

Projekt nr. 2012 – 01

Titel: NOx reduktion i mellemstore halmkedler

Udført af: Høng Varmeværk, FORCE Technology og Euro Therm A/S

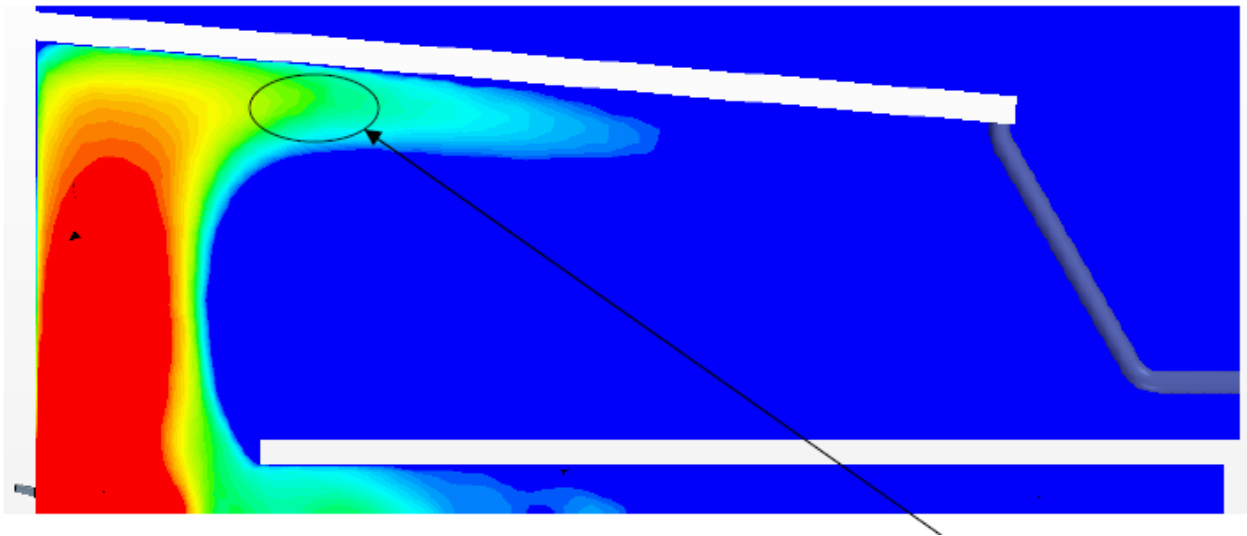
DeNOX anlæg på halmfyret fjernvarmekedel hos Høng Varmeværk

CFD-analyse og temperaturmålinger som grundlag
for Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)



Projekt nr. 2012 – 01

DeNOX anlæg på halmfyret fjernvarmekedel hos Høng Varmeværk



CFD-analyse og temperaturmålinger som grundlag
for Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)

Juni 2013



Forord

Denne rapport beskriver baggrund, gennemførelse og resultater af F&U projekt nr. 2012 - 01: "DeNOX anlæg på halmfyret fjernvarmekedel hos Høng Varmeværk - CFD-analyse og temperaturmålinger som grundlag for Selective Non Catalytic Reduction (SNCR)."

Formålet med rapporten er dels at dokumentere det udførte arbejde over for Dansk Fjernvarmes F&U Fond, og dels at tjene til inspiration for andre, der har interesse for "fjernelse" af NOx i halmfyrede varmeanlæg.

Arbejdet i forbindelse med dette projekt har vist, at det er muligt at skabe en forholdsvis billig DeNOx-løsning ved at indsprøjte urea i fyrboksen. Arbejdet har også vist, at der er en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem mængden af indsprøjtet urea og NOx-indholdet i røggassen.

Projektet er gennemført i perioden efteråret 2012 til sommeren 2013 af medarbejdere fra Høng Varmeværk, FORCE Technology og Euro Therm.

Projektet er delvist finansieret af Dansk Fjernvarmes F&U Fond.

Maj 2013

Henrik Rohde – Høng Varmeværk A.m.b.A
Jan Depenau – Euro Therm A/S

Indholdsfortegnelse

1. Indledning	4
Projektets baggrund	5
Projektets formål	5
Projektets faser	6
2 CFD-model	7
Opbygning af model	7
Beregninger og resultat	8
Temperatur	8
Hastighed	8
Røggas	8
Forslag til placering af SNCR inddysning	9
3 Verificering af CFD-model – måling på halmkedel	11
Beskrivelse af måleudstyr og forsøg	11
Resultat fra 1. forsøg	13
Resultat fra 2. forsøg	15
4 Forsøg med indsprøjtning af urea i halmkedel	17
Beskrivelse af måleudstyr og forsøg	17
Resultat fra 1. forsøg	18
Resultat fra 2. forsøg	18
Resultat fra 3. forsøg	19
Kontrol af ammoniak-emission	21
5 Økonomi	23
6 Konklusion og perspektiver	23

1. Indledning

Biomasse har i årtier været et populært brændstof i produktionen af fjernvarme, og der er ingen tvivl om, at biomassen i fremtiden vil spille en endnu større rolle i vores energiforsyning.

Når biomassen brændes, udvikles der en række affaldsprodukter i form af aske, sod, spildevand og partikler i røggassen. I de senere år er det især elementer af kvælstof i røggas, den såkaldte NOx, der har tiltrukket sig opmærksomhed.

I mange lande er der krav til, hvor stort NOx indholdet i røggassen må være, og mens de store biobrændselsanlæg (>15 MW) ofte har et særligt De-NOx-udstyr, finder man ikke et sådant udstyr på de små og mellemstore anlæg (5 MW < anlæg <15 MW).

For de små og mellemstore anlæg, er det især dem, der fyrer med halm, der kan have problemer, da der er meget store kvalitetsforskelle i den halm, der leveres til fjernvarmeværker, herunder meget varierende kvælstofindhold.

Det er af afgørende betydning både nationalt og internationalt, at der findes en løsning på NOx-emissionsproblemet i forbindelse med afbrænding af halm. I modsat fald kan konsekvensen være, at halm ikke kan anvendes til energiproduktion i små og mellemstore kedler. Dette vil ikke kun have alvorlige konsekvenser for de eksisterende halmværker, men også for samfundet, hvor den store uudnyttede halmressource skal bidrage til omstillingen til et fossilfrit samfund. Et stop for anvendelse af halm til energiproduktion på halmværkerne vil endvidere betyde store problemer for landbruget, da der produceres mere halm, end der er behov for til landbrugs-/jordbrugsformål.

