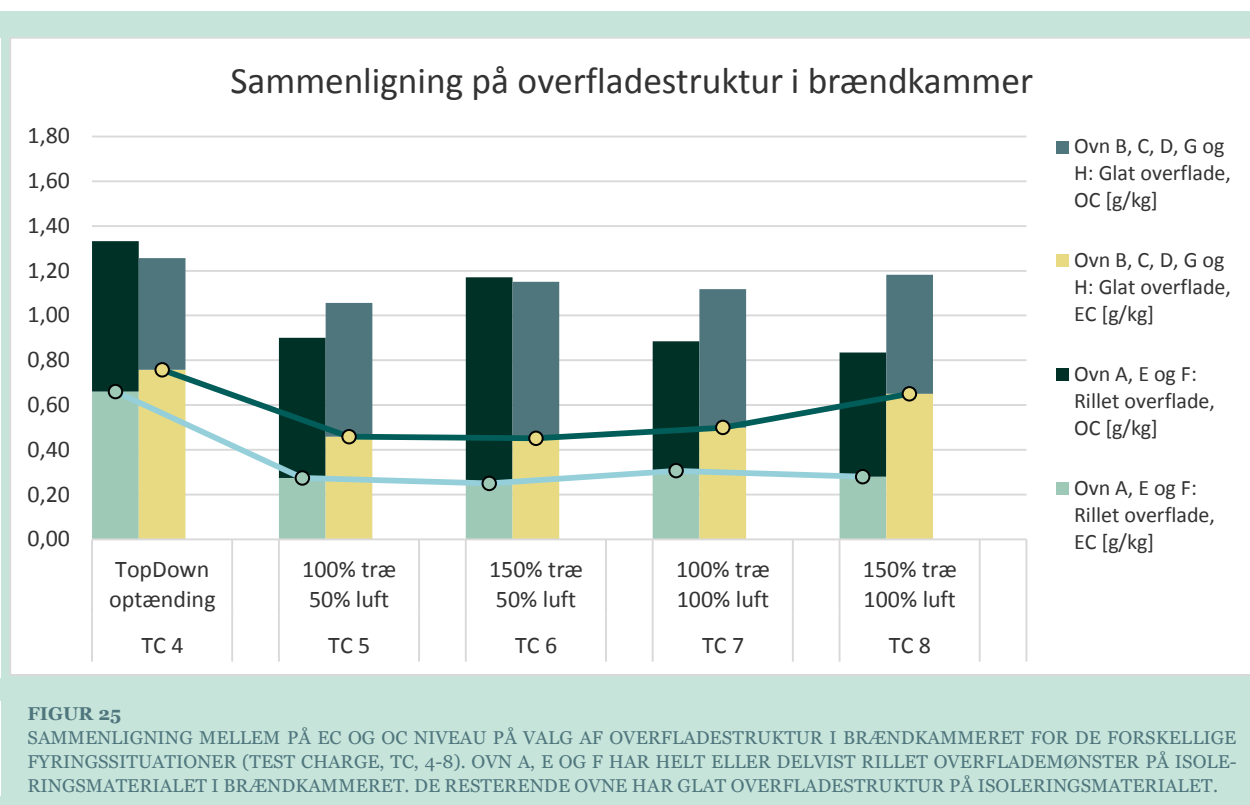


Hvis der derfor ses bort fra alle de andre parametre, da har dobbelt lag vermiculite samt enkelt lag vermiculite, som sidder vandret øverst, større tendens til at udlede mindre EC-emissioner end en ekstra røgvenderplade i stål, inden røgen ledes til skorstenen.

3.1.8.3 Overfladestruktur

De fleste moderne brændeovne har alle et brændkammer, som er beklædt med et isoleringsmateriale, som gør at varmen koncentrerer omkring bålet uden at blive kølet for meget af omgivelserne. Varmen i bålet er essentiel for at kunne afbrænde gasserne, som træet afgiver. Alle ovne i målekam-

pagnen har haft sider, bagplade og minimum 1 røgvenderplade i isoleringsmaterialet vermiculite. Enkelte ovne har også haft hele bunden eller dele af bunden i vermiculite (bortset fra bundristen). Resten har udelukkende haft støbejernsbund. Hvis der ses bort fra bunden og der kigges på bagside, sider og røgvenderplade, da har nogle producenter valgt at lave en struktur i overfladen. Andre har glat overfladestruktur, som materialet er som standard. Skamol A/S producerer dette produkt, og det er muligt at lave en hvilken som helst overfladestruktur, som kunden ønsker. Materialet bliver trykket sammen, hvorfor det er muligt ved hjælp af den rette støbeform at lave de mønstre eller former, som der ønskes til den enkelte ovn. Overfladestrukturen kan være medvirkende til øget lokal turbulens, når røggassen passerer overfladen. På *Figur 25* er det undersøgt, om overfladestrukturen har noget at sige i forhold til EC- og OC-udledningen. Ovnene A, E og F har helt eller delvis rillet overflade i et individuelt mønster. De resterende ovne har glat overflademønster på sidevæg, bagvæg og på røgvenderplade.

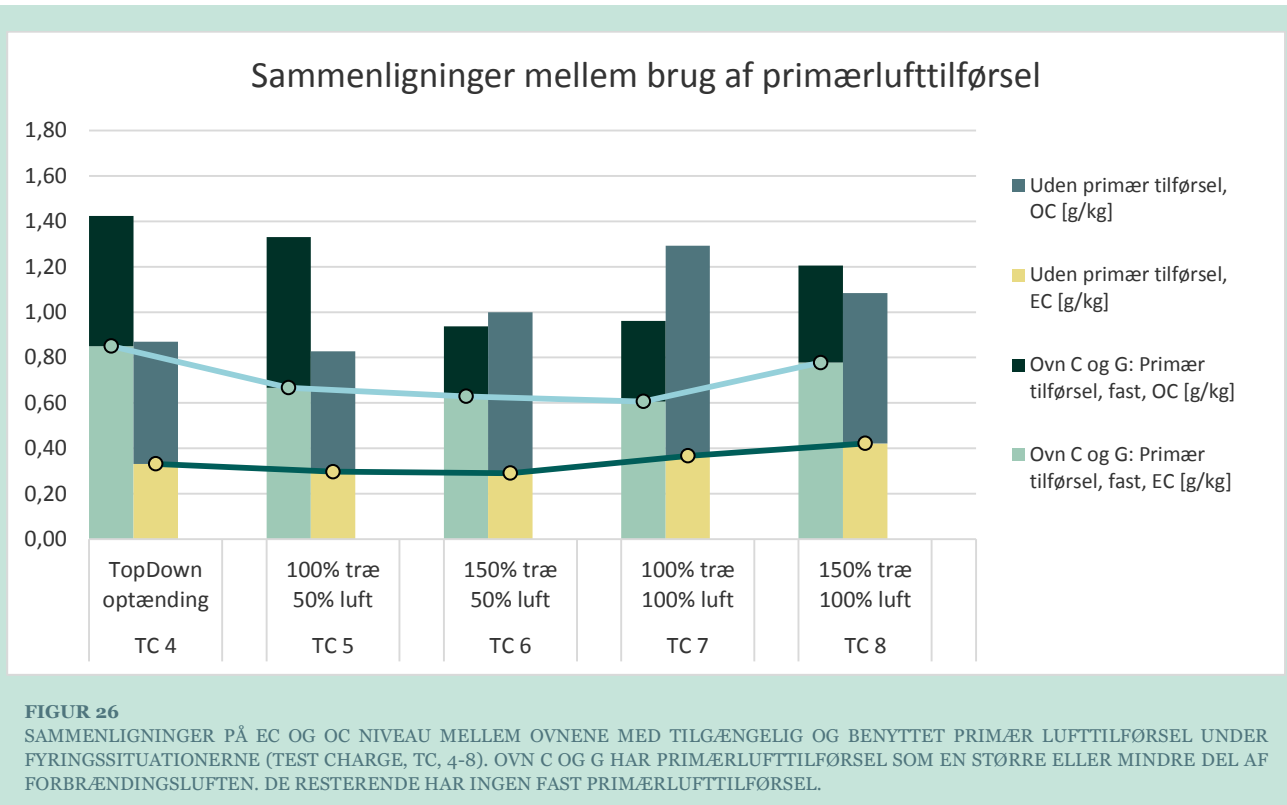


Hvis der ses bort fra TC 4 (optænding) og TC 6 (overload af brændkammer med lille luftmængde), da bliver OC-emissionerne tilnærmelsesvis ens, hvad enten der er tale om rillet eller glat overfladestruktur. Ses der derimod på EC-emissionerne, da er der ved alle fyringssituationerne en lavere EC-emission ved ovnene med rillet overfladestruktur. Isoleret set kan den lokale turbulens omkring overflademønstret i brændkammeret derfor ligesom typen af røgvenderplader godt have tendens til at udlede mindre EC-emissioner end en glat overfladestruktur.

3.1.8.4 Sammenligning på primærlufttilførslen

Den største faktor for udledningen af højt EC-emissionsniveau kan skyldes lufttilførslen snarere end brændkammerudformningen. Alle ovnene er forsynet med sekundærluft (rudeskyl) og tertiærluft (konstant eller regulerbar tilført luft fra bagvæggen over bålet). Enkelte ovne har primærluft som en del af den forbrændingsluft, som bålet bliver tilført. For at undersøge forskellen mellem

benyttet primærluft, viser *Figur 26* de forskellige fyringssituationer og de ovne med og uden primærlufttilførsel. Primærluften benyttes hos mange producenter kun i opstartsfasen fra kold ovn eller ved merfyringen. Ovnene A, D og H har ingen tilgængelig primær lufttilførselsmuligheder. Ovnene C og G har primærluft som en fast del af forbrændingsluften, hvor ovn C har haft en mindre primærluft tilførsel end ovn G i fyringssituationerne. Ovnene B, E og F har primærluft som en opstartsanordning.

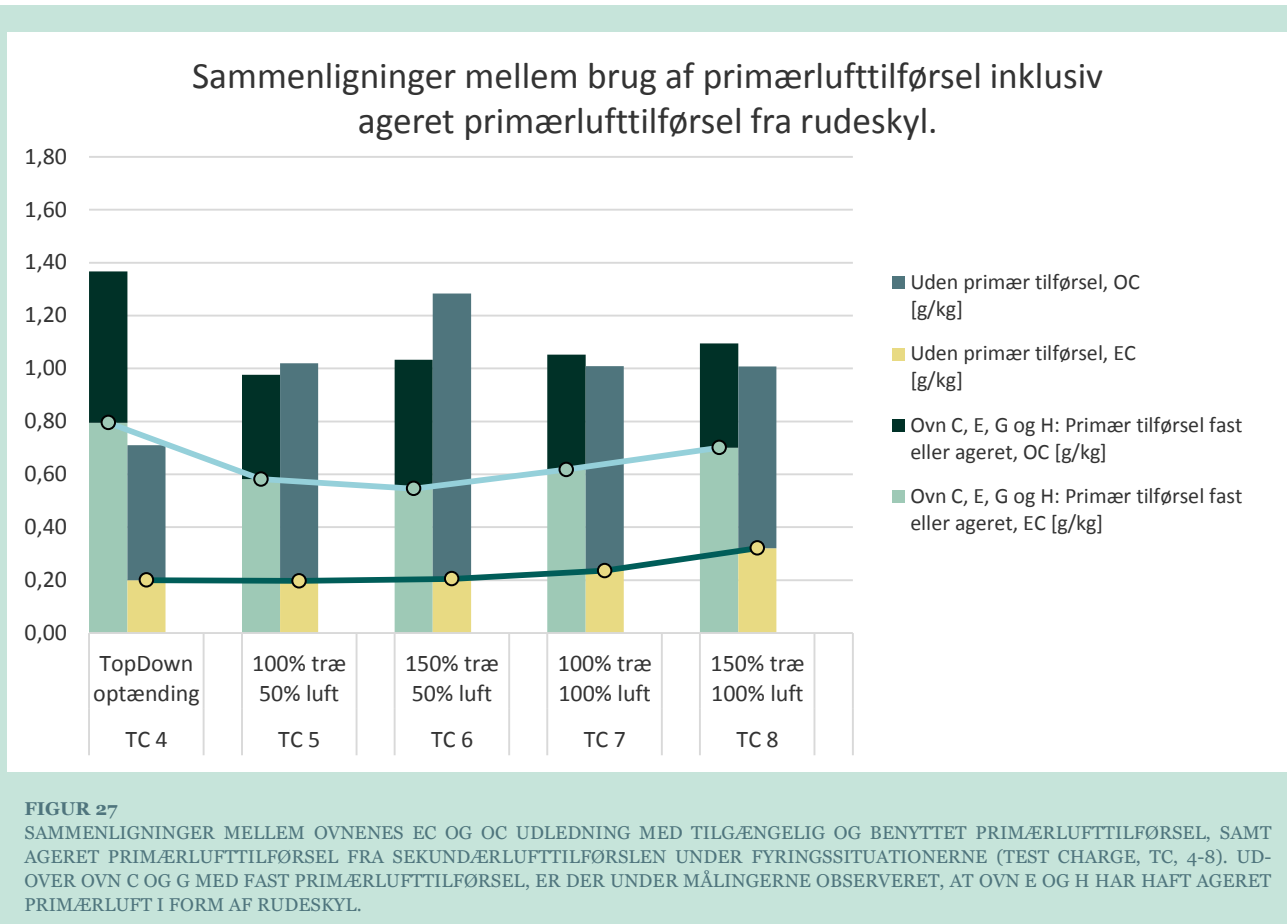


Sammenligningen viser en betydelig forskel mellem ovne med og uden primærlufttilsætning. Forskellen for EC udledningen for de fem fyringssituationer er ca en faktor to. For OC udledningen viser sammenligningen for TC 5, 6 og 7 det omvendte billede. Her ser primærlufttilsætningen ud til at gavne forbrændingen, da ovnene uden primærlufttilsætning har højere OC ledningen end ovnene med primærlufttilsætning.

3.1.8.5 Rudeskyl som primærluft

Luftlæbens størrelse kombineret med mængden af sekundærlufttilførsel udgør den kontrollerbare forbrændingsluft til bålet. Hvis der ses bort fra optændingen, hvor alle med brug af primærluft har højere EC emissioner end ovne uden primærluft, da skiller ovnene C, E, G og H sig ud på EC/OC ratioen, da mængden af EC er noget højere end mængden af OC. Ovn C og G's bidrag kan skyldes den faste primærluft, hvorimod ovn E og H ikke har primærluft som en fast del af forbrændingsluften. Derimod kan luftlæbens udformning og hastigheden på sekundærluften sandsynligvis have været så høj, at den er gået ned og ageret primærlufttilførsel foran bålet. Hvis dette er tilfældet, da er effekten afbilledet på *Figur 27*, hvis bålet bliver tilført primærluft enten som en fast del igennem bundristen eller i form af sekundærluft, som har så stor hastighed, at den agerer som primærlufttilførsel.

Både Figur 26 og Figur 27 viser begge en stigning af EC-udledningen med 100% lufttilførsel kontra 50% lufttilførsel, hvilket godt kan tyde på en tendens af øget EC-emission ved mere lufttilførsel. Det stemmer både overens med den første fyring i optændingen, hvor størstedelen af ovnen har større lufttilførsel end de 50% forbrændingsluft, men også de to sidste fyringssituationer med 100% lufttilførsel. Derudover ses det, at niveauet af EC-udledningen for ovnene uden primærlufttilførsel eller antaget ageret primærlufttilførsel fra sekundærtilførslen er faldet yderligere. Omvendt stiger OC-udledningen, så ovnene A, B, D og F har en noget lavere EC/OC ratio end ovnene med enten fast eller antaget ageret primærlufttilførsel.



Hvis det antages, at ovn E og ovn H's sekundærlufttilførsel bliver tilført brændkammeret med så stor hastighed, at luft glider hele vejen ned langs ruden og skydes ind under bålet og agerer som primærlufttilførsel, da kan lufttilførslen have meget større betydning for EC- og OC-emissionsudledningen end forventet. Selvom EC+OC niveauet tilsammen giver nogenlunde tilsvarende niveau (For primærtilførsel gennemsnitligt 1,10 g/kg for de fem fyringssituation, mens det tilsvarende giver 1,01 g/kg for ovnene uden primærtilførsel), så er der en faktor 4,5 til forskel mellem EC og OC fordelingen. Altså kan analysen tyde på, at placeringen af lufttilførslen til bålet har mere betydning for EC-emissionerne end fx forbrændingshastighed, antal stykker træ eller brændkammer-grundformen.

En forsigtig konklusion er dermed, at primærlufttilførslen til bålet har den største betydning for en forhøjet EC-udledning – hvad enten den er tilført som bevidst designet forbrændingsluft op igennem gløderne, eller det sker ved stor hastighed fra rudeskyllet.

3.1.9 Sammenfatning af målekampagnens resultater

Billederne taget af hvert filter indikerer, at farven kan give et antydning af, om filteret indeholder en større eller mindre mængde opsamlet EC-fraktion og dermed BC. Dog er farven kun en antydning omkring den målte EC-fraktion, og dermed ikke OC-fraktionens størrelse. Ligeledes kan man ikke altid ud fra filterets farve gå ud fra, at den målte EC-fraktion er lig med den beregnede udledte EC-emission, da den beregnede emissionsudledning blandt andet afhænger af brændselsmængde og måleperiode.

Jf. tidligere udviklet måleprocedure (se *Bilag 01*) er det bestemt, hvilke delperioder en fyringscyklus kan opdeles i. Opstartsfasen, pyrolysefasen og udglødningsfasen. I mangel af online måleinstrumenter til dette projekt har den faseopdelte fyring klarlagt, hvornår i forbrændingscyklussen EC- og OC-emissionsudledningen finder sted. Betragtes den relative mængde EC pr. minut, så sker den største udledning i opstartsfasen, hvilket hænger godt sammen med teorien, hvor der er størst risiko for ufuldstændig forbrænding. Næsthøjeste periode for EC-udledningen er den stabile fase med konstant flammeudvikling. For OC-emissionsudledning sker de største udledninger i opstartsfasen og i udglødningsfasen, som også er kendetegnende for de totale hydrocarbon-forbindelser (omregnet til OGC).

Dataene opsamlet og målt i målekampagnen giver et indblik i de enkelte fyringssituationers betydning for EC-, OC-emissionerne, men også de øvrige emissioner målt, så som CO, OGC, den målte røggastemperatur m.fl. Sammenligningerne mellem EC- og OC-emissionerne og de øvrige målte emissioner vil blive belyst i *afsnit 4*, men umiddelbare sammenligninger ud fra analysen viser, at der ikke nødvendigvis er sammenfald mellem lave målte emissioner og lav EC-emission. Derimod falder de øvrige emissioner med mere luft tilført bålet, hvilket er modsat EC-emissionen, som stiger svagt jo mere luft bålet får tilført. Dette kan muligvis tilskrives den øgede hastighed fra rudeskyllet og dets påvirkning på bålet og ændret flow i ovnene.

Der er mange parametre, som spiller ind på en god forbrænding i en brændeovn. Intermitterende fyring er svær at genskabe samt svær at fortolke, da et utal af parametre kan spille ind på de endelige resultater. Af den grund er denne analyse baseret på et spinkelt grundlag, da hver fyringssituation kun er udført én gang pr. ovn, hvilket gør usikkerheden stor for, om fyringerne er repræsentative nok for den enkelte ovn. Grundlaget for valg af ovnene til målekampagnen var, at der skulle være et bredt udvalg af brændkammergrundforme og lufttilførselsmuligheder. Samtidig skulle ovnene være moderne ovne med tertiærlufttilførsel, og uden sideglas monteret. Det har vist sig, at primærlufttilførslen sandsynligvis har den største betydning for udledningen af EC-emissioner sammenlignet med de andre undersøgte parametre (isoleret set).

Ydermere har det vist sig, at sekundærluften antageligt kan agere som primærluft grundet stor hastighed og lille højde på brændkammeret. Forventningen var, at udformningen af brændkammeret havde mindst lige så meget at sige. Resultaterne fra de otte ovne har dog varieret så meget, at der ikke er sammenfald mellem brændkammer-grundformen, hvorfor det ikke har været relevant at undersøge for de forskellige grundforme. Derimod har det vist sig, at både rillet overfladestruktur i brændkammeret, samt valg af dobbelt røglederplade i vermiculite kan give lavere EC-emissioner kontra røglederplader bestående af en kombination af vermiculite og stål samt glat overfladestruktur. Men om disse resultater i virkeligheden skyldes lufttilsætningen eller en hel anden parameter er svær at vide sig sikker på.

3.2 Sammenligning mellem ICCI målinger og LowCarbon Brændkammer målinger

I det følgende drages der sammenligninger mellem nærværende målinger af EC og OC i LowCarbon Brændkammer (LCB) projektet og tidligere målinger for International Cryosphere Climate Initiative (ICCI).

Målingerne for ICCI indgår som led i en række af eksperimentelle målinger af EC og OC udført af SINTEF fra Norge og University of Eastern Finland (UEF) og senest også af Sveriges Tekniske Forskningsinstitut (SP) og Teknologisk Institut (TI). ICCI er optaget af at begrænse klimarelateret afsmeltning af polare og glacielle områder, og et af fokusområderne er indflydelse af emissioner af BC fra *domestic wood burning*, i vores del af verden primært brændeovne, men andre steder primært mere eller mindre primitive *cook stoves*, altså madlavning over ild i åbne bål eller primitive brændekomfurer. ICCI hævder at emissioner fra de skandinaviske brændeovne, selvom de i absolutte tal er forsvindende i forhold til emissioner fra diverse ukontrollerede afbrændinger andre steder på den Nordlige halvkugle (jf. *Figur 10* og *Figur 11*), er af særlig betydning for afsmeltningen i Arktis. Dette tilskrives de særlige meteorologiske forhold i vinterhalvåret "the Arctic Dome" (Quinn et al, 2011) der, som det udtrykkes, åbner en transportvej til Arktis for partikler fra Nordeuropæiske brændeovne – dette også nævnt under *afsnit 2.1.6*.

ICCI sigter ultimativt imod at få vedtaget lovfæstede grænseværdier for emissioner af BC, men det kortsigtede mål er at få grænseværdier inkluderet i kriterierne for brændeovne i det Nordiske miljømærke (Svanemærket). Svanen kræver dokumentation for partikeludledning målt efter Norsk metode NS3058. Det har været naturligt for ICCI at vælge samme metode, for ikke yderligere at komplicere eller fordyre målingerne, hvilket kunne virke som en barriere for fabrikanters søgning mod svanemærket og dermed en frivillig grænseværdi for udledning af BC. Indeværende målinger under LCB projektet er til forskel fra ICCI målingerne udført efter Europæisk metode, dvs. i henhold til typeprøvningsstandarden EN13240 til CE-mærke. For at få aftegnet et bredere spektrum af potentiale for emissioner af BC, her udtrykt ved bestanddelene EC og OC, har vi valgt at udvide prøvningsomfanget.

Der er tilføjet ekstra målinger med anvendelse af dobbelt brændemængde og med spjældet helt åbent. Princippet er ellers, at det er fabrikanten alene der definerer brændemængden og spjældindstillingen til ydelsesprøven efter EN13240 (se evt. yderligere beskrivelse i afsnittet 'Valg af målemetode'). På grund af forskellene mellem EN13240 og NS3058 beskrevet tidligere, må man generelt forvente større andel af OC under målingerne til ICCI og generelt større forekomst af EC for de ovne der, uanset målemetode, enten vedvarende eller i perioder ud over de første par minutter gør brug af primær lufttilførsel. Det ene er ikke mere rigtigt end det andet, men eventuelle forskelle i niveauer af og indbyrdes forhold mellem EC og OC er blot udtryk for de forskellige metoders egenskaber, hvortil kommer bidrag fra de forskellige ovnes brændkammer designs og luftsystemer. Det er projektets mål at forsøge at isolere bidragene fra ovnenes brændkammer designs og luftsystemer, for derved om muligt at kunne udstikke retningslinjer for brændkammer designs og luftsystemer, der særligt betinger lave udledninger af EC og OC.

3.2.1 Sammenligning af ICCI og LowCarbon Brændkammer resultater

Sammenligningen er delt i to afsnit; en overordnet sammenligning der har til formål at identificere generelle tendenser og en mere specifik sammenligning af resultaterne fra 2 ovne, der var tilnærmelsesvis gengangere i både ICCI målingerne og LCB målingerne. Det drejer sig om F- og G-ovnene, der begge er moderne ovne med lignende udformning og luftsystemer. Som parameter benyttes forholdet mellem EC og OC omregnet til emissioner efter Norsk standard og udtrykt i

enheden justeret partikulær udslipsandel [g/kg] tørt brænde. ICCI målingerne er målt over to omgange. Første gang i marts 2014, hvor der indgik to ovne: en ældre traditionel ovn og en moderne traditionel ovn, der i øvrigt var identisk med F-ovnen. Anden målerunde blev udført i maj og juni 2015. Der indgik tre ovne; en moderne speciel ovn, en moderne ovn med omvendt forbrænding, og som reference ovn, en moderne traditionel brændeovn. Den moderne specielle ovn er af samme type og princip som G-ovnen. Et eksempel måleopstillingen og benyttet NS-fyringsklods kan ses på *Billede 5*.



BILLEDE 5
MÅLEOPSTILLING TIL VENSTRE MED SAMTIDIG MÅLING AF EC-OC OG PM. TIL HØJRE DEN NORSKE PRØVEKLODS AF GRAN

TABEL 8
MÅLINGER FRA FØRSTE MÅLERUNDE PÅ EN MODERNE OVN OG EN TRADITIONEL OVN.DEN MODERNE OVN ER IDENTISK MED OVN F FRA LOWCARBON BRÆNDKAMMER PROJEKTET.

	Filt #	Fuel load kg	Burn rate kg/h	Flue temp °C	OC g/kg	EC g/kg	PM g/kg	EC/OC Ratio
Moderne ovn	1	1,86	2,00	351	0,62	0,66	2,28	1,06
	3	1,84	1,60	315	1,1	0,83	1,97	0,75
	5	1,78	1,21	260	2	1,18	3,32	0,59
	7	1,86	1,30	280	1,62	1,31	2,58	0,81
	9	1,86	1,88	343	1,5	2,5	4,29	1,67
	11	3,56	1,62	235	0,96	0,76	1,77	0,79
	13	1,80	1,43	296	0,96	1,33	2,03	1,39
Traditionel ovn	15	1,53	1,57	333	overload	overload	overload	overload
	17	1,53	0,85	221	3,69	2,68	7,27	0,73
	19	1,51	0,66	197	4,7	2,5	11,95	0,53
	21	1,48	1,36	275	2,33	1,22	5,14	0,52
	23	1,51	1,64	324	overload	overload	overload	overload
	25	1,83	1,41	170	0,86	0,78	1,58	0,91
	27	1,49	1,03	207	4,7	1,02	5,96	0,22

Målingerne fra første målerunde, se *Tabel 8*, blev udført med 5,9 mm sugestuds, men med uændret NS udsugning på 1244 l/time hvilket har bevirket forhøjet masseafsætning på filtrene, samt at samlingen ikke har været isokinetisk korrekt udført. To filtre var decideret overloadede og måtte kasseres. Af de resterende filtre var 5 moderat overloadede, men alligevel inden for instrumentets grænser for analyse. På grund af disse forhold vurderes niveauerne af EC generelt at være overestimerede, sikkert også uforholdsmæssigt mere end den tilsvarende overestimeringen af OC, hvilket tilsammen forrykker EC-OC forholdstallet i opadgående retning. Der ses bort fra målingerne med filter 11 og 25, fordi der benyttedes løvtræ for at kunne måle på en hel Top-Down optændings- og fyringscyklus. Af de to ovne der indgik i målingerne var den ovn der er benævnt 'Moderne ovn' identisk med F-ovnen.

I anden omgang var målingerne koncentreret til måling af EC og OC, se *Tabel 9*. Der blev benyttet 5,9 mm sugestuds og tilsvarende reduceret suge hastighed på 436 l/time og korrekt dysehastighed på 4,4 m/sek. Som resultat var ingen filtre i nærheden af at være overloadede, og isokinetrien var korrekt. Målingerne omfatter 3 ovne, hvoraf den der er benævnt 'Ovn "G"' er sammenlignelig med G-ovnen.

Stove	Filt #	Burn rate kg/h	Flue temp °C	OC (g/kg)	EC (g/kg)	EC/OC Ratio
Traditional	26	1,42	245	1,31	0,41	0,31
Traditional	28	1,23	237	1,61	0,36	0,22
Traditional	29	1,94	322	1,86	1,08	0,58
Traditional	2	1,51	256	1,3	0,66	0,51
Traditional	4	1,69	278	0,84	0,49	0,58
Ovn "G"	14	1,49	261	0,63	0,58	0,92
Ovn "G"	16	1,34	252	1,16	0,53	0,46
Ovn "G"	22	1,30	237	1,21	0,46	0,38
Ovn "G"	24	1,14	221	1,1	0,57	0,52
Downdraft	6	1,36	1,68	0,28	0,18	0,64
Downdraft	10	1,29	166	0,66	0,19	0,29
Downdraft	12	1,22	164	0,28	0,01	0,04

TABEL 9
MÅLINGER FRA ANDEN MÅLERUNDE

Som opsummering af resultaterne af ICCI målingerne efter Norsk metode ses niveauer af EC emission på ca. 0,6 g/kg og for OC på 1-1,3 g/kg, idet der ses bort fra ovnen med omvendt forbrænding. Dette fravalg er begrundet med at ovnen med omvendt forbrænding i sit princip adskiller sig afgørende fra ovnene A-G fra LCB projektet, og ikke med rimelighed vil kunne gøres til genstand for sammenligning.

Resultatet for EC for den moderne ovn fra første målerunde benyttes, men med en korrektion der skal opveje effekten af det faktisk udsugede højere volumen på 1244 l/h imod 436 l/h. Hvis man korrigerer for at det udsugede volumen har været ca. 2,8 gange højere end under anden målerunde, fås faktisk emissioner af EC af omtrent samme størrelsesorden som de øvrige traditionelle ovne på ca. 0,5 g/kg. I forhold til de forventede effekter ved brug af Norske metode og savskåret grantræ som skitseret indledningsvis, har det vist sig at andelen af OC ikke ser ud til at være overrepræsenteret.

teret i forhold til hvad man kunne forvente, og ligger under det forhold på 1:9 som US EPA (2015) nævner som værende typisk for biomasse (åben afbrænding af biomasse).

Sammenlignes ICCI målinger og LCB målinger for F-ovnens vedkommende, ses det i *Tabel 10* at de absolutte niveauer af EC og OC er inden for samme størrelsesorden, hvorimod forholdstallene er mere en faktor 2 forskellige. For G-ovnens vedkommende ses der betydelig forskel på de absolutte niveauer af EC og OC, og forholdstallet varierer med en faktor 6 højere.

