

# Reduktion af luftforurening fra gasmotoranlæg

- Effektivitet af RECCAT-systemet

Niels Bjarne Rasmussen

RECCAT ApS

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.

# Indhold

FORORD	5
SAMMENFATNING OG KONKLUSIONER	7
SUMMARY AND CONCLUSIONS	9
1 BAGGRUND	11
2 PROJEKTETS FORMÅL	13
3 PROJEKTINDHOLD	15
4 FORSØGSPLANLÆGNING	17
4.1 RECCAT-ANLÆGGET HOS RMV	17
4.2 FORSØGSPLAN	17
5 RESULTATER	19
5.1 PROJEKTFORLØBET	19
5.2 MÅLINGER	19
5.2.1 <i>Formaldehyd, CO, lugt og smøreolie</i>	<b>20</b>
5.2.2 <i>Uforbrændte kulbrinter, UHC</i>	<b>20</b>
5.3 BEREGNINGSPROGRAM	24
5.4 ØKONOMIBEREGNINGER, PRIS FOR ANLÆG	27
6 DISKUSSION	31

## Bilag A

### Emissionsmålinger foretaget 4 dage

- 07-08-2007
- 13-08-2007
- 21-08-2007
- 27-08-2007

## Bilag B

### Emissionsmålinger foretaget

- 03-09-2007



# Forord

Dette projekt blev gennemført i samarbejde med Rask Mølle Varmeværk (RMV), Dansk Gasteknisk Center (DGC) samt NIRAS. DGC udførte målingerne hos RMV i samarbejde med RECCAT, og NIRAS har udført økonomiberegninger i et sideløbende projekt. NIRAS har desuden det overordnede ansvar for kontrolmålinger samt efterfølgende potentiale vurdering.

Projektet blev støttet af Miljøstyrelsen under Virksomhedsordningen 2006.

De deltagende parter samt Miljøstyrelsen takkes for et godt samarbejde under projektets gennemførelse.

RECCAT ApS  
Hørsholm, april 2008.



# Sammenfatning og konklusioner

Der er et betydeligt udslip på gasmotoranlæg af uforbrændt naturgas (UHC). Hovedparten heraf er metan, som er en kraftig drivhusgas. RECCAT er et nyudviklet miljøanlæg, som kan fjerne uforbrændt naturgas fra motorens røggas.

Foreløbige økonomiske beregninger tyder på, at der kan være samfundsøkonomiske fordele ved indførelsen af anlæg, der reducerer udledningen af UHC fra gasmotoranlæg af en vis størrelse.

RECCAT ApS fik en bevilling til gennemførelse af dette projekt under Virksomhedsordningen 2006.

Formålet med projektet har været at eftervise RECCAT-systemets effektivitet på et kraftvarmeværk (KV-værk). RECCAT renser for de organiske stoffer UHC, CO, FA (formaldehyd), lugt og smøreolie. Det er projektets formål at vise hvor høj en rensningsgrad, der kan opnås.

Målgruppen for produktet er først og fremmest KV-værker, som har naturgasfyrede (eller biogasfyrede) motorer. Målgruppen for projektet er Miljøstyrelsen og beslutningstagere, som skal afgøre, om der skal iværksættes initiativer til at sikre ækvivalent CO<sub>2</sub>-reduktion.

Følgende punkter er gennemført i projektet.

- Måling af UHC-, CO-, FA-, og lugt-reduktion på et værk med RECCAT-anlæg installeret.
- Afprøvning af RECCAT-systemet med tilsatsfyring med naturgas i små mængder (fra 0 til ca. 3%) for at finde den optimale tilsætning.
- Et beregningsprogram er opbygget (regneark), som kan omregne resultaterne i dette projekt til optimale reaktorer i kommende projekter.
- Baseret på resultaterne i dette projekt og tidligere er der fundet estimerede priser på RECCAT-installationer på typiske KV-værker.

Projektet blev gennemført i samarbejde med Rask Mølle Varmeværk (RMV), Dansk Gasteknisk Center (DGC) samt NIRAS. DGC udførte målingerne hos RMV i samarbejde med RECCAT, og NIRAS har udført økonomiberegninger i et sideløbende projekt. NIRAS har desuden det overordnede ansvar for kontrolmålinger samt efterfølgende potentialevurdering.

Målingerne blev gennemført efter planen i august/september 2007. Hele projektet blev gennemført inden for tidsplanen.

Før målingernes start havde katalysatoren været i drift i ca. 5400 timer.

Følgende konklusioner kan udledes af projektet:

- Ved emissionsmålingerne blev der målt rensningsgrader for UHC mellem 73 og 98%.
- Der blev målt rensningsgrader for CO over 99%.
- Der blev målt rensningsgrader for formaldehyd på ca. 95%.
- Der blev målt rensningsgrader for lugt mellem 58 og 85%.
- Der skete en betydelig reduktion i smøreolieemissionen.
- Set over alle målinger er der opnået reaktoreffektiviteter for UHC på mellem 40 og 98% afhængigt af driftslast og gastilsætning.
- På anlægget i Rask Mølle fås ved 100% last det mindste gastab (emissioner) med en bypass gasmængde på ca. 2,9-3,0%. (Dette svarer til en ventilindstilling i bypass på 4-5).
- Motoren i Rask Mølle har en emission af UHC før RECCAT, som er kraftigt afhængig af driftslasten.
- Af hensyn til katalysatormaterialet skal temperaturen i reaktorerne holdes under ca. 620°C. Ved driftslast under 70% skal der lukkes for bypass-gassen.
- Reaktoreffektiviteten for UHC afhænger kraftigt af toptemperaturen i reaktorerne og i mindre grad af driftslasten.
- For nye anlæg skal reaktorerne forøges med ca. 40% i størrelse.
- For nye anlæg skal toptemperaturen i reaktorerne være over 600°C, hvis den samme type katalysatormateriale anvendes. Dette opnås ved, at den forøgede størrelse sker i længderetningen, så varmevekslingen i reaktorerne forbedres.
- For nye reaktorer kan en blivende effektivitet for UHC-rensning på over 90% opnås med ca. 40% længere reaktorer og samme type katalysatormateriale, bortset fra at pelletstørrelsen skal forøges med ca. 50% for at formindske modtrykket til under 2000 Pa.
- Formaldehyd kan reduceres til under gældende grænseværdi. En vis mængde formaldehyd bliver dannet i røggassystemet efter motoren.
- Et beregningsprogram er opbygget, hvormed man med rimelig god nøjagtighed kan dimensionere nye reaktorer.



# Summary and conclusions

Considerable emissions of unburned natural gas (UHC) come from the exhaust of gas engines. Most of the UHC is methane. The RECCAT system is a novel environmental facility that is able to incinerate the unburned UHC in the engine exhaust.

Preliminary financial estimates indicate that great advantages may be achieved by introducing facilities that reduce the emissions of UHC from gas engines in Denmark.

RECCAT ApS was supported by a grant from the Danish EPA under a subsidy scheme called "Virksomhedsordningen 2006".

The purpose of the project is to demonstrate, study and prove in full-scale the ability of the RECCAT system to clean the flue gases from CHP plants for undesirable emissions of UHC, CO, formaldehydes (FA), and odour.

The main target group of RECCAT is CHP plants with natural-gas- (or bio-gas-) fired engines. The target group of the project is the Danish EPA and decision-makers who decide if new initiatives are to be taken to reduce emissions of CO<sub>2</sub> equivalents.

The project involved the following:

- Measurements of the reduction of UHC, CO, FA and odours at a CHP plant with the RECCAT system installed, and with small quantities of additional natural gas for the RECCAT system for optimization.
- Establishment of a calculation method to estimate the optimal RECCAT reactors for future projects at CHP plants.
- Estimation of typical costs of RECCAT installations at CHP plants, using results from this project and previous projects.

The project was carried out in cooperation with Rask Mølle Varmeværk (RMV), Danish Gas Technology Centre (DGC) and NIRAS. The measurements at RMV were carried out by DGC in cooperation with RECCAT, and NIRAS made the financial estimates. NIRAS also had primary responsibility for validating the results of the project.

The measurements were made in August/September 2007. The project was completed within the time schedule.

At the start of the measurements, the catalyst material in the reactors of the RECCAT system had been in operation for about 5400 hours.

The following conclusions can be drawn from the project:

- The measured cleaning efficiency for UHC was between 73 and 98%.
- The cleaning efficiency for CO was more than 99%.
- The cleaning efficiency for formaldehyde was about 95%.
- The cleaning efficiency for odours was between 58 and 85%.
- Emissions of lubrication oil were reduced.
- Taking all the measurements into account, cleaning efficiencies between 40 and 98% were found for UHC, dependent on the load and additional natural gas.
- At RMV and 100% load, the smallest emissions of UHC occur with 2.9-3.0% additional natural gas.
- The uncleaned exhaust emissions of UHC from the engine at RMV depend highly on the load.
- To protect the catalyst material in the reactors, the temperature must be kept below 620°C.
- The UHC cleaning efficiency of the reactors depends strongly on the maximum temperature and less on the load.
- The reactors for new plants should be made 40% larger.
- With the present kind of catalyst material the maximum?? temperature in the reactors should be above 600°C in new plants. This is achieved by making the reactors longer, which improves the heat exchange.
- Permanent efficiency for UHC cleaning of more than 90% can be achieved with reactors 40% larger and by increasing the pellet size of the present catalyst material by 50% to reduce the back pressure of the system.
- Formaldehyde is reduced to a very low level by the RECCAT system. Some formaldehyde is produced in the exhaust system of the engine.

# 1 Baggrund

Der er et betydeligt udslip på gasmotoranlæg af uforbrændt naturgas (UHC). Hovedparten heraf er metan, som er en kraftig drivhusgas. Det samlede udslip af metan fra danske gasmotorer svarer til omkring 400.000 tons CO<sub>2</sub> ækvivalenter om året. RECCAT er et nyudviklet miljøanlæg, som kan fjerne uforbrændt naturgas fra motorens røggas.

Foreløbige økonomiske beregninger tyder på, at der kan være samfundsøkonomiske fordele ved indførelsen af anlæg, der reducerer udledningen af UHC fra gasmotoranlæg af en vis størrelse.

På baggrund af disse samfundsmæssigt positive udsigter til at opnå en betydelig CO<sub>2</sub> reduktion til en favorabel pris har Miljøstyrelsen indkaldt ansøgninger under Virksomhedsordningen 2006. RECCAT ApS fik en bevilling til gennemførelse af dette projekt.

Projektet blev i løbet af 2007 planlagt gennemført på det eksisterende RECCAT-anlæg hos Rask Mølle Varmeværk (RMV). En konsulent blev tilknyttet projektet for at gennemføre målinger og udføre økonomiske beregninger.



## 2 Projektets formål

Følgende formål blev opstillet for projektet, som RECCAT ApS har udført med tilskud fra Virksomhedsordningen.

- Eftervisning af RECCAT-systemets effektivitet på et kraftvarmeværk (KV-værk). RECCAT renser for de organiske stoffer UHC, CO, FA (formaldehyd), lugt og smøreolie. Det er projektets formål at vise hvor høj en rensningsgrad, der kan opnås.
- Måling af UHC-, CO-, FA-, og lugt-reduktion på et værk med RECCAT-anlæg installeret.
- Afprøve RECCAT-systemet med tilsatsfyring med naturgas i små mængder (fra 0 til ca. 3%). Herved kan den optimale tilsætning findes.
- Målgruppen for produktet er først og fremmest KV-værker, som har naturgasfyrede (eller biogasfyrede) motorer. Målgruppen for projektet er Miljøstyrelsen og beslutningstagere, som skal afgøre, om der skal iværksættes initiativer til at sikre ækvivalent CO<sub>2</sub>-reduktion.



# 3 Projektindhold

Følgende punkter er gennemført i projektet.

- Der blev indgået en aftale med Rask Mølle Varmeværk (RMV) om at stille sig til rådighed for projektet i måleperioden.
- Der blev indgået aftaler med underleverandører og en endelig tidsplan blev opstillet.
- Der er udført forsøg med forskellige mængder af tilsatsfyring og forskellige motoreffekter og der er udført tilsvarende målinger.
- Den optimale tilsatsfyring og en metode til regenerering af anlæggets katalysator er fundet.
- Et beregningsprogram er opbygget (regneark), som kan omregne resultaterne i dette projekt til optimale reaktorer i kommende projekter.
- Baseret på resultaterne i dette projekt og tidligere er der fundet estimate-rede priser på RECCAT-installationer på typiske KV-værker.
- Der er samarbejdet med konsulenten, som følger projektet.

Projektet blev gennemført i samarbejde med Rask Mølle Varmeværk (RMV), Dansk Gasteknisk Center (DGC) samt NIRAS. DGC udførte målingerne hos RMV i samarbejde med RECCAT, og NIRAS har udført økonomiberegninger i et sideløbende projekt. NIRAS har desuden det overordnede ansvar for kontrolmålinger samt efterfølgende potentiale vurdering.





# 4 Forsøgsplanlægning

## 4.1 RECCAT-anlægget hos RMV

RECCAT-anlægget hos RMV består af 5 stk. ens reaktorer, som kører parallelt. Det har vist sig, at reaktorerne blev dimensioneret for små til dette anlæg. Standardstørrelsen for reaktorer til fremtidige værker vil være større. Af fysiske og funktionsmæssige årsager er den optimale reaktorstørrelse den samme for alle anlæg. Kun antallet af reaktorer er bestemt af den aktuelle motorstørrelse.

## 4.2 Forsøgsplan

Der blev indgået en aftale med RMV om at gennemføre forsøgsrækken og målingerne på værket i sommeren 2007. Dette tidspunkt er bedst, idet motoren hos RMV kun kører omkring 4-6 timer dagligt om sommeren. I forsøgsplanen skal køres med ned til 50% last i op til en uge ad gangen, hvilket ikke kunne gennemføres i vinterhalvåret, hvor motoren ofte kører op til 24 timer pr døgn på fuld last.

Forsøgsrække og målinger blev udført hos RMV i august/september 2007 efter nedenstående tidsplan. Før målingernes start havde katalysatoren været i drift i ca. 5400 timer.

I begyndelsen af 2007 blev installeret et bypass-system for naturgas omkring motoren hos RMV. En lille gasmængde bliver udtaget fra gassystemet før motoren. Via en gasrampe med reguleringsventiler mm. tilsættes gassen udstødningen efter motoren. Herved kan gasmængden i udstødningen, som går til RECCAT-systemet, reguleres og optimeres. Bypassmængden indreguleres til 0-3% af indfyret effekt til motoren.

I forsøgsplanen indgår en speciel ny kombineret driftstilstand hver dag i 5 uger. For hver uge i forsøgsperioden indstilles motoren til en ny driftstilstand kendetegnet ved procent driftslast. For hver dag i ugen indstilles bypass-systemet til en ny indstilling. Herved fås en forsøgsmatrix med varierende driftslast kombineret med varierende bypass-gasmængde.

Almindeligvis kører motorer på KV-værker kun fuldlast, hvor driftstiden pr dag er afhængig af varmeaftaget hos varmemeforbrugerne. Ved forsøgene køres motoren imidlertid ned til 50% last. Herved kan man simulere større reaktorer, idet de samme reaktorer relativt set er større i forhold til motorlasten (og indfyringseffekten).

MST-projekt. Tidsplan for målinger hos Rask Mølle Varmeværk 2007.					
	Ti. 7. aug. (uge 32)	Ma. 13. aug. (uge 33)	Ti. 21. aug. (uge 34)	Ma. 27. aug. (uge 35)	Ma. 3. sept. (uge 36)
Emissionsmåling før RECCAT	x	x	x	x	Δ
Emissionsmåling efter RECCAT	x	x	x	x	Δ
Emissionsmåling før skorsten	x	x	x	x	Δ
2 stk FA-måling før RECCAT		x			Δ
2 stk FA-måling efter RECCAT		x			Δ
2 stk FA-måling før skorsten		x			Δ
Lugt-måling før RECCAT		x			x
Lugt-måling efter RECCAT		x			x
Driftslast (%)	50	60	70	80	100
Max temp. i reaktor dag 1 (°C)	620	620	620		
Bypassventil max (dag 1 i ugen)	1,5	2,5	4	5	6
Bypassventil min (dag 5 i ugen)	0	0	0	1	0
Motorstart kl.	05:00	05:00	05:00	05:00	05:00
Første måling ca. kl.	13:00	13:00	12:00	12:00	12:00
Registrering af bypass-gas (RMV)	x	x	x	x	x
Δ: betales af DGC's rådgivningsprojekt for MST, udføres af DGC-Ålborg					
x: betales af RECCAT's projekt for MST, udføres af DGC-Ålborg og RMV					

Figur 4.1. Tidsplan for gennemførelse af målinger hos Rask Mølle Varmeværk.

Der er foretaget emissionsmålinger én gang hver uge. Det permanente data-logger system, som er installeret på værket, opsamler data hver tredje minut vedrørende temperaturer for reaktorer, tryk, og forskellige andre data. Ved at kombinere temperaturdata og emissionsmålinger kan der etableres en beregning, så emissioner og andre røggasdata kan beregnes alene ud fra temperaturmålingerne på de dage, hvor kun temperaturmålinger foretages. Disse beregninger er indgået i databehandlingen.

# 5 Resultater

## 5.1 Projektforløbet

Projektet er forløbet helt i overensstemmelse med planen. Målingerne er udført efter tidsplanen, og den efterfølgende databehandling er udført planmæssigt. Opstilling af beregningsprogrammet er sket inden for tidsplanen.

DGC udførte emissionsmålingerne i projektperioden. Der blev foretaget i alt fem emissionsmålinger i fem på hinanden følgende uger. I forsøgsuge nr. 2 (60% last) og forsøgsuge nr 5 (100% last) blev der desuden foretaget målinger af formaldehyd og lugtemissioner i røggassen.

## 5.2 Målinger

I bilag A og B ses måleresultaterne fra DGC's emissionsmålinger i henholdsvis de første 4 uger og i den sidste uge af måleserien.

I tabel 5-1 ses et sammendrag af de vigtigste resultater fra emissionsmålingerne.

Som det ses, er der opnået høje rensningsgrader for UHC, CO og formaldehyd (FA). Rensningsgraden for UHC er målt mellem 73% og 98% afhængigt af lastpunkt for motoren. Rensningsgraden for FA er målt til ca. 95%, mens rensningen for CO er målt over 99% i alle tilfælde. Reduktionen af lugt er målt til mellem 58 og 85%.

<b>Tabel 5-1 Rask Mølle Varmeværk</b>							
Måling på RECCAT-system i forbindelse med gasmotor, 1,5 MW-el							
august-september 2007							
	enhed	Driftslast (%)	50	60	70	80	100
CO	mg/m <sup>3</sup> n <sup>(2)</sup>	før RECCAT	1907	1486	1101	912	688
	mg/m <sup>3</sup> n <sup>(2)</sup>	efter RECCAT	6	8	7	9	7
	%	<b>rensningsgrad</b>	<b>99,7</b>	<b>99,5</b>	<b>99,4</b>	<b>99,0</b>	<b>99,0</b>
Formaldehyd	mg/m <sup>3</sup> n <sup>(2)</sup>	før RECCAT		105,4			81,0
	mg/m <sup>3</sup> n <sup>(2)</sup>	efter RECCAT		4,8			4,1
	%	<b>rensningsgrad</b>		<b>95,4</b>			<b>94,9</b>
UHC	% af indfyret	efter motor	7,37	5,72	4,44	3,95	3,03
	% af indfyret	før RECCAT <sup>(1)</sup>	7,86	7,40	6,79	7,17	6,22
	% af indfyret	efter RECCAT	0,16	0,37	0,85	1,01	1,65
	%	<b>reaktoreffektivitet</b>	<b>97,9</b>	<b>95,0</b>	<b>87,5</b>	<b>85,8</b>	<b>73,5</b>
Lugt	LE/m <sup>3</sup>	før RECCAT		11850			13200
	LE/m <sup>3</sup>	efter RECCAT		1800			5600
	%	<b>rensningsgrad</b>		<b>84,8</b>			<b>57,6</b>
El-virkningsgrad	%		33,9	35,6	37,0	37,9	39,5
Varmevirkningsgrad	%		54,7	53,6	51,7	51,1	49,2
Totalvirkningsgrad	%		88,6	89,2	88,6	89,0	88,7
1) Inklusiv gas fra bypass-systemet							
2) Omregnet til 5% O <sub>2</sub>							

### 5.2.1 Formaldehyd, CO, lugt og smøreolie

Rensningen for FA har vist, at det er muligt at opnå emissionsniveauer for FA under de nuværende grænser, som der er givet dispensation for. Der er opnået emissioner for FA under 5 mg/m<sup>3</sup>n. De nuværende grænser, som der er givet dispensation for, ligger på 10 mg/m<sup>3</sup>n. Det ses, at RECCAT-anlægget kan reducere FA-emissionen til under halvdelen af den gældende grænseværdi.

Under målingerne blev i øvrigt gjort en bemærkelsesværdig observation vedrørende FA. Værdien 5 mg/m<sup>3</sup>n blev konstateret i røggasrøret ca. 5 meter efter RECCAT-anlægget. Der blev ligeledes målt længere fremme i systemet, dvs. efter næste lyddæmper og røggaskøler umiddelbart før skorsten. Her blev målt op til 8 mg/m<sup>3</sup>n. Konklusionen er, at der dannes FA i røggaskanalerne efter motoren på et naturgasmotorbaseret kraftvarmeanlæg.

Det betyder, at der umiddelbart efter RECCAT-anlægget måske er ned til 1-2 mg/m<sup>3</sup>n FA i røggassen. Det svarer til, hvad der tidligere blev målt på prototypen på laboratoriet. Det betyder samtidigt, at man ved fastsættelse af grænser for FA fra gasmotorer er nødt til at specificere, hvor og hvordan målingerne skal udføres, fx "lige efter katalysator" eller "lige før skorsten", samt at der i grænseværdierne bør tages hensyn til denne "efterdannelse" af FA.

Rensningen for CO i RECCAT-anlægget er overbevisende. Der er ved alle målinger opnået over 99% rensning for CO. Emissionerne ligger under 10 mg/m<sup>3</sup>n, hvilket svarer til 2% af den tilladte emission.

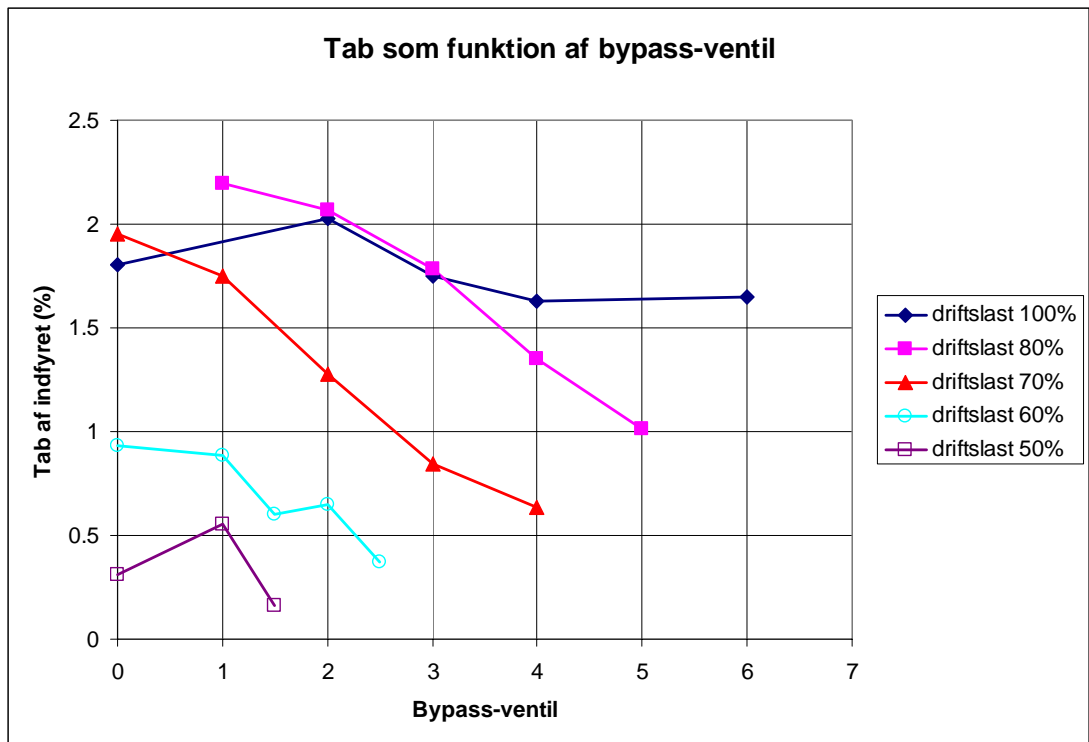
Der er i almindelighed stor usikkerhed på målinger for lugtemissioner. Der blev hos RMV konstateret reduktioner på 58% og 85% gennem RECCAT-anlægget ved de to foretagne lugtmålinger. Usikkerhederne taget i betragtning antages det, at RECCAT-anlægget kan reducere lugtemissionerne fra skorstenen med mellem 50 og 80%.

Der er ikke foretaget målinger på smøreolie, men driftslederen på værket oplyser, at mængden af smøreolie, som udfældes i bunden af røggasvarmeveksleren, er faldet betydeligt efter installationen af RECCAT-anlægget i marts 2006.

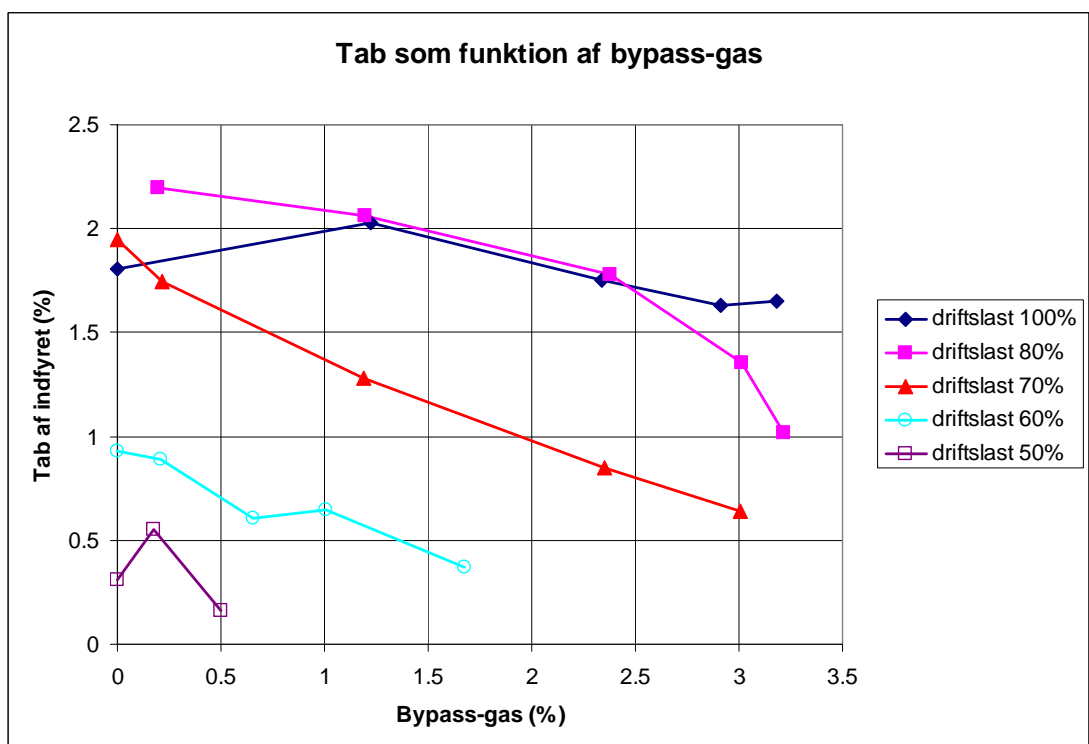
### 5.2.2 Uforbrændte kulbrinter, UHC

Data fra emissionsmålingerne for de enkelte uger er brugt til at beregne karakteristiske konstanter gældende for de respektive driftslaster. Herved kan man bruge temperaturmålingerne fra den kontinuerte dataopsamling til at beregne UHC-emissioner og dermed reaktor-effektiviteter i hele måleperioden, dvs. også de dage, hvor der kun er data fra dataopsamlingen.

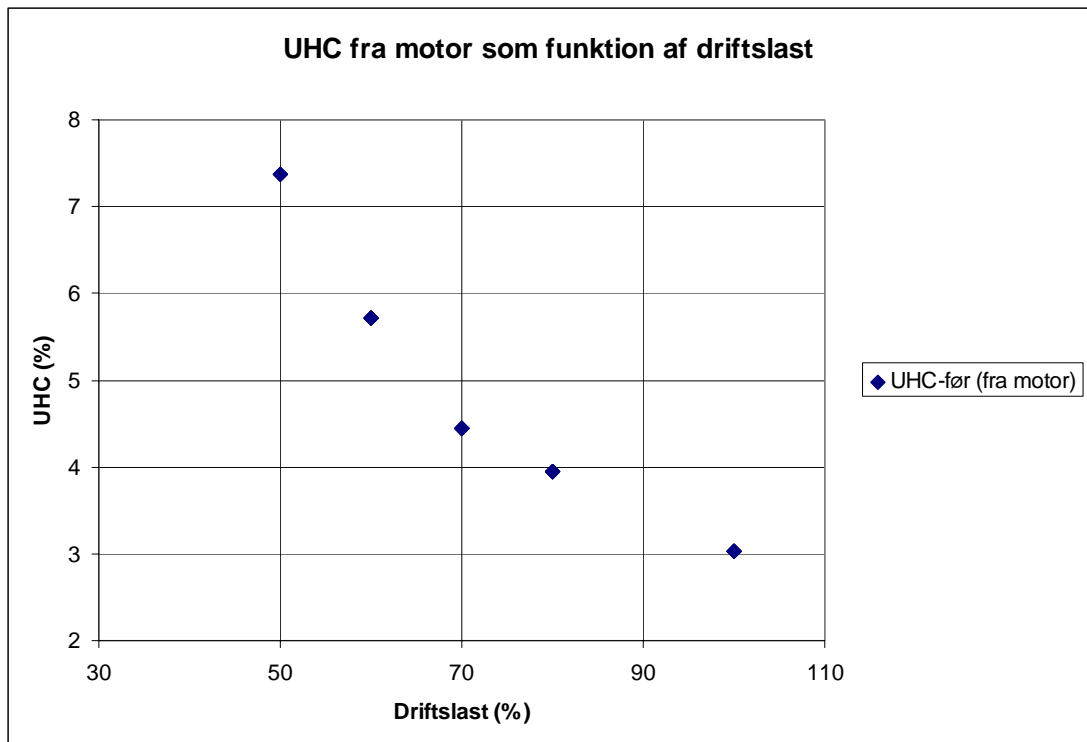
På figurerne herunder er disse beregnede (og målte) data vist.



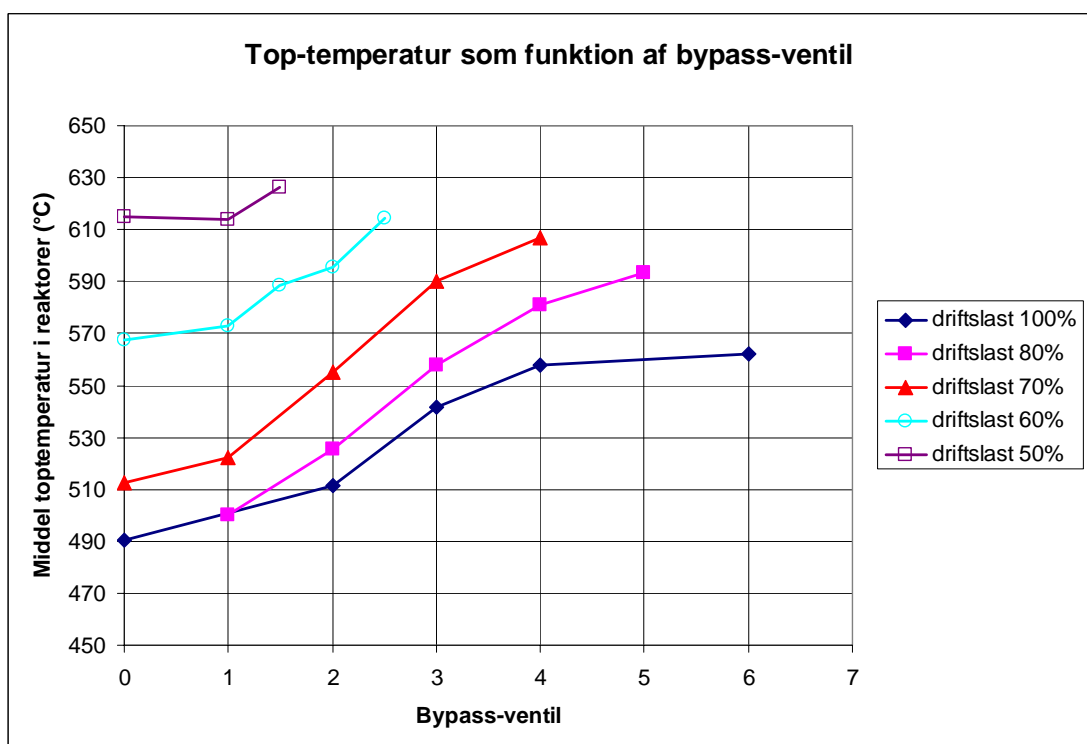
Figur 5.1. Røggastabet i form af uforbrændt som funktion af bypass-ventilens indstilling



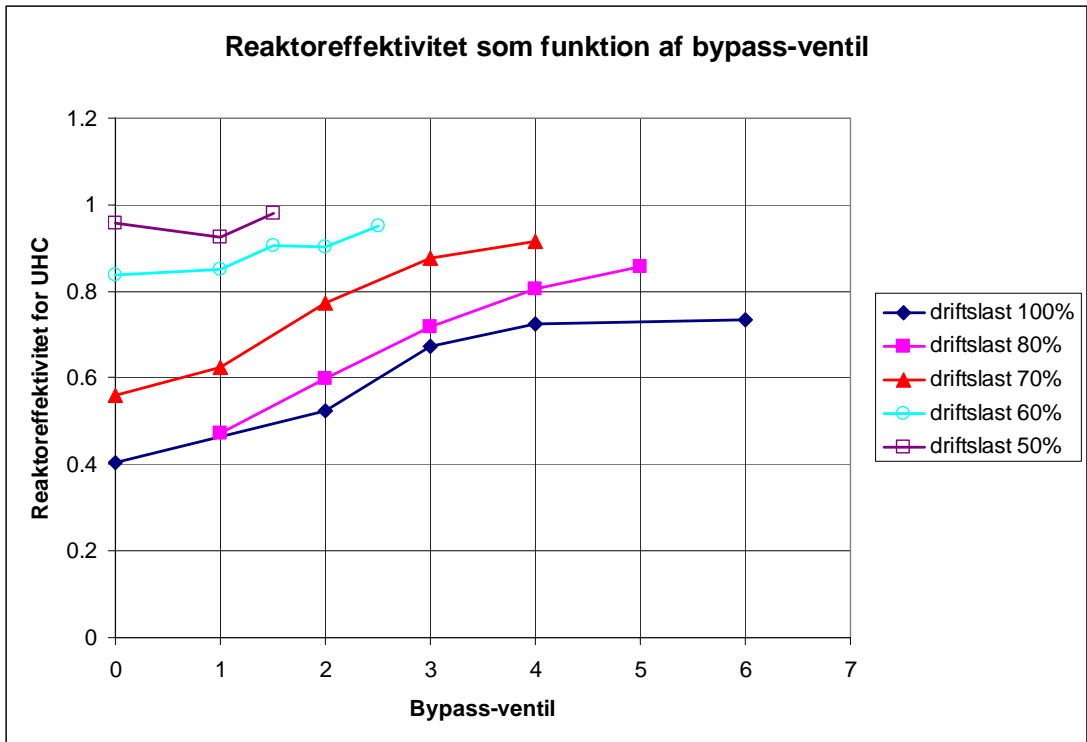
Figur 5.2. Røggastabet i form af uforbrændt som funktion af bypass-gasmængden.



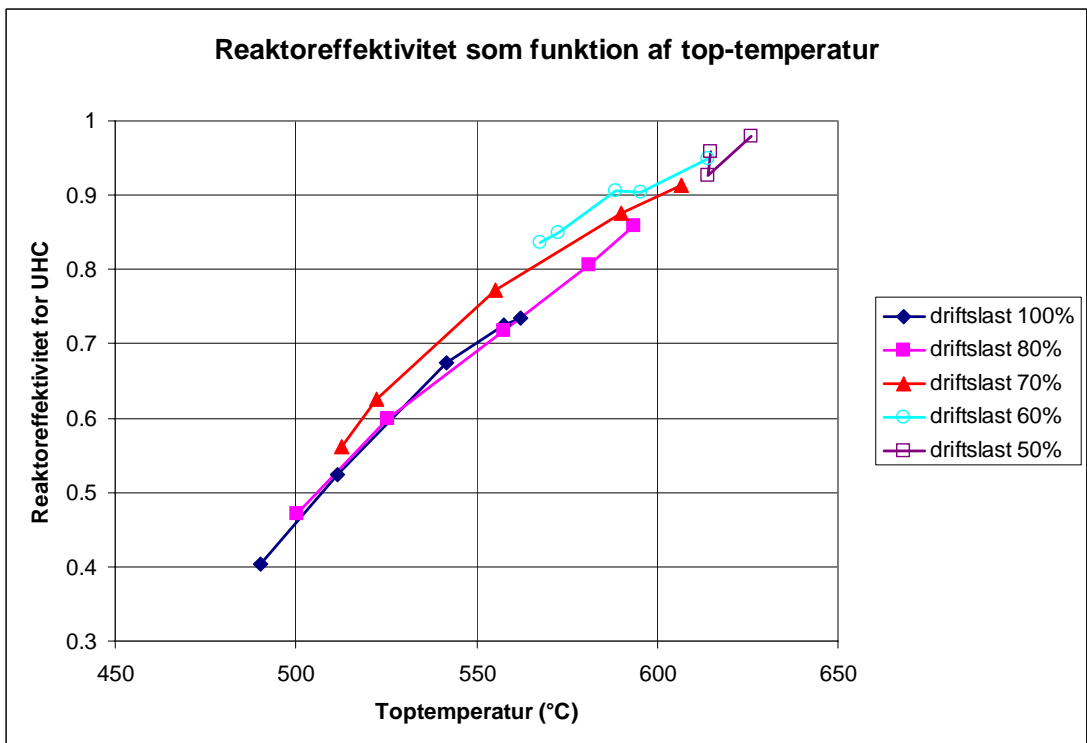
Figur 5.3. Uforbrændt fra motoren som funktion af driftslast.



Figur 5.4. Toptemperaturen i reaktorerne som funktion af bypass-ventilens indstilling.



Figur 5.5. Reaktoreffektiviteten som funktion af bypass-ventilens indstilling.



Figur 5.6. Reaktoreffektiviteten som funktion af toptemperaturen i reaktorerne.

Figur 5.1 viser, at på anlægget i Rask Mølle ved 100% last fås det mindste gastab med en ventilindstilling i bypass på 4-5. Dette svarer til en bypass gasmængde på ca. 2,9-3%.

Figur 5.3 viser, at motoren i Rask Mølle har en emission af UHC før REC-CAT, som er kraftigt afhængig af driftslasten.

Af hensyn til katalysatormaterialet skal temperaturen i reaktorerne holdes under ca. 620°C. Figur 5.4 viser, at ved driftslast under 70% skal der lukkes for bypass-gassen for ikke at overophede reaktoren.

Figur 5.6 viser, at reaktoreffektiviteten først og fremmest afhænger af toptemperaturen i reaktorerne, hvilket er det samme som max-temperaturen. Ved temperatur i toppen over ca. 600 °C fås den ønskede rensningsgrad på over 90%. Det ses, at dette lige præcis nås med 70% last. For 60 og 50% last nås det nemt. Reaktoreffektiviteten for UHC afhænger kraftigt af toptemperaturen i reaktorerne og i mindre grad af driftslasten.

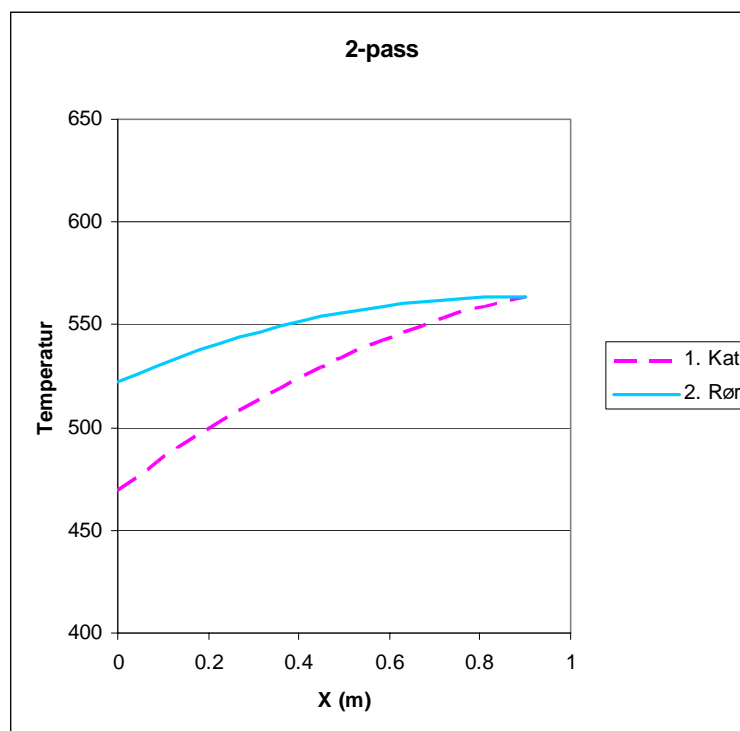
Heraf kan man slutte, at reaktorerne ideelt burde være ca. 40% større. Herved ville opholdstiden være ca. den samme, som ved 60-70% last for de nuværende reaktorer. For nye anlæg skal toptemperaturen i reaktorerne være over 600°C, hvis den samme type katalysatormateriale anvendes. Dette opnås ved, at den forøgede reaktorstørrelse sker i længderetningen, så varmevekslingen i reaktorerne forbedres.

Set over alle målinger (inklusiv måledage med kun temperaturmålinger) er der opnået reaktoreffektiviteter for UHC på mellem 40 og 98% afhængigt af driftslast og gastilsætning

### 5.3 Beregningsprogram

Nye reaktorer til andre værker ville blive dimensioneret noget større i forhold til de nuværende ud fra erfaringerne hos RMV. Det har derfor været nødvendigt at opbygge et beregningsprogram, som kan omregne resultaterne fra de nuværende reaktorer til nye reaktorer. Programmet er et simuleringsprogram, som er tilpasset til at gengive måleresultaterne fra RMV med de nuværende reaktorer, og som kan bruges til beregning af nye reaktorer på andre værker. På figur 5.7 ses beregning af en reaktor hos RMV ved fuld last. Temperaturen er stigende op gennem katalysatoren (stiplet graf) og faldende på vejen tilbage gennem rørene, som afgiver varme til katalysatorsiden.

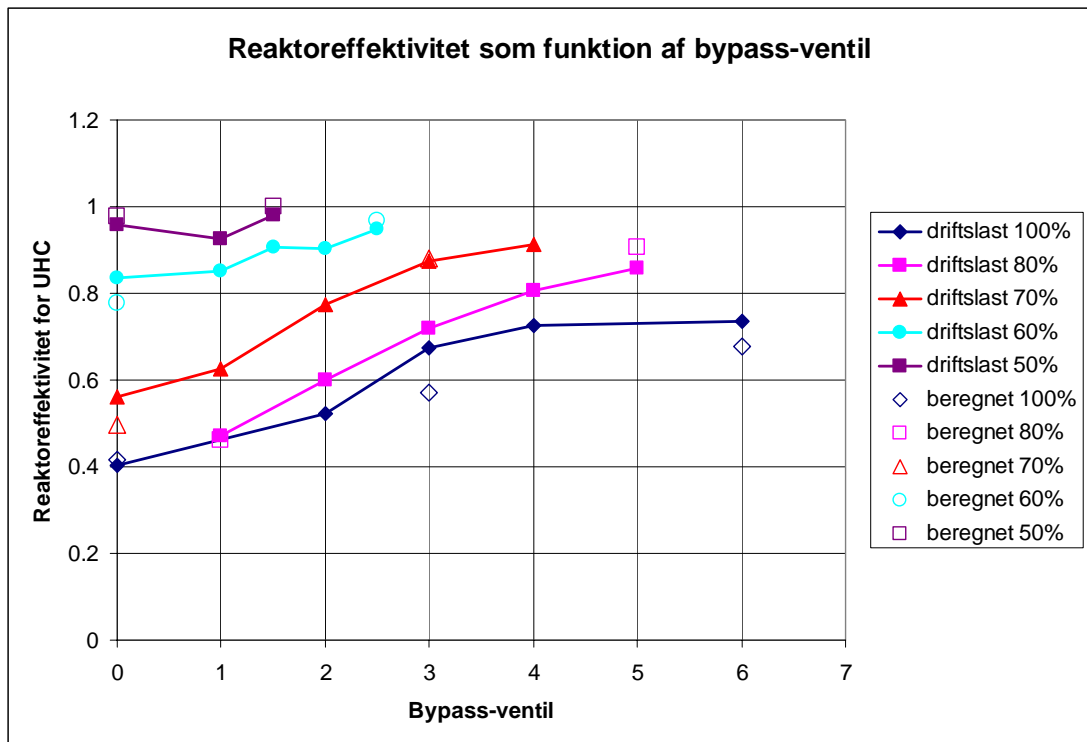




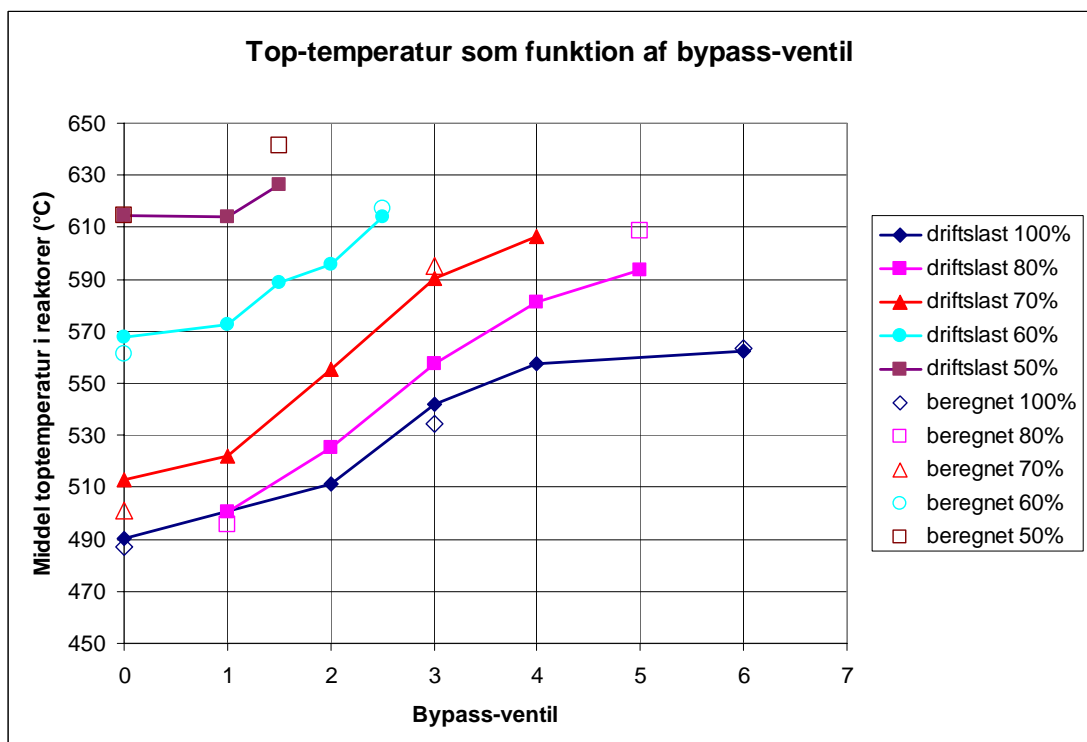
Figur 5.7. Beregninger af reaktor på Rask Mølle Varmeværk

På figur 5.8 og 5.9 ses sammenligning mellem målte værdier og beregnede værdier fra beregningsprogrammet. Det ses, at der er rimelig god overensstemmelse mellem målinger og beregninger både for reaktoreffektiviteten og for toptemperaturen, som er de vigtigste parametre. Forskellen mellem målinger og beregninger indeholder både usikkerhederne i målingerne og usikkerhederne i de anvendte modeller for beregningerne. I modelberegningerne er anvendt teoretiske modeller, hvor de empiriske konstanter er fundet ved tilpasning til målingerne.

Der er rimelig god overensstemmelse, og beregningsmodellen kan derfor bruges ved dimensionering af nye reaktorer.

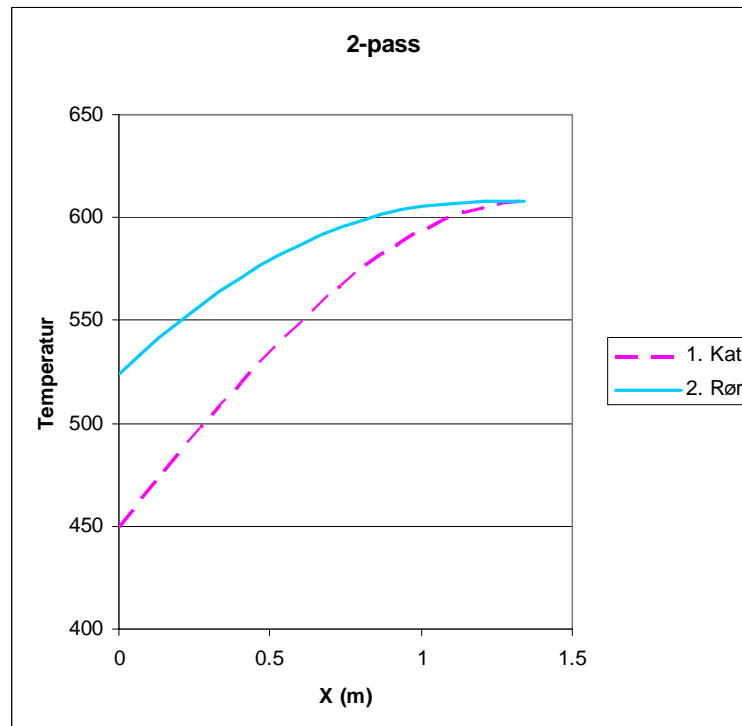


Figur 5.8. Reaktoreffektiviteten som funktion af bypass-ventilens indstilling. Målte og beregnede værdier.



Figur 5.9. Toptemperaturen i reaktorerne som funktion af bypass-ventilens indstilling. Målte og beregnede værdier.

På figur 5.10 ses beregnet temperaturprofil gennem en tænkt reaktor til et fiktivt værk. Der er her dimensioneret til en temperatur lige over 600 °C i toppen af reaktoren. Reaktorerne dimensioneres som én standardstørrelse beregnet til alle anlægsstørrelser. Antallet af reaktorer vil være bestemt af motoreffekten.

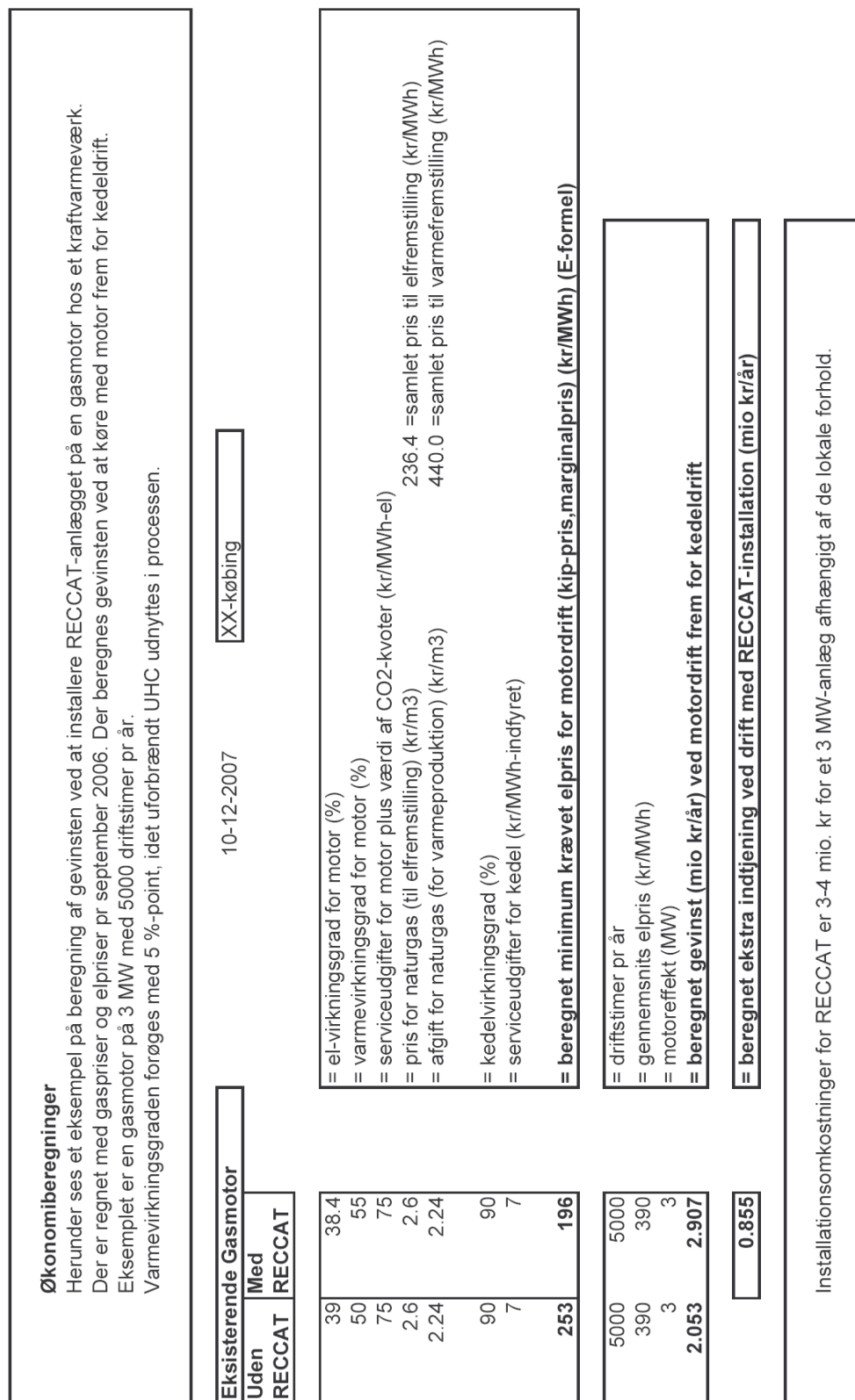


Figur 5.10. Beregninger af reaktor på nyt værk

#### 5.4 Økonomiberegninger, pris for anlæg

Rensningen for UHC og CO resulterer i en højere varmeeffektivitet på værket, hvilket vil være økonomiske grundlag for installationen af RECCAT-anlæg på KV-værker.

På figur 5.11 ses et konkret eksempel på beregning af den økonomiske gevinst ved installation af et RECCAT-anlæg. Forudsætningen er, at der er ca. 4% uforbrændt UHC efter motoren. Beregningen gælder for de nye større reaktorer. Andre forudsætninger står i tabellen.



Figur 5.11. Konkret eksempel på beregning af økonomisk gevinst med RECCAT-installation (anonymiseret).

Udgifterne til køb og installation af RECCAT-anlæg fremgår af nedenstående tabel. På grund af prisstigninger på råvarer som stål og katalysatormateriale er der sket en væsentlig stigning i den beregnede fremtidige pris på RECCAT-anlægget. Der er sket stigninger på mellem 40 og 85% på stål til reaktorerne siden det første demo-anlæg. Det skyldes stigninger i energipriser, som slår igennem i stålpriser.

Det forventes imidlertid, at effektivisering og stordrift ved fremstillingen vil kunne nedsætte prisen i fremtiden.

Pris i 1000 kroner				
El-effekt	1MW	3MW	9MW=3x3MW	Bemærkning
Reaktorer	780	2405	6715	Nuværende pris
Installation	400	925	2000	Nuværende pris
I alt (retrofit)	1180	3330	8715	Nuværende pris
-15% (effektivisering)	1000	2830	7400	Fremtidig pris
Integreret løsning	800	2480	6850	Fremtidig pris
Serviceudgifter ved 2 års garanti	0	0	0	Nuværende pris
Serviceudgifter ved mere end 2 års garanti	16/år	48/år	144/år	Nuværende pris ved 4000 driftstimer/år

Serviceudgifterne afhænger af, hvilken garanti kunden ønsker. Ved 2 års garanti forventes ingen serviceudgifter. Hvis RECCAT ApS skal garantere ud over 2 år, er serviceudgifter foreløbigt sat til 4 kr/MWh<sub>el</sub> produceret på motoren regnet fra og med andet år. Der er regnet med 4000 driftstimer som minimum pr år for det enkelte anlæg.

I Danmark vil retrofit være den almindeligste måde, hvorpå RECCAT kan installeres. I andre lande og på enkelte anlæg i DK kan RECCAT-systemet medtages som en integreret løsning i designfasen, og omkostningerne kan derved reduceres væsentligt, idet der også kan spares komponenter som en lyddæmper og andre katalysatorer.

Som rapporteret tidligere virker RECCAT-anlægget som en lyddæmper. På nye anlæg kan man derfor spare den ene lyddæmper af de sædvanlige to stk. Man kan samtidigt spare en CO- eller formaldehydkatalysator. Nettoudgiften for installation af RECCAT-anlæg på nye værker er derfor mindre end angivet i tabellen herover.



## 6 Diskussion

Der blev ved 100% driftslast opnået reaktoreffektivitet på ca. 73% vedrørende UHC-rensning. Ved lavere last opnåedes effektiviteter op til 98 %. På fremtidige anlæg ønskes en større rensningsgrad ved 100% last end opnået hos RMV. Visse tekniske uhensigtsmæssigheder på de opstillede reaktorer korrigeres på de efterfølgende anlæg.

De hidtidige erfaringer fra prototype og fuldskala-anlæg samt nye erfaringer fra dette projekt vil gøre, at det planlagte design for reaktorerne i fremtidige projekter vil kunne optimeres.

RECCAT-reaktorerne havde ved tidspunktet for målingerne været i drift i ca. 1½ år. Det betyder, at målingerne giver et sandt billede af katalysatorens effektivitet, da den indledende degenerering af katalysatoren er sket før målingerne. Det betyder, at målingerne kan bruges direkte uden korrektion for degenerering.

Ved dimensionering af nye reaktorer skal disse gøres større end de nuværende. Herved kan opnås blivende rensningsgrader over 90%, som er ønsket. For nye reaktorer kan en blivende effektivitet for UHC-rensning på over 90% opnås med ca. 40% længere reaktorer og samme type katalysatormateriale, bortset fra at pelletstørrelsen skal forøges med ca. 50% for at formindske modtrykket til under 2000 Pa.

På figur 5.10 er vist resultater af reaktorberegninger for et nyt anlæg. Der er her beregningsmæssigt opnået rensningsgrader på over 90% med en reaktorstørrelse som forudsat i ovenstående prisberegninger. Bypass-gastilsætningen var beregningsmæssigt ca. 2%. Emissionen af UHC er beregningsmæssigt under 0,5% mod ca. 4% uden RECCAT-systemet installeret.





# Bilag

Bilag A.

Emissionsmålinger foretaget 4 dage

07-08-2007

13-08-2007

21-08-2007

27-08-2007

Bilag B.

Emissionsmålinger foretaget

03-09-2007