



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

# CFD simulering af miljøeffektiv forbrænding

Miljøprojekt nr. 1437, 2012

**Titel:**

CFD simulering af miljøeffektiv forbrænding

**Redaktion:**

Claus Bæk Christiansen  
Scandtec Aps.

**Udgiver:**

Miljøstyrelsen  
Strandgade 29  
1401 København K  
www.mst.dk

**År:**

2012

**ISBN nr.**

978-87-92903-38-9

**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>4</b>
<b>1. Sammenfatning og konklusion</b> .....	<b>5</b>
1.1 Baggrund og formål .....	5
1.2 Undersøgelsen.....	5
1.3 Projektresultat .....	5
1.4 Hovedkonklusion.....	6
<b>Summary and conclusion</b> .....	<b>7</b>
1.5 Background and purpose.....	7
1.6 Research.....	7
1.7 Project result .....	7
1.8 Main conclusion.....	7
<b>2. Baggrund</b> .....	<b>9</b>
2.1 Afbrænding af træ i dag i Danmark.....	9
2.2 Sundhedsskadelige effekter.....	9
2.3 Nuværende emissionsniveau ved træafbrænding .....	9
2.4 Forbrugerønsker til ydelse i fremtiden .....	10
2.5 Projekt mål for emissionsniveau og ydelse.....	11
<b>3. CFD-simulering som værktøj</b> .....	<b>13</b>
3.1 CFD-programmet NX .....	13
3.2 Arbejdsform .....	15
3.3 Program-input .....	15
3.4 Detaljeoptimering.....	16
3.5 CFD-simulering til konceptudvikling .....	16
<b>4. Opnåede emissionsværdier</b> .....	<b>19</b>
4.1 Ydelsesområde .....	19
4.2 Mål for emissionsværdier .....	19
4.3 Målte CO-emissionsværdier .....	19
4.4 Målte NO <sub>x</sub> -emissionsværdier.....	21
<b>5. Konklusion</b> .....	<b>23</b>

**Bilag A: Eksempler på træddeler på markedet**

**Bilag B: Plot af målt CO-niveau over 6 timer**

# Forord

Boligopvarmning af private hjem ved afbrænding af træ har de sidste år været meget udskældt for blandt andet sit udslip af kræftfremkaldende stoffer og sin store andel af den samlede partikelforurening i Danmark.

Da biobrændsel ikke er så homogent et brændsel som eksempelvis olie, kul og gas har det, måske på grund af konservatisme, været accepteret at det ikke kunne brænde mere rent, og der er i mange år ikke sket meget for at nedbringe emissionsværdier.

Med projektet her har det været et ønske at vise, at det nuværende emissionsniveau og de dertil hørende sundhedsskadelige stoffer kan reduceres. Det nuværende niveau er altså ikke en forurening, man bare må acceptere i forbindelse med afbrænding af træ, og det kan ikke med god grund bruges til totalforbud mod afbrænding af træ i eksempelvis byområder.

Emissioner fra afbrænding af træ kan gennem udviklingsarbejde af brændzonen i kedlen reduceres og gøres til et rigtigt godt alternativ til de mange andre boligopvarmningsformer.

Formålet med projektet har været at få opbygget en intern viden til at kunne gennemføre CFD-simuleringer (Computational Fluid Dynamics) i forbindelse med udvikling af træfyrede kedler med lavere ydelse og at finde et værktøj, som kan bruges til systematisk at nedbringe emissionsværdier til et ikke før set niveau.

Der er i projektet arbejdet med træfyrede kedler, men metoden med CFD-simulering forventes at kunne anvendes for andre anlægstyper som for eksempel brændeovne eller kraftværkskedler. Baggrunden er, at det generelt er forbrændingszonen, der simuleres og tilpasses.

Projektet er udført med tilskud fra Miljøstyrelsen under tilskudsordning til miljøeffektiv brændefyringsteknologi. Dette indebærer dog ikke at indholdet er udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter.

Projektet med udvikling af det nye forbrændingskoncept og CFD-simuleringer og analyser er gennemført af Civilingeniør Claus Bæk Christiansen.

# 1. Sammenfatning og konklusion

## 1.1 Baggrund og formål

Boligopvarmning af private hjem ved afbrænding af træ i træfyrede kedler og brændeovne har de sidste år været meget udskældt for negative miljøpåvirkninger på lokalmiljøet. Men det er samtidigt den billigste boligopvarmningsform, der findes. Prisen, samt det at brændslet er CO<sub>2</sub>-neutralt og lokalt produceret, er rigtig gode grunde til at fortsætte og udbrede brugen af det overalt, selv i tæt bebyggede områder - hvis de lokale miljøpåvirkninger, som er negative for folkesundheden, kan fjernes.

Formålet med projektet har været at få opbygget en intern viden til at kunne gennemføre CFD-analyser i forbindelse med udvikling af træfyrede kedler med lavere ydelse og at få et værktøj som kan bruges til systematisk at nedbringe emissionsværdier til et ikke før set niveau.

## 1.2 Undersøgelsen

Der er blevet udviklet et nyt brændzonekoncept ud fra analytiske beregninger og CFD-simuleringer. CFD-simuleringer har her gjort det muligt at finjustere på hele forbrændingszonen tidligt i udviklingsfasen og give en bedre 1. prototype. Denne proces har også vist, hvor dårligt tidligere udformninger af brændzoner er optimeret, og at denne manglende optimering har stor betydning for de emissionsværdier, der senere kan opnås i laboratoriet.

Som første prioritet er der optimeret imod et lavt CO-niveau. Det er den ufuldstændige forbrænding som giver den store mængde sundhedsskadelige stoffer. Måling af niveauet af uforbrændte kulmonoxid (CO) i røggassen er en god indikator for hvor fuldstændig forbrændingen er, og for hvor højt niveauet af sundhedsskadelige stoffer er.

## 1.3 Projektresultat

Det har været muligt ved alle afprøvninger på 1. prototype over en tid at opnå en kontinuerlig forbrænding med en gennemsnitlig CO-værdi på under 10 mg/m<sup>3</sup>. Alle værdier i rapporten er omregnet til 10 % O<sub>2</sub> og kan direkte sammenlignes med eksempelvis værdierne i EN 303-5.