TABEL 10
SAMMENLIGNING MELLEM ICCI MÅLINGER MED LCB MÅLINGER PÅ DE TO OVNE

	Middelemmission af OC [g/kg]	Middelemmission af EC [g/kg]	Forholdet EC/OC
F-ovnen ICCI	0,50	0,50	1
F-ovnen LCB	0,71	0,33	0,46
G-ovnen ICCI	1,03	0,54	0,52
G-ovnen LCB	0,31	0,93	3

Som nævnt tidligere er det vanskeligt at kunne isolere indflydelsen af selve ovnen, den anvendte testprocedure, operatøren, det anvendte brændsel og summen af diverse lab-betingelser (se yderligere påvirkninger *afsnit 3.1.7*). Hvis man vil kunne udtale sig mere konkret om testprocedurens indflydelse, vil der kræves yderligere en hel serie af målinger, hvor man parvis forsøger at holde de øvrige variabler så fast som muligt. Det er et spinkelt sammenligningsgrundlag, og der er forbehold ud over de allerede nævnte (f.eks. ukendt spjældkarakteristik for de to ellers 'ens' G-ovne), men på det foreliggende grundlag, er det ikke muligt at identificere nogle generelle forskelle i resultaterne, som kan tilbageføres til testproceduren.

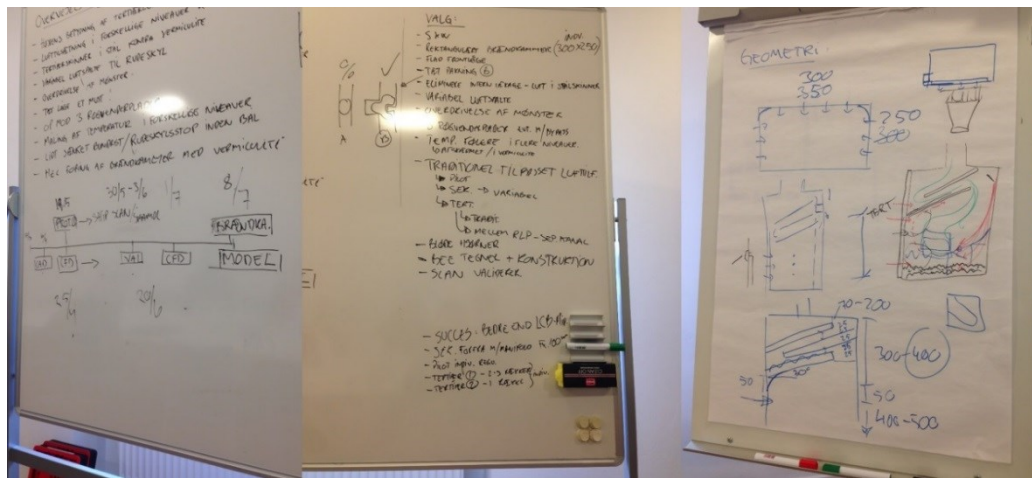
4. **Udvikling af retningslinjer og LowCarbon model-brændkammer**

Udviklingsdelen i dette projekt har bestået af flere steps samlet i arbejdsplan 4 (AP4).

Første step var en design- og beslutningsfase, hvor et model-brændkammer blev besluttet. Beslutningerne omkring geometri, lufttilsætning og udformning af røggasvej blev taget ud fra dels et erfaringsmæssigt grundlag fra projektgruppen, dels ud fra målekampagnens isolerede tendenser som viste lav BC (analyseret og beregnet EC) udledning. Næste step var ud fra de besluttede parametre at skabe en CAD model og efterfølgende en CFD analysemodel. Formålet med disse to var at CAD modellen skulle udgøre grundstenen til selve konstruktionen af brændkammeret, mens CFD analysemodellen på forhånd skulle være med at verificere, om strømningsforløbene i ovnen forholdt sig hensigtsmæssigt. Sideløbende med CFD modelopbygning blev ovnen fysisk produceret. Efter den fysiske ovn stod færdig, blev ovnen prøvefyret i og lufttilsætningen blev tilpasset de praktiske omstændigheder. Efter en periode med fyringer i forskellige situationer med forskellige lufttilsætningsindstillinger var resultaterne stabile nok til at ovnen kunne gennemføre den selvsamme udviklede test, som de øvrige ovne i målekampagnen, for at danne et sammenligningsgrundlag. Sideløbende med udvikling og test af model-brændkammeret blev der udviklet et sæt retningslinjer og anbefalinger for, hvilke design- og forbrændingsmæssige parametre for fremtidige brændkammerdesigns, der kan spille ind på en reduceret BC udledning. Efter de endelige målinger på den producerede ovn blev der yderligere undersøgt et begrænset antal ekstra tiltag på en prototype B ovn, som givetvis kunne have en reducerende effekt på BC udslippet. Slutteligt er der i datagrundlaget fra målekampagnen og de endelige målinger blevet undersøgt, om der er indikatorer på BC niveauet ud fra de allerede eksisterende CEN/TS15883 emissionsmålinger, som producenterne selv kan måle i deres egne laboratorier til evt. fremtidig brug.

4.1 Fra ideudvikling til færdigt model-brændkammer

Efter analysestudiet i AP3 over målekampagnen satte projektgruppen sig sammen for at udvikle et model-brændkammer, som forhåbentlig skulle vise en reduceret EC udledning ud fra det dannede erfaringsgrundlag. Brainstorming, se *Billede 6*, angående udformning på brændkammeret, lufttilsætningsmuligheder og variation af disse, materialevalg, røggasvej m.fl. blev i fællesskab til et sæt fastsatte parametre ud fra dels et erfaringsmæssigt grundlag i gruppen, dels ud fra målekampagnens isolerede undersøgte virkemidler på reduceret BC udledning.



BILLEDE 6
BRAINSTORMING OG BESLUTNINGER VEDR. MODEL-BRÆNDKAMMER UDFORMNING OG FORLØB.

4.1.1 Grundlæggende designparametre og succeskriterie

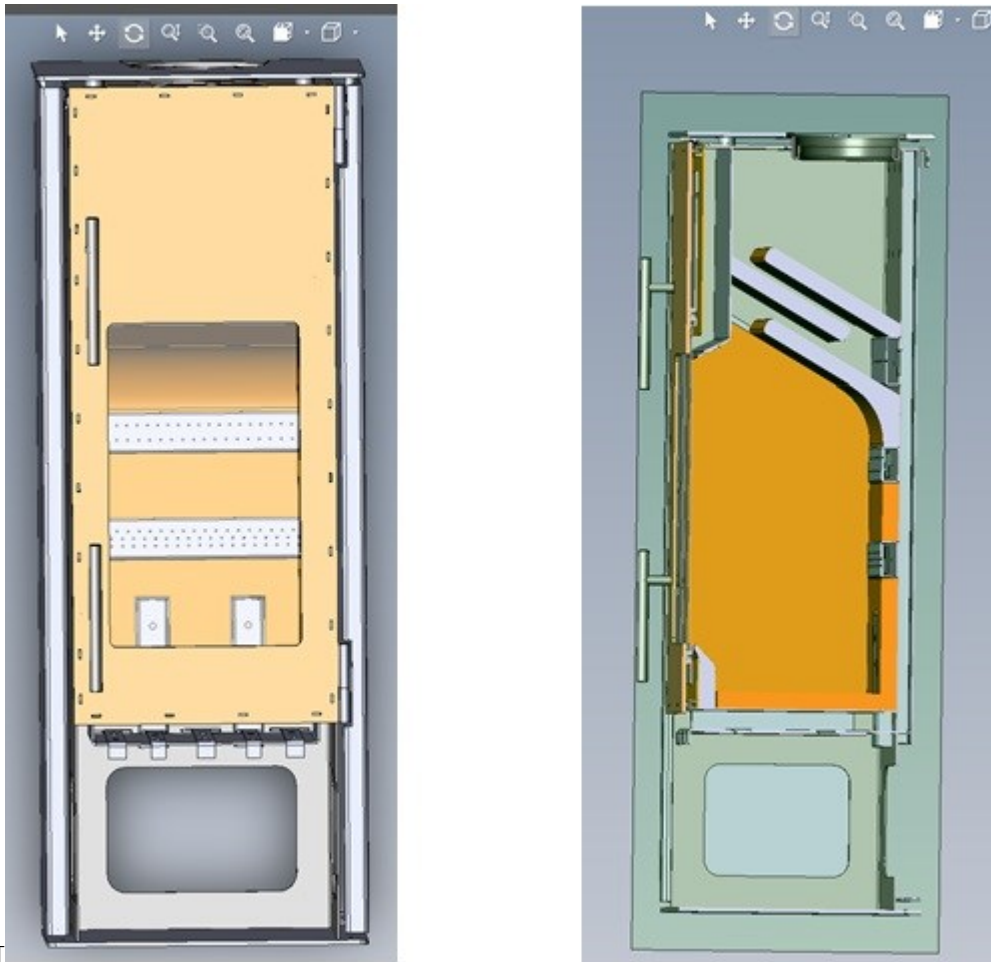
De grundlæggende designparametre ud fra ovenstående brainstorm blev fastsat til følgende parametre;

- Svagt rektangulært grundareal med dimensionerne 300x250mm.
 - Grundet at formen ikke skulle være for kompliceret og nemt skal kunne implementeres i fremtidige designs.
- God højde på brændkammer.
 - Giver stor opholdstid i den varme "zone".
- Tætluukkende låge (derfor to håndtag på efterfølgende billeder).
 - Vigtigt i forhold til kontrol over lufttilførslen og reducerer falsk luft til forbrænding.
- 3x rørgvenderplader i vermiculite.
 - Erfaring fra målekampagnen overdrives ved at tilføje en ekstra plade.
- Ingen primærlufttilsætning.
 - Erfaring fra målekampagnen.
- Sekundærluften med justerbar luftmellemrum mellem stål og glasrude.
 - Samtidig vinkles vermiculite-element i bunden af glasset for at forhindre, at luften bliver ledt ned i gløderne for en ageret primærlufttilsætning.
- Tertiærlufttilsætning som en masse små huller i flere niveauer.
 - Senere tilføjet ekstra skinne til i alt tre skinner.
- Pilotlufttilsætning for bedre opstart.
 - Placeres i to niveauer fra i alt 4 retninger.

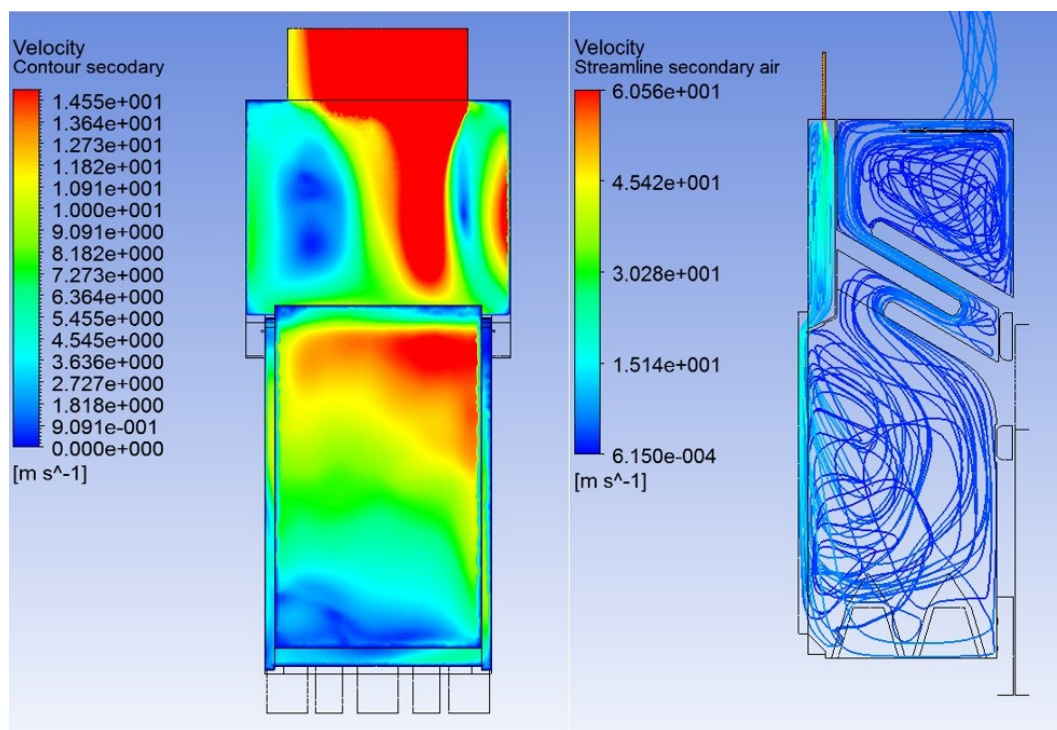
Det blev på projektmødet aftalt, at succeskriteriet for det ny-udviklede model-brændkammer var, at det skulle være bedre end gennemsnittet af de otte ovne fra målekampagnen – ikke kun på EC-analyse parameteret, men også på de øvrige emissionsparametre, som der måles på til de endelige typetestes ved godkendelse af nye brændeovne – altså både CO, OGC og virkningsgrad.

4.1.2 CAD, CFD og konstruktion af model-brændkammer

Efter CAD opbygningen, *Figur 28*, blev næste skridt sat i gang. Sideløbende med konstruktionen af ovnen blev CFD modellering påbegyndt, *Figur 29*, efter den dannede CAD fil. Det blev besluttet på projektmødet, at CFD modelleringen skulle verificere strømningsforløbet og ikke brændkammerets forbrændingsegenskaber – dels kræver dette meget stor ekspertise inden for CFD simulering og erfaring med netop forbrænding, dels krævede det store ressourcer, som ikke er omfattet af dette projekt. For en samlet gennemgang af forløbet henvises til *Bilag 05*. Det endelige resultatet af CFD analysen viser et forholdsvis jævnt rudeskyl (sekundærluft), som rammer træets overside som ønsket, og som derefter bliver opvarmet og mixet med den øvrige forbrændingsluft. Det efterfølgende forløb i ovnen har ikke givet anledning til unormalt flow i ovnen.



FIGUR 28
ENDELIG CAD DESIGN OVER MODEL-BRÆNDKAMMER SET FORFRA OG SET SOM SNIT IGENNEM MIDTEN AF OV-
NEN.



FIGUR 29

CFD MODELLERING AF MODEL-BRÆNDKAMMER. HASTIGHEDSDIAGRAMMET (TV) VISER ET NOGENLUNDE JÆVNT FORLØB NED LANGS RUDEN, MENS FORLØBET I INDLØBSKANALEN VISER ENKELTE RECIRKULATIONSOMRÅDER. HASTIGHEDSDIAGRAMMET (TH) VISER FLOW IGennem OVnen UDELUKKENDE PÅVIRKET AF RUDESKYLLET.

Det fysiske brændkammer gennemgik faserne vist på *Billede 7*, inden de endelige målinger.



BILLEDE 7

FIRE FASER I UDVIKLINGEN AF BRÆNDKAMMERET FRA RÅ OVN(1), TIL MALET OVN INKL. VERMICULITE(2), TIL OVN MED ILD I (3), TIL ENDELIG PROJEKTOVN TILSAT EN EKSTRA TERTIÆRSKINNE LIGE OVER BRÆNDSLET(4).

4.2 Måling og resultater af model-brændkammer samt retningslinjer

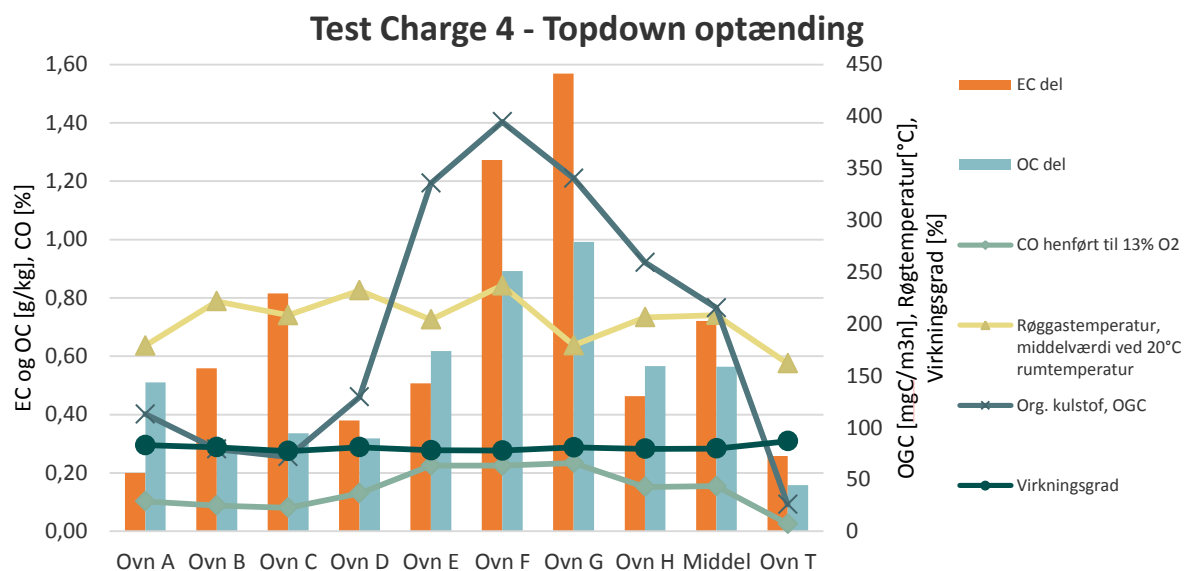
4.2.1 Model-brændkammer sammenlignet med målekampagnen.

Efter en forbrændingsmæssig modificeringsperiode, hvor ovnen blev tilpasset til at have gode praktiske forbrændingsmæssige egenskaber, gennemgik model-brændkammeret samme måleprocedure, som de øvrige otte moderne brændeovne udviklet i AP2. *Tabel 11* og *Figur 30* viser den udviklede ovns (Ovn T) resultater for én af fyringssituationerne; Test charge 4, – TopDown optændingsmetoden, sammenlignet med hhv. middelværdien fra målekampagnen og alle otte ovne. Den udviklede ovn markerer sig markant bedre på alle parametre for optændingen - lige fra en meget høj virkningsgrad til en meget flot forbrænding på både EC, OC, CO og OGC. For flere detaljerede oplysninger vedrørende de øvrige data og øvrige fyringssituationer se *Bilag 06*, hvor der både er tabeller og grafer over de udførte fyringssituationer.

TABEL 11

TABEL OVER DET UDVIKLEDE BRÆNDKAMMER FOR TC4 – TOPDOWN OPTÆNDINGEN I FORHOLD TIL MIDDELVÆRDIEN FOR DE 8 TESTEDE OVNE I MÅLEKAMPAGNEN.

	Brændsel	Vægt pr. TC	Forbrug	Røggas-temp	Virkningsgrad	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambda	Jus. Part. EC del	Jus. Part. OC del
[Enhed]	[type]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[mgC/m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Middel ovn A-H	Opt. Birketræ	2,40	2,36	208	80	7,6	0,16	215	2,7	0,72	0,56
Ovn T	Opt. Birketræ	2,30	2,51	162	87	8,7	0,03	26	2,4	0,26	0,16



FIGUR 30

OVN T SAMMENLIGNET MED DE ØVRIGE OVNE I MÅLEKAMPAGNEN PÅ 6 FORSKELLIGE PARAMETRE. OVNE T PERFORMER OVERRASKENDE GODT PÅ ALLE 5 FORBRÆNDINGSPARAMETRE SELV VED EN LAVERE RØGTEMPERATUR.

Det aftalte succeskriterie inden LCB model-brændkammeret blev bygget var, at dets resultater fra måleproceduren var bedre end gennemsnittet af de otte ovne fra målekampagnen ud fra kriterierne EC, OC, OGC, CO og virkningsgrad som et samlet gennemsnit over de fem fyringssituationer. I *Tabel 12* ses et samlet overblik. Det ses her, at både virkningsgraden er hævet betydeligt og emissionerne er betydeligt reduceret – altså et opfyldt succeskriterie på middelværdi på 100%. Dette er meget glædeligt for projektet.

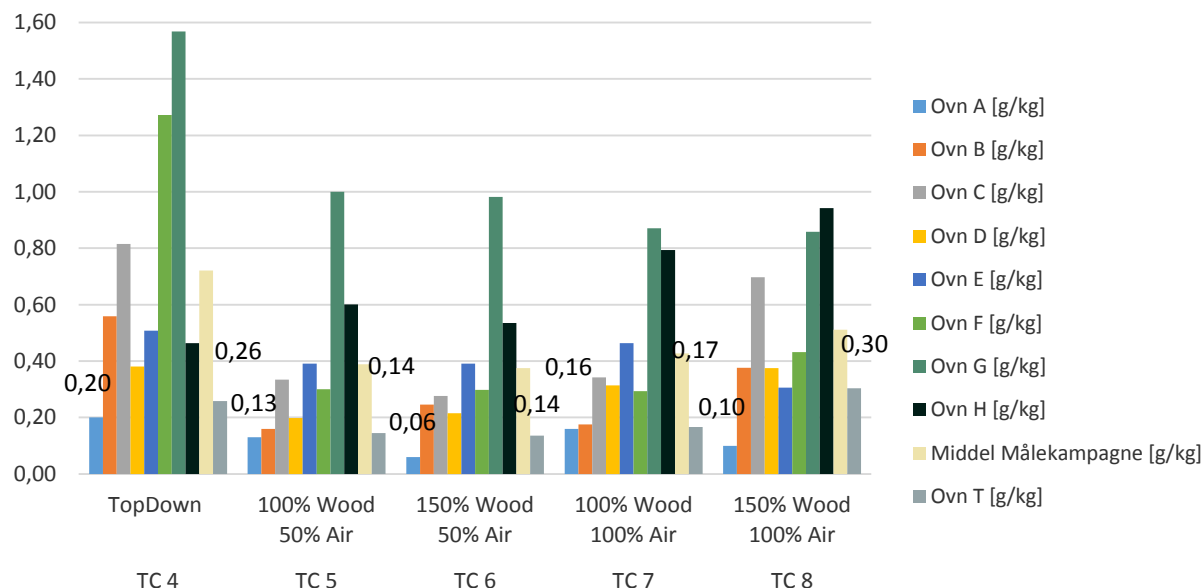
TABEL 12

SUCCESSKRITERIET VAR, AT LCB OVNE SKULLE VÆRE BEDRE END GENNEMSNIET AF MÅLEKAMPAGNEN. TABELLEN VISER, AT OVNE I SÆRDELESHED LEVER OP TIL DET FORDUSATTE KRITERIE MIDLET SET PÅ DE FEM FYRINGSSITUATIONER.

Parameter:	Virknings- grad	CO henført til 13% O ₂	Org. kulstof, OGC	EC del	OC del
[Enhed]	[%]	[%]	[mgC/m ³ n tør gas ved 13% O ₂]	[g/kg (tørstof)]	[g/kg (tørstof)]
Middel målekam- pagne	77	0,125	138	0,48	0,62
LCB ovn T	81	0,046	41	0,20	0,20
%-vis forbedring på TC4-8	5%	61%	65%	58%	67%

Udspecificeres ovenstående tabel ud på de enkelte fyringssituationer, så de fem fyringssituationer (TC4-TC8), de ni ovne (otte fra kampagnen og LCB ovnen) og de fem fyringsparametre (samme som ovenstående tabel) ganges ud med hinanden, da giver dette 225 enkelte situationer. LCB ovnen bliver på 225 situationer kun overgået 14 gange af andre ovne i kampagnen. Dette giver en samlet succesrate på 94%. Kombinationen mellem den midlede procentvise forbedring på emissioner og virkningsgrad og den udspecificerede succesrate vidner om, at der i fællesskab er udviklet en ovn, som har nogle geometriske former og luftsystemer, der ikke alene har lav EC udledning, men som spiller godt sammen som en helhed også i forhold til de nuværende emissionsparametre. På *Figur 31* EC udledningen mellem de otte ovne i målekampagnen og middelværdien af kampagnen op imod LCB ovn T. Som også kan antydes på farverne på filtrene (se *Billede 8*) overgås LCB ovn T kun af Ovn A fra målekampagnen mht. EC udledningen. Dog som det ses på *Figur 32* har LCB ovn T også lav OC udledning, hvilken får det samlede EC+OC partikeludslip til at blive betydeligt lavere end nogen af de øvrige ovne.

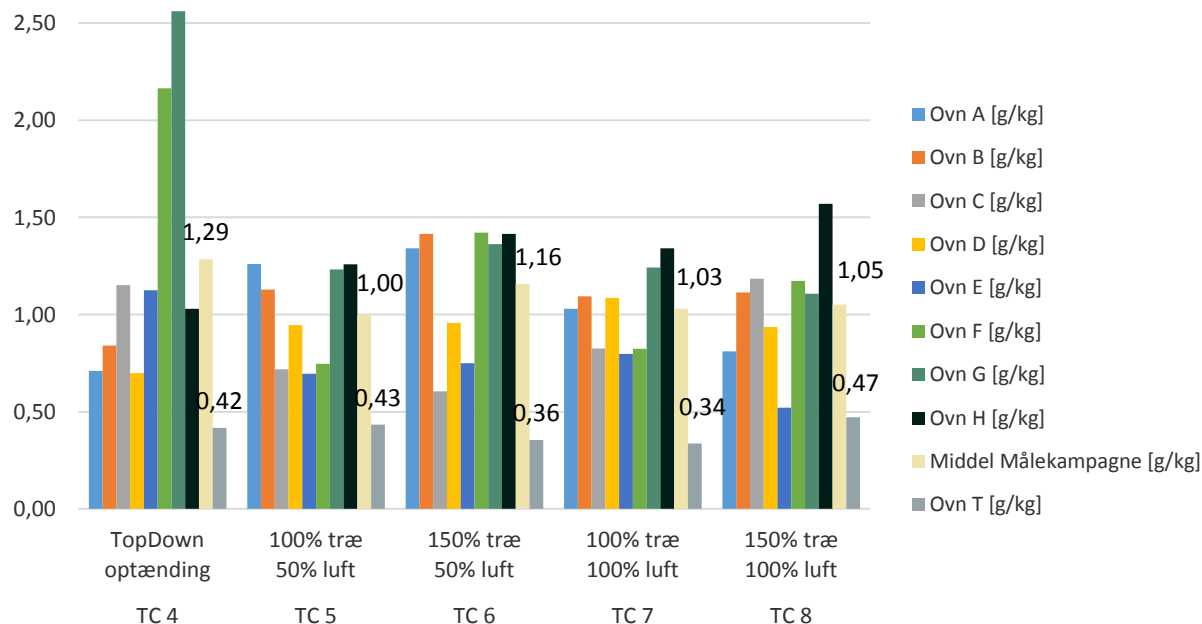
EC g/kg ved de forskellige TC



FIGUR 31

EC UDLEDNINGEN MELLEM DE 8 OVNE I MÅLEKAMPAGNEN OG LCB OVN T, HVOR DEN UDVIKLEDE OVN KUN OVERGÅS 5 GANGE - ALLE AF OVN A FOR ALLE 5 FYRINGSSITUATIONER (TEST CHARGE, TC, 4-8).

EC+OC g/kg ved de forskellige fyringssituationer



FIGUR 32

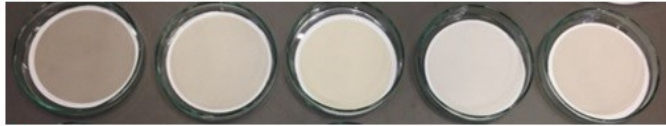
DEN SAMLEDE EC+OC UDLEDNING MELLEM DE 8 OVNE I MÅLEKAMPAGNEN OG LCB OVN T, HVOR DEN UDVIKLEDE OVN HAR DEN LAVESTE UDLEDNING I ALLE FYRINGSSITUATIONERNE. REDUKTIONEN LIGGER I FORHOLD TIL MIDDELTALLET MELLEM 55-69% FOR DE 5 FYRINGSSITUATIONER (TEST CHARGE, TC, 4-8).

Filteroversigt – visuelt: Filter ved TC 4-5-6-7-8+LCB ovn

LCB ovn T:



A:



B:



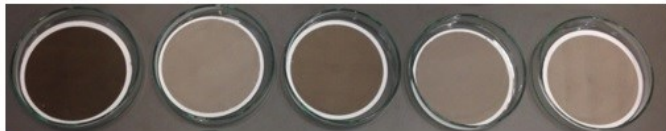
C:



D:



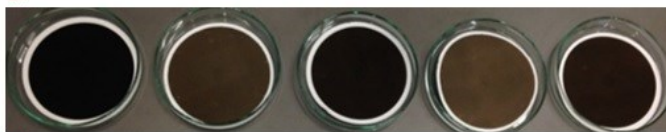
E:



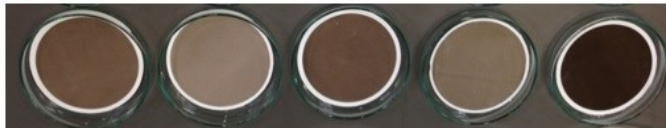
F:



G:



H:



[
BILLEDE 8

FILTEROVERSIGT OVER DE MÅLTE OVNE I KAMPAGNEN SAMMENLIGNET MED LCB OVN T ØVERST. HER KAN SES, AT DER IKKE ER MEGET FARVE PÅ FILTRENE FRA OVN T. SAMLET SET MINDER OVN T'S FILTRE EN DEL OM OVN A'S FILTRE PÅNÆR DET SIDSTE FILTER.

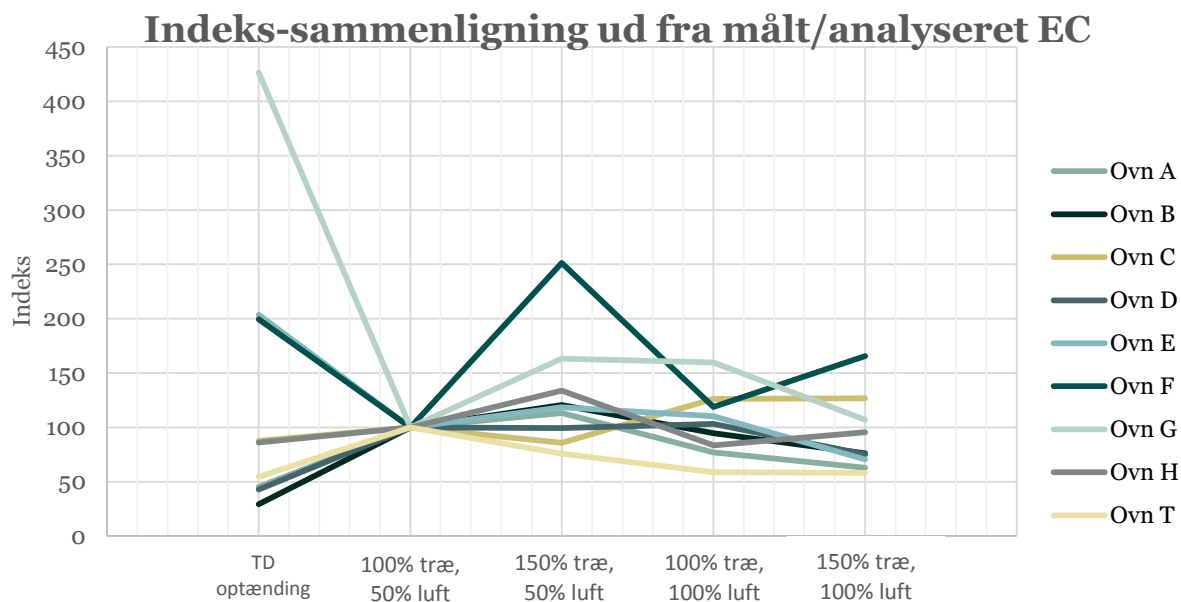
TABEL 13

EC/OC ratio som et midlet snit over de 5 fyringssituationer TC4-TC8. Ovn T med den laveste total mængde har en ratio svarende til samme niveau som målekampagnens midlede tal.

