
Rapport SGC 108

**MINSKNING AV NO_x-EMISSIONER FRÅN
BIOBRÄNSLEELDADE ANLÄGGNINGAR
GENOM KATALYTISK REBURNING**

**Fredrik A. Silversand
Katator AB**

Februari 2000



Rapport SGC 108

MINSKNING AV NO_x-EMISSIONER FRÅN BIOBRÄNSLEELDADE ANLÄGGNINGAR GENOM KATALYTISK REBURNING

**Fredrik A. Silversand
Katator AB**

Februari 2000

SGC:s FÖRORD

FUD-projekt inom Svenskt Gastekniskt Center AB avrapporteras normalt i rapporter som är fritt tillgängliga för envar intresserad.

SGC svarar för utgivningen av rapporterna medan uppdragstagarna för respektive projekt eller rapportförfattarna svarar för rapporternas innehåll. Den som utnyttjar eventuella beskrivningar, resultat eller i rapporterna gör detta helt på eget ansvar. Delar av rapport får återges med angivande av källan.

En förteckning över hittills utgivna SGC-rapporter finns i slutet på denna rapport.

Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) är ett samarbetsorgan för företag verksamma inom energigasområdet. Dess främsta uppgift är att samordna och effektivisera intressenternas insatser inom områdena forskning, utveckling och demonstration (FUD). SGC har följande delägare: Svenska Gasföreningen, Sydgas AB, Sydkraft AB, Göteborg Energi AB, Lunds Energi AB och Helsingborg Energi AB.

Följande parter har gjort det möjligt att genomföra detta utvecklingsprojekt:

Katator AB
Statens Energimyndighet
Perstorp AB
Värmeforsk AB
Sydkraft Gas AB
Sydgas AB
Göteborg Energi AB
SE Gas AB

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER AB



Johan Rietz

Sammanfattning

En studie avseende möjligheterna att utnyttja katalytisk reburning för att minska emissionerna av kväveoxider från biobränsleeldade anläggningar har genomförts. Projektet har samfinansierats av Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning (Värmeforsk), Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC), Perstorp AB och Katator AB.

Vid katalytisk reburning får primärförbränningen ske vid så lågt luftöverskott som är möjligt med hänsyn till emissioner av CO och kolväten. Nedströms brännkammaren tillförs reduktionsmedel i en kvantitet som är tillräcklig för att förbruka restsyret i rökgaserna. Huvuddelen av reduktionsmedlet, restsyret samt kväveoxiderna förbrukas i den reburningkatalysator som placerats i rökgasstråket. Nedströms reburningkatalysatorn tillförs sekundärluft för att återföra rökgasblandningen till överstökiometrisk förhållanden. Eventuella rester av CO och oförbrända kolväten förbränns därefter i en oxidationskatalysator.

Experiment har genomförts i en för ändamålet ombyggd småskalig panna (10-20 kW_{bränsle}) för förbränning av pellets. Undersökningarna visar att det är möjligt att nå reduktionsgrader på 90% eller mer med avseende på kväveoxider utan att nettoutsläppen av CO och/eller kolväten ökar.

En översiktlig ekonomisk analys har genomförts baserat på de experimentella resultaten och utvärderingen indikerar en stor känslighet för priset på det använda reburningbränslet. Om konventionella reduktionsmedel (naturgas/gasol) används blir återbetalningstiden för investeringen 3 - 5 år. Om förnyelsebara reduktionsmedel används alternativt om konventionella reduktionsmedel kan skattebefrias i denna tillämpning, blir återbetalningstiden kortare än 2 år, baserat på gällande regler avseende avgifter för kväveoxidutsläpp

I större anläggningar kan problem förväntas uppstå med stråkbildning och kraftiga koncentrationsgradienter över rökgasstråkets tvärsnitt. Dessa effekter medför en försämrad prestanda varvid reduktionsgraden blir lägre. Korrosionsskador kan under syrefattiga betingelser uppstå i anläggningsdelar som har hög godstemperatur (t. ex. i överhettaren).

Som ett alternativ till katalytisk reburning har kolväte-SCR undersökts. I denna process tillförs små mängder reduktionsmedel (lämpligtvis propan) vid överstökiometrisk förhållanden. Under optimala betingelser erhålls en kväveoxidreduktion på 50 - 70% med övergångsmetallinbytt zeolitkatalysatorer, vilket framgår ur försök utförda i den pelletseldade pannan. Processuppbyggnaden kring kolväte-SCR är väsentligt enklare än den för katalytisk reburning. Trots att reduktionsgraden är något lägre med denna metod indikerar den ekonomiska analysen att återbetalningstiden blir så kort som ca. 2 år.

Det fortsatta arbetet bör inriktas på demo.-installationer i större biobränsleeldade pannor, varvid en fullständig teknisk och ekonomisk uppföljning kan genomföras. Det är härvid av speciell vikt att studera deaktiveringsfenomen.

Nyckelord: Katalytisk reburning, kolväte-SCR, biobränslen, kväveoxider (NO_x)

Summary

A study concerning the possibility of using catalytic reburning in the abatement of nitrogen oxides from bio-fuelled combustion units has been accomplished. The project was equally financed by Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning (Värmeforsk), Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC), Perstorp AB and Katator AB.

In catalytic reburning, the fuel is combusted at a low excess-air-ratio to minimize the necessary amount of reburning gas added downstream the combustion chamber. The reburning fuel (a reducing agent, e.g. natural gas or LPG) will react catalytically with oxygen and nitrogen oxides in the reburning catalyst to produce carbon oxides, water and nitrogen. Secondary air is injected downstream the reburning catalyst to facilitate an effective combustion of remaining CO and hydrocarbons in the oxidation catalyst, usually in a tail-end position.

Experiments were carried out in a small-scale combustion unit (10-20 kW_{fuel} for pellets of bio-fuel). The results indicate possible conversion degrees of 90% with respect to nitrogen oxides, without increased emissions of CO and hydrocarbons.

The economic evaluation indicates a great sensitivity to the price of the reburning fuel. The pay-off-time of an installation for catalytic reburning is between 3 and 5 years when conventional reburning fuels are used (e.g. natural gas and LPG). If renewable reburning fuels (e.g. ethanol) are used or if the taxes could be decreased for conventional fuels in this application, the pay-off-time will be less than 2 years. The calculations are based on current Swedish legislation concerning charges for nitrogen-oxide-emissions.

Problems with uneven flow conditions and concentration gradients are expected to reduce the performance of catalytic reburning. Damages caused by corrosion at low oxygen concentrations are likely to occur in positions with high metal temperatures, e.g. in the super-heater-portion of the flue-gas-channel.

Hydrocarbon-SCR is an alternative method to obtain a reasonable reduction of the emissions of nitrogen oxides. Small amounts of certain hydrocarbons (e.g. LPG) are added to the flue-gas-stream at a normal excess-air-ratio to obtain a conversion degree of 50 - 70% over a transition-metal-exchanged zeolite catalyst. Despite the relatively low degree of conversion, the pay-off-time will be around 2 years, primarily due to a relative simple design.

Continued experiments should focus on installations in large bio-fuelled appliances, where a detailed technical and economical evaluation is possible. Especially catalyst deactivation needs to be evaluated further.

Key words: Catalytic reburning, Hydrocarbon-SCR, bio-fuels, nitrogen oxides (NO_x)

Innehåll

<i>Avsnitt</i>	<i>Sida</i>
1. Bakgrund	1
2. Målsättningar	2
3. Konceptbeskrivning	3
4. Studiens omfattning och inriktning	5
4.1 Systemdesign	5
4.2 Katalysatorarrangemang och dimensionering	7
4.3 Förbränningstekniska prestanda	9
5. Studiens genomförande	11
5.1 Tester utförda vid olika syreöverskott i brännkammaren	11
5.2 Studier av olika bränslegaser vid katalytisk reburning	14
5.3 Jämförande försök med olika kvaliteter av biobränslen	19
5.4 Effekterna av sekundärluftinjektion och återoxidation	20
5.5 Fastläggande av optimal driftprofil vid katalytisk reburning	21
5.6 Resultat från långtidsförsök	22
5.7 Kolväte-SCR, mikroreaktorförsök samt modelltest	24
6. Katalysatorkarakterisering	28
7. Dominerande problemområden	28
8. Översiktlig ekonomisk analys av katalytisk reburning	29
9. Installationstekniska lösningar i vissa huvudtyper av anläggningar	34
10. Slutsatser och rekommendationer	35
11. Litteratur	37

1. Bakgrund

All termisk förbränning av bränslen med luft leder till bildning och utsläpp av kväveoxider, NO_x (NO_x är ett samlingsnamn för NO och NO_2). Utsläppen av kväveoxider har varit föremål för en intensiv debatt under senare år beroende på dessa föreningars negativa inverkan på miljön.

Miljödebatten har under senare tid också fokuserats på den globala uppvärmning som sker till följd av utsläpp av drivhusgaser. I detta perspektiv har stora insatser riktats mot att kommersialisera energiproduktion som inte leder till nettoemissioner av drivhusgaser (CO_2). Den ökade användningen av biobränslen i Sverige är ett led i denna politik. Även om biobränsleanvändningen ger positiva effekter på de nationella utsläppen av drivhusgaser är det angeläget att också minska emissionerna av lättflyktiga (VOC) och polyaromatiska (PAH) kolväten samt av NO_x . NO_x -emissionerna (vanligen över 100 mg/MJ_{bränsle}) härrör framförallt från det kemiskt bundna kvävet i biobränslet, som vid förbränningen omvandlas till NO_x , N_2O och N_2 . Bland kolvätena återfinns ett flertal irriterande och/eller carcinogena föreningar, t. ex. propen, butadien, bensen och olika tjärkolväten.

Katator AB har tidigare på uppdrag av Svenskt Gastekniskt Center AB (SGC) genomfört en studie avseende möjligheterna att utnyttja trevägskatalys för reduktion av NO_x -utsläppen vid gaseldning [1]. Vid trevägskatalys låter man förbränningen ske stökiometriskt eller svagt understökiometriskt, varvid det är möjligt att reducera NO_x -utsläppen genom katalytiska reaktioner mellan NO_x , kolmonoxid (CO), vätgas (H_2) och oförbrända kolväten (UHC). Resultaten visar att NO_x -emissionerna kan reduceras med mer än 90% samtidigt som pannverkningsgraden kan ökas med 1 - 2%, till följd av ett minskat rökgasflöde vid stökiometrisk förbränning. Tekniken förväntas vara av kommersiellt intresse för sådana anläggningar som omfattas av NO_x -avgifter, där återbetalningstiden för investeringen bedöms ligga i intervallet 0.5 - 2 år.

De fastbränslerelaterade utsläppen av NO_x i Sverige kan beroende på den förda energipolitiken förväntas öka i framtiden samtidigt som det är förenat med svårigheter att finna effektiva metoder för rökgasrening. Genom insats av förbränningstekniska åtgärder och SNCR (Selektiv icke-katalytisk reduktion av kväveoxider) kan rökgasernas NO_x -halt ungefär halveras. För att driva reningen längre krävs katalytiska metoder, SCR (Selektiv katalytisk reduktion av kväveoxider), varvid reningsgraden kan bli så hög som 90%. SCR är dock en relativt dyr metod ur investeringssynpunkt samtidigt som katalysatorns aktivitet relativt snabbt avtar i rökgasmiljö från biobränsleförbränning.

I föreliggande studie undersöks möjligheterna att utnyttja s.k. katalytisk reburning för att signifikant reducera rökgasernas innehåll av NO_x . Vid katalytisk reburning låter man primärförbränningen ske vid ett så lågt luftöverskott som är möjligt med hänsyn till förbrännings- och emissionstekniska förhållanden. Därefter tillförs ett sekundärbränsle, som har till uppgift att reducera restsyre och kväveoxider över en speciell reburningkatalysator. Sekundärluft tillförs efter reburningssteget och eventuella rester av CO , H_2 och UHC förbränns effektivt över en oxidationskatalysator, som placerats nedströms reburningkatalysatorn. Beräkningar visar att reduktionsgraden m.a.p. NO_x under gynnsamma betingelser kan bli så hög som 90% eller mer.

Det finns ett antal farhågor/problemområden som måste beaktas i sammanhang där katalytisk reburning övervägs:

- Risk för igensättning av katalysatorn
- Foulingproblematik och katalysatordeaktivering
- Ogynnsamma effekter av stråkbildning
- Korrosionsproblem under syrefattiga förhållanden
- Ökad kokshalt i askan
- Problem att finna ett ekonomiskt reburningbränsle.

Katalysatorn kan sättas igen i stoftrik miljö om dess uppbyggnad är felaktigt dimensionerad med avseende på kanalvidden. Det är välkänt att alkaliaerosoler bildas vid biobränsleförbränning då rökgaserna svalnar, varvid katalysatorn riskerar beläggas med ett lager av kondenserande alkalipartiklar. Närvaron av sådana skikt medför att katalysatorn deaktiveras. Det är vidare av vikt att rökgasernas sammansättning är någorlunda homogen tvärs flödesriktningen. Kraftiga gradienter och/eller stråkbildning har negativa effekter på reningsgraden. I detta sammanhang är det också av vikt att injicera såväl sekundärbränsle som sekundärluft homogent i rökgasflödet. Miljön i biobränsleeldade pannor är relativt korrosiv eftersom rökgaserna innehåller såväl svavel som alkali- och klorföreningar. Syrefattiga förhållanden i kombination med närvaro av denna typ av föreningar kan leda till korrosionsskador, speciellt vid höga godstemperaturer (t.ex. i överhettare). Om man sänker luftöverskottet vid primärförbränningen finns risk för försämrad förbränning, varvid andelen koks i askan kan öka. Detta leder till en försämrad verkningsgrad för processen. Beroende på skattesituationen i Sverige är det förenat med svårigheter att finna ett ekonomiskt och lättillgängligt reburningbränsle. I en situation där reburningbränslet kunde betraktas som ett reduktionsmedel för NO_x snarare än som ett bränsle skulle denna situation kunna förändras radikalt.

Med dagens regelverk avseende NO_x -avgifter och bränslebeskattnings förväntas det ekonomiska utfallet för katalytisk reburning vara ungefär likvärdigt med det som gäller för SCR.

Föreliggande studie innehåller en teknisk värdering av tekniken samt en översiktlig ekonomisk jämförelse mellan katalytisk reburning och andra tekniker för NO_x -reduktion från biobränsleeldade anläggningar. Den tekniska värderingen bygger på en rad försök som utförts i en biobränsleeldad panna i effektområdet 10 – 20 kW_{bränsle}.

2. Målsättningar

Huvudmålsättningen med studien har definierats på följande sätt i den projektbeskrivning som låg till grund för projektet:

"Att åstadkomma en signifikant reduktion av kväveoxidutsläppen från biobränsleeldade anläggningar till en låg kostnad genom katalytisk reburning där olika energigaserna används som reburningbränslen"

Med signifikant reduktion avses generellt en reduktionsgrad av NO_x på lägst 90%. I vissa fall kan det dock vara ekonomiskt mer lönsamt att välja en lägre reningsgrad eftersom marginalkostnaden för katalysatorn ökar kraftigt vid höga reningsgrader. För att öka reningsgraden från 70 till 90% krävs t.ex. en fördubbling av katalysatormängden.

För att tekniken skall vara av kommersiellt intresse krävs att återbetalningstiden för investeringen är rimlig, typiskt 1-3 år. För att det skall vara möjligt att uppnå en god ekonomi krävs att billiga reburningbränslen kan utnyttjas. Det är därför av betydelse att undersöka och bedöma teknikens flexibilitet med avseende på valet av reburningbränsle.

3. Konceptbeskrivning

Förbränning av biobränslen kännetecknas generellt av relativt höga luftöverskott i förbränningszonen. Erforderlig nivå på luftöverskottet är beroende av förbränningsanläggningens utformning samt av bränslekvaliteten. I rosteranläggningar som eldas med fuktigt bränsle kan luftöverskottet vid förbränningen ofta överstiga 20 – 30%. Minskas luftöverskottet under en viss gräns sker en oacceptabel ökning av CO/VOC-emissionerna.

Vid konventionell reburning krävs därför betydande tillsatser av sekundärbränsle för att erhålla de reduktionszoner som erfordras för effektiv NO_x -reduktion. Vid katalytisk reburning kan luftöverskottet vid förbränningen minskas eftersom eventuella emissioner av CO/VOC effektivt kommer att förbrännas i de efterföljande katalysatorstegen. Sekundärbränsletillförseln vid katalytisk reburning kan därför förväntas bli lägre än vid konventionell reburning.

I figur 1 återfinns en principkonstruktion av ett system för katalytisk reburning. Katalysatorplacering och positioner för injektion av sekundärbränsle och sekundärluft kan anpassas efter anläggningens utseende och driftsätt.