Det vurderes, at projektmålet med en CO-middelværdi på 10 mg/m<sup>3</sup> kan nås for en komplet fyring med en god lambdasty-ring. Projektmålet for NO<sub>x</sub>-reduktionen er ikke nået. Men en CO-middelværdi på 10 mg/m<sup>3</sup> og de opnåede NO<sub>x</sub>-værdier er dog ikke højere end hvad der accepteres på oliefyrede kedler i dag. Og det er med et billigt og CO<sub>2</sub>-neutralt brændsel, der samtidigt er lokalt produceret.

Et CO-emissionsniveau på 10 mg/m<sup>3</sup> svarer til 0,5 % af hvad en perfekt justeret brændeovn skal kunne præstere i gennemsnit i et laboratorium for at opnå Svanemærke, og 5 % af hvad mange træfyrede kedler på markedet med lambdastyring har som gennemsnit nu.

#### **1.4 Hovedkonklusion**

Emissionsreduktionen opnået på 1. prototype af det nye for-brændingskoncept er så stor, at det forventes, at alle negative miljøpåvirkninger på lokalmiljøet kan fjernes, hvis forbrændingskonceptet anvendes sammen med en god lambdastyring.

Metoden med en stor del af analytiske beregninger på delemner og efterfølgende CFD-simulering på det samlede system er ikke specifikt for træafbrænding. Det samlede princip kan fuldstændigt overføres på al afbrænding af biomasse, som f.eks. træpiller, flis, halm og træ, uanset om det er i stokerfyr, brændeovne eller kedler og uanset effekt. Og det vil også her kunne bidrage med en reduktion i emissionsværdierne, fordi forbedringen her kun er opnået gennem et nyt optimeret forbrændingskoncept, og ikke med filtre og katalysatorer eller med lambdastyring.

# Summary and conclusion

## 1.5 Background and purpose

During recent years, domestic space heating by means of wood burning in wood boilers and stoves has been much criticised for having a negative environmental impact on the local environment and population. However, it is also the cheapest way of heating a domestic house. The price and the fact that the fuel is CO<sub>2</sub> neutral and locally produced are very good reasons for continuing and expanding the use of it everywhere, even in densely populated areas - if the environmental impacts which constitute a health risk to the local environment and population can be removed.

The purpose of the project has been to gain in-house knowledge to be able to carry out CFD analyses in connection with the development of wood boilers with a low output. And get a tool which can be used for systematically reducing the emission of pollutants to a previously unseen level.

## 1.6 Research

A new combustion zone concept has been developed on the basis of analytical calculations and CFD simulations. CFD simulations have made it possible to fine adjust the entire combustion zone early in the development process, and in this way the 1. prototype gets better. This process has also shown how poorly previously developed combustion zone concepts have been optimised and that this lack of optimisation has a large influence on the emission levels which can be obtained in the laboratory.

As first priority, optimisation has been made with regard to a low CO level. It is the incomplete burning which gives the large amount of hazardous pollutants. By measuring the level of unburnt carbon monoxide (CO) in the flue gas, a good indication is given of how complete the combustion is and of the level of hazardous pollutants.

## 1.7 Project result

All tests of the 1. prototype showed, over a period of time, a continuous combustion with an average CO level below 10 mg/m<sup>3</sup>. All values in the rapport are recalculated to 10 % O<sub>2</sub> and are therefore directly compatible with values from EN 303-5.

It is estimated that the project objective of an average CO level of 10 mg/m<sup>3</sup> can be reached for a complete heating with a good lambda controller. The project objective of a NO<sub>x</sub> reduction has not been reached. However, an average CO level of 10 mg/m<sup>3</sup> together with the NO<sub>x</sub> values which have been reached are not higher than what can be accepted for oil-fired boilers today. And this is with a cheap and CO<sub>2</sub> neutral fuel which is locally produced.

A CO emission of 10 mg/m<sup>3</sup> is equal to 0.5 % of what a perfectly adjusted wood-burning stove must be able to achieve on average in a laboratory in order to obtain the Nordic ecolabel Svanemærke and 5 % of what many wood boilers with lambda controller on the market achieve on average today.

## 1.8 Main conclusion

The emission reduction reached with the 1. prototype of the new combustion concept is so large that it is expected that all negative environmental impacts on the local environment and population can be removed if the combustion concept is used together with a good lambda controller.

The method of making a lot of analytical calculations on sub-parts followed by CFD simulations on the total system is not just specific for wood burning. The total principle can be completely transferred to all burning of biomass in wood-burning stoves or boilers. And in all the cases it will contribute to an emission reduction as the improvement has exclusively been achieved through a new and optimised combustion concept and not by means of filters and catalytic converters or a lambda controller.



# 2. Baggrund

## 2.1 Afbrænding af træ i dag i Danmark

Afbrænding af træ er den billigste boligopvarmningsform. Brændslet er samtidigt CO<sub>2</sub>-neutralt og lokalt produceret, hvilket er rigtig gode grunde til at fortsætte og udbrede brugen af det overalt, selv i tæt bebyggede områder - hvis de lokale miljøpåvirkninger, som er negative for folkesundheden, kan fjernes.

## 2.2 Sundhedsskadelige effekter

Den lokale miljøpåvirkning stammer fra for høje koncentrationer af CO, NO<sub>x</sub>, PAH, VOC og partikler.

Brændeovne og træfyrede kedler er de største bidragsydere til partikelemissionen i Danmark, og da dette er sundhedsskadeligt, forventes det at kravene til træafbrænding i nær fremtid skærpes betragteligt med hensyn til partikelemission.

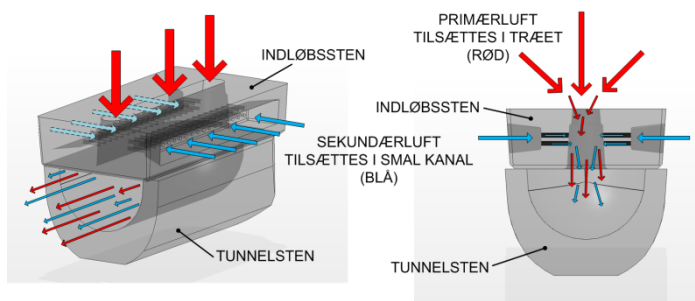
De ovennævnte stoffer er ikke træafbrændingsspecifikke, men dannes også i større eller mindre grad ved afbrænding af kul, olie og naturgas, og fra forbrændingsmotorer i transportsektoren.

## 2.3 Nuværende emissionsniveau ved træafbrænding

Det er den ufuldstændige forbrænding som giver den store mængde sundhedsskadelige stoffer. Måling af niveauet af uforbrændte kulmonoxid (CO) i røggassen er en god indikator for hvor fuldstændig forbrændingen er, og for hvor højt niveauet af sundhedsskadelige stoffer er.