Type	EC/OC ratio	EC udledning [g/kg]	EC+OC udledning [g/kg]
Ovn A	0,18	0,13	1,03
Ovn B	0,61	0,30	1,12
Ovn C	1,25	0,49	0,90
Ovn D	0,41	0,30	0,92
Ovn E	1,20	0,41	0,78
Ovn F	0,70	0,52	1,27
Ovn G	2,85	1,06	1,50
Ovn H	1,06	0,67	1,32
Middel ovn A-H (TC4-8)	1,05	0,48	1,10
LCB Ovn T (TC4-8)	1,11	0,20	0,40
Åben Biomasse	0,11	-	-
Diesel afbr.	1	-	-
Husholdning	0,25	-	-
Industri	0,5	-	-

Det er meget interessant og tankevækkende, at LCB ovn T både har en meget lav EC, men også en meget lav OC udledning, se *Tabel 13*. Tidligere har vi undersøgt EC/OC ratioen, som ifølge teorien er lav ved åben biomasseafbrænding. Målekampagnen viste, at der var stor ratio-spredning fra 0,18 til 2,85 midlet set, men for enkelte charges helt fra 0,04 (ovn A) til 4,29 (ovn G). Det viser blot, at man i stedet for at fokusere på dette forhold, bør fokusere mere på selve niveauet af udledningen, som for både kampagnen og LCB ovnen er meget lav (højest 1,5 g/kg fra *Figur 31*). Ratioen afhænger af forskellige parametre, hvorfor et enhedsløs forhold siger intet i forhold til en faktisk EC og OC udledning på begge tilnærmelsesvis 0,20g/kg (Ovn T). *Afsnit 4.4* kommer nærmere ind på, at der kan være en sammenhæng mellem OC og THC, hvilket betyder jo renere forbrænding, jo lavere THC og dermed jo højere ratio, såfremt det antages, at EC-niveauet er mere konstant end OC-niveauet, som kan være nemmere at forbedre i forbrændingen.

Illustreret på en anden måde kan man ud fra et indekstal se, hvordan de testede ovne – heriblandt den nye ovn – klarer sig i forhold til de forskellige brugssituationer. Det gøres på en indeksskala ud fra et indeks 100, på baggrund af fyringssituationen med 100% træ og 50% forbrændingsluft. Det formodes på forhånd, at denne indstilling gennemsnitligt er tættest på en optimal fyringssituation. Det kan selvfølgelig variere for den enkelte ovn, hvorfor det kun er en formodning. På *Bilag 07* kan de seks parametre undersøgt ses for hver ovn – figurene og tabellerne giver værdier for maksimum udsving, minimum udsving og spredningen for hver ovn for de forskellige parametre i de forskellige fyringssituationer. For at illustrere det, vises på *Figur 33* ovnenes evne til at håndtere EC-udslippet (som målt/analyseret værdi i ug/cm²) ud fra den enkelte ovns indeks 100 – altså jo tættere på indeks 100 den enkelte ovn ligger i alle fyringssituationerne, jo bedre er ovnen til at håndtere forskellige brugssituationer for den viste parameter EC mest jævnt.



FIGUR 33

FIGUREN VISER EN INDEKS SAMMENLIGNING OVNE NE IMELLEM PÅ DEN MÅLTE EC-UDLEDNING. INDEKS 100 GIVES FRA FYRINGEN MED 100% TRÆ OG 50% LUFT, DA DET ANTAGES AT DETTE ER DEN MEST OPTIMALE INDSTILLING (TC 5). JO TÆTTERE PÅ INDEKS 100 JO ENS PERFORMER OVNE NE VED FORSKELLIGE BRUGSSITUATIONER.

TABEL 14

TABELLEN VISER OVNE NES INDEKS-UDSVING I FORHOLD TIL INDEKS 100 VED SITUATIONEN 100% TRÆ OG 50% LUFT FOR PARAMETEREN MÅLT/ANALYSERET EC (UG/CM²).

Indeks ud fra analyseret EC									
Ovn =>	A	B	C	D	E	F	G	H	T
Max. udsving	113,3	120,7	126,8	103,2	203,6	251,3	426,4	133,9	100,0
Min. udsving	45,1	29,1	85,7	42,7	70,6	100,0	100,0	83,3	54,6
Spredning	68,1	91,5	41,1	60,5	133,1	151,3	326,4	50,6	45,4
Gennemsnit for ovn	79,6	84,1	105,2	84,1	120,6	167,0	191,3	99,7	69,5

For EC-udledningen i de fem fyringssituationer ligger ovn T lavest på indeksskalaen, se *Tabel 14* – hvilket kan tyde på, at ovn T ikke har performer bedst på den ”nominelle” indstilling for netop EC-udledningen. Ovn H, der ligger tættest på dens eget indeks 100, er ovn H – hvilket betyder, at det er den ovn som gennemsnitligt ud fra EC performer mest jævnt uagtet fyringssituationen. Tages spredningen med i ligningen er det nærmere ovn C, som performer mest jævnt – dog til den lidt høje side. Ovn G er for EC den ovn, som ligger længst fra dets eget indeks 100. Samlet set ud fra de seks parametre, se *Tabel 15*, er det ovn A og Ovn T, som viser både det laveste indekstal og ligger tættest på deres eget indeks 100. Disse to ovne har identiske tal, hvorfor de er ”lige gode” til at håndtere brugssituationerne, hvad enten der er forøget luft eller forøget brændselsmængde. De øvrige ovne har et højere indekstal end 100, hvilket betyder at ovnene gennemsnitlig performer bedst i den forudsatte mest ”optimale” brugssituation og mindre godt ved andre situationer. Forklaringen kan ligge mange steder, men de mest oplagte er, at de enkelte ovne er begrænset i deres luftsystemer og ikke håndterer en større brændselsmængde så godt. Det kan omvendt også være, at indstillingen med 100% luft giver for varmt et bål i forhold til det aktuelle brændkammer. Ovn A og T viste også det laveste indekstal. Det kan betyde mindst to ting:

- 1) Det forudvalgte ”drift-optimum” ved 100% træ og 50% luft er ikke de to ovns mest optimale indstilling, måske Ovn T performer bedre ved 8kW frem for 6 kW.
- 2) Den valgte test charge er ikke optimalt kørt, hvorfor det kan skævvride indeksskalaen for de to ovne, hvis ovnene kunne have performer bedre, og dermed mindsket dets emissioner ved 100% træ og 50% luft, og dermed forhøjet indekset for de øvrige forbrugssituationer. Omvendt kan dette også have været tilfældet ved de ovne, hvor indekstallet er højere.

Generelt set skal man huske på, at dette udelukkende er en sammenligning ud fra ovns eget forudbestemte ”optimale” drift-punkt, hvorfor det ikke betyder, at Ovn A har samme lave emissioner som Ovn T. Dette kan man i stedet tolke ud fra de øvrige figurer i rapporten, der illustrerer emissionsniveauet.

TABEL 15

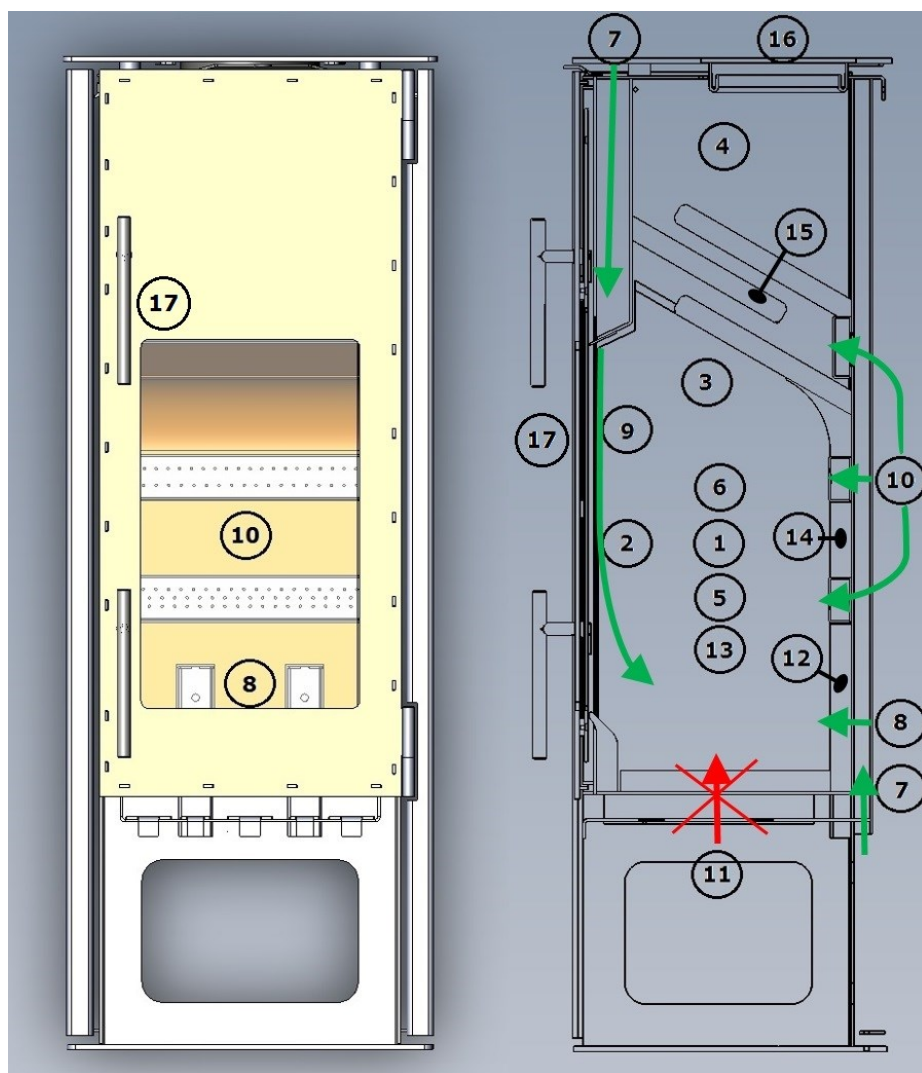
TABELLEN VISER OVNEENS INDEKS-UDSVING I FORHOLD TIL INDEKS 100 VED SITUATIONEN 100% TRÆ OG 50% LUFT FOR SEKS PARAMETRE - EC, OC, OGC; CO, VIRKNINGSGRAD OG EC+OC LAGT SAMMEN.

Indekstal ud fra alle seks parametre									
Ovn =>	A	B	C	D	E	F	G	H	T
Max. udsving	131,5	200,2	169,5	160,1	260,8	302,2	357,7	161,7	122,2
Min. udsving	53,1	64,9	76,7	78,8	83,5	94,3	83,3	75,8	61,1
Spredning	78,4	135,3	92,8	81,3	177,3	207,8	274,4	85,9	61,1
Gennemsnit for ovn	89,7	118,4	117,8	118,1	136,3	174,0	162,6	116,0	89,7

4.2.2 Retningslinjer for reduktion af BC udledning for fremtidige brændkammer

Ud fra målekampagnen, det efterfølgende analysestudie og erfaringer fra det nye modelbrændkammer er vi i projektet kommet frem til 17 punkter, som dels gør sig gældende ved almindelig opbygning af brændkammer, men også punkter som isoleret set har betydning for BC udledningen. Retningslinjerne er en af milepælene og et af de overordnede formål i dette projekt og oplystes herunder. At bygge et brændkammer hvor kriteriet blot er, at det skal kunne give varme, er i sig selv

ikke en vanskelig opgave, men at bygge et brændkammer, der skal kunne leve op til nuværende og fremtidige emissionskrav er straks mere vanskeligt. Som belyst tidligere er der rigtig mange parametre, som alle på en eller anden måde influerer på de forbrændingsmæssige egenskaber. Grundstenene inden for brændefyring er de tre T'er: Temperatur, Turbulens og Tid. Uden den ene af disse tre forudsætninger, får man ikke en tilnærmelsesvis ren forbrænding. *Tabel 6 og Tabel 7 i afsnit 3.1.7* belyser nogle af de øvrige parametre, som kan sikre disse tre forudsætninger, såsom brændslet (fugt, art, mængde, størrelse, udformning, placering, med eller uden bark etc.) eller fyrmesteren (erfaring, interesse, rutiner, viden om lufttilførsel generelt, viden om den aktuelle ovns egenskaber, påfyringstidspunkter etc.) eller ovnsens lufttilførsel (primær-, sekundær-, tertiær- eller pilotlufttilførsel, placeringer, funktioner, forvarmning, kanalbegrænsninger, hastigheder, røgvandring) og der kunne nævnes flere parametre.



FIGUR 34
FIGUREN ILLUSTRERER RETNINGSLINJERNE, SOM TAGER UDGANGSPUNKT I DET UDVIKLEDE MODEL-BRÆNDKAMMER.

Retningslinjerne tilhørende *Figur 34*:

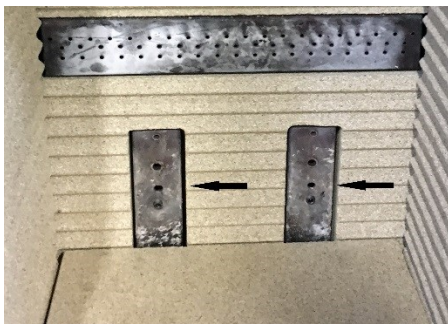
1. Veldimensioneret brændkammerstørrelse i forhold til den ønskede ydelse
2. Sempel brændkammeropbygning
 - Uden sideglas
 - Uden for stor radius eller vinkel på frontglas
3. God højde inde i brændkammer for længere opholdstid og flammeudvikling
 - Den frie flammeudvikling begrænses ikke af en lavtliggende røgvenderplade
4. Høj top over røgvenderplader for længere opholdstid og mere stabil røgtemperatur
5. Stabil og høj temperatur i brændkammer (erfaring fra projektovn)
 - Type K termoelement ca. 15mm inde i brændkammer (strålingsbeskyttet) målt 2 steder i hver side i 4 forskellige højder
 - Emissionerne falder ved en svagt opadstigende temperatur fra 450°C => den svage stigning fortsætter til over 500°C => når temperaturen falder til under 500°C igen stiger emissionerne
 - I perioder med kraftig temperaturstigning er der ikke tilstrækkelig med ilt til steder for at lave en ren forbrænding, selvom temperaturen er over de anbefalede temperaturer
6. God opblanding med forskellige lufttilførsler
 - Lambda hurtig ned => emissioner hurtig ned => når lambda overstiger 3 i forbrændingsforløb stiger emissioner. Emissionerne er lavest når lambdaforholdet er lavt med stabil temperaturforløb
7. Minimal modstand i luftsystelet
 - Regulering over spjældet er essentiel – luftkanaldimensionering må ikke udgøre begrænsningen => jo flere indsnævninger og bøjninger jo større modstand => jo mindre luft til forbrændingen
8. Pilotlufttilførsel OK fra bagside (nederst)
 - OK med flere niveauer (2 niveauer i LCB oven) og helst lige over gløder
9. Sekundærlufttilførsel (rudeskyl) OK – dog ikke for stor hastighed
 - Jævnt rudeskyl
 - Må ikke vinkles for meget ned i gløder, da det kan give primær luft effekt (negativ, punkt 11)
 - Direkte ind i brændkammer, ikke igennem et langt kanalsystem
10. Tertiærtilførsel OK i flere forskellige niveauer (LCB oven 3 niveauer)
11. Primærlufttilførsel (op igennem gløder) IKKE GAVNLIGT FOR BC UDLEDNING som fast del af forbrændingsluften (største kilde jf. målekampagne)
12. Generelt velisoleret brændkammer
 - For at opretholde den høje temperatur
13. Turbulens via forskellige lufttilsætninger og overflader i brændkammer
 - Urolige flammer er ikke et nødvendigvis et dårligt tegn
14. Rillet overflademønster
 - Skaber lokal turbulens og kan bidrage til lavere EC-udslip pga. længere opholdstid
15. Flere røgvenderplader i vermiculite (3 røgvenderplader i LCB oven)
 - Afstanden må ikke være for snæver => skaber for stor modstand for røgvandring og kan give røgudslip-gener hos forbrugeren
16. Black Carbon (elemental carbon) niveau kan forsigtigt bestemmes ud fra den visuelle farve på filtret
17. Tæt lågesystem
 - Forhindrer falsk luft i at bidrage til forbrændingen og forvirre det øvrige luftsystelet

Disse punkter tilhørende er alle på hver sin måde essentielle for at skabe den rene forbrænding, så ovnene kan leve op til de nuværende krav. Projektet har til formål at blive klogere og samtidig forberede branchen, såfremt BC bliver en fremtidig emissionsparameter. Litteraturstudiet, målekampagnen og udviklingsarbejdet på at lave en ovn med lavt udslip har alle været med at kaste lys på, hvad der ved brændefyring forårsager BC udledningen, og hvordan det kan forhindres. Dermed ikke sagt, at retningslinjerne er en opskrift på et brændkammer, der altid vil virke reducerende. De enkelte punkter skal tilpasses hinanden, så praksis stemmer overens med teorien.

4.3 Øvrige BC reduktionsmetoder

Aktivitet 4.3 har omhandlet øvrige tiltag til at reducere BC udledning på den fremstillede projektovn, som ikke har været undersøgt ved den første udviklingsfase. Generelt er det essentielt i udviklingen af brændkamre, at man ikke ændrer alle forudsætninger på en gang, hvis man skal sammenligne ud fra et givet udgangspunkt. Øvelsen har derfor dels bestået i at finde øvrige mulige virkemidler til lavere EC udledning, men samtidig ikke for mange virkemidler på én gang, da det så ikke kan kvantificeres, hvilken af ændringerne der var udslagsgivende. Projektgruppen er dog blevet enige omkring tre ændringer/virkemidler som blev forsøgt samtidig;

1. Nederste pilothuller hævet 15mm (*Billede 9*).
 - Huller løftet en anelse for ikke at ramme det øverste lag af gløderne (som en age-ret primærlufttilsætning). Har indflydelse på de grundlæggende forbrændingsegenskaber, da luft-flowet i ovnen dermed ændres.
2. Mere kantet overflademønster på vermiculite-elementerne (isoleringsmaterialet) i brændkammeret (*Billede 10*).
 - Kan lokalt langs overfladen give øget turbulens og dermed længere opholdstid i brændkammeret, og dermed større chance for afbrænding af partiklerne.
3. Indvendig isolering af øverste del af ovn over røgvenderplader se (*Billede 11*)
 - Giver højere røggastemperatur i skorstenen (målepunktet), da røggassen over røgvenderpladerne ikke bliver kølet af den koldere ståltemperatur.



BILLEDE 9
DE TO NYE HULLER VED PILENE ERSTATTER DE TIDLIGERE PILOTHULLER 15MM NEDENUNDER. DERMED SIKRES, AT PILOTLUFTTILFØRSLEN IKKE KOMMER I KONTAKT MED DET OPBYGGEDE GLØDELAG.



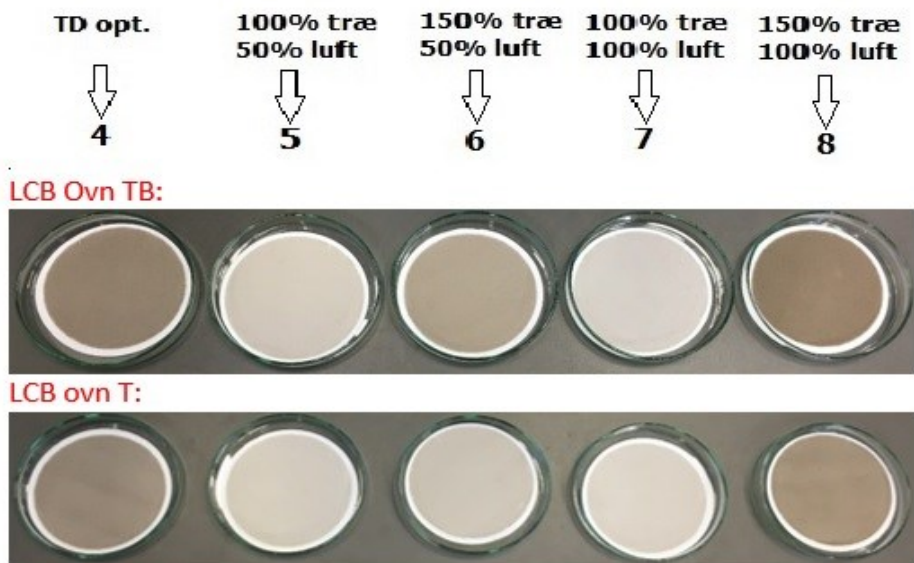
BILLEDE 10
DET NEDERSTE OG MERE KANTEDE MØNSTER ERSTATTER DE ORIGINALE MERE BLØDE FORMER.



BILLEDE 11

ET VIEW NEDEFRA OG OP (UDEN RØGVENDER-PLADERNE) GIVER ET BILLEDE AF, AT DEN ØVERSTE DEL AF OVNE ER BLEVET ISOLERET INDEFRA MED VERMICULITE.

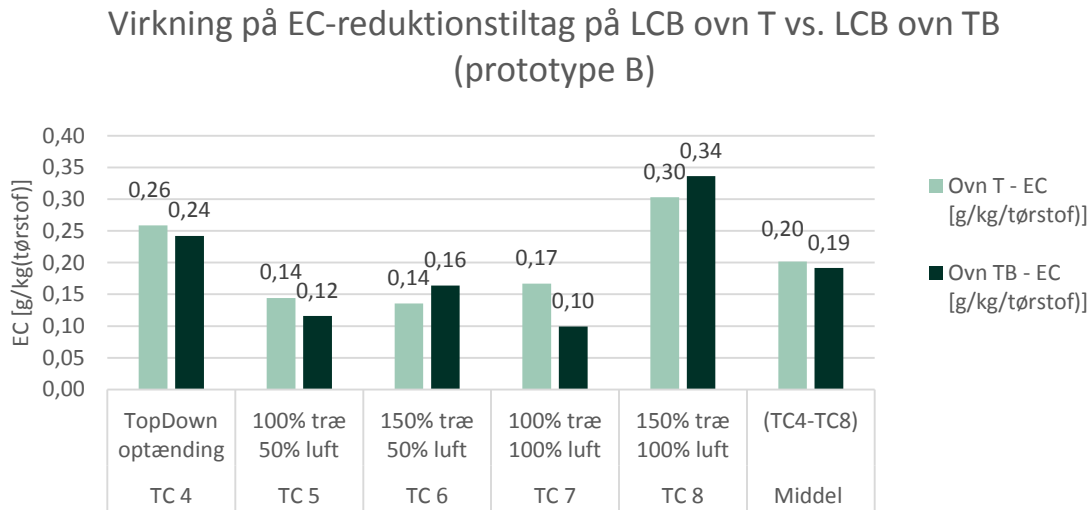
De tre nye tiltag listet ovenfor er blevet implementeret på den udviklede LowCarbon ovn T. Den modificerede ovn kaldes for prototype B af ovn T – derfor betegnelsen ovn TB. Den er blevet testet efter samme måleprocedure som de øvrige ovne i målekampagnen, såvel som filtre er sendt til Sunset Laboratories i Holland for samme EC-OC analyse for filtrene TC4-TC8 svarende til filtre fra den 2. testdag jf. den udviklet målemetode, se *Bilag 01*. På *Billede 12* kan ses de to forskellige visuelle resultater. Hvis der skeles til tendensen ud fra projektets erfaring med jo mørkere farveafsætning på filteret jo mere analyseret EC, da kan man ud fra farveforskellen på de to prototyper forsigtig konkludere, at der er en anelse mere på filter 6 og 8, mens de øvrige tre er tilnærmelsesvis det samme eller en anelse lysere.



BILLEDE 12

DEN VISUELLE FORSKEL PÅ MÅLEMETODEN FRA DE TO LCB OVNE – ØVERST PROTOTYPE B (OVN TB) OG DEN NEDERSTE DEN ORIGINALE UDVIKLEDE OVN TIL PROJEKTET.

Disse visuelle iagttagelser har jf. analyseresultater vist sig at holde stik. *Figur 35* viser, at der ikke er en klar tendens i at de tre tiltag skulle give en yderligere reduktion i EC-udledningen på det udviklede brændkammer. For tre af fyringssituationerne (TC4, TC5 og TC 7) er der en reduktion på TB ovnen, men ved fyringer med overload (150% brænde ved fyringssituation TC 6 og TC8) er der den omvendte tendens med mere på filterne. Middel-målinger viser også, at de to prototyper er ens fyret over de 5 fyringssituationer, hvorfor det må konkluderes, at der ikke er et klart billede af, at de tre tiltag giver et direkte billede på en EC reduktion. Det ens lave EC-niveau for begge ovne kan snarere tilskrives, at der er tale om et ”robust” ovndesign og lufttilførsel overfor EC-udledningen.

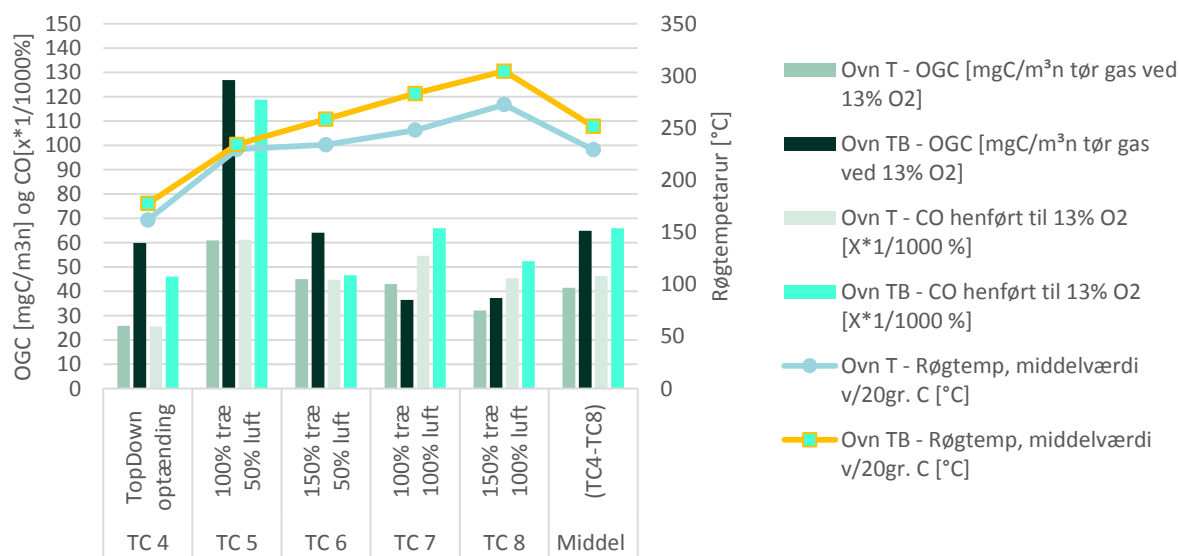


FIGUR 35

DET GRAFISKE UDTRYK OVER DE TRE TILTAG UNDERSØGT FOR YDERELIGERE EC REDUKTION.

For de øvrige emissioner kan dog konstateres, at ovnen ikke helt har ligget på samme flotte niveau som den originale ovn. I snit over de 5 fyringssituationer er der en øget røgtemperatur, som kan tilskrives den isolerede top af ovnen. De øvrige forhøjede OGC- og CO-emissioner kan formentlig tilskrives flytningen af pilothullerne snarere end den ændrede overfladestruktur. Se et samlet overblik på *Figur 36*.

Forskel på øvrige parametre mellem LCB ovn T og LCB ovn TB (prototype B)



FIGUR 36

DE TRE TILTAGS VIRKNING PÅ DE ØVRIGE EMISSIONSPARAMETRE.

Dermed kan forsigtig udledes, at de tre tiltag ikke havde den ønskede effekt overfor en reduceret EC udledning for denne ovn. Dog er det ikke udelukket, at det ville have virket på et andet brændkammerdesign. Det er positivt, at EC udledningen er på samme niveau som den originale ovn T til trods for, at forbrænding på de øvrige emissionsparametre ligger højere. Ligeledes er det positivt, at praksis også hænger sammen med teorien mht. den øgede røgtemperatur pga. den isolerede top, såvel som det er vigtig viden, at pilothullernes placering og luftens hastighed har stor betydning for ovnens forbrændingsmæssige egenskaber.

4.4 Indikatorer på BC udledningen

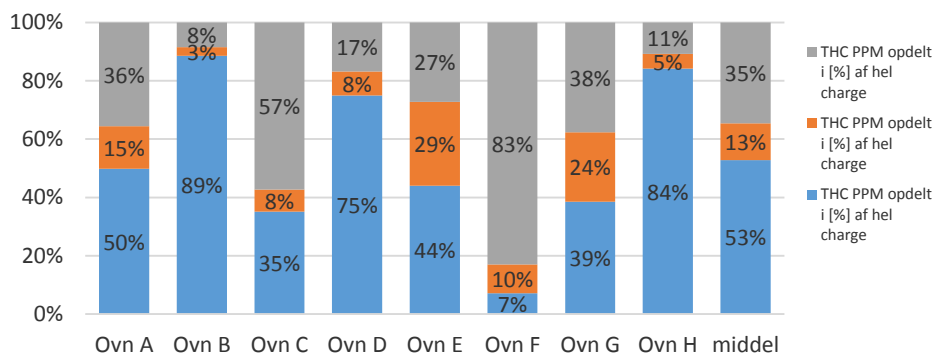
Denne aktivitet 4.4 har haft til opgave at undersøge projektets datamateriale og sammenholde disse data med de analyserede og beregnede EC værdier. Med sådan en viden kunne det være muligt at estimere et EC udslip med de nuværende emissionsparametre, blandt andet OGC målt efter CEN/TS 15883. Det har i kampagnen ikke været muligt at måle støv eller PM (partikulær masse), som brændeovnene i dag testes for ved hhv. typetesten og den norske partikelmetode (NS3058/59). Det var meningen fra begyndelsen, at der skulle have været en PM-udledning også, men da quartz-filtrene jf. *afsnit 3.1.3* ikke viste sig at være brugbare, er det nærmeste sammenligningsgrundlag analysens værdier af PM som EC+OC. Heri mangler som tidligere beskrevet en ukendt størrelse af uorganisk materiale.

