



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# Udvikling af brændeovn med to- kammer katalytisk forbrænding

Miljøprojekt nr. 1528, 2014

**Titel:**

Udvikling af brændeovn med to-kammer  
katalytisk forbrænding

**Redaktion:**

Teknologisk Institut og Rais A/S

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
[www.mst.dk](http://www.mst.dk)

**År:**

2014

**ISBN nr.**

978-87-93026-62-9

**Ansvarsfraskrivelse:**

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

Må citeres med kildeangivelse.

# Indhold

|  |           |
|--|-----------|
| <b>Forord</b> .....  | <b>5</b>  |
| <b>Konklusioner og sammenfatninger</b> .....                     | <b>6</b>  |
| <b>Summary and conclusions</b> .....                             | <b>7</b>  |
| <b>1. Forundersøgelse</b> .....                                  | <b>8</b>  |
| 1.1 Kommercielle Produkter .....                                 | 8         |
| 1.1.1 Almindelige gennemforbrændingsovne .....                   | 9         |
| 1.1.1 Ovne med omvendt forbrænding .....                         | 10        |
| 1.2 Katalysatormateriale.....                                    | 10        |
| <b>2 Princip for TKK</b> .....                                   | <b>13</b> |
| <b>2. Indledende tests for udvikling af TKK</b> .....            | <b>15</b> |
| 2.1 Katalysator på Rais Mino .....                               | 15        |
| 2.2 Tests med og uden katalysatormateriale i Rais Epoca .....    | 19        |
| 2.3 Samlet vurdering fra indledende tests .....                  | 25        |
| <b>3. Udformning af TKK, vers. 1 &amp; 2</b> .....               | <b>26</b> |
| 2.4 Opbygning af TKK version 1 .....                             | 26        |
| 2.4.1 Målinger på TKK version 1 .....                            | 28        |
| 2.5 Opbygning af TKK version 2 .....                             | 31        |
| 2.5.1 Måling på TKK version 2.....                               | 32        |
| 2.6 Supplerende test med og uden stråling fra glasruden.....     | 34        |
| 2.7 Supplerende test af katalysator i kontrolleret reaktor ..... | 35        |
| 2.8 Erfaringer fra tests på version 1 og 2.....                  | 36        |
| <b>4. Udformning af TKK, vers. 3 &amp; 4</b> .....               | <b>37</b> |
| 2.9 Opbygning af TKK version 3.....                              | 37        |
| 4.1.1 Målinger på TKK version 3 .....                            | 38        |
| 2.10 Opbygning af TKK version 4 .....                            | 43        |
| 4.1.2 Måling på TKK version 4 .....                              | 45        |
| 2.11 Erfaringer fra tests på version 3 og 4 .....                | 48        |
| <b>5. Sluttest med emissionsmålinger</b> .....                   | <b>49</b> |
| 2.12 Måleprogram for miljømålinger.....                          | 49        |
| 5.1.1 Emissionsmålinger i henhold til brændeovnsstandarder ..... | 50        |
| 5.1.2 PAH-målinger .....   | 51        |
| 5.1.3 Kontinuerlige partikelmålinger .....                       | 52        |
| 2.13 Miljømålinger på TKK version 3 og Rais Epoca .....          | 55        |
| 2.14 Måling af partikelstørrelsesfordeling.....                  | 58        |
| 5.1.4 DustTrak.....  | 58        |
| 5.1.5 SMPS .....   | 61        |
| 2.15 Måling af PAH.....  | 68        |
| <b>6. Diskussion og konklusioner</b> .....                       | <b>71</b> |
| 2.16 Tokammerovn med katalysator .....                           | 71        |
| 2.17 TKK emissioner.....   | 71        |

|           |                         |           |
|-----------|-------------------------|-----------|
| 6.1.1     | Optænding.....          | 72        |
| 6.1.2     | Indfyringer .....       | 73        |
| <b>7.</b> | <b>Referencer .....</b> | <b>79</b> |

# Forord

Dette projekt er udført for Miljøstyrelsen af en projektgruppe bestående af Rais A/S og Teknologisk Institut, Division for Energi og Klima.

Projektet er medfinansieret af Miljøstyrelsens "Tilskudsordning til miljøeffektiv teknologi" og er udført i perioden 2009 til 2013.

Rapporten indeholder en beskrivelse af udviklingen af en brændeovn med et tokammer-forbrændingssystem med katalysator. Tokammer-forbrændingens umiddelbare miljømæssige gevinst er forventet gennem en reduceret emission af CO, OGC, og PAH partikler.

Projektets formål er at udvikle og afprøve en brændeovn med tokammer-forbrænding samt at udstyre efterforbrændingskammeret med katalysator. Anvendelse af en katalysator i brændeovnes efterforbrændingskammer betyder, at forbrændingen lettere vil kunne foregå. Katalysatoren tænkes dermed at kunne bidrage til at nedbringe udledningen af skadelige forbindelser fra brændeovne og give en mere fuldstændig forbrænding. Ideelt vil der således kun forekomme højere emissioner i kort tid efter den første optænding, hvor ovnen endnu er kold.

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

# Konklusioner og sammenfatninger

Efter at lovgivningen og bl.a. Miljøstyrelsens Luftvejledning har fået de større, primære luftforureningskilder under kontrol, er der kommet mere fokus på mindre, sekundære kilder. Her har det vist sig, at bl.a. halmfyrede gårdanlæg og brændefyrede anlæg til boligopvarmning m.m. emitterer ikke uvæsentlige mængder af uønskede skadestoffer til anlæggenes nærområde. Gennemførte undersøgelser viser, at røgen indeholder sundhedsskadelige tjærestoffer (PAHer) og partikler (sod og tjæredråber), herunder også mange fine partikler (PM<sub>2,5</sub>) og ultrafine partikler (PM<sub>1</sub>).

I nyere brændekedler til centralopvarmning trinopdeles forbrændingsprocessen i tokammersystemer med kontrolleret forbrændingslufttilførsel, tilstrækkelig opholdstid og kraftig turbulens, som sikrer en langt mere effektiv udbrænding.

I forbindelse med brændeovne, hvor forbrugerne stiller krav til eksempelvis store glasruder og naturlige flammebilleder, er der fortsat en del uløste problemer. Ved at udvikle en brændeovn (TKK) med tokammerforbrænding, hvor efterforbrændingskammeret udstyres med katalysator og samtidigt placeres oven på primærkammeret for dermed at drage størst mulig nytte af varmens naturlige bevægelsesmønstre, vil problemerne efter hensigten kunne reduceres.

Forud for udviklingen af TKK er der foretaget indledende undersøgelser af katalysatorer indbygget i en allerede eksisterende brændeovn. Resultaterne viser, at det på trods af opnåede reduktioner på CO emissionen må konkluderes, at katalysatoren alene ikke kan opfylde de stillede mål, og på den baggrund arbejdes der videre med udviklingen af en tokammer ovn, TKK.

I projektet udvikles fortløbende i alt fire versioner af TKK. Efter hver konstruktion gennemføres en række målinger for at undersøge effekten af konstruktionsændringerne. Efter TKK version 4 gøres der status, og man vælger at udføre projektets afsluttende miljømålinger på version 3, hvilken umiddelbart anses for mest lovende.

Der demonstreres gode forbrændingsresultater på den udviklede TKK i de gennemførte miljømålinger, og med undtagelse af PAH og støv målt i opvarmet filter er resultaterne meget lovende. Der foretages sammenligning med en underforbrændingsovn, og det vurderes, at potentialet for TKK er større end de resultater, der er opnået i dette projekt. Yderligere vurderes det, at resultaterne for PAH giver anledning til nærmere analyser af de forhold der gør sig gældende i både det primære kammer og efterforbrændingskammeret.

# Summary and conclusions

After the major primary sources of air pollution are being controlled by legislation and among others DEPA Air Guide, focus has been put on smaller, secondary sources of air pollution. It has been found that for example straw-fired farmhouses and wood-fired residential combustion appliances etc. emit non-negligible amounts of unwanted pollutants to their surroundings. Completed studies show that the smoke from such plants contains harmful tars (PAHs) and particles (soot and tar droplets) including many fine particles (PM<sub>2.5</sub>) and ultrafine particles (PM<sub>1</sub>).

Modern boilers for central heating divide the combustion process into steps in dual-chamber systems with controlled combustion air supply, sufficient retention time and heavy turbulence, which ensure a much more efficient burn.

In connection with wood burning stoves, where consumers for example demand large glass windows and natural flame images, there are still some unresolved issues. By developing a wood burning stove (TKK) with a dual-chamber combustion system, where the post-combustion chamber is equipped with a catalytic converter and is simultaneously placed on top of the primary chamber in order to maximize the benefits of the natural movement patterns of heat, problems will properly be reduced.

Prior to the development of TKK, preliminary studies of catalytic converters built into an existing wood burning stove have been conducted. Results show that despite the achieved reductions in CO emissions, it must be concluded that the catalyst cannot meet the performance goals alone, and based on this, the development of the wood burning stove with a dual-chamber combustion system, TKK, persists.

Four versions of the TKK stove are developed during the project. After each version, a series of measurements is conducted in order to investigate the effect of the design changes. After TKK version 4, evaluations are made and it is decided to perform the final environmental measurements at TKK version 3, which appears most promising.

The developed TKK demonstrates fine combustion results in the completed environmental measurements, and with the exception of PAH and dust measured in the heated filter, the results are very promising. When comparing the TKK with a sub-combustion wood burning stove, it is estimated that the potential for the TKK is greater than the results obtained in this project. Furthermore, it is estimated that the results of PAH give cause for further analysis of the conditions that apply for both the primary chamber and the post-combustion chamber.

# 1. Forundersøgelse

Fra gennemprøvede forbrændingsteknikker i forbindelse med eksempelvis nyere brænde kedler til centralopvarmning ved man, at der kan opnås en betydelig bedre forbrændingskvalitet for fast brændsel, når forbrændingsprocessen trinopdeles i et tokammersystem. Denne forbrændingsteknik er imidlertid ikke almindelig anvendt i brændeovne.

Illustration af resultaterne fra emissionsmålinger på en kedel med ét forbrændingskammer og to kedler med tokammersystemer ses i nedenstående tabel. Kedlen af fabrikatet Viadrus U22 har ét forbrændingskammer, mens de to anonyme kedler begge har tokammerforbrænding. Tabellen viser, at resultaterne er langt bedre for tokammerkedlerne end for Viadrus U22-kedlen. Sidste række i tabellen viser resultaterne fra en svanemærket brændeovn af typen Epoca, som er produceret af brændeovnsvirksomheden Rais. Denne brændeovn er også med etkammerforbrænding. Kedler er dog ikke helt sammenlignelige med brændeovne, og der kan derfor ikke drages en direkte parallel til potentialet for emissionsreduktionen.

|                            | CO<br>ppm<br>ved 13 % O <sub>2</sub> | OGC*<br>mg C/m <sup>3</sup> <sub>n,t</sub><br>ved 13 % O <sub>2</sub> | Støv<br>mg/m <sup>3</sup> <sub>n,t</sub><br>ved 13 % O <sub>2</sub> |
|----------------------------|--------------------------------------|---|---|
| <b>Viadrus U22</b>         | 3.740                                | 594   | 228   |
| <b>2-kammer<br/>kedel1</b> | 406                                  | 2   | 41  |
| <b>2-kammer<br/>kedel2</b> | 189                                  | 4   | 36  |
| <b>Rais Epoca</b>          | 1000                                 | 85  | 19  |

\*OGC: Uforbrændte kulbrinter (Organic Gaseous Compounds)

I modsætning til fraværet af tokammerforbrænding i brændeovne, er det imidlertid ikke ualmindeligt, at katalysatorer anvendes til emissionsreduktion fra brændeovne.

Kommercielle katalytiske brændeovne findes således allerede i bl.a. Norge, Østrig og USA. United States Environmental Protection Agency (EPA) har publiceret en liste med certificerede brændeovne på det amerikanske marked, som omfatter såvel amerikanske som europæiske fabrikater. Her er oplyst omkring 150 fabrikater, som tilsammen har over 800 certificerede produkter, hvoraf mere end 250 er forsynet med en katalysator.

## 1.1 Kommercielle Produkter

EPA's liste over certificerede brændeovne skelner mellem katalytiske og ikke-katalytiske ovne. Ikke-katalytiske ovne skal overholde en partikel-grænseværdi på 7,5 g/h, mens katalytiske ovne skal overholde en værdi på 4,1 g/h<sup>1</sup>. Ved prøvning opnår de bedste ovne en emissionsrate på < 1 g/h.

<sup>1</sup> Baggrunden for den lavere grænseværdi for brændeovne med katalysator er, at katalysatoren forventes at forringes med tiden, hvormed middelværdien af støvemissionen over dens levetid derfor antages at ville være på niveau med ikke-katalytiske ovne.



Alle de katalytiske ovne har katalysatoren monteret i røgafgangen eller umiddelbart før afgang. Ingen af ovnene er opbygget som et tokammersystem. Ideen i nærværende projekt er således ny og den fortjener en nærmere undersøgelse.

### 1.1.1 Almindelige gennemforbrændingsovne

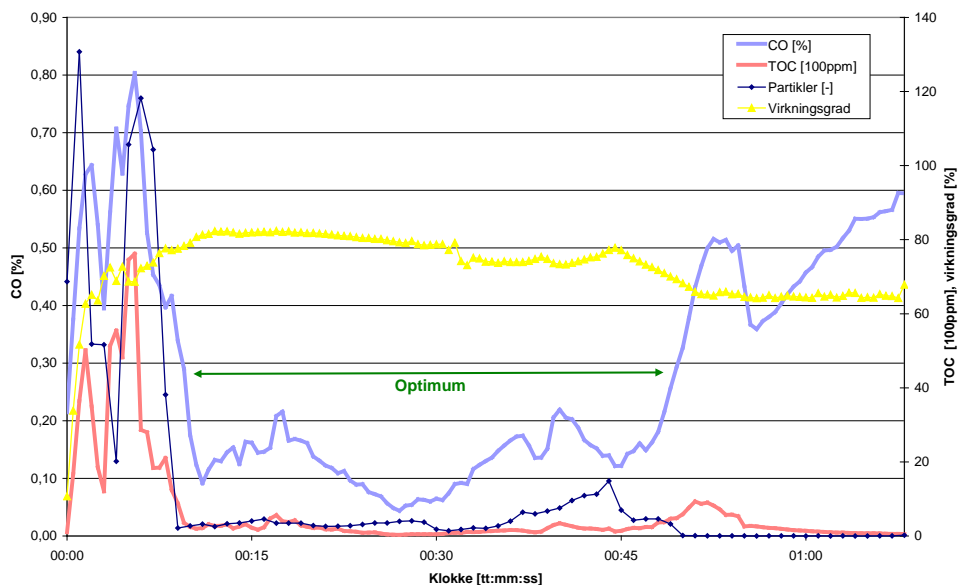
Forbrænding af træ sker normalt i fire mere eller mindre sammenfaldende faser:

- Tørring
- Forgasning
- Gasforbrænding
- Kulstofforbrænding

Almindelig gennemforbrænding er karakteriseret ved, at forbrændingsluften bevæger sig nedfra og op gennem brændselslaget. Faserne med tørring og forgasning finder sted ved relativ lav temperatur (under 600 °C).

Udover den primære forbrændingsluft, som tilføres nedfra og op gennem glødelaget, er der i almindelige moderne brændeovne også tilførsel af forbrændingsluft i forbrændingszonerne, hvor faserne med gas- og kulstofforbrænding foregår. Forbrændingsluft der tilsættes i brændkammerets bagvæg benævnes typisk for tertiær forbrændingsluft, og luft der tilsættes øverst i brændkammeret, typisk som rudeskylsluft, benævnes ofte som sekundær forbrændingsluft. Temperaturen i disse faser er relativ høj (højere end 600 °C).

Trods flere forbrændingslufttilførsler har moderne brændeovne med gennemforbrænding ligeledes et uhensigtsmæssigt forbrændingsmønster, som starter med en kraftig tørring og afgasningsfase de første ti minutter efter påfyldning af brændsel. I denne periode emitteres uforbrændte gasser i form af tjærestoffer og kulilte. Efter de første ca. ti minutter starter gasforbrændingen og emissionerne reduceres. I den afsluttende kulstofforbrændingsfase sker igen en øget udledning af kulilte.



FIGUR 1: TYPISK FORBRÆNDINGSMØNSTER FOR EN VELFUNKERENDE BRÆNDEOVN.

### 1.1.1 Ovne med omvendt forbrænding

Omvendt forbrænding er karakteriseret ved, at forbrændingsluften bevæger sig fra toppen og nedad gennem glødelaget og derefter ud gennem en spalte i bunden af fyrboksen til et separat forbrændingskammer. Der er altså tale om forbrænding i et tokammersystem.



FIGUR 2: SNITTEGNING AF BAXI BONUS-KEDEL MED UNDERFORBRÆNDING

Et af de få kendte eksempler på en brændeovn der anvender tokammerforbrænding benytter også teknikken med omvendt forbrænding. Ovnen er af typen Bioovn, der produceres af firmaet Bioovn i Ertebølle. Bioovnen har et tokammersystem med en spalte i bunden af det øverste brændkammer, der leder forbrændingen ned i et efterforbrændingskammer. Røggasser, der i en traditionel ovn forsvinder op gennem røgkanalen og videre op igennem skorstenen, tvinges her til at bevæge sig ned gennem glødelaget først. Formålet er, at kontakten mellem de varme gløder og røggasserne samt tilsætning af luft aktiverer yderlig udbrænding (lavere emission).

Bioovnen er monteret med et manuelt spjæld, der giver brugeren mulighed for at vælge, hvornår det sekundære forbrændingskammer skal anvendes. Ved optænding og påfyring vil det sekundære brændkammer ikke være i anvendelse, og ovnen vil fungere som en almindelig gennemforbrændingsovn.

I forbindelse med moderne brændeovne, hvor forbrugerne stiller krav til eksempelvis store glasruder, naturlige flammebilleder og minimal betjening, findes der fortsat en del uløste problemer ved teknologien. Ingen af ovnene på EPA's liste er opbygget med et tokammersystem, og samme billede tegner sig for svanemærkede ovne.

### 1.2 Katalysatormateriale

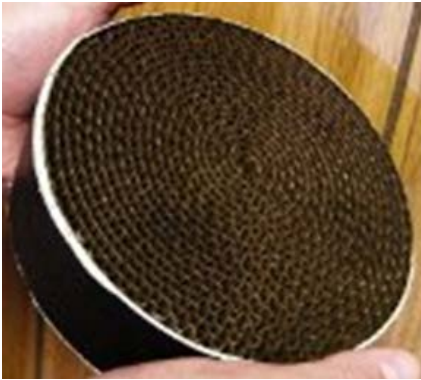
Projektets formål er at udvikle og afprøve en brændeovn med tokammerforbrænding samt at udstyre efterforbrændingskammeret med katalysator. Katalysatorens overflade vil bevirke, at reaktioner mellem gasmolekyler foregår hurtigere eller ved lavere reaktionstemperaturer end det ellers ville være tilfældet. Anvendelse af en katalysator i brændeovnes efterforbrændingskammer vil

således betyde, at forbrændingen lettere vil kunne foregå. Dermed vil katalysatoren bidrage til at nedbringe udledningen af skadelige forbindelser fra forbrændingen og give en mere fuldstændig forbrænding. Ideelt vil der således kun forekomme større emissioner i kort tid efter optænding, hvor ovnen endnu er kold. Ved senere påfyringer er ovnen varm og katalysatoren er aktiv.

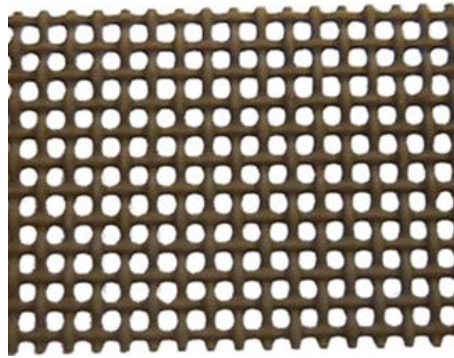
Katalysatorens bærematerialer, der skal være et mekanisk stabilt materiale, kan i brændeovnes tilfælde eksempelvis være keramik eller rustfrit stål. Oven på dette lag findes et keramisk materiale med et stort overfladeareal i størrelsesordenen  $10 \text{ m}^2/\text{g}$ . Det store overfladeareal skal sikre, at det katalytiske metallag ligeledes får en stor overflade, hvilket er nødvendigt for at reaktionen med de brændbare komponenter i røggassen kan foregå tilfredsstillende.

Overordnet set findes der fire hovedtyper af katalysatorbærestrukturer til bl.a. brændeovne:

- Honeycomb struktur med lige kanaler
- Metalliske net
- Piller (granulat)
- Hård, porøs "skumstruktur" i zirkoniumoxid



FIGUR 3: EKSEMPEL PÅ HONEYCOMB



FIGUR 4: EKSEMPEL PÅ METALLISK NET



FIGUR 5: EKSEMPEL PÅ GRANULAT



FIGUR 6: EKSEMPEL PÅ SKUMSTRUKTUR

På alle disse heterogene (faste) katalysatorstrukturer foregår katalysen på overfladen af det aktive materiale, hvormed de gasformige reaktanter omdannes til gasformige produkter, når de strømmer forbi katalysatorens overflade.

Honeycomb og metalliske net har den mindste partikeludskilning, og granulat og den porøse skumstruktur den største. Partikeludskilningen har naturligvis indflydelse på katalysatorens

degradering og tidsintervallet mellem hver rengøring af katalysatoren. Tryktabet på granulat og skumstruktur vil således alt andet lige være størst.

Det er kostbare ædelmetaller som platin, palladium og rhodium der anvendes som katalysator til forbrændingsprocesser. De er alle aktive oxidationskatalysatorer af kulmonooxid og kulbrinter. Den mængde af det aktive metallag der anvendes som katalysator er imidlertid så lille, at materialeprisen har meget lidt betydning.

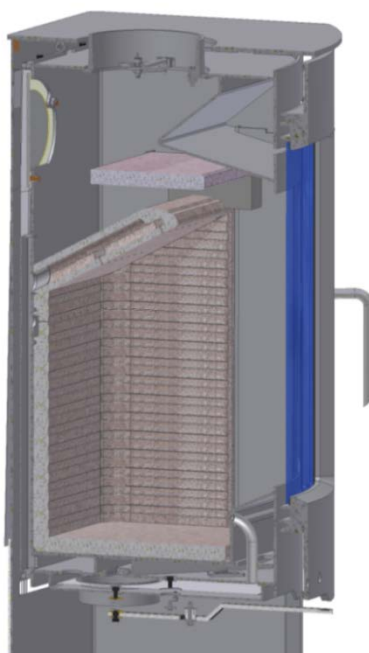
Valg af materiale til katalysatorens bæremedie og dermed også til efterforbrændingskammerets struktur skal foretages med henblik på den hurtigst mulige opvarmning af kammeret. Forundersøgelsen viser, at der i udlandet er kommercielle katalysatorer tilgængelige, som er udviklet med henblik på anvendelse i brændeovne. Det gælder bl.a. i USA, hvor udbuddet er relativt stort. Det er således muligt at anskaffe færdigproducerede katalysatorer, der geometrisk kan bearbejdes til indpasning i et efterbrændingskammer, hvilket ønskes i nærværende projekt. På denne baggrund arbejdes der videre med en løsning, hvor der anvendes en eksisterende kommerciel katalysator.

## 2 Princip for TKK

I projektet modificeres en Rais Epoca ovn til en To-Kammer-Katalytisk (TKK) ovn. For at drage størst mulig nytte af røggassens naturlige bevægelsesmønstre placeres efterforbrændingskammeret oven på primærkammeret. Dermed undgås det, at røggassens naturlige opadgående bevægelse modvirkes, og risikoen for røgdudslip til rummet, hvor ovnen placeres, vil være reduceret.



FIGUR 7: RAIS EPOCA BRÆNDEOVN



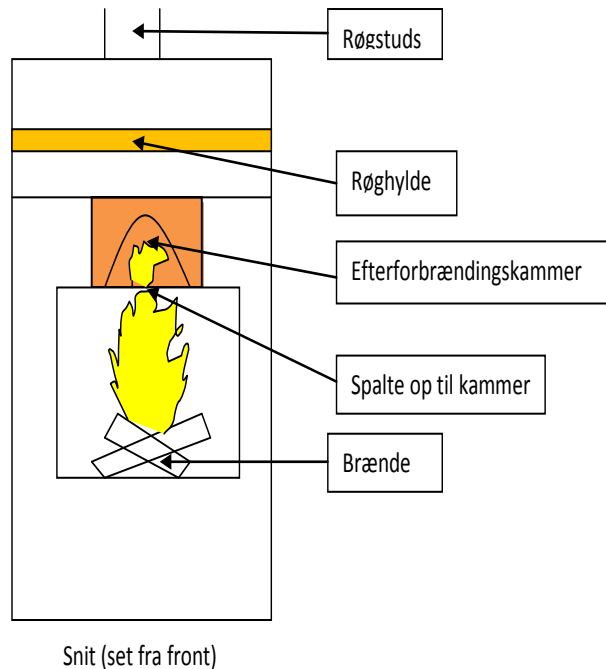
FIGUR 8: SNITTEGNING AF RAIS EPOCA BRÆNDKAMMER OG RØGDUGANG

Det er en forudsætning for Rais, at Epoca ovnens grundelementer ikke ændres i projektet. Efterforbrændingskammeret skal dermed tilpasses de eksisterende forhold. Det er desuden et ønske, at det normale flammebillede så vidt muligt bevares og at frontglasset i det primære forbrændingskammer så vidt muligt ikke tilsodes.

Epoca ovnen er oprindelig opbygget med luftsystemer og pilotluft. Det hele reguleres af et enkelt multifunktionsspjæld. Tertiærluften tilføres i forbrændingskammerets skrå loft, som består af en 40 mm tyk vermiculite-sandwich med fræsede luftkanaler i de to pladesider, der vender mod hinanden.

TKK er designet således, at der i primærkammeret foretages en normal afbrænding af træ, der tilføres dog ikke primær- eller tertiærluft. Røggasserne, som indeholder pyrolyseproduktet, ledes herefter til et separat efterforbrændingskammer, hvor der sker en kontrolleret udbrænding af brændbare gasser og eventuelle sod- og tjærepartikler. Adskillelsen mellem de to kamre udføres, således at røggasserne samles i midten. For effektiv forvarmning føres forbrændingsluften gennem kanaler i skillepladen. Røggas og forbrændingsluft blandes i skillepladens luftspalter.

Efterforbrændingskammeret opbygges af et aktivt katalytisk materiale, der giver en mere fuldstændig forbrænding. Udformningen af efterforbrændingskammeret sker under hensynstagen til røggassernes opholdstid, nødvendige areal af de katalytisk aktive overflader, og minimering af tryktab.



FIGUR 9: PRINCIPSKITSE AF TKK.

De opstillede mål er:

- Lavt forbrændingskammer, således at flammerne kan nå op til spalten til efterforbrændingskammeret
- Lidt dårlig forbrænding i det primære brændkammer, således at der er næring til efterforbrændingskammeret (herunder bl.a. ingen tertiær luft)
- Tilsætning af opvarmet luft i efterforbrændingskammeret
- Røghylde over efterforbrændingskammeret for at nedkøle røgen
- Der skal være et nogenlunde normalt flammebillede i brændkammeret
- Rent glas ved primærbrændkammer
- Rent glas ved efterforbrændingskammer
- Resultatet skal have mindre indhold af CO, OGC og partikler i røggassen samt højere CO<sub>2</sub> målt i forhold til "normale brændeovne".

## 2. Indledende tests for udvikling af TKK

Forud for udviklingen af TKK er der foretaget forskellige indledende undersøgelser. Disse undersøgelser har til formål at afdække effekten af indbygning af en katalysator i en eksisterende brændeovn uden samtidig at konstruerer et efterforbrændingskammer. Ved konstruktion af et efterbrændingskammer ændres der på det visuelle design, hvilket kan være problematisk. Hvis det derfor er muligt at opnå lovende resultater ved hjælp af en katalysator alene, vil det være mest hensigtsmæssigt at arbejde videre i den retning.

Det er således formålet at se, i hvor høj grad det vil være muligt at opnå tilfredsstillende resultater med en katalysator, men uden et efterforbrændingskammer og uden væsentlig ændring af det visuelle design.

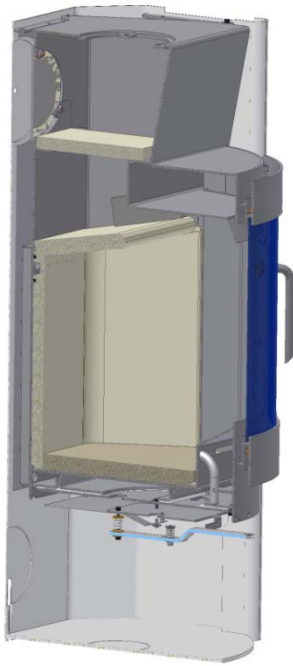
Til formålet er der foretaget sammenlignende undersøgelser af tre forskellige løsninger:

- placering af katalysator efter forbrændingskammeret, men inden røgstudsens - undersøgelse foretaget i en Rais Mino ovn
- placering af katalysator under røghylden i selve forbrændingskammeret - undersøgelse foretaget i en Rais Epoca ovn
- eksisterende røghyld erstattes af katalysator - undersøgelse foretaget i en Rais Epoca ovn

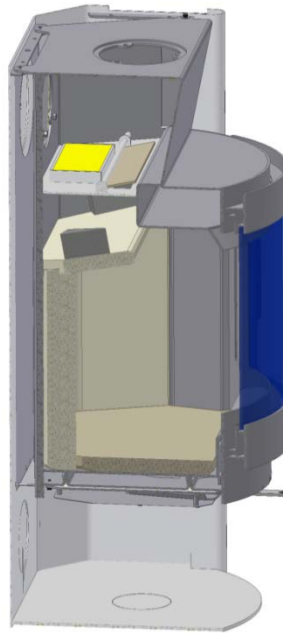
### 2.1 Katalysator på Rais Mino

Rais Mino ovnen har afrundet frontrude og lige sider uden glas. Ovnen har en nominel ydelse på 6 kW, og den er forsynet med et betjeningshåndtag til spjældregulering. Ovnen har primær, sekundær og tertiær lufttilførsel.