I princippet er der to løsninger: man kan fjerne kvælstof fra halmen, før den brændes, eller man kan reducere kvælstof i forbrændingsprocessen.

Fokus for dette projekt vil være at finde en brugbar måde at reducere NOx-indholdet i forbrændingsprocessen.

Projektets baggrund

Det er en kendt sag, at mange danske halmvarmeværker har vanskeligt ved at overholde grænseværdien for udledning af NOx, der i henhold til luftvejledningen fra de kommunale miljømyndigheder i nye miljøgodkendelser sættes til 300 mg NOx/m³.

NOx-dannelse ved forbrænding består af 3 komponenter:

$$\text{Total mængde NOx} = \text{Termisk NOx} + \text{Brændsel NOx} + \text{Prompt NOx}$$

Termisk NOx dannes ved temperaturer over 1400° C, og erfaringsmæssigt ved man, at den termiske NOx i et moderne kedelanlæg er forsvindende lille, ligesom bidraget fra Prompt NOx-en ikke har nogen reel betydning. Udfordringen ligger derfor i at fjerne brændsels NOx, som er direkte afhængig af den kvælstofmængde, der er bundet i brændslet. Normalt vil 50 % af det kvælstof, der er i halmen, kunne genfindes i røggassen som NOx¹.

Grundlæggende findes der to forskellige metoder til at reducere NOx i røggassen. Selective Non Catalytic Reduction (SNCR), som er kendetegnet ved, at en type af ammoniak (NH₃) doseres direkte ind i kedlen, og Selective Catalytic Reduction (SCR), hvor NH₃ reagerer med NO og danner N₂ over en katalysator.

SCR er en meget dyr løsning og findes derfor kun på større anlæg. Dertil kommer, at SCR på grund af risiko for forurening af katalysator ikke er velegnet til halm. SNCR er mere oplagt til mindre og mellemstore anlæg, men endnu er det ikke lykkedes nogen² at styre processen (mængde af NH₃ kombineret med rigtig temperatur), således en acceptabel effekt opnås.

Projektets formål

Formålet med dette projekt er at undersøge muligheden for at reducere NOx-emissionen fra en halmkedel ved indsprøjtning af en vandig opløsning af ammoniak,

¹ Forbrænding - teori og praksis, bind 1, 2. udgave, Kap 3, s56, POLYTEKNISK FORLAG

² Euro Therm A/S har tidligere deltaget i en række DeNOx forsøg på Galten Fjernvarmes Fliskedel. Forsøgene viste, at det var muligt at reducere mængden af NOx, men at temperaturforholdene ved indsprøjtningsspunktet i kedlen ændrede sig så meget ved forskellig last og variation af brændselets konsistens, at det ikke var muligt at fastholde en acceptabel NOx-reduktion over et større tidsrum.

urea eller evt. andet egnet reagens direkte i forbrændingen og samtidig bestemme sammenhængen mellem den indsprøjtede mængde og NOx-reduktionen.

Projektets faser

Fase 1. Opbygning af model

Fase 2. Tilpasning af kedlen ift. måleudstyr

Fase 3. Verificering af model (og evt. tilretning)

Fase 4. Tilpasning af kedlen ift. dyselanseplacering.

Fase 5. Forsøg med indsprøjtning af en vandig opløsning direkte i forbrændingen.

2 CFD-model

Med udgangspunkt i Høng Varmeværks halmkedel har FORCE opbygget en CFD-model, der afdækker flow og temperaturforhold i kedlen. På baggrund af simuleringer/beregninger med CFD-modellen, er der identificeret et optimalt område for indsætning af doseringsdyser.

Opbygning af model

På grundlag af detailtegninger af kedlen, oplysninger om driftsforhold og brændslets sammensætning har FORCE gennemført en CFD-beregning. Der er således opbygget et beregningsnet for analyse af strømnings- og temperaturforholdene bestående af et passende antal beregningsceller, som opløser alle geometriske detaljer, der forventes at have betydning for strømnings- og temperaturforholdene samt forbrændingsprocesserne. Følgende fysiske modeller/forhold er medtaget i CFD-beregningen:

1. Turbulent strømning.
2. Temperaturfelt.
3. Forbrændingsprocesser (herunder forbrænding på rist, udbrænding af faststofpartikler).
4. Stråling.
5. Varmeoptag i hedeflader.
6. Emissioner: CO, CO₂, O₂, H₂O.

Til modellering af forbrændingsprocesserne på risten er der anvendt en såkaldt bed-model udviklet af FORCE Technology. Via bed-modellen modelleres processerne i halmlaget, dvs. fordampning, forgasning, forbrænding og partikelemission. Bed-modellen er koblet med CFD-beregningen, således at temperatur af halmlaget samt koncentration af gasser fra bed-modellen anvendes som input til CFD-modellen, mens strålingsoutput fra CFD-beregningen anvendes som input i bedmodellen.

CFD-beregningen er tunet i forhold til eksisterende driftsdata (varmeoptag).

Beregninger og resultat

Den efterfølgende baselineberegning har givet detaljeret viden om flow og temperaturforhold i hele den modellerede geometri. Derudover er fordelingen af kemiske specier (O₂, H₂O, CO₂, CO) også afdækket.

Endvidere er der defineret en række relevante snit, hvor der er lavet en række (vektor og kontur-) plots af ovenstående. Hermed giver beregningen et godt udgangspunkt for at få et overblik over forbrændingsforholdene i kedlen.

Temperatur

Resultatet af baselineberegningen viser et relativt varierende temperaturfelt i de områder, hvor det temperaturmæssigt vil være passende at indsætte SNCR-dyser med henblik på at reducere NO_x-udledningen. Som forventet optræder temperaturerne ca. 900–950°C i trækket efter vendingen fra fyrboksen, hvor også den eksisterende temperaturmåler er placeret.

Hastighed

Vektorplot af hastighedsfeltet viser, at der forekommer en større recirkulationszone efter vendingen til første træk. Hvirvlen er med til at give et meget varieret temperaturfelt i trækket. På den ene side er dette uønsket, da ensartede forhold for SNCR-inddysningen ofte er hensigtsmæssigt, på den anden side skaber hvirvlen også gunstigt forhold for opblanding af ammoniak i forbindelse med SNCR.

Røggas

Røggasmængde og forskellige beregnede værdier i røggassen er angivet i Tabel 1.