4.4.1 Sammenhæng mellem udledning af EC og andre målte emissioner ud fra middelværdier

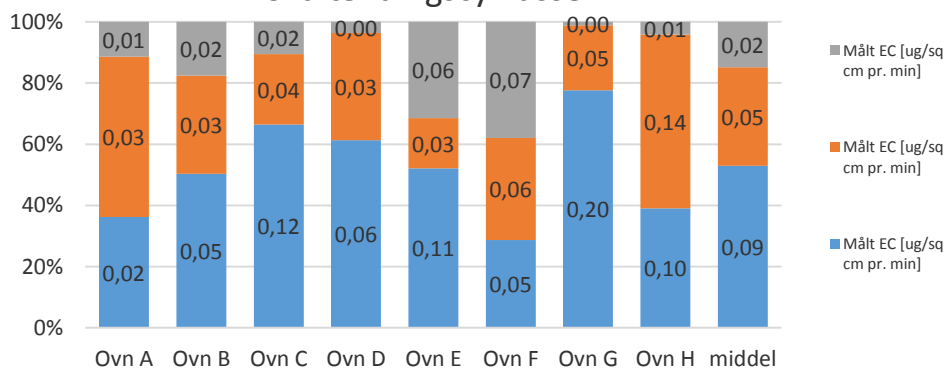
Ud fra den enorme datamængde opsamlet i dette projekt, er der ud fra de enkelte charges middelværdier af emissioner ikke fundet en umiddelbar korrelation, på hverken den analyserede eller beregnede EC udledning sammenlignet med de øvrige emissionsparametre. Ej heller imellem den analyserede eller beregnede OC udledning sammenlignet med de øvrige emissionsparametre. Forhåbningen var, at man ud fra nuværende emissionsparametre (fx CO og OGC) kunne spore sig ind på EC niveauet, såfremt EC på et tidspunkt blev en fremtidig emissionsparameter. Den højeste korrelation på de midlede data fra de enkelte charges på EC var $R^2=0,21$ (mellem analyseret EC og beregnet CO [% v/13% O₂]). For OC en smule højere, men stadig lavt omkring $R^2=0,65$ (mellem analyseret OC og beregnet OGC), hvilket ikke er vurderet høj nok til at kunne påvise en direkte sammenhæng.

På de beregnede værdier ud fra den analyserede værdi er der en større korrelation (fx analyseret EC [$\mu\text{g}/\text{cm}^2$] og beregnet EC [g/kg]) er der en lineær korrelation på $R^2=0,89$), men dette vil også være at forvente, da den analyserede værdi bruges til den beregnede værdi. Derimod er der en mulig sammenhæng med, hvornår i forbrændingsfasen udledningen sker. Især OCs relative værdier (som analyseret værdi pr. minut) i målekampagnens opdelte forbrændingsfaser sammenholdt med de selvsamme værdier for THC (Total hydrocarbon forbindelser) [ppm] i forbrændingsforløbet. Begge figurer (inkl. figuren for ECs relative udledning) er afbilledet herunder som *Figur 37* og viser, at der godt kan være sammenfald for, at størstedelen af både OC og THC bliver udledt i forbrændingsfasen med mindst stabile forhold – nemlig i opstartsfasen og udglødningsfasen. Samme udledning kan man ikke helt lave på EC-udledningen, da der kun er sammenfald i opstartsfasen.

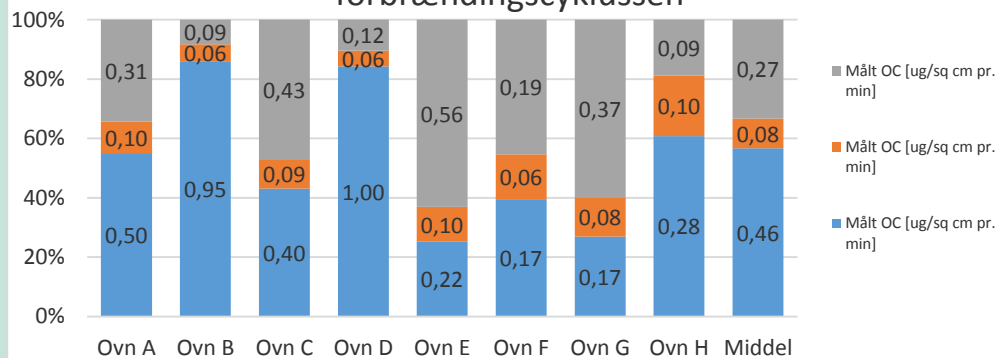
Målt THC %-vis bidrag i forbrændingscyklussen



Målt EC bidrag pr. minut fra filter 1-3 i forbrændingscyklussen



Målt OC bidrag pr. minut fra filter 1-3 i forbrændingscyklussen



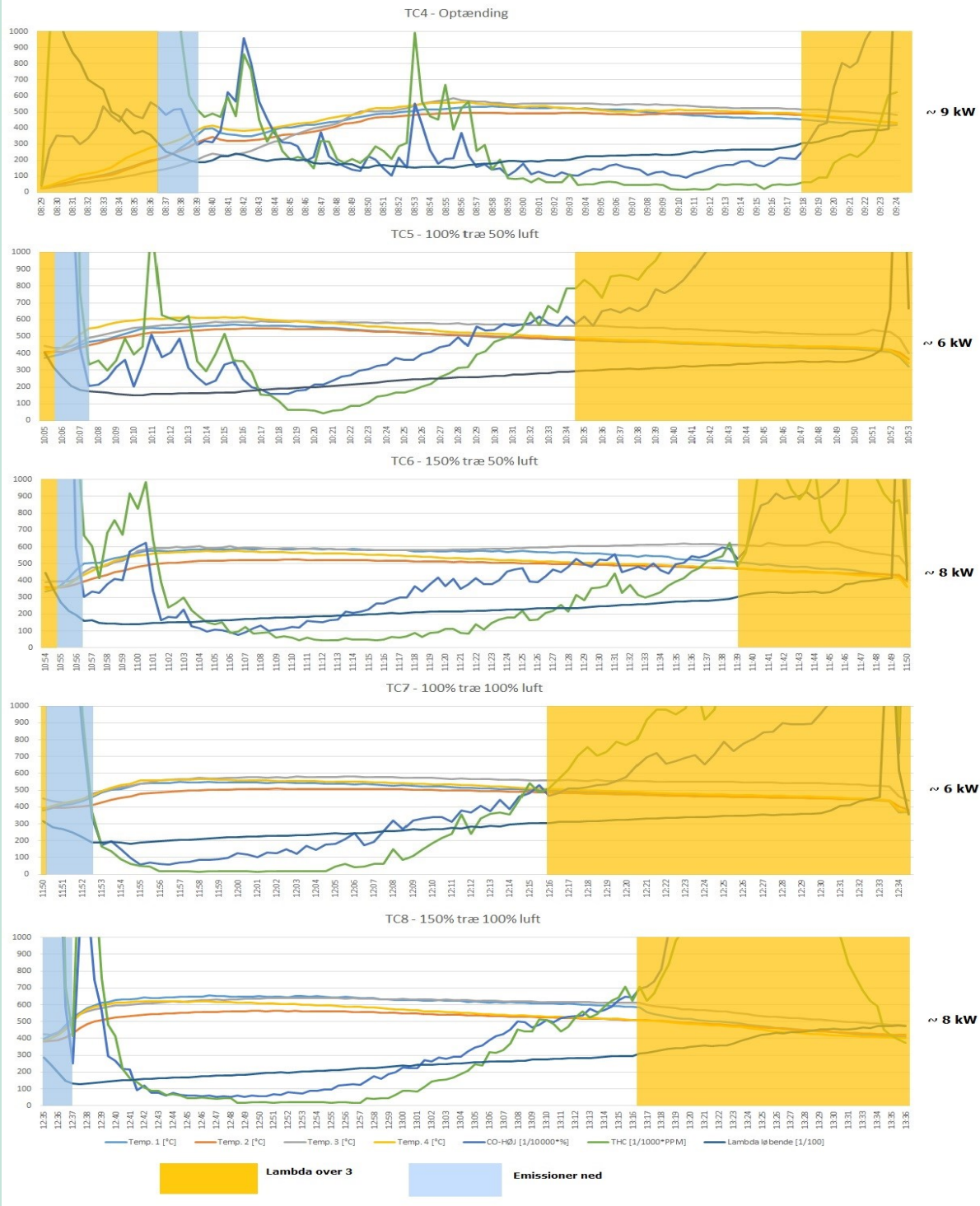
FIGUR 37

SAMMENLIGNING MELLEM THC OG MÅLT EC OG OC PR. MINUT I FORBRÆNDINGSFASEN FRA DE OPDELTE FYRINGER FORETAGET I MÅLEKAMPAGNEN. DEN BLÅ VISER OPSTARTSFASEN, DEN ORANGE VISER MIDTERFASEN, MENS DEN GRÅ VISER UDGLØDNINGSFASEN. BETRAGTES MIDDELVÆRDIERNE I DEN ØVERSTE OG NEDERSTE FIGUR ANTyder DE, AT DER KAN VÆRE SAMMENFALD MELLEM THC OG OC I FORBRÆNDINGSFASENS TRE PERIODER NÅLT SNARERE END PÅ FAKTISKE VÆRDIER MÅLT.

4.4.2 Sammenhæng mellem løbende emissioner, lambda og brændkammertemperatur

Under målingerne af den endelige LCB ovn T blev der samtidig målt brændkammertemperaturer direkte inde i brændkammeret i fire forskellige højder (Type K elementer placeret i strålingsafskærmet rør ca. 1,5-2cm inde i det faktiske brændkammer. To i hver side, og alle fire i forskellige højder. Starthøjde ca. 10cm over bunden, mens den øverste er ca. 45cm over bunden og under den første røgvenderplade). Temperaturerne målt sammenholdt med de løbende emissioner og løbende beregnet luftoverskudstal, lambda, viser en sammenhæng for dette brændkammer.

Det løbende luftoverskud indeholder både den initiale CO og CO₂-værdi som er mere beskrivende end en middelværdi over hele forbrændingsforløbet. Det lader det til, at emissionerne falder, så snart luftoverskuddet er lavt (omkring 2-1,5[enhedsløs,-]) samtidig med at brændkammertemperaturen er svagt opadgående ved 450°C. Den efterfølgende periode er den stabile periode. Her stiger temperaturen svagt (vigtigt at temperaturen ikke stiger for hurtigt) til ca. 550-600°C, samtidig med at lambda er stabil og svagt opadgående i takt med at brændslet fylder mindre og mindre med den tilgængelige luft tilført brændkammeret. Så snart lambda (for dette brændkammer – uvist om det gør sig gældende for alle brændkamre) overstiger 3, er der for meget luft i overskud i forhold til den resterende brændselsmængde i brændkammeret. Derfor køler den tilførte luft røggassen i stedet for at bidrage til forbrændingen, og røgttemperaturen falder til under ca. 500°C. Ved det stigende luftoverskud og den faldende temperatur i brændkammeret stiger emissionerne således mere eller mindre simultant. Dette forløb gør sig gældende for alle 5 charges for den udviklede LCB ovn T og kan ses på *Figur 38*. Forløbet afbilledet på denne måde afslører samtidig, at det designede brændkammer ud fra emissionernes og luftoverskuddets forløb performer mest optimalt ved en stor ydelse omkring 8-9kW (TC4,6 og 8) – og ikke den ønskede 5-6kW (TC5 og 7). Ved 6kW er afkølingsperioden for lang mod slutningen af forbrændingsperioden, hvor perioden med lave emissioner og lavt luftoverskud forlænges ved den større træmængde.

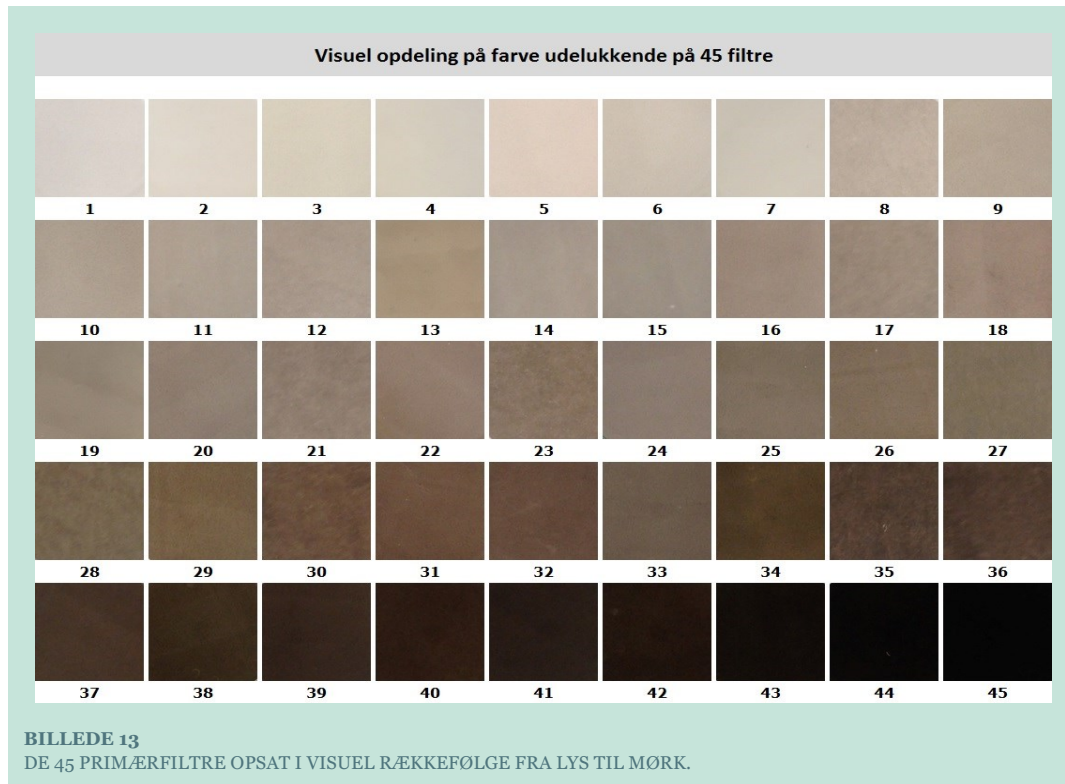


FIGUR 38

LCB OVN T'S FORBRÆNDINGSFORLØB OVER DE FEM FYRINGSSITUATIONER INKL. LØBENDE LAMBDA, 4XBRÆNDKAMMERTEMPERATURMÅLINGER OG LØBENDE CO- OG THC-EMISSIONER.

4.4.3 Visuel sammenhæng mellem målt EC og farve på filtre

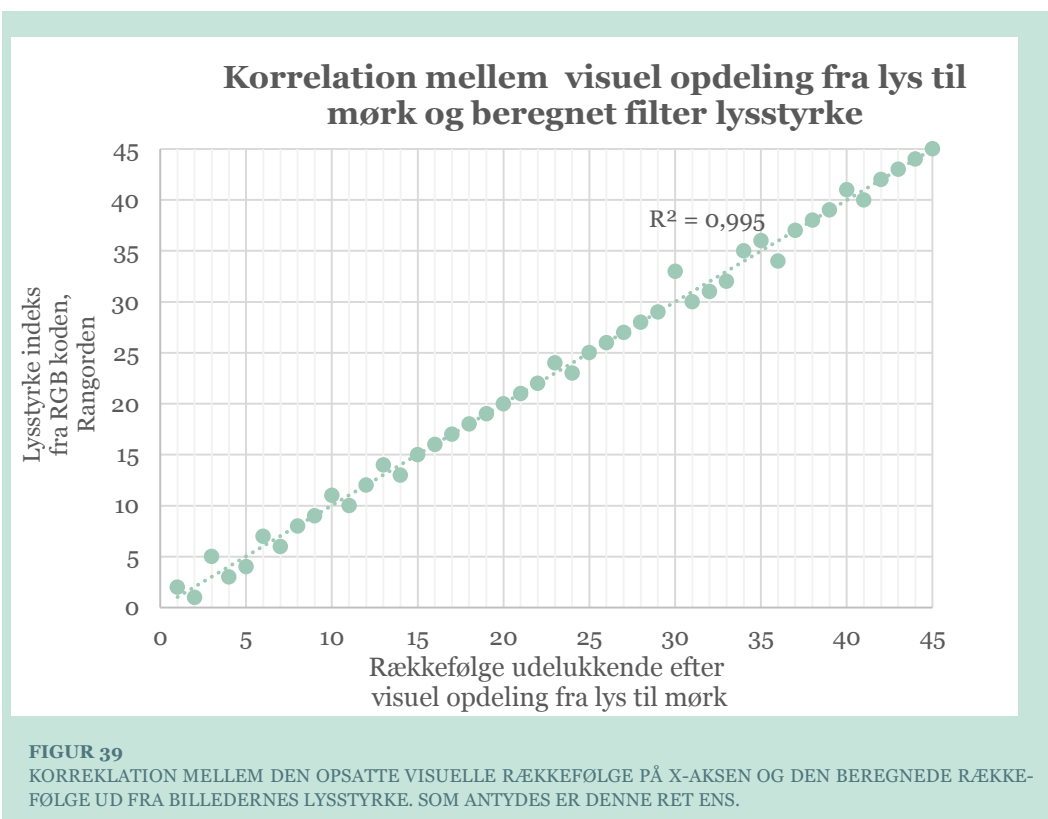
Med det undersøgte data har det ikke været muligt at finde en sammenhæng mellem EC og de øvrige målte emissionsparametre på middelværdierne. Derimod er der fundet en sammenhæng mellem farven afsat på filterne mellem de 45 primærfiltre fra målekampagnen og fra LCB oven T og den analyserede EC værdi, som afbilledet nedenfor på *Billede 13*.



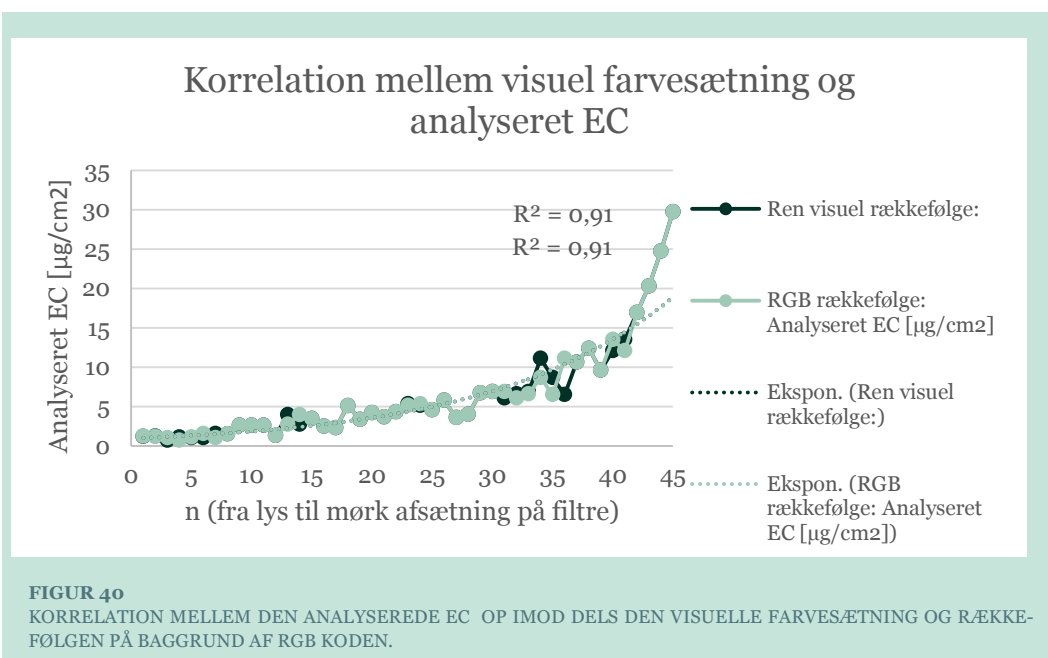
Primærfiltrene har alle fået taget billeder på samme måde (dog med håndholdt telefonkamera og naturligt tilgængelig lys på pågældende tidspunkt), som er blevet fysisk udprintet og opstillet fra lys til mørk. Derudover er de enkelte billeder undersøgt teknisk (uden forbehold taget for de enkelte billeders kvalitet). Det enkelte filters RGB-kode kan benyttes til at beregne farvernes lysstyrke/kontrast. Indenfor web design har standardiseringsrådet World Wide Web konsortium (W3) udviklet en formel for hvordan en farves lysstyrke/kontrast beregnes (Enfoquelatino, 2013):

$$\text{Lysstyrke} = (299 \times R + 587 \times G + 114 \times B) / 1000$$

Korrelationen mellem den beregnede rækkefølge og den visuelle rækkefølge er meget lineær, se *Figur 39*, hvilket vil sige, at den visuelt opsatte rækkefølge også teknisk er den tilnærmelsesvis korrekte beregnede rækkefølge ud fra billedernes lysstyrke.



Med denne viden omkring det visuelle udtryk er på plads, kan man opsætte korrelation mellem den målte EC værdi på filteret. Sammenligningen mellem farven og den analyserede værdi giver en eksponentiel korrelation på $R^2=0,91$ - både for den visuelt opsatte rækkefølge og den beregnede rækkefølge ud billedernes lysstyrke. Korrelationerne er afbilledet i *Figur 40*.



Hvis der derimod opstilles en korrelation mellem den korrekte opstillede rækkefølge og den beregnede EC [just. part. g/kg(tørstof)], falder denne til et lavere niveau, hvor det bliver mere tilfældigt (eksponentiel $R^2=0,76$ og lineær $R^2=0,67$).

5. Formidlingsaktiviteter i projektperioden

Løbende branchemøder (2015-2017)

Der er løbende afholdt branchemøder med og for de interesserede DAPO-medlemmer, som ikke har været med til styregruppemøderne. Dette er gjort for at opretholde interessen for projektet og fremvise de foreløbige resultater for dem, som skulle være interesserede.

Præsentation for ICCI

I projektets spæde start blev formål og forløb præsenteret for ICCI's "bestyrelse" (interesseorganisation mod bevarelse af polerne - International Cryosphere Climate Initiative) til stor interesse for de medhørende.

Standardiseringsmøder WG5+6 (2015-2017)

Projektet er ved flere lejligheder taget op på flere standardiseringsmøder til både præsentation og diskussion i WG5 og 6, hvor både Jes Sig Andersen (Teknologisk Institut) og Peter K. Søren (Jotul Group og teknisk udvalg i DAPO) har deltaget.

EUBCE, Amsterdam NL – Poster presentation (2016)

Projektet blev i efteråret 2015 udvalgt via et indsendt abstrakt til at blive præsenteret med en visual poster presentation. Dette foregik ved: 24th European Biomass Conference and Exhibition den 6.-9. Juni 2016.

Fagligt seminar TI (2016)

Teknologisk Institut afholdt 24. august det årlige faglige seminar for interessenter på biomasseområdet. Her blev der på "Brændeovns-sporet" fremlagt foreløbige projekresultater for de tilmeldte, som en fast del af dagen program.

International Bioenergi Conference, Manchester UK – Poster presentation (2017)

Projektet blev ligeledes i efteråret 2016 udvalgt via endnu et indsendt abstrakt til at blive præsenteret med endnu en visual poster presentation. Dette foregik ved International Bioenergy Conference 2017 i Manchester den 22.-23. marts 2017.

Referencer

- Bond, T. C., Doherty, S. J., Fahey, D. W., Forster, P. M., Berntsen, T., DeAngelo, B. J., Flanner, M. G., Ghan, S., Karcher, B., Koch, D., Kinne, S., Kondo, Y., Quinn, P. K., Sarofim, M. C., Schultz, M. G., Schulz, M., Venkataraman, C., Zhang, H., Zhang, S., Bellouin, N., Guttikunda, S. K., Hopke, P. K., Jacobson, M. Z., Kaiser, J. W., Klimont, Z., Lohmann, U., Schwarz, J. P., Shindell, D., Storelvmo, T., Warren, S. G., and Zender, C. S. (2013). *Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment*, J. Geophys. Res., 118, 5380–5552.
- Janssen, N., Gerlofs-Nijland, M. E., Lanki, T., Salonen, R. O., Cassee, F., Hoek, G., Fischer, P., Brunekreef, B., Krzyzanowski, M. (2012). *World Health Organisation, Regional office for Europe: Health effects of black carbon*, 96pp.
- Lack, D. A., Moosmüller, H., McMeeking, G. R., Chakrabarty, R. K. and Baumgardner, D. (2013). *Characterizing elemental, equivalent black, and refractory black carbon aerosol particles techniques, their limitations and uncertainties*. Analytical and bioanalytical Chemistry. 48pp.
- Petzold, A., Ogren, J. A., Fiebig, M., Laj, P., Li, S.-M., Baltensperger, U., Holzer-Popp, T., Kinne, S., Pappalardo, G., Sugimoto, N., Wehrli, C., Wiedensohler, A. and Zhang, X.-Y. (2013). *Recommendations for reporting “black carbon” measurements*. Atmos. Chem. Phys., 13, 8365–8379.
- Quinn, P.K., Stohl A., Arneth, A., Berntsen, T., Burkhardt, J. F., Christensen, J., Flanner, M., Kupiainen, K., Lihavainen, H., Shepherd, M., Shevchenko, V., Skov, H. and Vestreng, V. (2011). *The impact of black carbon on arctic climate. Arctic Monitoring and Assessment Programme (AMAP)*, Oslo. 72 pp.
- Quinn, P. K., Stohl, A., Arnold, S., Baklanov A., Berntsen, T. K., Christensen, J. H., Eckhardt, S., Flanner, M., Klimont, Z., Korsholm, U. S., Kupiainen, K., Langner, J., Law, K., Monks, S., Salzen, K. v., Sand, M., Schmale, J., Vestreng, V., (2015). *AMAP Assessment 2015: Black Carbon and ozone as Arctic climate forcers. Arctic Monitoring and Assessment Programme, (AMAP)*, Oslo, Norway. vii + 116 pp.
- UNEP, Governing Council of the United Nations Environment Programme (2011). *Integrated Assessment of Black Carbon and Tropospheric Ozone: Summary for decision makers*. 37pp.
- U.S. Environmental Protection Agency (2010). *Report to Congress on Black Carbon*. Department of the interior, Environment, and Related Agencies Appropriations act, EPA-450/R-12-001.
- U.S. Environmental Protection Agency, RIA (2015): *Regulatory Impact Analysis (RIA) for Residential Wood Heaters NSPS Revision*, Final report. EPA-452/R-15-001, Side 7-30 til 7-33.

Web:

- MST (2014). Miljøstyrelsens hjemmeside: Nye krav til Brændeovne i Europa giver renere luft: <http://mst.dk/service/nyheder/nyhedsarkiv/2014/okt/nye-krav-til-braendeovne-i-europa-giver-renere-luft/>. Dato 28-10-2014

- Ossfoundation.us. (2015). Omkring Climate Forcing:
<http://ossfoundation.us/projects/environment/global-warming/radiative-climate-forcing>
- Sunset Laboratory (2015). Omkring Sunset Laboratory, som udfører EC-OC analyser:
<http://www.sunlab.com/>
- Enfoquelatino (2013). Omkring lysstyrker:
<http://www.enfoquelatino.com/hvordan-man-beregner-farvekontrast/> Dato: 17/12/2013

Bilagsoversigt

Bilag 1 - Måleprocedure udviklet til måling af BC fra brændeovne.....	s.103
Bilag 2 - Bestemmelse af usikkerhed på vejning af quartzfiltre.....	s.116
Bilag 3 - Sodprøve på eksperimenterende plan.....	s.118
Bilag 4 - Samlet data fra målekampagnen.....	s.119
Bilag 5 - CFD simulering af brændkammer.....	s.125
Bilag 6 - Data inklusiv LCB ovn T.....	s.134
Bilag 7 - Sammenligninger på ovnen ud fra målte parametre.....	s.139

Bilag 1 Måleprocedure udviklet til måling af BC fra brændeovne.

Oversigt over tilhørende ark til procedure:

- 1 – Målebetingelser
- 2 – Måleprogram
- 3 – Måleprocedure – Opstilling og klargøring til måling
- 4 – Måleprocedure – stopkriterium
- 5 – Måleprocedure – Optænding og mellemfyring
- 6 – Måleprocedure – Halv spjæld
- 7 – Måleprocedure – Fuld spjæld
- 8 – Måleprocedure – Faseopdelt, 3 faser

Inden målekampagne:

Den udvalgte ovn fra den enkelte producent fyres til hjemmefra, så maling afbrændes og vermiculite udtørres. Stopkriterier, prøveklods og spjældindstillinger testes inden ankomst til prøveperioden, så de tilhørende ark er forstået.

1 Beskrivelse af de valgte målebetingelser

Vi har forsøgt at fastlåse så mange variabler som muligt, for derved bedre at muliggøre sammenkædning mellem måleresultater og ovnens geometri og luftsystem.