Der er udført test på en almindelig Rais Mino ovn og efterfølgende på en ombygget Rais Mino ovn, hvor røgvenderpladen af vermiculite er erstattet af en stålplade, der dækker hele ovnens tværsnitsareal. Stålpladen har isat katalysator og bypass spjæld, der kan betjenes manuelt. Bypass spjældet har ikke været anvendt i de gennemførte test.



FIGUR 10: TEGNING AF RAIS MINO



FIGUR 11: TEGNING AF RAIS MINO MED KATALYSATOR.

Den anvendte katalysator er af typen honeycomb fra Süd-Chemie Prototech<sup>2</sup> og er ifølge producenten designet til katalytiske processer ved forbrænding af brænde.

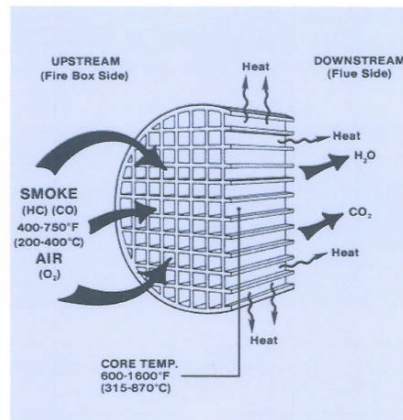
### Süd Chemie Prototech. Air Purification Catalyst WOOD & GAS CATALYTIC COMBUSTORS

#### Wood Stove Catalyst

Süd Chemie Prototech Long Life™, Long Life Plus™, and PRO\*ECO\* CAT™ Combustors provide economical and environmental solutions for the burning of wood as a source of heat. These catalytic combustors offer many of the unique properties that have made Süd Chemie Prototech catalysts the premier choice for catalytic converter systems for more than two decades. Süd Chemie Prototech has developed the optimum chemistry to yield a catalyst that yields the lowest emissions and longest life of any catalyst in the world. Süd Chemie Prototech's catalytic combustors are available in a variety of designs for wood burning stoves. When it comes to designing a new catalytic wood stove our engineers can work with you to develop the optimum shape and size for your stove.

#### Up to 50% More Heat

Burning wood smoke can require higher temperatures than practical in a wood stove. Smoke passing through a Süd Chemie Prototech catalytic combustor contacts a noble metal, which reduces the temperature at which smoke will burn by 50%\* and releases stored heat through radiant-heat transfer.



#### Up to 90% Less Pollution

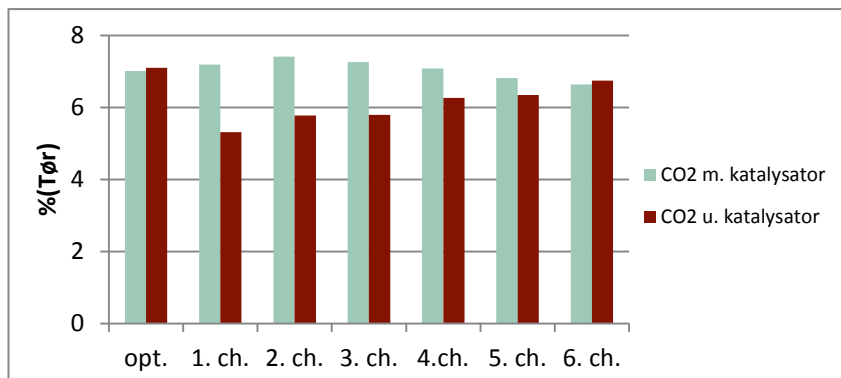
Gases and particles in smoke contribute to air pollution. The combustor eliminates 90%\* of wood stove pollution by burning these gases and particles before they exit the stove. Süd Chemie Prototech brings twenty years of research and development experience in the field of emissions control to catalytic combustors for your wood stove.

FIGUR 12: UDSNIT AF MATERIALE FRA SÜD-CHEMIE

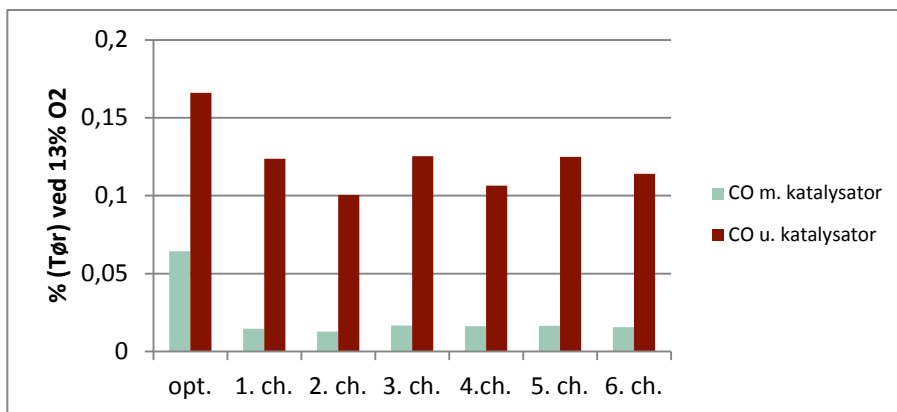
<sup>2</sup> I 2011 blev Süd-Chemie en del af Clariant.



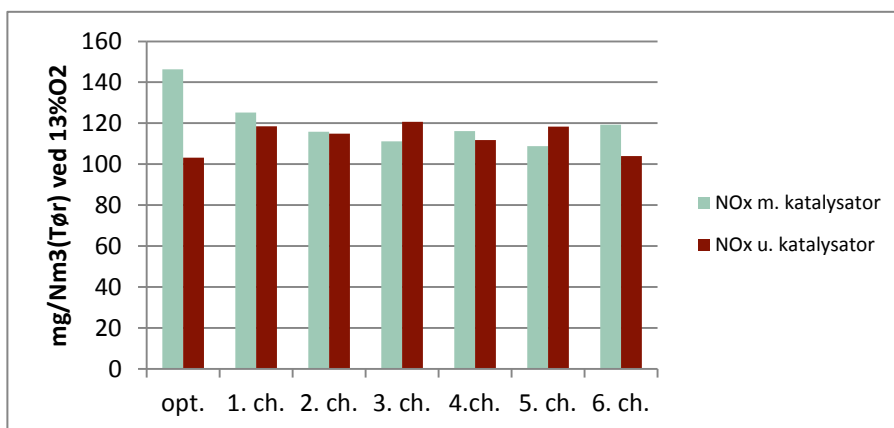
Resultaterne fra de gennemførte forsøg er vist i de efterfølgende otte figurer. De illustrerede søjlediagrammer viser middelværdien over en måleperiode der strækker sig fra indfyring til indfyring. Som det ses i figurerne, er målingerne gennemført fra optænding og efterfølgende ved seks indfyringer (charges) med katalysator og seks indfyringer uden katalysator.



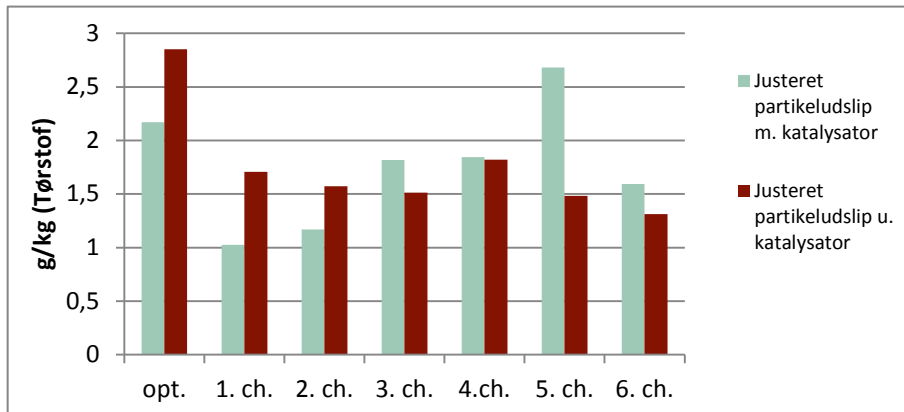
**FIGUR 1: KULDIOXID I RØGGAS, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.**



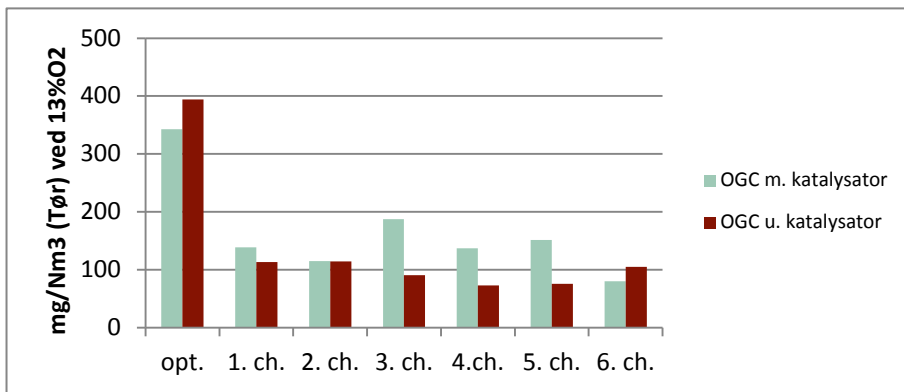
**FIGUR 2: KULILTE I RØGGAS, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.**



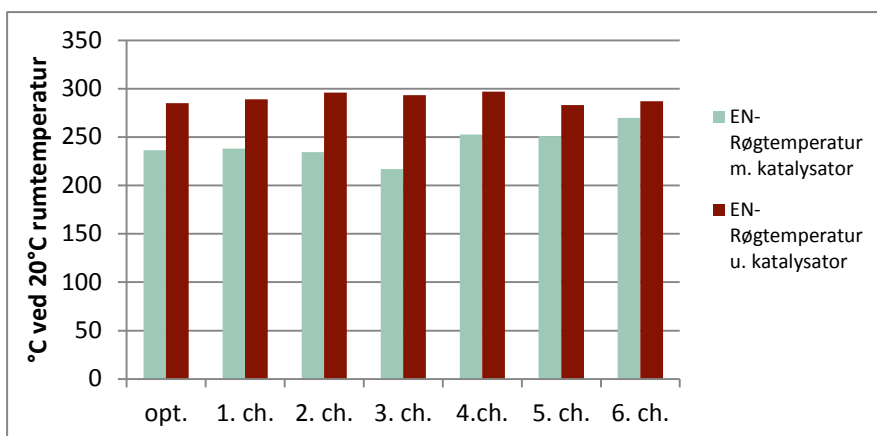
**FIGUR 3: KVÆLSTOFILTER I RØGGAS, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.**



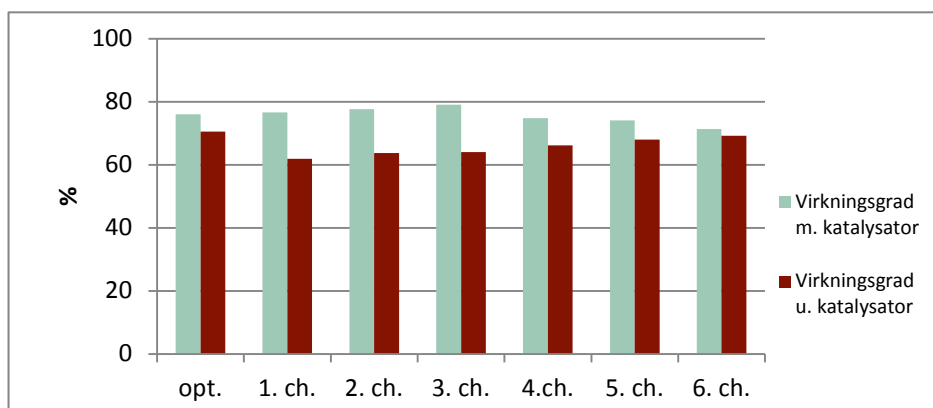
FIGUR 4: PARTIKLER I RØGGAS, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.



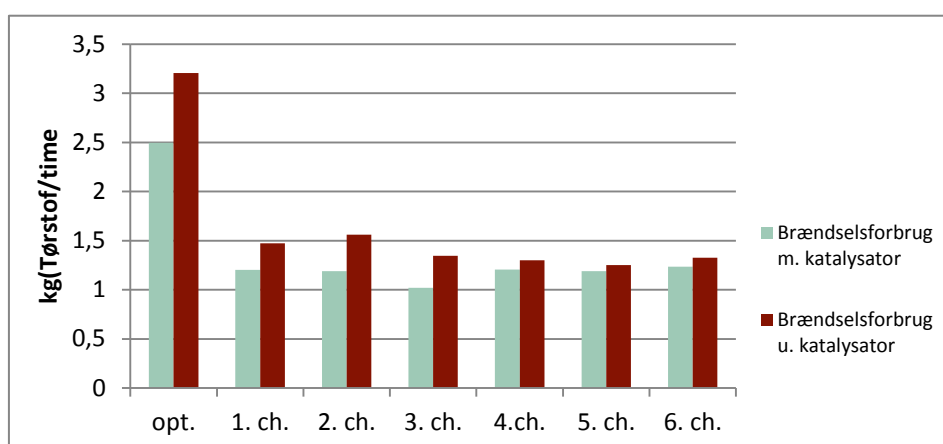
FIGUR 5: ORGANISK BUNDET KULSTOF I RØGGAS, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.



FIGUR 6: RØGGASTEMPERATUR, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.

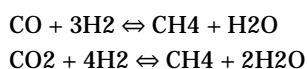


FIGUR 197: VIRKNINGSGRAD, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.



FIGUR 20: BRÆNDELSFORBRUG I RØGGAS, RAIS MINO MED OG UDEN KATALYSATOR.

Af figurerne fremgår det, at katalysatoren har god effekt på CO, som er reduceret til knap ti procent af den målte CO uden katalysator. Katalysatoren har ingen effekt på den målte udledning af NOx, partiker og OGC. Faktisk viser målingerne, at OGC er højere ved anvendelse af katalysator. Dette kan skyldes en metanisering, hvor reaktionen mellem carbonoxider og hydrogen danner metan i henhold til følgende:



Den reducerede røgtemperatur som ses ved anvendelsen af katalysator medfører en øget virkningsgrad, i takt med en uændret eller forbedret CO2 procent. Figur 20 viser, at de gennemførte forbrændingsperioder er sammenlignelige, idet afbrændte kilo per time er på samme niveau.

## 2.2 Tests med og uden katalysatormateriale i Rais Epoca

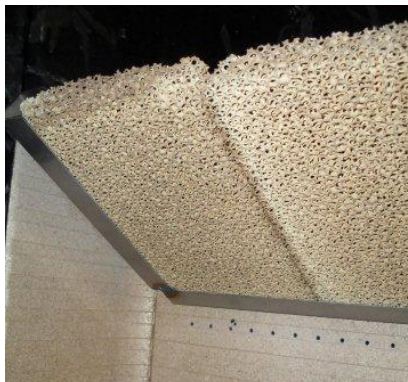
Der er foretaget tre fortløbende test på en almindelig Rais Epoca ovn, en Rais Epoca ovn med katalysator under den eksisterende røghylde samt med katalysator som erstatter røghylden.

Tilsvarende Rais Mino ovnen er Rais Epoca ovnen forsynet med et betjeningshåndtag til spjældregulering og har primær, sekundær og tertiær lufttilførsel. Tilførslen af tertiær luft adskiller

sig dog på Rais Epoca ovnen, idet luften her dels tilsættes i bagsiden af ovnen gennem en hulrække under røghylden, og dels føres fra bagsiden af ovnen gennem luftpassager i røghyldens vermiculite, hvorefter den tilsættes ned i brændkammeret gennem to rækker lufthuller i selve røghylden. I forsøgene med katalysator har det været nødvendigt at afblænde den del af tertiærluften der tilsættes via hullerne i røghylden.




FIGUR 21: FOTO AF RAIS EPOCA MED KATALYSATOR UNDER RØGHYLDE.



FIGUR 22: FOTO AF RAIS EPOCA MED KATALYSATOR I STEDET FOR RØGHYLDE.

Den anvendte katalysatoren i de to testrækker er en "skumstruktur"-type i zirkoniumoxid fra HearthCAT, Clear Skies Unlimited.

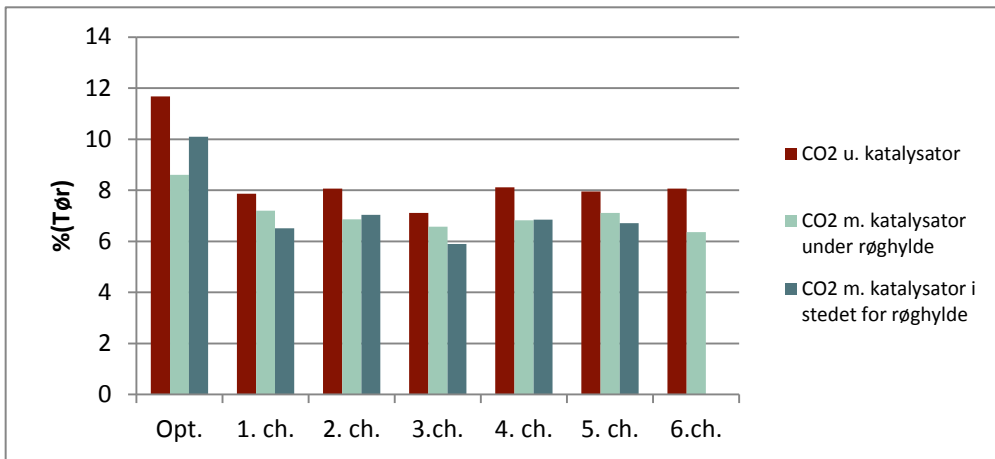


**HearthCAT™**

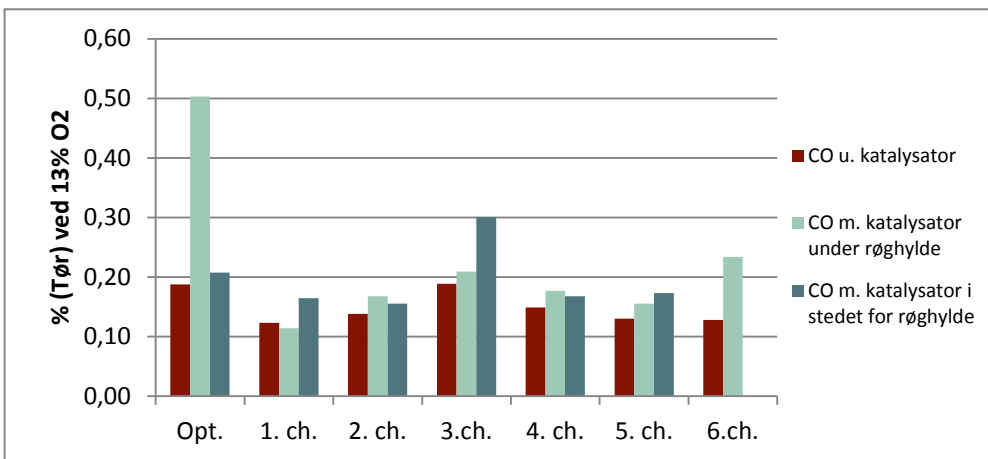
- **Design & Performance Features**
  - Reticulated Structure - Catalyst Support
    - Alumina Zirconia Ceramic (2000 F)
    - Optional Metal Foam (2200F)
  - Palladium Catalyst (Optional Platinum)
    - Coated @ 15 g/ft<sup>3</sup>
  - Minimal Pressure Drop
  - Very High Surface Area
  - No Thermal Crumbling
  - High Thermal Conductivity

FIGUR 8: UDDRAG AF MATERIALE FRA CLEAR SKIES UNLIMITED.

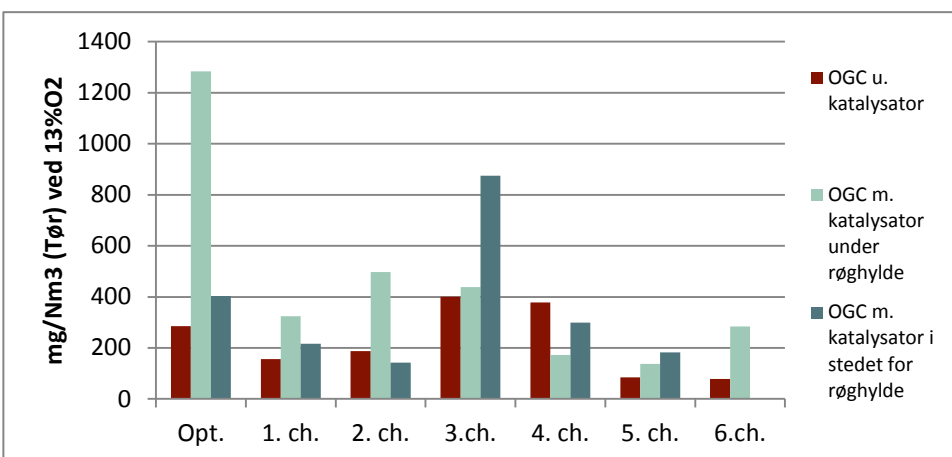
Resultaterne fra de udførte test kan ses i de efterfølgende figurer. De illustrerede søjlediagrammer viser middelværdien pr. charge. Som det ses i figurerne, er målingerne gennemført fra optændingsstart og efterfølgende ved henholdsvis fem, seks og syv påfyringer for test med katalysator i stedet for røghylda, katalysator under røghylda, og uden katalysator.



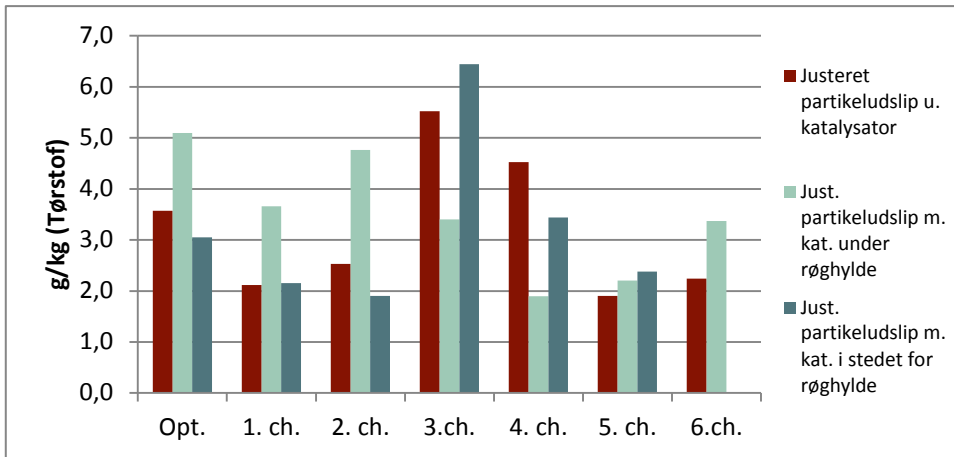
FIGUR 9 KULDIOXID I RØGGAS, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



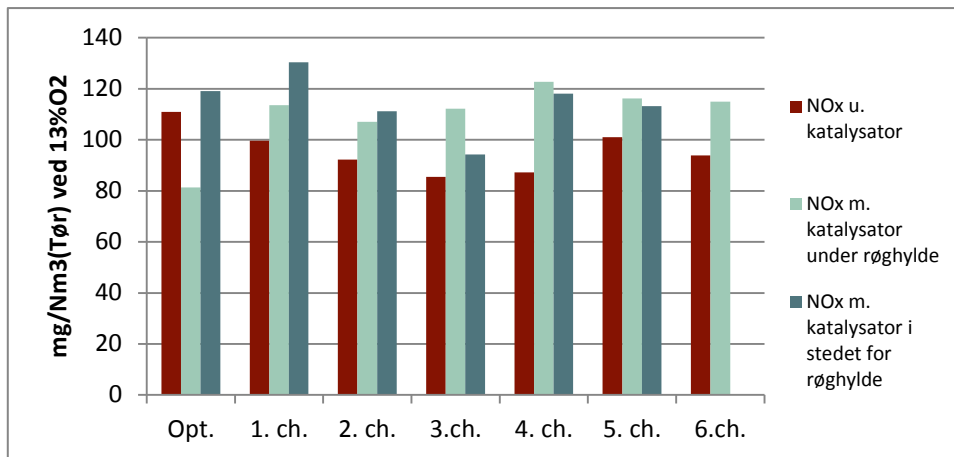
FIGUR 10: KULILTE I RØGGAS, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



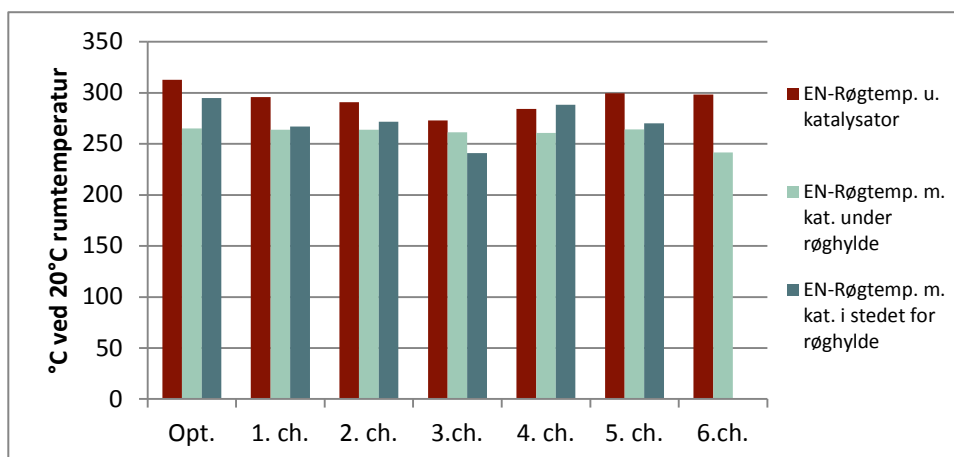
FIGUR 11: ORGANSK BUNDET KULSTOF I RØGGAS, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



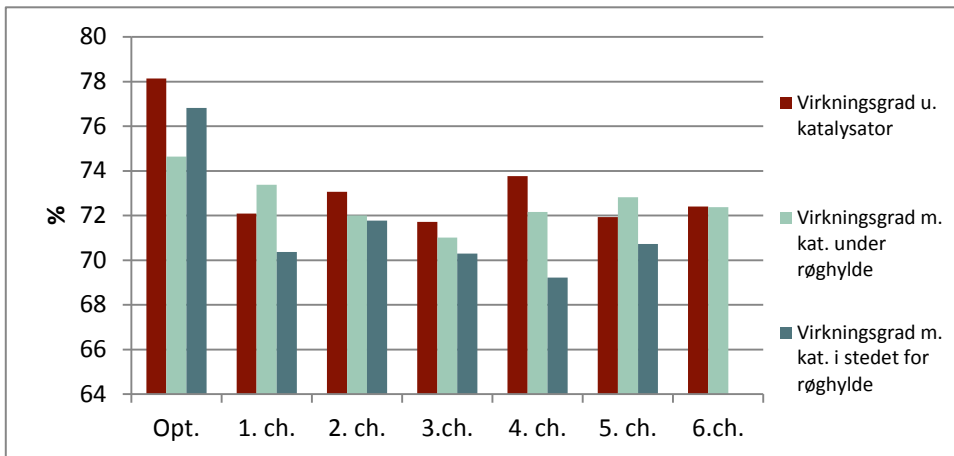
FIGUR 12: PARTIKLER I RØGGAS, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



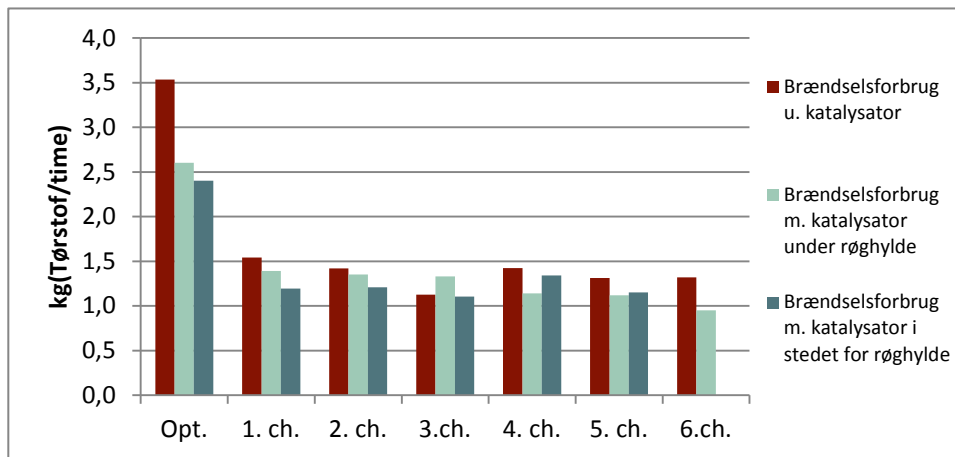
FIGUR 28: KVÆLSTOFILTER I RØGGAS, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



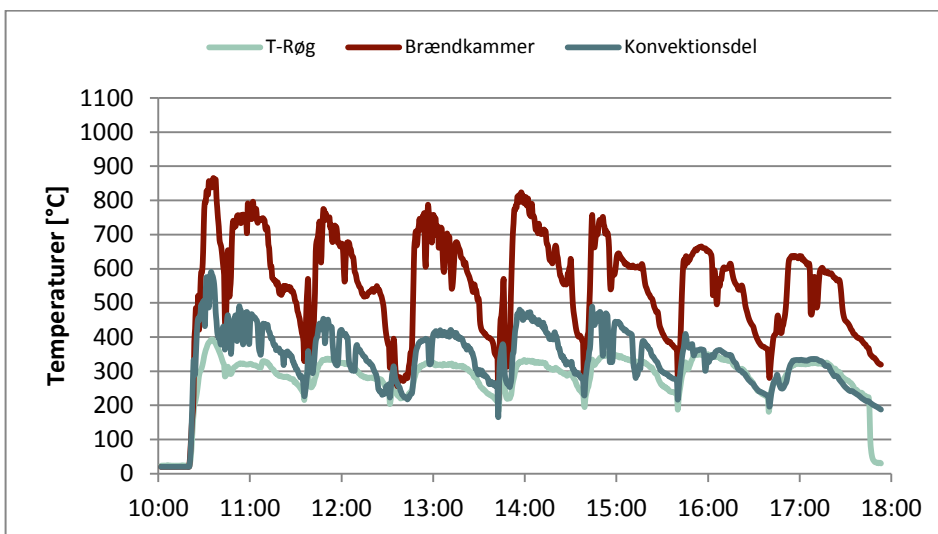
FIGUR 29: RØGGASTEMPERATUR, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



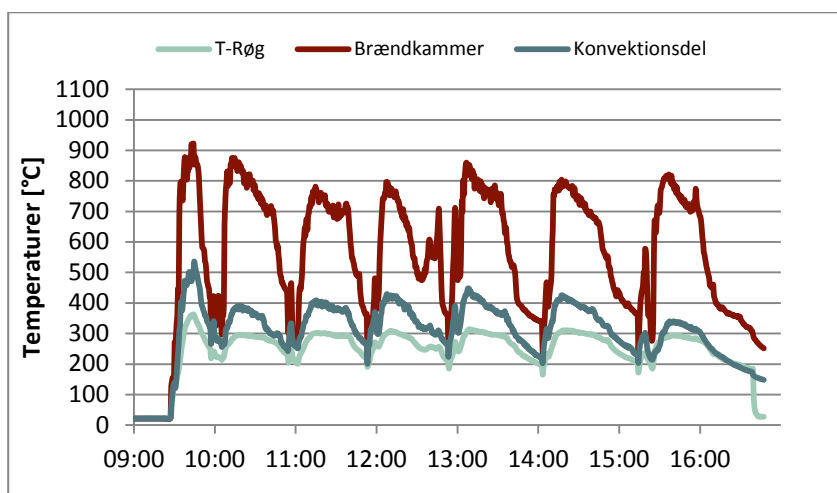
FIGUR 30: VIRKNINGSGRAD, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



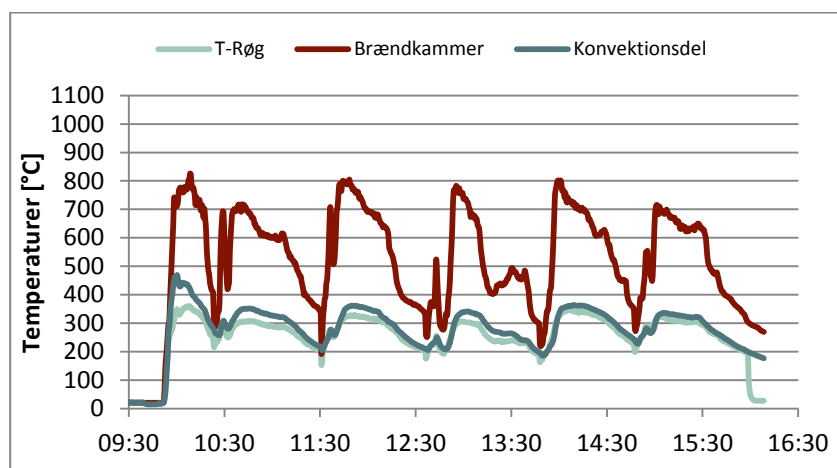
FIGUR 31: BRÆNDELSFORBRUG, RAIS EPOCA MED OG UDEN KATALYSATOR.