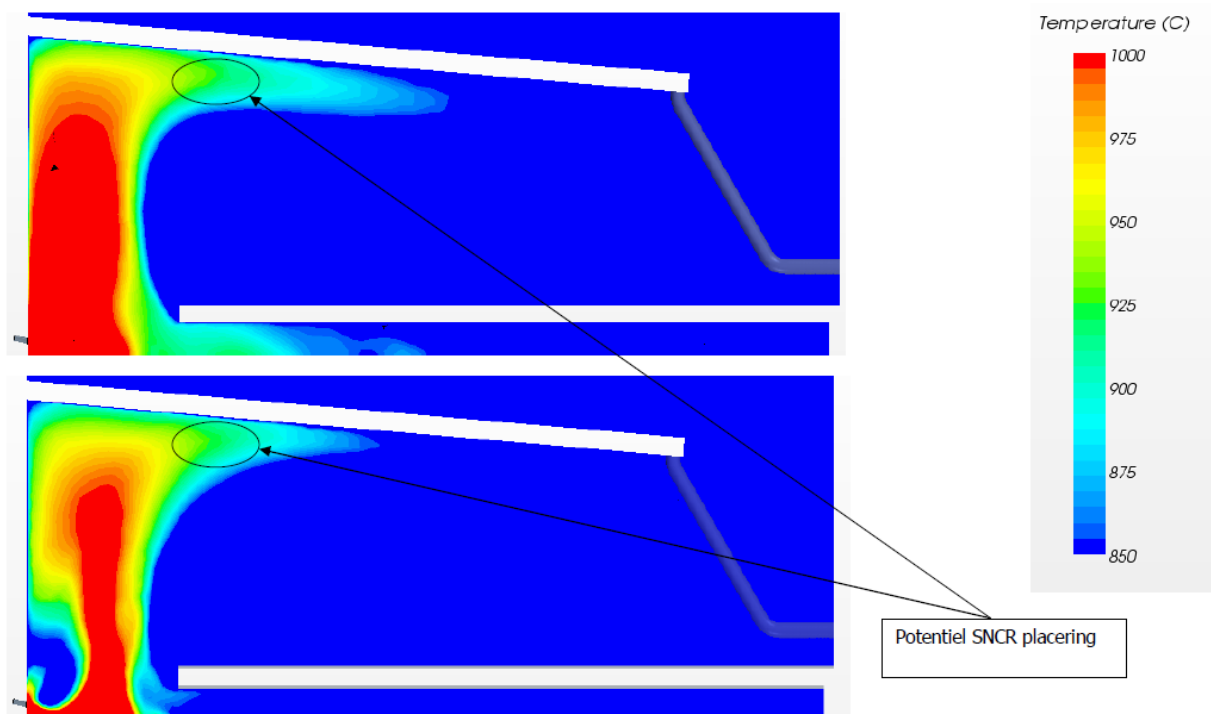
	Enhed	Værdi	Oplyst af Høng
Røggasmængde	Nm ³ /h	13300	
Røggastemperatur	°C	340	Omtrent 340
Vandindhold	vol%	10.4	9
O ₂	vol% tør	8.3	7.1
CO ₂	vol% tør	13.1	13

Tabel 1. Røggasværdier

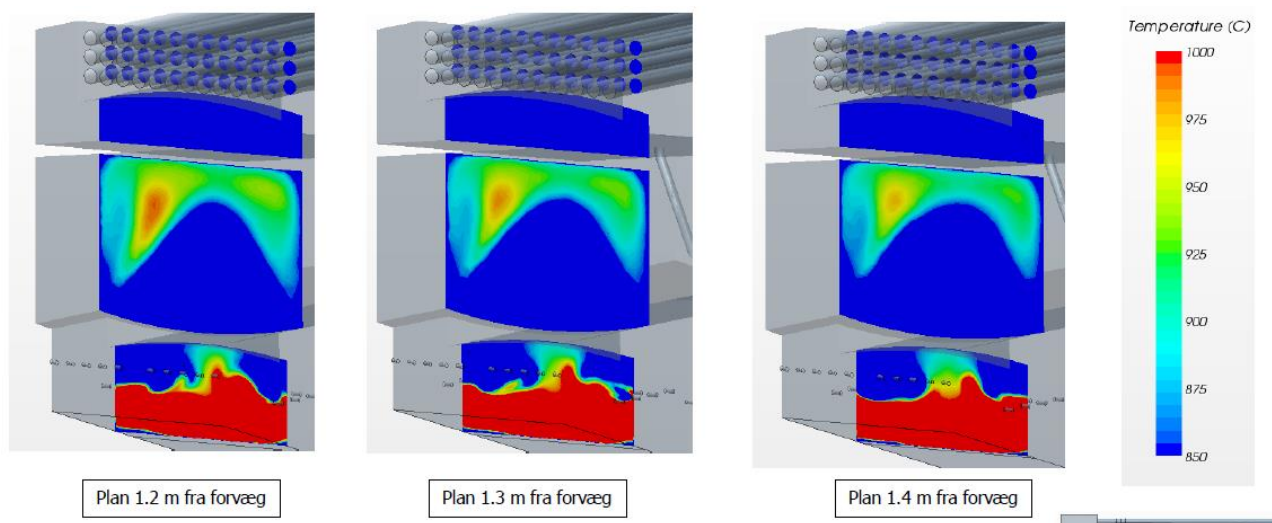
Det ses, at udløbstemperaturen passer omtrent med middelværdien af målinger fra tidligere på ca. 340°C. Indhold af ilt, vand og kuldioxid passer overens inden for ca. 1 procentpoint.

Forslag til placering af SNCR inddysning

På baggrund af beregningerne i CFD-modellen vil det være mest hensigtsmæssigt at placere SNCR inddysninger i den øvre del af 1. træk, uden for recirkulationszonen, som det er vist på figur 1 og 2.



Figur 1. Temperaturprofil i centerplan (øverst) og kvartplan (nederst).



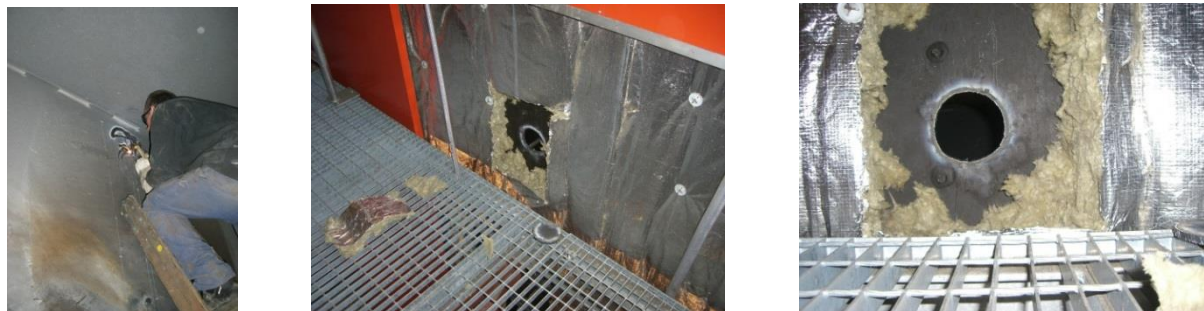
Figur 2. Temperaturprofiler i lodrette planer 1.2m, 1.3m og 1.4 m fra forvæggen.