Egenskab	Valg	Overvejelser
----------	------	--------------

Brænde	Birk, uden bark	Antændes let, gængs brændsel, ofte benyttes under typeprøven.
Røgtræk	Fast 12 Pa, $\pm$ 1 Pa	Sammenlignelighed med typeprøven, 'uangribeligt' valg.
Brændemængde	Mængde der er brugt til EN-test (nominel), som oplyst i fabrikantens vejledning, eller, hvis ikke oplyst, så beregnet ud fra NHO og 45 min påfyrringsinterval. 150% prøve ved X1,5 mængde.	Tillader sammenligning mellem det ovnen er optimeret til, og stresstilstand ved større brændemængde. Mulig tydeligere årsagssammenhæng ved større mængde. 150% prøven skal være et ekstra stykke træ i fht. 100% brændemængden.
Udtagning af PM/BC prøve	Udtagning fra fortyndingstunnel, afsætning på NS filtre af Quartz.	Der benyttes en studs på filterholderen af størrelse 5,9mm, samtidig nedsættes flowet til en hastighed på 4,4m/s (alm. NS hastighed) for at undgå overfyldte filtre.
PM-Filtre	110 mm Quartzfiltre og NS filterstation.	Kun det tilsværtede primærfilter skal indsendes til analyse. Backup filtret kan genanvendes, hvis det stadig er ufarvet (hvidt).
PM-Samlingsperiode	Der måles over hele perioden, dog fraregnet et par minutter til sidst af hensyn til filterskift	Brug to filterstationer, og byt om i slutningen af den forudgående måleperiode.
Yderligere målinger	CO ₂ , CO, OGC, (NO _x), Røgt-temp.	Der måles under hele fyringsperioden og sammenholdes med PM/BC målingerne.
Spjældindstilling	<u>Opstart:</u> 3 min. Fra lågen sættes på klem/lukkes, hvor alt er tilladt. <u>Halv spjæld:</u> Indstillingen midtvejs på spjældgrebets vandring, mellem lukket og 100% åben (forbrændingsluft). <u>Fuld spjæld:</u> 100% åben forbrændingsluft. Evt selvstændigt primærspjæld benyttes kun under opstart, hvorefter det skal være lukket.	Opstartstiden kan forøges op til 5 min i alt, hvis det er nødvendigt. Undgå så vidt muligt at holde lågen på klem. Fravalg af indstillingen der svarer til nominel ydelse, da indstillingen kan være vanskelig at ramme. Prøve ved lav ydelse er fravalgt, da den kan være vanskelig at udføre ensartet og tager længere tid. Lavlast vil bare være en unødvendig kilde til unødige variationer.
Optænding og forfyring	Valgt som en samtidig funktion. Der skal bruges top-down optændingsmetode (se ark 5).	Vi ønsker at måle emission under optænding og forfyring. Det kan tillades at justere bålet 1 gang i løbet af optændingen – max 10 sek.
Mellemfyring forud for målingerne	Tilvalgt, varighed ca 20-30 min. Der benyttes 3 pinde á ca. 300 gram (se ark 5).	Mellemfyringen er tilvalgt for at sikre et godt og relativt ensartet glødelag til målingerne, da vi ikke ved hvad kvalitet glødelag top-down optændingen afleverer.
Start af første måling efter mellemfyringen	Der fyres på efter det generelle stopkriterium (se ark 3).	Vi ønsker gode og ensartede start betingelser for den første måling. Brug af vægt eller CO ₂ -% giver ikke samme grad af sikkerhed ved starten af første måling.
Start af efterfølgende målinger	Der fyres på efter det generelle stopkriterium (se ark 6-7-8).	Vi ønsker at der i målingen indgår noget af udglødningsfasen, så den aktuelle værdi skal muligvis justeres lidt i op- eller nedadgående retning.

2 – Måleprogram for 2 dages målekampagne i ELAB

	Dag 1	BC	Dag 2	BC
9:00	Opstilling af ovn, klargøring af prøvestand, filtre, brænde (se ark 1-4)		Måling over optænding og forfyring (se ark 4+5)	x1
	Måling over optænding og forfyring (se ark 4+5)		Mellemfyring ca 20-30 min (se ark 4+5)	
	Mellemfyring ca. 20-30 min (se ark 4+5)		Måling ved halv spjæld og 100% brænde (se ark 4+6)	x1
	Måling ved halv spjæld 100% brænde (se ark 4+6)		Måling ved halv spjæld og 150% brænde (se ark 4+6)	x1
	Måling ved halv spjæld 100% brænde opdelt i tre delperioder (se ark 4+8)	x3	Måling ved fuld spjæld og 100% brænde (se ark 4+7)	x1
			Måling ved fuld spjæld og 150% brænde (se ark 4+7)	x1
			(disponibel)	
15:00	Slut			

Under hele fyringsperioden måles CO₂, CO, (NO_x), OGC og Røgtemperatur. Under udvalgte perioder opsamles PM i fortyndingstunnel på Quartz-filter i NS-filterholder. Kun forfilter benyttes, såvidt Backup-filter ikke er tilsværtet (økonomiske årsager). I alt 8 filtre sendes til EC/OC analyse.

3 – Måleprocedure – Opstilling og klargøring til måling:

Sørg for hjemmefra at brænde ovnen til, så evt. maling fra ovnen og fugt i isoleringsmateriale brændes af. Vejledningerne (alle ark) læses grundigt igennem og der forsøges at prøve de forskellige fyringer med de anviste stopkriterier, brændemængder og spjældindstillinger, så "fyringsmanden" er klar til målekampagnen på TI.

1. Dato for målinger: _____
2. Noter fabrikant: _____
3. Noter type ovn: _____
4. Tag billede med det fremlagte kamera både forfra, fra siden og med åben låge.
5. Opmål brændkammer med det fremlagte grønne målebånd og noter herunder:

Hvad	Bredde (gennemsnit)	Dybde (gennemsnit)	Højde total (til røglederplade)	Højde tertiærhul- ler
mm				

6. Grundform af brændkammer, evt. skitser herunder: _____

7. Volumen: $B \times D \times H_{\text{tertiær}} = \text{_____ m}^3$

8. Antal røglederplader: _____

9. Luftsysteem – Beskriv i ord: _____

Luft	Primær luft	Pilot luft	Optændings- anordning	Sekundær	Tertiær 1	Tertiær 2
Til stede	☐	☐	☐	☐	☐	☐
mm ²						

10. Mål lækage (hjælp til dette af TI personale):

5	10	15	25	Pa
				m ³ /h

11. Tarér vægt og noter vægt (se billede nederst): _____ kg.
12. Opsætning af brændeovn og EN-måleskorsten (hjælp til dette af TI personale).
13. Rensning af sonder (hjælp til dette af TI personale) og påsætning af disse på skorsten.
14. Når alt sidder på vægten tareres denne igen.
15. Træk indstilles til 12Pa (hjælp til dette af TI personale).
16. Udstyr kalibreres (hjælp til dette af TI personale).
17. Sample hastighed tjekkes med tunnel hastighed (TI personale)
18. Når træk og udstyr er klar, gøres der klar til optænding.
19. Filtre, brænde (evt. til hele dagen) og hjælpeskema gøres klar. Der kan benyttes specielt digitalt hjælpeskema til prøverne, men hvis der foretrækkes manuel opskrivning i hånden, så kan dette godt accepteres.
20. Alt noteres; Tidspunkter for hver aktivitet, indfyringstidspunkter, spjældindstillinger, brænde vægt, brænde størrelse, brændeopstilling, filterisætning, filtervægt (før og efter), filter udsuget volumen (før og efter), CO₂ og Røgtemperatur ved påfyring, evt. problemer noteres også.

21. Se billeder herunder for nærmere procedure for vægt, brænde, filtre, udsuget volumen.
22. Nominel vægt: _____ kg, _____ 1,5x Nominel vægt: _____ kg

23. Beskriv brændeklods: _____



Vægt til ovnen:

Stand D: Grøn knap tarerer vægten, så den nulstilles.

Dette gøres før ovn sættes op på vægt, hvorefter ovnens vægt noteres. Der trykkes igen efter skorsten og udstyr er sat på, og målingerne kan begynde.

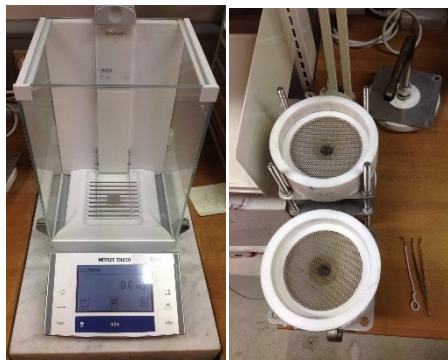


Vægt til brænde:

Brænde tilpasses med motorsav, kløver og økse og vejes på vægt i brænderumme. Vægt noteres i hjælpeskema eller på manuelt ark.

Både vægt, størrelse og opstilling noteres ved hver fyring.

Der kan med fordel laves alt træ til dagen på 1 gang, så man ikke behøver at koncentrere sig om dette i løbet af fyringerne.



Filtre klargøres: Filterholder isættes i monteringsholderen til venstre for vægten og åbnes ved at afmontere de 8 møtrikker (4 på toppen og 4 nederst). Filtrene ligger fremme nummereret med et bogstav efterfulgt af et tal. Filtre nummereret med tal bruges som primærfilter/forfilter, og filtre nummret med 4 efterfulgt af et B bruges som backup filter. For håndtering, juster og centrering af filter i holder benyttes pincet. Det er vigtigt, at filtret bliver centreret for at undgå

utætheder. Filterholder samles og møtrikker strammes igen. Filtrene skal ikke vejes, da dette gøres i en anden bygning efter tørring.



Tilslutning filterholder: Der benyttes en 5,9mm Nozzle størrelse. Inden pumpen tændes er det MEGET VIGTIGT AT TEMPERATURFØLER OG SLANGE TILSLUTTES FILTERHOLDER.

Filtersnøvsen isættes i kanalen og sættes til stre-gen på bordet. Der benyttes 2 filterholdere til metoden, så der hurtigt kan skiftes mellem fyringerne.



Kontakt til pumpen:

For at tænde pumpen trykkes på kontakten med skriften: "NS udsugning". Husk at isætte filter-temperaturføler, tilslut slange i enden til pumpen (se billede over) og sætte snøvsen ind i kanalen. Når prøven er slut slukkes for kontakten igen, og filterholderen skiftes. HUSK at aflæse gasmåler inden pumpe tændes og efter måleperioden er slut!



Gasmåler aflæses:

Gasmåleren skal aflæses og Liter eller m^3 og skal noteres ned inden pumpen tændes og efter måleperioden er slut (ved hvert filterskift)!

Der er en forsinkelse på ca. 20-30 sekunder, så vent med at notere udsuget volumen, til gasmåleren har talt færdigt.

For at notere i Liter aflæses hele tallet, hvoraf det sidste tal er et komma-tal: Altså aflæst: 454048,7L eller $454,0487m^3$

Filteroversigt, midlertidig:

Ovn _____ type _____ og

#: _____

Dag **1** - **Dato:** _____**1:** Type: 3-delt måling – 1. måling (10min)

Filter vægt	-1	-1B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

2: Type: 3-delt måling – 2. måling (mellem-fasen)

Filter vægt	- 2	- 2B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

3: Type: 3-delt måling – 3. måling (Glødefasen)

Filter vægt	-3	-3B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

Dag 2 - Dato: _____**4:** Type: Optænding og Forfyring (top-down)

Filter vægt	-4	- 4B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

5: Type: Halv spjæld og 100% brænde

Filter vægt	-5	-5B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

6: Type: Halv spjæld og 150% brænde

Filter vægt	-6	-6B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

7: Type: Fuld spjæld og 100% brænde

Filter vægt	-7	-7B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

8: Type: Fuld spjæld og 150% brænde

Filter vægt	-8	-8B	Udsuget liter på gasmåler
Før			
Efter			

4 – Måleprocedure - stopkriterium

Vi har forsøgt at fastlægge en stopkriterium ud fra et forholdsvist veldefinerede stadium i forbrændingsprocessen.

Egenskab	Valg	Overvejelser
Afslutning af måleperiode	<u>Ved x1 Brændemængde:</u> Målingen afsluttes indenfor et vindue, afgrænset af; CO ₂ : 5,0 – 3,0 Røgtemp: 250 – 220 °C	Det valgte stopkriterium skal sikre, både at en vis del af udglødningsforløbet måles med (helst 8-10 minutter efter at CO ₂ værdien er begyndt at falde markant), samt at der er tilstrækkelig restenergi i glødelaget til effektivt at kunne antænde det næste brændelæg. Vi har forsøgt at tage højde for at forløbet af CO ₂ kurvens sidste del kan variere fra ovn til ovn, og fra måling til måling. Nogle gange falder kurven temmelig brat, andre gange går den næsten i stå.
	<u>Ved x1,5 Brændemængde:</u> Målingen afsluttes indenfor et vindue, afgrænset af; CO ₂ : 5,0 – 3,0 Røgtemp: 270 – 240 °C	Samme stopkriterium anvendes både ved afslutningen af mellemfyringen og de efterfølgende måleperioder. Enkelte ovne passer muligvis ikke ind i det valgte stopkriterium. Juster selv grænserne, begrund dig valg, og noter ned hvad du har gjort.

5 – Måleprocedure – Optænding og mellemfyring

I diskussion af validiteten af pm målinger har vi ofte modtaget kritik for, at der ikke måles pm under start fra kold ovn. Vi har en stærk formodning om at en korrekt udført top-down optænding ikke sviner mere end en almindelig påfyring, og ønsker derfor at udnytte indeværende projekt, til at skaffe nogle systematiske data over pm emission under opstart.

Egenskab	Valg	Overvejelser	Måling af BC
Kombineret optænding og forfyring	Udføres kombineret som en samtidig funktion. Der skal bruges top-down optændingsmetode. <u>Start:</u> Der tændes op fra kold og rensed ovn. <u>Slut:</u> Prøveperioden afsluttes når CO₂ % er nede imellem 3-5 %, dog tidligst når røgtemperaturen er lavere end 250 °C, og senest når røgtemperaturen er på 220 °C	Det er oplagt at benytte dette projekt til at skaffe oplysninger om emissionerne under optænding. Ved korrekt udført top-down optænding er emissionerne ikke specielt høje. <u>Top-Down optændingsmetode:</u> I bunden placeres 2-3 stykker træ med maksimalt sammen vægt som den normale brændemængde til nominel prøve. Ovenpå, placeres lagvis ca. 1 kg pinde i aftagende tykkelse. Bålet antændes ved rigeligt brug af bio tændblokke. Spjældindstillingen: 100% åben forbrændingsluft. Opstartsluft efter behov, de første 5-10 minutter. Sammensætningen af brændestykker og pindebrænde skal være således at der sikres god antænding af brændet, inden pindene er brændt ud. Det kan evt være nødvendigt at sætte spjældet ned på 50% efter et stykke tid, hvis bålet brænder alt for voldsomt. Skriv ned hvad i gør. Det kan tillades at bålet justeres 1 gang i løbet af optændingen – max 10sek åben låge.	JA
Mellemfyring forud for målingerne	Varighed ca 20-30 min. Der benyttes 3-4 pinde på tilsammen ca 1 kg <u>Start:</u> Mellemfyringen påbegyndes i direkte forlængelse af optændingen <u>Slut:</u> Mellemfyringen standses efter det universelle stopkriterium, defineret som et 'vindue' af parvise værdier af røgtemperatur og CO₂.	Mellemfyringen er valgt for at sikre et godt og relativ ensartet glødelag til at starte den efterfølgende måleperiode, hvor der er tilstrækkelig med energi til at sikre en hurtig opstart. (Det vides ikke præcist, hvilken kvalitet glødelag top-down optændingen afleverer fra ovn til ovn) Hvis ikke der er opbygget tilstrækkeligt med gløder iløbet af optænding og mellemfyring, gentages mellemfyringen.	NEJ

6 – Måleprocedure – Fyring med spjældet halvt åben

Selve målingerne udføres over 2 forskellige spjældindstillinger og to forskellige prøveklodser, altså 4 kombinationsmuligheder i alt. Første dag benyttes 50% spjæld og 100% prøveklods for at komme rigtig ind i rutinen og blive fortrolig med filterskift. Samtidig sikrer 1. dag den 3-delte måling over 1 fyring, så vi kan få et indblik i, hvornår BC fremkommer under fyringen. 2. dag benyttes alle 4 muligheder: 50% spjæld ved hhv. 100% og 150% prøveklods. Efterfølgende skrues op på 100% spjæld ved hhv. 100% og 150% prøveklods. Der måles emission af BC under alle kombinationer

Egenskab	Valg	Overvejelser
Måling tæt på nominal ydelse	Måling ved 50% spjæld og 100% prøveklods <u>Start:</u> I direkte forlængelse af mellemfyringen eller den forudgående prøveperiode <u>Slut:</u> Prøven standses når stopkriteriet er opnået	Det formodes at ovnen er istand til at kontrollere emissionerne rimeligt ved denne kombination af klods og spjæld.
Måling med overload af brænde	Måling ved 50% spjæld og 150% prøveklods <u>Start:</u> I direkte forlængelse af sidste fyring med 100% klods. <u>Slut:</u> Prøven standses når stopkriteriet er opnået	Det forventes at den forøgede (men i øvrigt ret realistiske) brændemængde vil provokere ovnen til tydeligt forhøjede emissioner. 150% prøveklods er 1 ekstra stykke træ ovenpå, i forhold til den nominelle prøveklods på 100%.

7 – Måleprocedure – Fyring med spjældet fuldt åben

Selve målingerne udføres over 2 forskellige spjældindstillinger og to forskellige prøveklodser, altså 4 kombinationsmuligheder i alt. Første dag benyttes 50% spjæld og 100% prøveklods for at komme rigtig ind i rutinen og blive fortrolig med filterskift. Samtidig sikrer 1. dag den 3-delte måling over 1 fyring, så vi kan få et indblik i, hvornår BC fremkommer under fyringen. 2. dag benyttes alle 4 muligheder: 50% spjæld ved hhv. 100% og 150% prøveklods. Efterfølgende skrues op på 100% spjæld ved hhv. 100% og 150% prøveklods. Der måles emission af BC under alle kombinationer

Egenskab	Valg	Overvejelser
Måling over nominel ydelse	Måling ved 100% spjæld og 100% prøveklods <u>Start:</u> I direkte forlængelse af den forudgående prøveperiode <u>Slut:</u> Prøven standses når stopkriteriet er opnået	Det formodes at ovnen med spjældet fuldt åben har lavere emission af BC, idet risikoen for luftunderskud må være minimeret.
Måling med overload af brænde	Måling ved 100% spjæld og 150% prøveklods <u>Start:</u> I direkte forlængelse af sidste fyring med 100% klods <u>Slut:</u> Prøven standses når stopkriteriet er opnået	Det forventes at den forøgede (men i øvrigt ret realistiske) brændemængde vil provokere ovnen til tydeligt forhøjede emissioner, dog bør fuld lufttilførsel bevirke at emissionen er lavere end ved kombinationen halv spjæld og større prøveklods. 150% prøveklods er 1 ekstra stykke træ ovenpå, i forhold til den nominelle prøveklods på 100%.

8 – Måleprocedure – faseopdelt PM måling

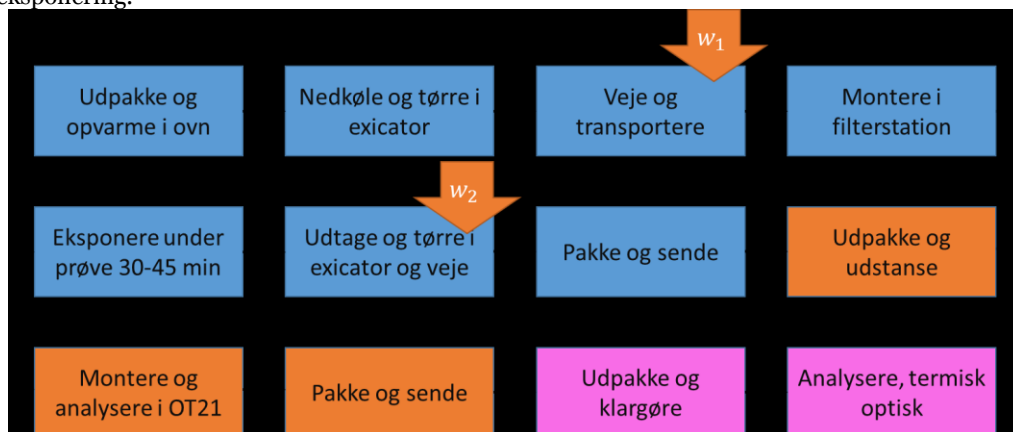
Denne måling foretages på dag 1 og skal forsøge at belyse hvornår over en forbrændingscyklus, emissionen opstår. Forbrændingscyklussen opdeles i de tre delperioder; Udtørring; stabil pyrolyse og udbrænding af kul.

Der benyttes tre filtre, et for hver delperiode. Der kræves to filterstationer.

Egenskab	Valg	Overvejelser
Måling under udtørring og begyndende afgasning	Måling ved kombinationen 50% spjæld og 100% prøveklods <u>Start:</u> Direkte efter påfyring. <u>Slut:</u> 10 minutter inde i prøven SKIFT FILTER-STATION	Det har altid været hævdet at vi unddrager os for en stor del af emissionen, ved (under den Tyske metode) ikke at måle de første 3 minutter. Her får vi isoleret bidraget for den første del af perioden, hvor CO ₂ kurven er på vej op og toppe, og der normalt er pæne bidrag af CO og OGC. Husk ved hvert skift af filterstation at notere udsuget volumen på gasmåler.
Måling under stabil pyrolyse	<u>Start:</u> Umiddelbart efter det 10. minut <u>Slut:</u> Når ilden er gået så meget ud, at CO kurven begynder at løfte sig. SKIFT FILTER-STATION	Støttekriterier. Det kan være svært at give helt klare retningslinjer for afslutningstidspunktet, men hold øje med følgende hændelser: • Ilden går ud over bålet, og der står kun en flamme i hver ende af brændet. • CO₂ kurven knækker over, ofte lige efter en kortvarig opblomstring, og begynder at falde kraftigt. • CO målingen passerer værdien 0,1% i stabil opadgående retning (for en ovn der brænder 45 minutter, vil den her delperiode typisk vare 22-27 minutter)
Måling under kuludbrænding	<u>Start:</u> I direkte forlængelse af delperioden med den stabile pyrolyse <u>Slut:</u> Prøven standses når stopkriteriet er opnået STOP FILTER-PUMPEN	Vi vil gerne have målt en del af 'halen' med, helst af en varighed på minimum 8-10 minutter. Juster evt på kriterierne, hvis ovnen standser meget brat op til sidst. Forsøg udført tyder på, at der alligevel kommer et vist bidrag i den sidste delperiode, nok fordi gasser går uforbrændte op i filtret, når blandingen ikke længere er fed nok til at kunne nære en flamme.

Bilag 2 Bestemmelse af usikkerhed på vejning af quartzfiltre

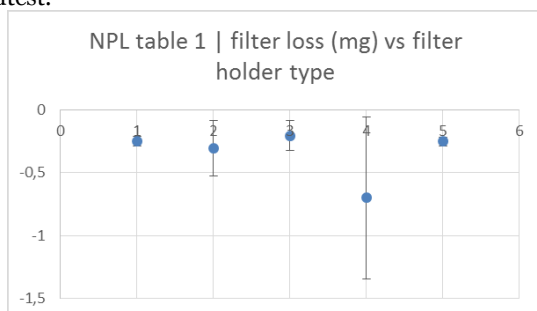
Håndtering af quartzfiltre er illustreret med procesdiagrammet nedenfor. Filtrene vejes før (w_1) og efter (w_2) eksponering for at bestemme den afsatte mængde partikler i filtreret ($\Delta w = w_2 - w_1$). Der er en række usikkerheder forbundet med den proces der foregår imellem vejningerne. Disse usikkerhedsbidrag skal kvantificeres for bedre at kunne udtale sig om den egentlige afsatte partikelmængde, på baggrund af de resultater der er opnået ved vejning af filtrene før og efter eksponering.

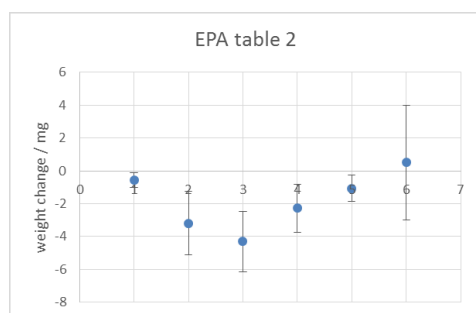


Den samlede usikkerhed, $U(\Delta W)$, på vægtforskellen bestemmes ud fra tilgængelig data omkring filterhåndteringsprocessen. Der opstår en række usikkerhedsbidrag forbundet med

1. Montering af filteret i filterholderen
2. Eksponering af filtret i sig selv
3. Afmontering af filteret
4. og analysevægtens egen usikkerhed

Der er data tilgængelige i en rapport fra NPL ("*Study into the loss of material from filters used for collecting particulate matter during stack emissions monitoring*") og i en artikel fra EPA ("*Investigation of Filter Media for Use in the Determination of Mass Concentrations of Ambient Particulate Matter*"). Disse rapporter har undersøgt, vha. blindtest, hvordan montering, afmontering og selve eksponeringen påvirker filtervægten før og efter. Analysevægtens usikkerhed fremgår af dens kalibreringscertifikat. Artiklen fra EPA og NPL viser begge at der er en vægtændring ($\Delta W < 0$) ved blindtest, men også at spredningen på de målingerne af ΔW er forholdsvis stor. Se fx nedenstående plot af værdier fra NPL tabel 2 og NPL tabel 1 der begge illustrerer vægtændringen af et filter ved blindtest.

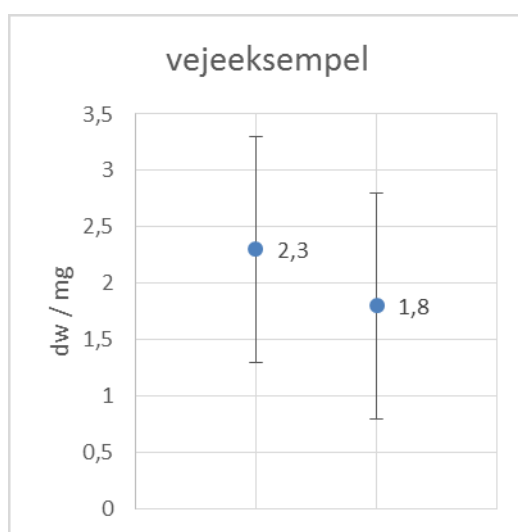




Hvis NPL's data anvendes kan vi opliste usikkerhedskomponenterne (se også excel-ark "data.xlsx"):

usikkerhedskomponent	bidrag, k=1 [mg]	inkluder?	kommentar
Laboratorievægtens usikkerhed	0,210	0,210	fra certifikat
EPA (filter håndtering)	0,540		fra CEN artikel, table 1
EPA (blindtest)	1,780		fra CEN artikel, table 2
NPL (bias)	0,342	0,342	fra NPL rapport, table 1
NPL (spredning)	0,322	0,322	fra NPL rapport, table 1
<i>kombineret usikkerhed (k=1)</i>		0,515	
Usikkerhed med 95 % konfidensniveau		1,029 mg	

NPL's data er anvendt (fremfor EPA's tilsvarende data) da disse forsøg bedst svarer til processen beskrevet ovenfor, og en usikkerhed på vejningen kan hermed beregnes $U(\Delta w) = 1,03$ mg. Usikkerheden U er beregnet med et 95 % konfidensinterval der normalt benyttes ved opgivelse af måleresultater. Et eksempel på to målinger ($\Delta w = 2,3$ og $1,8$ mg) med tilhørende usikkerheder er givet nedenfor sammen med en tabel der angiver den relative usikkerhed som funktion af den målte vægtforskel (Δw).

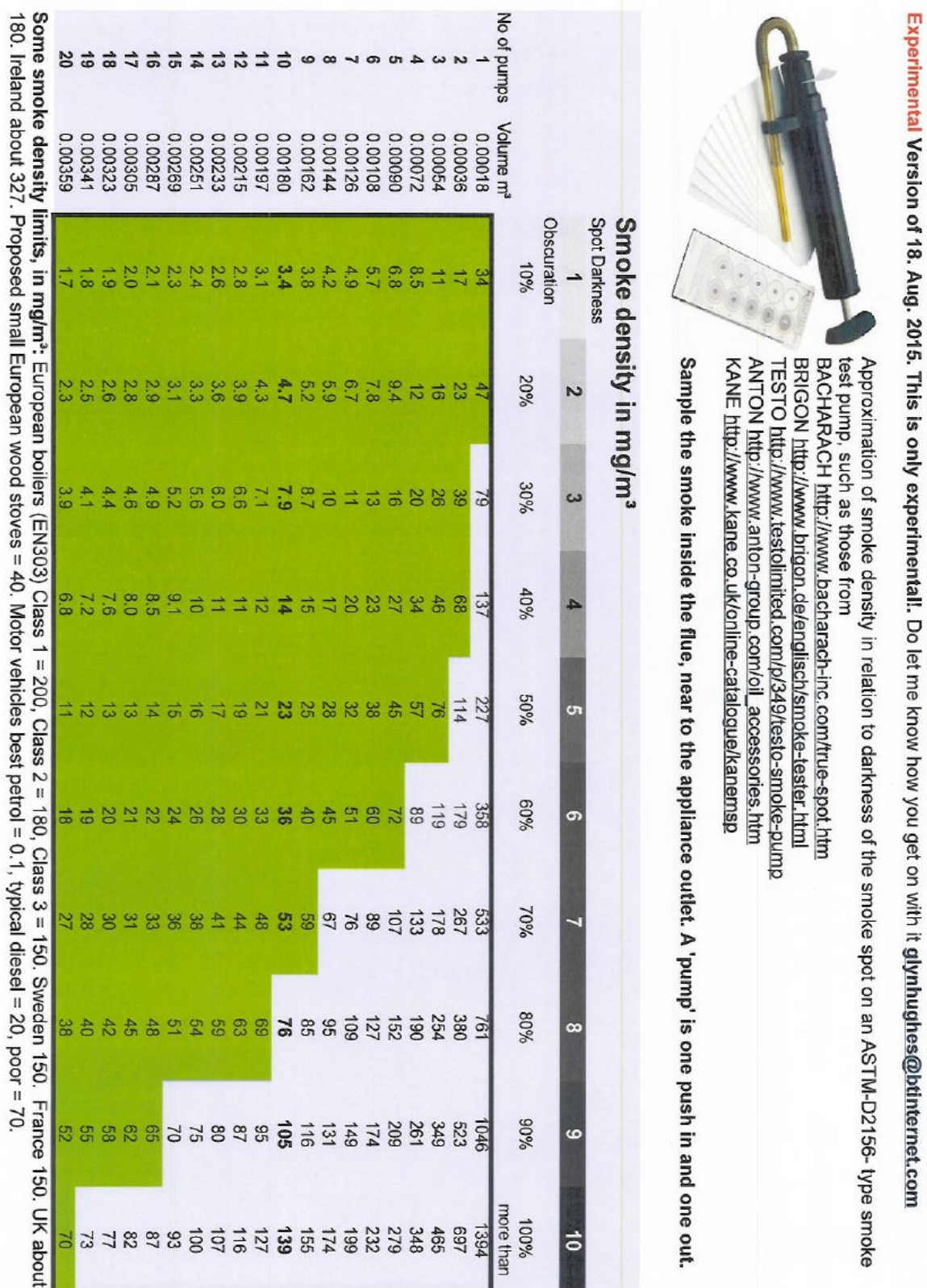


dw (mg)	2	4	6	8	10	12
U rel. (%)	51	26	17	13	10	9

Den tilgængelige datamængde er forholdsvis begrænset, hvilket gør usikkerheden på usikkerheden ret stor – vil man have en bedre karakterisering af usikkerheden i systemet bør man lave sine egne blindtests. Herudover er der i rapporterne angivet en række forhold man bør være opmærksom på, især luftfugtigheden ved konditionering og når filtret vejes kan muligvis have en stor effekt på vejeresultatet (NPL rapport).