FIGUR 32 TEMPERATURER I ALMINDELIG RAIS EPOCA OVN



FIGUR 33: TEMPERATURER I RAIS EPOCA MED KATALYSATORPLADE UNDER RØGHYLDE



FIGUR 34: TEMPERATURER I RAIS EPOCA MED KATALYSATOR I STEDET FOR RØGHYLDE

Af figurene fremgår det, at katalysatoren i de to ovnmodifikationer ingen entydig effekt har på emissionerne, hverken i forsøgene med katalysator i stedet for røghylde eller med katalysator under røghylde.

Røggastemperaturen er svagt højere uden katalysator, hvilket imidlertid ikke resulterer i en reduceret virkningsgrad, idet en højere CO<sub>2</sub> procent opvejer den øgede røggastemperatur. Således er virkningsgraden uden katalysator på niveau med testene udført med katalysator.

Det vurderes, at især to forhold spiller ind i relation til den manglende effekt af katalysatoren i Rais Epoca ovnen. Dels kan det ikke afvises, at afblænding af lufttilsætningen i tertiærhullerne i røghylden resulterer i for lille tilsætning af tertiærluft til forbrændingen, og dels medfører katalysatorens placering som røghylde, at røggassen passerer henover strukturen og grundet tryktabet ikke passere igennem den, hvormed kontaktfladen bliver for lille.



### **2.3 Samlet vurdering fra indledende tests**

Forud for udviklingen af TKK er der foretaget indledende undersøgelser af katalysatorer indbygget i en allerede eksisterende brændeovn. Til formålet er der valgt to forskellige kommercielle katalysatorer.

Der er gennemført test med tre forskellige placeringer af katalysatorer. Til sammenligning er der desuden gennemført test på de anvendte ovne uden katalysator.

Resultaterne viser, at placering af katalysator efter forbrændingskammeret på Rais Mino ovnen, som en delvis erstatning og udbygning af røgvenderpladen, har en betydelig effekt på CO. Katalysatoren bevirker en reduktion på knap ti procent af den målte CO uden katalysator.

På ingen af de testede ovne/katalysator-konfigurationer er der målt positiv effekt på udledningen af NO<sub>x</sub>, partiker og OGC.

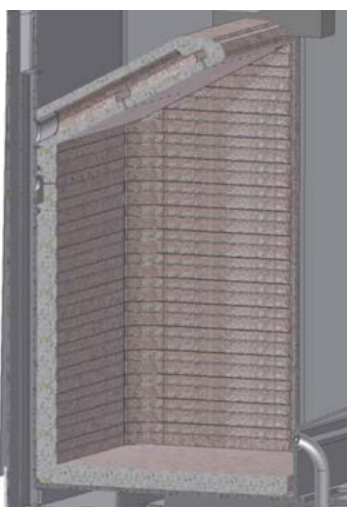
Baseret på de gennemførte test konkluderes det desuden, at katalysatoren ikke er funktionel, hvis den placeres som en del af afgrænsningen af ovnens brændkammer.

På trods af de opnåede reduktioner på CO emissionen må det konkluderes, at katalysatoren ikke alene kan opfylde de stillede mål, og på den baggrund arbejdes der videre med udvikling af TKK.

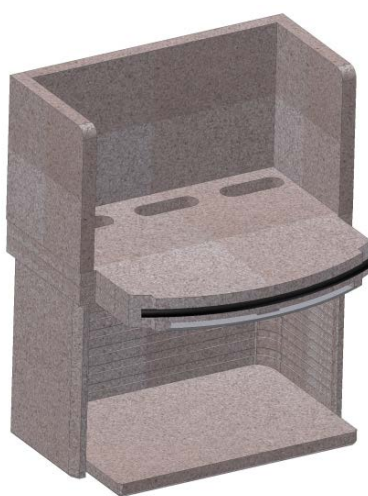
# 3. Udformning af TKK, vers. 1 & 2

## 2.4 Opbygning af TKK version 1

Udformning af et efterforbrændingskammer i TKK version 1 sker ved opdeling af Rais Epoca ovns oprindelige brændkammer i to dele, for dermed at ændre mindst muligt på væsentlige dele af ovnen.



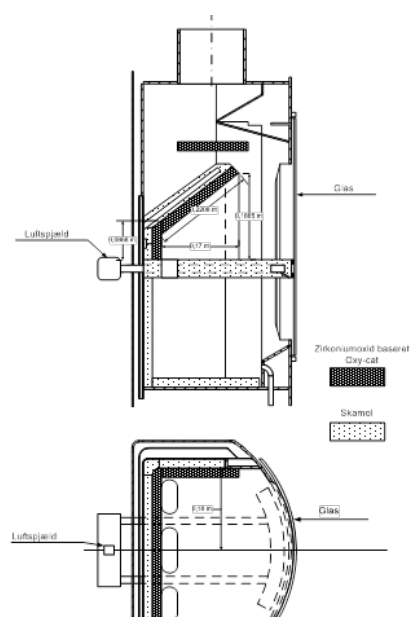
FIGUR 35: SNITTEGNING AF BRÆNDKAMMER I RAIS EPOCA



FIGUR 36: TEGNING AF BRÆNDKAMMEROPDELING.

Opdelingen sker ved hjælp af en ca. 45 mm tyk vermiculiteplade. Pladen har tre gennemgående rektangulære huller, hvorigennem røggassen fra det primære kammer kan ledes op i efterforbrændingskammeret. For at sikre de ønskede luftstrømninger er der en pakning mellem rude og vermiculiteplade.

Efterforbrændingskammeret bliver beklædt med katalytiske plader af fabrikatet HearthCAT, der også er benyttet i forbindelse med de forudgående test for udvikling af TKK (se kapitel 3)



FIGUR 37: TEGNING AF TKK VERSION 1.

Rais Epoca ovns luftreguleringsspjæld ændres fra det oprindelige system, hvor ét reguleringshåndtag gør det mulig for brugeren at justere på primærluften, til et avanceret system på TKK ovnen, hvor der kan reguleres frit på alle luftindtag separat. Mulige reguleringer omfatter primærluft (tilføres i bunden af brændkammerets front), sekundærluft (tilføres som rudeskyl i efterforbrændingskammeret), tertiærluft (tilføres fra efterforbrændingskammerets røghylde) og pilotluft (en fast primærluft, normalt uden spjæld, som tilføres i bunden af brændkammerets front).

Fra et nyt luftsysteem på ovns bagside ledes sekundær forbrændingsluft via to horisontale luftpassager i den 45 mm tykke vermiculite pladen frem til ruden. Forbrændingsluften herfra ledes ned langs ruden og ind til bålet på den nederste del af glasruden.



**FIGUR 38: LUFTSYSTEM I BUNDEN AF TKK - SET NEDEFRA.**



**FIGUR 39: LUFTSYSTEM I BUNDEN AF TKK - SET OVENFRA.**

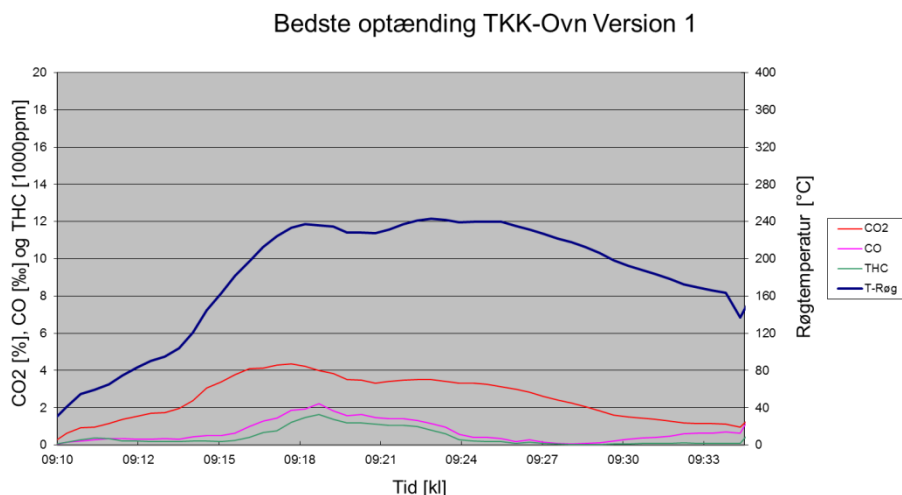
## 2.4.1 Målinger på TKK version 1

Der er gennemført tre testrækker, og der er således foretaget tre optændinger med henholdsvis efterfølgende fire, seks og fire indfyringer.

| TKK ovn Version 1 Målinger.                          |      |        |        |        |        |        |        |        |   |
|--|------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|---|
| 01-02-2011   | Opt. | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | Enhed   |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur |      | 184    | 251    | 273    | 303    | 245    |        |        | °C  |
| Røggasmasseflow                                      |      | 13,7   | 10,4   | 10,1   | 9,5    | 7,9    |        |        | g/s   |
| Virkningsgrad  |      | 75     | 64     | 69     | 65     | 67     |        |        | %   |
| Nominel varmeydelse, total                           |      | 9,5    | 5,1    | 7,1    | 6,1    | 4,4    |        |        | kW  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        |      | 5,8    | 5      | 6,7    | 6,5    | 5,4    |        |        | %   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    |      | 0,6206 | 0,3141 | 0,3253 | 0,3657 | 0,4211 |        |        | %   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     |      | 2212   | 1103   | 901    | 941    | 1365   |        |        | mgC/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13 % O <sub>2</sub>     |
| NOx (Som NO <sub>2</sub> )                           |      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |        |        | mg/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13% O <sub>2</sub>       |
|  |      |        |        |        |        |        |        |        |   |
| 02-02-2011   | Opt. | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | Enhed   |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur |      | 176    | 240    | 241    | 227    | 256    | 244    | 259    | 257 °C  |
| Røggasmasseflow                                      |      | 40,5   | 11,1   | 8,4    | 8,2    | 8,1    | 7,3    | 7,8    | 7,3 g/s   |
| Virkningsgrad  |      | 56     | 67     | 67     | 70     | 68     | 71     | 66     | 73 %  |
| Nominel varmeydelse, total                           |      | 8,7    | 5,6    | 4,3    | 4,6    | 4,5    | 4,8    | 4,3    | 5,8 kW  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        |      | 2,5    | 5,1    | 5,1    | 5,3    | 5,6    | 6,2    | 5,5    | 7,2 %   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    |      | 0,2074 | 0,0917 | 0,1823 | 0,2219 | 0,1509 | 0,1993 | 0,2793 | 0,2557 %  |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     |      | 674    | 171    | 415    | 665    | 276    | 408    | 600    | 389 mgC/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13 % O <sub>2</sub> |
| NOx (Som NO <sub>2</sub> )                           |      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0 mg/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13% O <sub>2</sub>     |
|  |      |        |        |        |        |        |        |        |   |
| 03-02-2011   | Opt. | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      | 7      | Enhed   |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur |      | 195    | 225    | 228    | 217    | 257    |        |        | °C  |
| Røggasmasseflow                                      |      | 12,9   | 8,9    | 8,2    | 8,2    | 8,7    |        |        | g/s   |
| Virkningsgrad  |      | 73     | 66     | 68     | 69     | 66     |        |        | %   |
| Nominel varmeydelse, total                           |      | 8,1    | 3,9    | 4,2    | 4,1    | 4,7    |        |        | kW  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        |      | 5,5    | 4,5    | 5      | 4,8    | 5,4    |        |        | %   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    |      | 0,4992 | 0,143  | 0,1265 | 0,2549 | 0,203  |        |        | %   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     |      | 1634   | 360    | 212    | 608    | 253    |        |        | mgC/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13 % O <sub>2</sub>     |
| NOx (Som NO <sub>2</sub> )                           |      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      |        |        | mg/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13% O <sub>2</sub>       |

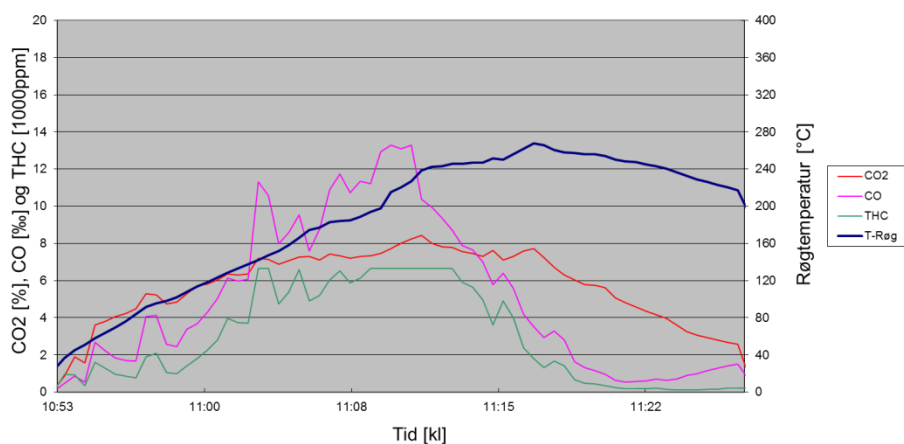
FIGUR 40: SAMLEDE DATA FRA MÅLINGER PÅ TKK VERSION 1.

I det følgende vises grafer for den bedste og dårligst optænding samt bedste og dårligste indfyring. Definitionen af den bedste og den dårligste indfyring er baseret på CO. Der er desuden vist tabeller med gennemsnitlige værdier. Resultaterne er kort kommenteret sidst i afsnittet.



FIGUR 41: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 1, OPTÆNDING.

Dårligste optænding TKK-Ovn Version 1

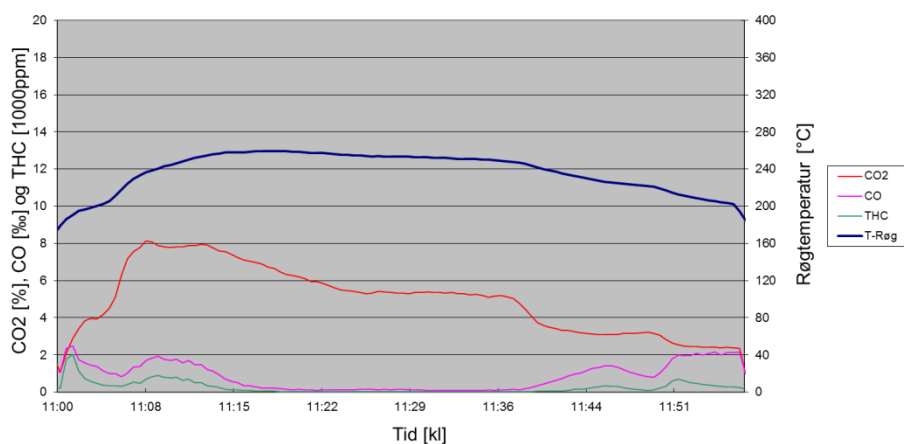


FIGUR 42: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 1, OPTÆNDING.

| Optænding TKK version 1 | Bedste | Middel | Dårligste |
|-------------------------|--------|--------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]   | 176    | 185    | 184       |
| CO2 [%]                 | 2,5    | 4,6    | 5,8       |
| CO [% ved 13% O2]       | 0,21   | 0,44   | 0,62      |
| OGC [mg/Nm3 ved 13% O2] | 674    | 1507   | 2212      |

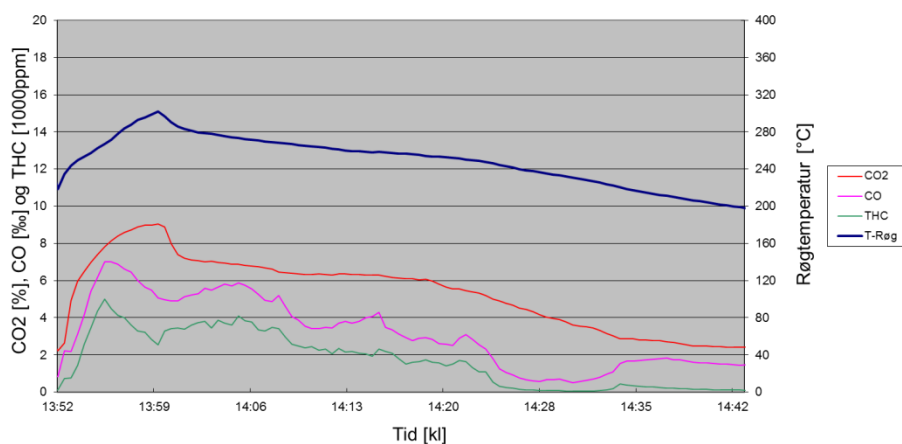
FIGUR 43: BEDSTE, DÅRLIGSTE OG MIDDELVÆRDI AF RESULTATER FRA OPTÆNDING, TKK VERSION 1.

Bedste charge TKK-Ovn Version 1

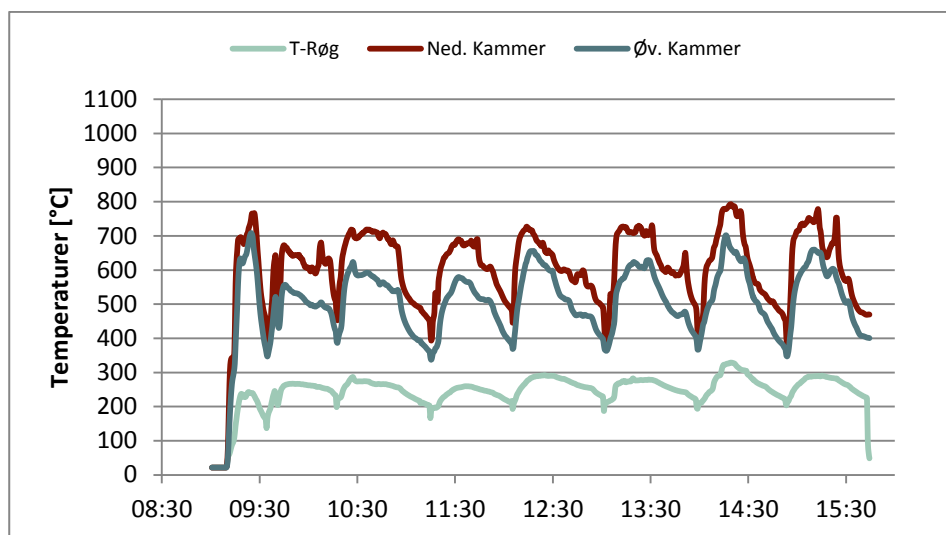


FIGUR 44: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 1, NOMINEL.

Dårligste charge TKK-Ovn Version 1



FIGUR 45: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 1, NOMINEL.



FIGUR 46: TEMPERATURER I TKK VERSION 1.

| Optænding TKK version1  | Bedste | Middel | Dårligste |
|-------------------------|--------|--------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]   | 240    | 249    | 245       |
| CO2 [%]                 | 5,1    | 5,4    | 5,4       |
| CO [% ved 13% O2]       | 0,09   | 0,23   | 0,42      |
| OGC [mg/Nm3 ved 13% O2] | 171    | 606    | 1365      |

FIGUR 47: BEDSTE, DÅRLIGSTE OG MIDDELVÆRDI AF RESULTATER FRA ALLE CHARGES, TKK VERSION 1.



FIGUR 48: FLAMMEBILLEDE, TKK VERSION 1.

Forsøg med TKK version 1 gav et utilfredsstillende resultat med 0,09-0,42 % CO og 171-1365 mg/m<sup>3</sup>n OGC. Kun den bedste charge er en smule bedre end en almindelig Rais Epoca ovn.

Der er stort set ingen forbrænding i efterforbrændingskammeret. Den øverste rude er sværtet, hvilket skyldes, at der er forsøgt med meget lidt rudeskyldsluft i sekundærkammeret for at øge CO<sub>2</sub> indholdet i røggassen.

## 2.5 Opbygning af TKK version 2

På baggrund af de gennemførte test med TKK version 1 vurderes det, at der er behov for yderligere tilførsel af forbrændingsluft til efterforbrændingskammeret. I version 1 blev der alene tilført forbrændingsluft til efterforbrændingen via luftkanalerne i røghylden. Lufttilførslen i version 2 øges derfor med tre sæt med to stk. Ø5mm huller placeret i de tre røggaspasser mellem primærkammeret og efterforbrændingskammeret. Luften tilføres fra ovns bagside direkte fra det fri.



FIGUR 49: BUND I EFTERFORBRÆNDINGSKAMMER MED 2X3 LUFTHULLER.

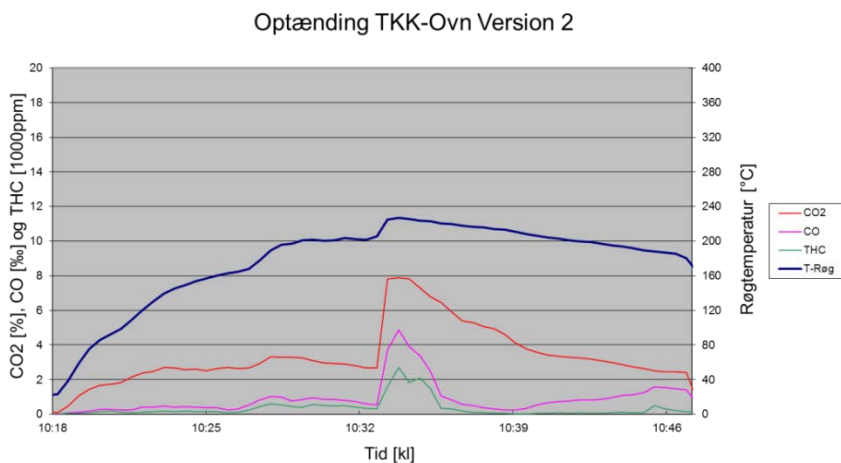
## 2.5.1 Måling på TKK version 2

Test er gennemført med én optænding og fem indfyringer.

| TKK ovn Version 2 Målinger.                                |        |        |        |        |        |        |  |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|
| 09-02-2011   | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6 7 Enhed  |
| Vægt pr. påfyring  | 1,44   | 1,43   | 1,41   | 1,41   | 1,41   | 1,51   | kg   |
| Nedre brændværdi   | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | MJ/kg  |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)                   | 0,50   | 0,93   | 0,89   | 0,89   | 0,90   | 0,88   | h  |
| Brændselsforbrug pr. time                                  | 2,89   | 1,54   | 1,58   | 1,59   | 1,57   | 1,72   | kg/h   |
| Middel rumtemperatur                                       | 24     | 28     | 29     | 29     | 30     | 30     | °C   |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur       | 173    | 225    | 240    | 250    | 245    | 276    | °C   |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                              | 3,4    | 4,6    | 4,6    | 5,7    | 5,6    | 5,1    | %  |
| CO, middelværdi  | 0,09   | 0,08   | 0,08   | 0,10   | 0,08   | 0,10   | %  |
| THC, middelværdi   | 347    | 260    | 205    | 89     | 137    | 93     | ppm (fugtig)                                       |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                        | 12     | 11     | 12     | 13     | 12     | 13     | Pa   |
| Nominal varmeydelse  | 7,8    | 4,2    | 4,1    | 4,5    | 4,4    | 4,3    | kW   |
| < 10% variation på NHO i forhold til middelværdi på to ch. | -      | -      | -      | -      | -      | -      | -  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                       |        |        |        |        |        |        |  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur       | 173    | 225    | 240    | 250    | 245    | 276    | °C   |
| Røggasmasseflow  | 22,8   | 9,1    | 9,3    | 7,7    | 7,6    | 9,1    | g/s  |
| Virkningsgrad  | 67     | 67     | 64     | 69     | 69     | 62     | %  |
| Nominal varmeydelse, total                                 | 7,8    | 4,2    | 4,1    | 4,5    | 4,4    | 4,3    | kW   |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                              | 3,4    | 4,6    | 4,6    | 5,7    | 5,6    | 5,1    | %  |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                          | 0,1973 | 0,1252 | 0,1349 | 0,1296 | 0,1067 | 0,1399 | %  |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>           | 425    | 235    | 187    | 67     | 104    | 77     | mgC/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13% O <sub>2</sub> |
| NOx (Som NO <sub>2</sub> )                                 | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | 0      | mg/nm <sup>3</sup> tør gas ved 13% O <sub>2</sub>  |

FIGUR 50: SAMLET DATA FRA MÅLINGER PÅ TKK VERSION 2.

Der vises grafer fra optænding samt for den bedste og dårligste indfyring. Definitionen af den bedste og den dårligste indfyring er baseret på CO. Der er desuden vist tabeller med gennemsnitlige værdier. Resultaterne er kort kommenteret sidst i afsnittet.



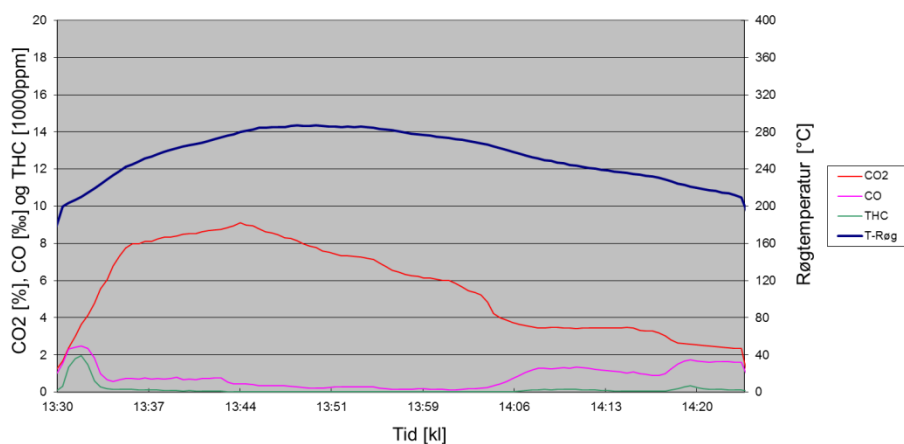
FIGUR 51: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 2, OPTÆNDING.

| Optænding TKK version 2                          | Bedste | Middel* | Dårligste |
|--|--------|---------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]                            | -      | 173     | -         |
| CO <sub>2</sub> [%]                              | -      | 3,4     | -         |
| CO [% ved 13% O <sub>2</sub> ]                   | -      | 0,20    | -         |
| OGC [mg/Nm <sup>3</sup> ved 13% O <sub>2</sub> ] | -      | 425     | -         |

FIGUR 52: RESULTATER FRA OPTÆNDING, TKK VERSION 2. BEMÆRK\*: KUN 1 OPTÆNDING.