Emissionskravene for CO-niveauet, for at kunne få godkendt en træfyrede kedel med en ydelse under 50 kW i Danmark er, at den under ideelle forhold i et laboratorium ved fuld ydelse kan brænde med et CO-gennemsnit på maksimalt 5000 mg/m<sup>3</sup>.

Træfyrede kedler som fremstilles i Europa i dag med en ydelse på 20-60 kW er for hovedpartens vedkommende opbygget efter et mindst 20 år gammelt koncept med indløbs- og tunnelsten. Det forventes ikke at der kommer betydelige emissionsreduktioner på dette gamle princip.



Figur 1 Principskitse med indløbs- og tunnelsten

Uden regulering og perfekt justeret kan de træfyrede kedler ved afprøvning i laboratorium opnå en CO-gennemsnitsværdi på omkring 1300 mg/m<sup>3</sup> og en NO<sub>x</sub>-gennemsnitsværdi på 250 mg/m<sup>3</sup>, se bilag A med eksempler herpå. Med en lambdasty-ring (lambdasonde, spjældmotorer og elektronisk regulering) kan de nå gennemsnitsværdier for emission af CO på omkring 300 mg/m<sup>3</sup> og NO<sub>x</sub> på 90-180 mg/m<sup>3</sup>.

Reduktionen med en lambdastyring opnås ved at én spjældmotor regulerer primærlufttilsætningen så afgangens fra træet, og derved ydelsen holdes konstant over forbrændingstiden. En lambdasonde måler iltindholdet i røggassen, som forlader kedlen, og styrer en anden spjældmotor, der tilsætter sekundærluft, som passer lige til det nuværende behov for at opnå en god forbrænding.

Til sammenligning er kravet til afbrænding af træ i en manuelt fyret kedel jf. EN 303-5 klasse 3 – en CO middelværdi på maks-simult 5000 mg/m<sup>3</sup>.

Ved en lavere ydelse end den vil der normalt dannes en langt større mængde skadelige stoffer. Hvis kedlen ikke er installeret med en lagertank kan man risikere meget u hensigtsmæssige driftsforhold. Hvis huset ikke kan optage den fulde ydelse vil ventilatoren stoppe og en ufuldstændig forbrænding vil opstå med meget høje emissionsværdier. Det samme gælder hvis brugeren reducerer lufttilførslen for at skrue ned for den producerede varme, da stuen er rigelig varm eller fordi man ønsker at der skal produceres varme hele natten.

Forbrændingen får herved ikke den luft der skal til for at opnå en god forbrænding, hvilket øger mængden af skadelige emissioner betragteligt. Forbrændingstemperaturen reduceres samtidigt på grund af den manglende lufttilførsel, hvilket også øger mængden af skadelige stoffer. Problemet med dårlig brugerjustering og nedregulering af ydelse fra maksimalydelsen er størst på gamle brændeovne og træfyrede kedler, men gælder også nye.

Hvis derimod kedlen er udstyret med en lambdasonde og elektronisk styring kan ydelsen reduceres til ca. 50% af den nominelle uden forbrændingen "vælter" og med emissionsværdier på samme niveau som ved nominal ydelse.

Med hensyn til andre uønskede emissioner (PAH, VOC, partikler og lugt) er det forventeligt at de også reduceres betragteligt sammen med CO-niveauet.

## **2.4 Forbrugerønsker til ydelse i fremtiden**

I takt med at boligmassen bliver bedre isoleret, forventes det, at maksimalydelsen på en træfyrede kedel til et én-familiehus vil falde fra de nuværende 20-60 kW helt ned til 2-10 kW.

Det forventes også at forbrugerne, samtidig med ønsket om at kunne opvarme boligen miljøvenligt og billigt med træafbrænding, ønsker mere komfort, så varmen ikke bliver så koncentreret i et lokale, som med brændeovnen, men kan fordeles til andre rum, gulvvarme og samtidigt give varmt brugsvand.

En ny træfyrede kedel med lav ydelse vil kunne gå direkte ind og erstatte en stor del af brændeovnene som boligens eneste varmekilde i én-familiehuse, udelukkende på grund af øget brugerkomfort.

Ved store træfyrede kedler med elektronisk regulering af lufttilskud er der ved regulering en vis træghed, da volumen af træ, som brænder, altid er stort. Så hvis der kortvarigt lukkes lidt for meget for luften eller hvis opblandingen ikke er helt god, så går det alligevel, da trægheden medfører at overregulering udjævnes over tid.

En træfyret kedel, som designes til en lavere ydelse på 2-10 kW, vil ved nedskallering af nuværende brændzone være meget følsom overfor variationer i eksempelvis afgasningen af brændsel og luftregulering. Dette må forventes at resultere i højere emissionsværdier end nu.

## **2.5 Projekt mål for emissionsniveau og ydelse**

Målet er at udvikle træfyrede kedler, som brænder med emissionsværdier, der er så lave, at de ikke er negative for folkesundheden. Det skal være ved en lavere kedelydelse end de nuværende. Dette kræver, at der udvikles et nyt koncept for kedlernes brændzone.

Målet, med at starte dette projekt, var, at man, på en prototype, kunne komme ned på gennemsnitsværdier for forbrændingens emissioner i en størrelsesorden på 10 mg/m<sup>3</sup> for CO og på 40 mg/m<sup>3</sup> for NO<sub>x</sub>. Dette skulle kunne nås ved en ydelse i området 2-10 kW.



# 3. CFD-simulering som værktøj

For ved en lavere ydelse at opnå en betydelig reduktion af emissionsværdier i forhold til hvad de bedste træfyrede kedler kan præstere i dag, er det ikke nok kun at arbejde med den samlede kedel som et totalt system. Det giver simpelthen ikke en tilstrækkelig detaljeringsgrad til at kunne analysere, hvis man kun kigger på slutresultatet - det vil sige at måle på røggassen og gennemfører punktvis målinger af temperaturen.

Ved at kunne lave strømnings- og varmetransport CFD-simuleringer på tredimensionelle modeller, er det muligt i detaljer at forstå og analysere komplekse processer, og det vil være muligt at optimere på selv helt små detaljer.