Potentiel SNCR placering i de grønne områder omkring 925°C.

På disse figurer er temperaturskalaen begrænset, således at temperaturer under 800 og over 1000° C er markeret blå hhv. rødt. Det optimale område for SNCR inddysning ved ca. 900–950° C er forholdsvis smalt, og det bemærkes, at temperaturfeltet varierer en del hen over kanaltværsnittet. Figur 2 viser temperaturfeltet i lodrette planer 1.2, 1.3 og 1.4 m fra forvæggen. Det bemærkes, at flowet ikke er helt symmetrisk omkring centeraksen. En del af dette skyldes, at der er tidlige effekter i flowet (for eksempel hvirvelafkast), som på trods af, at der søges en stationær løsning, vil vise sig som mindre lokale svingninger i flow- og temperaturfeltet.

3 Verificering af CFD-model – måling på halmkedel

På baggrund af CFD-modellens resultater blev kedlen udstyret med en ”gennemføring, der tillader indsætning af måleudstyr. På figur 3 er vist et billede af gennemføringen.



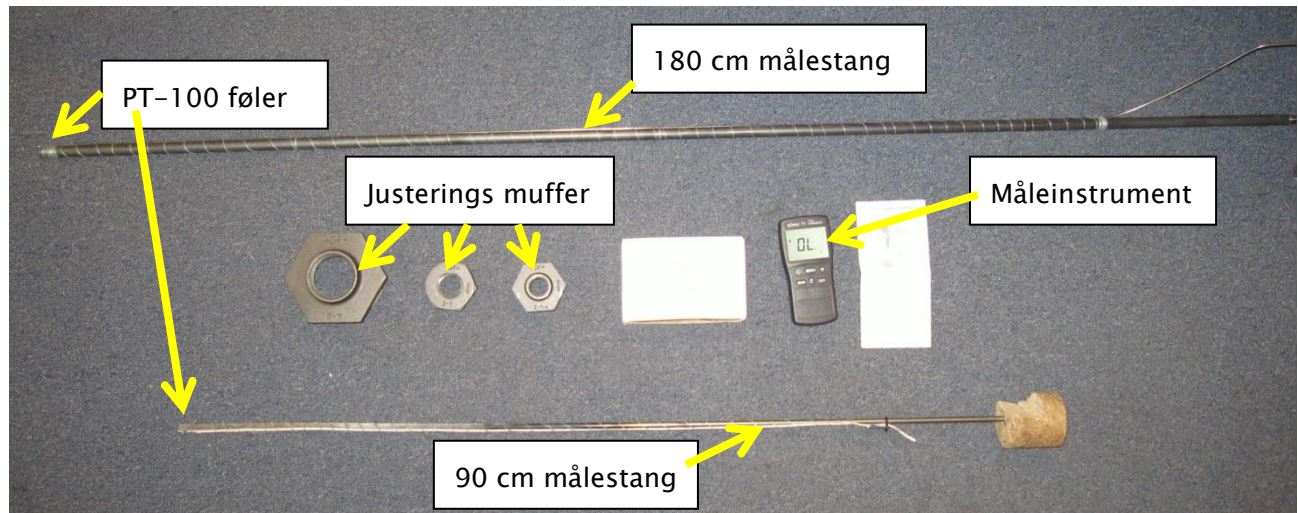
Figur 3. Billede af kedelgennemføringen til måling af kedeltemperaturer.

Der blev herefter gennemført 2 måleserier, hvor temperaturforholdene i kedlen omkring det område, CFD-modellen havde udpeget som optimal for SNCR-inddysning, blev undersøgt.

Beskrivelse af måleudstyr og forsøg

Måling af temperaturforhold i en kedel er ikke nogen trivial sag på grund af de høje temperaturer og meget fluktuerende forhold. Dansk Fjernvarmes F&U kontors projekt nr. 2001-01 ”Fyrbokstemperatur i halmkedel” – afdækker netop disse forhold, bl.a. undersøges kvaliteten af målinger foretaget med henholdsvis IR-føler og PT-100 føler.

Selvom en IR-føler uden tvivl er den mest nøjagtige føler og i stand til at fange de hurtigt fluktuerende temperaturudsving, har vi under hensyntagen til projektets rammer valgt at benytte en PT-100 føler. PT-100 føleren giver en passende fleksibilitet mht. at nå forskellige målepunkter, og samtidig vurderer vi, at den giver tilstrækkelig præcise måleresultater til vores behov. På figur 4 er vist det måleudstyr, som blev benyttet ved forsøgene i Høng.



Figur 4. Måleudstyr benyttet ved forsøgene i Høng.

Selve forsøgene blev gennemført ved at indføre den 180 cm lange målestang ind igennem kedelgennemføringen og variere længden af indføringen samt vinklen af målestangen i både horisontal og vertikal retning. Billedet på figur 5 illustrerer disse forhold.



Figur 5. Måling af temperaturen i Høng Varmeværks halmkedel.

Ved hver måling blev målestangen placeret i det ønskede punkt, og efter ca. 30 sekunders ophold i målepunkter blev målestangen taget ud igen for at afkøle. I løbet af de 30 sekunder blev henholdsvis minimum og maximum temperaturen aflæst, samt den temperatur der var mest repræsentativ.

Resultat fra 1. forsøg

Målingerne fra det første forsøg er vist i tabel 2.