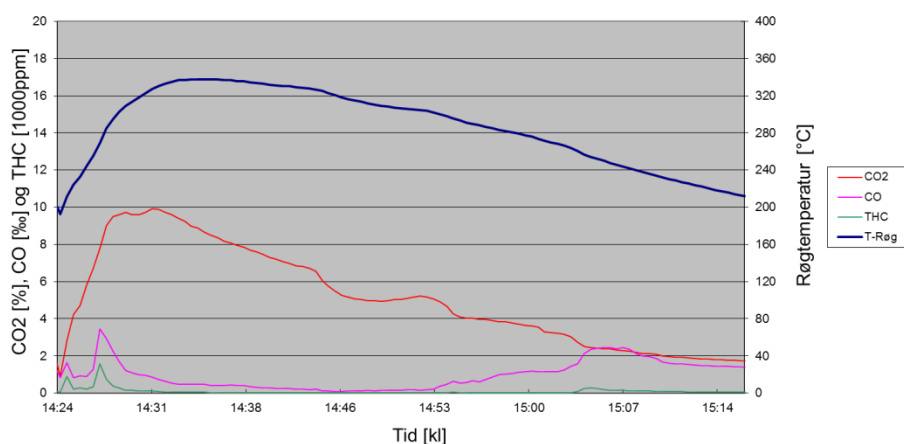


Bedste charge TKK-Ovn Version 2



FIGUR 53: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 2, NOMINEL.

Dårligste charge TKK-Ovn Version 2



FIGUR 54: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 2, NOMINEL.

| Optænding TKK version 2 | Bedste | Middel | Dårligste |
|-------------------------|--------|--------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]   | 245    | 247    | 276       |
| CO2 [%]                 | 5,6    | 5,1    | 5,1       |
| CO [% ved 13% O2]       | 0,11   | 0,13   | 0,14      |
| OGC [mg/Nm3 ved 13% O2] | 104    | 134    | 77        |

FIGUR 55: BEDSTE, DÅRLIGSTE OG MIDDELVÆRDI AF RESULTATER FRA ALLE CHARGES, TKK VERSION 2.



FIGUR 56: FLAMMEBILLEDE, TKK, VERSION 2.

I version 2 ovnen er der sket en forbedring i forhold til version 1, og resultaterne er nu på niveau med den oprindelige Rais Epoca ovn. Resultaterne fra de enkelte charges er forholdsvis ensartet.

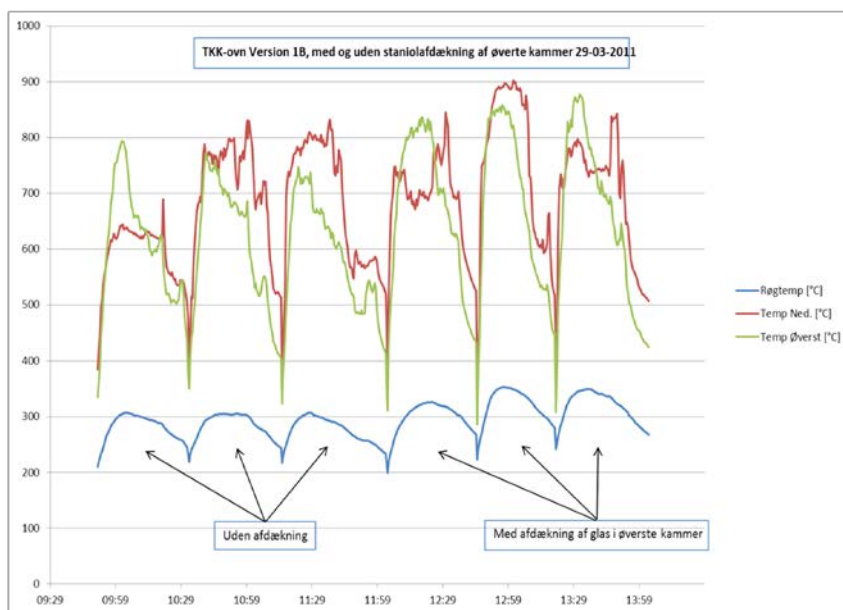
Efterforbrændingskammeret har imidlertid endnu ikke givet den ønskede effekt. Emissionerne er stadig ikke tilfredsstillende, idet der blev målt 0,11-0,15 % CO og 70-252 mg/m<sup>3</sup>n OGC. Indholdet af CO<sub>2</sub> i røggassen er også lavere end forventet, og det tilskrives, at temperaturen i efterforbrændingskammeret ikke er tilstrækkelig høj. For at undersøge om det relativt store glasareal i efterforbrændingskammeret kan være en betydende faktor, gennemføres supplerende test med reduktion af varmestrålingen fra glasruden.

## 2.6 Supplerende test med og uden stråling fra glasruden

Varmeafgivelsens betydning for temperaturen i efterforbrændingskammeret undersøges ved at gennemføre målinger med og uden afdækning af ruden. Temperaturen i det primære brændkammer og i efterforbrændingskammeret er samtidige målinger med termoelementer, som placeres i de respektive kamre fra lågens håndtagsside.



FIGUR 57: TKK VERSION 2, MED STRÅLINGSKÆRMNING.

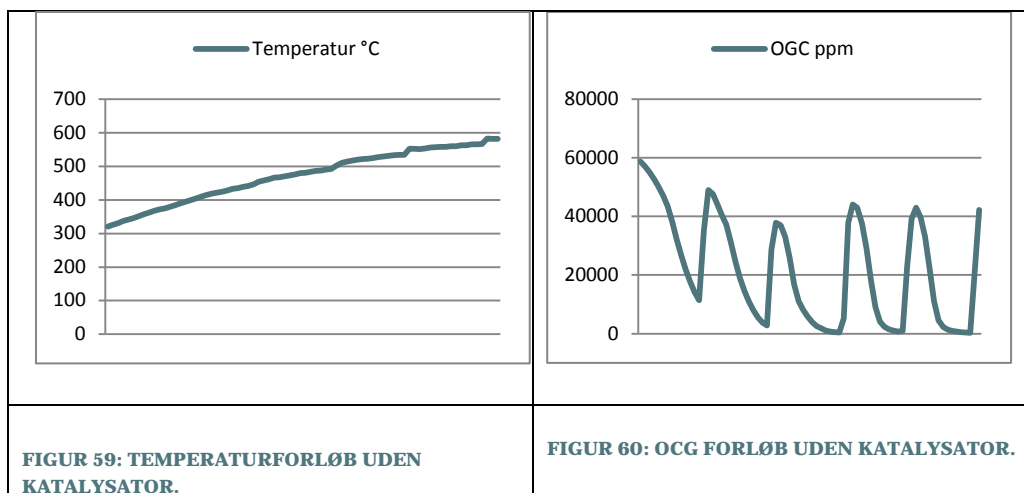


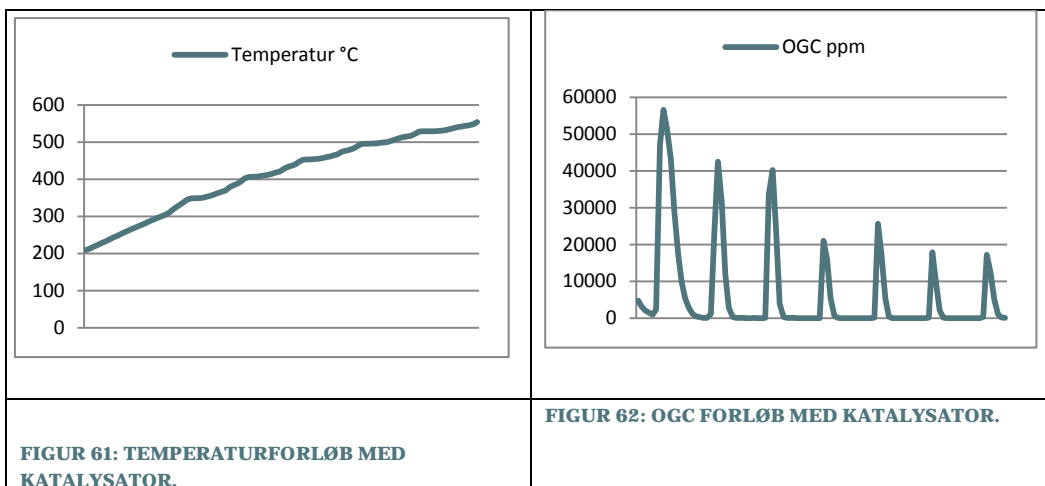
**FIGUR 58: MÅLTE TEMPERATURER MED OG UDEN STRÅLINGSAFSKÆRMNING, TKK VERSION 2.**

Resultaterne fra undersøgelsen viser, at røggastemperaturen stiger med op til 50 °C, og samtidig konstateres en øget temperatur i efterforbrændingskammeret på mellem 50 og 100 °C.

## 2.7 Supplerende test af katalysator i kontrolleret reaktor

Det fremgår af forsøgene med strålingsafskærmning, at temperaturer i hele systemet stiger markant. Der foretages derfor en undersøgelse af katalysatormaterialet for at se, om materialet er katalytisk aktivt. To plader af materialet blev neddelte til et groft granulat, som blev påfyldt en katalysator testunit. Herefter blev propans selvantændelsestemperatur målt, med og uden katalysator. Uden katalysator blev der konstateret en temperatur på 498-500 °C, helt i overensstemmelse med værdien, som oplyses i faglitteraturen. Med katalysator blev målt en temperatur på ca. 300 °C, hvilket er bevis for, at katalysatoren er aktiv. Projektet kan altså fortsat bygge på det indkøbte produkt. Det blev besluttet, at gå videre med en modifikation af efterforbrændingskammeret i TKK version 3.





## 2.8 Erfaringer fra tests på version 1 og 2

Det er lykkedes at få forbrændingskvaliteten forbedret mellem version 1 og 2, således at version 2 nu forbrændingsmæssigt er på niveau med den oprindelige Rais Epoca ovn samt har et acceptabelt flammebillede.

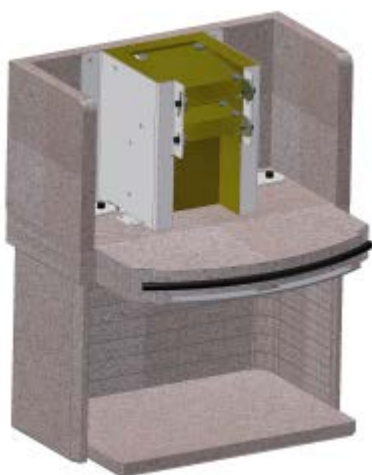
Efterforbrændingskammeret har imidlertid ikke givet den ønskede effekt og skal derfor undergå en forbedring, der kan bidrage til at øge CO<sub>2</sub> indholdet i røggassen. Efterforbrændingskammeret har i version 1 og 2 samme dimensioner som det primære kammer, hvilket ikke har givet mulighed for en koncentreret efterforbrændingszone, hvor der kan opnås høj turbulens og temperatur.

# 4. Udformning af TKK, vers. 3 & 4

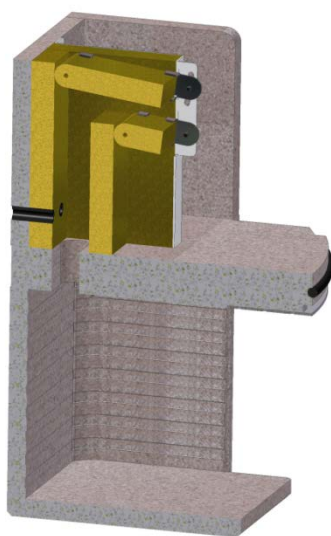
## 2.9 Opbygning af TKK version 3

Med henblik på at forbedre efterforbrændingszonen opbygges et lille kompakt lodretstående efterforbrændingskammer med vandret udløb. Kammeret opbygges af samme katalysatormaterialet som i version 1 og 2. Det vandrette udløb konstrueres således, at udløbsretningen og arealet kan justeres i forbindelse med forsøgene.

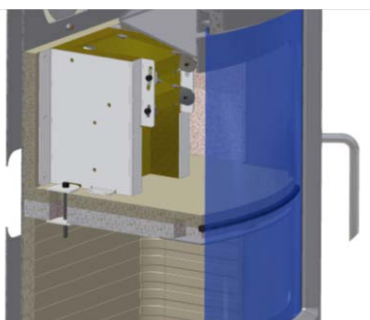
I forbindelse med etablering af det kompakte kammer lukkes de to yderste huller i efterforbrændingskammerets bund, således at forbrændingsgas fra det primære kammer strømmer direkte op i det kompakte kammer. Af de oprindelige tre sæt med to stk. Ø5mm huller fra ovns bagside, er de to yderste sæt nu blændet af, og det midterste øges med et tredje hul, således at der nu er tre forbrændingsluftsdyser af Ø10 mm. Dyser kan i forbindelse med forsøgene også ændres til Ø6 eller Ø8 efter behov.



FIGUR 63: BRÆNDKAMRE, TKK VERSION 3.



FIGUR 64: SNITTEGNING AF BRÆNDKAMRE, TKK VERSION 3.



FIGUR 65: SNITTEGNING AF BRÆNDKAMMER, TKK VERSION 3.



FIGUR 66: BUND I EFTERFORBRÆNDINGSKAMMER, TKK VERSION 3.

#### 4.1.1 Målinger på TKK version 3

Der er gennemført syv testrækker, og der er således foretaget syv optændinger med henholdsvis efterfølgende tre til fem indfyringer i hver testrække. Der vises grafer fra optænding samt for den bedste og dårligste indfyring. Der er desuden vist tabeller med gennemsnitlige værdier. Undervejs i prøverne er der justeret på spjældene for at optimere forbrændingen. Resultaterne er kort kommenteret sidst i afsnittet.

| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |  |                     |
|--|--------|--------|--------|--------|--|---------------------|
| 12-01-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      |  | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |  |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,84   | 1,62   | 1,69   | 1,88   |  | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  |  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,92   | 0,84   | 0,77   | 0,96   |  | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 2,00   | 1,93   | 2,21   | 1,97   |  | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 | 21     | 22     | 22     | 22     |  | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 214    | 259    | 292    | 296    |  | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,8    | 4,8    | 6,7    | 6,1    |  | %                   |
| CO, middelværdi                                      | 0,07   | 0,03   | 0,05   | 0,04   |  | %                   |
| THC, middelværdi                                     | 149    | 83     | 94     | 63     |  | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 13     | 12     | 13     | 12     |  | Pa                  |
| Nominel varmeydelse                                  | 5,6    | 4,9    | 6,1    | 5,2    |  | kW                  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |        |        |        |        |  |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 214    | 259    | 292    | 296    |  | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      | 11,4   | 11,1   | 9,1    | 8,9    |  | g/s                 |
| Virkningsgrad  | 69     | 63     | 69     | 65     |  | %                   |
| Nominel varmeydelse, total                           | 5,6    | 4,9    | 6,1    | 5,2    |  | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,8    | 4,8    | 6,7    | 6,1    |  | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,1055 | 0,0432 | 0,0571 | 0,0476 |  | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | 132    | 73     | 61     | 44     |  | mgC/nm <sup>3</sup> |

| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |  |                     |
|--|--------|--------|--------|--------|--|---------------------|
| 13-01-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      |  | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |  |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,54   | 1,87   | 2,01   | 1,98   |  | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  |  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,70   | 0,94   | 1,07   | 0,80   |  | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 2,22   | 1,99   | 1,88   | 2,47   |  | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 | 20     | 21     | 22     | 23     |  | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 201    | 282    | 292    | 313    |  | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 5,4    | 5,5    | 6,2    | 7,8    |  | %                   |
| CO, middelværdi                                      | 0,11   | 0,03   | 0,05   | 0,05   |  | %                   |
| THC, middelværdi                                     | 399    | 80     | 64     | 63     |  | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 13     | 13     | 13     | 13     |  | Pa                  |
| Nominel varmeydelse                                  | 6,7    | 5,2    | 5,1    | 7,1    |  | kW                  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |        |        |        |        |  |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 201    | 282    | 292    | 313    |  | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      | 11,0   | 10,1   | 8,3    | 8,7    |  | g/s                 |
| Virkningsgrad  | 74     | 64     | 67     | 71     |  | %                   |
| Nominel varmeydelse, total                           | 6,7    | 5,2    | 5,1    | 7,1    |  | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 5,4    | 5,5    | 6,2    | 7,8    |  | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,1493 | 0,0473 | 0,0664 | 0,0482 |  | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | 313    | 63     | 44     | 35     |  | mgC/nm <sup>3</sup> |

| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |        |  |                     |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--|---------------------|
| 16-01-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      |  | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |        |  |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,75   | 1,74   | 2,02   | 1,71   | 1,87   |  | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  |  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,84   | 0,83   | 1,25   | 1,09   | 1,08   |  | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 2,07   | 2,11   | 1,61   | 1,57   | 1,73   |  | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 | 20     | 21     | 22     | 22     | 22     |  | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 188    | 281    | 270    | 260    | 273    |  | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,5    | 6,3    | 6,3    | 6,1    | 6,1    |  | %                   |
| CO, middelværdi                                      | 0,07   | 0,04   | 0,08   | 0,08   | 0,09   |  | %                   |
| THC, middelværdi                                     | 156    | 95     | 116    | 177    | 139    |  | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     |  | Pa                  |
| Nominel varmeydelse                                  | 6,1    | 5,9    | 4,6    | 4,4    | 4,8    |  | kW                  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |        |        |        |        |        |  |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 188    | 281    | 270    | 260    | 273    |  | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      | 12,6   | 9,2    | 7,0    | 7,1    | 7,7    |  | g/s                 |
| Virkningsgrad  | 72     | 68     | 70     | 70     | 68     |  | %                   |
| Nominel varmeydelse, total                           | 6,1    | 5,9    | 4,6    | 4,4    | 4,8    |  | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,5    | 6,3    | 6,3    | 6,1    | 6,1    |  | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,1126 | 0,0502 | 0,0939 | 0,0967 | 0,1110 |  | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | 146    | 65     | 79     | 125    | 97     |  | mgC/nm <sup>3</sup> |

| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |        |        |                      |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|----------------------|
| 18-01-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | Enhed                |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |        |        |                      |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,66   | 1,77   | 1,72   | 1,97   | 1,83   | 1,79   | kg                   |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | MJ/kg                |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,70   | 0,97   | 0,95   | 0,98   | 1,11   | 1,15   | h                    |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 2,37   | 1,82   | 1,81   | 2,01   | 1,64   | 1,56   | kg/h                 |
| Middel rumtemperatur                                 | 20     | 21     | 22     | 22     | 22     | 22     | °C                   |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 183    | 277    | 286    | 300    | 269    | 257    | °C                   |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,4    | 5,6    | 5,8    | 6,1    | 6,0    | 6,6    | %                    |
| CO, middelværdi                                      | 0,22   | 0,04   | 0,08   | 0,07   | 0,03   | 0,06   | %                    |
| THC, middelværdi                                     | 919    | 92     | 117    | 106    | 68     | 163    | ppm (fugt)           |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     | Pa                   |
| Nominel varmeydelse                                  | 6,8    | 4,8    | 4,8    | 5,3    | 4,6    | 4,6    | kW                   |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |        |        |        |        |        |        |                      |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 183    | 277    | 286    | 300    | 269    | 257    | °C                   |
| Røggasmasseflow                                      | 14,0   | 9,0    | 8,5    | 9,0    | 7,6    | 6,5    | g/s                  |
| Virkningsgrad  | 71     | 65     | 65     | 65     | 69     | 72     | %                    |
| Nominel varmeydelse, total                           | 6,8    | 4,8    | 4,8    | 5,3    | 4,6    | 4,6    | kW                   |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,4    | 5,6    | 5,8    | 6,1    | 6,0    | 6,6    | %                    |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,3540 | 0,0570 | 0,1016 | 0,0867 | 0,0402 | 0,0698 | %                    |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | 872    | 70     | 86     | 74     | 49     | 106    | mgC/nm <sup>3</sup>  |
| NOx (Som NO <sub>2</sub> )                           | 0      | 56     | 142    | 131    | 121    | 104    | mg/nm <sup>3</sup> t |

| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |        |  |                     |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--|---------------------|
| 20-01-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      |  | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |        |  |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,79   | 1,86   | 1,86   | 2,09   | 2,19   |  | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  |  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,73   | 0,95   | 0,93   | 1,01   | 1,13   |  | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 2,44   | 1,95   | 2,01   | 2,06   | 1,94   |  | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 | 20     | 21     | 22     | 22     | 23     |  | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 208    | 286    | 291    | 291    | 298    |  | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 6,0    | 6,2    | 9,0    | 8,8    | 8,5    |  | %                   |
| CO, middelværdi                                      | 0,19   | 0,04   | 0,10   | 0,40   | 0,08   |  | %                   |
| THC, middelværdi                                     | 544    | 97     | 117    | 1143   | 76     |  | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     |  | Pa                  |
| Nominel varmeydelse                                  | 7,4    | 5,3    | 6,2    | 6,2    | 5,8    |  | kW                  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |        |        |        |        |        |  |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 208    | 286    | 291    | 291    | 298    |  | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      | 10,9   | 8,6    | 6,2    | 6,3    | 6,4    |  | g/s                 |
| Virkningsgrad  | 75     | 67     | 76     | 74     | 74     |  | %                   |
| Nominel varmeydelse, total                           | 7,4    | 5,3    | 6,2    | 6,2    | 5,8    |  | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 6,0    | 6,2    | 9,0    | 8,8    | 8,5    |  | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,2288 | 0,0535 | 0,0856 | 0,3334 | 0,0715 |  | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | 388    | 67     | 57     | 576    | 40     |  | mgC/nm <sup>3</sup> |

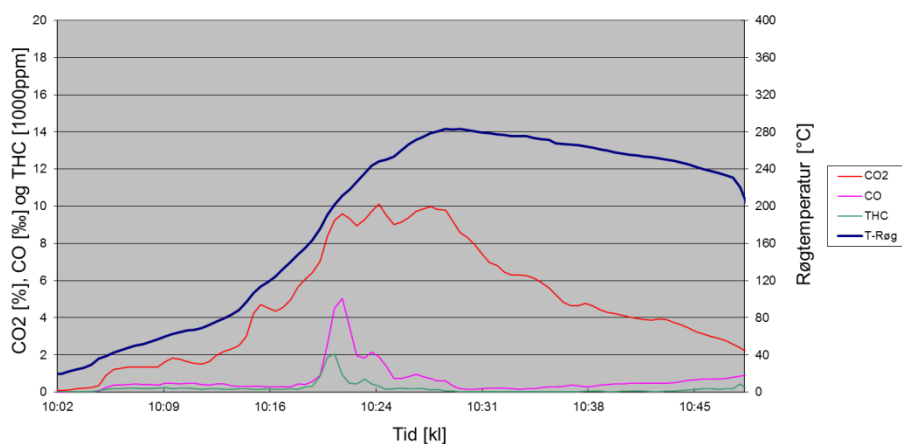
| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |        |  |                     |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--|---------------------|
| 23-01-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      |  | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |        |  |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,46   | 1,92   | 2,56   | 1,88   | 2,35   |  | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  |  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,69   | 0,98   | 1,29   | 1,23   | 1,28   |  | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 2,11   | 1,96   | 1,98   | 1,52   | 1,84   |  | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 | 18     | 20     | 21     | 21     | 22     |  | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 198    | 251    | 289    | 261    | 265    |  | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 5,6    | 7,1    | 8,2    | 6,8    | 7,6    |  | %                   |
| CO, middelværdi                                      | 0,12   | 0,04   | 0,27   | 0,14   | 0,21   |  | %                   |
| THC, middelværdi                                     | -1498  | -850   | 673    | 186    | 407    |  | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     |  | Pa                  |
| Nominal varmeydelse                                  | 6,4    | 5,9    | 5,9    | 4,5    | 5,5    |  | kW                  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |        |        |        |        |        |  |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 198    | 251    | 289    | 261    | 265    |  | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      | 10,2   | 7,6    | 6,6    | 6,1    | 6,6    |  | g/s                 |
| Virkningsgrad  | 75     | 75     | 73     | 72     | 74     |  | %                   |
| Nominal varmeydelse, total                           | 6,4    | 5,9    | 5,9    | 4,5    | 5,5    |  | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 5,6    | 7,1    | 8,2    | 6,8    | 7,6    |  | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,1556 | 0,0425 | 0,2449 | 0,1512 | 0,2022 |  | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | -1138  | -517   | 362    | 118    | 235    |  | mgC/nm <sup>3</sup> |

| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |        |  |                      |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--|----------------------|
| 26-01-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      |  | Enhed                |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |        |  |                      |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,53   | 2,19   | 2,20   | 2,20   | 2,20   |  | kg                   |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  |  | MJ/kg                |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,78   | 1,07   | 1,13   | 1,12   | 1,37   |  | h                    |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 1,96   | 2,04   | 1,95   | 1,96   | 1,60   |  | kg/h                 |
| Middel rumtemperatur                                 | 20     | 21     | 22     | 22     | 22     |  | °C                   |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 188    | 277    | 293    | 296    | 272    |  | °C                   |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,8    | 7,3    | 8,0    | 8,4    | 7,0    |  | %                    |
| CO, middelværdi                                      | 0,06   | 0,05   | 0,11   | 0,08   | 0,09   |  | %                    |
| THC, middelværdi                                     | 190    | 144    | 148    | 113    | 129    |  | ppm (fugt)           |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     |  | Pa                   |
| Nominal varmeydelse                                  | 5,9    | 6,0    | 5,8    | 5,9    | 4,7    |  | kW                   |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |        |        |        |        |        |  |                      |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 188    | 277    | 293    | 296    | 272    |  | °C                   |
| Røggasmasseflow                                      | 11,2   | 7,7    | 6,7    | 6,4    | 6,3    |  | g/s                  |
| Virkningsgrad  | 74     | 73     | 73     | 74     | 72     |  | %                    |
| Nominal varmeydelse, total                           | 5,9    | 6,0    | 5,8    | 5,9    | 4,7    |  | kW                   |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 4,8    | 7,3    | 8,0    | 8,4    | 7,0    |  | %                    |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,0990 | 0,0528 | 0,1058 | 0,0682 | 0,0968 |  | %                    |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | 167    | 85     | 81     | 59     | 79     |  | mgC/nm <sup>3</sup>  |
| NOx (Som NO <sub>2</sub> )                           | 153    | 111    | 109    | 237    | 109    |  | mg/nm <sup>3</sup> t |

Der vises grafer fra optænding samt for den bedste og dårligste indfyring. Definitionen af den bedste og den dårligste indfyring er baseret på CO. Bemærk at OGC værdien ikke altid følger CO. OGC og CO er typisk begge høje i indfyringen, mens kun CO er det i slutfasen. Der er desuden vist tabeller med gennemsnitlige værdier. Resultaterne er kort kommenteret sidst i afsnittet.

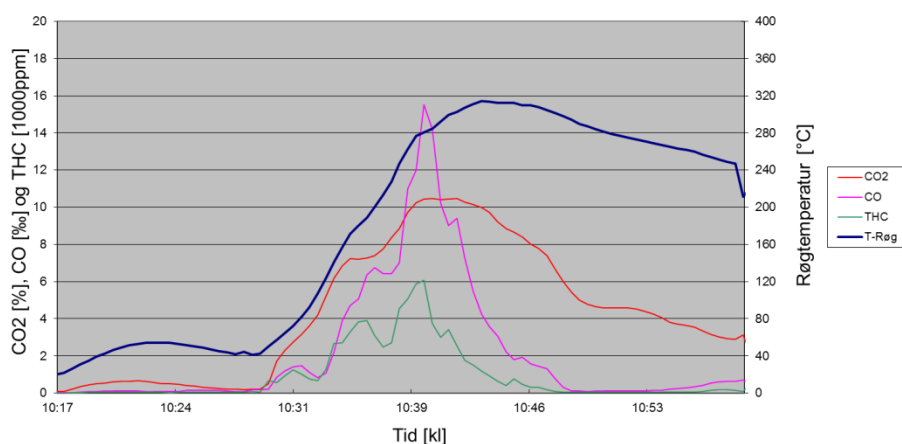


Bedste optænding TKK-Ovn Version 3



FIGUR 67: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 3, OPTÆNDING.

Dårligste optænding TKK-Ovn Version 3

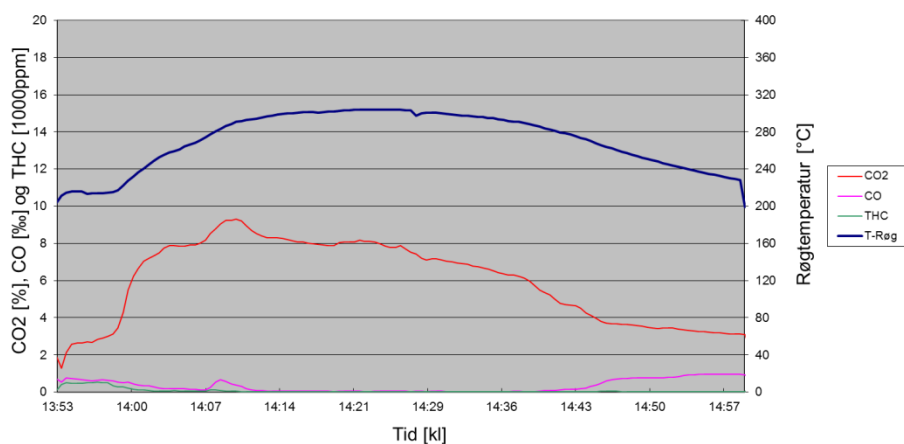


FIGUR 68: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 3, OPTÆNDING.

| Optænding TKK version 3 | Bedste | Middel | Dårligste |
|-------------------------|--------|--------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]   | 188    | 197    | 183       |
| CO2 [%]                 | 4,8    | 5,1    | 4,4       |
| CO [% ved 13% O2]       | 0,10   | 0,17   | 0,35      |
| OGC [mg/Nm3 ved 13% O2] | 167    | 125    | 872       |

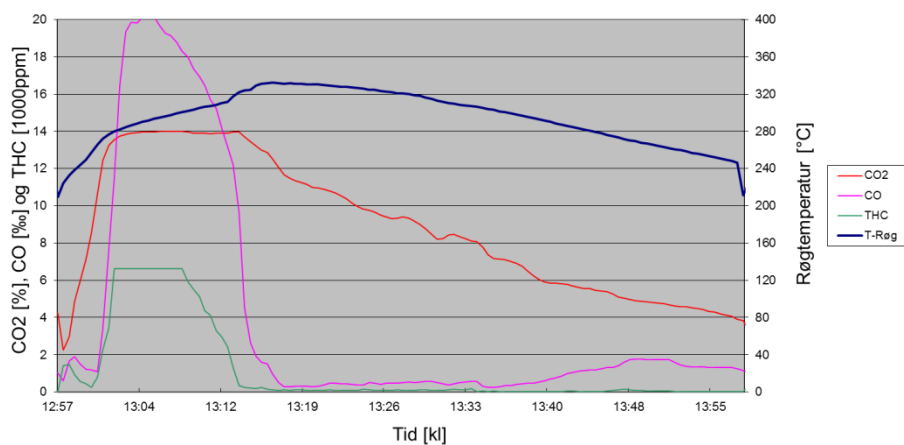
FIGUR 69: BEDSTE, DÅRLIGSTE OG MIDDELVERDI AF RESULTATER FRA OPTÆNDING, TKK VERSION 3.