Bilag 3 Sodprøve på eksperimenterende plan

Approximation of smoke density

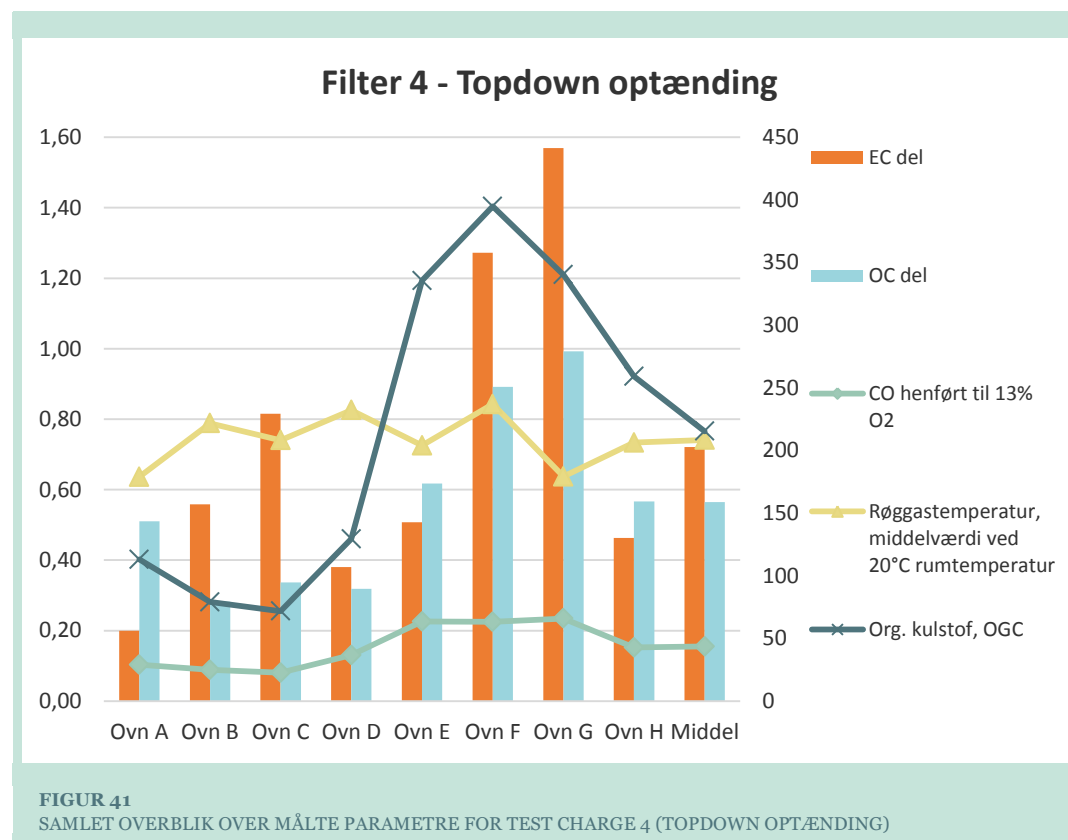


Bilag 4 Samlet data fra målekampagnen

TABEL 16

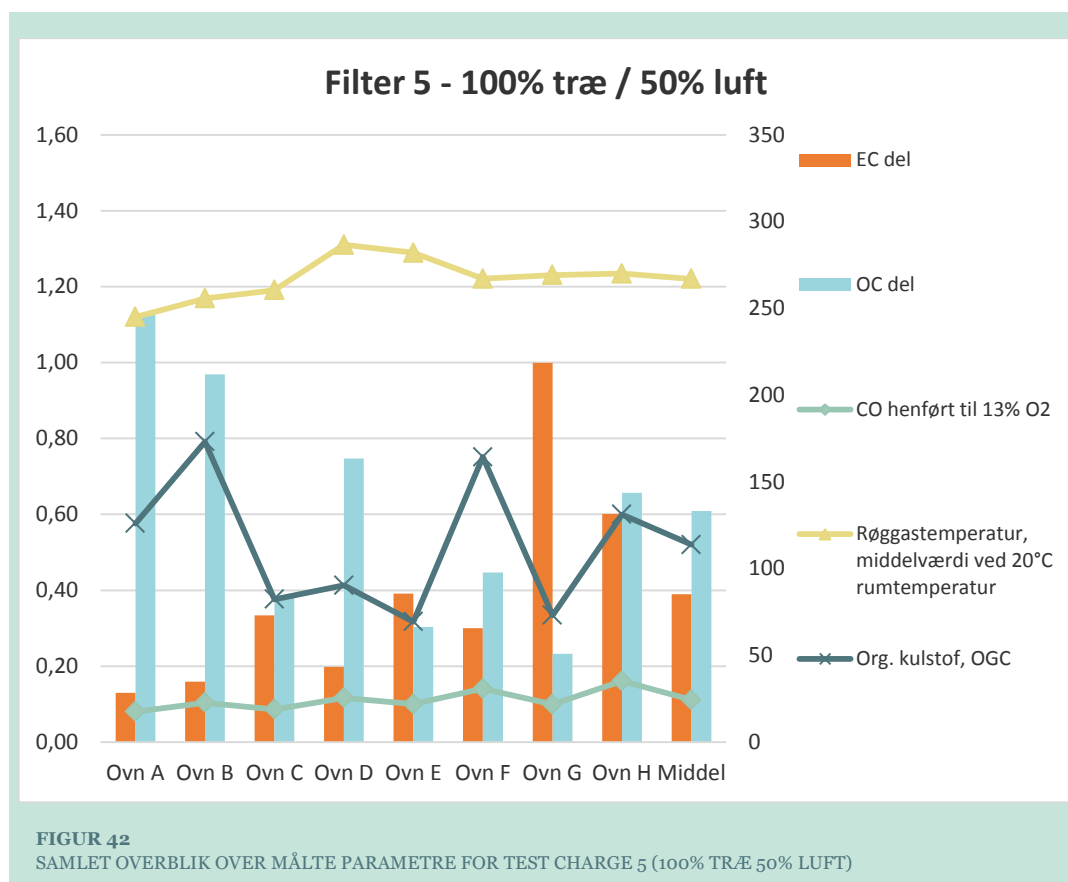
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 4 (TOPDOWN OPTÆNDING)

	Brændsel	Vægt pr. TC	Forbrug	Røggastemp	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambda	EC del	OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[mgC/m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	2+1kg	2,10	1,75	179	7,6	0,10	113	2,7	0,20	0,51
Ovn B	3+1kg	2,33	2,28	222	8,6	0,09	79	2,4	0,56	0,28
Ovn C	3+1kg	2,37	2,61	208	6,4	0,08	72	3,2	0,82	0,34
Ovn D	3+1kg	2,80	2,58	232	9,3	0,13	129	2,2	0,38	0,32
Ovn E	3+1kg	2,80	2,39	204	6,8	0,23	336	3,0	0,51	0,62
Ovn F	2+1kg	2,37	2,50	237	8,0	0,23	395	2,5	1,27	0,89
Ovn G	2+1kg	2,44	2,24	179	6,9	0,23	340	2,9	1,57	0,99
Ovn H	2+1kg	2,03	2,49	206	7,3	0,15	259	2,8	0,46	0,57
Middel		2,40	2,36	208	7,6	0,16	215	2,7	0,72	0,56



TABEL 17
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 5 (100% TRÆ 50% LUFT)

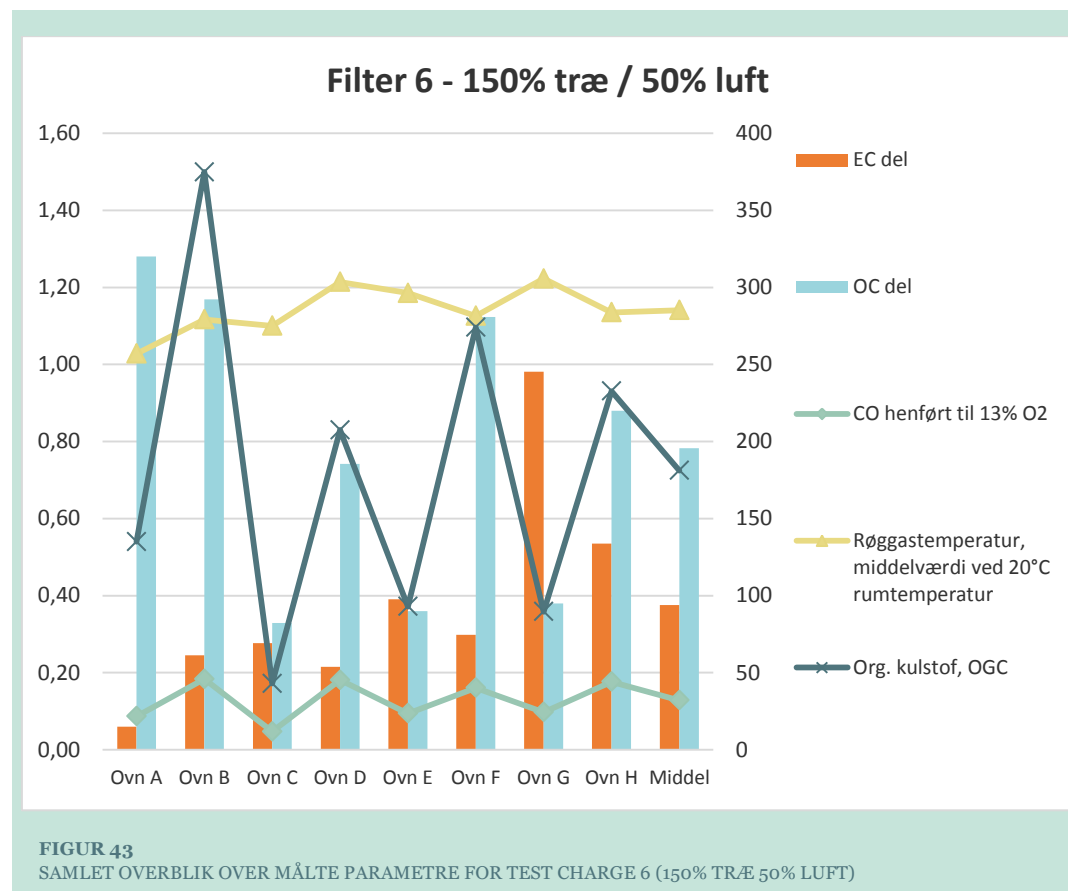
	Brænd sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røgga- ga- stemp	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lamb- da	EC del	OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	2,00	1,15	1,47	245	8,5	0,08	126	2,4	0,13	1,13
Ovn B	2,00	1,34	1,50	256	8,8	0,10	173	2,3	0,16	0,97
Ovn C	2,00	1,31	1,74	261	7,2	0,09	82	2,8	0,33	0,38
Ovn D	3,00	1,81	2,00	287	9,9	0,12	90	2,1	0,20	0,75
Ovn E	2,00	1,80	1,85	282	7,9	0,10	69	2,6	0,39	0,30
Ovn F	2,00	1,36	1,78	267	9,2	0,14	164	2,2	0,30	0,45
Ovn G	2,00	1,83	2,15	269	7,9	0,10	73	2,6	1,00	0,23
Ovn H	2,00	1,12	1,69	270	10,4	0,16	131	1,9	0,60	0,66
Middel	2,13	1,46	1,77	267	8,7	0,11	114	2,4	0,39	0,61



TABEL 18

SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 6 (150% TRÆ 50% LUFT)

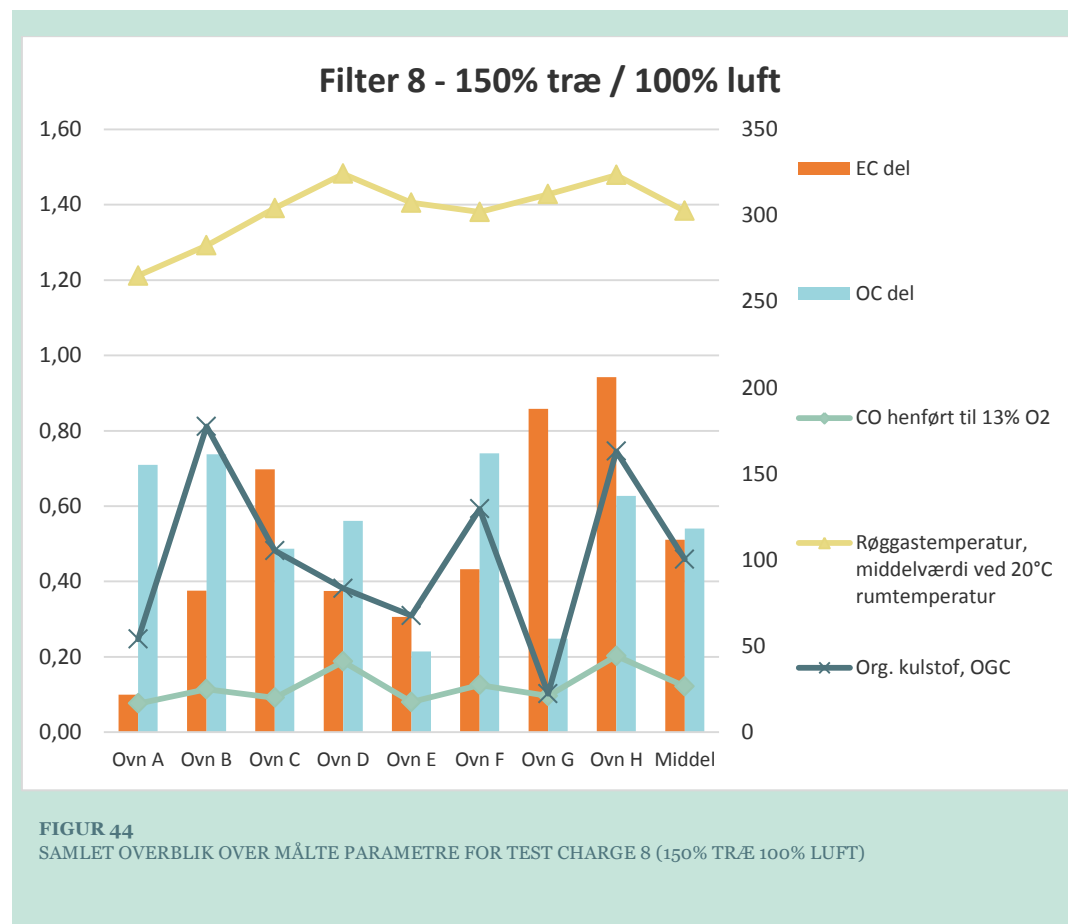
	Brænd sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røgga- ga- stemp	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lamb- da	EC del	OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	3,00	1,72	1,81	257	9,7	0,09	135	2,1	0,06	1,28
Ovn B	3,00	2,01	2,10	279	12,5	0,18	375	1,6	0,25	1,17
Ovn C	3,00	1,99	2,46	275	9,1	0,05	43	2,3	0,28	0,33
Ovn D	4,00	2,72	2,43	303	11,4	0,18	207	1,8	0,22	0,74
Ovn E	3,00	2,70	2,40	296	9,1	0,09	93	2,2	0,39	0,36
Ovn F	3,00	2,02	2,19	282	11,4	0,16	274	1,8	0,30	1,12
Ovn G	3,00	2,76	2,77	306	9,4	0,10	90	2,2	0,98	0,38
Ovn H	3,00	1,72	2,24	284	11,6	0,18	233	1,7	0,53	0,88
Middel	3,13	2,20	2,30	285	10,5	0,13	181	2,0	0,38	0,78



TABEL 19

SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 8 (150% TRÆ 100% LUFT)

	Brænd sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røgga- ga- stemp	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lamb- da	EC del	OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	3,00	1,73	1,56	265	9,3	0,08	54	2,2	0,10	0,71
Ovn B	3,00	2,02	2,04	283	11,3	0,11	177	1,8	0,38	0,74
Ovn C	3,00	2,02	2,57	304	9,3	0,09	105	2,2	0,70	0,49
Ovn D	4,00	2,72	2,37	324	9,3	0,19	83	2,2	0,37	0,56
Ovn E	3,00	2,70	2,43	307	7,9	0,08	68	2,6	0,31	0,21
Ovn F	3,00	2,05	2,13	302	9,8	0,13	130	2,1	0,43	0,74
Ovn G	3,00	2,76	2,48	312	8,6	0,10	22	2,4	0,86	0,25
Ovn H	3,00	1,70	2,18	323	9,4	0,20	163	2,1	0,94	0,63
Middel		2,21	2,22	303	9,4	0,12	100	2,2	0,51	0,54



FIGUR 44

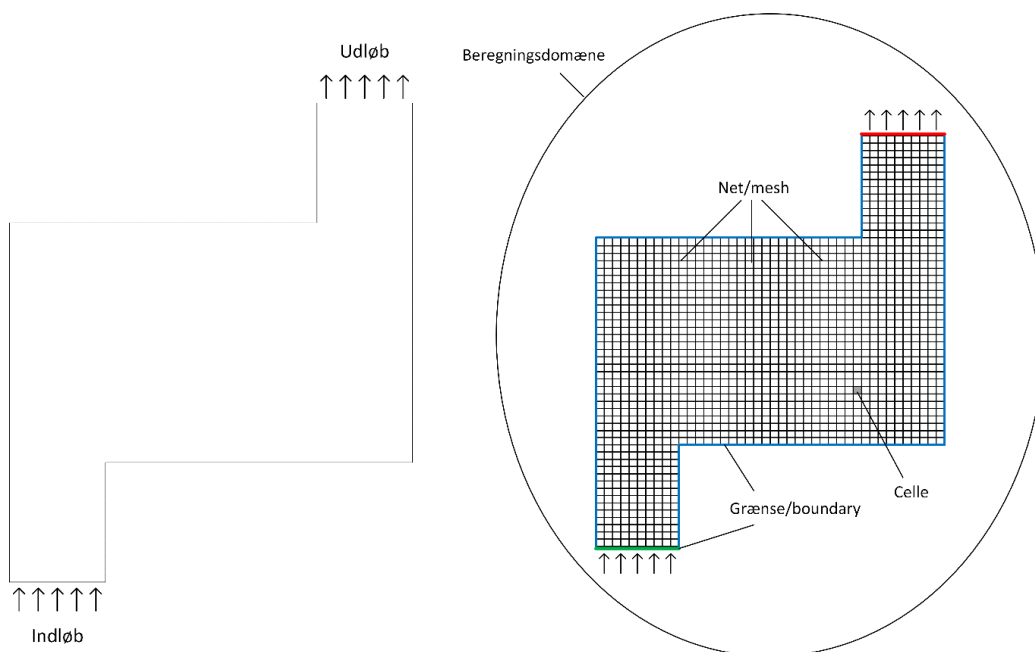
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 8 (150% TRÆ 100% LUFT)

Bilag 5 CFD simulering af brændkammer

Der er opbygget en virtuel model af hele det indvendige luftvolumen i forbrændingskammeret. Ved at sætte denne model op med relevante grænsebetingelser og fysiske tilstandsstørrelser i et CFD software, er der foretaget simuleringer af luftflowet igennem brændkammeret. Resultatet af simuleringerne vil være viden omkring luftens fordeling samt tryk- og temperaturforhold både i selve brændkammeret samt lufttilførselskanalerne. Formålet med CFD simuleringerne er derfor at kunne afsløre eventuelle uhensigtsmæssigheder med hensyn til luftflowet igennem brændeovnen, hvilket er afgørende for forbrændingsprocessen i ovnen.

CFD – Computational Fluid Dynamics

Som skrevet i overskriften er CFD den engelske forkortelse for ”beregningsmæssig fluid dynamik” eller ”numerisk fluid dynamik”. I modsætning hertil står fx teoretisk fluid dynamik og eksperimentel fluid dynamik. Indenfor CFD kan der altså regnes på den dynamiske udvikling af et givent fluid flow der er underlagt en bestemt volumen, hvori det kan bevæge sig (også kaldet beregningsdomænet), samt en opsætning omkring fysikken i problemstillingen. Det være sig grænsebetingelser, stofegenskaber, tyngdekraft, energi, turbulensmodellering, kemiske reaktioner, etc.



Figur 45: CFD terminologi. Et eksempel på et virkeligt problem på venstre side. Rumlig diskretisering samt grænsebetingelser for problemet på højre side, der samtidigt viser terminologien anvendt indenfor CFD.

Arbejdsgangen i et CFD software er generelt opdelt i tre faser:

Pre-processering: Denne første fase omhandler definition og diskretisering af problemet, der ønskes simuleret. Man kan kort sagt sige, at her klargøres CFD modellen af problemet til at blive løst. I mange kommercielle CFD software er fasen splittet op i tre dele: geometri, mesh og opsætning. Først genereres den geometri, som problemet udgør, dvs. det volumen hvori strømningen kan forløbe. I tilfældet med brændkammeret, vil det sige alle indvendige volumener, hvorigennem luft kan strømme. Volumener der er helt indelukkede eller ikke har som minimum ét indløb og ét udløb er derfor udelukket fra simuleringen, da de ikke vil have indflydelse på flowet. Den samlede geometriske udformning af problemet betegnes også ”beregningsdomænet” (se evt. figur 1).

Herefter skal den opstillede geometri ”diskretiseres”, dvs. i stedet for at regne på det totale volumen under ét deles det op via et net (mesh) til et antal små volumener (celler), som der regnes på hver især (se evt. figur 1). Hver celle fungerer som et lille kontrolvolumen, for hvilken de styrende

ligninger sættes op og løses i solveren. Genereringen af dette beregnings-net har meget stor indflydelse på kvaliteten af simuleringen. Overordnet set vil et finere net medføre større nøjagtighed på simuleringen, men det vil samtidigt kræve større beregningskraft fra det anvendte hardware. Formen på cellerne i meshet har desuden også betydning, da fx meget aflange eller spidse celler kan være en kilde til fejl. Under opsætningen defineres hvilke fysiske eller kemiske fænomener, som simuleringen skal medtage i sin løsning af problemet, som fx tilstedeværelsen af tyngdekraft. Hertil kommer opsætning af stofegenskaber og grænse- og startbetingelser. Det kan eksempelvis have stor betydning om en overflade sættes op til at have en ruhed eller være uendelig glat, om der er et indflow eller udflow af fluid gennem en flade, eller om der er en konstant temperatur eller varmeflux på en given overflade, etc. Denne definition af problemets omstændigheder specificeres under opsætningen i pre-processoren.

Løser/solver: Når problemet er defineret på tilfredsstillende vis jf. ovenstående, kan løseren sættes op og vil herefter begynde at løse problemet iterativt. Løseren kan enten løse problemet som en steady state eller transient løsning, hvilket vil sige hhv. en løsning uden tidsafhængige ændringer og en løsning, hvor problemet er afhængig af den simulerede tid. Bortsmeltning af is som følge af varmepåvirkning kunne være et eksempel på en tidsafhængig løsning, mens flowet omkring en bil, der kører ved en konstant hastighed og uden øvrige ændringer er et eksempel på et problem, som ville kunne simuleres som en steady state løsning. Løsning af problemet kan inddeles i tre trin:

Integration af de styrende ligninger for fluid flow for alle celler i domænet.

Diskretisering af integralligningerne genereret ovenfor til et system af algebraiske ligninger.

Løsning af de algebraiske ligninger ved en iterativ metode.

At løseren er iterativ betyder i praksis at den regner problemet igennem mange gange mod en stadig mere præcis løsning. Når løsningen rammer et forud opstillet kriterium for dens præcision, stopper solveren og løsningen betegnes som værende konvergeret. Omvendt, hvis løseren løbende får større og større afvigelser på simuleringens parametre fra gennemregning til gennemregning, siger man at løsningen ikke konvergerer men er divergerende. I dette tilfælde opnås der ikke brugbart resultat og man må tilbage og redefinere problemet for at eliminere kilden til divergensen (hvis man kan).

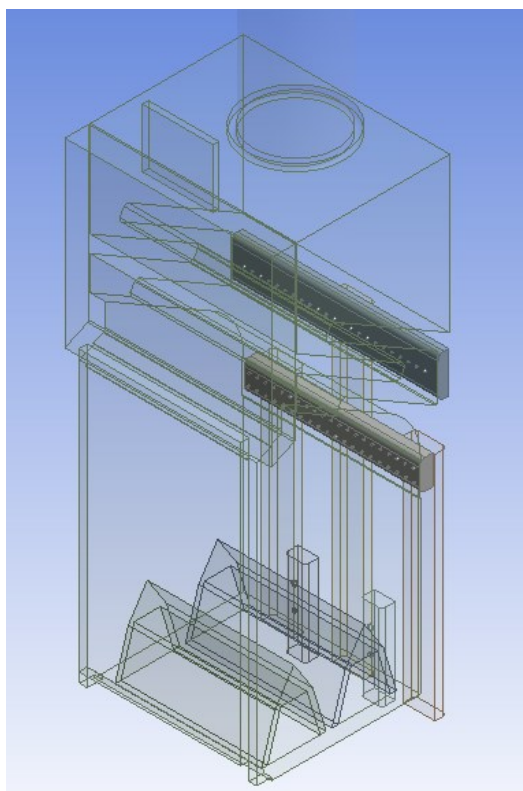
Post-processor: Post-processering dækker over de aktiviteter, der foretages efter løsningen er konvergeret og frem mod det endelige resultat. Dette vil i realitet være udlæsning af data eller visualisering af data. Løseren løser problemet med de fastsatte parametre, men det er først i post-processeringen, at de løste værdier sættes i anvendelse i form af grafer, konturplots, 2D/3D plots, overfladeplots, vektorfelter, strømlinjer, etc.

Geometri: Geometrien af brændkammerets indvendige volumen er reproduceret fra 3D CAD tegninger af brændeovnen. Nederst er valgt en snitflade ved for luftfordelingskanalerne lige over spjældene, mens der i toppen er lagt en snitflade ind ved skorstenens udløb således at hele skorstenen ikke medtages i simuleringen af brændkammeret. Skorstenens højde er sat til 1000 mm over overgangen fra brændkammer til skorsten. Hele geometrien er vist på figur 2, mens detaljer fra hhv. bund- og midter- og topsektionen af kammeret er vist på figurerne 3 til 6.

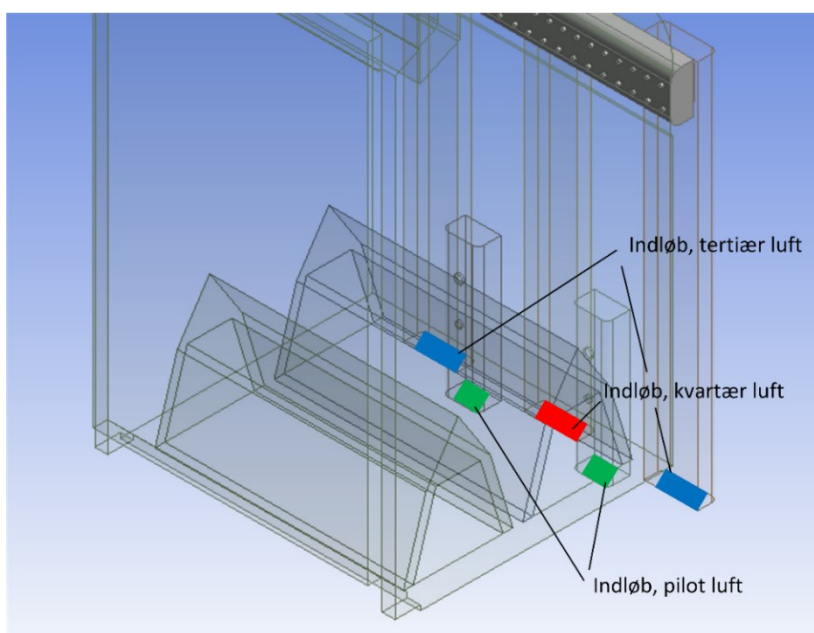
I forhold til de originale tegninger af prototypen er der lavet følgende ændringer ift. geometrien anvendt i simuleringerne: Bund hævet 30 mm samt vinkel af skråt stykke mellem døråbning og bund er ændret fra 54° til 45°. Valget omkring at hæve bunden er taget idet at der vil opbygges et askelag i bunden af ovnen under fyringen. Da der vil opbygget et sådan lag under en test af prototypen, er denne effekt medtaget i simuleringerne. Som følge heraf ændres vinklen på vermiculit-delen (ses i nederste venstre hjørne på figur 4), der er placeret mellem underkanten af døren og bunden.

Hertil kommet nogle ændringer, der minder mere om parameterstudier, nemlig ændring af udformning på lufthullerne ved spjældet til sekundærluften i toppen af brændeovnen (se figur 6). Der er udført simuleringer med hullerne, som de er vist på figur 6, samt med en geometri hvor

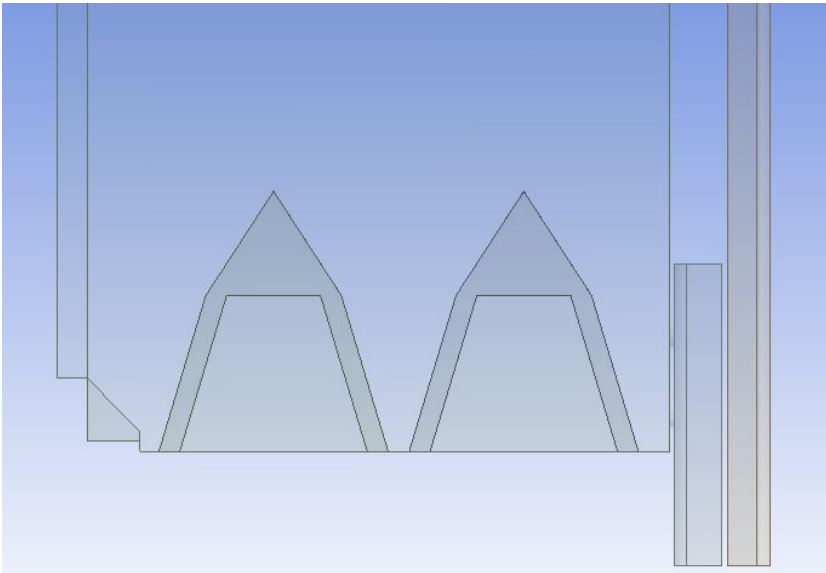
hullerne er erstattet af en langsgående spalte, som vist på figur 2. Desuden er læben ved toppen af rudeskyllet (ses i venstre side af figur 5) trukket op til 5 mm tilbage, så sekundærluften nemmere kan passere hen over denne. Disse variationer er foretaget som led i at forbedre flowstabiliteten i modellen, hvilket uddybes længere nede i denne tekst. Dimensionerne af brændet er vist på figur 7. Længden af brændet er 250 mm.