Må- ling	y-retning (vertical) (grader)	x-retning (horizontalt) (grader)	y-retning (m)	x-retning (m)	z-retning (dybde) (m)	Tempe- ratur (°C)	Delta T under måling
1	0	0	0	0	1,1	900	
2	0	0	0	0	1,1	730	
3	0	0	0	0	1,1	810	780-810
4	0	5	0	0,095871317	1,1	790	
5	0	10	0	0,191012995	1,1	910	820-915
6	0	15	0	0,28470095	1,1	950	870-900
7	0	0	0	0	1,1	895	870-900
8	5	0	0,095871317	0	1,1	700	700-750
9	-5	0	-0,095871317	0	1,1	750	
10	0	-10	0	-0,191013	1,1	900	
11	0	-10	0	-0,191013	1,1	760	
12	0	0	0	0	0,6	700	650-750
13	0	5	0	0,052293446	0,6	800	
14	0	10	0	0,104188907	0,6	835	
15	0	-10	0	-0,10418891	0,6	880	
16	5	0	0,052293446	0	0,6	695	
17	5	0	0,052293446	0	0,6	850	
18	-5	0	-0,052293446	0	0,6	720	
19	0	0	0	0	1,2	940*	
20	0	10	0	0,208377813	1,2	910*	
21	0	-10	0	-0,20837781	1,2	960*	

* Disse målinger blev alle udført indenfor ca. 15 s

Tabel 2. Målingerne fra det 1. forsøg i Høng d. 10-12-2012.

Som det fremgår af tabellen, er der meget store svingninger i målingerne, hvilket heller ikke er overraskende i forhold til de store temperaturgradienter, CDF-modellen forudsagde. Spørgsmålet er imidlertid, om målingerne er præcise nok til at være brugbare. Helhedsindtrykket af temperaturmålingerne er imidlertid, at der er god overensstemmelse med CFD-modellen, blot er der en tendens af en forskydning af temperaturen på ca. 100° C.

En temperaturforskydning af denne størrelse kan efter vores opfattelse skyldes 3 ting:

1. Usikre målinger
2. For lav kedellast i forhold til de data der blev brugt ved CFD-modelleringen
3. Målestudsen er ikke placeret korrekt

Ad 1. De usikre målinger kan vi ikke gøre noget ved. Hvis en af de andre forklaringer viser sig at være rigtige, er usikkerheden i sig selv ikke et problem.

Ad 2. Driftsparametrene ved forsøget:

- Kedel: 6.68 MW
- Vasker: 0.55 MW
- Total: 7.24 MW
- Temperatur inden konvektionsdel (outlet – CFD): 345.5 °C
- Brændsel: 550kg/17min = 0.539kg/s

Effekten af anlægget var således ca. 10 % under de 8.1 MW, der blev anvendt ved CFD simuleringen.

Dette vil naturligvis medføre en temperaturforskel mellem det målte og modellen. Hvis det antages, at Cp-værdien for røggassen er konstant som overslagsregning (det er den ikke), bør temperaturen for CFD beregningerne også være ca. 10 % lavere, eller ca. 80–100 grader i vores tilfælde.

Tager man dette i betragtning, passer målingerne noget bedre med CFD-beregningerne.

- Ad 3. Ser man på de målinger, hvor $z=1,1$, opnås de højeste temperaturer, når føleren drejes mod kedlens frontvæg ($x>0$). Når føleren er i intervallet $x=0$ og $x<0$ ($z=1,1$), sker der ikke nogen ændring. Dette passer egentlig fint med CFD-modellen på figur 1, blot med den detalje, at såfremt vi har fat i de rigtige temperaturer, vil det svare til, at føleren var placeret ca. 40–50 cm længere væk fra kedlens frontvæg ($x=-40$).

For at afgøre i hvilken af de 3 ovenstående situationer vi stod i, blev det besluttet at gennemføre endnu en måleserie, hvor kedlens last blev kørt op på niveau med forudsætningen for CFD-beregningerne. Opgaven gik denne gang ud på at foretage nogle kontrolmålinger, til sammenligning med forsøg 1, samt at bestemme positionen af det område, hvor temperaturen er ca. 1000° C.

Resultat fra 2. forsøg

Målinger ved dette forsøg blev foretaget med samme måleudstyr, som ved det første forsøg. De 10 første målinger tjente som kontrolmålinger, hvorimod de sidste 5 målinger blev foretaget med en "bøjet" målepind. Ideen med den bøjede målepind var at komme tættere på kedlens frontvæg og dermed det område, hvor de højeste temperaturer forventes at befinde sig.

Forsøget blev gennemført d. 31. januar 2013 af Jørgen Larsen og Henrik Rohde fra Høng Varmeværk, med en kedellast der svarede til den, der dannede grundlaget for CFD-modellen. Målingerne fra dette forsøg er vist i tabel 3.

Må- ling	y-retning (vertikal) (grader)	x-retning (horisontalt) (grader)	y-retning (m)	x-retning (m)	z-retning (dybde) (m)	Tempe- ratur (°C)	Delta T under måling
1	0	0	0	0	1,2	820	
2	0	10	0	0,20837781	1,2	815	
3	0	-10	0	-0,208377813	1,2	960	
4	0	0	0	0	1,2	820	
5	0	0	0	0	1,2	780	
6	0	0	0	0	1,2	965	
7	0	0	0	0	1,2	980	
8	0	10	0	0,208377813	1,2	910	
9	0	10	0	0,208377813	1,2	950	
10	0	10	0	0,208377813	1,2	950	
11	Bøjet*	0	0			975	
12	Bøjet*	0	0			980	
13	Bøjet*	0	0			1005	
14	Bøjet*	0	0			945	
15	Bøjet*	0	0			980	

*Målepinden bøjet til forskydning på 40 cm i x-retning

Tabel 3. Målingerne fra det 2. forsøg i Høng d. 31-01-2013.

Sammenlignes de 10 første målinger med de tilsvarende målinger fra 1. forsøgsrunde, kan der generelt konstateres højere temperaturer. Der ses også en bedre overensstemmelse mellem de nye måleresultater og CFD-modellen. Forklaringen herpå mener vi er, at forsøgene denne gang er udført ved tæt på fuld last, hvilket

også gælder for CFD-modellen. Vores overvejelser om årsagen til de lavere temperaturer i forbindelse med forsøg 1 kan således tilskrives for lav kedellast (situation 2).

Der ses fortsat stor variation ved gentagne målinger i samme punkt, men dette passer med, at målepunkterne, ifølge CFD beregningerne, befinder sig i et meget turbulent område med store gradienter.

De målinger, der er foretaget med bøjet målepind, således at målepunktet er flyttet ca. 40 cm. længere mod forvæggen, viser som ventet ud fra CFD-modellen en højere temperatur – i gennemsnit omkring ca. 975C.