Bedste charge TKK-Ovn Version 3

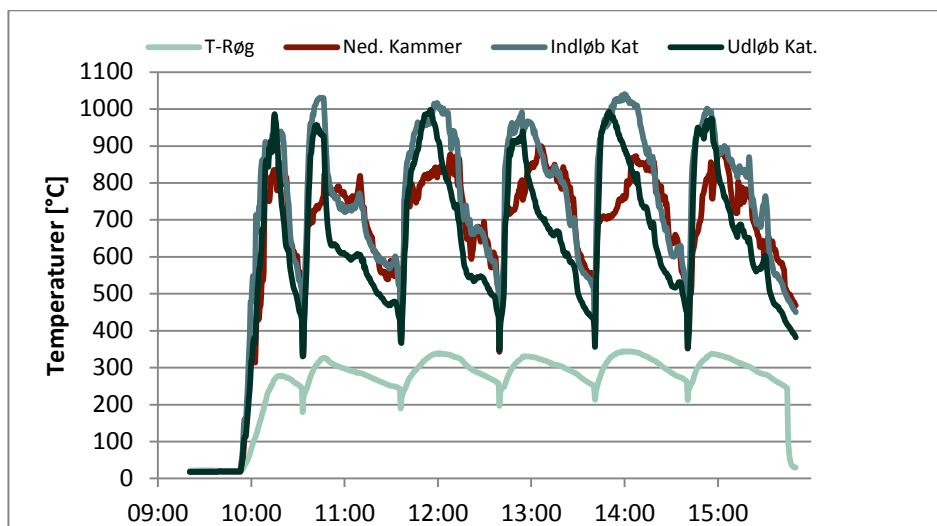


FIGUR 70: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 3, NOMINEL.

Dårligste charge TKK-Ovn Version 3



FIGUR 71: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 3, OPTÆNDING.



FIGUR72: TEMPERATURER I TKK VERSION 3.

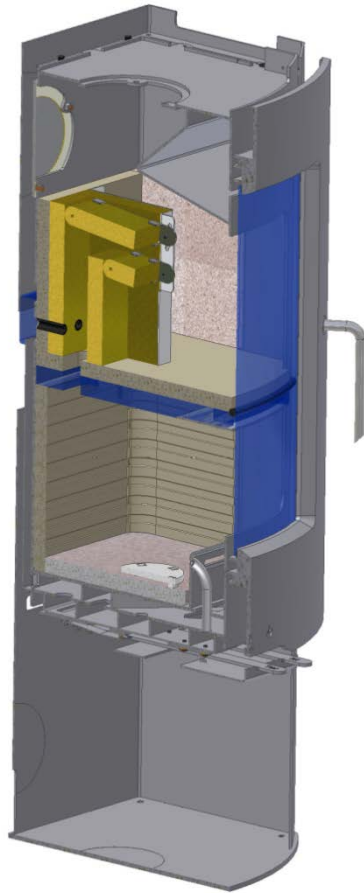
| Optænding TKK version 3                          | Bedste | Middel | Dårligste |
|--|--------|--------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]                            | 269    | 281    | 291       |
| CO <sub>2</sub> [%]                              | 6,0    | 6,8    | 8,8       |
| CO [% ved 13% O <sub>2</sub> ]                   | 0,04   | 0,09   | 0,33      |
| OGC [mg/Nm <sup>3</sup> ved 13% O <sub>2</sub> ] | 49     | 84     | 576       |

FIGUR 73: BEDSTE, DÅRLIGSTE OG MIDDELVÆRDI AF RESULTATER, TKK VERSION 1, NOMINEL.

Resultaterne fra TKK version 3 er hidtil de bedste, og det har vist sig muligt at genskabe gode resultater gentagende gange med kun ganske få undtagelser. De opnåede middelværdier er tæt på den bedste fyring, mens den dårligste afviger betydeligt på CO og OGC. Middelværdierne på CO og OGC ligger 35 % og knap 40 % under henholdsvis CO og OGC målt på TKK version 2.

## 2.10 Opbygning af TKK version 4

TKK version 4 opbygges som version 3, men idet der ønskes højere CO<sub>2</sub>, gerne en fordobling i forhold til middelværdien opnået i version 3, som er på 6,8 %, tilføjes et luftspjæld i bunden af det primære forbrændingskammer med ekstra primærluft (se rosetten i figur 74). Det primære luftspjæld forøger forgasningen i det primære kammer og medfører en større koncentration af brændbare gasser i det sekundære kammer.



**FIGUR 74: SNITTEGNING AF TTK-OVN VERSION 4.**

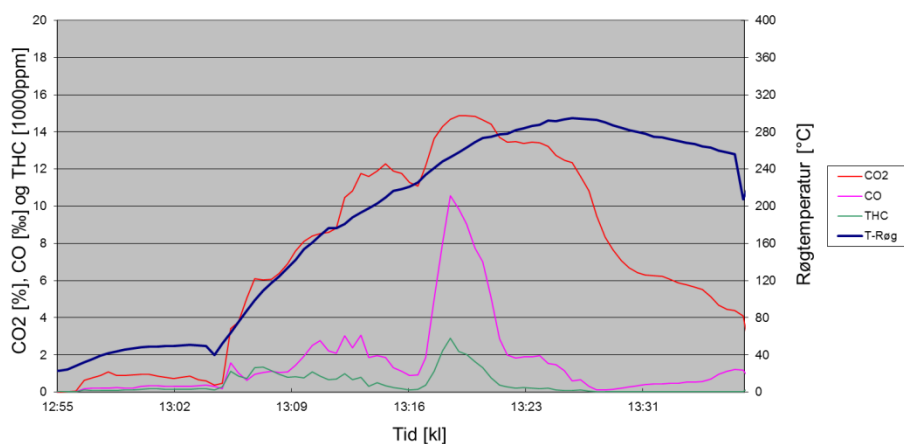
#### 4.1.2 Måling på TKK version 4

På samme vis som ved de foregående versioner af TKK ovnen er der gennemført et antal testrækker. I version 4 gennemføres to testrækker med i alt to optændinger og seks indfyringer. Der vises grafer fra optænding samt for den bedste og dårligste indfyring. Definitionen af den bedste og den dårligste indfyring er baseret på CO. Der er desuden vist tabeller med gennemsnitlige værdier. Resultaterne er kort kommenteret sidst i afsnittet.

| TKK-ovn version 4, målinger.                         |  |  |  |        |        |        |                     |
|--|--|--|--|--------|--------|--------|---------------------|
| 29-05-2012   |  |  |  | Opt.   | 1      | 2      | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |  |  |  |        |        |        |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    |  |  |  | 1,59   | 2,16   | 2,18   | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     |  |  |  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             |  |  |  | 0,70   | 0,99   | 0,89   | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            |  |  |  | 2,26   | 2,18   | 2,44   | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 |  |  |  | 22     | 23     | 23     | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur |  |  |  | 182    | 296    | 304    | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        |  |  |  | 7,3    | 9,1    | 8,8    | %                   |
| CO, middelværdi                                      |  |  |  | 0,16   | 0,17   | 0,22   | %                   |
| THC, middelværdi                                     |  |  |  | 439    | 381    | 570    | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  |  |  |  | 12     | 12     | 12     | Pa                  |
| Nominel varmeydelse                                  |  |  |  | 7,5    | 6,6    | 7,3    | kW                  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |  |  |  |        |        |        |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur |  |  |  | 182    | 296    | 304    | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      |  |  |  | 8,4    | 6,6    | 7,6    | g/s                 |
| Virkningsgrad  |  |  |  | 82     | 75     | 73     | %                   |
| Nominel varmeydelse, total                           |  |  |  | 7,5    | 6,6    | 7,3    | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        |  |  |  | 7,3    | 9,1    | 8,8    | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    |  |  |  | 0,1644 | 0,1436 | 0,1866 | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     |  |  |  | 261    | 187    | 289    | mgC/nm <sup>3</sup> |

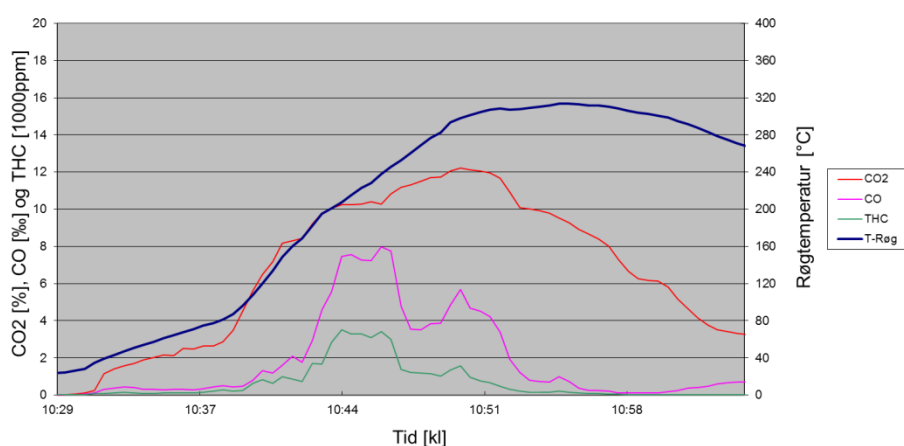
| TKK-ovn version 4, målinger.                         |  |  |  |        |        |        |        |        |                     |
|--|--|--|--|--------|--------|--------|--------|--------|---------------------|
| 30-05-2012   |  |  |  | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |  |  |  |        |        |        |        |        |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    |  |  |  | 1,59   | 2,21   | 2,20   | 2,11   | 2,25   | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     |  |  |  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             |  |  |  | 0,58   | 1,03   | 1,07   | 1,16   | 1,00   | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            |  |  |  | 2,74   | 2,15   | 2,05   | 1,81   | 2,25   | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 |  |  |  | 23     | 24     | 24     | 23     | 23     | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur |  |  |  | 203    | 267    | 292    | 274    | 273    | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        |  |  |  | 6,8    | 8,7    | 9,6    | 8,8    | 9,6    | %                   |
| CO, middelværdi                                      |  |  |  | 0,19   | 0,12   | 0,12   | 0,10   | 0,14   | %                   |
| THC, middelværdi                                     |  |  |  | 675    | 494    | 178    | 166    | 404    | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  |  |  |  | 12     | 11     | 11     | 11     | 11     | Pa                  |
| Nominel varmeydelse                                  |  |  |  | 8,7    | 6,7    | 6,4    | 5,6    | 7,1    | kW                  |
| Omregnede middelværdier af 1. charge                 |  |  |  |        |        |        |        |        |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur |  |  |  | 203    | 267    | 292    | 274    | 273    | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      |  |  |  | 10,8   | 6,8    | 5,9    | 5,7    | 6,5    | g/s                 |
| Virkningsgrad  |  |  |  | 78     | 77     | 77     | 77     | 78     | %                   |
| Nominel varmeydelse, total                           |  |  |  | 8,7    | 6,7    | 6,4    | 5,6    | 7,1    | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        |  |  |  | 6,8    | 8,7    | 9,6    | 8,8    | 9,6    | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    |  |  |  | 0,2073 | 0,1008 | 0,0917 | 0,0850 | 0,1124 | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     |  |  |  | 429    | 251    | 83     | 83     | 188    | mgC/nm <sup>3</sup> |

Bedste optænding TKK-Ovn Version 4



FIGUR 75: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 4, OPTÆNDING.

Dårligste optænding TKK-Ovn Version 4

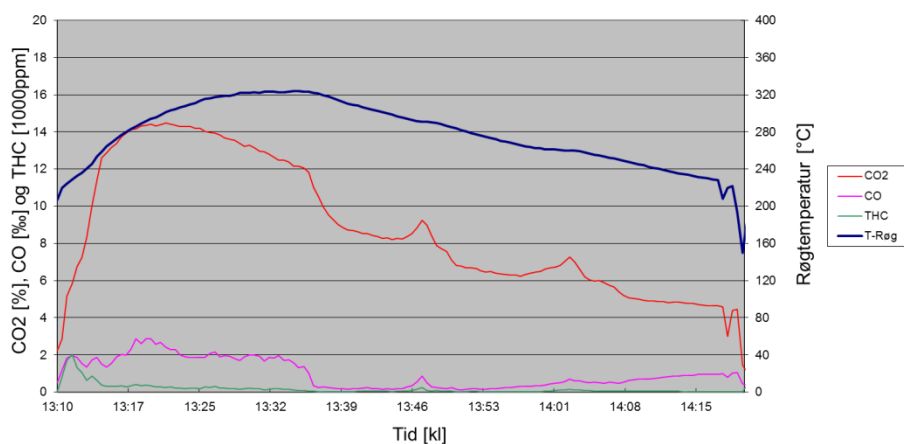


FIGUR 76: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 4, OPTÆNDING.

| Optænding TKK version 4 | Bedste | Middel* | Dårligste |
|-------------------------|--------|---------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]   | 182    | 193     | 203       |
| CO2 [%]                 | 7,3    | 7,1     | 6,8       |
| CO [% ved 13% O2]       | 0,16   | 0,19    | 0,21      |
| OGC [mg/Nm3 ved 13% O2] | 261    | 345     | 429       |

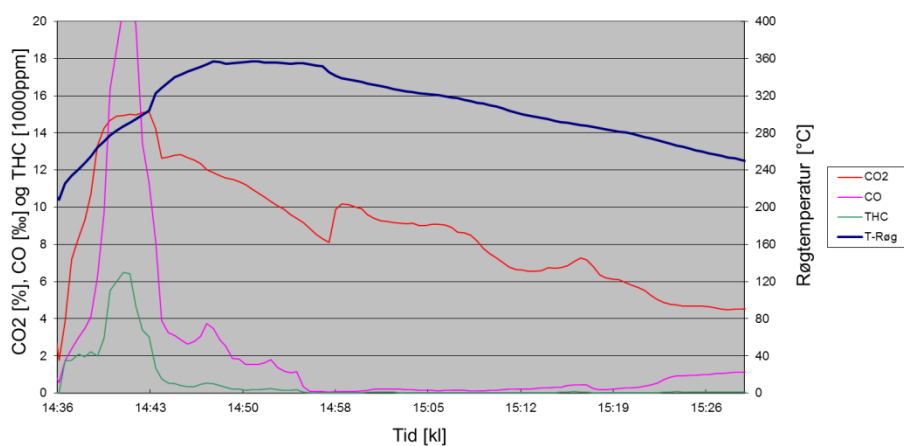
FIGUR 77: BEDSTE, DÅRLIGSTE OG MIDDLEVÆRDI AF RESULTATER FRA OPTÆNDING, TKK VERSION 4. BEMÆRK\*: KUN 2 OPTÆNDINGER.

Bedste charge TKK-Ovn Version 4



FIGUR 78: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 4, OPTÆNDING.

Dårligste charge TKK-Ovn Version 4



FIGUR 79: KULDIOXID, KULILTE, ORGANISK BUNDET KULSTOF OG RØGGASTEMPERATUR, TKK VERSION 4, OPTÆNDING.

| Optænding TKK version 4 | Bedste | Middel | Dårligste |
|-------------------------|--------|--------|-----------|
| Røggastemperatur [°C]   | 274    | 284    | 304       |
| CO2 [%]                 | 8,8    | 9,1    | 8,8       |
| CO [% ved 13% O2]       | 0,08   | 0,12   | 0,19      |
| OGC [mg/Nm3 ved 13% O2] | 83     | 180    | 289       |

FIGUR 80: BEDSTE, DÅRLIGSTE OG MIDDELVÆRDI AF RESULTATER, TKK VERSION 4, NOMINEL.

Det ses ved relativt få forsøg, at der som ønsket er opnået en højere CO<sub>2</sub> ved tilsætning af primær luft i det primære forbrændingskammer. CO<sub>2</sub> procenten ligger dog stadig betydeligt under de ønskede 13 %, og samtidig må det konstateres, at resultatet er opnået på bekostning af CO og OGC emissionen, idet CO nu ligger på niveau med TKK version 2, og OGC er forringet.

## **2.11 Erfaringer fra tests på version 3 og 4**

Det kompakte efterforbrændingskammer i TKK version 3 har bevirket, at der er opnået bedre resultater end i version 1 og 2. En ønsket forbedring af CO<sub>2</sub> er forsøgt i version 4 ved introduktion af et primært luftspjæld i bunden af det primære kammer. Formålet har været at få en større forgasning i det primære kammer med henblik på at øge koncentration af brændbare gasser i det sekundære kammer. Imidlertid er det ønskede niveau på ca. 13 % CO<sub>2</sub> ikke opnået, og en forbedring fra en CO<sub>2</sub> procent på 6,8 i version 3 til 9,1 i version 4, er sket på bekostning af CO og OGC emissionen, idet middelværdierne er øget fra 0,09 til 0,12 % for CO og fra 84 til 180 ppm for OGC.

Opbygningen af TKK version 3 og 4 er udført med mulighed for justering af efterforbrændingskammerets udløbsretning og -areal. På det primære luftspjæld som introduceres i version 4, er der desuden mulighed for regulering af luftmængden. I de gennemførte tests er der fortløbende, det vil sige før hver indfyring, foretaget justeringer på baggrund af de erfaringer, der er indhentet fra den foregående fyring.

Det er ikke lykkedes at opnå betydelige ændringer på emissionsresultaterne på baggrund af justeringerne. Det konkluderes derfor, at det ikke kan lade sig gøre at opnå tilstrækkelige forbedringer på version 4 alene ved at tilpasse luftmængder og efterforbrændingsudløbet. Det besluttet derfor, at de bedste resultater, der kan opnås indenfor projektets rammer, er ved optimering af indstillingsmulighederne på TKK version 3.



# 5. Sluttest med emissionsmålinger

I projektets slutfase gennemføres en serie miljøundersøgelser på den version af de fire udviklede TKK ovne, som har vist de mest lovende resultater. Som konkluderet i kapitel 5 er de bedste resultater inden for projektets rammer opnået med TKK version 3. Ovnene vil derfor blive underkastet yderligere miljøundersøgelser. Som referenceovn, der kan anvendes til sammenligning, vælges Rais Epoca ovnen, som også er den oprindelige ovn der i projektet er modificeret til TKK ovnen. Ovnene prøves under identiske betingelser med samme afgivne effekt. Prøverne skal vise de to ovnes emissioner af:

- Partikler (masse, antal og størrelsesfordeling)
- PAH
- Øvrige røggasparametre (CO, CO<sub>2</sub>, TOC).

Før den endelige serie miljøundersøgelser gennemføres endnu en testrække på TKK version 3 for at sikre optimale spjældindstillinger og indstillinger på efterforbrændingskammerets udløbsretning og -areal. Resultaterne ses i nedenstående tabel.

| TKK-ovn version 3, målinger.                         |        |        |        |        |        |        |        |  |  |                     |
|--|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--|--|---------------------|
| 31-05-2012   | Opt.   | 1      | 2      | 3      | 4      | 5      | 6      |  |  | Enhed               |
| Middelværdi af 1 charge                              |        |        |        |        |        |        |        |  |  |                     |
| Vægt pr. påfyring                                    | 1,57   | 2,20   | 2,20   | 2,20   | 1,83   | 1,81   | 1,96   |  |  | kg                  |
| Nedre brændværdi                                     | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  | 14,61  |  |  | MJ/kg               |
| Prøvens varighed (Min 0,75h i en charge)             | 0,66   | 0,91   | 0,99   | 1,01   | 0,90   | 0,85   | 0,90   |  |  | h                   |
| Brændselsforbrug pr. time                            | 2,37   | 2,43   | 2,21   | 2,17   | 2,02   | 2,14   | 2,18   |  |  | kg/h                |
| Middel rumtemperatur                                 | 23     | 23     | 24     | 24     | 24     | 24     | 24     |  |  | °C                  |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 193    | 297    | 312    | 306    | 307    | 295    | 305    |  |  | °C                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 7,0    | 9,2    | 9,4    | 9,1    | 9,4    | 8,9    | 9,7    |  |  | %                   |
| CO, middelværdi                                      | 0,19   | 0,08   | 0,04   | 0,09   | 0,08   | 0,07   | 0,38   |  |  | %                   |
| THC, middelværdi                                     | 516    | 155    | 34     | 88     | 80     | 70     | 840    |  |  | ppm (fugt)          |
| Skorstenstræk, middelværdi (12±2Pa)                  | 12     | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     | 13     |  |  | Pa                  |
| Nominal varmeydelse                                  | 7,7    | 7,4    | 6,7    | 6,5    | 6,2    | 6,5    | 6,6    |  |  | kW                  |
|  |        |        |        |        |        |        |        |  |  |                     |
| Omrregnede middelværdier af 1. charge                |        |        |        |        |        |        |        |  |  |                     |
| Røggastemperatur, middelværdi ved 20°C rumtemperatur | 193    | 297    | 312    | 306    | 307    | 295    | 305    |  |  | °C                  |
| Røggasmasseflow                                      | 9,1    | 7,3    | 6,6    | 6,6    | 6,0    | 6,6    | 6,1    |  |  | g/s                 |
| Virkningsgrad  | 80     | 76     | 75     | 75     | 75     | 75     | 75     |  |  | %                   |
| Nominal varmeydelse, total                           | 7,7    | 7,4    | 6,7    | 6,5    | 6,2    | 6,5    | 6,6    |  |  | kW                  |
| CO <sub>2</sub> , middelværdi                        | 7,0    | 9,2    | 9,4    | 9,1    | 9,4    | 8,9    | 9,7    |  |  | %                   |
| CO henført til 13% O <sub>2</sub>                    | 0,2035 | 0,0634 | 0,0285 | 0,0723 | 0,0679 | 0,0606 | 0,2901 |  |  | %                   |
| Org. Kulstof, OGC henført til 13% O <sub>2</sub>     | 320    | 75     | 16     | 43     | 38     | 35     | 390    |  |  | mgC/nm <sup>3</sup> |

## 2.12 Måleprogram for miljømålinger

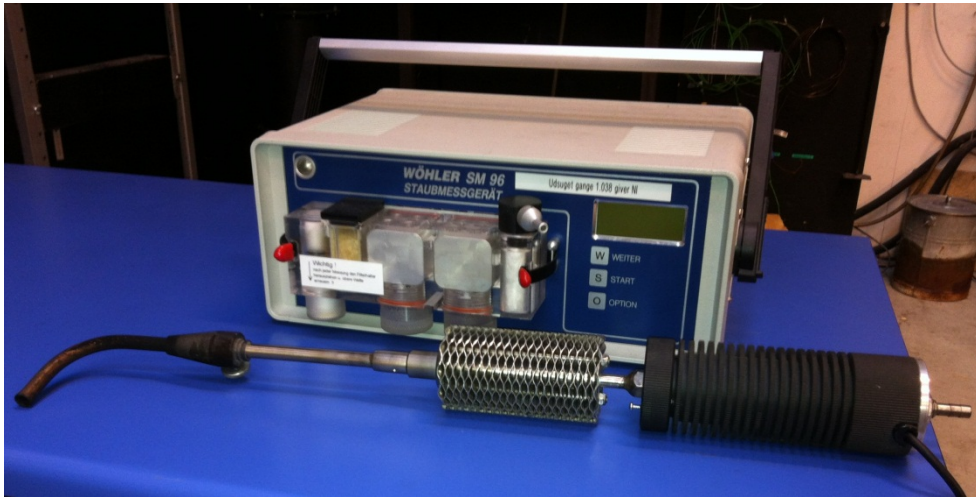
I forbindelse med miljømålingerne gennemføres tre prøvningsdage på Epoca og tre prøvningsdage på TKK. Alle prøvninger gennemføres ved nominal ydelse. En prøvningsdag omfatter optænding, forfyring og fire indfyringer. Med undtagelse af PAH-målingerne, hvor der er udvalgt forskellige testperioder på de to gange tre prøvningsdage, foretages der målinger over hele perioder.

### 5.1.1 Emissionsmålinger i henhold til brændeovnsstandarder

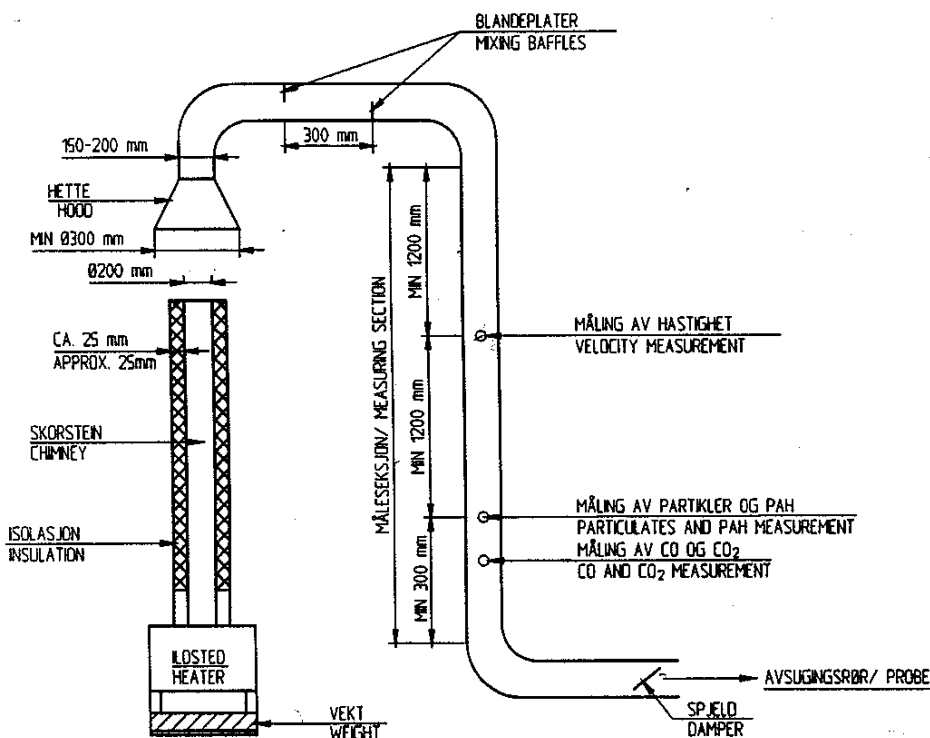
Miljømålingerne omfatter de traditionelle målinger efter DS/EN 13240 suppleret med DIN+. Der måles således CO, CO<sub>2</sub>, TOC (OGC), NO<sub>x</sub> samt gravimetrisk støv og partikelmålinger. Der skelnes mellem de gravimetriske bestemmelser som følger:

- Støv måles efter DIN+ med opvarmet filter. Der måles i perioden fra 3 til 33 minutter efter påfyring.

Partikler måles efter NS 3058 i fortyndingstunnel ved maksimalt 35 grader C. Partikler måles over hele nedbrændingen.



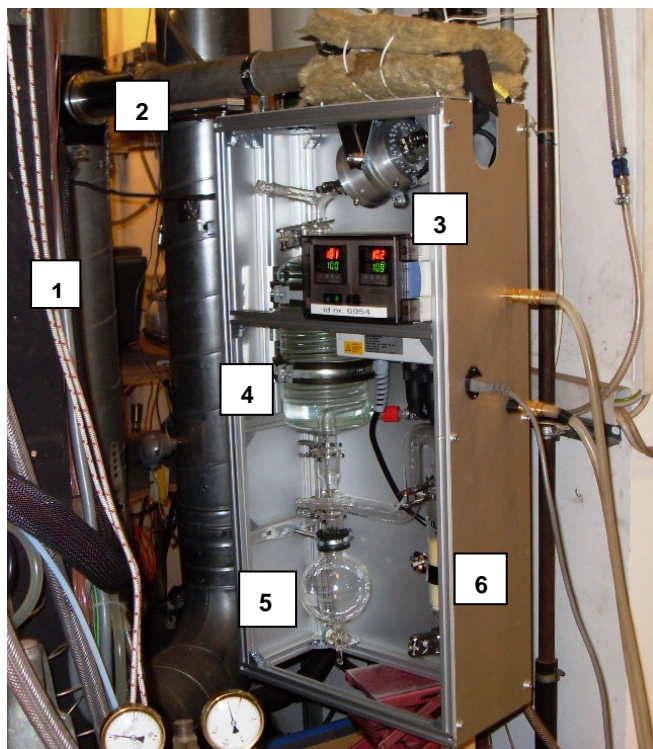
Figur 81: Wöhler instrument til støvmåling efter DIN+.



FIGUR 82: FORTYNDINGSTUNNEL EFTER NS3058.