CFD-simulering har i flere år været anvendt ved High End ud-vikling indenfor fly- og automobilindustrien, men de er inden-for de seneste par år også blevet brugt til udvikling indenfor mindre industrier, hvor man ønsker at komme tættere på en optimal funktion.

Blandt andet investerede BMW Sauber Formel 1 hold i 2007 i mere CFD software og beregningskraft, i stedet for vindtunneltests. Og Speedo's svømmedragt, som var meget omdiskuteret under OL i Kina er udviklet med hjælp af CFD-simuleringer.



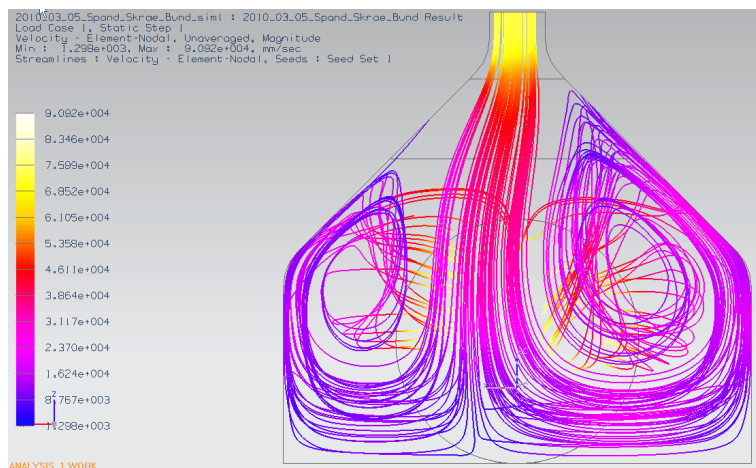
Figur 2 CFD-analyse af Speedo svømmedragt, billede fra nettet

## 3.1 CFD-programmet NX

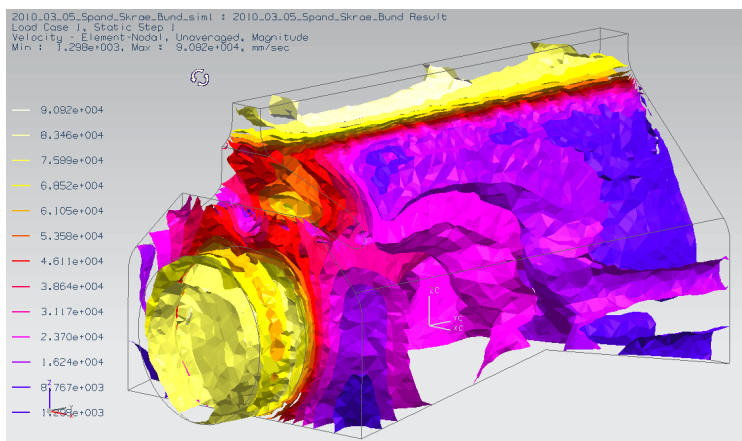
CFD-programmet, som er anvendt, er programmet NX fra Siemens. Det kan simulere strømninger og varmetransport samtidigt, og programmet har til fulde opfyldt analysebehovet. Den mulige detaljeringsgrad, når modellen skal opbygges, er passende, og opbygningen af modellen og ændringer i denne er lette at gennemføre. Beregningstiden pr. simulering er acceptabel, og når simuleringen er færdig har programmet mange typer data og plots, der er meget anvendelige, når CFD-simuleringen skal analyseres.

De forskellige visualiseringsmuligheder, som NX tilbyder efter en simulering, er rigtig gode, og de gør det ikke bare muligt at "se", hvad der sker men også at sætte tal på, så resultatet fra forskellige simuleringer kan sammenlignes.

Der kan blandt andet laves diverse plots af trykfordeling, tur-bulens, temperatur, samt et der viser, hvilken vej et segment tager gennem hele forbrændingszonen. Efterfølgende er der vist nogle eksempler fra NX på plots, der kan bruges i analyse-fasen.



Figur 3 Plot fra NX af segmenters vej gennem brændzonen



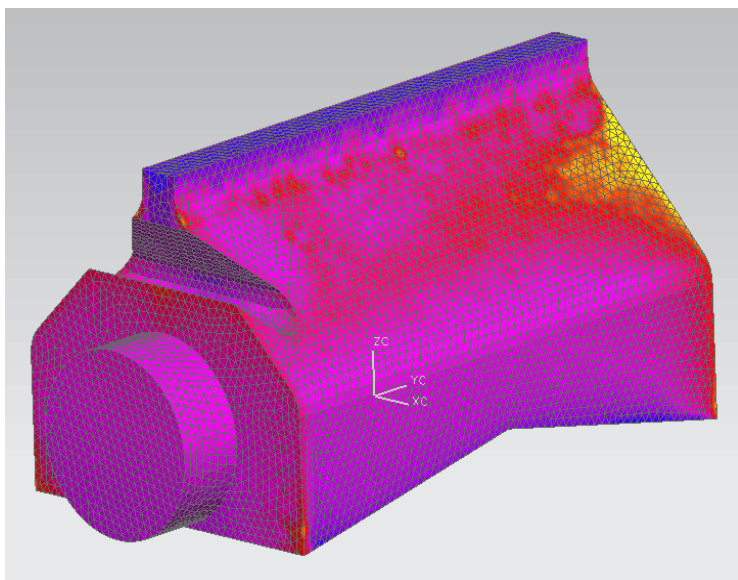
Figur 4 Plot fra NX af strømningshastigheder i brændzonen

Programmet kan herudover simulere både Steady State og Transiente situationer. Det sidste er meget anvendeligt i for-hold til reduktion af emissioner, da forureningen normalt er højere ved opstart og udbredning end under konstant drift. Programmet giver altså mulighed for eksempelvis at simulere en opstart med en kold forbrændingszone, og man kan så "se", hvordan forholdet i forbrændingen ændres over tid, når effekten stiger og delene varmes op.

Til at fastslå om CFD-simulering og prototypekedel passer overens har det været enkelt at bestemme differencen og efterfølgende tilpasse CFD-modellen til virkeligheden.

### 3.2 Arbejdsform

I forbindelse med udviklingen af den nye udformning af brændzonen er forskellige løsninger indflydelse på emissionsværdierne beregnet analytisk. Først for at afgøre om de kan være en "stopper" for det samlede koncept og efterfølgende for at bestemme et optimum for delemnet. For det nye brændzonekoncept er der konsekvent gennemført analytiske beregninger for delområder.