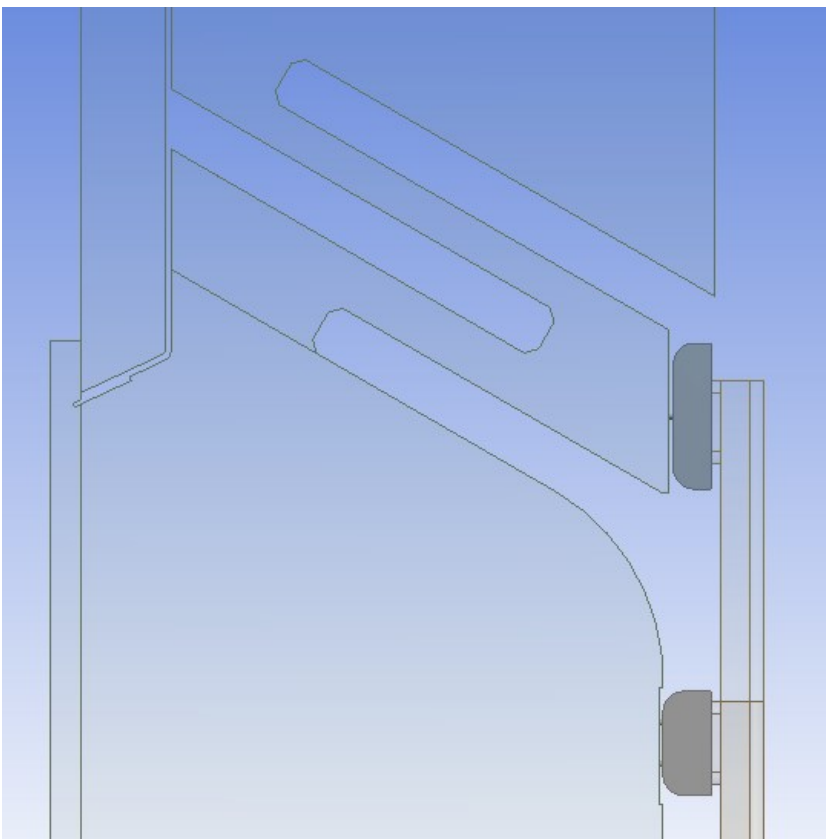
Figur 46: Brændkammerets geometri med to stykker brænde placeret på tværs i bunden. På bagsiden er de i alt fem luftkanaler placeret til hhv. pilot-, tertier- og kvartærluften. Sekundærluften/rudeskyllet har sit indløb fra toppen af ovnen tæt på fronten.



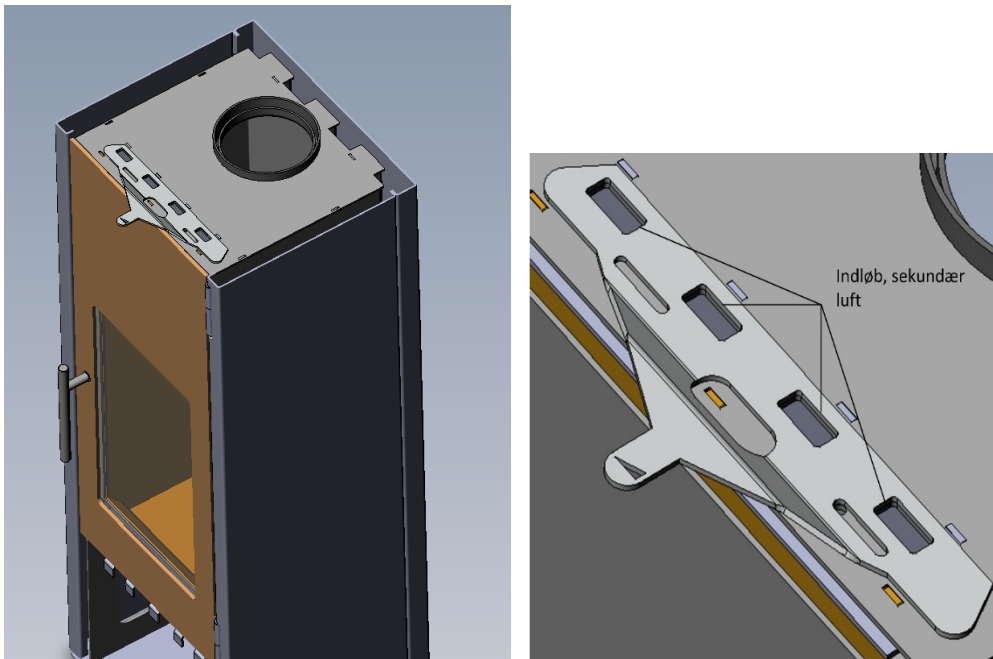
Figur 47: Bundsektion af prototypeovnen med angivelser af indløb til hhv. pilot, tertier og kvartær luft.



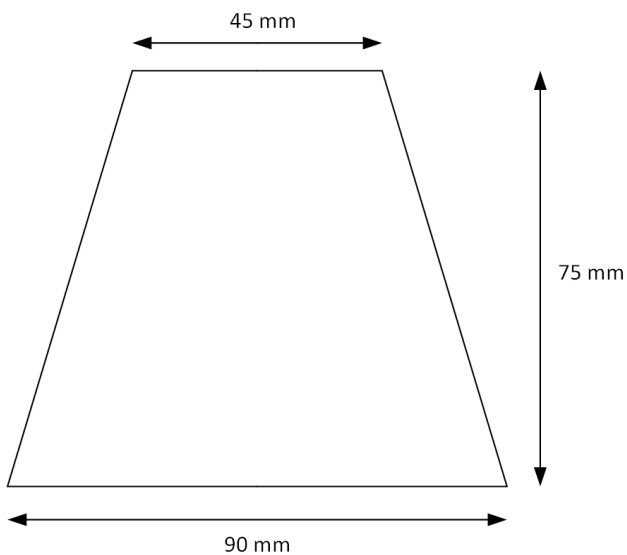
Figur 48: Bundsektion set fra siden.



Figur 49: Midtersektion af ovnen med de tre røgvenderplader. Sekundærluften strømmer ned gennem passagen i øverste venstre hjørne, hen over læben ved ruden og ned langs denne som rudeskyllet.



Figur 50: CAD tegning af prototypen. Her fokus på ovns øverste del (venstre), samt spjældet ved indløbet til sekundærluften (højre).



Figur 51: Mål på brændet anvendt i simuleringen. Længden anvendt er 250 mm.

Mesh

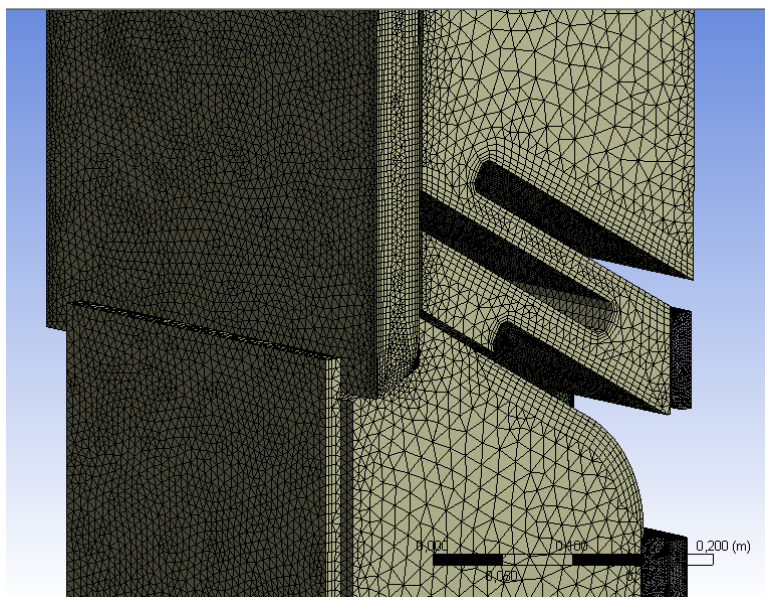
Der regnes på et mesh med 3.480.793 elementer. Der anvendes såkaldt ustruktureret mesh, hvor elementernes generelle form er såkaldte 'tetrahedrons' (tre-sidet pyramide). Konvergenskriteriet for en løsning er sat til $1.0e-04$. Et udsnit af den meshede geometri er vist i figur 8 herunder. Det er lagt grænselags-net ind på alle større indvendige flader i brændkammeret for at opløse simuleringen af grænselagseffekterne mere korrekt.

Opsætning

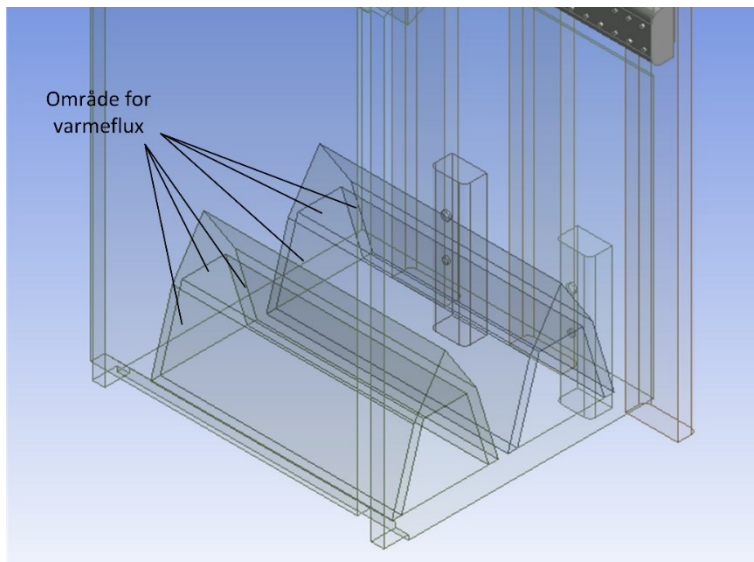
Simuleringerne foretages som stationære simuleringer også kaldet steady state simuleringer. Vedrørende opsætningen af modellen, er samtlige overflader simuleret som værende vægge med en given ruhed. Desuden regnes der med en opdrift på mediet i form af en tyngdeacceleration på $-9,81 \text{ m/s}^2$. Mediet er naturligvis specificeret som værende luft ved atmosfæretryk og med startbetingelsen 20°C . Indløbene, som ses i figur 3 og 6, er defineret som en "fri åbning", mens udløbet

ved skorstenen er defineret til at være et "udløb" med et specifikt masseflow. Sidstnævnte er valgt for at have kontrol over flowet ind og ud af brændkammeret. Flowets størrelse er således beregnet ud fra hvad en sandsynlig udgangstemperatur på røggassen bør være. Turbulensmodellen anvendt er SST – Shear Stress Transport.

For at simulere effekten af forbrændingen af brændestykkerne i brændkammeret, er der specificeret en varmekraft på brændets ydre overflade (se figur 9). Fluxen svarer til, at der samlet set afsættes 5 kW på brændets overflade. Oprindeligt var det tiltænkt at varmen skulle indføres som en rumlig flux fremfor en overflade flux, hvilket er grunden til at der er udformet en trekantet zone omkring brændet. Da løsningen med overfladefluxen blev valgt, er denne zone blot en del af det samlede domæne og har ingen betydning for flowet.



Figur 52: Udsnit af mesh for brændkammerets midtersektion.

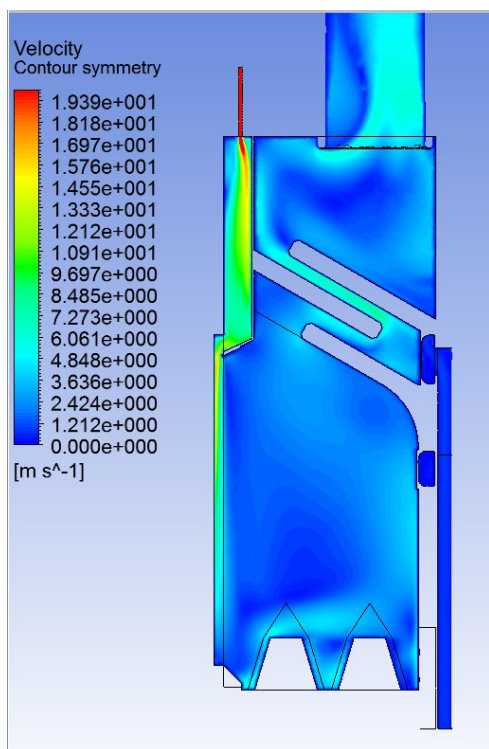


Figur 53: Effekt tilsættes i brændkammeret i form af en defineret varmekraft på de angivne overflader.

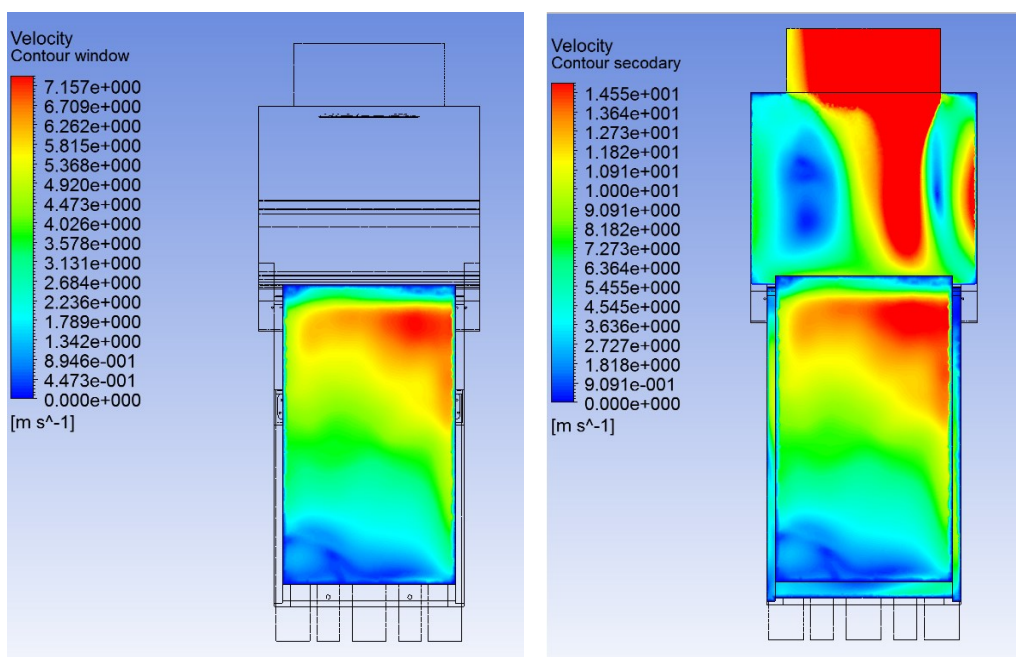
Resultater: Modellen har ved alle simuleringerne været præget af ustabiliteter i flowet i større eller mindre grad. Det kom til udtryk ved at der dannes et højt flow igennem visse lufttilførselskanaler og meget lidt igennem andre. Især sekundærluften viste sig at være problematisk at simulere

på en meningsfuld måde. Der blev observeret problemer med at der var indflow gennem nogle af hullerne, mens der var et udadgående flow i andre, hvilket er et fænomen, der vurderes til ikke at ville forekomme i virkeligheden. For at ændre dette billede omkring indflow-regionen af sekundærluften, blev hullerne byttet ud med en langstrakt spalte med en højde på 150 mm. Således flyttes eventuelle recirkulationszoner op og væk fra det, der er defineret som værende snitfladen til sekundærluftens indløb. Spaltens areal er omtrent det samme som det samlede areal af hullerne til sekundærluften i prototypens egentlige design. Ovennævnte forsøg på at forbedre flowstabiliteten ved at ændre parametre i modellen har resulteret i 36 individuelle kørsler af modellen. Dog har tiltagene ikke bevirket at modellen generelt er blevet mere stabil mht. flow. Følgende resultater er genereret med en lang og smal spalte til sekundærluften og luftlåben ved rudeskyllet trukket 5 mm tilbage i forhold til tegningsmaterialet af prototypen.

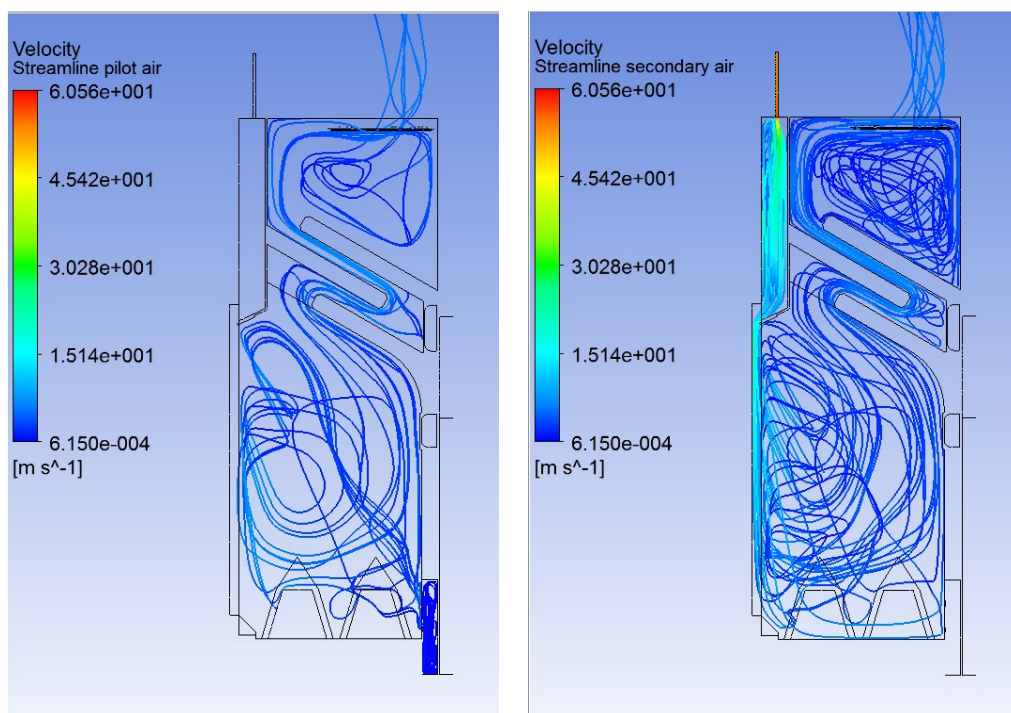
Figur 10 og 11 viser hastigheden luften i to forskellige snit i brændkammeret. Trods svingende stabilitet på flowet ses der generelt i simuleringerne at der opstår recirkulationszoner lige efter indløbet af sekundærluften. Dette ses som de blå og grønne nuancer på figur 11 (højre side), mens hovedparten af luften strømmer igennem midten, hvilket øger hastigheden. Desuden er det også generelt for simuleringerne at flowet ned over ruden er relativt ensartet fordelt, forstået på den måde at luftlåben fordeler flowet næsten jævnt ud i bredden. De overordnede linjer i flowmønstret er ligeledes stort set det samme ved alle simuleringer: Sekundærluften strømmer ind gennem indløbet og fordeles hen over luftlåben og ned langs ruden. Herefter rammer det den forreste den af bunden og strømmer henover brændet, hvor det opvarmes, og videre op ad bagvæggen. Der tilsættes pilot- og tertiærluft, hvorefter luften strømmer omkring første røgvenderplade. Her tilsættes kvartærluft, hvilket får hastigheden til at stige en smule, før luften når brændkammeret øverste rum og til sidst skorstenen. Sekundærflowet er langt større end flowet fra de andre åbninger, hvilket vurderes til at være en overdrivelse i forhold til virkeligheden. Det anerkendes, at der ved en mere virkelighedstro fordeling af flowet mellem brændkammerets åbninger, vil kunne forekomme ændringer i det beskrevne flowmønster.



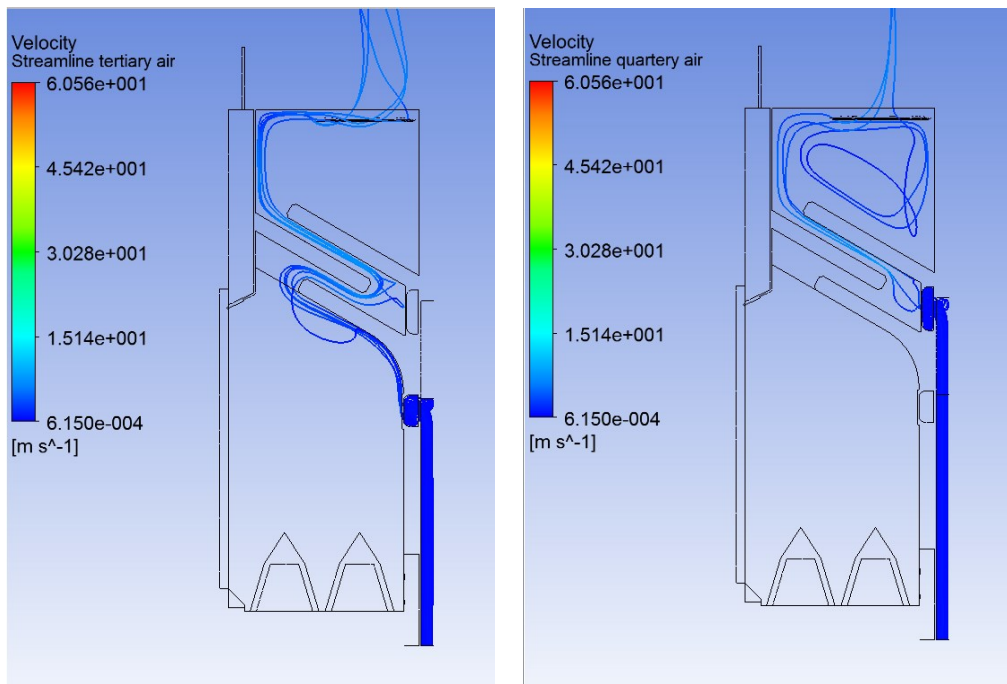
Figur 54: Hastighedskonturer igennem et snit midt i brændkammeret.



Figur 55: Venstre billede: Hastighedskonturer 1 mm fra ruden. Højre billede: Hastighedskonturer 1 mm fra ruden samt i et snit igennem spalten til indløbet af sekundærluften.



Figur 56: Strømlinjer for hhv. pilotluften (venstre) og sekundærluften (højre).



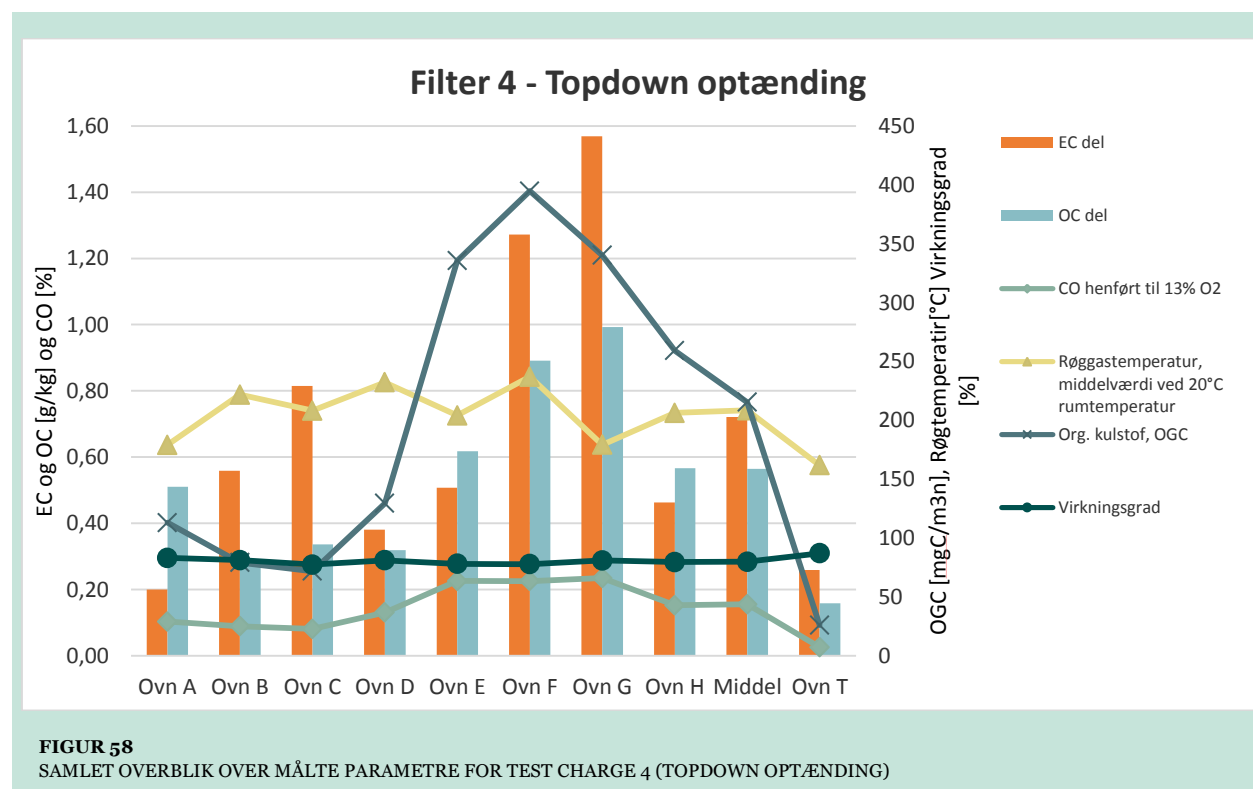
Figur 57: Strømlinjer for hhv. tertiærluft (venstre) og kvartærluften (højre).

Bilag 6 Data inklusiv LCB oven T.

TABEL 20

SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 4 (TOPDOWN OPTÆNDING)

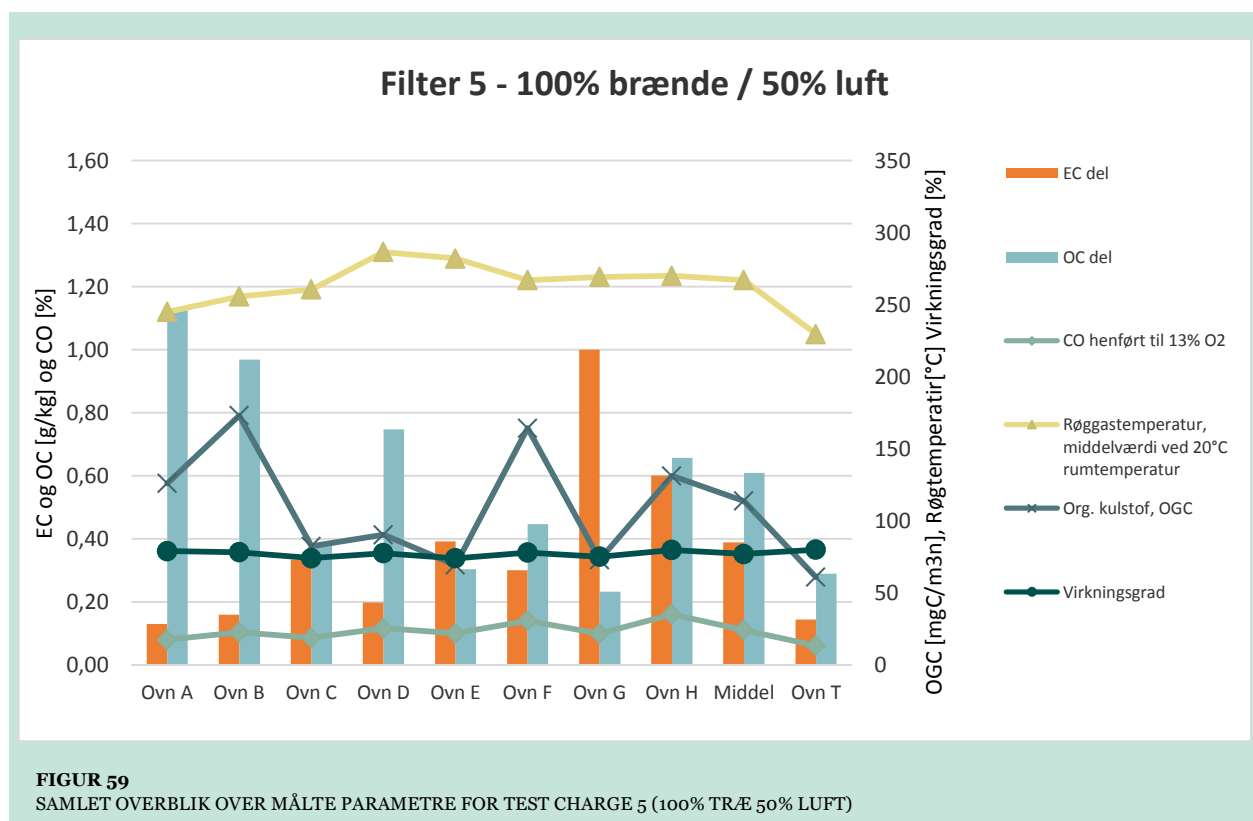
	Brænd- sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røg- gas- temp	Virk- nings- grad	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambd a	Jus. Part. EC del	Jus. Part. OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	2+1kg	2,10	1,75	179	83	7,6	0,10	113	2,7	0,20	0,51
Ovn B	3+1kg	2,33	2,28	222	81	8,6	0,09	79	2,4	0,56	0,28
Ovn C	3+1kg	2,37	2,61	208	77	6,4	0,08	72	3,2	0,82	0,34
Ovn D	3+1kg	2,80	2,58	232	81	9,3	0,13	129	2,2	0,38	0,32
Ovn E	3+1kg	2,80	2,39	204	78	6,8	0,23	336	3,0	0,51	0,62
Ovn F	2+1kg	2,37	2,50	237	78	8,0	0,23	395	2,5	1,27	0,89
Ovn G	2+1kg	2,44	2,24	179	81	6,9	0,23	340	2,9	1,57	0,99
Ovn H	2+1kg	2,03	2,49	206	80	7,3	0,15	259	2,8	0,46	0,57
Middel		2,40	2,36	208	80	7,6	0,16	215	2,7	0,72	0,56
Ovn T	3 stk + 1 kg	2,30	2,51	162	87	8,7	0,03	26	2,4	0,26	0,16