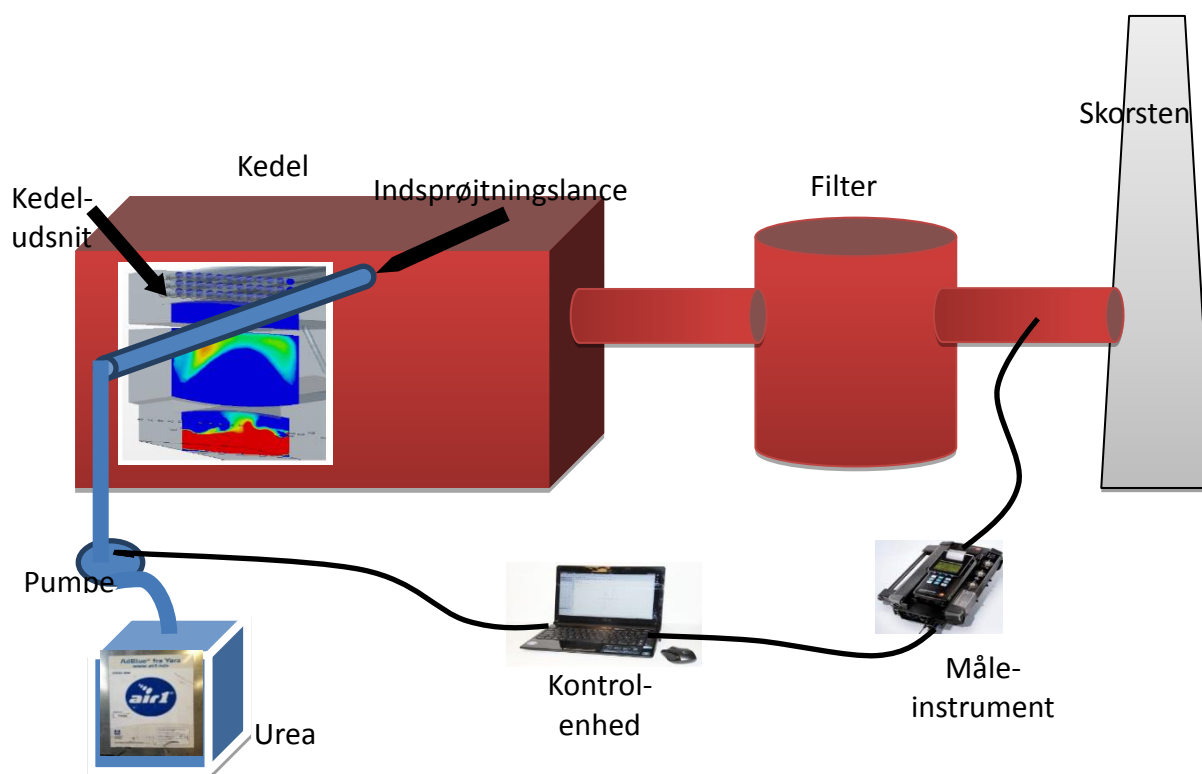
Baseret på disse målinger mener vi, at der er opnået god overensstemmelse med CFD-beregningen, og at det er lykkedes at bestemme et fornuftigt inddysningssted. Vi mener således ikke, at der på baggrund af de foreliggende måledata er grund til at ændre i modellen.

4 Forsøg med indsprøjtning af urea i halmkedel

Med modellen på plads var vejen for forsøg med indsprøjtning af urea banet, idet målegennemføringen umiddelbart kunne benyttes som inddysningssted.

Beskrivelse af måleudstyr og forsøg

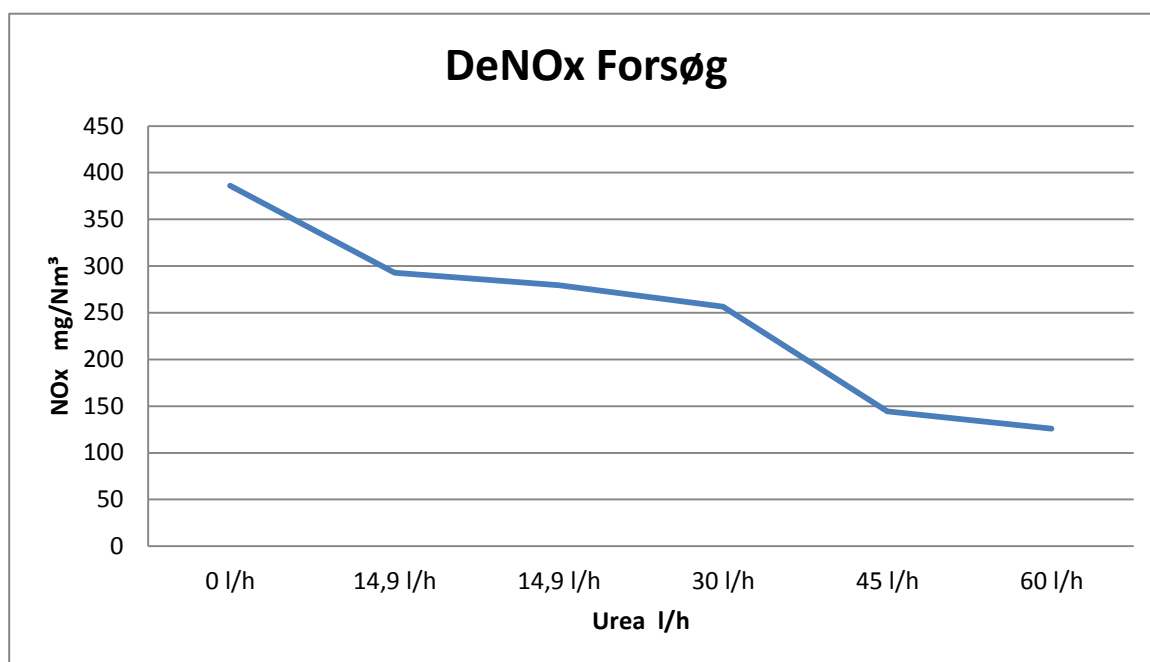
På figur 6 er vist en skitse af den måleopstilling, der blev benyttet ved forsøgene med indsprøjtning af urea i kedelens fyrboks. Alle forsøg blev gennemført ved, at der i et vist tidsinterval blev indsprøjtet en bestemt mængde urea, samtidig med at NO_x-en i røggassen blev målt. Ved indgangen til næste tidsinterval blev doseringsmængden forøget. Denne procedure fortsatte, indtil pumpens maksimale pumpeevne på 60 l/h blev nået.



Figur 6. Skitse af måleopstilling til forsøg med indsprøjtning af urea i kedelens fyrboks

Resultat fra 1. forsøg

Målet med forsøg nr. 1 var at få en generel fornemmelse af ureaens virkning, dvs. reaktionstid, virkningsmængde og evt. mætningsmængde. Forsøget blev gennemført med et tidsinterval på ca. 10 minutter i hver doseringsperiode. Resultatet er vist på figur 7.

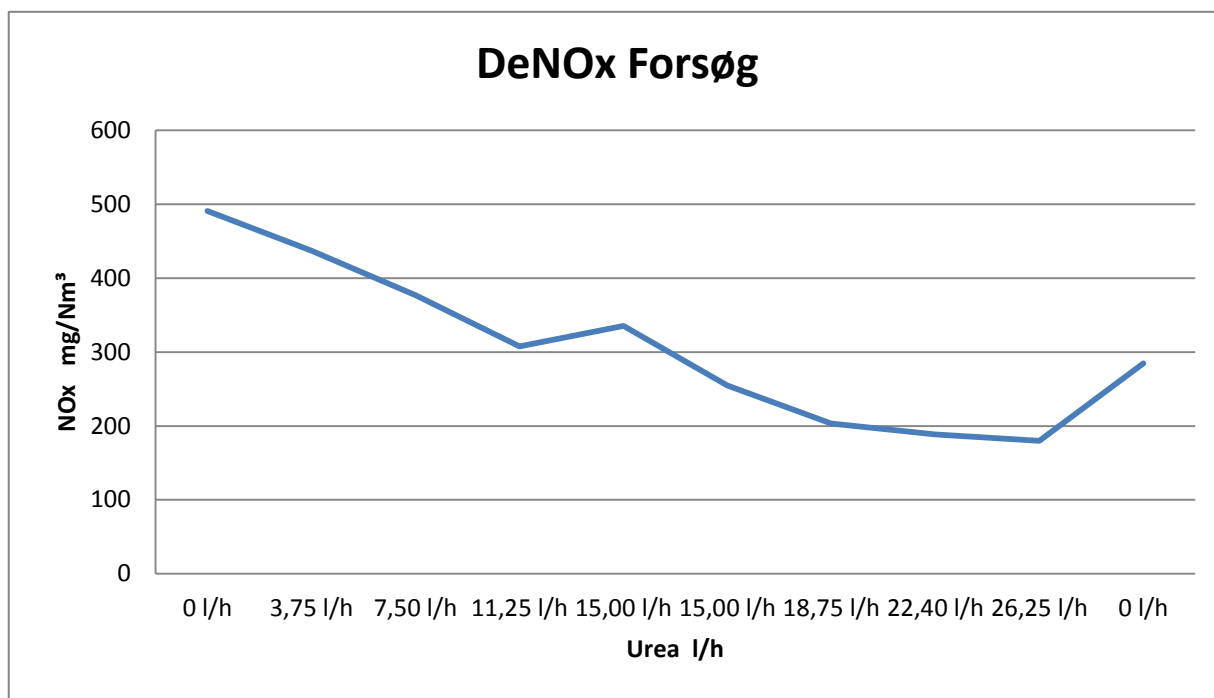


Figur 7. Sammenhængen mellem urea-mængden og NO_x i røggassen ved forsøg 1

Af figuren fremgår det, at der indtræffer en virkning allerede mellem 0 og 14,9 l/h. Det ses også, at kurven flader ud efter 45 l/h. Under forsøget observerede vi ved forhøjelsen af doseringsmængden, at reaktionen indtraf i løbet af få sekunder.

Resultat fra 2. forsøg

Målet med forsøg nr. 2 var at få en nærmere ide om ureaens virkningsmængde og i særdeleshed, hvilken mængde der skulle til for at bringe røggassen fra den halm, der blev anvendt ved forsøget ned under miljøkravet på 300 mg/Nm³ NO_x. Resultatet er vist på figur 8.



Figur 8. Sammenhængen mellem urea-mængden og NOx i røggassen ved forsøg 2

Overordnet ses der en nærmest lineær sammenhæng mellem mængden af urea og NOx i røggassen. Den "underlige" stigning, der sker fra 11,25 l/h til 15,00 l/h, skyldes, at doseringsslangen ved indgangen til indsprøjtningssdyserne blev utæt. Efter denne blev tætnet, fortsatte kurvens pænt faldende tendens, for til sidst at flade ud.

Af kurven fremgår det endvidere, at man ved at dosere mellem 11,25 l/h til 15,00 opnår en tilpas reduktion af NOx-en til at overholde miljøkravene.

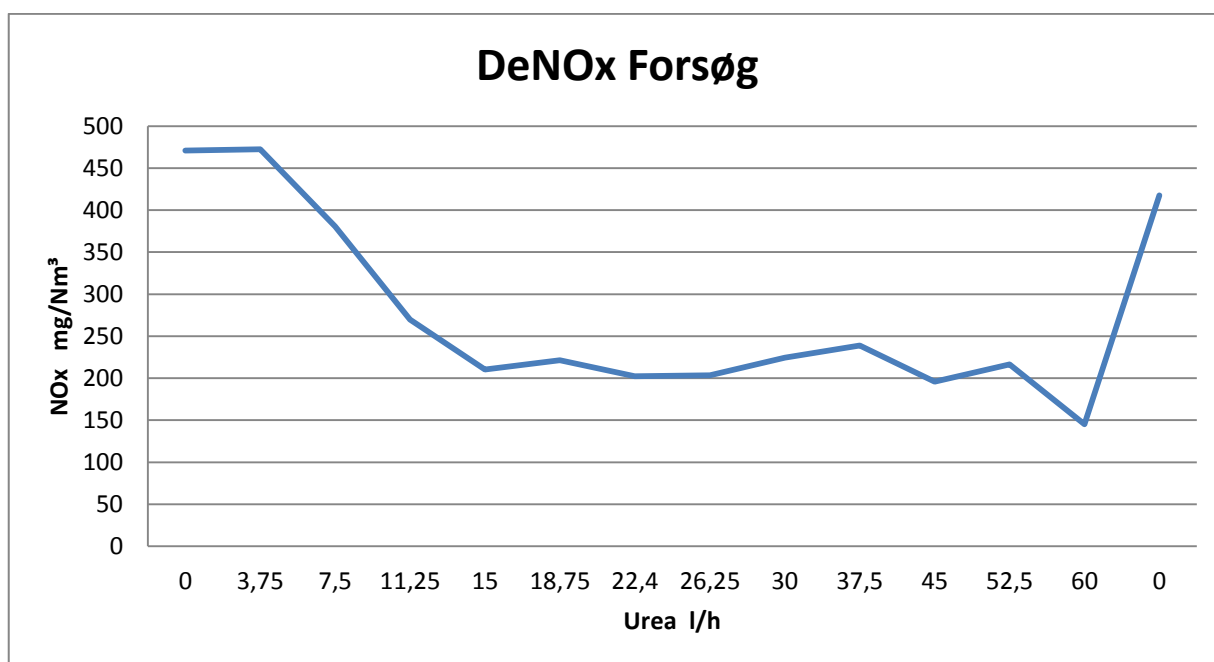
Resultat fra 3. forsøg

Målet med forsøg nr. 3 var, baseret på erfaringerne fra forsøg 1 og 2, at få en præcis måling af ureaens virkning mht. virkningsmængde og evt. mætningsmængde, samt undersøge mængden af ammoniak (NH₃) i røggassen. FORCE Technology havde ved denne lejlighed koblet deres testudstyr til røgkanalen ved skorstenen for dels at måle ammoniakken og som en ekstra validering af NOx-målingerne. På figur 9 er vist et billede af FORCEs testudstyr.



Figur 9. FORCEs testudstyr til måling af røggassen

Selve forsøget blev gennemført med et tidsinterval på ca. 5 minutter i hver doseringsperiode. Sammenhængen mellem mængden af urea og NOx i røggassen fremgår af figur 10.



Figur 10. Sammenhængen mellem urea-mængden og NOx i røggassen ved forsøg 3

Resultatet af det 3. forsøg er meget interessant. For det første viser kurven, at der skal en vis mængde urea (virkningsmængde) til, før det giver sig udslag i en NOx reduktion. Virkningsmængden er i dette tilfælde ca. 3,75 l/h. Dernæst ses en næsten lineær aftagende NOx mængde som funktion af urea i intervallet fra 3,75 l/h til 15,00 l/h. Det bemærkes endvidere, at miljølovens krav til NOx udledning på 300 mg/Nm³ opnås ved indsprøjtning af ca. 11 l/h. Forløbet i intervaller fra 15,00 l/h til 52,50 l/h er noget særpræget, idet der ikke ses nogen særlig effekt af at forøge urea-mængden, tværtimod kan man se at NOx indholdet vokser lidt i visse punkter. Årsagen til disse variationer er vi ikke helt sikre på, men en mulig forklaring er den naturlige variation, der er i kedeldriften og det indfyrede halm. Hvis dette er tilfældet, har vi således en mætningsmængde på ca. 15 l/h.

Kontrol af ammoniak-emission

I forbindelse med 3. forsøg blev der, som nævnt ovenfor, også foretaget måling af ammoniak-emission. Resultatet fremgår af tabel 4 og viser bl.a., at den højest målte ammoniak-emission på 1,3 mg/m³ ligger langt under den gældende luftvejledningskrav på 500 mg/m³. Det er dog vores opfattelse at de 500 mg/m³ ikke anses at være særlig relevant i denne sammenhæng, idet en realistisk vurdering er, at de

kommunale miljømyndigheder vil stille krav om en emissionsgrænseværdi for ammoniak på 10 mg/m³. Dette giver dog stadig en stor margen i forhold til det målte.

Parameter	Enhed	Måling 1	Måling 2	Måling 3	Middel	Miljøkrav *
Dato	dd-mm-åå	15.04.2013	15.04.2013	15.04.2013	15.04.2013	-
Måleperiode	tt:mm	13:46 - 14:06	14:12 - 14:33	14:37 - 14:59	13:46 - 14:59	-
Koncentrationer						
CO	mg/m ³ (n,t)	100	270	170	180	-
CO	mg/m ³ (ref)	90	250	140	160	625
NO _x (NO ₂)	mg/m ³ (n,t)	390	200	220	270	-
NO _x (NO ₂)	mg/m ³ (ref)	340	180	180	230	300
NH ₃	mg/m ³ (n,t)	0,35	0,67	1,3	0,77	-
NH ₃	mg/m ³ (ref)	0,31	0,62	1,0	0,66	-
(ref) angiver tør røggas ved normaltilstanden (0°C, 101,3 kPa) og 10 % ilt						

Tabel 4. Måleresultater fra FORCE viser emissionsmåling af CO, NO_x og NH₃

Ammoniak-emission som følge af DeNO_x processen vurderes derfor ikke umiddelbart at medføre yderligere problemer i forhold til overholdelse af grænseværdier.

5 Økonomi

Ud fra projektets erfaringer vurderes det, at et anlæg til inddosering af ammoniakopløsning, lig det som er blevet anvendt i Høng, vil kunne etableres for ca. DKK 300.000. Hertil kommer omkostning til måleudstyr.

Driftsomkostningerne vil hovedsageligt kunne henføres til den anvendte reagens, samt vedligeholdelse af indsprøjtningssdyser og lanse. Den ved forsøget anvendte AddBlue koster pt. ca. 3.50 kr. pr. liter. Driftsomkostninger vurderes at ligge på 6 – 7 kr. pr. MWh for en kedel på 7,5 MW som den i Høng.

6 Konklusion og perspektiver

Den overordnede konklusion på arbejdet udført i dette projekt er, at det er lykkedes vha. af en CFD model at udpege et brugbart inddysningspunkt og efterfølgende dosere en passende mængde urea ind i kedlens fyrboks, således at NOx indholdet i kedlens røggas bringes et godt stykke under de 300 mg/Nm³, som miljøloven kræver.

Hvorvidt resultaterne fra dette projekt direkte kan overføres på andre typer kedler er tvivlsomt, men vi tror på, at fremgangsmåden med fordel vil kunne anvendes af andre.

Det er vores generelle opfattelse, at man med den måleopstilling, vi har benyttet i dette projekt, vil kunne skabe en relativ billig DeNOx løsning for mange mindre og mellemstore danske fjernvarmewærker, som vil kunne sikre overholdelse af emissionsgrænseværdier ved fyring med almindelige halmtyper, uanset de store variationer i halmens kvælstofindhold.

Der er naturligvis en række udfordringer og problemer, som endnu ikke er løst eller afdækket, f.eks.:

- Hvorledes skal dyserne udformes og placeres for at opnå optimal effekt (minimal forbrug af urea)
- Hvad er langtidseffekten af at indsprøjte en vandig opløsning fyrboksen

Konkret er der i Høng skabt en brugbar DeNOx løsning, og det er Høng Varmeværk og Euro Therms intention at arbejde videre med løsninger, for dels at forbedre anlæggets performance og dels at hente driftsmæssige erfaringer.