Figur 5 Plot fra NX af netgenereret brændzone

Når dimensioner for delemner er fastsat, optegnes forbrændingszonen i en tredimensionel model, som CFD-simuleringen så foretages på. At køre en CFD-simulering på pc'en tager fra 30 minutter og op til 12 timer afhængigt af modelstørrelse (element antal, kompleksitet, krav til output osv.).

Ved den efterfølgende analyse af CFD-simuleringen kan det afklares, om de ønskede mål er opnået og på hvilke områder, der skal ske forbedringer. Designmål for forbrændingszonen opsættes dog af brugeren, og programmet fortæller ikke, hvad der skal forbedres eller hvilket mål, der nu skal arbejdes hen imod for at opnå lavere emissionsværdier!

### 3.3 Program-input

For at CFD-simuleringerne kan være repræsentative for virkeligheden, kræves det, at brugeren har en forståelse af de fysiske forhold og kan foretage en mængde analytiske beregninger for at fastlægge randbetingelser for modellen.

Herudover skal der i programmet under opbygning af modellen tages mange betydende beslutninger, omkring hvorledes analysen ønskes foretaget. For at få en repræsentativ model skal brugeren også her have forståelse for disse valg.

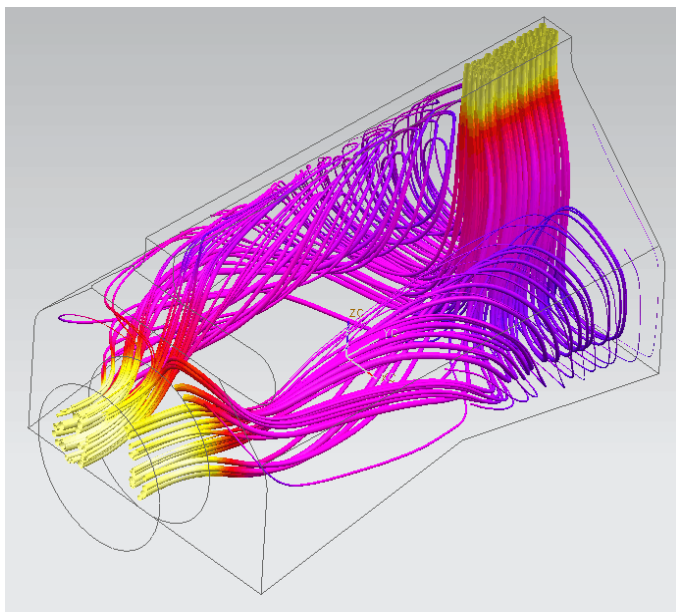
Brugeren skal som minimum kunne lave analytiske strømnings- og termiske beregninger på et relativt højt niveau. Uden dette arbejde er programmet helt uanvendeligt. Hver gang der i modellen ændres dimensioner og udformning, skal randbetingelserne beregnes analytisk på ny.

### 3.4 Detaljeoptimering

En optimering af de analytiske beregninger på dele er vital for at opnå et lavt emissionsniveau, men den kan ikke sikre, at den samlede løsning arbejder perfekt. Her er CFD-simuleringerne også et rigtigt godt værktøj.

CFD-simuleringerne har vist, at betydningen af små detaljer kan være stor på det totale system og gøre, at forbrændings-zonen ikke mere opfylder målet. CFD-simuleringer har her gjort det muligt at finjustere på hele forbrændingszonen tidligt i udviklingsfasen og givet en bedre 1. prototype, som ikke har krævet så megen testtid i et laboratorium for at nå gode resultater. Denne proces har også vist, hvor dårligt tidligere brændkammerudformninger er optimeret, og at denne manglende optimering har stor betydning for de emissionsværdier, der senere kan opnås i et laboratorium.

Optimeringen med CFD behøver selvfølgelig ikke altid foretages på den samlede forbrændingszone, men kan også laves på dele for at sammenligne forskellige løsninger eller optimeringer.



Figur 6 Plot fra NX af segmenters hastighed gennem brændzonen

### 3.5 CFD-simulering til konceptudvikling

I forbindelse med udviklingen af kedler til afbrænding af træ eller andet biobrændsel er CFD-simulering en rigtig god over-bygning til afprøvning i et laboratorium. CFD-simuleringer giver simpelthen en unik mulighed for tidligt i udviklingsfasen at "se", hvad der sker, når man varierer forskellige parametre. Samtidig er hastigheden, hvormed nye ideer og ændringer kan vurderes, mange gange hurtigere, end hvis man udelukkende bruger prototyper og laboratorium. Derudover kan arbejdet gennemføres og vurderes på pc'en, inden der bruges udviklingstid og penge på 1. prototype.



CFD-simuleringer fra NX viser dog ikke emissionsværdier, og da det kun er simuleringer, skal resultaterne altid holdes op imod virkeligheden med målinger i laboratoriet.

Slutresultatet med hensyn til lave emissionsværdier eller jævn robust forbrænding, afhængigt af hvad der optimeres imod, er langt bedre end blot arbejde med prototyper og i laboratorium alene. Se mere om dette under emissionsresultater.



# 4. Opnåede emissionsværdier

## 4.1 Ydelsesområde

Med 1. prototype har det været muligt at opnå gode emissionsværdier ved ydelsesområdet fra 7 til mindst 16 kW. Ydelsesområdet ligger altså højere end ønsket. Hvis ydelsen for kedlen tvinges længere ned stiger, så stiger emissionsværdierne.

Men ud fra erfaringen med 1. prototype vurderes det, at målet vil kunne nås med yderligere udviklingsarbejde.

## 4.2 Mål for emissionsværdier

Målet med dette projekt og anvendelsen af CFD-simulering som værktøj er at kunne nå ned på gennemsnitsværdier for i en størrelsesorden på 10 mg/m<sup>3</sup> for CO og på 40 mg/m<sup>3</sup> for NO<sub>x</sub>.

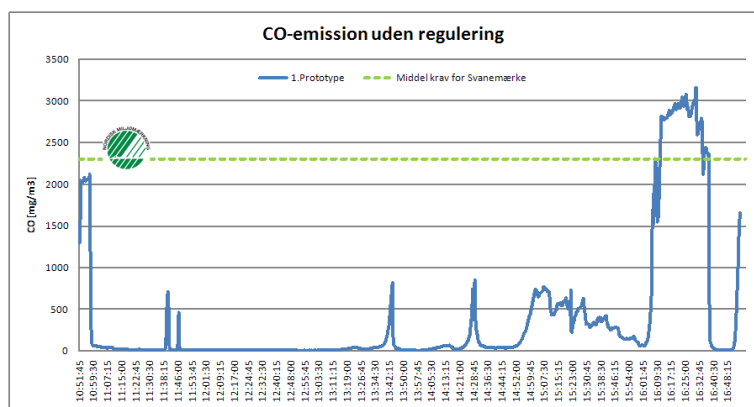
Målingen foretages på røggassen, hvor denne forlader prototypen og går ind i skorstenen.