### 5.1.2 PAH-målinger

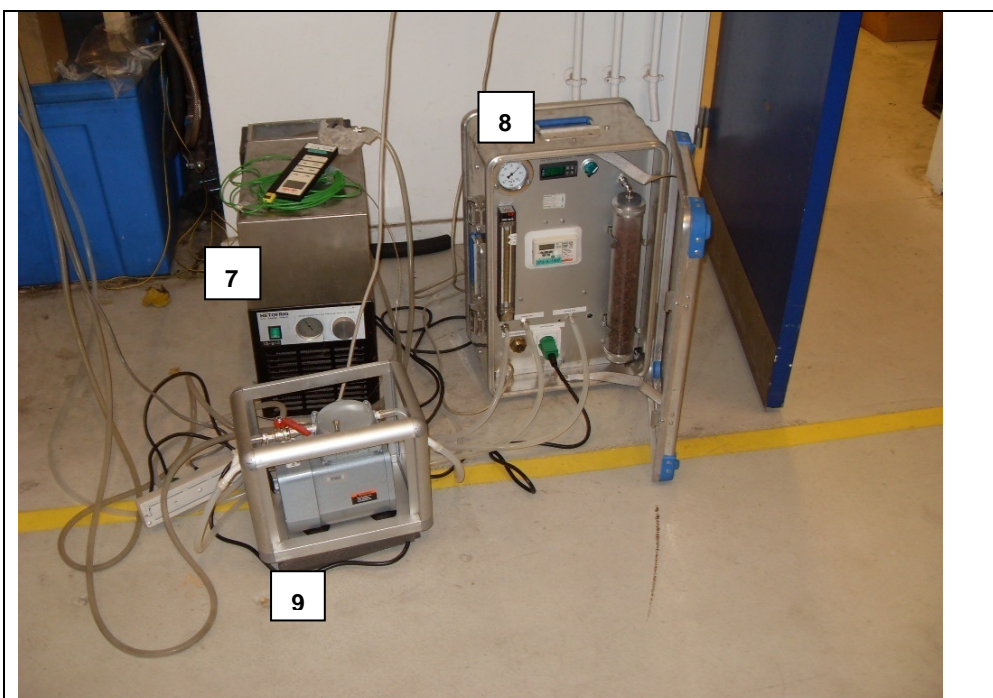
Polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) er en gruppe tjærestofforbindelser der emitteres som partikler og gasser til luften i forbindelse med forbrænding af f.eks. brænde. PAH er mistænkt for at være kræftfremkaldende, og brændeovne peges på som en af synderne for et øget totaludslip af PAH i Danmark i perioden 2000-2006. Det findes derfor centralt at måle PAH i nærværende miljømålinger. Det anvendte udstyr er beskrevet i det følgende:



FIGUR 83: PAH MÅLEUDSTYR.

| Pos. |                                    |
|------|------------------------------------|
| 1    | Røggaskanal                        |
| 2    | Opvarmet prøvetagningssonde (glas) |
| 3    | Ovn med partikelfilter             |
| 4    | Vandkølet glasrørssvaler           |
| 5    | Kondensbeholder                    |
| 6    | Adsorption af VOC (PUF)            |

Fra røggaskanalen (1) udsuges en delmængde via en opvarmet glassonde, som er anbragt i et varmeisoleret stålør (2). Den udsugede røggas passerer et opvarmet kvartsuldfilter, som er anbragt i en ovn (3). Her udskilles partikler og organiske substanser, som måtte være hæftet til partiklerne. Gasformige stoffer passerer filteret, hvorefter de bliver afkølet i en glasrørssvaler (4). Vand- og tjæredampe kondenserer i svaleren, hvorefter kondensatet løber ned i glaskolben (5). Røggassen, som stadig indeholder flygtige bestanddele (VOC), passerer en glaskolbe (6), som er fyldt med polyuretanskum (PUF). Her udskilles de sidste flygtige organiske komponenter. Efter hver måling skylles prøvetagningsudstyret med acetone og toluen. Udsugning, køling og konditionering af røggasprøven sker vha. udstyr, som er vist i figur 84. På laboratoriet ekstraheres filter og PUF, hvorefter ekstrakterne, kondensatet og skyllevæsken analyseres for PAH ved hjælp af GC/MS.

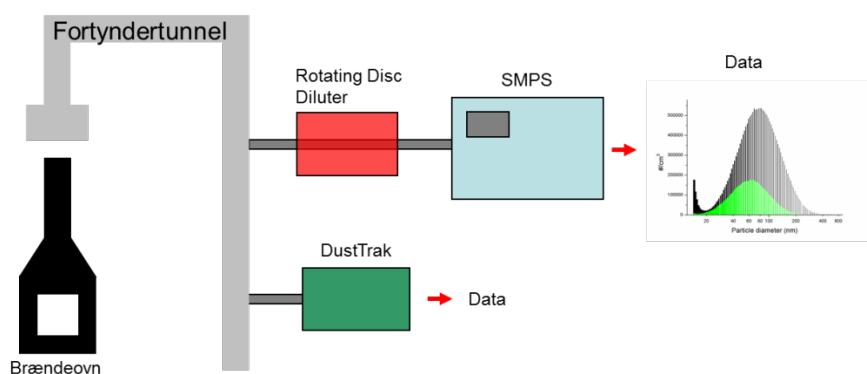


FIGUR 84: TILBEHØR TIL PAH-MÅLEUDSTYR.

| Pos. |  |
|------|--|
| 7    | Køleaggregat for vand                      |
| 8    | Gasvolumen – konditionerings- og målemodul |
| 9    | Vacuumpumpe                                |

### 5.1.3 Kontinuerlige partikelmålinger

Specielt partikelemissionen vil være i fokus i miljømålingerne. Udover de gravimetriske partikelmålinger i henhold til standarderne, som omtalt i afsnit 6.1.1., er der anvendt en Scanning Mobility Particle Sizer (SMPS), som tæller antallet af partikler, og DustTrak DRX Aerosol monitor, som laver massebaserede partikelmålinger.



FIGUR 85: ILLUSTRATION AF PARTIKELMÅLING MED SMPS OG DUSTTRACK.

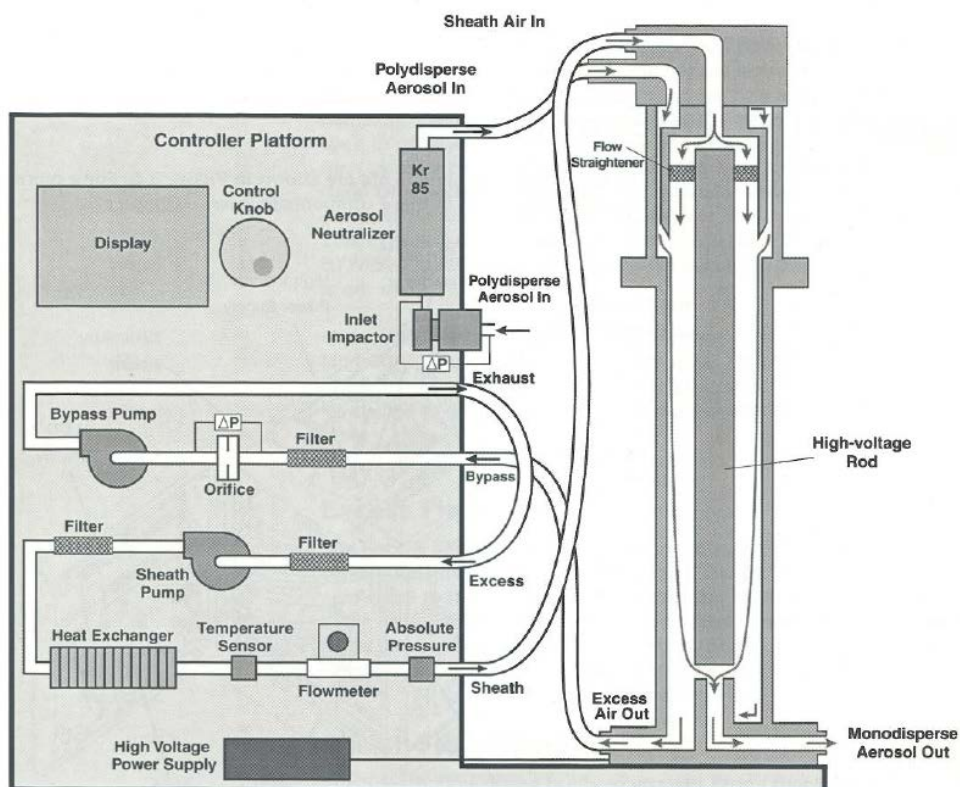
## Scanning Mobility Particle Sizer - SMPS

SMPS tæller partikler i op til 128 fraktioner i størrelsesintervallet 2-1000 nm. Måleudstyret giver en præcis partikelstørrelsesfordeling og en antalskoncentration. Da instrumentet tæller enkelte partikler og ikke måler den totale masse kan indholdet af nanopartikler bestemmes meget præcist, selv i lave koncentrationer på trods af eventuel tilstedeværelse af større partikler.

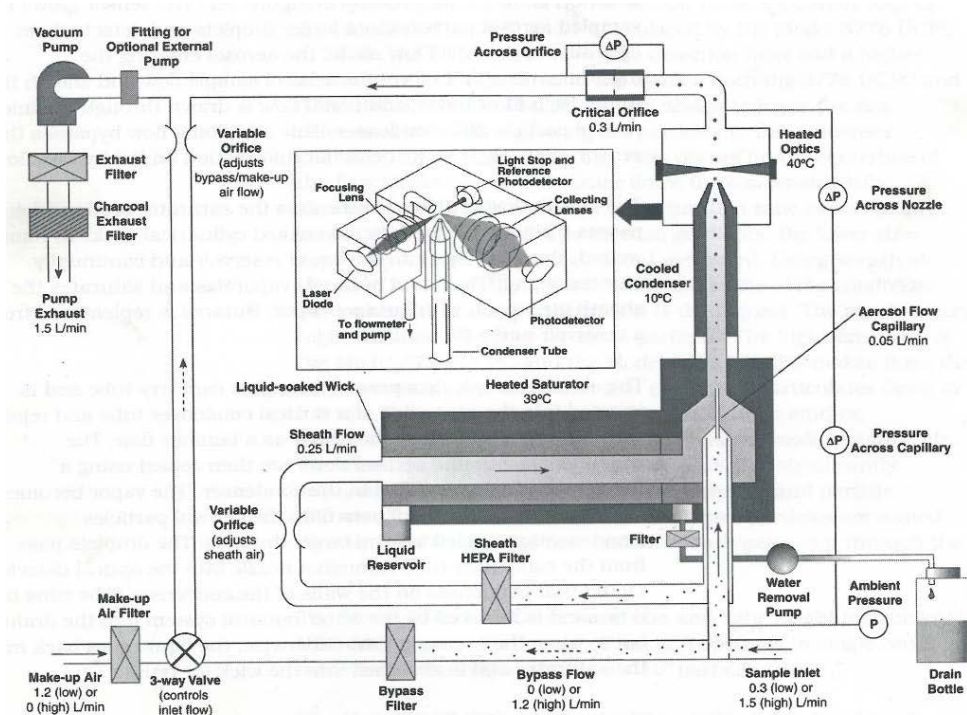
Måling af nanopartikler i brændeovnsrøg udgør en særlig udfordring grundet den relativt høje emissionskoncentration. Det er derfor nødvendigt at foretage en kontrolleret fortynding af røgen inden SMPS-målingen udføres.

Fortyndingen sikrer, at koncentrationen af nanopartikler, der når frem til SMPS'en, ikke overstiger grænsen for, hvad instrumentet kan måle samt at flygtige stoffer, som f.eks. vanddamp, ikke kondenserer på nanopartiklerne. Teknologisk Institut råder over en opvarmet roterende diskfortynder, der er udviklet til at fortynde aerosoler med en partikeldiameter i intervallet 10-1000 nm. Fortyndingsudstyret er robust og kan fortynde røggasser med en faktor 3000 og operere i temperaturområdet 0 – 200° C. Dette udstyr har bl.a. været brugt i et større projekt i samarbejde med DMU til emissionskortlægning af nanopartikler fra dieselmotorer, hvilket har været med til at opbygge en unik ekspertise hos Teknologiske Institut inden for måling af nanopartikler i røg med høje partikelkoncentrationer.

Det fysiske princip bag SMPS-målingen er som følger: en impactor, som er koblet på SMPS'ens indgang, fanger partikler > ca. 1 µm. De mindre partikler passerer igennem impactoren, hvorefter de neutraliseres og tilordnes en kendt ladning ved at passere en radioaktiv Kr-85-kilde. Partiklerne udvælgelse efterfølgende i en Differential Mobility Analyzer (DMA) på baggrund af deres elektriske mobilitetsdiameter. Man har således udvalgt partikler i et meget snævert størrelsesinterval. De udvalgte partikler tælles efterfølgende i en Condensation Particle Counter (CPC) ved detektion af det spredte lys fra partiklerne i en fotodetektor. I det specifikke setup med måling i fortyndingstunnel efter brændeovn er valgt en SMPS-konfiguration, hvor der skannes med fire minutters varighed i et størrelsesinterval 14 – 724 nm.



FIGUR 85A: PARTIKLERNES VEJ GENNEM DEN ELEKTROSTATISKE CLASSIFIER, HERUNDER SELVE UDVÆLGELSEN I DMA'EN. INLET SES MIDT PÅ FIGUREN (POLYDISPERSE AEROSOL IN).



FIGUR 85B: PARTIKLERNES VEJ GENNEM CPC'EN OG DETEKTION. INLET SES I BUNDEN AF FIGUREN TIL HØJRE (SAMPLE INLET).

### DustTrak DRX Aerosol monitor

DustTrak DRX giver modsat SMPS-målinger en massebaseret partikelmåling. Partiklerne måles simultant i fem størrelsesfraktioner: PM1, PM2.5, PM4, PM10 og total PM eller TSP, hvor PM står for Particulate Matter og TSP for Total Suspended Particulates. PM 1 betyder eksempelvis masse af partikler med en diameter mindre end 1 µm. Instrumentet dækker et koncentrationsområde på 0,001 – 150 mg partikler pr. m<sup>3</sup>, og en måling kan foretages for hvert sekund. Der er således tale om en reel onlinemåling.

Detektionen foregår optisk ved at det spredte lys fra partiklerne fokuseres ind i en fotodetektor, hvor det omsættes til en spænding. Det gennemsnitlige spændingssignal kan for PM 2.5-partikler konverteres til et masesignal ved at kalibrere op mod en kendt aerosol. Spændingsværdien af signalet for de enkelte partikler måles som enkelte spændingspulser. Disse pulser kan gennem modellering oversættes til en størrelsesfordeling med de fem intervaller PM1, PM2.5, PM4, PM10 og TPM.

## 2.13 Miljømålinger på TKK version 3 og Rais Epoca

Herunder følger resultater fra standardiserede emissionsmålinger på TKK samt Rais Epoca. Med Standardiserede emissionsmålinger menes der måleparametre, som udføres ved normale typeprøvninger af brændeovne. Det sidste skema i afsnittet viser middelværdi af alle slutmålingerne.

| CO2 %       | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|-------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TKK   | 7,8       | 8,1      | 8,8      | 9,0      | 9,7      | 9,4      |
| 2. dag TKK  | 6,7       | 9,4      | 10,0     | 9,6      | 9,8      | 10,1     |
| 3. dag TKK  | 7,8       | 8,5      | 9,3      | 9,4      | 10,0     | 9,6      |
| 1.dag Epoca | 9,1       | 6,6      | 7,2      | 8,2      | 7,8      | 8,2      |
| 2.dag Epoca | 7,9       | 7,3      | 7,8      | 8,7      | 7,9      | 7,2      |
| 3.dag Epoca | 7,3       | 6,7      | 8,1      | 8,2      | 8,4      | 8,4      |

| CO mg/Nm3 ved 13% O2 | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|----------------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TKK            | 1785      | 888      | 464      | 899      | 869      | 1291     |
| 2. dag TKK           | 3514      | 2464     | 1275     | 538      | 1904     | 1571     |
| 3. dag TKK           | 2664      | 493      | 748      | 631      | 1896     | 293      |
| 1.dag Epoca          | 1399      | 2072     | 1832     | 1197     | 1460     | 1145     |
| 2.dag Epoca          | 1036      | 1504     | 1379     | 1194     | 1266     | 1638     |
| 3.dag Epoca          | 1268      | 2414     | 1272     | 1383     | 1292     | 1537     |

| CO % ved 13% O2 | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|-----------------|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TKK       | 0,14      | 0,07     | 0,04     | 0,07     | 0,07     | 0,10     |
| 2. dag TKK      | 0,28      | 0,20     | 0,10     | 0,04     | 0,15     | 0,13     |
| 3. dag TKK      | 0,21      | 0,04     | 0,06     | 0,05     | 0,15     | 0,02     |
| 1.dag Epoca     | 0,11      | 0,17     | 0,15     | 0,10     | 0,12     | 0,09     |
| 2.dag Epoca     | 0,08      | 0,12     | 0,11     | 0,10     | 0,10     | 0,13     |
| 3.dag Epoca     | 0,10      | 0,19     | 0,10     | 0,11     | 0,10     | 0,12     |

| OGC<br>mgC/Nm <sup>3</sup> ved<br>13% O <sub>2</sub> | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|--|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TTK  | 294       | 64       | 36       | 54       | 37       | 93       |
| 2. dag TTK   | 545       | 272      | 62       | 22       | 132      | 90       |
| 3. dag TTK   | 363       | 48       | 41       | 36       | 128      | 15       |
| 1.dag Epoca  | 119       | 204      | 410      | 88       | 161      | 98       |
| 2.dag Epoca  | 74        | 201      | 152      | 109      | 82       | 135      |
| 3.dag Epoca  | 97        | 319      | 106      | 81       | 74       | 148      |

| Partikler <sup>1)</sup><br>mg/Nm <sup>3</sup> ved<br>13% O <sub>2</sub> | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TTK   | 135       | 82       | 85       | 99       | 104      | 118      |
| 2. dag TTK  | 193       | 166      | 115      | 96       | 140      | 112      |
| 3. dag TTK  | 177       | 103      | 127      | 110      | 132      | 83       |
| 1.dag Epoca   | 101       | 135      | 438      | 103      | 164      | 104      |
| 2.dag Epoca   | 85        | 198      | 125      | 109      | 77       | 111      |
| 3.dag Epoca   | 90        | 272      | 98       | 74       | 79       | 147      |

1) Målt efter NS 3058/3059 (i fortyndingstunnel ved maksimalt 35°C)

| Partikler <sup>1)</sup><br>g/kg<br>(tørstof) | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|--|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TTK                                    | 1,61      | 0,99     | 1,03     | 1,19     | 1,24     | 1,41     |
| 2. dag TTK                                   | 2,25      | 1,95     | 1,37     | 1,15     | 1,66     | 1,33     |
| 3. dag TTK                                   | 2,08      | 1,24     | 1,52     | 1,33     | 1,57     | 1,00     |
| 1.dag Epoca                                  | 1,20      | 1,60     | 5,20     | 1,23     | 1,95     | 1,25     |
| 2.dag Epoca                                  | 1,01      | 2,35     | 1,49     | 1,30     | 0,91     | 1,32     |
| 3.dag Epoca                                  | 1,07      | 3,21     | 1,16     | 0,88     | 0,94     | 1,74     |

1) Målt efter NS 3058/3059 (i fortyndingstunnel ved maksimalt 35°C)



| Støv <sup>1)</sup><br>mg/Nm <sup>3</sup> ved<br>13% O <sub>2</sub> | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|--|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TTK  | 78        | 29       | 35       | 35       | 29       | 45       |
| 2. dag TTK   | 93        | 73       | 60       | 44       | 64       | 56       |
| 3. dag TTK   | 97        | 49       | 56       | 37       | 46       | 33       |
| 1.dag Epoca  | 39        | 27       | 104      | 13       | 19       | 9        |
| 2.dag Epoca  | 27        | 26       | 16       | 11       | 7        | 19       |
| 3.dag Epoca  | 20        | 47       | 7        | 7        | 9        | 11       |

<sup>1)</sup> Målt efter DIN plus prøvningsforskrift (Med opvarmet filter)

| NO <sub>x</sub> <sup>1)</sup><br>mg/Nm <sup>3</sup> ved<br>13% O <sub>2</sub> | Optænding | 1.charge | 2.charge | 3.charge | 4.charge | 5.charge |
|---|-----------|----------|----------|----------|----------|----------|
| 1.dag TTK   | 94        | 100      | 125      | 105      | 115      | 96       |
| 2. dag TTK  | 86        | 88       | 106      | 114      | 95       | 98       |
| 3. dag TTK  | 96        | 137      | 110      | 118      | 90       | 116      |
| 1.dag Epoca   | 92        | 100      | 101      | 100      | 96       | 95       |
| 2.dag Epoca   | 101       | 98       | 98       | 95       | 92       | 90       |
| 3.dag Epoca   | 97        | 89       | 94       | 98       | 103      | 98       |

<sup>1)</sup> NO<sub>2</sub> ækvivalenter

| Middelværdier af alle<br>slutmålinger                                   | Optænding |       | Alle charge |       |
|---|-----------|-------|-------------|-------|
|   | TKK       | Epoca | TKK         | Epoca |
| CO <sub>2</sub><br>[%]  | 7,4       | 8,1   | 9,4         | 7,8   |
| CO<br>[% ved 13% O <sub>2</sub> ]                                       | 0,21      | 0,10  | 0,09        | 0,12  |
| OGC<br>[mgC/Nm <sup>3</sup> ved 13% O <sub>2</sub> ]                    | 401       | 97    | 75          | 158   |
| Støv efter DIN+<br>[mg/Nm <sup>3</sup> ved 13 % O <sub>2</sub> ]        | 89        | 29    | 46          | 22    |
| Partikler efter NS 3058<br>[mg/Nm <sup>3</sup> ved 13% O <sub>2</sub> ] | 168       | 92    | 111         | 149   |

Alle værdier er i tør røggas

## 2.14 Måling af partikelstørrelsesfordeling

### 5.1.4 DustTrak

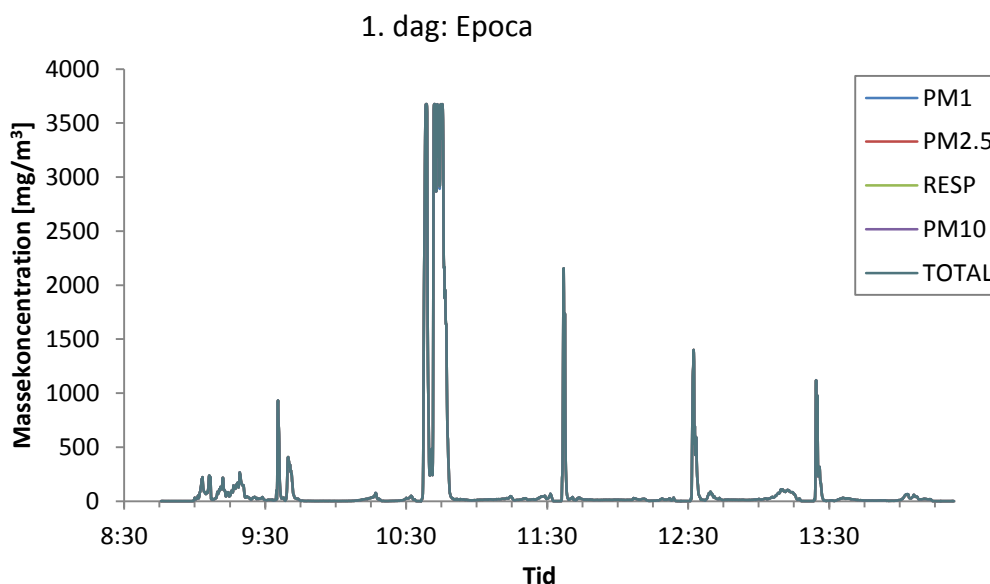
Massekoncentrationen er bestemt ved hjælp af måling med DustTrack. Målingerne er udført kontinuerligt over en hel fyringsdag.

I nedenstående tabel er middelværdien af massen angivet for samme periode som norsk filter opsamling, dvs. hele perioden af hver enkelt fyring.

| Epoca  |                                  |        | TKK    |       |        |        |
|--------|----------------------------------|--------|--------|-------|--------|--------|
|        | 1.dag                            | 2. dag | 3. dag | 1.dag | 2. dag | 3. dag |
| Fyring | Middelmasse (mg/m <sup>3</sup> ) |        |        |       |        |        |
| Opt    | 68,8                             | 35,2   | 33,3   | 120,3 | 196,5  | 195,6  |
| 1      | 33,9                             | 107,2  | 121,5  | 37,9  | 189,4  | 84,7   |
| 2      | 431,1                            | 35,1   | 53,5   | 52,3  | 122,0  | 124,0  |
| 3      | 45,1                             | 29,5   | 35,2   | 50,3  | 88,8   | 104,9  |
| 4      | 62,0                             | 16,9   | 32,9   | 69,0  | 116,3  | 133,0  |
| 5      | 36,3                             | 16,5   | 84,5   | 73,8  | 89,7   | 78,7   |

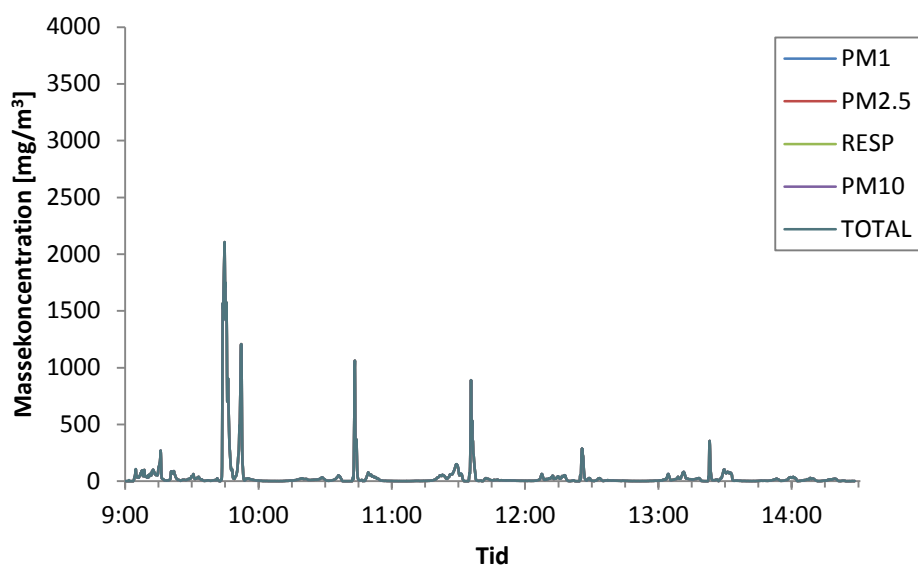
Middelmassen målt med DustTrak i norsk fortyndertunnel.

Efterfølgende vises grafer med partikelmasse målt med DustTrak over tid. I alle fyringer måles partikelmassen stort set kun som PM1, hvilket afspejles i det faktum, at kurverne overlæjres.



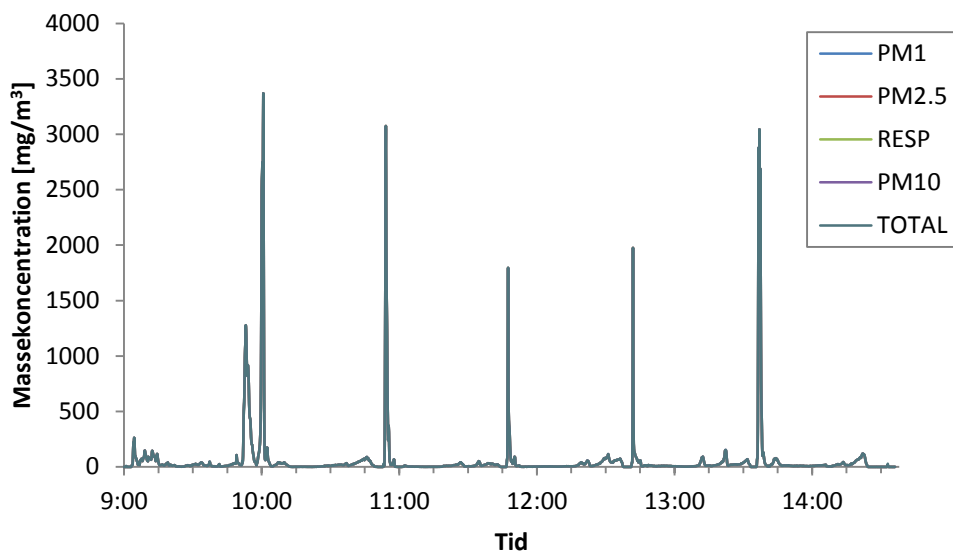
FIGUR 86: MASSEKONCENTRATION SOM FUNKTION AF TID FOR EPOCA.

### 2. dag: Epoca

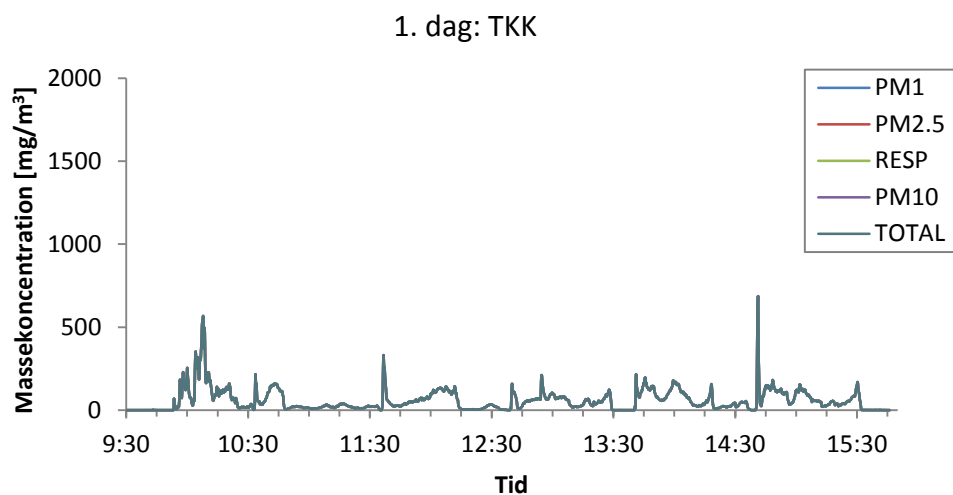


FIGUR 87: MASSEKONCENTRATION SOM FUNKTION AF TID FOR EPOCA.

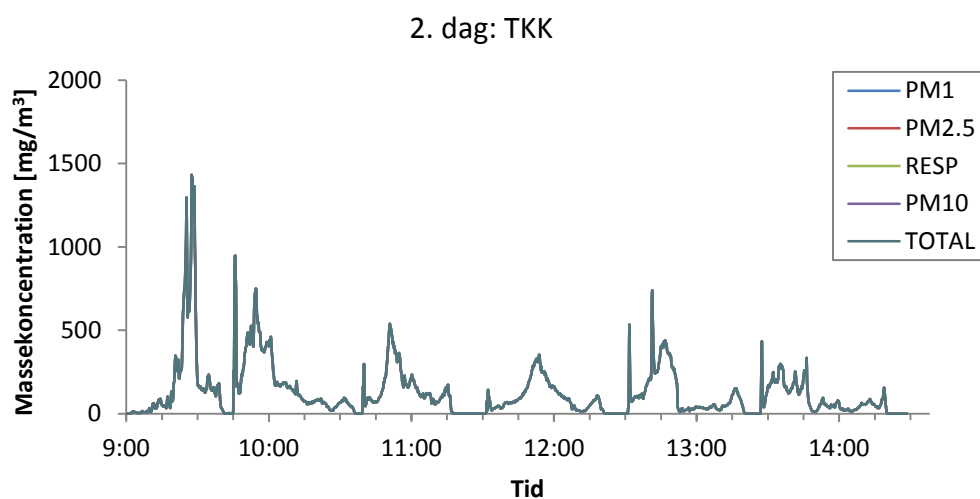
### 3. dag: Epoca



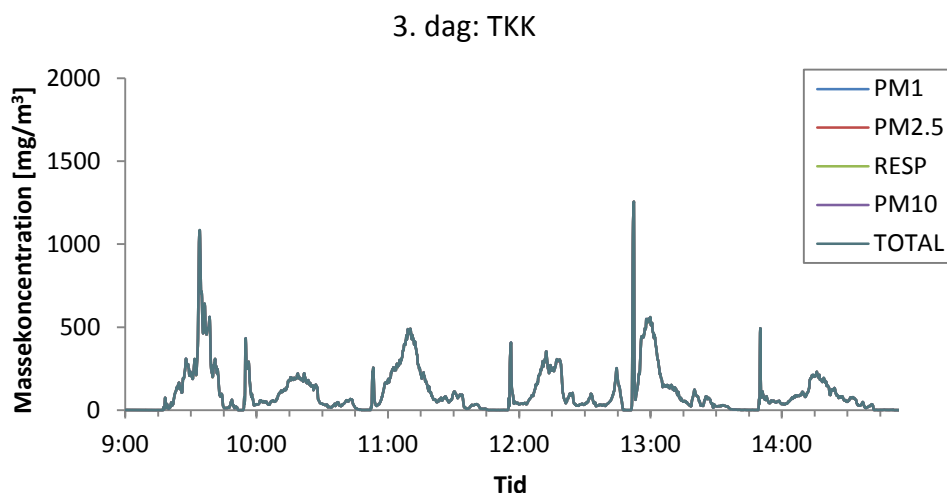
FIGUR 88: MASSEKONCENTRATION SOM FUNKTION AF TID FOR EPOCA.



FIGUR 89: MASSEKONCENTRATION SOM FUNKTION AF TID FOR TKK.



FIGUR 90: MASSEKONCENTRATION SOM FUNKTION AF TID FOR TKK.



FIGUR 91: MASSEKONCENTRATION SOM FUNKTION AF TID FOR TKK.

Det generelle billede viser, at Epoca ovnen har tydelig tendens til høj massekoncentration under indfyring, både højere og mere markant end det ses for TKK. Den efterfølgende massekoncentration er derimod lavere. Overordnet set er middelmassen omtrentlig den samme for begge ovne med store variationer enkelte fyringer i mellem.

### 5.1.5 SMPS

Antalskoncentrationen er målt med SMPS. Målingerne er udført kontinuerligt over en hel fyringsdag.

I nedenstående to tabeller er henholdsvis antalskoncentrationen og middelpartikelstørrelsen midlet over hver enkelt fyringsperiode. Perioden er den samme som norsk filter opsamling af partikler.

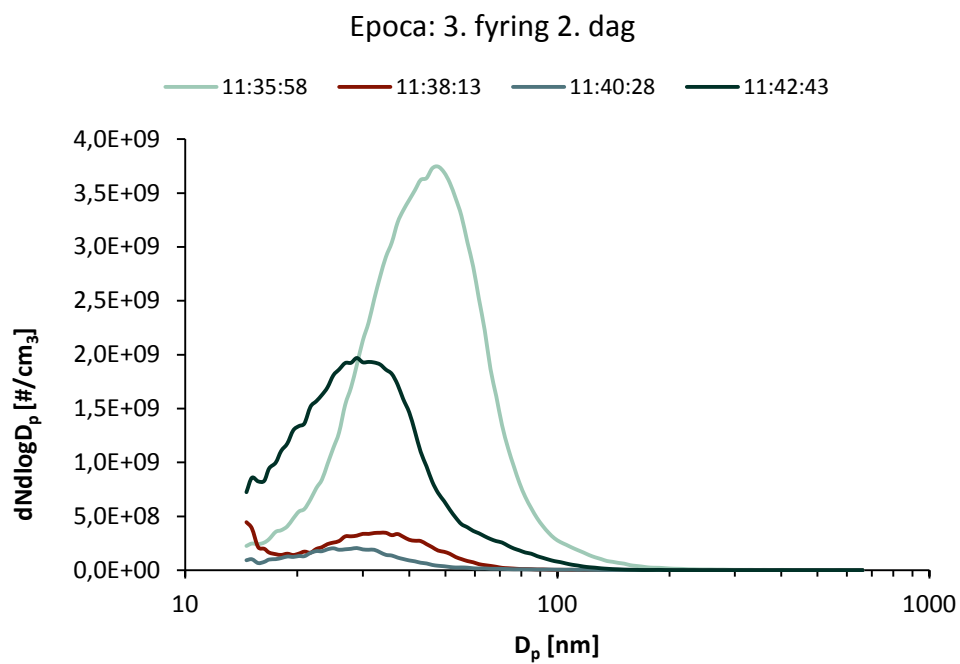
|        | Epoca                                    |         |         | TKK     |         |         |
|--------|--|---------|---------|---------|---------|---------|
|        | 1.dag                                    | 2. dag  | 3. dag  | 1.dag   | 2. dag  | 3. dag  |
| Fyring | Antalskoncentration (#/cm <sup>3</sup> ) |         |         |         |         |         |
| Opt.   | 6.2E+07                                  | 5.7E+07 | 6.7E+07 | 1.7E+07 | 4.5E+07 | 5.6E+07 |
| 1      | 1.8E+08                                  | 2.4E+08 | 2.9E+08 | 2.0E+07 | 7.0E+07 | 5.0E+07 |
| 2      | 2.8E+08                                  | 1.6E+08 | 1.0E+08 | 2.1E+07 | 5.1E+07 | 5.1E+07 |
| 3      | 7.7E+07                                  | 1.5E+08 | 3.9E+07 | 2.9E+07 | 4.3E+07 | 4.2E+07 |
| 4      | 2.3E+08                                  | 1.1E+08 | 5.6E+07 | 1.9E+07 | 5.5E+07 | 5.2E+07 |
| 5      | 1.0E+08                                  | 1.5E+08 | 1.4E+08 | 3.7E+07 | 5.6E+07 | 4.0E+07 |

Antalskoncentrationen målt med SMPS af partikler midlet over hver enkelt fyringsperiode.

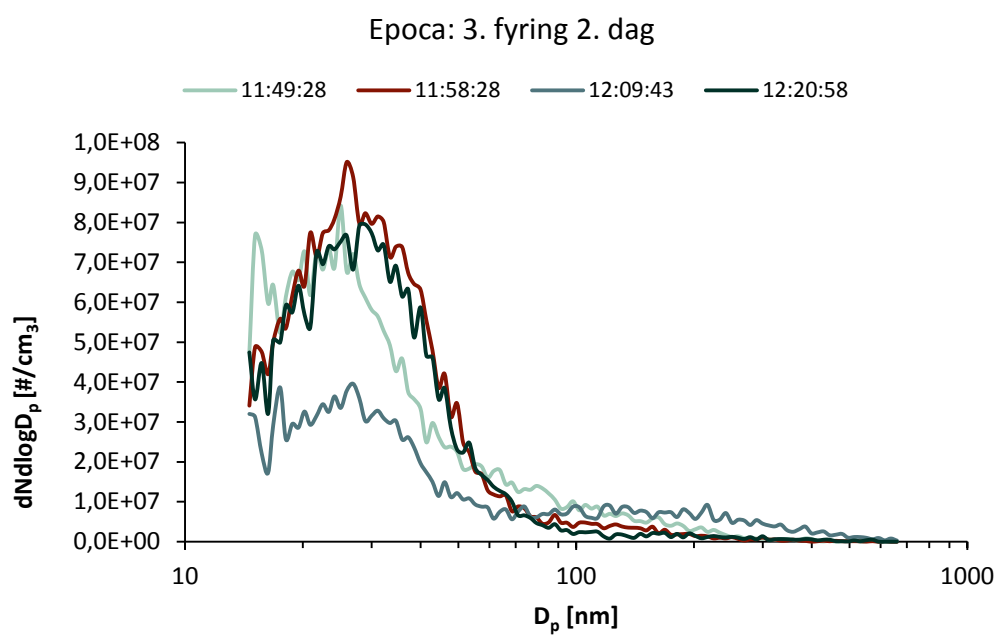
|        | Epoca                         |        |        | TKK    |        |        |
|--------|-------------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|
|        | 1.dag                         | 2. dag | 3. dag | 1. dag | 2. dag | 3. dag |
| Fyring | Middel partikelstørrelse (nm) |        |        |        |        |        |
| Opt.   | 91                            | 77     | 55     | 117    | 113    | 114    |
| 1      | 46                            | 45     | 63     | 86     | 128    | 99     |
| 2      | 65                            | 57     | 52     | 93     | 110    | 101    |
| 3      | 50                            | 50     | 69     | 90     | 106    | 107    |
| 4      | 80                            | 47     | 62     | 101    | 112    | 95     |
| 5      | 57                            | 39     | 62     | 102    | 109    | 101    |

Partikelstørrelsen målt med SMPS midlet over hver enkelt fyringsperiode.

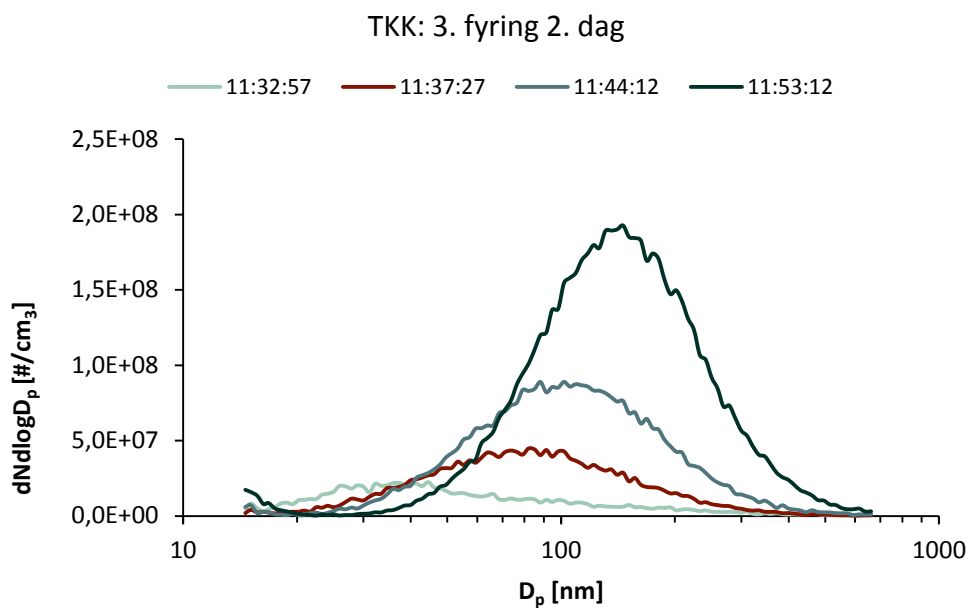
Eksempler på hvor meget partikelstørrelsesfordelingen ændrer sig gennem en fyring på Epoca ovnen (3. fyring, 2. dag) og på TKK (3. fyring, 2. dag) er vist på de kommende fire grafer. Repræsentative SMPS spektre er udvalgt. Spektre fra samme fyring er vist på to individuelle grafer for overskuelighedens skyld.



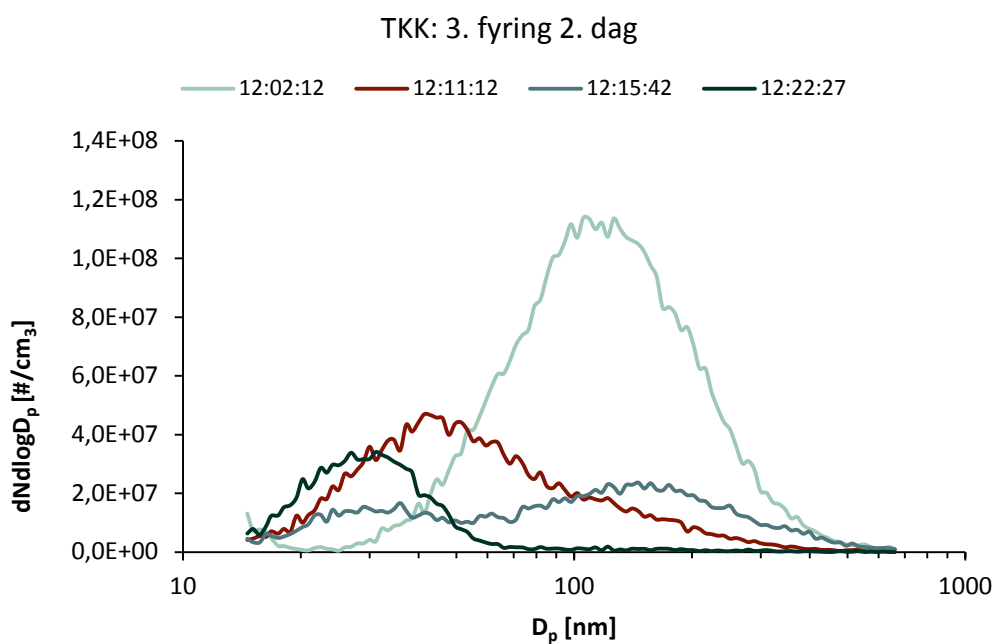
FIGUR 92: PARTIKELSTØRRELSFORDELING – 1. DEL AF FYRING.



FIGUR 93: PARTIKELSTØRRELSFORDELING – 2. DEL AF FYRING.



FIGUR 94: PARTIKELSTØRRELSFORDELING – 1. DEL AF FYRING.

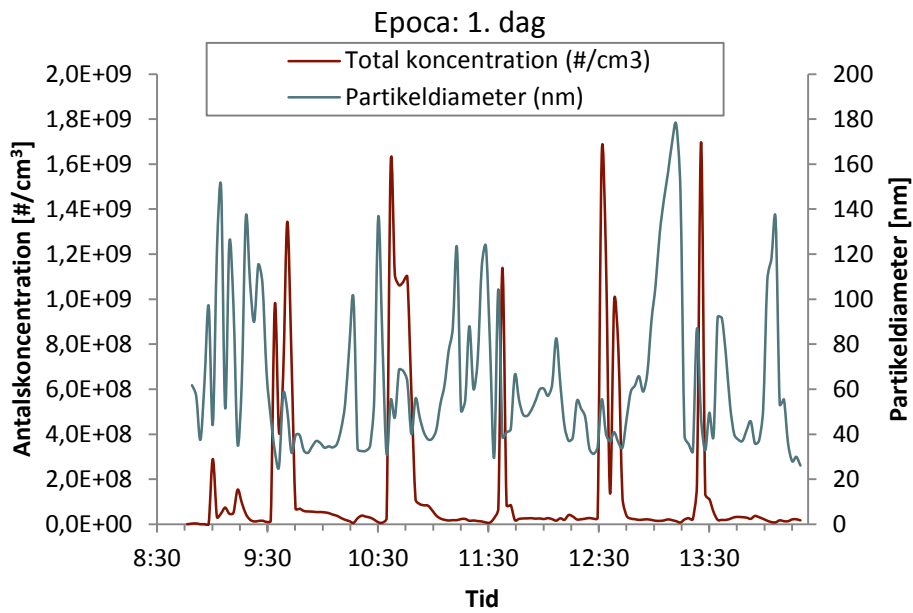


FIGUR 95: PARTIKELSTØRRELSFORDELING – 2. DEL AF FYRING.

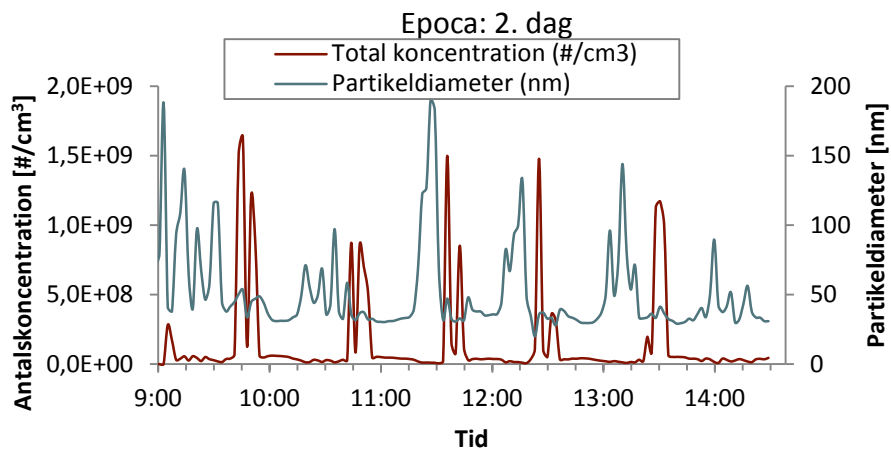
Det er bemærkelsesværdigt, at partiklerne generelt er væsentlig større på TKK og omkring en faktor ti færre i antal i den første del af forbrændingsperioden. Både forskellen i antalskoncentrationen og middelpartikelstørrelsen afspejles i tabellerne vist først i afsnittet.

Antalskoncentration og middel partikeldiameter over tid er vist på efterfølgende figurer.

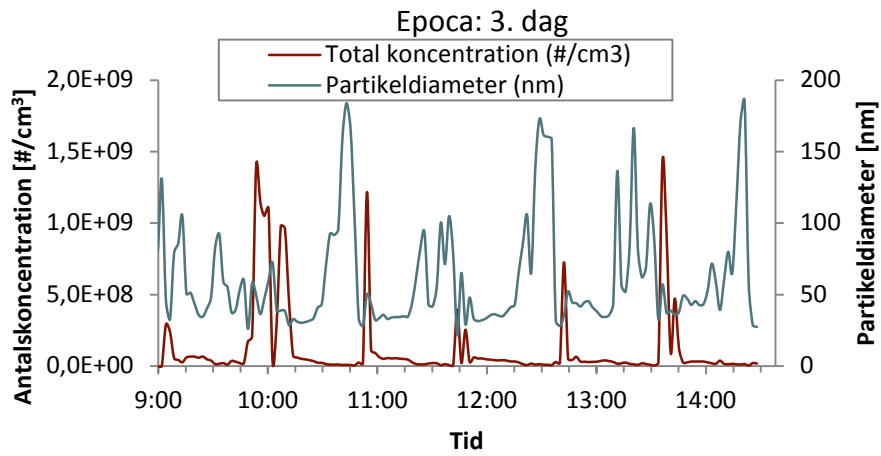




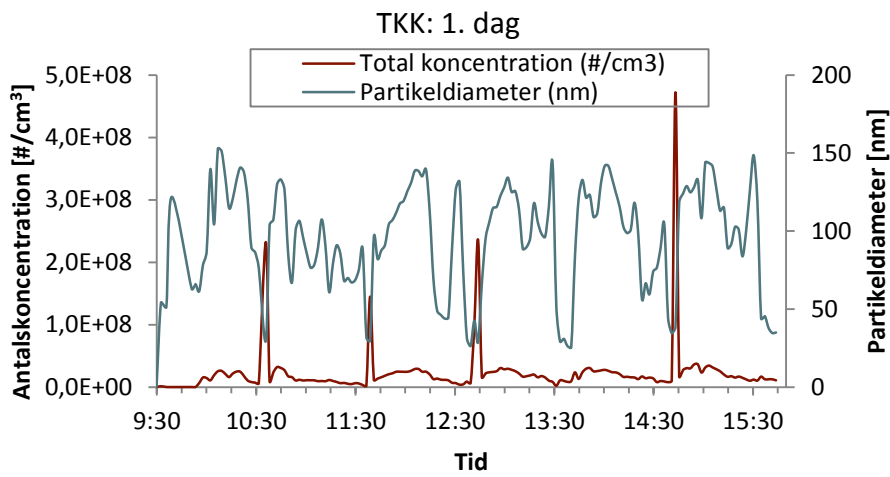
FIGUR 96: ANTALSKONCENTRATION OG MIDDEL PARTIKELDIAMETER SOM FUNKTION AF TID FOR EPOCA.



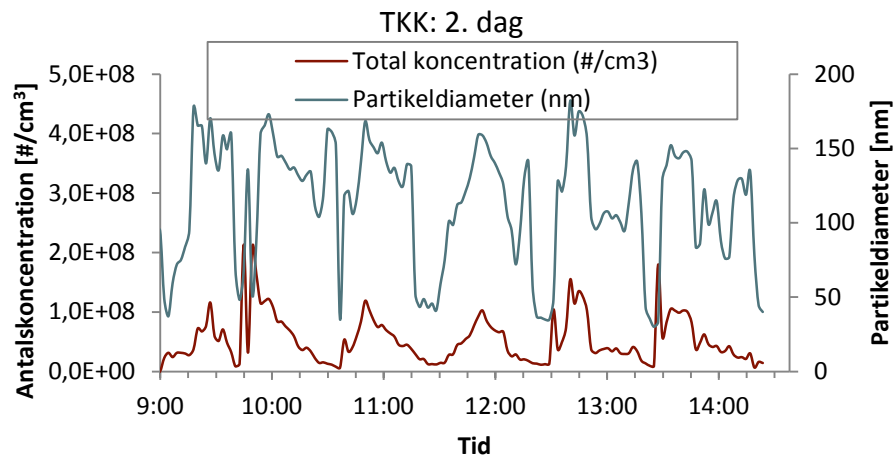
FIGUR 97: ANTALSKONCENTRATION OG MIDDEL PARTIKELDIAMETER SOM FUNKTION AF TID FOR EPOCA.



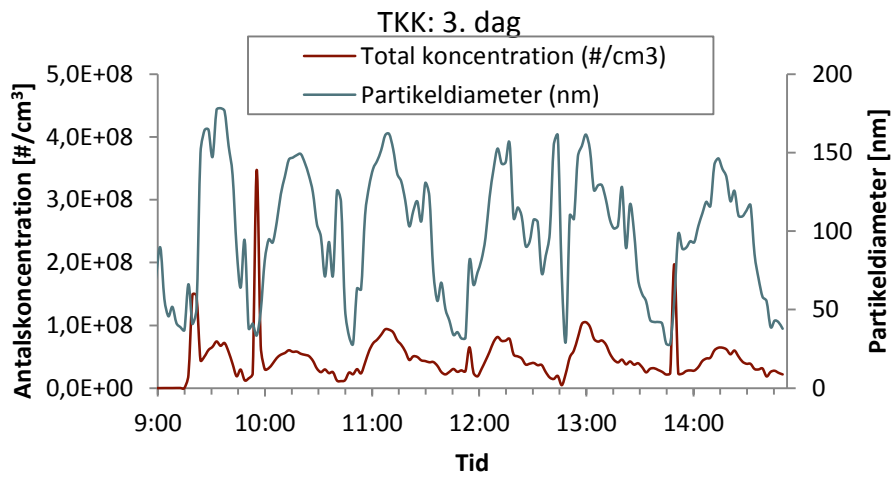
FIGUR 98: ANTALSKONCENTRATION OG MIDDEL PARTIKELDIAMETER SOM FUNKTION AF TID FOR EPOCA.



FIGUR 99: ANTALSKONCENTRATION OG MIDDEL PARTIKELDIAMETER SOM FUNKTION AF TID FOR TKK.



FIGUR 100: ANTALSKONCENTRATION OG MIDDEL PARTIKELDIAMETER SOM FUNKTION AF TID FOR TKK.



FIGUR 101: ANTALSKONCENTRATION OG MIDDEL PARTIKELDIAMETER SOM FUNKTION AF TID FOR TKK.

I lighed med observationerne fra massekoncentrationerne fra DustTrack'en er det generelle billede, at Epoca ovnen har mere markant forskel på tiden lige efter indfyring og den efterfølgende forbrændingsperiode end det ses på TKK. Antalskoncentrationen er større end TKK under indfyring og mindre efter de første ca. 15 min. Samtidig ses det også, at middel partikeldiameteren er generelt højere i TKK.

## 2.15 Måling af PAH

I forbindelse med de øvrige emissionsmålinger er der gennemført en serie undersøgelser med henblik på at bestemme PAH-emissionen fra brændeovnene. Målingerne er udført iht. metodeblad nr. MEL-10, "Bestemmelse af koncentrationer af Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAH)", i strømmende gas.

Følgende enkeltkomponenter er målt:

| PAH-komponent          | Ækvivalensfaktor |
|------------------------|------------------|
| Naphthalen             | 0,001            |
| Acenaphthylen          | 0,001            |
| Acenaphthen            | 0,001            |
| Fluoren                | 0,0005           |
| Phenanthren            | 0,0005           |
| Anthracen              | 0,0005           |
| Fluoranthen            | 0,05             |
| Pyren                  | 0,001            |
| Benz[a]anthracen       | 0,005            |
| Chrysen                | 0,03             |
| Benz[b,k]fluoranthener | 0,1              |
| Benz[e]pyren           | 0,002            |
| Benz[a]pyren           | 1                |
| Indeno[1,2,3]pyren     | 0,1              |
| Benz[ghi]perylene      | 0,01             |
| Dibenz[ah]anthracen    | 1,1              |

De enkelte komponenters ækvivalensfaktor er udtryk for stoffernes toksicitet. De enkelte komponenters toksicitet vægtes i forhold til Benz[a]pyren (BaP), som er et stof, der er mistænkt for at være kræftfremkaldende. Ved at vægte de målte emissionsværdier med de ovenfor anførte ækvivalensfaktorer kan værdierne adderes, hvorved emissionen udtrykkes ved et enkelt tal, som er et objektivi udsagn om emissionens skadepotentiale. Den samlede PAH-emission udtrykkes således i BaP-ækvivalenter.

## Epoca

| Fyringsmåde   | Hel dag                             | 2.-5.<br>charge                     | Opt-1.<br>charge                    |
|---|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Dato  | 1. dag                              | 2. dag                              | 3. dag                              |
|   | $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ |
| Naphthalen  | 2899                                | 1918                                | 5847                                |
| Acenaphthylen   | 166                                 | 1823                                | 3508                                |
| Acenaphthen   | 580                                 | 276                                 | 327                                 |
| Fluoren   | 207                                 | 0                                   | 102                                 |
| Phenanthren   | 822                                 | 0                                   | 240                                 |
| Anthracen   | 219                                 | 0                                   | 109                                 |
| Fluoranthen   | 118                                 | 0                                   | 0                                   |
| Pyren   | 130                                 | 0                                   | 0                                   |
| Benz[a]anthracen  | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Chrysen   | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Benz[b,k]fluoranthener  | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Benz[e]pyren  | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Benz[a]pyren  | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Indeno[1,2,3]pyren  | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Benz[ghi]perylene   | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Dibenz[ah]anthracen   | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Sum PAH [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ]                             | 5140                                | 3912                                | 10132                               |
| BaP ækv. [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ]                            | 10                                  | 4                                   | 10                                  |
| Sum PAH [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ] ved<br>13 % O <sub>2</sub>  | 5071                                | 3912                                | 9867                                |
| BaP ækv. [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ] ved<br>13 % O <sub>2</sub> | 10                                  | 4                                   | 10                                  |

## TKK

| Fyringsmåde            | Hel dag                             | 2.-5.<br>charge                     | Opt-1.<br>charge                    |
|------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|
| Dato                   | 1. dag                              | 2. dag                              | 3. dag                              |
|                        | $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ | $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ |
| Naphthalen             | 3761                                | 16542                               | 158969                              |
| Acenaphthylen          | 11446                               | 7385                                | 15043                               |
| Acenaphthen            | 622                                 | 376                                 | 22661                               |
| Fluoren                | 221                                 | 0                                   | 18949                               |
| Phenanthren            | 2494                                | 4892                                | 5217                                |
| Anthracen              | 446                                 | 719                                 | 1237                                |
| Fluoranthen            | 853                                 | 870                                 | 1262                                |
| Pyren                  | 808                                 | 769                                 | 1383                                |
| Benz[a]anthracen       | 39                                  | 134                                 | 0                                   |
| Chrysen                | 154                                 | 176                                 | 267                                 |
| Benz[b,k]fluoranthener | 179                                 | 468                                 | 0                                   |
| Benz[e]pyren           | 119                                 | 0                                   | 0                                   |
| Benz[a]pyren           | 70                                  | 0                                   | 0                                   |
| Indeno[1,2,3]pyren     | 0                                   | 92                                  | 0                                   |
| Benz[ghi]perylene      | 0                                   | 0                                   | 0                                   |
| Dibenz[ah]anthracen    | 0                                   | 0                                   | 0                                   |

|  |       |       |        |
|--|-------|-------|--------|
| Sum PAH [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ]                          | 21213 | 32423 | 224988 |
| BaP ækv. [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ]                         | 154   | 133   | 282    |
| Sum PAH [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ] ved 13 % O <sub>2</sub>  | 18105 | 24878 | 205910 |
| BaP ækv. [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ] ved 13 % O <sub>2</sub> | 132   | 102   | 257    |

| Ovn   | Hel dag<br>1. dag | 2.-5. charge<br>2. dag | Opt.-1.<br>Charge<br>3. dag | Sum 2.-5. og<br>Opt.-1<br>2.+ 3. dag | Enhed  |
|-------|-------------------|------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|--|
| TKK   | 13994             | 6765                   | 8795                        | 15560                                | Total BaP ækv.<br>[ $\mu\text{g}$ ved 13% O <sub>2</sub> ] |
| Epoca | 959               | 240                    | 381                         | 621                                  | Total BaP ækv.<br>[ $\mu\text{g}$ ved 13% O <sub>2</sub> ] |

Af ovenstående skema kan ses sammenligning med total udledt BaP ækv. over hele prøveperioder. Der er målt dels over en hel dag (optænding og 1. til 5. charge) og dels over 2 halve dage. (optænding + 1. charge i en test og 2. til 5. charge i en anden test). Summen i sidste kolonne kan sammenlignes med målingen over en hel dag i første kolonne.

Det målte PAH er betragtelig større i TKK end i Epoca. Det gælder såvel for optænding, forfyring som ved efterfølgende indfyringer. Der er i alle tilfælde mere end en faktor 10 til forskel.

# 6. Diskussion og konklusioner

## 2.16 Tokammerovn med katalysator

Det er muligt at udvikle en tokammer-brændeovn med et forholdsvis naturligt flammebillede, som det kendes fra traditionelle brændeovne ved at placere efterforbrændingskammeret ovenpå det primære kammer. Herved er det desuden unødvendigt at anvende bypass spjæld eller tilsvarende mekaniske løsninger i forbindelse med optænding og indfyring, idet behovet for skorstenstræk ikke er større end i en traditionel brændeovn. Fjernelse af behovet for bypass spjæld falder i tråd med trenden, der fordrer minimal brugerbetjening og muliggør, at der også kan drages nytte af gevinsten ved efterforbrændingskammeret i optændings- og indfyringsfasen, som det tidligere beskrevet i afsnit 1.2.



FIGUR 102: BRÆNDKAMMER I TKK VERSION 3.



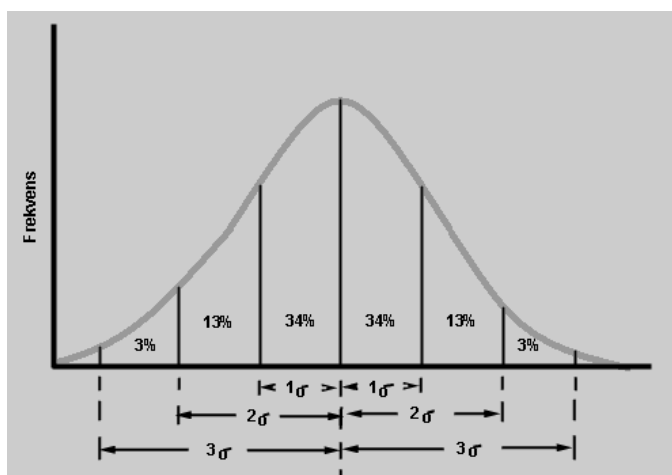
FIGUR 103: FLAMMEBILLEDE PÅ TKK VERSION 3.

For at efterforbrændingskammeret skal fungere tilfredsstillende skal forholdene for høj turbulens og høj temperatur være til stede. I projektet er dette søgt løst dels ved at udforme et kompakt efterforbrændingskammer, og dels ved at opbygge efterforbrændingskammeret af katalysatorplader, der kan bevirke, at reaktioner foregår ved lavere temperaturer end det ellers ville være tilfældet.

## 2.17 TKK emissioner

De gennemførte miljømålinger på TKK version 3 viser et flertydigt billede af de opnåede forbrændingsresultater. Hovedresultaterne er vist i efterfølgende illustrationer.

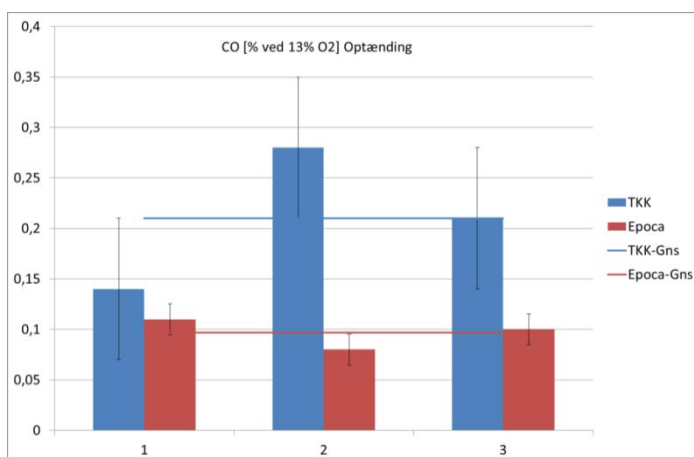
På søjlediagrammerne, der viser de traditionelle målinger efter NS3058-del 2 og DS/EN 13240 suppleret med DIN+, er standardafvigelsen beregnet og illustreret med et konfidensinterval på 68%.



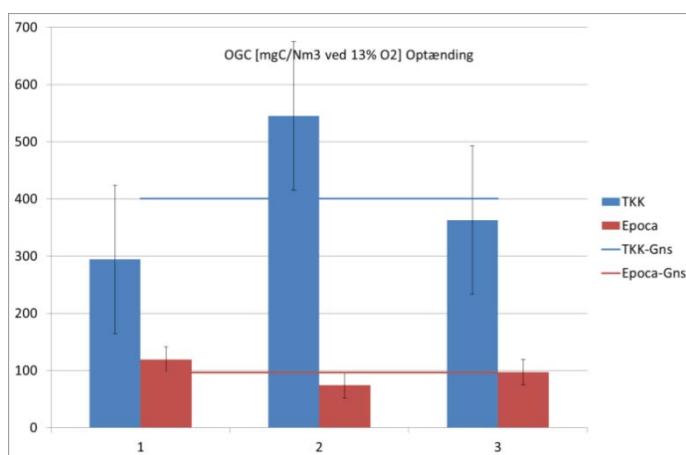
FIGUR 104: NORMALFORDELING MED SANDSYNLIGHEDER I HELE PROCENT.

### 6.1.1 Optænding

Resultaterne fra optændinger i forbindelse med miljømålingerne er illustreret i de efterfølgende tre figurer. Der er benyttet Top-Down optændingsmetode.

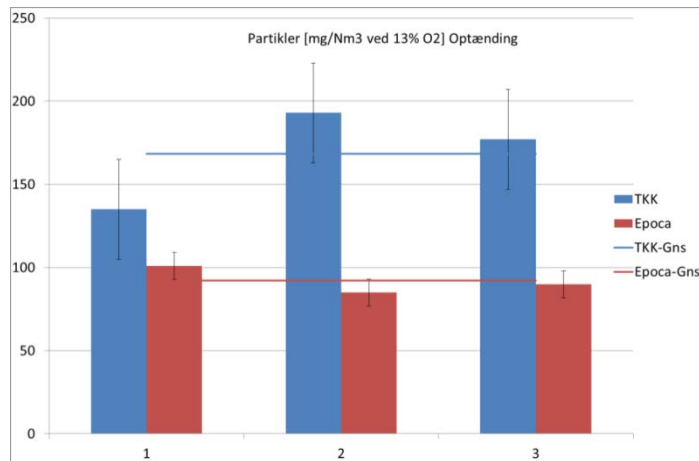


FIGUR 105: KULLTTE I RØGGAS VED OPTÆNDING, TKK OG EPOCA.

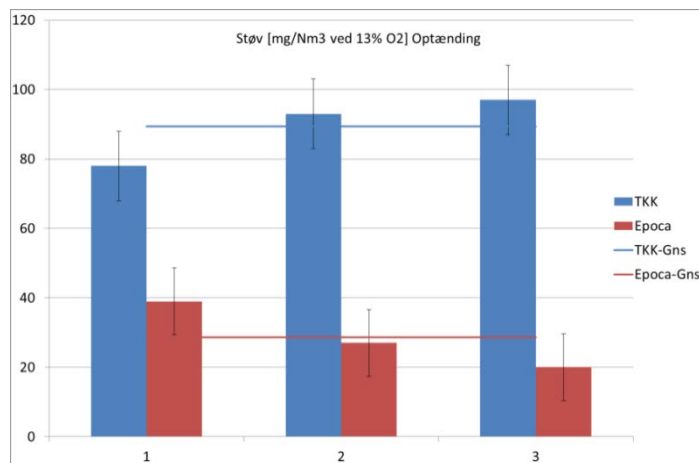


FIGUR 106: ORGANISK BUNDET KULSTOF I RØGGAS VED OPTÆNDING, TKK OG EPOCA.





FIGUR 107: PARTIKLER I RØGGAS MÅLT I HHT. NS VED OPTÆNDING, TKK OG EPOCA.

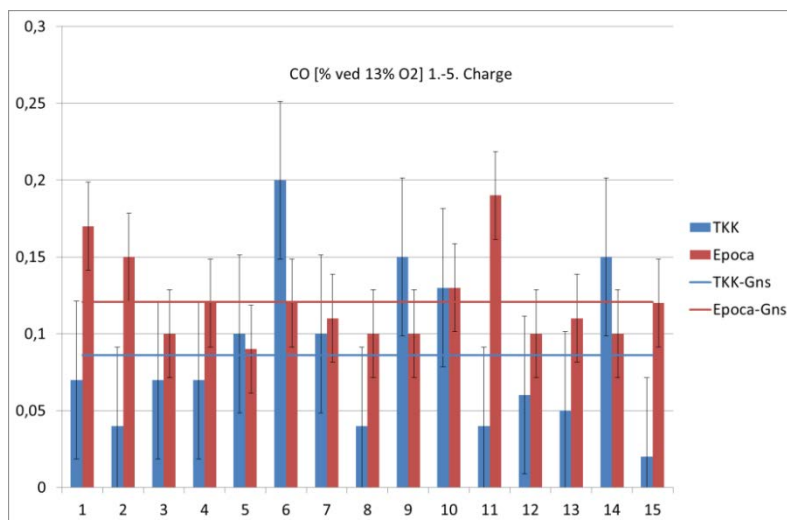


FIGUR 108: STØV I RØGGAS MÅLT I HHT. DIN+ VED OPTÆNDING, TKK OG EPOCA.

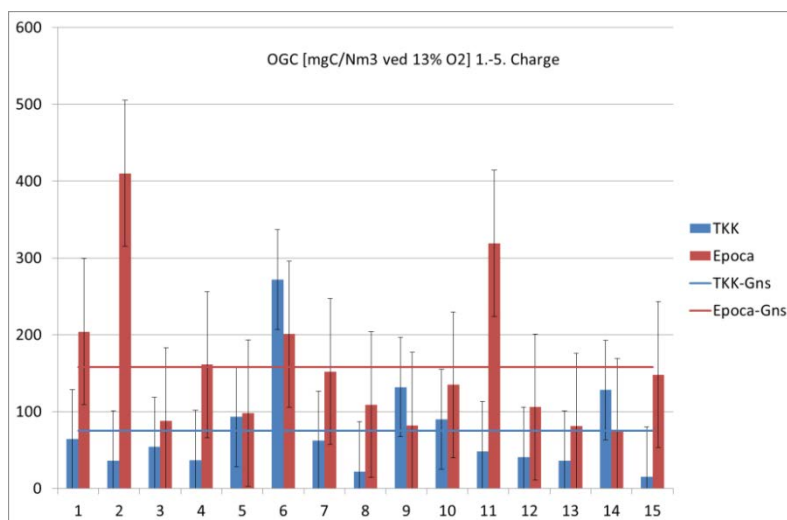
Idet der kun er udført tre optændinger pr. oven er grundlaget spinkelt for indgående analyser, men tendensen viser en dårligere forbrænding på TKK fremfor Epoca. Forklaringen kan formodentlig findes i det større areal af brændkammeret, der er i kontakt med røggasserne på TKK, hvormed ovnen er længere om at blive tilstrækkelig varm til at kunne opnå en god forbrænding.

### 6.1.2 Indfyringer

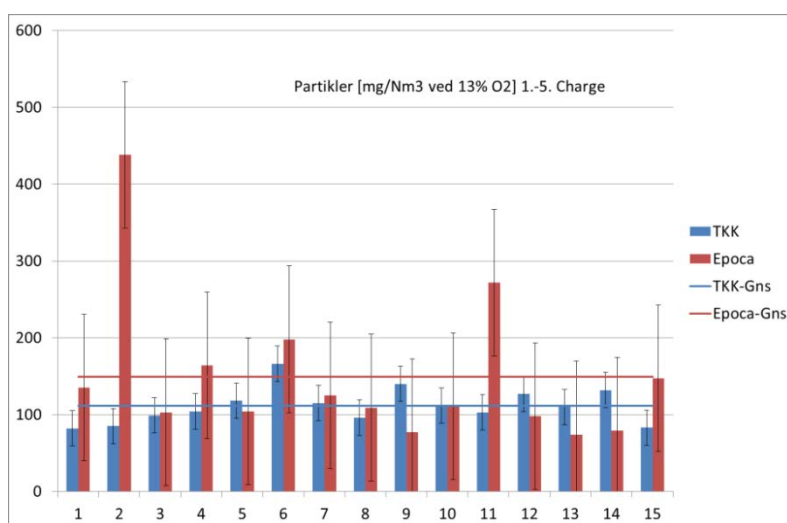
Illustration af resultater opnået ved 15 indfyringerne for henholdsvis Epoca og TKK ses i nedenstående søjlediagrammer. Der er valgt ikke at fjerne nogen resultater, selvom enkelte indfyringer falder signifikant uden for den generelle tendens.



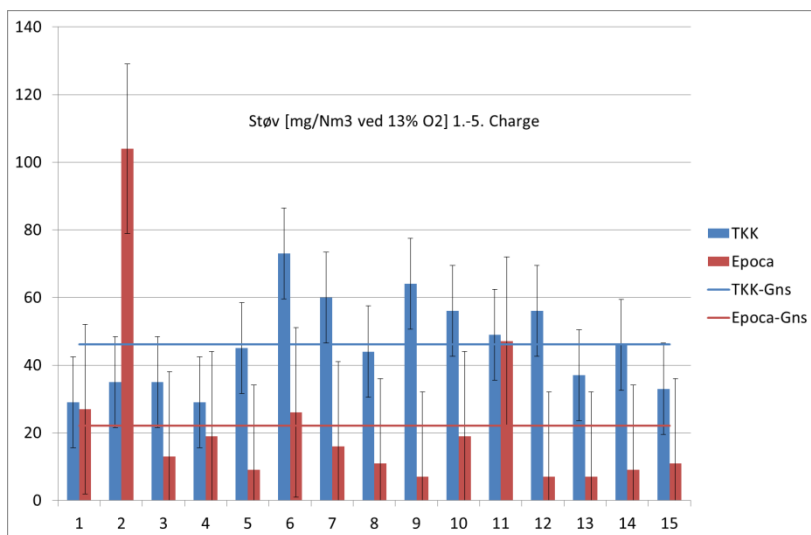
FIGUR 109: KULILTE I RØGGAS, TKK OG EPOCA.



FIGUR 110: ORGANISK BUNDET KULSTOF I RØGGAS,TKK OG EPOCA.



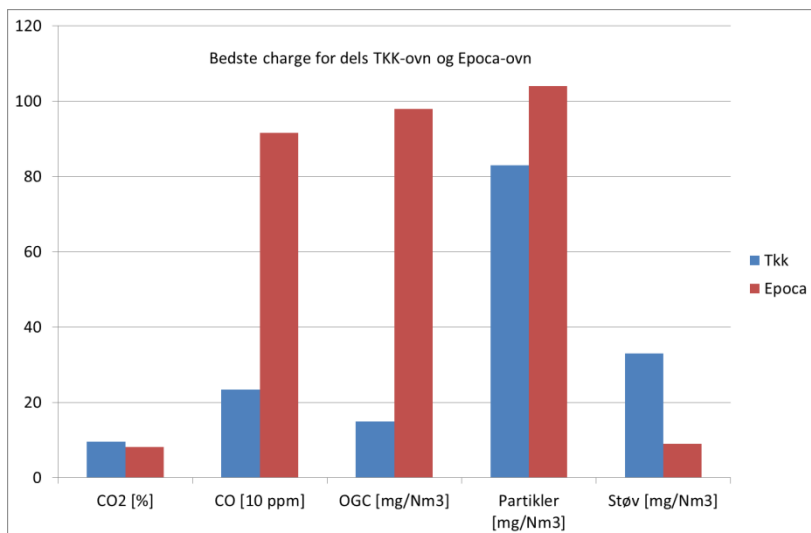
FIGUR 111: PARTIKLER I RØGGAS MÅLT I HHT. NS, TKK OG EPOCA.



FIGUR 112: STØV I RØGGAS MÅLT I HHT. DIN+, TKK OG EPOCA.

Med undtagelse af støv målt efter DIN+ viser resultaterne en forbedring af forbrændingen i TKK. Yderligere ses en svag tendens til at emissionerne er mere ensartede på TKK end på Epoca. Det kan tolkes som, at TKK er mindre følsom overfor et uheldigt forbrændingsmønster grundet den uensartethed, der naturligt vil forekomme ved forbrænding af brændestykker. Forbedringen kan i lige høj grad tilskrives katalysatoren som efterforbrændingskammeret.

Måleresultaterne for støv efter NS og DIN+ viser to forskellige billeder. Det er væsentligt at bemærke, at mens partikler i NS er målt i fortyndingstunnel og i hele perioden, fra træet lægges ind, til der skal fyres på ny, er støv i henhold til DIN+ målt i en periode på 30 minutter med start tre minutter efter påfyring. Målingerne er endvidere in-stack i varm røggas og med opvarmet filter. Både støvmåling og partikelmåling er foretaget i henhold til de respektive standarder.



FIGUR 113: EMISSIONER I RØGGAS, TKK OG EPOCA.

I standardiseringsgrupper under CEN har der over længere tid været drøftet, om der med rimelighed kan foretages omregning mellem resultaterne opnået med opvarmet filter og med fortyndingstunnel. I prEN16510-1:2013, Annex G foreskrives en omregning som følger:

$$PME = PM_{HF} + 0,42x[OGC]$$

Hvor:

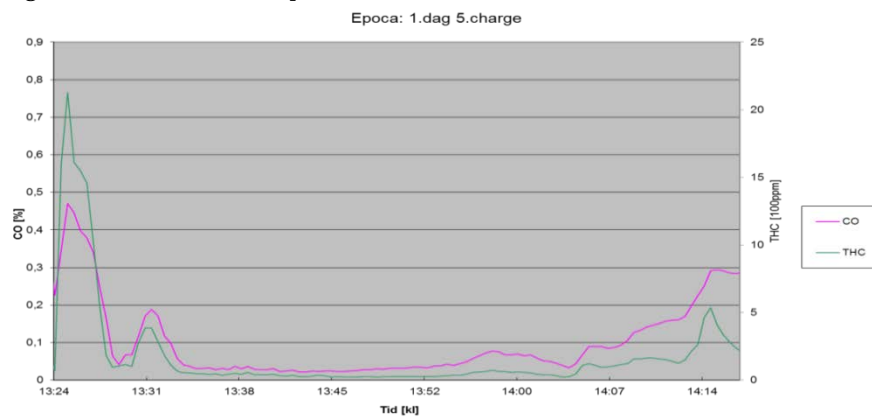
PME: er den totale partikelemission i fortyndingstunnel ved 13 % O<sub>2</sub> i mg/Nm<sup>3</sup>

PM<sub>HF</sub>: er resultatet af målt faste partikler ved sample temperatur med opvarmet filter

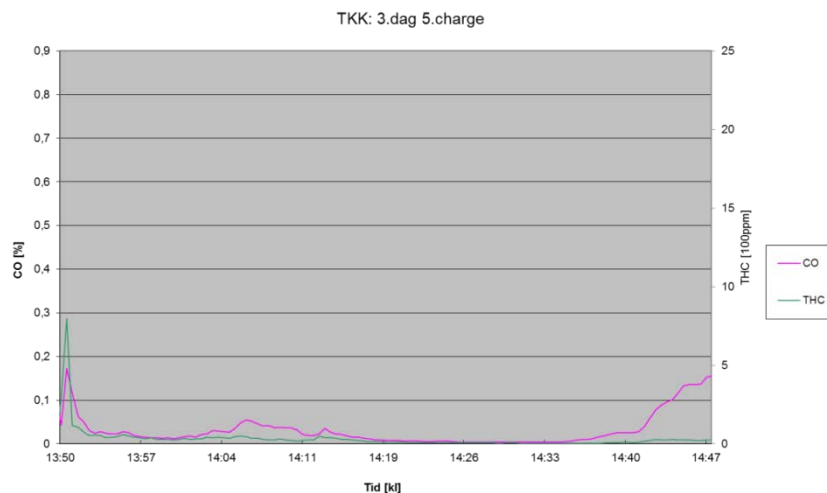
Denne omregning skulle ideelt set sikre, at de kondenserbare røggaskomponenter inkluderes ved måling med opvarmet filter, hvormed en sammenligning skulle være mulig.

I nærværende miljømålinger er det muligt at genfinde den ønskede sammenhæng mellem de to anvendte målemetoder, om end faktoren 0,42 er for lav til helt at opveje andelen af de kondenserbare komponenter. En faktor på det dobbelte er mere retvisende for de udførte målinger. Det skal samtidig bemærkes, at måleperioden i DIN+ er reduceret til tre minutter efter indfyring og 30 minutter frem.

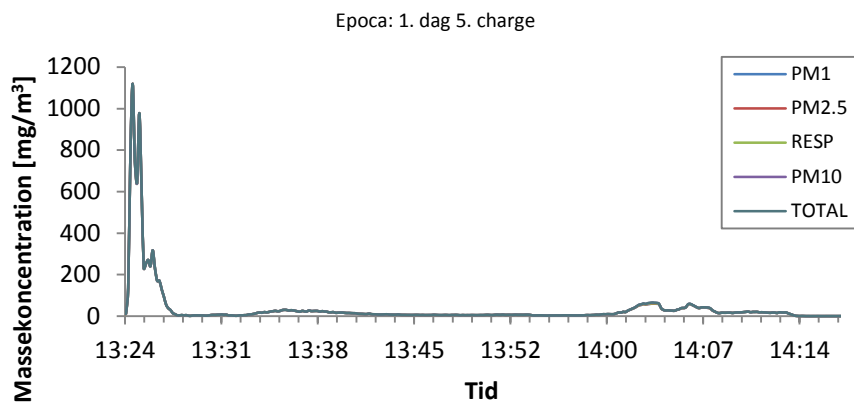
Ved at sammenholde emissionsforløbet på den bedste indfyring på Epoca og TTK respektivt kan det vurderes, om der er klar forskel på emissionsniveauet i forskellige tidsperioder på de to ovne. Definitionen af den bedste indfyring er her den laveste CO. I de fire følgende figurer vises grafer for CO, THC og massekoncentration af partikler.



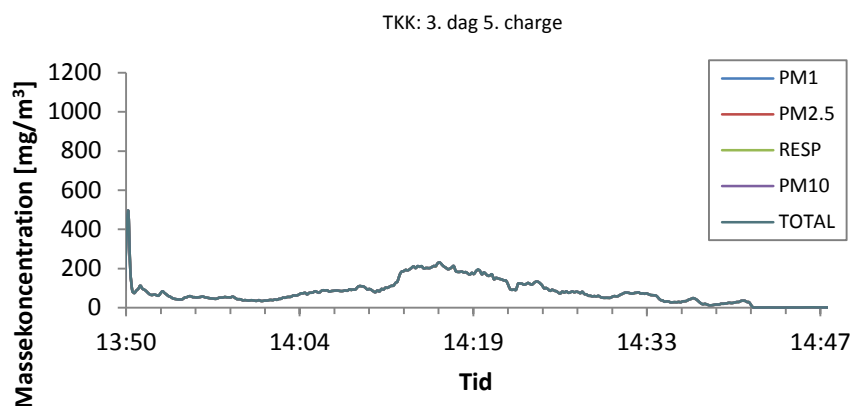
FIGUR 114: CO OG THC I DEN BEDSTE TEST PÅ EPOCA.



FIGUR 115: CO OG THC I DEN BEDSTE TEST PÅ TTK.



FIGUR 116: BEDSTE TEST PÅ EPOCA.



FIGUR 117: BEDSTE TEST PÅ TKK.

Massekoncentrationen af partikler er højst i Epoca lige efter indfyring, mens billedet vender efter de første fem minutter, og massekoncentrationen af partikler er højst i TKK i stort set hele den resterende del af forbrændingsperioden. Sammenholdes massekoncentrationen med måling af CO og OGC synes dette forhold også at blive afsløret af røggasmålingerne samt partikelmålingerne efter NS. I støvmålingsresultater efter DIN+ opnår Epoca bedre resultater end TKK, idet måleperioden er begrænset til det tidsrum, hvor massekoncentrationen af partikler er lavt, nemlig 3 til 33 minutter efter indfyring.



Udover støvmålingerne i henhold til DIN+ er den eneste anden faktor, der indikerer, at emissionsresultaterne på TKK ikke i alle henseende er Epoca overlegne, er de udførte PAH målinger, der er illustreret i nedenstående skema.

|       | Hel dag  | 2.-5. charge | Opt-1. charge |
|-------|--|--------------|---------------|
|       | 1. dag   | 2. dag       | 3. dag        |
|       | BaP ækv. [ $\mu\text{g}/\text{m}^3_{\text{n}}$ ] ved 13 % O <sub>2</sub> |              |               |
| Epoca | 10   | 4            | 10            |
| TKK   | 132  | 102          | 257           |

### Sammenligning af bedste indfyring for TKK, Epoca med Bioovn

Sammenligning af de bedste resultater fra TKK og Epoca med Bioovnen og Rais Bionic, der begge kommercielle tokammer brændeovne med underforbrænding, vises i nedenstående skema.

Resultaterne på Bioovnen og Bionic, der stammer fra akkrediterede målinger udført i henholdsvis 2008 og 4. kvartal i 2012 på Teknologisk Institut, er venligst stillet til rådighed af producenterne.

| Bedste indfyring  | TKK  | Epoca | Bioovnen  | Bionic   |
|---|------|-------|---|--|
| CO <sub>2</sub> [%]   | 9,6  | 8,2   | 13,4  | 8,4  |
| CO<br>[% ved 13% O <sub>2</sub> ]                                     | 0,02 | 0,09  | 0,06  | 0,02   |
| OGC<br>[mgC/Nm <sup>3</sup> ved 13%<br>O <sub>2</sub> ]               | 15   | 98    | 43  | 11   |
| Støv efter DIN+<br>[mg/Nm <sup>3</sup> ved 13%<br>O <sub>2</sub> ]    | 33   | 9     | 9   | 4,2  |
| Partikler efter NS<br>[mg/Nm <sup>3</sup> ved 13%<br>O <sub>2</sub> ] | 83   | 104   |  |  |

Skemaet viser, at der er opnået gode forbrændingsresultater på TKK i forhold til Bioovnen og Bionic, dog med undtagelse af støvmåling i henhold til DIN+. Resultatet fra støvmåling er derimod det samme for Epoca og Bioovnen. Der er ikke målt partikler efter NS på Bioovnen og Bionic, og det skal yderligere bemærkes, at selvom der var, ville resultaterne ikke være sammenlignelige, da NS ved normal akkrediteret typeprøving foreskriver forbrænding af lægter og ikke kløvet brændestykker, som det er gjort ved TKK og Epoca.

CO<sub>2</sub> procenten på Bioovnen er væsentligt bedre end på TKK, hvilket tyder på at potentialet for TKK er større eksempelvis ved at forbedre opblanding af forbrændingsluft og røgasser i efterforbrændingskammeret. Endvidere er der bl.a. grundlag for nærmere undersøgelse af ideel placering samt af katalysator og temperaturforhold. Det er overraskende, at der trods de generelt gode resultater måles højt PAH. Disse resultater giver anledning til nærmere analyser af de forhold, der gør sig gældende i både det primære kammer og efterforbrændingskammeret.

# 7. Referencer

Kim Winther, Teknologisk Institut, Vurdering af brændekedlers partikelemission til luften i Danmark, Miljøstyrelsen nr. 6, 2008.

Afprøvning af teknologier til røggasrensning og/eller forbrændingsforbedring til eftermontering på eksisterende brændeovn- og brændekedelinstallationer, MST projekt 523-00068

Fireplace Emission Test Report, OMNI-Test Laboratories, Inc., Portland, Oregon US, March 2, 2009.

List of EPA Certified Wood Stoves

Residential solid fuel burning appliances – Part 1: General requirements and test methods, prEN16510.

Glasius, M., Vikelsøe, J., Bossi, R., Andersen, H.V., Holst, J., Johansen, E., Danmarks Miljøundersøgelse, Schleicher, O. FORCE Technology, Dioxin, PAH og partikler fra brændeovne, Arbejdsrapport fra DMU, nr. 212, 2005.

Glasius, M., Konggaard, P., Stubkjær, J., Bossi, R., Hertel, O., Ketznel, M., Wählin, P., og Palmgren, F., Danmarks Miljøundersøgelse, Schleicher, O. FORCE Technology, Partikler og organiske forbindelser fra træfyring – nye undersøgelser af udslip og koncentrationer, Arbejdsrapport fra DMU, nr. 235, 2007.

### **Udvikling af brændeovn med to-kammer katalytisk forbrænding**

Rapporten indeholder en beskrivelse af udviklingen af en brændeovn med et to-kammer-forbrændingssystem med katalysator. To-kammer-forbrændingens umiddelbare miljømæssige gevinst er forventet gennem en reduceret emission af CO, OGC, og PAH partikler. Anvendelse af en katalysator i brændeovnes efterforbrændingskammer betyder, at forbrændingen lettere vil kunne foregå.

I forbindelse med brændeovne, hvor forbrugerne stiller krav til eksempelvis store glastruder og naturlige flammebilleder, er der fortsat en del uløste problemer. Ved at udvikle en brændeovn (TKK) med to-kammerforbrænding, hvor efterforbrændingskammeret udstyres med katalysator og samtidigt placeres oven på primærkammeret for dermed at drage størst mulig nytte af varmets naturlige bevægelsesmønstre, vil problemerne efter hensigten kunne reduceres.



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

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

**[www. mst.dk](http://www.mst.dk)**