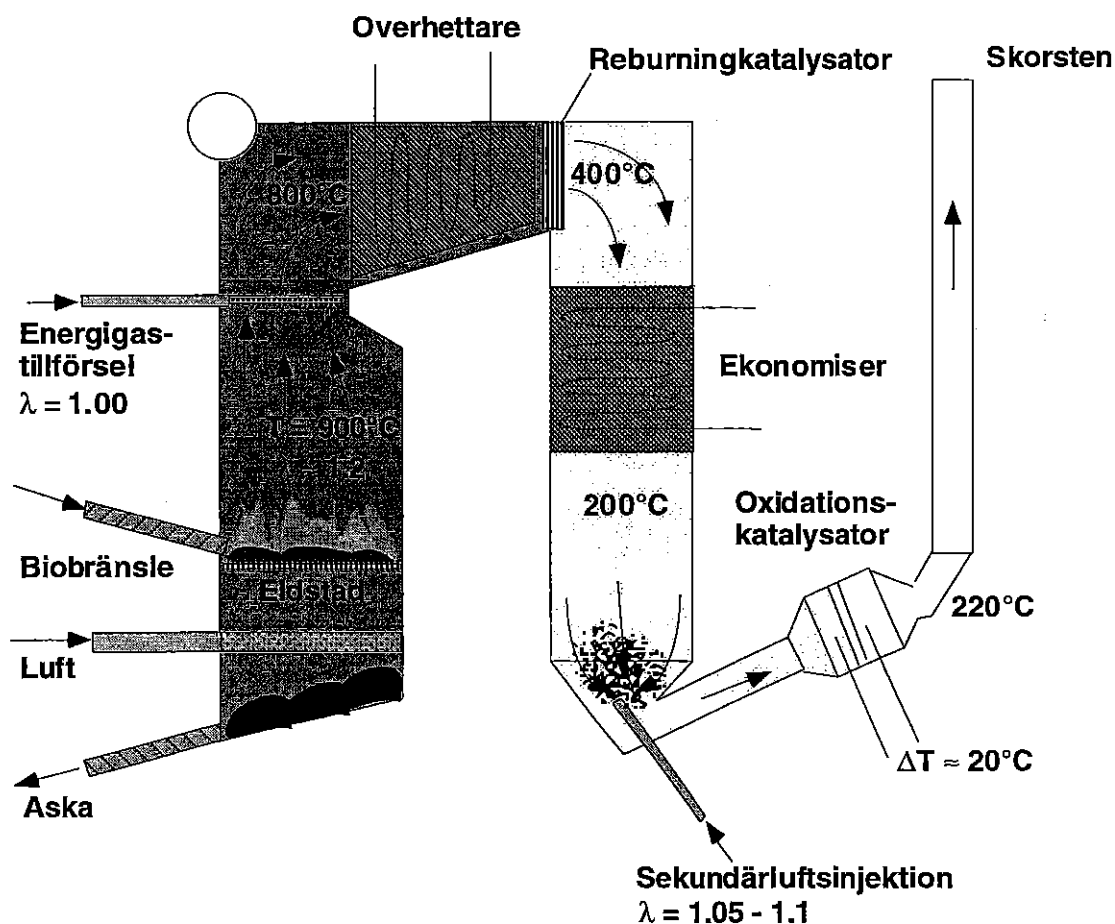
Sekundärbränsle (någon form av energigas) tillförs i en position efter förbränningsrummet. Det är viktigt att tillse att distributionen av sekundärbränslet över tvärsnittet blir jämn. Blandningen av rökgaser och energigas får därefter passera genom reburningkatalysatorn, som kan placeras på olika ställen längs rökgasstråket. Kravet är att gasblandningens temperatur ligger i intervallet 400 – 800°C. Omedelbart efter reburningkatalysatorn tillförs sekundärluft för att återföra rökgasblandningen till överstökiometrisk förhållanden. Eventuella rester av CO/VOC/UHC förbränns därefter i en oxidationskatalysator, som placerats i slutet av rökgaskanalen.

I konstruktionen enligt figur 1 finns risk att överhettaren utsätts för en neutral rökgasblandning, kännetecknad av låg syrehalt. Kombinationen av låg syrepotential hos rökgaserna, korrosiva rökgaskomponenter (svavel, klorider, alkaliföreningar) samt höga godstemperaturer kan leda till livstidspåverkande korrosionsangrepp i överhettaren. Det är dock möjligt att flytta såväl reburningkatalysator som sekundärlufttillförseln till en position före överhettaren. Härigenom riskeras inte korrosionsskador i överhettaren till följd av det modifierade driftsättet. Korrosionsproblemen är väsentligt mindre i hetvattenanläggningar där godstemperaturen i värmeväxlarna är lägre då kylning sker med vatten under relativt låga tryckförhållanden.

För att man skall kunna tillföra lämplig mängd sekundärbränsle under olika driftförhållanden krävs en kontinuerlig mätning och övervakning av rökgasernas lambdavärde. Signalen från lambdasonden utnyttjas för att via erforderligt arrangemang av kontrollenhet och ventiler dosera lämplig mängd reburningbränsle.

Sekundärufttillförseln kan avpassas efter sekundärbränsledoseringen. Luften erhålls lämpligtvis från konventionella medeltrycksfläktar, vilka försetts med varvtalsreglering. Genom att mäta temperaturdifferensen över oxidationskatalysatorn erhålls en indikation på reburningprocessens funktionsmässighet. Tidigare erfarenheter från gaseldade installationer visar att driftbetingelserna blir optimala med hänsyn till reningsgraden då temperaturdifferensen uppgår till 10 – 20°C. Temperaturökningen förorsakas av CO/VOC-förbränningen.

Rökgasernas CO-halt mäts kontinuerligt (sådan mätning finns redan implementerad i de flesta förbränningsanläggningar av aktuell typ). En ökad CO-halt kan tyda på bristfällig/felaktig funktion hos reburningsystemet. I ett sådant fall skall tillförseln av reburningbränsle stoppas, varvid anläggningen återgår till normal drift.



Figur 1 Principkonstruktion
Design of a reburning installation

4. Studiens omfattning och inriktning

4.1 Systemdesign

Försöken har utförts i en konventionell vedeldad panna (Värmebaronen, Combimax 2000 UB) som konverterats till pelletsförbränning och försetts med en pelletsbrännare (JanFire flex). I figur 2 återfinns en schematisk bild av installationen efter de modifieringar som genomförts för att kunna studera katalytisk reburning.

Pelletsbrännaren matas med träpellets ($\varnothing 6 - \varnothing 12$ mm) av lämplig kvalitet och förbränningen sker på en roster dit bränslet kontinuerligt matas med skruv. Beroende på vald effektnivå sker bränslematningen med olika hastighet. Rökgaserna förs in i pannrummet och vidare genom två parallella kyltuber ($\varnothing 81$), vilka mynnar i ett by-pass-schakt. Vid start av pannan låter man rökgaserna passera från pannrummet direkt in i by-pass-schaktet genom att by-pass-spjället öppnas. Rökgaserna förs slutligen till skorstenen via ytterligare två parallella kyltuber ($\varnothing 81$).

Installationen har modifierats så att energigas kan tillföras via flödesmätare i en position omedelbart före kyltuberna. Vid reburningdrift tillförs så mycket energigas att huvuddelen av restsyre och NO_x reduceras i reburningkatalysatorn (two). Sekundärluft tillförs i by-pass-schaktet via en varvtalsreglerad fläkt. Primär- och sekundärluftflöden mäts kontinuerligt m.h.a. anemometrar. Sekundärlufttillförseln återför rökgasblandningen till överstökiometriska förhållanden för att säkerställa en effektiv förbränning av CO/VOC/UHC i oxidationskatalysatorn (oc2).

Emissionerna från rosterbrännare av denna typ kännetecknas av kraftigt ökande CO/VOC-halter då luftöverskottet vid förbränningen sänks till nivåer under 20 å 30%. För att möjliggöra studier av katalytisk reburning vid lägre luftöverskott kompletterades installationen med en oxidationskatalysator (oc1) före den position i vilken energigas tillförs. Avsikten med denna oxidationskatalysator är att reducera de CO/VOC-emissioner som uppstår vid låga luftöverskott och som skulle kunna inverka på och störa studierna av katalytisk reburning.

Temperaturen mäts kontinuerligt i samtliga tre katalysatorpositioner. Rökgasprov kan erhållas från fyra olika positioner:

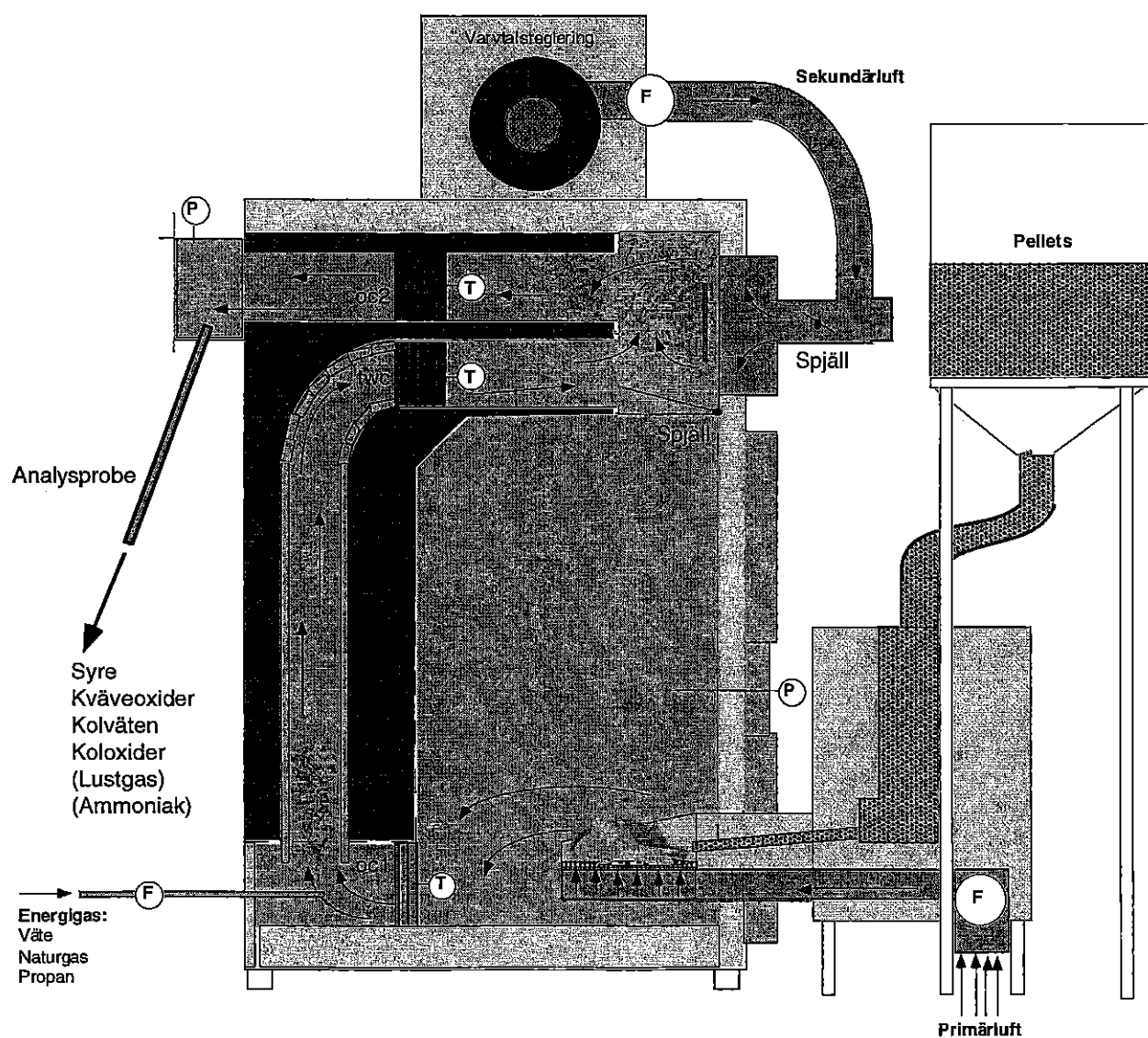
- I skorstenen, som markerats i figuren
- Omedelbart före oxidationskatalysator 1
- I by-pass-schaktet
- Omedelbart före reburningkatalysatorn

Genom att rökgasernas sammansättning kan följas längs rökgaskanalen erhålls en god bild av katalysatorernas funktion under olika driftbetingelser.

Pelletsbrännaren har fyra effektnivåer varvid det är möjligt att för varje effektnivå separat ställa primärluftflödet. För att uppnå tillräckligt höga rökgastremperaturer vid lågeffektdrift ($< 5 \text{ kW}_{\text{bränsle}}$) har rökgaskanalerna isolerats mot alltför effektiv kylning genom relining med keramiska tuber, jfr. figur 2. Härigenom säkerställs att temperaturen i reburningkatalysatorn uppgår till lägst ca 300°C under drift.

Försöken omfattar tester med olika energigaser som reurningbränslen. Målsättningen har varit att studera kommersiellt lättillgängliga bränslen (naturgas, gasol) såväl som bränslen som förmodas ha god effekt (vätgas, pyrolysgaser) vid katalytisk reurning. Som biobränsle har två pelletskvaliteter använts, kärnved respektive barkbränsle.

CO och CO₂ har analyserats med IR-instrument (ElectraControl, MGA 4000-T) medan syrehalten har fastställts genom en elektrokemisk mätmetod (Testoterm 350). Emissionerna av kolväten (VOC/UHC) har uppmäts med FID-instrument (Bernath atomic Model 3006) medan NO/NO₂-emissionerna har studerats m.h.a. elektrokemisk teknik (Testoterm 350) respektive genom kemiluminiscens (API, NO_x-analyser model 200).



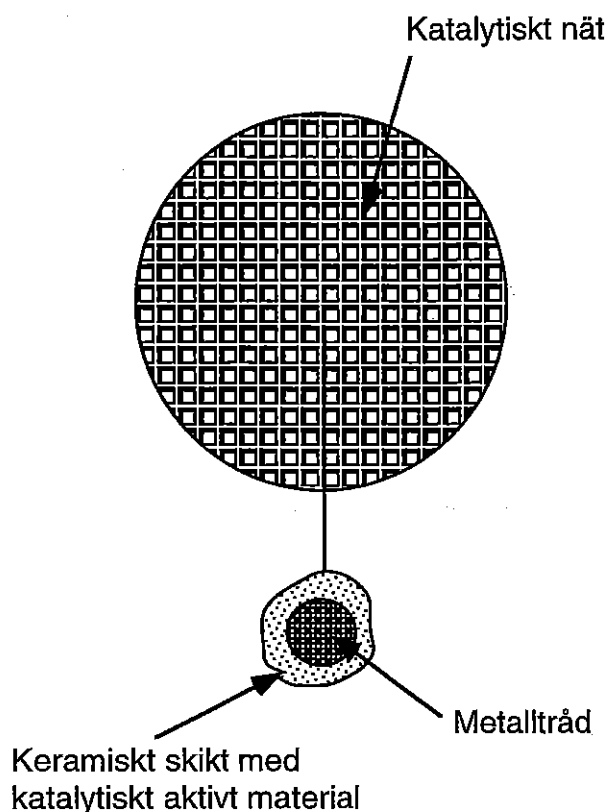
Figur 2 Experimentell utrustning
Experimental set-up

4.2 Katalysatorarrangemang och dimensionering

Katator AB har utvecklat ett unikt katalysatorkoncept som bygger på keramiskt belagda nätstrukturer, jfr. figur 3. De katalytiska näten medger en hög grad av geometrisk flexibilitet samtidigt som följdfördelar i form av låga tryckfall och höga mass-och värmeöverföringstal kan erhållas. De katalytiska näten är därför väl lämpade för insats i rökgasstråk i olika förbränningsanläggningar.

Masktäthet och tråddiameter kan väljas inom vida gränser. Parametrarna kan optimeras efter aktuell tillämpning. I stoftrik miljö bör relativt glesa nät (ca. 8 maskor per tum) användas för att minska problemen med askigensättning, som annars kan bli ett problem [2]. Tjockleken på det keramiska katalysatorskiktet samt olika morfologiska parametrar kan påverkas under tillverkningen så att katalysatorn kan skräddarsys för aktuell tillämpning.

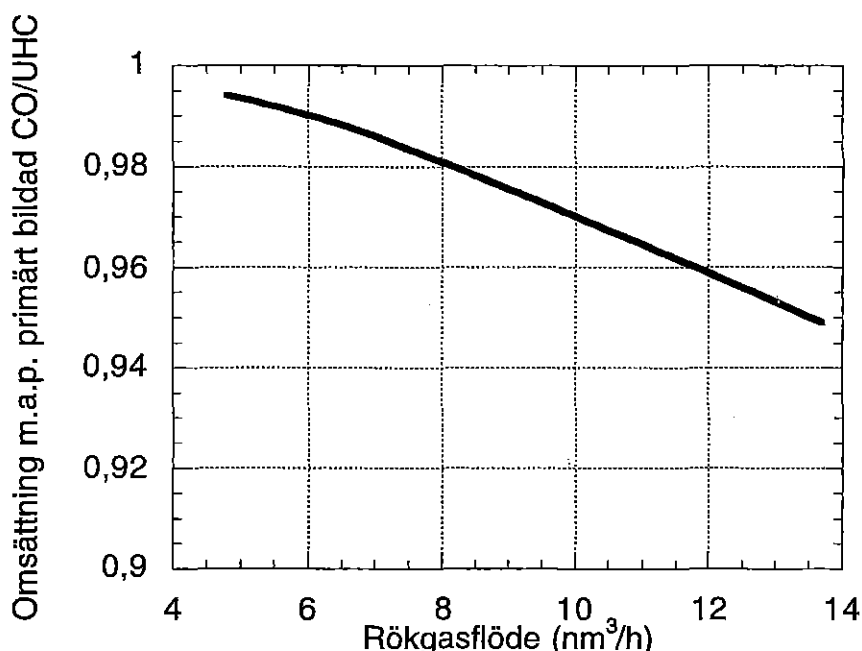
Katator AB har tidigare utvecklat en matematisk simuleringsmodell för att möjliggöra dimensioneringsberäkningar. Genom att utnyttja detta dimensioneringsverktyg i aktuell tillämpning har erforderlig katalysatormängd kunnat fastställas.



Figur 3 Nätkatalysatorns utseende
Appearance of the wire-mesh-catalyst

Oxidationskatalysator 1 baseras på katalytiska nät med en masktäthet på 6 maskor per tum och en tråddiameter på 0.9 mm. Nätet har belagts med ett aluminaskikt som sedan försetts med ett katalytiskt aktivt lager av Pt. Ett antal nät (6 st.) med tvärsnittsarean 0.013 m^2 placerades i serie i en position omedelbart före kyltuberna, jfr. figur 2. Den totala reaktorvolymen uppgick till ca 0.15 dm^3 . Figur 4 redovisar den förväntade omsättningen m.a.p. CO som funktion av volymflödet (nm^3/h). Vid maximal effekt uppgår flödesbelastningen till ca 100 000 katalysatorvolymper per timme, vilket är en mycket hög gasbelastning. Som framgår ur figuren förväntas omsättningen under de aktuella förhållandena ligga kring 95% eller högre.

Eftersom förbränningsreaktionerna är fullständigt masstransportkontrollerade erhålls ungefär samma omsättningsgrader för lätta kolväten (kolväten med ungefär samma molekylvikt som CO). Omsättningen m.a.p. tunga kolväten kan dock förväntas vara något lägre.

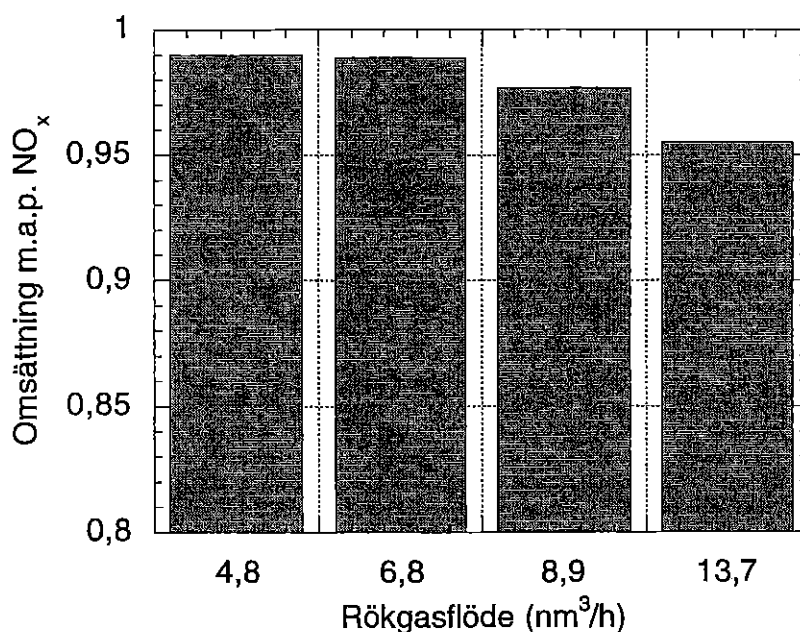


Figur 4 Förväntad reduktionsgrad m.a.p. CO/UHC i oxidationskatalysator 1
Calculated CO-conversion in oxidation catalyst 1

Genom insats av oxidationskatalysator 1 bör det således vara fullt möjligt att reducera det primära luftöverskottet vid förbränningen utan att riskera alltför höga utsläpp av CO/VOC.

Reburningkatalysatorn respektive oxidationskatalysator 2 baseras på aluminabelagda nät med en masktäthet på 8 maskor per tum och en tråddiameter på 0.7 mm. Reburningkatalysatorn belades med Pt/Rh medan den aktiva fasen i oxidationskatalysatorn utgjordes av Pt. Anledningen till att något tätare nät kan användas i dessa positioner är att stoftbelastningen förväntas vara lägre här. Totalt används 6 st. reburning- respektive oxidationsnät i serie ($\varnothing 80$) i de respektive kyltuberna. I figur 5 redovisas den förväntade

omsättningen av NO_x då H_2 används som reduktionsmedel vid några olika rökgasflöden. De respektive rökgasflödena hänför sig till de olika effektlägena på pelletsbrännaren (4, 5.7, 7.5 respektive 11.3 $\text{kW}_{\text{bränsle}}$). Ur figuren framgår att omsättningen m.a.p. NO_x under idealiska förhållanden bör kunna bli högre än 95%. Effekter av snedfördelning och otätheter medför dock att de experimentella omsättningarna förväntas bli något lägre.



Figur 5 Förväntad reduktionsgrad m.a.p. NO_x som funktion av flödesbelastningen
Calculated conversion of NO_x vs. the flue-gas flow

Tryckfallet över katalysatorinstallationen (samtliga katalysatorer) bedöms uppgå till ca 40 Pa vid högsta effekten (11.3 $\text{kW}_{\text{bränsle}}$, 13.7 nm^3/h). Nivån på tryckfallet bedöms inte medföra några problem eftersom primär- och sekundärluft tillförs med fläktar.

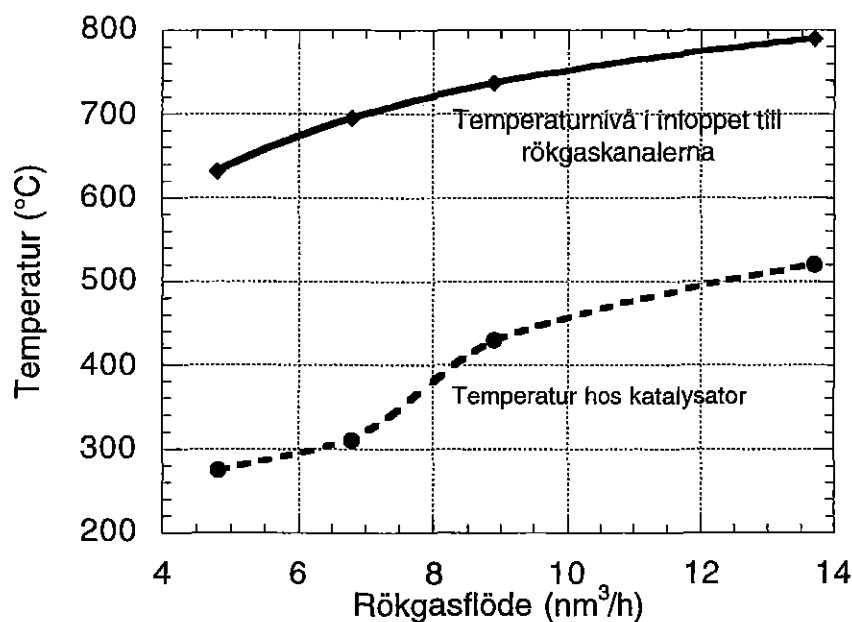
4.3 Förbränningstekniska prestanda

Temperaturen har uppmätts som funktion av rökgasflödet, dels i oxidationskatalysator 1 (oc1) och dels i reburningkatalysatorn (two). Som framgår ur figur 6 så arbetar reburningkatalysatorn i ett optimalt temperaturfönster (400 - 800°C) vid rökgasflöden mellan 8 och 14 nm^3/h (effektnivå 3 och 4).

Temperaturnivån i oxidationskatalysator 1 är tillräckligt hög för att uppnå en effektiv rening m.a.p. CO/VOC i samtliga effektlägen.

Eftersom reburningprocessen är exoterm erhålls ett temperaturläskott i reburningkatalysatorn på 50 – 250°C (beroende av storleken på energigastillförseln). Härigenom

säkerställs också att temperaturnivån i oxidationskatalysator 2 normalt är tillräckligt hög för effektiv reduktion av CO, VOC och UHC.



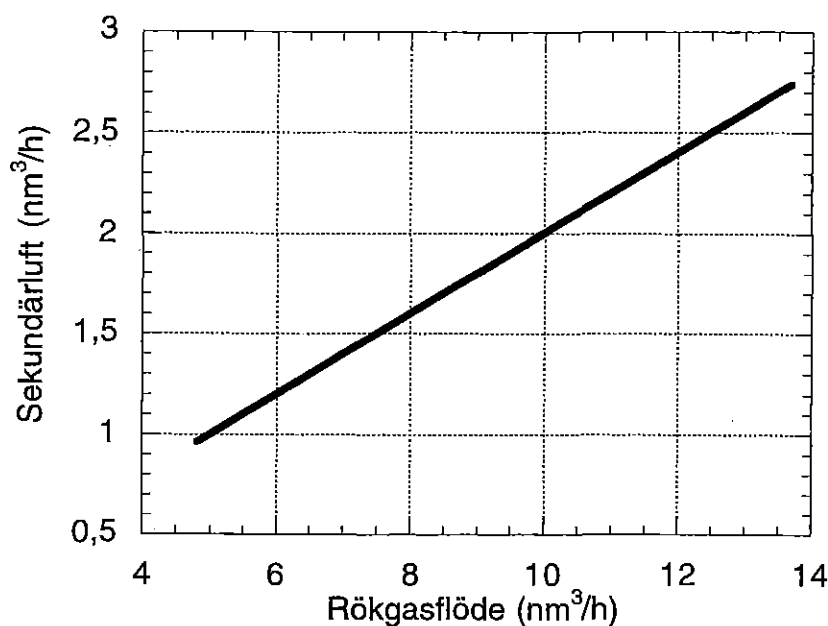
Figur 6

Rökgasernas temperatur omedelbart efter brännkammaren samt omedelbart före reburningkatalysatorn som funktion av rökgasflödet

Flue-gas temperatures immediately after the combustion chamber and in i position immediately before the reburning catalyst vs. the flue-gas flow

Vid reburningprocessen reagerar syre och NO_x med energigasen i katalysatorn, varvid restsyrehalten blir mycket låg. För att återföra gasblandningen till överstökiometriska förhållanden tillförs sekundärluft. I figur 7 redovisas storleken på sekundärlufttillförseln som funktion av rökgasflödet (nm³/h). Grafen anger det sekundärluftflöde som erfordras för att öka lambdavärdet med 0.1 enheter, från 1.0 till 1.1.

Målsättningen är att sekundärlufttillförseln skall vara så liten som möjligt. Den undre gränsen för sekundärlufttillförseln är avhängig funktionen hos oxidationskatalysator 2. Alltför låg syrehalt medför att återoxidationen av oförbrända komponenter sker med dålig verkningsgrad, varvid utsläppen ökar.



Figur 7 Sekundärluftflödet som funktion av rökgasflödet för att
åstadkomma en ökning av lambdavärdet med 0.1
Secondary air flow necessary to increase the lambda value by 0.1
units vs. the flue-gas flow

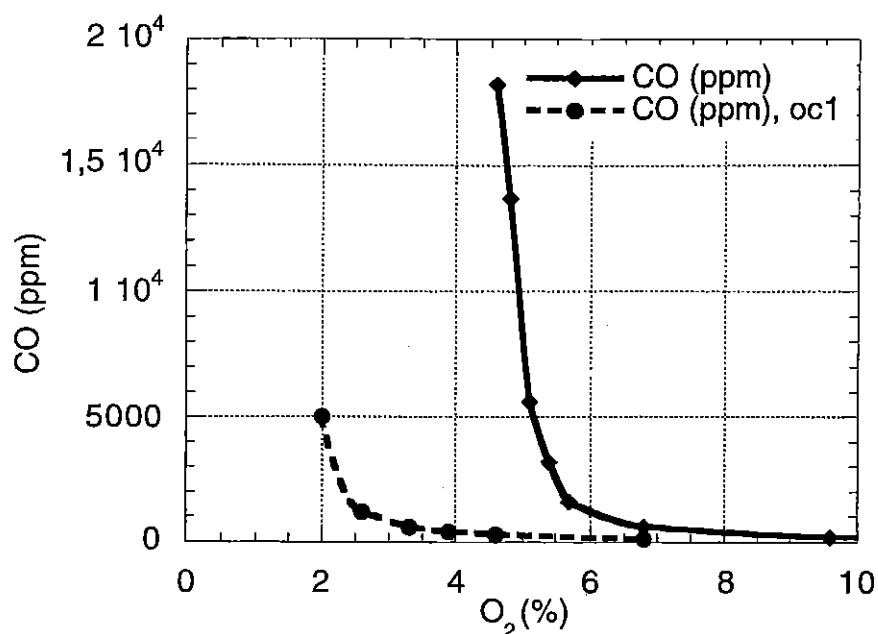
De förbränningstekniska studierna har indelats i ett antal relevanta områden, vilka redovisas i nästföljande kapitel:

- A) Tester utförda vid olika syreöverskott i brännkammaren
- B) Studier av olika energigaser vid katalytisk reburning
- C) Jämförande försök med olika kvaliteter av bibränslen
- D) Effekterna av sekundärluftinjektion och återoxidation
- E) Långtidsförsök avseende katalytisk reburning
- F) Katalytisk reburning vid syreöverskott

5. Studiens genomförande och resultat

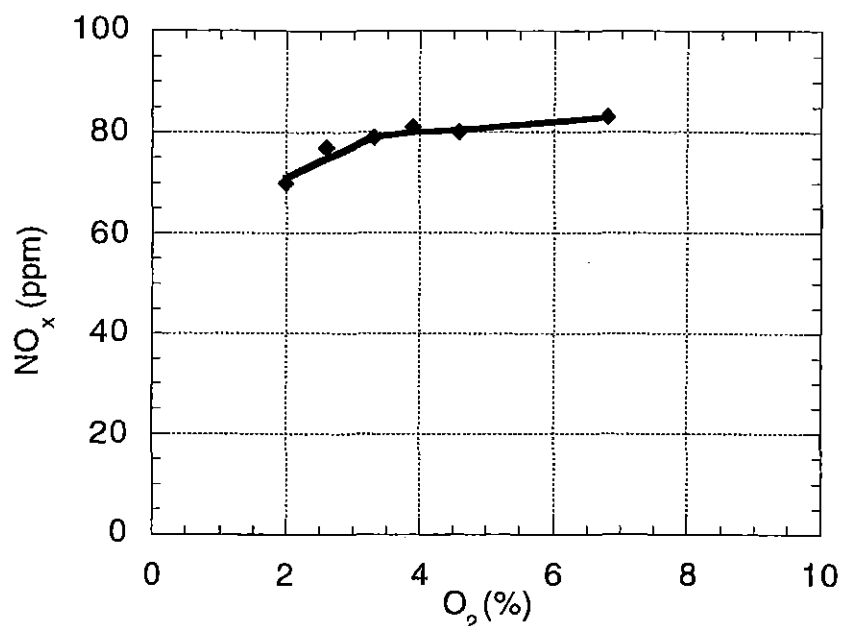
5.1 Tester utförda vid olika syreöverskott i brännkammaren

För att studera effekterna av oxidationskatalysator 1 (oc1) genomfördes försök med pelletsförbränning vid varierat luftöverskott i brännkammaren. I frånvaro av oc1 erhöles, som framgår ur figur 8, kraftigt ökade halter av CO i rökgaserna vid syrehalter under ca 6 vol%. Genom insats av oxidationskatalysator förskjuts den kritiska syrehalten nedåt, vilket möjliggör studier under realistiska förhållanden m.a.p. luftöverskottet då det gäller stora anläggningar. VOC-emissionerna följer exakt samma mönster som CO-emissionerna och påverkas i samma utsträckning av oxidationskatalysatorn som CO.



Figur 8 Rökgasernas innehåll av CO som funktion av syrehalten vid närvaro/frånvaro av oxidationskatalysator 1
 Flue-gas content of CO vs. the oxygen content in the presence and in the absence of oxidation catalyst 1

Kraftigt ökade halter av CO/VOC kan förväntas medföra sjunkande halter av NO_x till följd av homogenfasreaktioner i gasfas. Genom att mäta NO_x-halten i rökgaserna som funktion av restsyrehalten kunde konstateras att NO_x-bildningen minskar vid låga syrehalter, sannolikt till följd av homogenfasreaktioner (jfr. figur 9). Genom att enbart sänka luftöverskottet vid förbränningen skulle det alltså teoretiskt vara möjligt att minska NO_x-utsläppen till viss del. Problemet är att denna NO_x-reduktion sker till priset av oacceptabelt höga utsläpp av CO/VOC. Om en oxidationskatalysator placeras nedströms förbränningsrummet kan dock bildad CO/VOC effektivt förbrännas, vilket tidigare visats i figur 8 ovan.



Figur 9 Syrehaltens inverkan på rökgasernas halt av NO_x (utan katalysator)
 The NO_x-level plotted as a function of the oxygen content of the
 flue gases (no catalyst present)

Fastbränsleförbränning kännetecknas av kraftiga koncentrationsgradienter m.a.p. olika gaskomponenter. Även om genomsnittshalten av syre uppgår till några volymprocent förekommer zoner där förhållandena är understökiometriskas. Det är i dessa zoner som en viss NO_x-reduktion kan erhållas via homogenfasreaktioner.

Låga syrepotentialer medför risk för ofullständig utbränning av bränslet. Härigenom ökar askans innehåll av koks, vilket sekundärt leder till en försämrad bränsleekonomi. Utbränningsgraden är komplext beroende av ett flertal parametrar och kan vara svår att avgöra i ett specifikt fall utan experimentella undersökningar. I vissa anläggningar (lång uppehållstid för bränslet i förbränningsszonen) erhålls ingen signifikant försämring av utbränningsgraden då syrepotentialen minskas medan problemen sannolikt blir svåra att hantera i anläggningar vars konstruktion bygger på höga förbränningstemperaturer och korta uppehållstider.

Isokinetisk uppsamling av stoft har genomförts i den position där reburningkatalysatorn avses placeras. Mätningarna visar att stofthalten var mycket låg, <50 mg/MJ_{bränsle}, vilket sannolikt förklaras av den relativt låga medryckningshastigheten i kyltuberna. Beroende på den låga stofthalten bör igensättningsproblem i katalysatorn kunna undvikas. I en verklig installation kommer stofthalten i de flesta fall att vara avsevärt högre. En högre stofthalt utgör dock inget problem, förutsatt att katalysatorn dimensionerats korrekt med avseende på öppningar/kanalvidd.

I avsikt att säkerställa en reproducerbar och tillförlitlig emissionsmätning genomfördes en kartläggning av koncentrationsgradienterna för olika gaskomponenter i de respektive samplingspositionerna. Kartläggningen visade att fullständig homogenitet rådde i samtliga samplingspunkter, vilket också är naturligt eftersom en effektiv homogenisering sker i katalysatorerna, vilka fungerar som statiska omblandare. Vidare hinner en viss homogenisering ske via konvektions- och diffusionsprocesser i kyltuberna. I verkliga anläggningar kommer problemen med koncentrationsgradienter och stråkbildning att vara väsentligt större, vilket kan medföra degraderad katalysator-funktion.

Eftersom inga gradient- och stoftproblem förekommer i den valda försöksutrustningen kan studien således renodlas på katalysatortekniska parametrar, vilket också var syftet.

5.2 Studier av olika bränslegaser vid katalytisk reburning

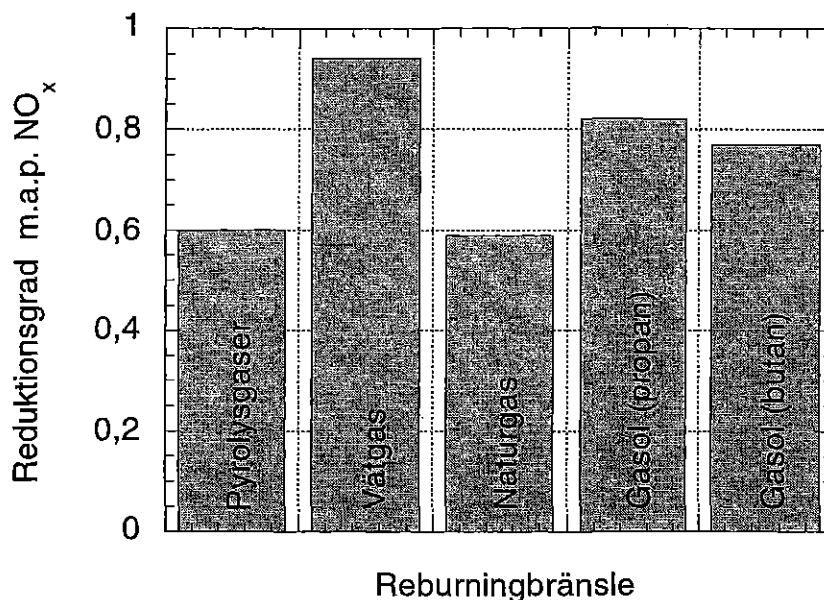
Försök har utförts med en rad olika reburningbränslen, vätgas, propan, butan och naturgas. Vidare har försök utförts att justera ned primärlufttillförseln så att kraftigt förhöjda halter av CO/VOC erhålls före reburningkatalysatorn. Avsikten härvid var att utnyttja de bildade pyrolysgaserna som reduktionsmedel i reburningprocessen.

Luftöverskottet vid biobränsleförbränningen varierades i studierna mellan 10 och 30%. Sekundärluft tillfördes för att återföra rökgasblandningen till överstökiometrisk förhållanden (ca. 3 vol% syre i skorstenen). Efter det att primärlufttillförseln justerats till önskat läge tillfördes reburningbränsle i en sådan kvantitet att restsyret förbrukades samtidigt som en signifikant NO_x-reduktion erhöles. Över en viss nivå på tillförseln av reburningbränsle erhöles ingen ytterligare minskning av NO_x-halten, utan endast ökade emissioner av CO/VOC/UHC. Värdet på den kritiska tillsatsen av reburningbränsle respektive maximalt uppnådd reduktionsgrad av NO_x var beroende av reburningbränslets egenskaper. I figur 10 redovisas den maximala reduktionsgraden m.a.p. NO_x då olika reburningbränslen använts som reduktionsmedel. Reduktionsgraden kunde beräknas genom att NO_x-halten före och efter reburningkatalysatorn analyserades under experimenten.

Bäst resultat erhöles då vätgas användes som reduktionsmedel. Vätgas kännetecknas av hög katalytisk reaktivitet i kombination med goda masstransportegenskaper. Vätgas har vidare förmåga att tränga undan inhiberande gasfaskomponenter från katalysatorns yta genom stark kemisorption. Som framgår av figuren uppgick reduktionsgraden m.a.p. NO_x till ca 95% vid full last (11 kW_{bränsle}, ca 14 nm³/h). Detta värde är i mycket god överensstämmelse med den förväntade reduktionsgraden under dessa förhållanden då vätgas användes som reburningbränsle, jfr. figur 5.

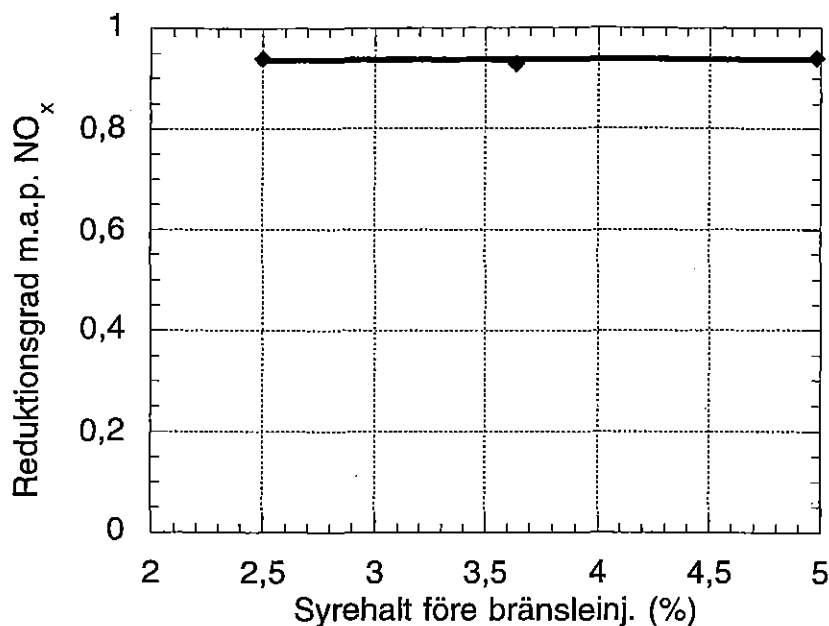
Genom att sänka luftöverskottet vid primärförbränningen erhöles kraftigt ökade halter av CO/VOC, fortsatt benämnda pyrolysgaser. Som framgår ur figuren uppgick den maximala reduktionsgraden m.a.p. NO_x till ca 60% i detta fall, d.v.s. väsentligt lägre än i fallet vätgas. CO/VOC har lägre reaktivitet och sämre diffusionsegenskaper än vätgas, vilket sannolikt förklarar den relativt dåliga verkningsgraden.

Gasol (propan och butan) ger ungefär likvärdiga resultat, ca. 80% reduktion av NO_x -halten. Naturgas har relativt låg katalytisk aktivitet, vilket också avspeglas i den relativt låga reduktionsgraden (knappt 60%).



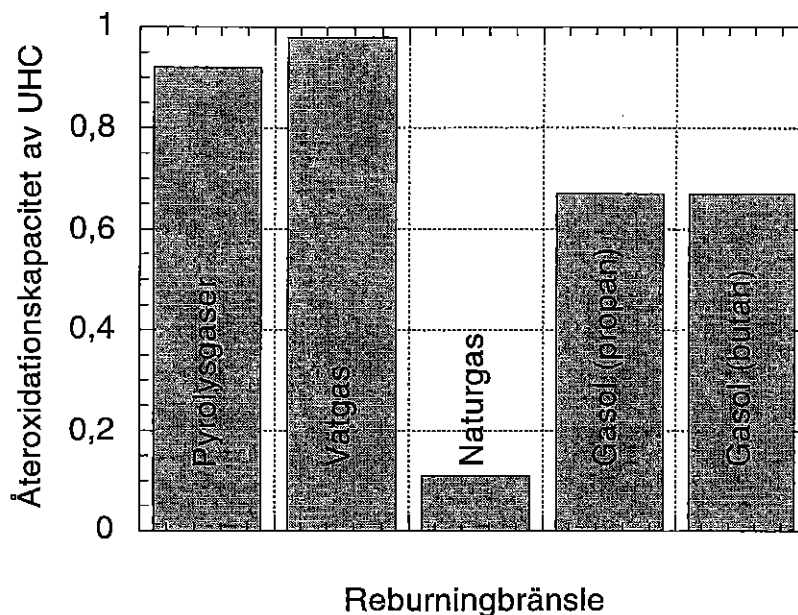
Figur 10 Maximal reduktionsgrad av NO_x för olika reburninggaser ($\text{SV}=60 \text{ kh}^{-1}$) (0% syre)
Maximum degree of NO_x -reduction for different reburning gases ($\text{SV}=60 \text{ kh}^{-1}$) (0% of oxygen)

Luftöverskottet vid förbränningen varierades, som tidigare nämnts, mellan 10 och 30%. Resultaten visar att reburningkapaciteteten är relativt oberoende av luftöverskottet vid förbränningen. Ett ökat syreöverskott måste dock kompenseras med ett ökat flöde av reburningbränsle, vilket kan leda till katalysatoröverhettning samt till ökade driftkostnader. Figur 11 redovisar hur reduktionsgraden m.a.p. NO_x varierar som funktion av syrehalten före injektionen av reburningbränsle.



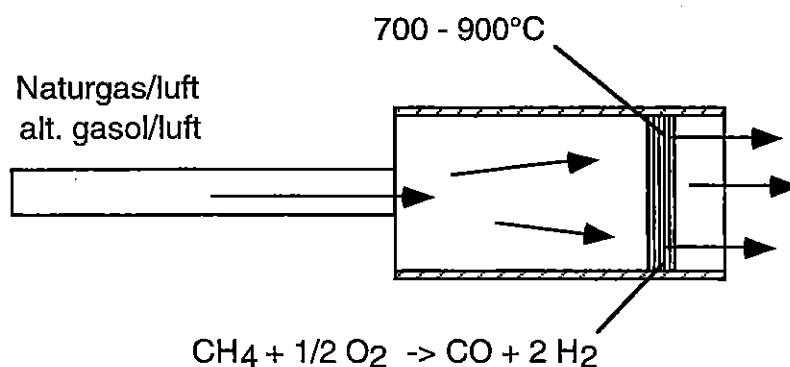
Figur 11 *Inverkan av primärluftöverskottet på NO_x-reduktionsgraden. (reburningbränsle: väte)*
The influence of the air-excess ratio on the reduction level of NO_x. (reburning fuel: hydrogen)

Experimenten med katalytisk reburning indikerar således att det finns en god potential för NO_x-reduktion med den beskrivna tekniken. För att tekniken skall kunna bli kommersiellt intressant krävs dock att återoxidationen av UHC fungerar med hög verkningsgrad. Genom att mäta halterna av UHC före och efter oxidationskatalysatorn, var det möjligt att beräkna återoxideringskapaciteten. Som framgår ur figur 12 föreligger problem att återoxidera bränslegaser som gasol och naturgas med tillräckligt hög verkningsgrad. För att lösa problem med acceptabla UHC-utsläpp måste antingen katalysatorn överdimensioneras kraftigt eller så måste drifttemperaturen ökas väsentligt (för naturgas krävs drifttemperaturer kring 600°C). Båda dessa alternativ förefaller svårbedömda i verkliga installationer, dels beroende på tekniska svårigheter att finna en plats med tillräckligt hög drifttemperatur och dels beroende på ekonomiska faktorer (hög installationskostnad då katalysatormängden ökar). Experimenten har dock visat att vätgas har speciellt goda egenskaper för NO_x-reduktion samtidigt som återoxidationen kan ske med hög effektivitet (jfr. figur 12).



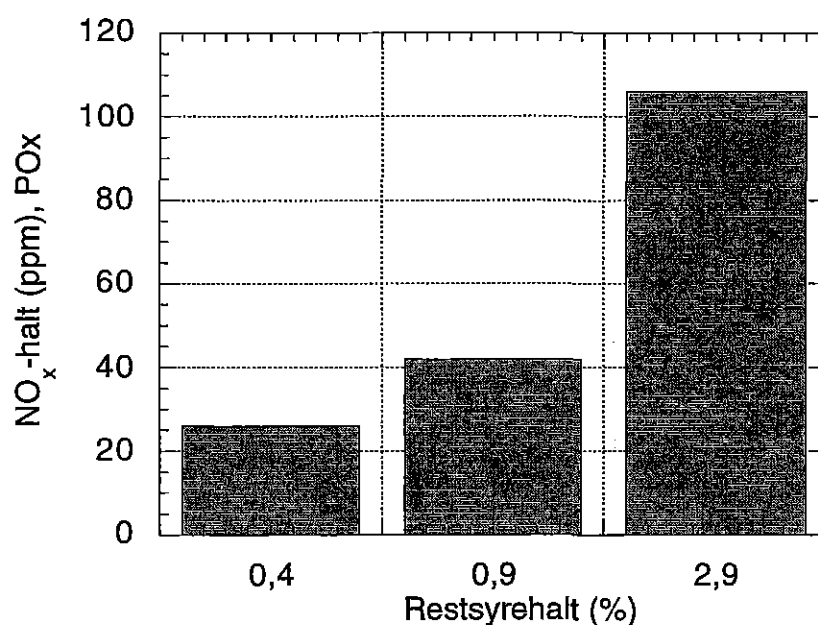
Figur 12 Återoxideringskapacitet för olika reburninggaser
Re-oxidation capacity of different reburning gases

Det är fullt möjligt att med utgångspunkt från konventionella bränslegaser (t.ex. naturgas och gasol) framställa en gasblandning som innehåller höga halter av H_2 och CO. Processen kan innefatta reformering eller partialoxidation eller en kombination av dessa metoder. För att indikera möjligheterna genomfördes ett försök med partialoxidation av naturgas/gasol. Partialoxidation är en svagt exoterm process, vilken resulterar i en blandning av H_2 och CO med molförhållandet 2:1 (partialoxidation av naturgas). En reaktor med diametern 35 mm tillverkades enligt figur 13. Ett katalytiskt aktivt nät (Pd-katalysator) placerades i reaktorn och en gasblandning av luft och naturgas leddes in i reaktorn via flödesmätare. Partialoxidationen startade omedelbart eftersom reaktorn förvärmades av de heta rökgaserna i pannan. Katalysatortemperaturen uppgick till 700 - 900°C under drift.



Figur 13 Reaktor för partialförbränning av naturgas/gasol.
Reactor for partial oxidation of natural gas/LPG.

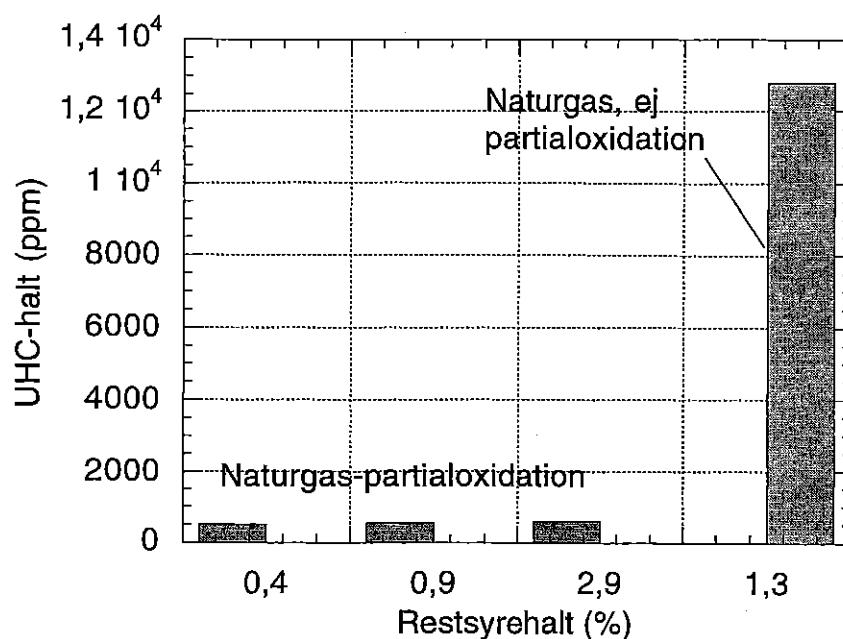
Figur 14 redovisar hur NO_x -halten efter reburningkatalysatorn varierar som funktion av uppmätt restsyrehalt. Vid en restsyrehalt på ca 3 vol% erhöles ingen synbar reduktion och NO_x -halten låg på drygt 100 ppm. Då restsyrehalten minskades erhöles en signifikant minskning av NO_x -halten (ca 80% reduktion vid en restsyrehalt på ca 0.4%). Genom partialförbränningen av naturgas erhöles således en högre reduktionsgrad av NO_x jämfört med om naturgas får reagera direkt med NO_x på reburningkatalysatorn. Av ännu större intresse är att studera partialförbränningens inverkan på utsläppen av UHC efter reburningkatalysatorn. Då naturgas används som reburningbränsle erhöles UHC-emissioner på över 10 000 ppm vid den maximala NO_x -omsättningen, jfr. figur 15. Då partialförbränd naturgas används som reburningbränsle erhöles ingen ökning av UHC-emissionerna jämfört med vid normaldrift (utan katalytisk reburning). UHC-emissionerna motsvarar således de normala VOC-emissionerna under de aktuella driftförhållandena.



Figur 14 NO_x -halten som funktion av restsyrehalten då partialförbränd naturgas används som reburningbränsle.
 NO_x -level as a function of the oxygen level when partial combusted natural gas is used as a reburning fuel

Ur figur 15 framgår att UHC-emissionen är oberoende av restsyrehalten, vilket innebär att stökiometrisk drift möjliggörs. Liknande försök utfördes med gasol (propan) varvid likartade resultat erhöles.

Utrustningen för partialoxidation av olika bränslen är synnerligen enkel samtidigt som erforderlig katalysatormängd är ytterst liten. Att inkludera katalytisk partialoxidation i en katalytisk reburninginstallation medför därför endast en marginell ökning av investeringskostnaden.



Figur 15 Utsläpp av oförbrända kolväten som funktion av restsyrehalten (trevägskat.)
Emission of UHC as a function of the oxygen level. (in the two)

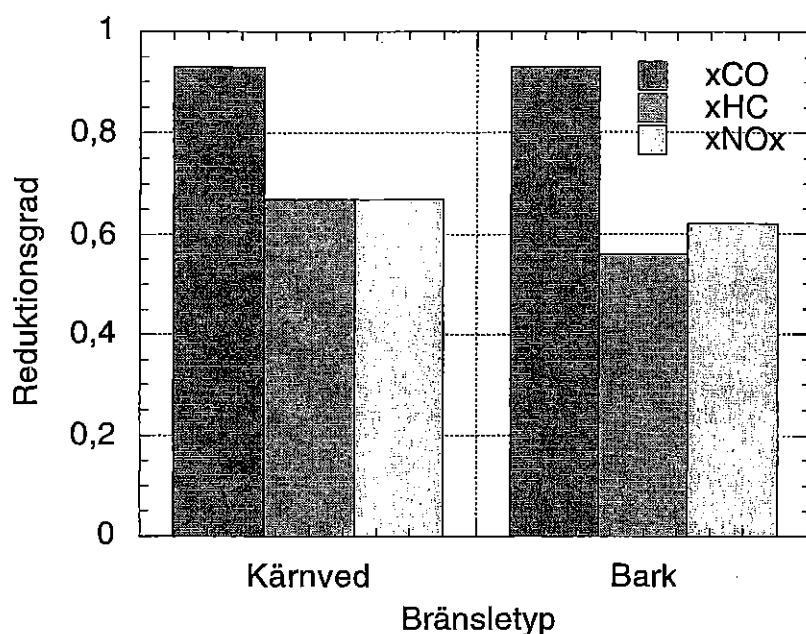
Försöken visar att vätgas/pyrolysgaser kan användas som reduktionsmedel vid katalytisk reburning. Om bränslegaser såsom naturgas och gasol skall användas måste kolvätena sänderdelas till en blandning av H_2/CO , vilket kan ske genom partialoxidation eller reformering. Reduktionsgraden m.a.p. NO_x blir generellt hög och motsvarar de förväntade värdena. Syreöverskottet vid biobränsleförbränningen bör vara så lågt som möjligt i avsikt att begränsa erforderligt tillflöde av reburningbränsle.

5.3 Jämförande försök med olika kvaliteter av biobränslen

Biobränsle är en mycket inhomogen grupp av bränslen, kännetecknad av varierande elementarsammansättning, varierande fukt- och askhalt samt olika morfologiska egenskaper. För att bedöma om tekniken är känslig för variationer i bränslekvalitet har försök utförts med pellets baserade på kärnved och pellets baserad på bark.

Förbränningsförsök utförda utan katalysator visar att såväl SO_x - som NO_x -emissionerna är högre då barkbränsle förbränns. Rökgasernas NO_x -halt uppgick till kring 80/90 ppm vid förbränning av kärnved (20% luftöverskott) medan motsvarande värde för barkbränsle låg kring 200/220 ppm.

I figur 16 redovisas försök där gasol (propan) använts som reburningbränsle via direktinjektion. Reduktionsgraden med avseende på NO_x är likvärdig för de båda biobränslena med hänsyn till de experimentella osäkerheterna. Funktionen hos oxidationskatalysatorn är också relativt likvärdig även om tendenser finns till en något lägre återoxideringskapacitet i fallet barkbränslen (för kolväten). Detta kan bero på inhiberingseffekter förorsakade av rökgasernas ökade innehåll av SO_x .



Figur 16 *Reduktionsgrader med olika träbränslen*
Reduction degrees obtained with different bio-fuels

5.4 Effekterna av sekundärluftinjektion och återoxidation

Som berörts tidigare kan återoxidationen av H_2 och CO utföras med god effektivitet, varvid nettoemissionerna till atmosfären blir låga. Problem med höga UHC-emissioner uppstår då bränslegaser (naturgas, gasol etc.) används som reburningbränsle via direktinlämning. För att möjliggöra ett utnyttjande av bränslegaser som reburningbränslen måste partialoxidation tillämpas för att överföra kolväte till en H_2 /CO-blandning.

För att återoxidationen av CO/ H_2 skall kunna ske med tillräcklig effektivitet bör syrehalten i den rökgasblandning som når oxidationskatalysatorn ligga på lägst 2 vol%. Denna nivå har fastställts genom teoretiska beräkningar samt verifierats experimentellt.

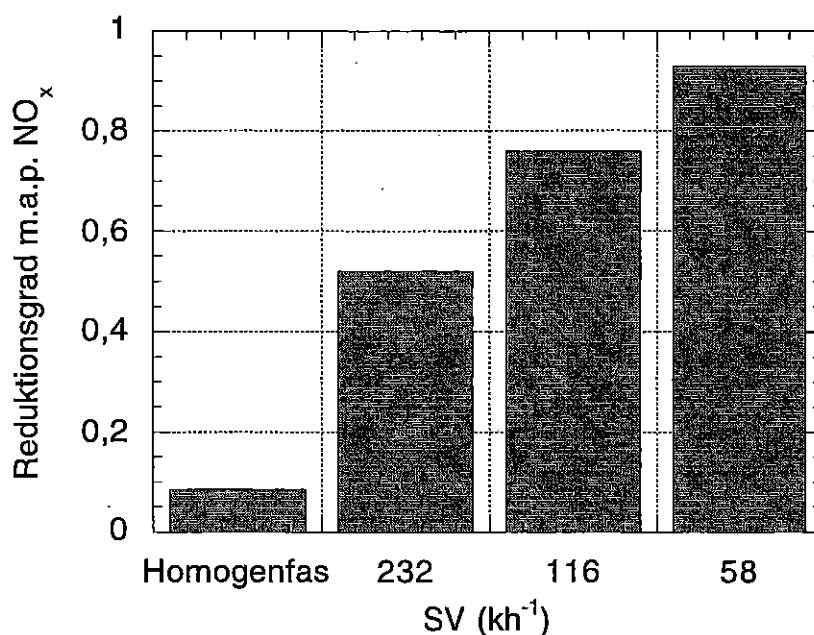
Återoxidationen av kolväten har ett större syreberoende än återoxidationen av H_2 /CO, vilket innebär att ett högre sekundärluftflöde erfordras för effektiv VOC/UHC-reduktion (normat ca 5%).

För att tekniken skall kunna kommersialiseras krävs att återoxidationen kan utföras med mycket hög effektivitet; återoxideringsgraden måste i de flesta fall ligga på 98 - 99%. Så höga reduktionsgrader är endast tekniskt/ekonomiskt möjliga då H_2 /CO-blandningar används som reburningbränsle, antingen genom direktinlämning eller genom partialförbränning/reformering av kolväten.

5.5 Fastläggande av optimal driftprofil vid katalytisk reburning

Effekterna av flödesbelastningen studerades genom att variera antalet nät i serie i reburningkatalysatorn. Figur 17 redovisar reduktionsgraden m.a.p. NO_x som funktion av flödesbelastningen (space velocity) då vätgas användes som reburningbränsle. Som framgår ur figuren får inte flödesbelastningen överstiga ca $60\,000\text{ h}^{-1}$ (reaktorvolym per timme) för att det skall vara möjligt att uppnå reningsgrader på 90% med aktuell katalysatorgeometri (nät med masktalet 8). En halvering av katalysatorvolymen medför att reduktionsgraden minskar från drygt 90% till ca 75%. I en verklig installation kan det dock vara ekonomiskt mer lönsamt att driva reningen till en lägre reduktionsgrad än 90% eftersom marginalkostnaden för katalysatorn är hög vid ökad reningsgrad.

Reduktionsgraden m.a.p. NO_x mättes i frånvaro av katalysator varvid en viss (ca 10%) reduktion kunde observeras. Denna effekt förklaras av homogenfasreaktioner mellan NO_x , CO och UHC/VOC, vilka gynnas av långa uppehållstider vid hög temperatur.



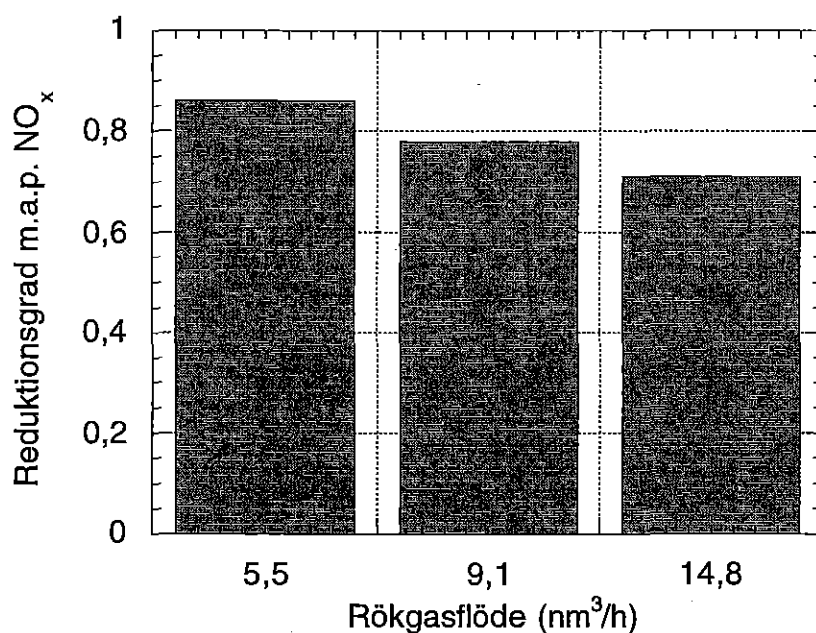
Figur 17

*Inverkan av flödesbelastningen på reduktionsgraden m.a.p. NO_x
The influence of the space velocity on the reduction degree with respect to NO_x*

Nätkatalysatorer kännetecknas av extremt god mass-och värmeöverföringskapacitet. Mass-och värmeöverföringskapaciteten ökar dessutom med ökad gashastighet, vilket innebär att det för en bestämd nätyta är gynnsammast att dela nätytan på flera nät i serie

med en liten tvärsnittsarea. I figur 18 redovisas försök där rökgasflödet varierats (olika lastlägen) vid konstant katalysatorvolym. Flödesbelastningen uppgick till 116 kh^{-1} vid

det högsta gasflödet. Då gasflödet minskades från $14,8$ till $5,5 \text{ nm}^3/\text{h}$ minskade flödesbelastningen till ca 43 kh^{-1} . Reduktionsgraden m.a.p. NO_x ökade dock bara från drygt 70% till ca 85%. Om detta resultat jämförs med iakttagelserna i figur 17 följer att det är oekonomiskt att dimensionera katalysatorn så att flödes hastigheten genom denna blir låg. Då gashastigheten hölls konstant ($14,8 \text{ nm}^3/\text{h}$) vid varierad katalysatorvolym erhöles en reduktionsgrad på ca 95% vid en flödesbelastning på 58 kh^{-1} .



Figur 18 Rökgasflödets inverkan på NO_x -omsättningen
Influence of the flue-gas flow on the NO_x -conversion

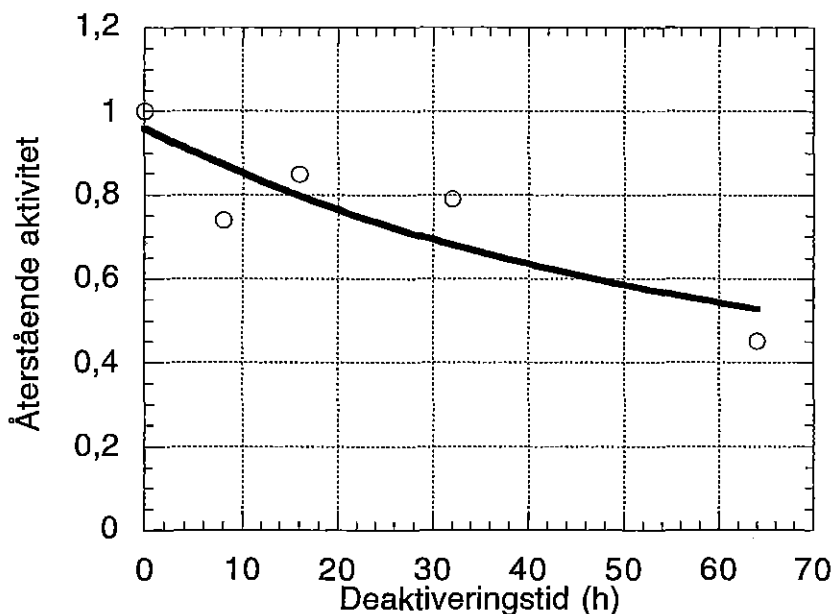
Slutsatsen av de genomförda studierna är att flödesbelastningen bör ligga mellan $50\,000$ och $100\,000 \text{ h}^{-1}$ för att reduktionsgraden m.a.p. NO_x skall bli 80 å 90%. En ökad gashastighet medför att katalysatorutnyttningen förbättras eftersom masstransportbegränsningarna vid reaktionen minskar. En hög gashastighet ger dock upphov till ett större tryckfall, vilket kan vara ett problem i vissa anläggningar.

5.6 Resultat från långtidsförsök

Det är känt att katalysatorer tämligen snabbt deaktiveras i rökgasmiljö från biobränsleförbränning [3]. Deaktiveringen förorsakas av alkaliaerosoler som kondenserar på och i katalysatorn varvid foulingfenomen uppträder. I avsikt att studera deaktiveringsförloppet vid katalytisk reburning genomfördes ett långtidsförsök i försöksutrustningen. Långtidsförsöket fick pågå under knappt 100 timmar och katalysatorernas aktivitet följdes under deaktiveringsförloppet. Figur 19 redovisar hur reburningkatalysatorns aktivitet

m.a.p. NO_x -reduktion avtar som funktion av drifttiden. Deaktiveringstrenden är hyperbolisk, vilket är typiskt för deaktivering genom fouling. Efter knappt 70 timmars drift har aktiviteten ungefär halverats, vilket motsvarar en minskning av reduktionsgraden från

90 till 70%. Deaktiveringshastigheten vid katalytisk reburning är god överensstämmelse med den deaktiveringshastighet som tidigare observerats i biobränsleinstallationer [3]. Temperaturen i reburningkatalysatorn uppgick till ca 600°C under långtidsförsöket. Deaktiveringshastigheten är beroende av drifttemperaturen och minskar om denna sänks.

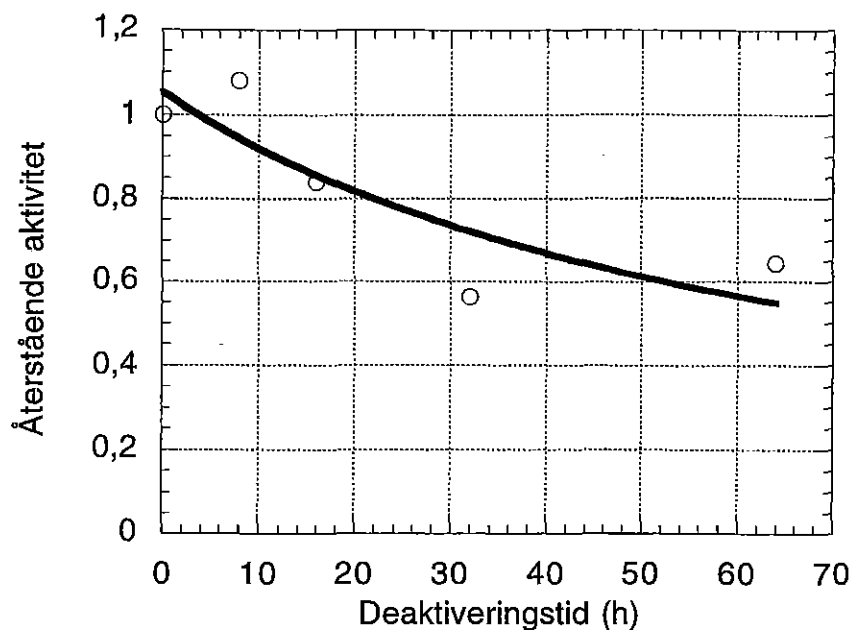


Figur 19 *Trevägs-katalysatorns aktivitet som funktion av drifttiden*
Activity of the three way catalyst vs. the time on stream

Oxidationskatalysatorns förmåga att förbränna CO följer samma deaktiveringsmönster som reburningkatalysatorn, jfr. figur 20. Deaktiveringsgraden efter 70 timmars drift är dock något lägre än för reburningkatalysatorn, endast ca 40%.

Genom att tvätta katalysatorerna i svagt surgjort vatten var det möjligt att återställa initialaktiviteten fullständigt. Analyser av lakvatten påvisade, som väntat, starkt förhöjda halter av kalium och svavel. Elementen förekom dessutom i molförhållandet 2:1, vilket indikerar förekomst av kaliumsulfat.

Fysikalisk karakterisering (uppmätning av porstorleksfördelning genom fysisorption, Micromeritics: Tristar) visade att katalysatorns mikroporositet förlorats under deaktiveringsförloppet beroende på porblockering av alkalisulfat. Genom tvättningen återbildades katalysatorns initiala porstruktur.



Figur 20

Oxidationskatalysatorns aktivitet som funktion av drifttiden
Activity of the oxidation catalyst vs. the time on stream

Långtidsförsöket påvisar en relativt snabb deaktivering av katalysatorn till följd av alkalipåslag. Deaktiveringen är dock fullständigt reversibel och full aktivitet kan återskapas genom ett enkelt tvättningsförfarande. Deaktiveringsförloppet följer ett hyperboliskt förlopp i tiden, vilket är typiskt för denna typ av deaktivering. Deaktiveringsmekanismen är identisk med den som gäller för ädelmetallbaserade oxidationskatalysatorer i konventionella bibränsleinstallationer.

I en verklig installation krävs därför att katalysatorn med viss regelbundenhet kan tvättas för att ta bort beläggningarna av alkalisulfat.

5.7 Kolväte-SCR, mikroreaktorförsök samt modelltest

En alternativ utformning av katalytisk reburning är kolväte-SCR, varvid bibränsleförbränningen får ske vid normalt luftöverskott. Lämpligt kolväte (t. ex. propan eller propan, dock inte metan) injiceras genom inloppet för energigastillförsel i ett volymflöde som motsvarar 1 - 5 ggr rökgasens volymflöde av NO_x . Reburningkatalysatorn ersätts med en kolväte-SCR-katalysator, som utgörs av en nätuppburen övergångsmetallinbytt zeolit. Eftersom syreförbrukningen över denna katalysator är marginell krävs ingen sekundärluftsinjektion för att säkerställa en effektiv oxidation av HC/CO. Oxidationskatalysatorn kan i detta fall placeras direkt efter kolväte-SCR-katalysatorn. Installationen blir enklare eftersom sekundärluftsinjektion undviks samtidigt som katalysatorn kan koncentreras till en position. Behovet av styrning och övervakning minskar också. Nackdelen med denna teknik är att NO_x -reduktionsgraden endast ligger i intervallet 30 - 70%, vilket dock kan vara tillräckligt i vissa anläggningar.

I avsikt att studera möjligheterna med kolväte-SCR genomfördes en rad mikroreaktorförsök med simulerad rökgasblandning. Olika katalysatorer (olika zeoliter respektive olika metallinbytnings) undersöktes m.a.p. reduktionskapacitet. Bäst resultat erhöles med Cu-inbytt hydrofob ZSM5.

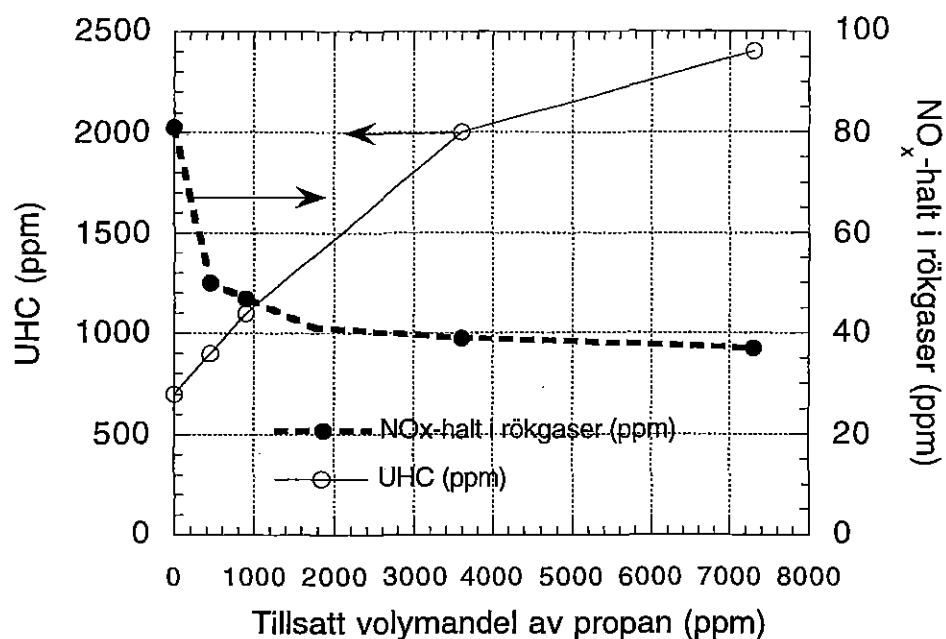
Genom att studera olika reduktionsmedel kunde konstateras att propen, propan och vätgas kan utnyttjas medan metan har för låg reaktivitet. Reduktionsgraden m.a.p. NO_x ökar monotont då förhållandet mellan kolväte och NO_x ökas. Marginaleffekten av ett ökat molförhållande är liten vid kolväte: NO_x -förhållande överstigande ca 10:1.

Reduktionen av NO_x sker parallellt med en syrereduktion, vilket innebär att reduktionsgraden når ett optimum vid en viss temperatur och ett visst gasflöde. Högst reduktionsgrad (ca 70%) erhöles vid temperaturer mellan 400 och 550°C.

Resultaten från mikroreaktorförsöken sammanfattades i en matematisk beräkningsmodell varigenom dimensioneringsberäkningar kunde genomföras. Katalysatornät baserade på Cu-inbytt zeolit placerades i försöksutrustningen varefter försök genomfördes med kolväte-SCR i reell rökgasatmosfär. Vid försöken uppmättes NO_x -och kolvätehalterna före och efter zeolitkatalysatorn. Ingen oxidationskatalysator för UHC hade inkluderats i katalysatorpaketet vid dessa försök. Figur 21 redovisar hur NO_x -halten varierar med tillsatt volymandel kolväte (propan). Som framgår ur figuren erhöles en reduktionsgrad på ca 50% vid en tillsats av ca 2000 ppm propan. Restsyrehalten vid försöken var 6% och flödesbelastningen i katalysatorn uppgick till ca 60 000 h^{-1} . Genom en optimering av driftbetingelserna är det sannolikt möjligt att öka reduktionsgraden och att minska kolvätetillsatsen. Sådana optimeringsstudier ligger dock utanför syftet med denna undersökning.

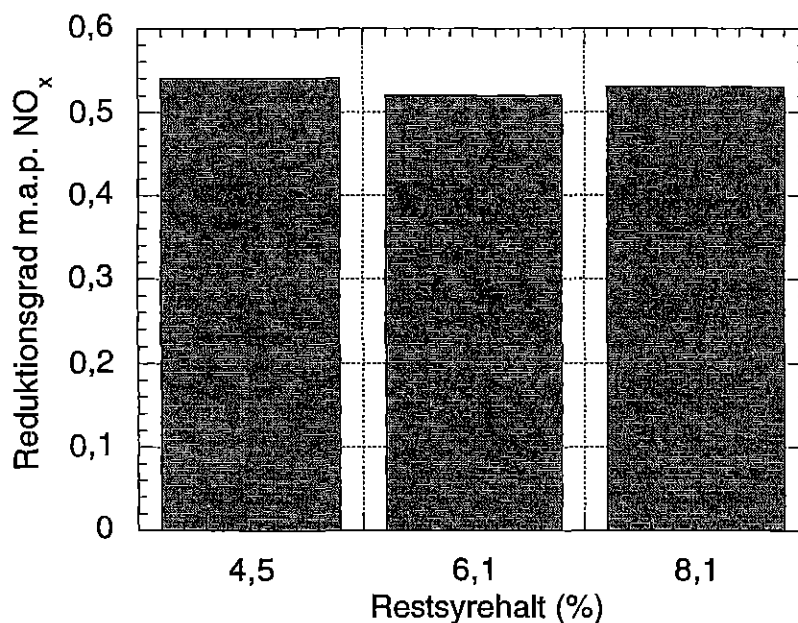
Det finns ingen tydlig inverkan av syrehalten på reduktionsgraden av NO_x , vilket framgår ur figur 22 där primärlufttillförseln vid förbränningen varierats. Vid försöken tillfördes 2000 ppm propan och flödesbelastningen uppgick, som tidigare, till ca 60 000 h^{-1} .

Likartade försök med propen som reduktionsmedel indikerar något bättre prestanda (lägre kolväteåtgång), sannolikt beroende på en högre reaktivitet. Försök med metan verifierar de dåliga erfarenheterna från mikroreaktorförsöken; ingen detekterbar reduktion kunde erhöles.



Figur 21

Effekterna av kolväte-SCR då tillsatsen av propan varierar
The effects of HC-SCR when adding different amounts of propane to the flue gases

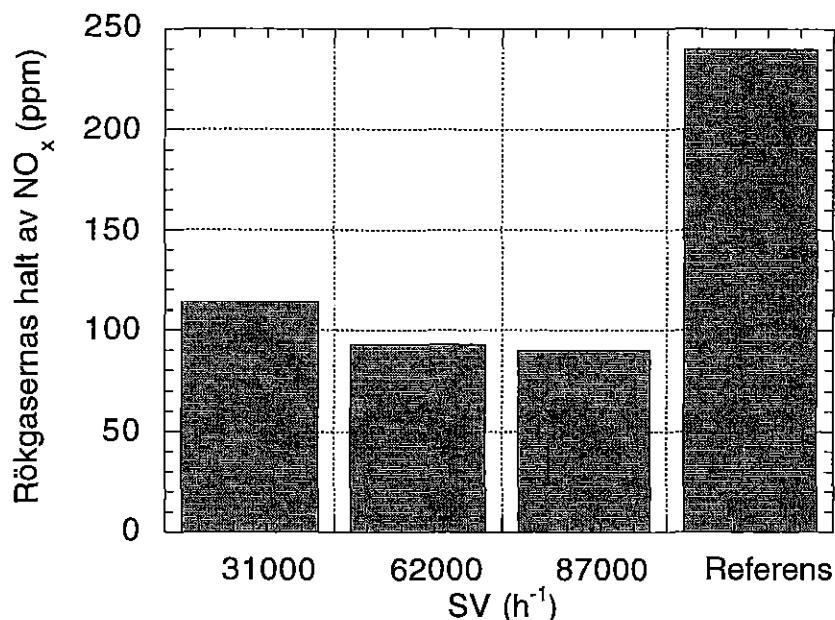


Figur 22

Syrehaltens inverkan på kolväte-SCR
The influence of the oxygen content on the performance of HC-SCR

Beroende på den komplicerade reaktionskinetiken blir reduktionsgraden komplext beroende av flödesbelastningen. I motsats till vad man kan förvänta sig, erhålls en ökad

reduktionsgrad då flödesbelastningen ökas, jfr. figur 23. Detta fenomen orsakas av att kolväteoxidationen dominerar över NO_x -reduktionen vid långa upphållstider. Om flödesbelastningen hade ökat ytterligare hade reduktionsgraden så småningom åter börjat avta. Vid de försök som redovisas i figur 23 användes barkbränsle vid förbränningen, vilket förorsakar de relativt höga NO_x -halterna.



Figur 23 *Inverkan av flödesbelastningen på kolväte-SCR. I referensfallet tillförs inget reduktionsmedel.*
The influence of the space velocity on the performance of HC-SCR. No reducing agent is added in the reference case.

Försöken med kolväte-SCR pågick under flera dagar, utan att allvarliga effekter av förgiftning kunde iakttagas. Även om långtidsförsök inte genomförts för denna typ av katalysator indikerar dock försöksresultaten att deaktiveringshastigheten är låg eller måttlig. Datorsimuleringar och mikroreaktorförsök visar att inhibering och/eller allvarlig förgiftning hade inverkat på försöken redan efter någon timmes drift.

De inledande studierna avseende kolväte-SCR är intressanta ur flera aspekter:

- Möjligt att uppnå en god reduktionsgrad m.a.p. NO_x , 50 - 70%
- Reduktionen kan genomföras vid överstökiometriska förhållanden
- Åtgången av reduktionsmedel blir låg; enkla reduktionsmedel (gasol) kan nyttjas
- Ingen sekundärluftstillförsel krävs; installationen blir enkel
- Reaktionen är snabb; höga gasbelastningar är möjliga

De genomförda undersökningarna bör följas upp med en optimeringsstudie samt ett långtidsförsök.

6. Katalysatorkaraktärisering

Fysisorptionsmätningar (Micromeritics, Tristar) har utnyttjats för att studera effekterna av fouling med avseende på förändringar i specifik yta (m^2/g) och porstorleksfördelning. De nytillverkade katalysatorerna hade generellt en specifik yta i intervallet 8000 - 10000 m^2 per kvadratmeter nät. Detta innebär således att katalysatorns totala poryta räknat på en kvadratmeter nät motsvarar ungefär en fotbollsplan.

Mätningarna visar att foulingen medför porblockering av de minsta porerna (<20 nm), varvid en del av den katalytiska effekten förloras. Genom tvättningsförfarandet i svagt surgjort vatten (citronsyra pH 4 - 5) återskapas porsystemet fullständigt varvid den katalytiska effekten når sitt initialvärde.

En detaljerad studie visar att nedgången i katalytisk aktivitet väl korrelerar mot andelen blockerade porer.

Kemisk karaktärisering (SEM-EDAX) av nätkatalysatorerna som utsatts för rök-gaser från biobränsle indikerar höga halter av alkali (speciellt K) och svavel. Förekomsten av alkali och svavel på katalysatorns ytteryta ökar med deaktiveringstiden, vilket visar att foulingen främst drabbar ytligt liggande porer i katalysatorn. Kompletterande kemisk analys av lakvatten från katalysatortvättning visar att K och S förekommer i molförhållandet 2:1, vilket indikerar förekomst av kaliumsulfat. Det är välkänt från förbränningsanläggningar att värmeöverföringssytor etc. ofta beläggs med täta skikt av alkalisulfater.

Den deaktivering som uppträder vid katalytisk reburning är således helt identisk med den typ av deaktivering som förekommer på ädelmetallbaserade oxidationskatalysatorer vid överstökiometrisk förbränning i biobränsleeldade pannor. Deaktiveringen är helt reversibel och den initiala aktiviteten återskapas genom ett enkelt tvättningsförfarande.

7. Dominerande problemområden

Som tidigare beskrivits kan goda reduktionsgrader m.a.p. NO_x erhållas vid katalytisk reburning. I en verklig anläggning är det viktigt att bedöma/ta hänsyn till ett antal relevanta problemområden då man överväger en installation av detta slag.

Det är viktigt att man kan genomföra primärförbränningen vid lågt syreöverskott i avsikt att kunna begränsa tillförseln av reburningbränsle. Katalytisk reburning är endast ekonomiskt attraktiv om andelen reburningbränsle i processen kan hållas låg. Ett sänkt syreöverskott vid primärförbränningen kan i vissa anläggningar medföra risk för dålig utbränning av bränslet, varvid processens totalekonomi försämras.

Rökgassammansättningen kännetecknas i många anläggningar av inhomogeniteter och kraftig stråkbildning. Katalytisk reburning bygger på principen att restsyret skall förbrännas med den bränslegas som tillförs. Om kraftiga gradienter förekommer blir det förenat med svårigheter att avpassa bränslegastillförseln efter de koncentrationsfält som

råder, och som dessutom kan variera i tiden. Effekterna av stråkbildning kommer att medföra att reduktionsgraden m.a.p. NO_x blir lägre än under idealiska förhållanden. Ett annat problem som uppmärksammats under experimenten är att det är förenat med svårigheter att uppnå en tillräckligt effektiv återoxidation av kolväten under syrefattiga förhållanden. Genom att utnyttja vätgas och/eller CO som reurninggaser kan detta problem undvikas. En blandning av vätgas/CO kan framställas ur konventionella bränslegaser genom partialförbränning eller reformering.

Kombinationen av korrosiva rökgaskomponenter (alkali, klorid, svavel) respektive låg syrepotential medför risker för livstidspåverkande korrosionsskador i olika anläggningsdelar. Störst risk för korrosionsskador bedöms föreligga i komponenter med hög godstemperatur (t. ex. överhettaren). Riskerna för korrosionsskador måste bedömas från fall till fall. I vissa anläggningar har man ersatt korrosionskänsliga material med bättre kvaliteter varvid problemen kan hanteras. I andra anläggningar måste en uppgradering av konstruktionsmaterialen ske innan en installation av katalytisk reurning kan bli aktuell. Alternativt måste installationen av katalytisk reurning modifieras så att rökgasmiljön i överhettaren blir nettooxiderande.

I anläggningar som saknar överhettare blir problemen väsentligt enklare att hantera eftersom korrosionsbenägenheten är starkt temperaturoberoende. I anläggningar där rökgaserna kyls med vatten (under lågt tryck) är godstemperaturen i värmeväxlarna så låg att riskerna för korrosionsskador bedöms som små.

Man kan närmast postulera att katalytisk reurning kommer att kännetecknas av en relativt snabb katalysatordeaktivering till följd av fouling med alkalisulfater. Katalysatorinstallationen måste utformas så att katalysatorn periodiskt kan regenereras genom tvättning. Eftersom deaktiveringen är fullständigt reversibel medför tvättningen att katalysatorns initialaktivitet återskapas. Beroende på nätkatalysatorns kompaktitet är avsikten att designa katalysatorinsatsen så att den kan dras ut och regenereras under drift.

8. Översiktlig ekonomisk analys av katalytisk reurning

Ett antal metoder, såväl katalytiska som icke-katalytiska, kan utnyttjas för att åstadkomma en reduktion av de biobränslerelaterade NO_x -utsläppen. De vanligaste åtgärderna omfattar förbränningstekniska åtgärder och/eller SNCR. Det finns endast ett fåtal SCR-installationer på biobränsleeldade pannor i Sverige. Beroende på de genomförda åtgärderna har NO_x -utsläppen generellt reducerats med 10 - 60% [4]. Det biobränsleeldade pannbeståndet uppvisar idag typiska NO_x -utsläpp på 50 - 150 mg/MJ_{bränsle}. Högst värden erhålls i anläggningar som eldas med barkbränslen.

De förbränningstekniska installationerna omfattar åtgärder som stegvis lufttillförsel, rökgasåterföring, vatten/ång-insprutning, kylning och befuktning av förbränningsluft. Åtgärderna är ofta relativt billiga men reduktionsgraden är generellt lägre än för de metoder som redovisas nedan.

Reburning eller stegvis förbränning innebär att man genom bränsleinsprutning skapar en reduktionszon efter den egentliga förbränningszonen. Generellt utnyttjas gasformiga bränslen som tillförs i en omfattning motsvarande 10 och 30% av den totala

energitillförseln. Nedströms reduktionszonen tillförs sekundärluft för att åstadkomma en effektiv slutförbränning. Generellt erhålls reduktionsgrader på 30 - 50%, med den kan bli så hög som 70% under idealiska förhållande. Reburning har inte fått något större genomslag på den svenska marknaden, främst beroende på de höga driftkostnaderna då stora mängder dyrt sekundärbränsle erfordras.

Genom att komplettera en konventionell reburninginstallation med katalysator kan reduktionsgraden ökas väsentligt samtidigt som åtgången av reburningbränsle kan minskas (högre effektivitet samt lägre lambdavärde vid primärförbränning). Beroende på dessa aspekter blir det ekonomiska utfallet för katalytisk reburning väsentligt bättre än för konventionell reburning.

SNCR innebär att urea, ammoniak eller cyanursyra sprutas in i förbränningsgaserna vid en temperatur kring 900°C, varvid NO_x reagerar med reduktionsmedlet och bildar kvävgas, vatten och lustgas (då urea används). Reduktionsgraden kan under reella betingelser bli så hög som 50 - 60% [5]. Under vissa driftförhållanden uppstår problem med ammoniakutsläpp. SNCR är billig att installera men kräver för sin funktion att relativt stora mängder reduktionsmedel tillförs. Under senare år har insatser gjorts för att förbättra styrning/kontroll av SNCR-processen, varvid förhållandet mellan reduktionsmedel och NO_x kunnat minskas.

I SCR-försedda anläggningar injiceras reduktionsmedlet (ammoniak, urea eller cyanursyra) i rökgaserna vid en temperatur på 300 - 400°C varefter gasblandningen får passera genom en katalysator, vanligen zeolit-eller vanadinpentoxidbaserad. Reduktionsgraden blir hög, generellt 80 - 90% samtidigt som åtgången av reduktionsmedel blir väsentligt lägre (ofta understökiometrisk tillsats i förhållande till NO_x). Installationskostnaden för metoden är, beroende på katalysatorn, relativt hög.

Vid kolväte-SCR ersätts de kvävehaltiga reduktionsmedlena med kolväten (t.ex. gasol eller propen). Reduktionsgraden kan under goda förutsättningar bli så hög som 70%, i reella installationer dock sannolikt lägre. Som katalysator används generellt övergångsmetallinbytt zeoliter, t. ex. Cu-ZSM-5. Kolväte-SCR utgör i dagens läge inte en kommersiell metod.

Det är förenat med stora svårigheter att göra en i alla avseenden rättvis ekonomisk jämförelse mellan olika reduktionsmetoder. I den översiktliga analys som redovisas i denna rapport har generiska värden för investeringskostnader avseende NO_x -reduktion i Sverige utnyttjats [4]. Då det gäller de metoder som tekniskt utvärderats i denna rapport har en investeringskostnadsbedömning genomförts med utgångspunkt från aktuella tekniska och ekonomiska parametrar. I figur 26 redovisas investeringskostnaden (SEK/kW_{bränsle}) för de jämförda metoderna. Ockat reburning står för katalytisk reburning med partialoxidation/reformering av kolväten.

Vid den ekonomiska bedömningen har reduktionsgraden ansatts till typvärden för de respektive metoderna. Avvikelse, såväl uppåt som nedåt, förekommer och föranleds av

anläggningsspecifika egenskaper. Följande reduktionsgrader har antagits vid den ekonomiska jämförelsen:

a) Förbränningsteknisk modifiering, 20%

b) Konventionell reburning, 50%

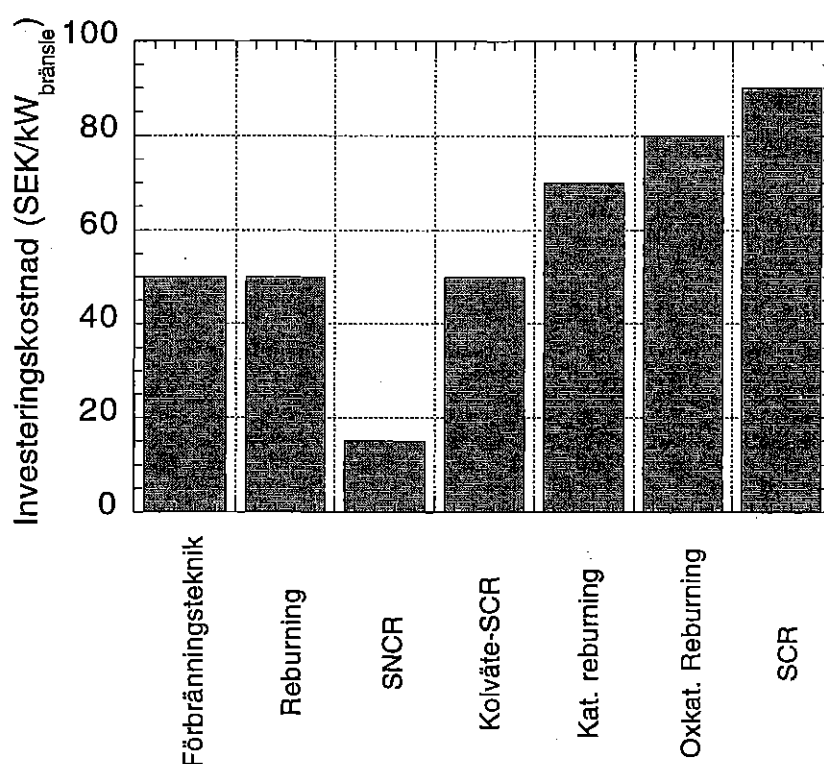
c) SNCR, 50%

d) SCR, 80-90%

e) Kolväte-SCR, 60%

f) Katalytisk reburning, 90% (baserat på småskaliga försök)

g) Katalytisk reburning med partialoxidation/reformering, 90% (baserat på småskaliga försök)



Figur 26 *Investeringskostnad för olika NO_x-reducerande tekniker*
Investment costs for different NO_x-reducing techniques

Basförutsättningarna vid den ekonomiska analysen är följande:

Effektivt värmevärde (torrt bränsle):	18.73 MJ/kg
Rökgasflöde (torrt bränsle):	5.30 nm ³ /kg
Fukthalt:	10%
Luftöverskott:	10%
NO _x -utsläpp	100 mg/MJ _{bränsle}

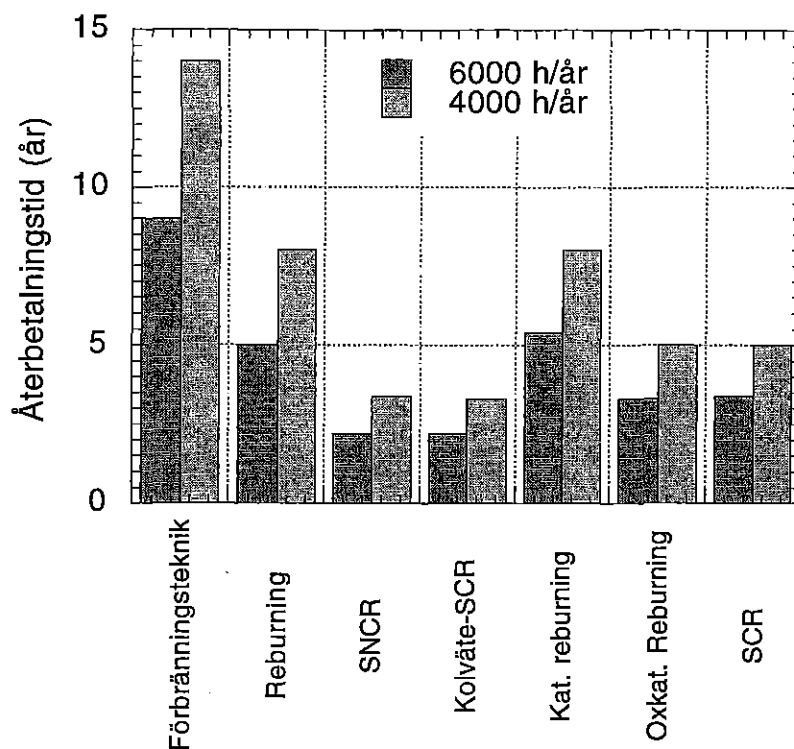
Verkningsgrad:	85%
Drifttid:	4000 alt. 6000 fullasttimmar per år
Bränsleeffekt:	10 MW
NO _x -avgift:	40 SEK per kg NO ₂
Återföring av skatt:	11.26 SEK/MWh
Bränslekostnad:	Biobränsle 100 SEK/MWh
	Bränslegas 150 SEK/MWh
	Biogas 130 SEK/MWh
Kostnad för reduktionsmedel:	2 SEK/kg (propan) 5 SEK/kg (ammoniak)
Stökiometri:	SCR, NO _x :Ammoniak - 1:1 SNCR, NO _x :Ammoniak - 1:4 Kolväte-SCR, NO _x :kolväten - 1:5
Underhållskostnad:	2 SEK/MWh
Livslängd för katalysator:	16 000 h (utrustning för reaktivering antas Installerad)

Den specifika katalysatorkostnaden relateras till den energimängd som producerats under dess livslängd och inkluderas i driftkostnaden. I kalkylen har installationskostnaden för katalysatorn antagits vara 50 kSEK/MW_{bränsle} och livslängden 16 000 h.

Den ekonomiska analysen ger ett årligt överskott som utnyttjas för återbetalning av investeringen. Figur 27 återger återbetalningstiden för de olika metoderna vid olika antal fullasttimmar per år. Som framgår ur figuren erhålls kortast återbetalningstider för SNCR och kolväte-SCR. De övriga katalytiska metoderna ger generellt återbetalningstider i intervallet 3 - 6 år, vilket sannolikt föranleder ett relativt lågt investeringsintresse. Av de metoder som avhandlas i denna rapport förefaller således kolväte-SCR ha bäst ekonomiska förutsättningar. Katalytisk reburning, å andra sidan, är känslig för priset på reburningbränslet. Figur 28 återger en känslighetsanalys för överskottet (SEK/år) vid olika värden på priset för reburningbränslet. Vid bränslepriser över ca 175 SEK/MWh, blir katalytisk reburning alltid olönsam. Om priset på reburningbränslet å andra sidan hade närmat sig priset för biobränsle (ca 100 SEK/MWh) erhålls en mycket god lönsamhet, varvid återbetalningstiden blir ca 1 år. Det ekonomiska utfallet av katalytisk reburning blir således helt avhängig skattesituationen på bränslen i Sverige. Om reburningbränslet klassats som reduktionsmedel istället för som fossilbränsle hade därför det ekonomiska utfallet blivit gynnsamt. Med dagens energiskatteregler måste förnyelsebara kolväten användas (ca 100 SEK/MWh) för att rimliga återbetalningstider skall kunna uppnås.

Eftersom förbrukningen av kolväten är väsentligt mindre vid kolväte-SCR, blir denna metod inte så känslig för rådande skatteregler. I detta fall skulle det sannolikt också vara

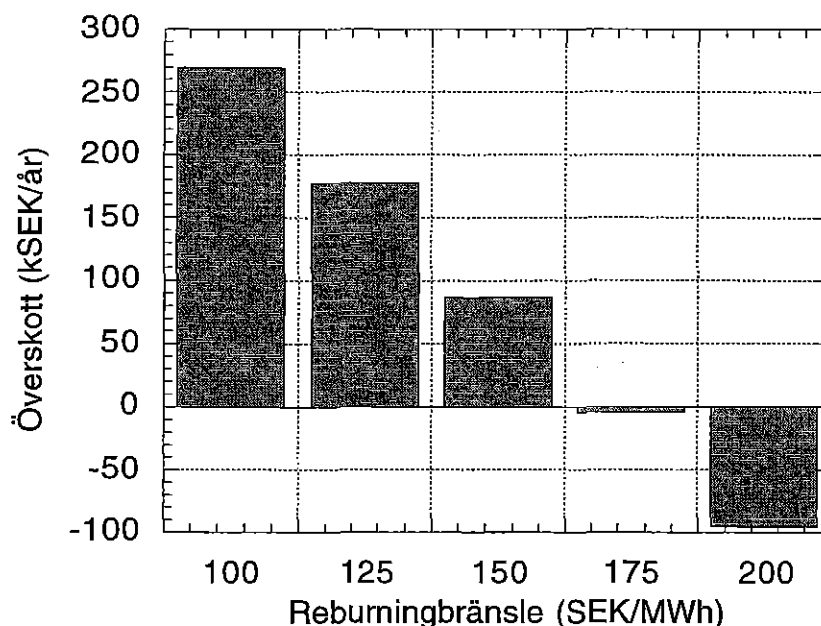
enklare att klassa kolvätet som reduktionsmedel eftersom den tillförda kolvätekvan-
titen inte på något signifikant sätt bidrar till energiproduktionen.



Figur 27 Återbetalningstid för olika tekniker. Drifttid: 4000 och 6000 h/år
Pay-off time for different techniques. Time in operation: 4000 and 6000 h/yr

Även om den genomförda ekonomiska analysen självklart innehåller många osäkerheter, ger den en indikation om metodernas inbördes lönsamhet. Slutsatsen är att kolväte-SCR kan vara en intressant metod i anläggningar där SNCR övervägs eller har övervägts och beroende på olika orsaker inte har installerats. Katalytisk reburning hade varit en mycket kostnadseffektiv metod om skattereglerna varit utformade på en rimligare sätt med hänsyn till bränslegasernas användning vid katalytisk reburning. Med rådande skattesituation är det tveksamt om katalytisk reburning överhuvudtaget bör övervägas. Om skatte-
reduktion kan medges för bränslegaser i denna tillämpning, skulle det ekonomiska utfallet bli mycket förmånligt, med återbetalningstider på 1 - 2 år.

Den ekonomiska analysen baseras på laboratoriemässiga resultat avseende katalytisk reburning och kolväte-SCR medan övriga metoder bygger på praktiska erfarenheter. Den ekonomiska analysen bör ånyo utvärderas då demonstrationsförsök utförts i en större anläggning och då bättre erfarenheter införskaffats, bl.a. med avseende på deaktiveringsfenomenen.



Figur 28

Inverkan av reburningbränslets kostnad för det ekonomiska utfallet vid katalytisk reburning (10 MW_{bränsle})
The influence of the fuel cost on the economic result of catalytic reburning. (10 MW_{bränsle})

9. Installationstekniska lösningar i vissa huvudtyper av anläggningar

Man kan gruppera fastbränsleanläggningar i två huvudtyper av anläggningar:

- Anläggningar med rörlig/bubblande bädd
- Anläggningar av rostertyp
- Pulverförbränning

Rosterna är idag optimerade för att uppnå lång drifttid samt hög driftsäkerhet. Den vanligaste typen av roster på den svenska marknaden är trapprosten. Utvecklingen går i riktning mot långsam transport av bränslet genom rosten samtidigt som luftöverskottet vid förbränningen minskas. I vissa fall har primärlufttillförseln minskats så mycket att driftbetingelserna närmast kan liknas vid förgasning. I sådana anläggningar finns förutsättningar för att katalytisk reburning ska kunna användas med rimliga tekniska och ekonomiska prestanda. Även om processoptimeringen går i den nämnda riktningen finns fortfarande ett stort antal pannor som eldas med högt primärluftöverskott i avsikt att begränsa utsläppen av CO/VOC. För att man skall kunna överväga katalytisk reburning i sådana anläggningar måste åtgärder först vidtas för att sänka luftöverskottet vid primärförbränningen, åtminstone till ca 10%. Vid högre nivåer på luftöverskottet blir den ekonomiska kalkylen ofördelaktig med dagens priser på lättillgängliga reburninggaser (naturgas, gasol etc.).

De flesta rosteranläggningarna används för produktion av hetvatten, t. ex. för uppvärmningsändamål. Ett undantag är barkeldade pannor, som ofta utnyttjas för ångproduktion inom skogsindustrin. Beroende på pannornas konstruktion finns olika förutsättningar att

placera reburning- och oxidationskatalysator inom lämpliga driftfönster. Varje installation måste således övervägas med utgångspunkt från anläggningsspecifika data. Många av de befintliga rosteranläggningarna har försetts med förbränningsstekniska åtgärder samt med SNCR, varvid NO_x -utsläppen kunna halveras.

I de fall rökgasstråket försetts med överhettare föreligger risker för korrosionsangrepp vid låga syrepotentialer. Korrosionen kan ha olika orsaker. Om svavel finns närvarande är vätesulfidkorrosion den viktigaste mekanismen vid låg syrepotential. Förekomst av klorider är en annan bidragande orsak. Askorna från biobränsleförbränning innehåller höga halter alkali och har förmågan att lösa upp de passiverande oxidskikten på heta metallstrukturer [5]. Härigenom öppnas en väg för ett snabbt korrosionsförlopp som kan leda till allvarliga skador, speciellt i överhettaren. I konventionella anläggningar för hetvattenproduktion är problemen väsentligt mindre eftersom yttemperaturen i värmeöverföringsytorna här är väsentligt lägre.

Katalytisk reburning kan övervägas som en NO_x -reducerande åtgärd i rosteranläggningar utan ångproduktion. Reburningkatalysatorn bör placeras vid en temperatur på 400 - 600°C medan oxidationskatalysatorn kan placeras ytterligare nedströms vid temperaturer på ca 300°C. Om ångproduktion sker i anläggningen bör katalytisk reburning övervägas endast om materialkvaliteten i överhettaren är sådan att korrosionsproblematiken kan bemästras.

I fluidiserade anläggningar tillkommer problem med erosion av askpartiklar som i större eller mindre utsträckning rycks med i rökgasströmmen. Erosionen kan i vissa fall förvärra korrosionsproblematiken, speciellt under syrefattiga betingelser. Den höga partikelhalten i rökgaserna medför att speciell försiktighet måste vidtas vid dimensioneringen av katalysatorns öppna kanalvidd, för att igensättningsproblem skall kunna undvikas. Förbränningsprocessen kännetecknas av en högre grad av homogenitet än i fallet med rosteranläggningar. Luftöverskottet vid primärförbränningen kan generellt hållas lägre, vilket i och för sig är gynnsamt då installation av katalytisk reburning övervägs.

Möjligheterna att installera katalytisk reburning är också i dessa fall beroende av anläggningsspecifika betingelser, m.a.p. konstruktion och driftsätt. Kravspecifikationen avseende lämpliga temperaturnivåer för katalysatorens placering är desamma som i fallet med rosteranläggningar.

10. Slutsatser och rekommendationer

Studien visar att en effektiv rökgasrening m.a.p. NO_x kan åstadkommas med katalytisk reburning. Under idealiska förhållanden kan reningsgrader överstigande 90% erhållas då vätgas används som reburningbränsle. Konventionella bränslegaser (gasol, naturgas etc) är mindre effektiva som reburningbränsle och ger generellt lägre reningsgrader. För att kompensera för den bristfälliga reaktiviteten måste man i sådana fall kraftigt överdimen

sionera katalysatorn. Ett effektivare sätt är att partialoxidera/reformera bränslegaserna varvid en vätgasrik gasblandning erhålls. Härigenom erhålls en hög reduktionsgrad vid höga värden på flödesbelastningen (90% reduktion av NO_x vid $\text{SV}=60\,000\text{ h}^{-1}$). Återoxidation av kvarvarande reduktionsmedel sker effektivast i fallen med H_2/CO .

Rester av konventionella bränslegaser är svåra att förbränna i syrefattig rökgasmiljö och kräver orealistiska katalysatorvolymmer för att ske med tillräcklig verkningsgrad. I vissa anläggningar förekommer en betydande stråkbildning med kraftiga koncentrationsgradienter. Det är härvid förenat med svårigheter att avpassa tillförseln av reurningbränsle så att en homogen reduktionsgrad erhålls över katalysatorns tvärsnitt.

Förbränningsförsöken visar att katalysatorn kan förväntas deaktiveras till följd av fouling med alkalisulfater. En installation för katalytisk reurning bör därför utformas så att periodisk reaktivering kan ske utan demontering. Reaktiveringsförsöken visar att katalysatorns aktivitet kan återställas till 100% genom ett enkelt tvättförfarande.

Det är möjligt att sänka luftöverskottet vid primärförbränningen i avsikt att minska erforderlig tillsats av reurningbränsle. Det minskade luftöverskottet leder till ökade primäremissioner, vilka dock reduceras i katalysatorstegen nedströms förbränningskammaren.

Vid katalytisk reurning bör således vätgas, pyrolysgas eller partialförbränd/reformerad bränslegas användas. Härigenom säkerställs en effektiv katalysatorutnyttjning samtidigt som problem med utsläpp av kolväten undviks. Den ekonomiska analysen indikerar att återbetalningstiden (med nuvarande system för NO_x -avgifter) blir 3 - 5 år. Känslighetsanalyser utförda avseende olika parametrar visar att det ekonomiska utfallet är speciellt känsligt för reurningbränslets prisbild. Om reurningbränslet klassats som reduktionsmedel och inte som en konventionell bränslegas hade den ekonomiska analysen väsentligt förbättrats. I nuvarande situation är man hänvisad till förnyelsebara reurningbränslen för att en rimlig ekonomisk situation skall kunna uppnås.

Kolväte-SCR är ett alternativ till katalytisk reurning. Metoden ger en lägre reduktionsgrad m.a.p. NO_x än katalytisk reurning men ger ett gynnsammare ekonomiskt utfall med en typisk återbetalningstid på 2 år. Katalysatorn kan förväntas deaktiveras på motsvarande sätt som reurningkatalysatorn. Reaktivering kan sannolikt ske på samma sätt som i fallet med reurningkatalysatorn, d.v.s. genom ett enkelt tvättförfarande.

Eftersom kolväte-SCR sker vid överstökiometriska förhållanden undviks risker för korrosionsskador, vilka annars kan uppstå vid höga godstemperaturer i syrefattig miljö. Korrosionsangreppen förorsakas främst av rökgasernas svavelinnehåll (sulfidering). Klorider i förening med lättsmälta askbeläggningar bidrar sekundärt till korrosionen. Vid katalytisk reurning kan korrosionsproblem förväntas i överhettaren om inte materialet uppgraderas med hänsyn till det förändrade driftsättet. I hetvattenpannor förekommer normalt inte rökgaskylare som arbetar vid så höga godstemperaturer. Härigenom kan korrosionsproblemen i allmänhet hanteras i denna anläggningskategori.

Även om de genomförda experimenten och de utförda ekonomiska beräkningarna indikerar rimliga förutsättningar för såväl katalytisk reurning som för kolväte-SCR så

bör försök i en mindre biobränslepanna (1-3 MW_{bränsle}) utföras i demonstrations-och utvärderingssyfte. Målsättningen härvid blir att erhålla drifterfarenhet av teknikerna, speciellt med inriktning mot deaktiveringsfenomen och möjligheterna till katalysatorreakivering.

11. Litteratur

1. F. Silversand, T. Hargitai och M. Näslund, "Utveckling av katalytisk rening av avgaser från befintlig panna", Rapport SGC 087, Malmö 1997.
2. F. Silversand, "Katalytiska metoder för begränsning av skadliga utsläpp från förbränning av biobränslen, deletapp 1: Deaktivering/Igensättning", Nutek, Stockholm 1998.
3. F. Silversand och J. Janner, "Katalytiska metoder för begränsning av skadliga utsläpp från förbränning av biobränsle.", infor. 471-97, Nutek, Stockholm 1997.
4. A.-K. Hjalmarsson och K. Hedin, "Installationer av NO_x-reducerande åtgärder.", Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning, rapport nr. 560, Stockholm 1996.
5. K. Persson och M. Gyllenhammar, "Stökiometrins inverkan på korrosionen i fastbränslepannor vid kraft-och värmeproduktion.", Stiftelsen för Värmeteknisk Forskning, rapport nr. 503, Stockholm 1994.

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
001	Systemoptimering vad avser ledningstryck	Apr 91	Stefan Grudén TUMAB	100
002	Mikrokraftvärmeverk för växthus. Utvärdering	Apr 91	Roy Ericsson Kjessler & Mannerstråle AB	100
004	Krav på material vid kringfyllnad av PE -gasledningar	Apr 91	Jan Molin VBB VIAK	50
005	Teknikstatus och marknadsläge för gasbaserad minikraftvärme	Apr 91	Per-Arne Persson SGC	150
006	Keramisk fiberbrännare - Utvärdering av en demo-anläggning	Jan 93	R Brodin, P Carlsson Sydkraft Konsult AB	100
007	Gas-IR teknik inom industrin. Användnings- områden, översiktlig marknadsanalys	Aug 91	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	100
009	Läcksökning av gasledningar. Metoder och instrument	Dec 91	Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
010	Konvertering av aluminiumsmältugnar. Förstudie	Sep 91	Ola Hall, Charlotte Rehn Sydkraft Konsult AB	100
011	Integrerad naturgasanvändning i tvätterier. Konvertering av torktumlare	Sep 91	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	100
012	Odöranter och gasolkondensats påverkan på gasrörssystem av polyeten	Okt 91	Stefan Grudén, F. Varmedal TUMAB	100
013	Spektralfördelning och verkningsgrad för gaseldade IR-strålare	Okt 91	Michael Johansson Driftekniska Inst. vid LTH	150
014	Modern gasteknik i galvaniseringsindustri	Nov 91	John Danelius Vattenfall Energisystem AB	100
015	Naturgasdrivna truckar	Dec 91	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100
016	Mätning av energiförbrukning och emissioner före o efter övergång till naturgas	Mar 92	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	50
017	Analys och förslag till handlingsprogram för området industriell vätskevärmning	Dec 91	Rolf Christensen AF-Energikonsult Syd AB	100
018	Skärning med acetylen och naturgas. En jämförelse.	Apr 92	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	100

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
019	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Glostorp, Malmö. Uppföljningsprojekt	Maj 92	Fallsvik J, Haglund H m fl SGI och Malmö Energi AB	100
020	Emissionsdestruktion. Analys och förslag till handlingsprogram	Jun 92	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
021	Ny läggningsteknik för PE-ledningar. Förstudie	Jun 92	Ove Ribberström Ove Ribberström Projekt. AB	150
022	Katalog över gastekniska FUD-projekt i Sverige. Utgåva 4	Aug 92	Svenskt Gastekniskt Center	150
023	Läggning av gasledning med plöjteknik vid Lillhagen, Göteborg. Uppföljningsproj.	Aug 92	Nils Granstrand m fl Göteborg Energi AB	150
024	Stumsvetsning och elektromuffsvetsning av PE-ledningar. Kostnadsaspekter.	Aug 92	Stefan Grudén TUMAB	150
025	Papperstorkning med gas-IR. Sammanfattning av ett antal FUD-projekt	Sep 92	Per-Arne Persson Svenskt Gastekniskt Center	100
026	Koldioxidgödsling i växthus med hjälp av naturgas. Handbok och tillämpn.exempel	Aug 92	Stig Arne Molén m fl	150
027	Decentraliserad användning av gas för vätskevärmning. Två praktikfall	Okt 92	Rolf Christensen ÅF-Energikonsult	150
028	Stora gasledningar av PE. Teknisk och ekonomisk studie.	Okt 92	Lars-Erik Andersson, Åke Carlsson, Sydkraft Konsult	150
029	Catalogue of Gas Techn Research and Development Projects in Sweden (På engelska)	Sep 92	Swedish Gas Technology Center	150
030	Pulsationspanna. Utvärdering av en demo-anläggning	Nov 92	Per Carlsson, Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	150
031	Detektion av dräneringsrör. Testmätning med magnetisk gradiometri	Nov 92	Carl-Axel Triumf Triumf Geophysics AB	100
032	Systemverkn.grad efter konvertering av vattenburen elvärme t gasvärme i småhus	Jan 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem AB	150
033	Energiuppföljning av gaseldad panncentral i kvarteret Malörten, Trelleborg	Jan 93	Theodor Blom Sydkraft AB	150
034	Utvärdering av propanexponerade PEM-rör	Maj 93	Hans Leijström Studsvik AB	150

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
035	Hemmatankning av naturgasdriven personbil. Demonstrationsprojekt	Jun 93	Tove Ekeborg Vattenfall Energisystem	150
036	Gaseldade genomströmningsberedare för tappvarmvatten i småhus. Litteraturstudie	Jun 93	Jonas Forsman Vattenfall Energisystem	150
037	Verifiering av dimensioneringsmetoder för distributionsledningar. Litt studie.	Jun 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
038	NOx-reduktion genom reburning med naturgas. Fullskaleförsök vid SYSAV i Malmö	Aug 93	Jan Bergström Miljökonstulterna	150
039	Pulserande förbränning för torkändamål	Sep 93	Sten Hermodsson Lunds Tekniska Högskola	150
040	Organisationer med koppling till gasteknisk utvecklingsverksamhet	Feb 94	Jörgen Thunell SGC	150
041	Fältsortering av fyllnadsmassor vid läggning av PE-rör med lägningsbox.	Nov 93	Göran Lustig Elektro Sandberg Kraft AB	150
042	Deponigasens påverkan på polyetenrör.	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
043	Gasanvändning inom plastindustrin, handlingsplan	Nov 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
044	PA 11 som material ledningar för gasdistribution.	Dec 93	Thomas Ehrstedt Sydkraft Konsult AB	150
045	Metoder att höja verkningsgraden vid avgaskondensering	Dec 93	Kjell Wanselius KW Energiprodukter AB	150
046	Gasanvändning i målerier	Dec 93	Charlotte Rehn et al Sydkraft Konsult AB	150
047	Rekuperativ aluminiumsmältugn. Utvärdering av degelugn på Värnamo Pressgjuteri.	Okt 93	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
048	Konvertering av dieseldrivna reservkraftverk till gasdrift och kraftvärmeprod	Jan 94	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult AB	150
049	Utvecklad teknik för gasinstallationer i småhus	Feb 94	P Kastensson, S Ivarsson Sydgas AB	150
050	Korrosion i flexibla rostfria insatsrör (Finns även i engelsk upplaga)	Dec 93	Ulf Nilsson m fl LTH	150

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
051	Nordiska Degelugnsprojektet. Pilot- och fältförsök med gasanvändning.	Nov 93	Eva-Maria Svensson Glafo	150
052	Nordic Gas Technology R&D Workshop. April 20, 1994. Proceedings. (På engelska)	Jun 94	Jörgen Thunell, Editor Swedish Gas Center	150
053	Tryckhöjande utrustning för gas vid metallbearbetning -- En förstudie av GT-PAK	Apr 94	Mårten Wärnö MGT Teknik AB	150
054	NOx-reduktion genom injicering av naturgas i kombination med ureainsprutning	Sep 94	Bent Karll, DGC P Å Gustafsson, Miljökons.	100
055	Trevägs-katalysatorer för stationära gasmotorer.	Okt 94	Torbjörn Karlelid m fl Sydkraft Konsult AB	150
056	Utvärdering av en industriell gaseldad IR-strålare	Nov 94	Johansson, M m fl Lunds Tekniska Högskola	150
057	Läckagedetekteringssystem i storskaliga gasinstallationer	Dec 94	Fredrik A Silversand Katator AB	150
058	Demonstration av låg-NOx-brännare i växthus	Feb 95	B Karll, B T Nielsen Dansk Gasteknisk Center	150
059	Marknadspotential naturgaseldade industriella IR-strålare	Apr 95	Rolf Christensen Enerkon RC	150
060	Rekommendationer vid val av flexibla insatsrör av rostfritt i villaskorstenar	Maj 95	L Hedeén, G Björklund Sydgas AB	50
061	Polyamidrör för distribution av gasol i gasfas. Kunskapssammanställning	Jul 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
062	PE-rörs tålighet mot yttre påverkan. Sammanställning av utförda praktiska försök	Aug 95	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	150
063	Naturgas på hjul. Förutsättningar för en storskalig satsning på NGV i Sverige	Aug 95	Naturgasbolagens NGV- grupp	150
064	Energieffektivisering av större gaseldade pannanläggningar. Handbok	Aug 95	Lars Frederiksen Dansk Gasteknisk Center	200
065	Förbättra miljön med gasdrivna fordon	Aug 95	Göteborgs Energi AB	150
066	Konvertering av oljeeldade panncentraler till naturgas. Handbok.	Nov 95	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	150

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
067	Naturgasmodellen. Manual för SMHI:s program för beräkn av skorstenshöjder	Dec 95	Tingnert B, SKKB Thunell J, SGC	150
068	Energigas och oxyfuelteknik	Dec 95	Ingemar Gunnarsson Energi-Analys AB	150
069	CO ₂ -gödsling med avgaser från gasmotor med katalysator	Dec 95	Bent Karll Dansk Gasteknisk Center	150
070	Utvärdering av naturgasförbränning i porösa bäddar	Mar 96	Henric Larsson Lunds Tekniska Högskola	150
071	Utvärdering av naturgasdrivna IR-boostar i ugn för pulverlackering	Nov 95	Ole H Madsen Asger N Myken	150
072	Sammanställning av emissionsdata från naturgas-, biogas- o motorgasdrivna fordon	Jun 96	Hans-Åke Maltesson Svenskt Gastekniskt Center AB	150
073	Livslängdsbestämning för PE-rör för gasdistribution (EVOPE-projektet)	Jul 96	Tomas Tränkner Studsvik Material AB	100
074	Gasblandningar för fordonsdrift. Idéstudie.	Aug 96	Ola Hall Sydkraft Konsult AB	150
075	Gasbranschens miljöhandbok	Sep 96	Jörgen Thunell Svenskt Gastekniskt Center	500
076	Låg-NO _x -teknik för gasdrivna processer - dagsläge	Okt 96	Mikael Näslund, LTH Inst.Värme- och Kraftteknik, LTH	150
077	Karakterisering av emissioner från naturgasdrivna lastbilar inom LB 50 -projektet	Dec 96	K-E Egeback Roger Westerholm	150
078	Uppvärmning med gas i svenska småhus - erfarenheter och framtida teknikval	Nov 96	Mikael Näslund, LTH	150
079	Handledn. för inst av gaseldade IR -värmare. Rådgivning, analys och genomförande	Apr 97	Pär Dalin DITAB	150
080	Mikrokraftvärmeverk med Stirlingmotor	Jan 97	Tomas Nilsson Lunds Tekniska Högskola	150
081	Naturgasbaserad småskalig kraftvärme inom uppvärmningssektorn	Feb 97	Mats Nilsson LTH/MALMÖ	150
082	Kylning och klimatisering av byggnader och lokaler med hjälp av naturgas	Apr 97	Anders Lindkvist Vattenfall Energisystem	150

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
083	Naturgassystemet i Sverige - en teknisk beskrivning	Jun 97	Ronny Nilsson, KM	150
084	Livscykelanalyser - Är det något för gasbranschen	Sep 97	Jörgen Thunell	150
085	Konvertering av direktelvärmda småhus till naturgasuppvärmning	Dec 97	Mikael Näslund Inst Värme- och Kraftteknik, LTH	150
086	Uppgradering av biogas . Fas 2, Praktiska försök med kondenseringsmetoder.	Jun 97	Ola Lloyd / BioMil AB Johan Nilsson / LTH	150
087	Utveckling av kataltalytisk rening av avgaser från befintlig panna	Dec 97	F Silversand, T Hargitai m fl Katator AB	150
088	Technical Description of the Swedish Natural Gas Distr System (På Engelska)	Jun 97	Ronny Nilsson, KM	150
089	Rening av avgaser från en naturgasdriven lean burn motor i en förbr.växlare	Okt 97	Björn Heed Inst för Energiteknik, CTH	150
090	Utsläpp av oreglerade ämnen vid förbränning av olika bränslen	Jun 98	Jörgen Thunell	150
091	Nya metoder för att säkerställa mätnoggrannheten i naturgasnät	Nov 97	Ulf R C Nilsson Luleå TH, Inst Systemteknik	150
092	LB30-projektet - Introduktion av naturgasdrivna tyngre lastbilar	Jan 99	Owe Jönsson Svenskt Gastekniskt Center	150
093	Karaktärisering av emissioner från naturgasdrivna lastbilar inom LB50-projektet	Sep 98	Karl Erik Egebäck	150
094	Gasdistribution och avgasinstallation i byggnader	Jan 99	Hans Christian Thiis Per Palm	150
095	Karaktärisering av emissioner från naturgasdrivna lastbilar inom LB50-projektet	Okt 98	Karl Erik Egebäck	150
096	Lifetime of PE-pipes subjected to squeeze off	Nov 98	Tomas Tränkner	150
097	Svensk högskoleförlagd energigasforskning Nutid och framtid	Jan 99	Mikael Näslund, LTH Owe Jönsson, SGC	150
098	Metoder för snabb kvalitetskontroll av PE-rör för gasdistribution	Apr 99	Tomas Tränkner	150

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
099	Gas co-firing for NOx-reduction in coal fired boilers	Apr 99	Fredrik Brogaard	200
100	Optimerad samrötning av restprodukter från stad och land	Apr 99	A Dahl, M Linné, L Andersson	150
101	Distribution av biogas i naturgasnät	Jul 99	Kaj Vågdahl	100
102	Evaluation of the efficiency face to the NOx -emissions from European plants	990901	M J Fourniguet, A Quinqueneau, B Karll, P Breithaupt, O Jonsson	150
103	Uppföljning av kvalitetsspecifikation för uppgraderad biogas som fordonsbränsle	Okt 99	Anders Dahl	150
104	Evaluation of three-way-catalysis for NOx -abatement in large gas-fired appliance	Jan 00	Fredrik Silversand	150
105	Undersökning och förstärkning av korrosionsskyddet på gasrör förlagd i skyddsror	feb 00	Göran Camitz, Åsa Marbe Charlotte Johansson	150
106	Demonstration och utvärdering av SenerTec mikrokraftvärmeverk	feb 00	Sören Dahlin	150
107	Jämförelse mellan el-IR och gas IR vid tillämpningar i industriella processer	feb 00	Magnus Palm	150
108	Minskning av emissioner från biobränsleeldning genom katalytisk reburning	feb 00	Fredrik A Silversand	150
A01	Fordonstankstation Naturgas. Parallellkoppling av 4 st Fuel Makers	Feb 95	Per Carlsson Göteborg Energi AB	50
A02	Uppföljning av gaseldade luftvärmare vid Arlövs Sockerraffinaderi	Jul 95	Rolf Christensen Enercon RC	50
A03	Gasanvändning för färjedrift. Förstudie (Endast för internt bruk)	Jul 95	Gunnar Sandström Sydkraft Konsult	0
A04	Bussbiller. Förslag till mätprogram	Jun 95	Ingemar Carlsson Ecotrans Teknik AB	50
A05	Värmning av vätskor med naturgas - Bakgrund till faktablad	Okt 95	Rolf Christensen Enerkon RC	50
A06	Isbildning i naturgasbussar och CNG -system (Endast för internt bruk)	Nov 95	Volvo Aero Turbines Sydgas, SGC	0

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
A07	Större keramisk fiberbrännare. Förstudie	Jan 96	Per Carlsson Sydkraft Konsult AB	50
A08	Reduktion av dioxin, furan- och klorfenoler vid avfallsförbränning	Maj 96	H Palmén, M Lampinen et al Helsingfors Tekniska Högskola	50
A09	Naturgas/mikrovågsteknik för sintring av keramer	Maj 96	Anders Röstin KTH	50
A10	NOx-reduktion genom naturgasinjektion o reburning. Demoprojekt på Knudmoseverket	Apr 96	Jan Flensted Poulsen Völund R & D Center	50
A11	Direktorkning av socker med naturgas (Endast för internt bruk)	Jul 96	Rolf Christensen Enerkon RC	0
A12	Uppföljning, installation av gaspanna med avgaskondensor, kv Hornblåsaren 6, Råå	Sep 96	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	50
A13	Klassningsplaner för gasinstallationer	Jun 97	Carl-Axel Stenberg Greger Arnesson	50
A14	Uppf av drift med natugaseldad kondenserande gaspanna i Rinnebäcksskolan	Okt 97	Bo Cederholm Sydkraft Konsult AB	50
A15	Undersökn o förstärkn av korr.skyddet på gasrör förl i skyddsrör - Delrapport 1	Nov 97	Åsa Marbe, C Johansson Sydkraft Konsult AB	100
A16	Ind - CO2-härdning av betong med naturgas	Feb 98	Åsa Marbe Sydkraft Konsult AB	50
A17	Reservförsörjning med fordonstransporterad LNG	Dec 97	Stig Johansen	50
A18	Emissions- och immissionsmätning vid en naturgaseldad villapanna	Mar 97	David Cooper IVL	50
A19	Katalytisk rening av gaseldade lean -burnmotorer etapp 1 - teoretisk förstudie	Aug98	Fredrik Silversand Katator	100
A20	Europeisk livscykelinventering för naturgas (endast för internt bruk)	Sep 98	Jörgen Thunell	0
A21	Naturgasdrivna järnvägsfordon - Förstudie	Dec 98	Rolf Öberg	100
A22	Catalytic abatement of CO- and UHC -emissions from Gas Fuelled Engines	Feb99	Fredrik Silversand	100

2000-02-14

RAPPORTFÖRTECKNING

SGC Nr	Rapportnamn	Rapport datum	Författare	Pris kr
A23	Förläggning av gasrör av polyeten i befintliga massor	Mar 99	Gunnar Bergström Stefan Nilsson	100



Svenskt Gastekniskt Center AB

SE-205 09 MALMÖ
Telefon: 040-24 43 10
Telefax: 040-24 43 14
www.sgc.se