Forsøgene er gennemført på en manuel fyret trækedel.

Det var planlagt, at den nye forbrændingszone skulle have været sammenkørt med en lambdastyring, dvs. en programmeret styring med lambdasensor og spjældmotorer, men projektet med udvikling af denne styring var ikke tidsmæssigt klar til indeværende projekt. Så alle målinger er uden en lambdastyring, hvilket er meget uhensigtsmæssigt og absolut ikke tidssvarende.

## 4.3 Målte CO-emissionsværdier

Det har været muligt ved alle 8 afprøvninger på 1. prototype over en tid at opnå en kontinuerlig forbrænding med en gennemsnitlig CO-emissionsværdi på under 10 mg/m<sup>3</sup>. Figur 7 til Figur 9 viser CO-emissionen af en afprøvning som brænder 6 timer.

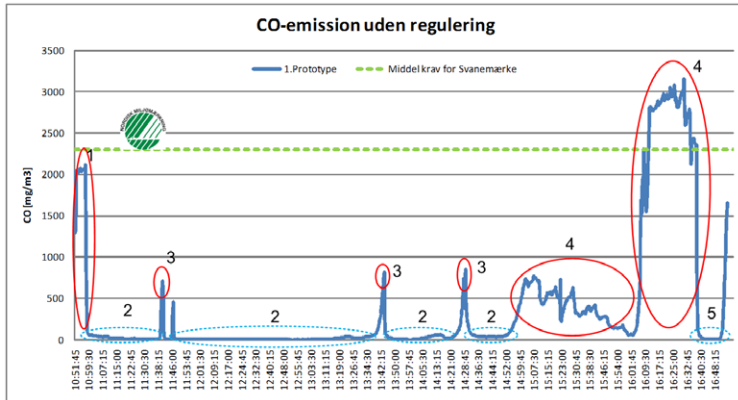


Figur 7 Målt CO-emissionsværdi på 1. prototype. Omregnet til 10 % O<sub>2</sub>, se også bilag B

Målingen er startet på en 20 grader kold kedel. Målingen er afsluttet når CO<sub>2</sub>-værdien er faldet til under 8,0 Vol Den grønne stiplede linje illustrerer et eksempel den middelværdi som CO-

værdien skal under ved afbrænding af træ i en bræn-deovn for at opnå miljø Svanemærket. Dette for at illustrere- at det er muligt at opnå meget bedre værdier og at Svanemærket ikke skal blive en sovepude for standarden og udviklingen af bedre forbrændingsteknikker..

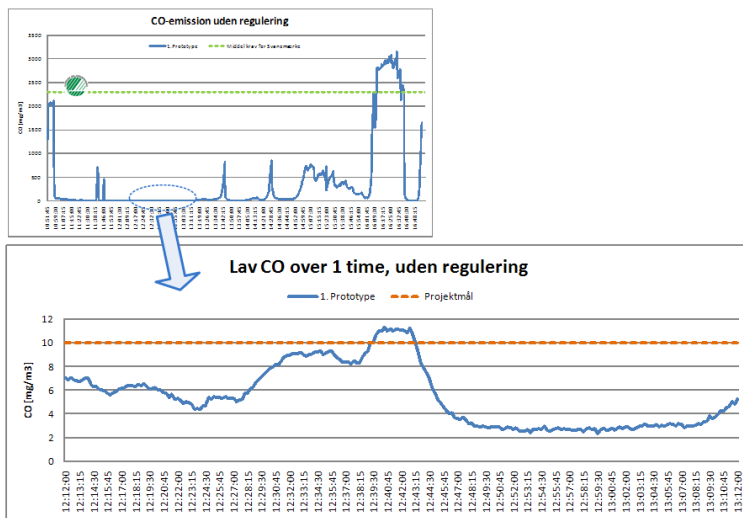
Nedenfor er der i Figur 8 og Figur 9 en forklaring til de forskel-lige tidspunkter i forbrændingen.



Figur 8 CO-emissionsværdi målt med udvalgte punkter markeret

Område 1: Opstartsfasen, hvor brændzonen skal opvarmes og afgasningen fra træet skal startes, vil altid have en højere emission af CO. Men tiden, hvori denne foregår, kan minimeres ved forskellige tiltag, blandt andet med en optimeret styring af primær- og sekundærluft baseret på erfaring.

Område 2: Forbrændingen er god og robust, og mængden af uforbrændt CO er lav. Middelværdien over en time er på under 6 mg/m<sup>3</sup> med 11 mg/m<sup>3</sup> som det højeste og 3 mg/m<sup>3</sup> som det laveste.



Figur 9 CO-emission målt. Lav værdi over 1 time. Omregnet til 10 % O<sub>2</sub>

Område 3: Peak hvor forbrændingen i en kort periode, ca. 2-3 minutter, stiger til 800 mg/m<sup>3</sup>. Kan eksempelvis være på grund af, at der afgasses for meget fra træet, eller at træet en kort periode ikke falder ned inde i fyrboksen. Peaks kan fjernes næsten helt med en god lambdastyring.

Område 4: Startindstillingen af primær- og sekundærspjæld er nu ikke mere optimal til de gasser der afgasses og forbrændingen bliver ustabil. Uden en aktiv justering af spjæld stiger emissionsværdierne meget. Fra et niveau for CO på 35 mg/m<sup>3</sup> stiger den først til omkring 500 mg/m<sup>3</sup> og senere til 2600 mg/m<sup>3</sup>.

Område 5: Til sidst i afprøvningen er der justeret på spjældene for at se, om en aktiv regulering kan reducere CO-emissionen - og det kan den. CO-emissionsværdien falder fra et niveau på omkring 2600 mg/m<sup>3</sup> helt ned til 3 mg/m<sup>3</sup>.

Når den målte værdier er på så lavt et niveau, må det dog forventes, at usikkerheden ved målingen er lige så stor som selve den målte emission.

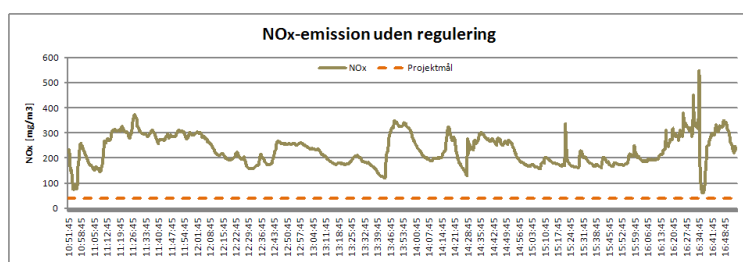
Samlet set optræder der uden regulering i løbet af forbrændingstiden peaks, hvor emissionen stiger på grund af den manglende regulering. Og efter ca. 4 timer stiger emissionsværdierne, da startfordelingen mellem primær- og sekundær-luft ikke er ideel i forhold til afgasningen sidst i forbrændingen. Men da der ved justering af spjældet, hurtigt kan nås ned på etcifrede CO-værdier igen, vurderes det, at det nye forbrændingskoncept er så godt, at der med en god lambdastyring kan opnås en CO-middelværdi på 10 mg/m<sup>3</sup>.

Samtidig har det vist sig, at det nye brændkammerkoncept er langt mere robust overfor luftreguleringen end det tidligere anvendte koncept med indløbs- og tunnelsten. Tilsætningen af sekundærluft behøver ikke være så præcis for at opnå en god forbrænding. Denne egenskab vil gøre det lettere for en lambdastyring at sikre en god forbrænding i praksis.

#### 4.4 Målte NO<sub>x</sub>-emissionsværdier

Målet med en NO<sub>x</sub>-middelværdi på 40 mg/m<sup>3</sup> er ikke opnået.

Middelværdien for NO<sub>x</sub> er 218 mg/m<sup>3</sup> når CO-middelværdien ligger på 6 mg/m<sup>3</sup>. Det er på niveau med det, som ikke-aktivt regulerede træfyrede kedler præsterer nu, og det er langt fra projektet.



Figur 10 NO<sub>x</sub>-emission målt. Er omregnet til 10 % O<sub>2</sub>

Det nye brændzonekoncept er først optimeret mod et lavt CO-niveau for at sikre en god forbrænding. Dette er gennemført ved at konceptet er presset på mange parametre for at opnå den lave CO-værdi, og de parametre virker for størsteparten til samtidigt at øge NO<sub>x</sub>-emissionen.

Uhensigtsmæssigheder som kunne ses fra CFD-analyserne og som kan øge dannelsen af NO<sub>x</sub>, er herefter reduceret, men stadig med målet for en lav CO-værdi.

Det nye brændkammerkoncept er meget robust over for CO<sub>2</sub>-udsving, hvilket kan udnyttes til at opnå en NO<sub>x</sub>-reduktion. Men hvor meget, der kan opnås ved dette, er uvist. Samtidigt kan nogle af de parametre, som er presset for at opnå det lave CO-niveau, måske slækkes lidt, for at sænke NO<sub>x</sub>-niveauet. Så det opnåede NO<sub>x</sub>-niveau er ikke noget, der skal accepteres, men kun et resultat for 1. Prototype.

# 5. Konklusion

Det er blandt andet ved hjælp af CFD-simuleringerne opnået at kunne afbrænde træ ved en lavere kedelydelse end tidligere, samtidig med at emissionsværdierne for CO er reduceret. Den laveste lydelse opnået på 1. prototype, hvor CO-emissionsværdierne er under 10 mg/m<sup>3</sup>, er 7 kW. Projektmålet, med at nå ned til 2 kW, er ikke nået med 1. prototype. Men ud fra erfaringen med 1. prototype vurderes det, at målet vil kunne nås med yderligere udviklingsarbejde.

Der er i projektet opnået viden til internt at kunne gennemføre CFD-simuleringer i forbindelse med afbrænding af biomasse, og herigennem til systematisk at reducere emissionsniveauet.

Emissionsreduktionen, opnået med 1. prototype af det nye forbrændingskoncept, er så stor, at det forventes, at alle negative miljøpåvirkninger på lokalmiljøet kan minimeres, hvis forbrændingskonceptet anvendes sammen med en god lambdastyring.

Det vurderes, at projektmålet for en CO-middelværdi på 10 mg/m<sup>3</sup> kan nås for en komplet fyring med en god lambdasty-ring. Projektmålet for NO<sub>x</sub>-reduktionen er ikke nået. Men NO<sub>x</sub>-værdier er dog ikke højere end hvad der accepteres på oliefyrede kedler i dag - og det på et billigt og CO<sub>2</sub>-neutralt brændsel.

Træafbrænding til bolig opvarmning med et CO-emissionsniveau på 10 mg/m<sup>3</sup>, svarer til 0,5 % af hvad en per-fekt justeret brændeovn skal kunne præstere i et laboratorium for at opnå miljø Svanemærket, og 5 % af hvad mange træfyrede kedler med lambdastyring har som gennemsnit nu.

Metoden med en stor del af analytiske beregninger på delemner og efterfølgende CFD-simulering på det samlede system er ikke specifik for afbrænding af træ i kedler. Det samlede princip kan fuldstændigt overføres på al afbrænding af biomasse, som f.eks. træpiller, flis, halm og træ om det er i stokerfyr, brændeovne eller kedler, uanset effekt. Det vil også i disse andre sammenhænge kunne bidrage med en reduktion i emissionsværdierne, fordi forbedringen her kun er opnået gennem et nyt optimeret forbrændingskoncept, og ikke ved hjælp af filtre og katalysatorer eller lambdastyring.

Selv ved ikke-reguleret træafbrænding, som f.eks. i brændeovne, må det forventes, at der er et stort potentiale for at reducere emissionsniveauet.

Potentialet for CFD-simulering som værktøj til reduktion af emissionsværdierne fra træafbrænding er meget stort set i lyset af de opnåede værdier for CO-emissionen på prototypen. Men kompleksiteten i opbygningen af korrekte modeller og simuleringen af en forbrænding med efterfølgende analyse af simuleringsresultatet gør, at det hos brugeren kræver specialistviden for at opnå en reduktion af emissionsværdierne. Og det vurderes, at den viden ikke pt. er til stede hos mange af de både små og store producenter.

I fremtiden kan boligopvarmning med afbrænding af træ i byområder altså sagtens lade sig gøre, selvom emissionskravene strammes. Og det vurderes at have et stort potentiale i Danmark, fordi opvarmningsformen er den billigste og brændslet er CO<sub>2</sub>-neutralt. Men det kræver, at der gennemføres et udviklingsarbejde med udformning af forbrændingszonen, og hvis der skal opnås rigtig lave emissionsværdier hos slutforbrugeren, skal der anvendes en form for aktiv styring.

# Bilag A

Eksempler på emissionsniveau på godkendte trækedler. To trækedler uden aktiv regulering og to med lambdastyring og aktiv regulering. Data er fra Teknologisk Instituts godkendelsesliste.

## 1.1 Calmer V 33

Ydelse: 35 kW  
CO-emission: 2678 mg/m<sup>3</sup>  
NO<sub>x</sub>-emission: - mg/m<sup>3</sup>  
OGC-emission 38 mg/m<sup>3</sup>  
Støv-emission: 27 mg/m<sup>3</sup>



## 1.2 Bonus 30

Ydelse: 27 kW  
CO-emission: 1288 mg/m<sup>3</sup>  
NO<sub>x</sub>-emission: 249 mg/m<sup>3</sup>  
OGC-emission 27 mg/m<sup>3</sup>  
Støv-emission: 28 mg/m<sup>3</sup>



## 1.3 HDG EURO 30 V2.0 – Trækedel med lambdastyring

Ydelse: 29 kW  
CO-emission: 240 mg/m<sup>3</sup>  
NO<sub>x</sub>-emission: 88 mg/m<sup>3</sup>  
OGC-emission 13 mg/m<sup>3</sup>  
Støv-emission: 14 mg/m<sup>3</sup>



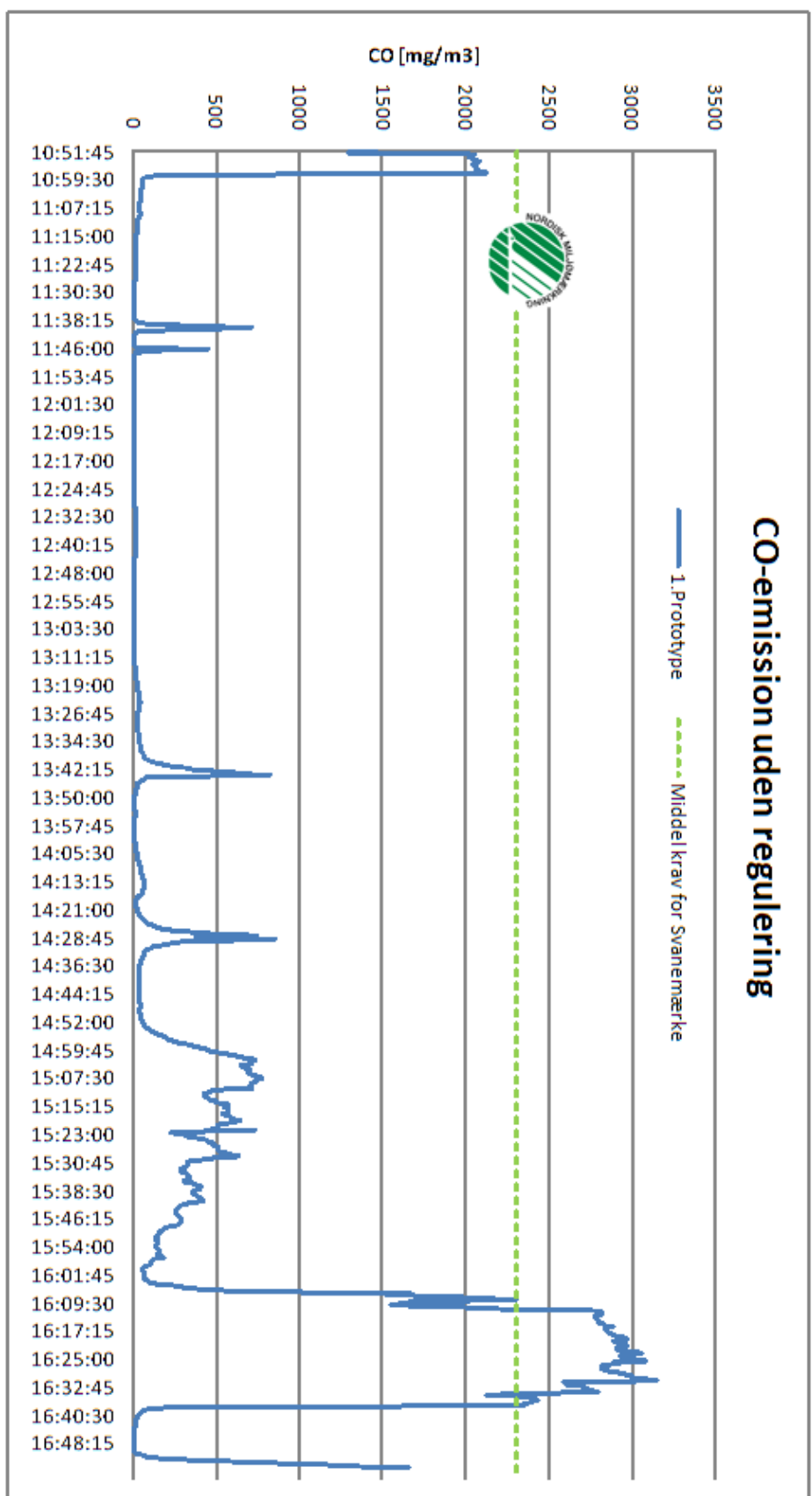
## Solo Innova 50 LC – Trækedel med lambdastyring

Ydelse: 21 - 47 kW  
CO-emission: 791 - 298 mg/m<sup>3</sup>  
NO<sub>x</sub>- emission: 166 mg/m<sup>3</sup>  
OGC-emission 4 mg/m<sup>3</sup>  
Støv-emission: 57 mg/m<sup>3</sup>





# Bilag B



## Resumé

Med grundlag i CFD simulering blev der dannet grundlag for en model af en brændzone til optimal forbrænding af skovtræ. Simuleringen synliggjorde "kolde" områder og u hensigtsmæssige former i brændzonen.

Der blev lavet en prototype som var med til at verificere CFD simuleringens egnethed til optimering af forbrændingen.

Resultaterne lever op til de forventninger der var stillet i projektet. Selv ved lav ydelse var forbrændingen optimal.



Miljøministeriet  
Miljøstyrelsen

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

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