TABEL 21

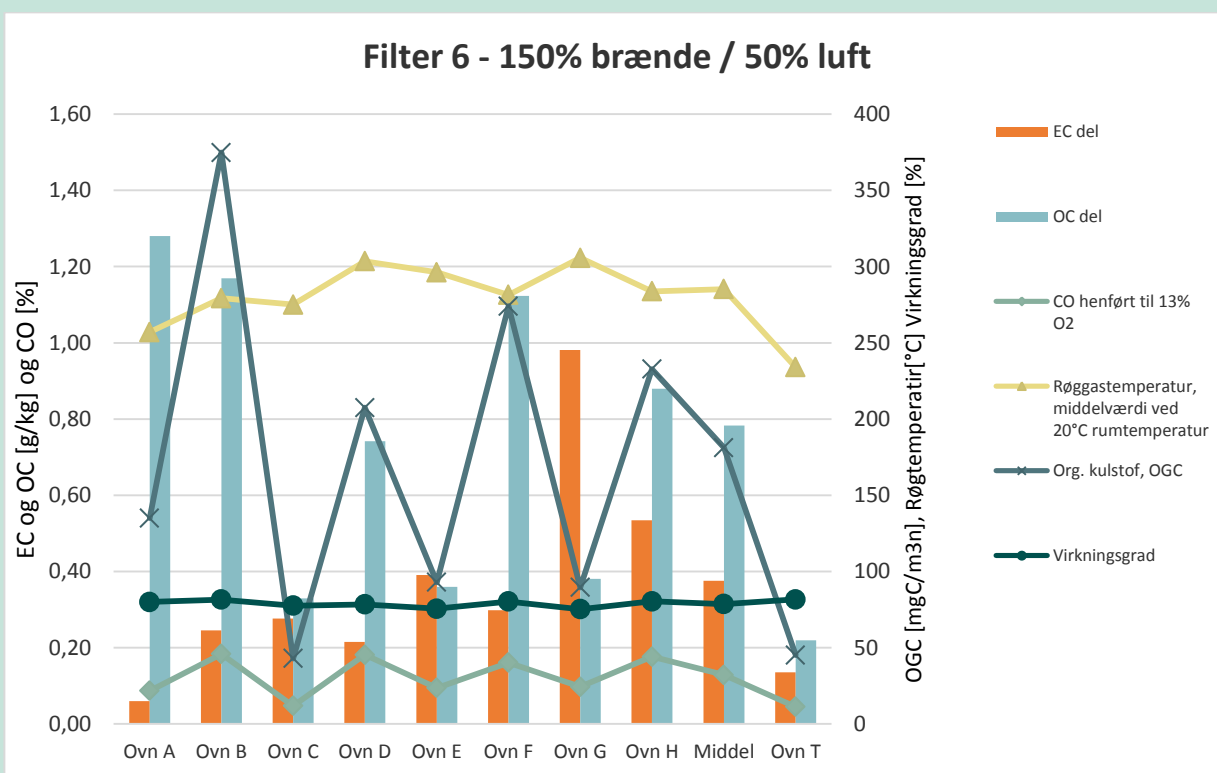
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 5 (100% TRÆ 50% LUFT)

	Brænd- sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røg- gas- temp	Virk- nings- grad	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambd a	Jus. Part. EC del	Jus. Part. OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	2,00	1,15	1,47	245	79	8,5	0,08	126	2,4	0,13	1,13
Ovn B	2,00	1,34	1,50	256	78	8,8	0,10	173	2,3	0,16	0,97
Ovn C	2,00	1,31	1,74	261	74	7,2	0,09	82	2,8	0,33	0,38
Ovn D	3,00	1,81	2,00	287	78	9,9	0,12	90	2,1	0,20	0,75
Ovn E	2,00	1,80	1,85	282	74	7,9	0,10	69	2,6	0,39	0,30
Ovn F	2,00	1,36	1,78	267	78	9,2	0,14	164	2,2	0,30	0,45
Ovn G	2,00	1,83	2,15	269	75	7,9	0,10	73	2,6	1,00	0,23
Ovn H	2,00	1,12	1,69	270	80	10,4	0,16	131	1,9	0,60	0,66
Middel	2,13	1,46	1,77	267	77	8,7	0,11	114	2,4	0,39	0,61
Ovn T	2,00	1,41	1,75	230	80	8,3	0,06	61	2,5	0,14	0,29



TABEL 3
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 6 (150% TRÆ 50% LUFT)

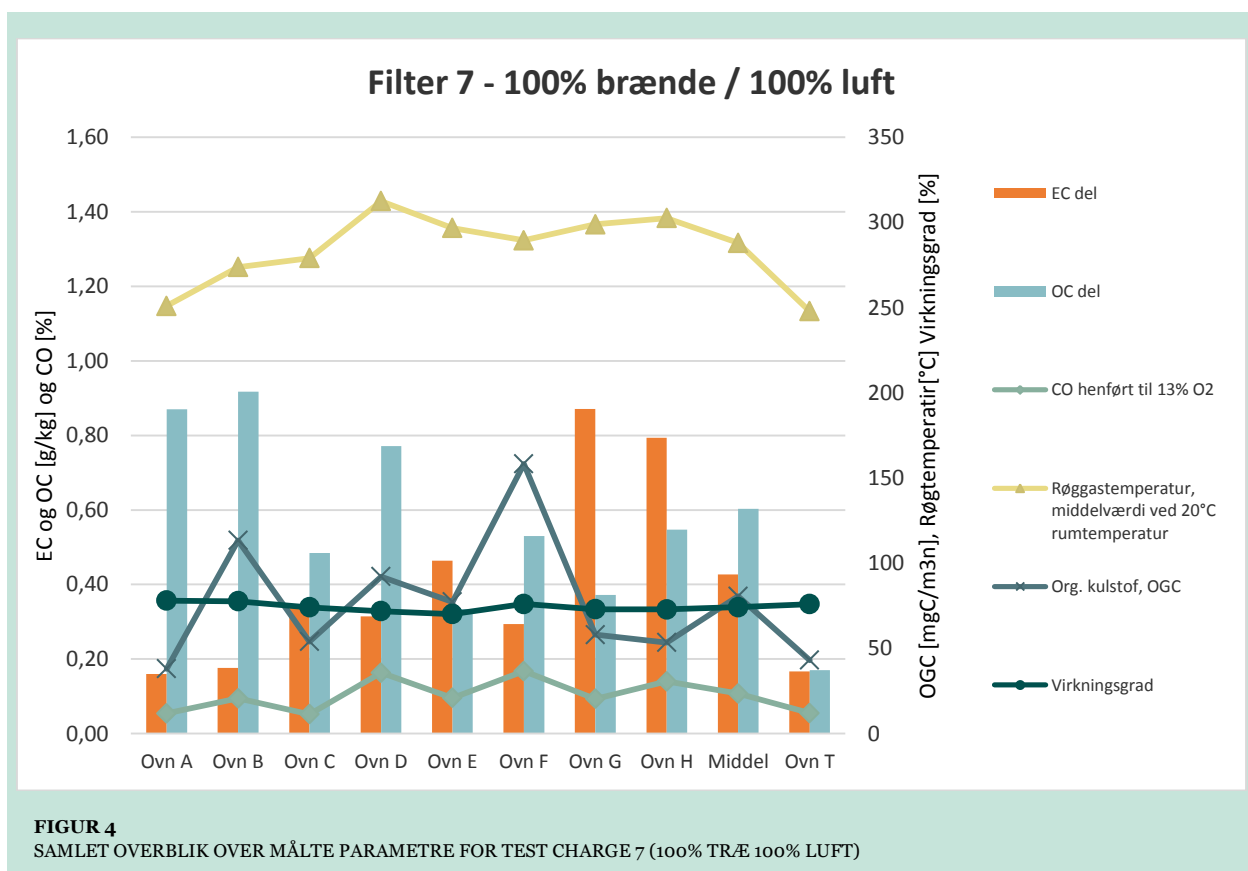
	Brænd- sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røg- gas- temp	Virk- nings- grad	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambd a	Jus. Part. EC del	Jus. Part. OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	3,00	1,72	1,81	257	80	9,7	0,09	135	2,1	0,06	1,28
Ovn B	3,00	2,01	2,10	279	82	12,5	0,18	375	1,6	0,25	1,17
Ovn C	3,00	1,99	2,46	275	78	9,1	0,05	43	2,3	0,28	0,33
Ovn D	4,00	2,72	2,43	303	78	11,4	0,18	207	1,8	0,22	0,74
Ovn E	3,00	2,70	2,40	296	76	9,1	0,09	93	2,2	0,39	0,36
Ovn F	3,00	2,02	2,19	282	80	11,4	0,16	274	1,8	0,30	1,12
Ovn G	3,00	2,76	2,77	306	75	9,4	0,10	90	2,2	0,98	0,38
Ovn H	3,00	1,72	2,24	284	80	11,6	0,18	233	1,7	0,53	0,88
Middel	3,13	2,20	2,30	285	79	10,5	0,13	181	2,0	0,38	0,78
Ovn T	3,00	2,13	2,26	234	82	9,3	0,04	45	2,2	0,14	0,22



FIGUR 3
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 6 (150% TRÆ 50% LUFT)

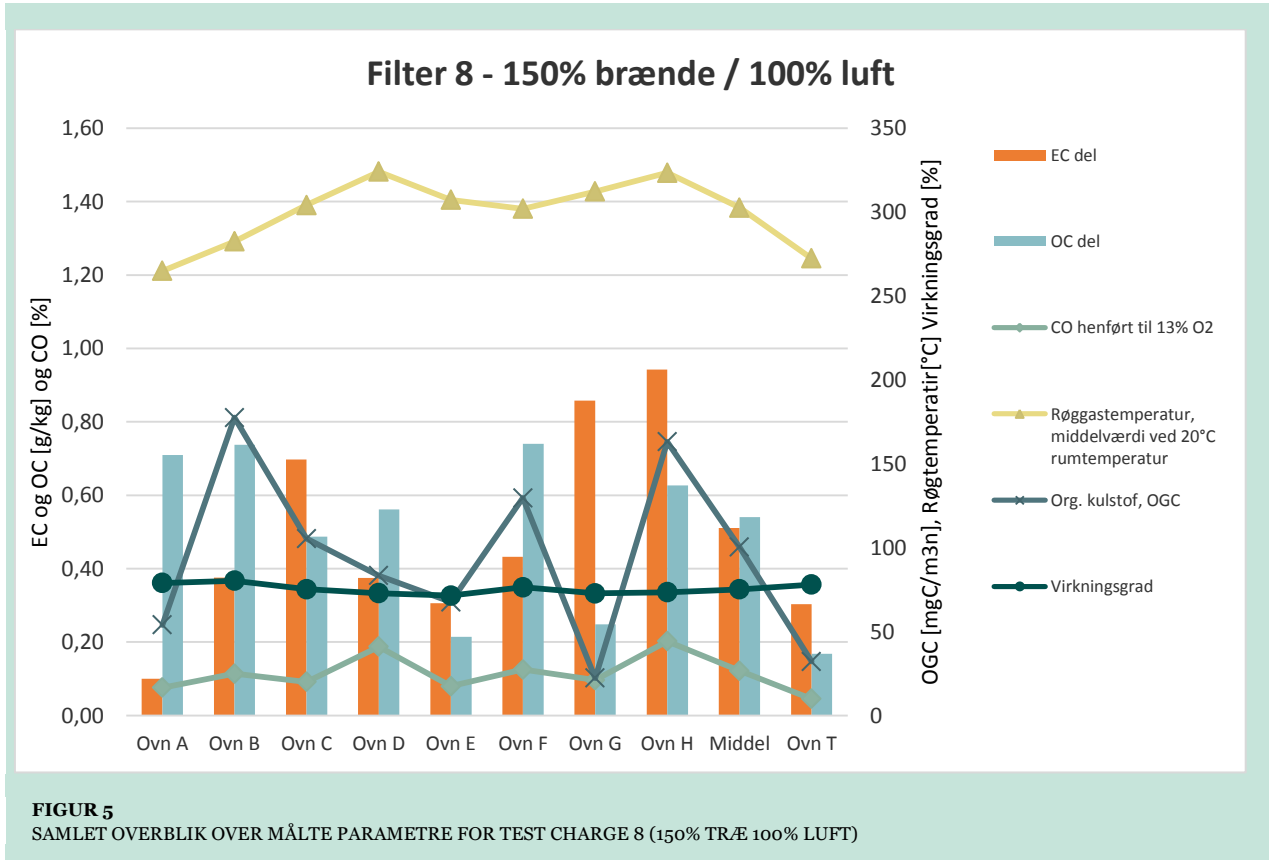
TABEL 4
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 7 (100% TRÆ 100% LUFT)

	Brænd- sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røg- gas- temp	Virk- nings- grad	CO ₂	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambd a	Jus. Part. EC del	Jus. Part. OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[mgC/ m ³ n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	2,00	1,15	1,42	251	78	8,4	0,05	38	2,4	0,16	0,87
Ovn B	2,00	1,36	1,49	274	78	9,2	0,09	113	2,2	0,18	0,92
Ovn C	2,00	1,28	2,03	279	74	7,8	0,05	54	2,6	0,34	0,48
Ovn D	3,00	1,80	1,89	313	72	8,4	0,16	92	2,4	0,31	0,77
Ovn E	2,00	1,80	1,86	297	70	7,2	0,10	77	2,8	0,46	0,33
Ovn F	2,00	1,36	1,82	289	76	9,3	0,17	158	2,2	0,29	0,53
Ovn G	2,00	1,84	2,21	299	73	8,2	0,09	58	2,5	0,87	0,37
Ovn H	2,00	1,12	1,56	303	73	8,3	0,14	53	2,4	0,79	0,55
Middel		1,46	1,78	288	74	8,3	0,11	81	2,4	0,43	0,60
Ovn T	2,00	1,42	1,91	248	76	7,3	0,05	43	2,8	0,17	0,17



TABEL 5
SAMLET OVERBLIK OVER MÅLTE PARAMETRE FOR TEST CHARGE 8 (150% TRÆ 100% LUFT)

	Brænd- sel	Vægt pr. TC	For- brug	Røg- gas- temp	Virk- nings- grad	CO2	CO v/ 13% ilt	OGC v/ 13% ilt	Lambd a	Jus. Part. EC del	Jus. Part. OC del
[Enhed]	[stk]	[kg]	[kg/h]	[°C]	[%]	[%]	[%]	[mgC/ m³n]	[-]	[g/kg]	[g/kg]
Ovn A	3,00	1,73	1,56	265	79	9,3	0,08	54	2,2	0,10	0,71
Ovn B	3,00	2,02	2,04	283	80	11,3	0,11	177	1,8	0,38	0,74
Ovn C	3,00	2,02	2,57	304	75	9,3	0,09	105	2,2	0,70	0,49
Ovn D	4,00	2,72	2,37	324	73	9,3	0,19	83	2,2	0,37	0,56
Ovn E	3,00	2,70	2,43	307	71	7,9	0,08	68	2,6	0,31	0,21
Ovn F	3,00	2,05	2,13	302	76	9,8	0,13	130	2,1	0,43	0,74
Ovn G	3,00	2,76	2,48	312	73	8,6	0,10	22	2,4	0,86	0,25
Ovn H	3,00	1,70	2,18	323	73	9,4	0,20	163	2,1	0,94	0,63
Middel		2,21	2,22	303	75	9,4	0,12	100	2,2	0,51	0,54
Ovn T	2,00	2,14	2,53	272	78	9,2	0,05	32	2,2	0,30	0,17



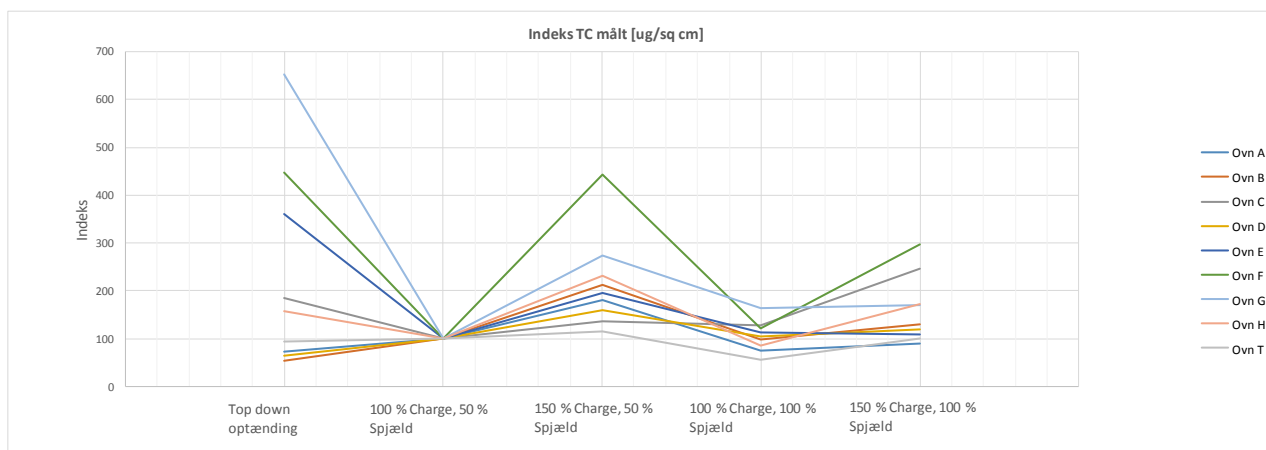
Bilag 7 Sammenligninger på ovnen ud fra målte parametre

Ovnenes evne til at håndtere de forskellige brugssituationer med forøget brændselsmængde og forøget forbrændingsluft på 6 parametre;

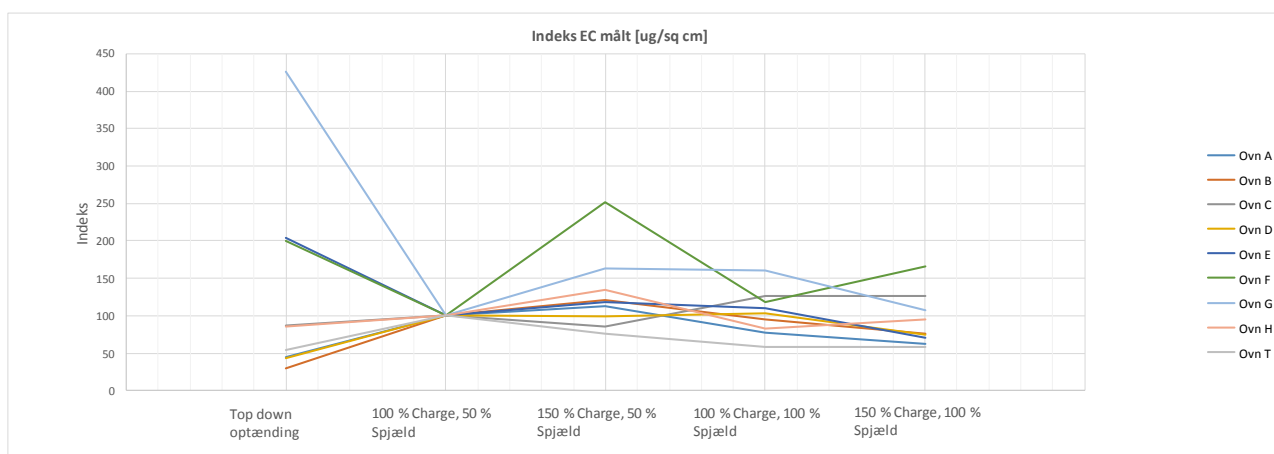
- målt EC+OC (TC), målt EC, målt OC, CO, OGC og Justeret part. Udslipsandel.

Der sammenlignes ud fra 100% træ og 50% luft, hvilket er det tætteste på en nominel indstilling og dermed tæt på den formodede optimale indstilling for alle ovnene (der kan selvfølgelig være variationer fra ovn til ovn, hvorfor dette kun er en formodning). Der er udover et midlet snit for de 6 parametre og de 5 fyringssituationer vist et gennemsnit på max udsving, gennemsnit på min udsving og gennemsnit på spredningen. På et snit over de 6 udvalgte parametre er ovnen tættest på indeks 100 for de 5 fyringssituationer Ovn A og Ovn T, som har akkurat det samme tal. Ovn med størst variation er ovn F.

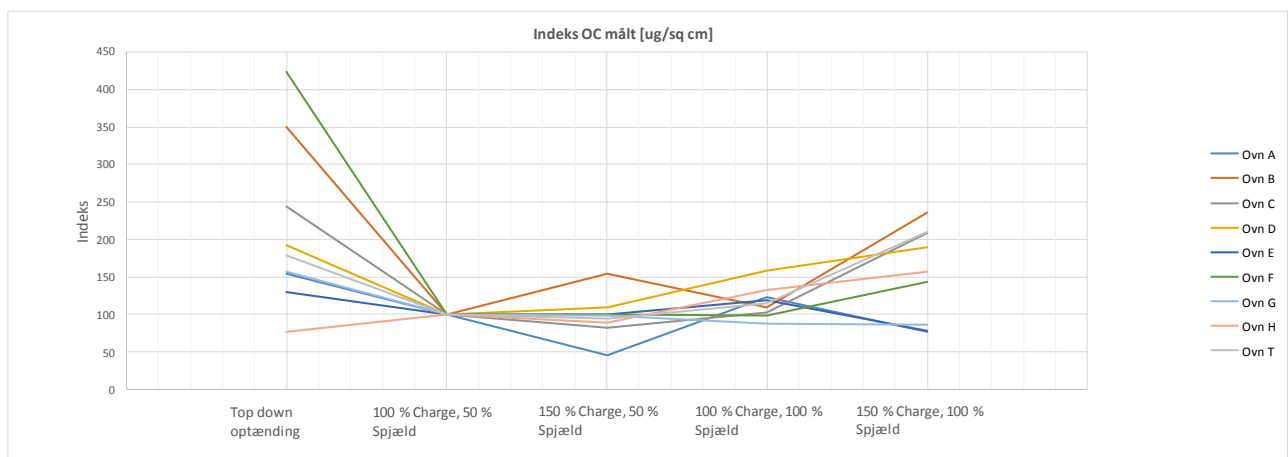
Indeks på gennemsnit af alle emissioner									
Ovn	A	B	C	D	E	F	G	H	T
max	131,5	200,2	169,5	160,1	260,8	302,2	357,7	161,7	122,2
min	53,1	64,9	76,7	78,8	83,5	94,3	83,3	75,8	61,1
spredning	78,4	135,3	92,8	81,3	177,3	207,8	274,4	85,9	61,1
gn.snit	89,7	118,4	117,8	118,1	136,3	174,0	162,6	116,0	89,7



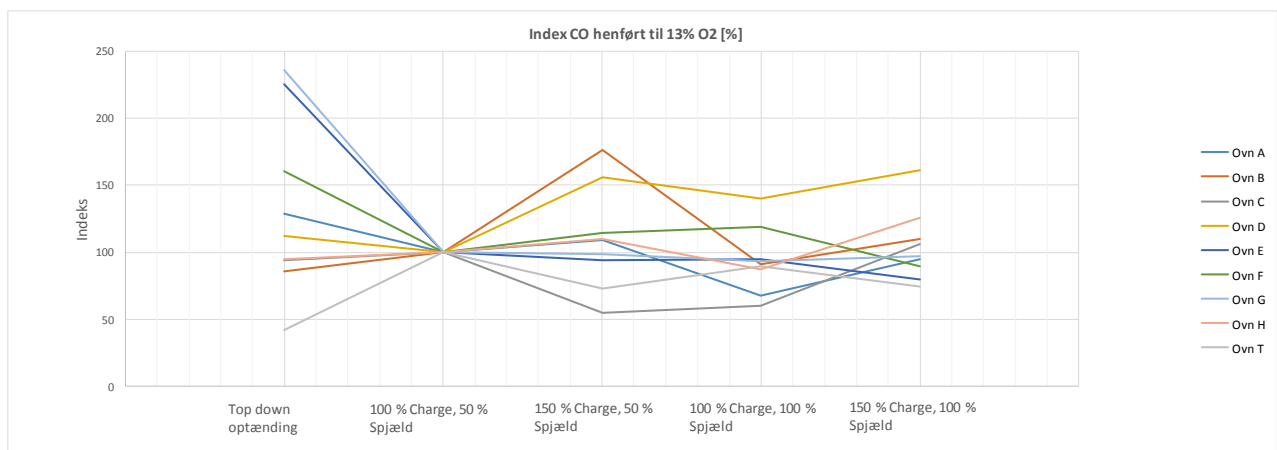
Indeks TC målt [ug/sq cm]									
Ovn	A	B	C	D	E	F	G	H	T
max	180,5	212,1	246,8	159,6	360,3	447,9	653,3	231,3	114,4
min	73,6	54,7	100,0	63,6	100,0	100,0	100,0	84,8	56,2
spredning	106,9	157,4	146,8	96,0	260,3	347,9	553,3	146,5	58,2
gn.snit	103,5	119,0	159,5	109,7	175,8	281,7	272,2	149,1	92,8



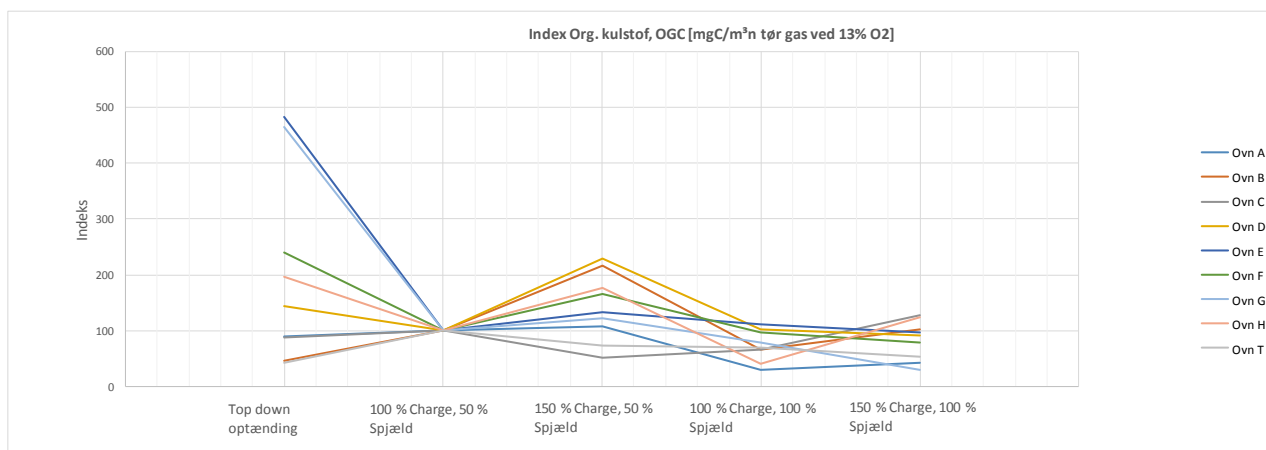
Indeks EC målt [ug/sq cm]									
Ovn	A	B	C	D	E	F	G	H	T
max	113,3	120,7	126,8	103,2	203,6	251,3	426,4	133,9	100,0
min	45,1	29,1	85,7	42,7	70,6	100,0	100,0	83,3	54,6
spredning	68,1	91,5	41,1	60,5	133,1	151,3	326,4	50,6	45,4
gn.snit	79,6	84,1	105,2	84,1	120,6	167,0	191,3	99,7	69,5



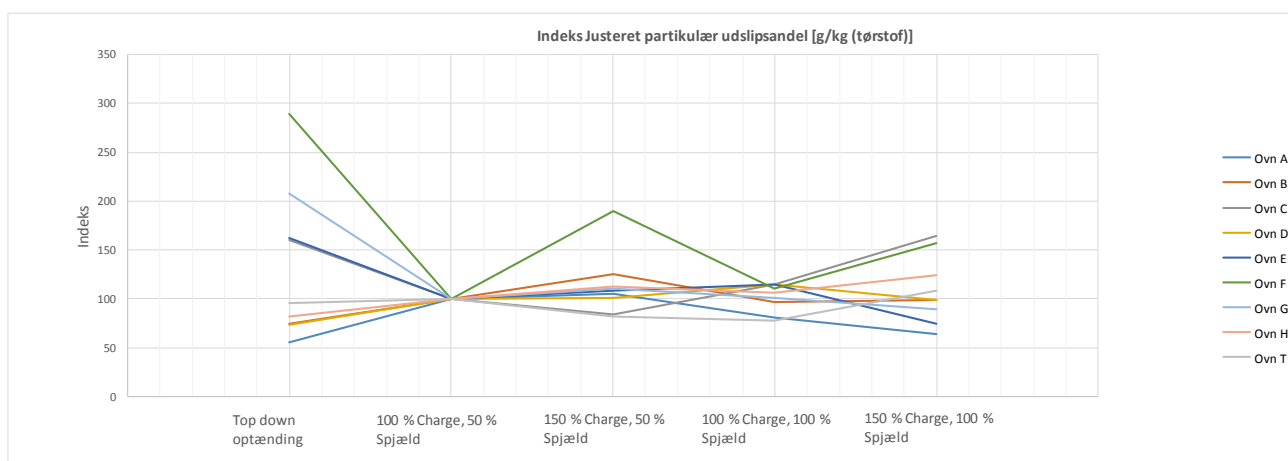
Indeks OC målt [ug/sq cm]									
Ovn	A	B	C	D	E	F	G	H	T
max	153,8	349,9	244,0	192,2	129,6	423,7	156,9	156,7	210,1
min	46,2	100,0	82,7	100,0	78,2	97,9	85,8	77,0	93,9
spredning	107,7	249,9	161,2	92,2	51,4	325,8	71,1	79,7	116,2
gn.snit	100,0	189,8	147,5	149,8	105,2	173,0	105,6	110,9	139,7



Index CO henført til 13% O2 [%]									
Ovn	A	B	C	D	E	F	G	H	T
max	128,8	176,6	106,3	160,9	225,3	160,2	236,0	125,9	100,0
min	67,5	85,5	55,0	100,0	79,8	89,1	93,5	87,0	41,7
spredning	61,3	91,1	51,3	60,9	145,6	71,1	142,5	39,0	58,3
gn.snit	100,0	112,5	83,0	133,7	118,9	116,6	124,9	103,5	75,6



Index Org. kulstof, OGC [mgC/m³n tør gas ved 13% O2]									
Ovn	A	B	C	D	E	F	G	H	T
max	107,1	216,5	128,0	229,7	483,9	240,2	465,6	197,5	100,0
min	30,2	45,7	52,2	92,3	97,6	78,9	30,6	40,7	42,5
spredning	77,0	170,8	75,8	137,3	386,3	161,3	435,0	156,8	57,5
gn.snit	74,0	106,0	86,6	133,4	185,4	136,4	159,6	128,0	68,0



Indeks Justeret partikulær udslipsandel [g/kg (tørstof)]									
Ovn	A	B	C	D	E	F	G	H	T
max	105,5	125,4	164,9	114,8	161,9	289,6	207,8	124,7	108,7
min	55,9	74,5	84,3	74,0	74,9	100,0	89,8	81,8	77,6
spredning	49,6	50,9	80,6	40,9	87,1	189,6	118,0	42,9	31,1
gn.snit	81,3	99,1	124,9	97,8	111,9	169,4	121,8	105,1	92,8

LowCarbon Brændkammer

Projektets overordnede formål har været at mindske udledningen af black carbon fra fremtidige moderne brændeovne. I projektet udførte man en omfattende målekampagne med målinger fra otte moderne danske brændeovne. Derefter fremstillede man dels et sæt anbefalinger og retningslinjer for fremtidige brændkamre for reduceret black carbon udledning, og dels udviklede man et model-brændkammer, der kunne verificere retningslinjerne. Succeskriteriet var, at måleresultaterne fra model-brændkammeret skulle være bedre end gennemsnittet af de otte moderne ovne fra målekampagnen - ikke kun for black carbon men også OC, CO, OGC og virkningsgrad. Testresultaterne for det udviklede brændkammer levede op til succeskriteriet og overgik projektets forventninger.



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk