
Rapport SGC 069

CO₂-GÖDSLING MED AVGASER FRÅN GASMOTOR MED KATALYSATOR

©Svenskt Gastekniskt Center - December 1995

Bent Karll
Danskt Gastekniskt Center a/s

FÖRORD

Denna rapport är en översättning av en dansk rapport med titeln ”Industriell kraftvarme og CO₂ gødskning med røggas fra gasmotor med katalysator i gartneri” utgiven i december 1995 av Dansk Gastekniskt Center. Rapporten utgör resultat av ett demonstrationsprojekt i vilket även Svenskt Gastekniskt Center medverkat med ekonomiskt projektstöd.

SVENSKT GASTEKNISKT CENTER

Jörgen Thunell

Innehåll

1a	Sammanfattning	1
1b	Summary	2
2	Inledning	3
3	Bakgrund	3
3.1	Industriell kraftvärme i trädgårdsmästerier	3
3.2	CO ₂ -gödning i trädgårdsmästerier	4
4	Uppdragsbeskrivning	5
5	Anläggningsbeskrivning	5
5.1	Kraftvärmeanläggningen	5
5.2	Utrustning för avgasrening	6
5.2.1	Topsøe SCR-process	6
5.2.2	Topsøe CATOX process för oxidation av CO och etylen	7
5.3	Styrning och övervakning	8
6	Utförda mätningar/använd utrustning	8
6.1	DGC:s mätresultat	9
6.2	Haldor Topsøes mätresultat	10
6.3	Diskussion	10
6.4	Uppföljande mätresultat	11
7	Drifterfarenheter	11
8	Ekonomi	12
8.1	Industriell kraftvärme	12
8.2	Avgasrening	12

Bilagor**13**

1. Schema över avgasreningsanläggningen
2. Data för mätutrustningen
3. Topsøes mätresultat inkl etylenanalyser på DGC:s prover
4. Växthusets värmebehov
5. Topsøes uppföljningsmätningar

CO₂-gödsling med avgaser från gasmotor med katalysator

1a Sammanfattning

Projektet har visat att industriell kraftvärme baserad på lean-burn gasmotorer kan installeras i trädgårdsmästerier med den extra funktionen att producera avgaser, som efter rening i en GREENOX katalysatoranläggning kan användas för CO₂-gödsling i växthus.

Först genomfördes ett antal mätserier under en dag med normaldrift, uppstart av anläggningen och avstängning av anläggningen. Därefter genomfördes en uppföljande mätserie ca 3 månader efter den första mätningen. Förutom emissionsmätningarna blev anläggningens regler- och övervakningssystem kontrollerat.

Mätningarna visar att emissionsvärdena ligger under specifikationsvärdena.

Reglerutrustningen säkerställer att det inte skickas ut orenade avgaser till växthusen. Vid fel-larm leds avgaserna till skorstenen, och doseringsfläktarna stoppar.

Det är viktigt att det sker en löpande kalibrering av analysatorerna och att det regelbundet utförs kontrollmätningar som också omfattar provtagningen, eftersom larmutrustningen är kopplad till dessa mätningar.

Emissionsvärdena som gäller för de renade avgaserna har utvärderats utifrån de tröskelvärden för skador som gäller vid långvarig exponering av plantorna. Tanken är att blanda avgaserna med atmosfärluft till dess att inget av gränsvärdena överskrids. Denna utspädning bestämmer den minsta utspädningsfaktorn. Den faktiska utspädningen i växthusen är dock inte undersökt.

Erforderlig utspädning har beräknats till 60 gånger för de renade avgaserna och det är halterna av NO₂ och SO₂ som är gränssättande. De utspädda avgaserna innehåller då 1.000 ppm CO₂ som således blir den maximala CO₂-koncentration som kan förekomma i växthuset. I praktiken blir dock koncentrationen lägre, eftersom växterna absorberar CO₂ men inte övriga ämnen i avgaserna.

I rapporten redovisas också ekonomin för såväl kraftvärmen som CO₂-produktionen. Återbetalningstiden för kraftvärmeverket med rökgasrening är 4,6 år utan statsbidrag.

1b Summary

The project has shown that industrial cogeneration based on lean-burn gas engines could be installed in greenhouses with the additional function to produce flue gases which, after being cleaned in a GREENOX catalyst plant, could be used for CO₂ fertilizing in the greenhouse.

To begin with a number of measurements were carried out during one day including normal operation, start of the plant and shutting down of the plant. Measurements were then repeated after about three months. In addition to the emission measurements the control and safety systems were checked.

The measurements show that the emission values are below the design values.

The control system guarantees that no uncleaned off-gases are sent out to the greenhouses. At an alarm the three gases are led to the smoke stack and the dosage fans are stopped.

The emission values for the cleaned flue gases are evaluated taking into consideration the threshold values for long term damage to the growing plants. The flue gases are supposed to be mixed with air until none of the permissible levels are exceeded. Practical experiments to verify the dilution factor have not yet been made.

The required dilution has been calculated to be a factor of 60 for the cleaned flue gases. The limit is governed by the content of NO₂ and SO₂. The diluted flue gases then contain 1,000 ppm CO₂ which, consequently, is the highest CO₂-level attainable in the greenhouse. In practice the concentration of CO₂ will be lower due to the fact that the plants absorb CO₂ but not other substances in the gases.

In the report the economy for the cogeneration and for the CO₂ production is calculated. The pay back time for the cogeneration plant including the off-gas cleaning is 4,6 years without governmental subsidizing.

2. Inledning

Rapporten redovisar ett demonstrationsprojekt avseende CO₂-gödsling med avgaser från en gasmotor med katalysator för rening med avseende på NO_x och andra skadliga ämnen. Projektet är ett samarbetsprojekt med deltagande av:

Haldor Topsøe A/S
Svenskt Gastekniskt Center AB och
Dansk Gasteknisk Center a/s

Projektet är utfört hos:

Gartneriet Alfred Pedersen
Assensvej 219
DK-5250 ODENSE SV

Alfred Pedersen har välvilligt ställt sitt trädgårdsmästeri till förfogande för demonstrationen och han har även praktiskt medverkat vid genomförandet.

3. Bakgrund

Naturgas används i stor omfattning för uppvärmning i trädgårdsmästerier, och i många växthus används rökgaserna från gaspannorna för CO₂-gödsling.

Med det ökande intresset i Danmark för installation av små kraftvärmeaggregat baserade på lean-burn gasmotorer, har det uppstått ett behov av att rena avgaserna från motorerna, så att även dessa avgaser kan användas för CO₂-gödsling.

Haldor Topsøe har utvecklat en katalysatorteknik som går under namnet GREE-NOX, och som kan åstadkomma den nödvändiga reningen av avgaserna. Den första anläggningen är placerad hos en trädgårdsmästare på Fyn.

Trädgårdsmästerierna och gasföretagen har uttryckt önskemål om att få bättre kunskap om den nya teknikens möjligheter, och det

finns således ett behov för att genom ett demonstrationsprojekt göra sig mer förtrolig med de problemställningar som är knutna till tekniken.

3.1 Industriell kraftvärme i trädgårdsmästerier

Industriell kraftvärme syftar till optimal bränsleutnyttning genom samtidig produktion av elkraft och värme. Tekniken väger tungt i den danska energiplaneringen som siktar mot besparingar i förbrukningen av primärenergi.

För att främja övergång till industriell kraftvärme ger danska Energistyrelsen bidrag till investeringen och det betalas ett CO₂-tillskott för el producerad i sådana anläggningar.

I ett trädgårdsmästeri kommer värmeproduktionen att vara densamma efter övergång till kraftvärme och till detta kommer bränsleförbrukningen för elproduktionen. Besparingen i primärenergi ligger i att elproduktionen ersätter elproduktionen i kondenskraftverk.

I ett gasmotorbaserat kraftvärmeverk överförs värmen från motorn i flera värmeväxlare som tar värmen från kylvattnet, avgaserna och smörjoljan samt eventuellt även från mellankylaren i turboladdaren.

Trädgårdsmästerier har goda möjligheter att utnyttja värme vid låg temperatur och är ofta i stånd att ordna så att returtemperaturen ligger under 50°C. Detta gör att gasmotorer passar mycket bra för branschen och garanterar hög totalverkningsgrad.

Moderna lean-burn gasmotorer har en totalverkningsgrad som typiskt brukar ligga på 85 % och en elverkningsgrad på mellan 36 och 40 %.

Hög utnyttjningsgrad är en förutsättning för kraftvärmeverkets räntabilitet och ut-

nyttjningstiden bör som regel vara minst 5.000 h/år. Detta medför att kraftvärmeverket inte kan dimensioneras för att täcka värmebehovet under de kallaste månaderna, utan där finns behov av en värmepanna som komplement.

Det är ekonomiskt fördelaktigt att producera så mycket el som möjligt under topp- och höglasterperioder på grund av tariffkonstruktionen för avräkning av el. Under de årstider då värmebehovet är mindre än motorns värmeeffekt, är det fördelaktigt att ha ett värmelager, så att produktionen av el och värme kan ske oavhängigt av när värmebehovet uppträder.

Eftersom värmebehovet på sommaren är litet kan det vara vanskligt att uppnå tillräckligt många drifttimmar för kraftvärmeverket. De trädgårdsmästerier som har det största värmebehovet under sommaren är de som utnyttjar ett stort luftutbyte för att reducera luftfuktigheten och därmed minska risken för svampangrepp.

Den relativa inbesparingen i primärenergi kan beräknas med utgångspunkt från verkningsgraderna för värmepanna, kraftvärmeverk och kraftverk. Antag att dessa är följande:

Verkn.grad värmepanna	90 %
Verkn.grad för värme i kraftvärmeverk	56 %
Verkn.grad för el i kraftvärmeverk	36 %
Verkn.grad kraftverk	42 %

Man kan då visa att besparingen i primärenergi i förhållande till den värmeproduktion som har överförts till kraftvärmesystemet blir 85 %.

Energiplan 95, Dansk Energi Analyse A/S (juli 1995) är ett utkast till uppdatering av den danska Energiplan 2000. Den pekar på att värmeunderlaget för industriell kraftvärme i trädgårdsmästerierna är 3000 TJ/år. Då har även räknats med att vissa

besparingar i värmeförbrukningen gjorts genom tillämpning av standardlösningar.

3.2 CO₂-gödning i trädgårdsmästerier

I dag är det helt naturligt att tillföra växthusluften extra CO₂. En vanlig koncentration är 500 - 1.500 ppm CO₂ mot naturligt förekommande 320 - 330 ppm.

Bakgrunden är att CO₂ är "råmaterial" för alla kolföreningar i växterna och att försök över hela världen har visat att produktionen ökar i takt med stigande CO₂-koncentration.

De första försöken med förhöjd CO₂-koncentration gjordes i slutna växthus, dvs växthus som endast hade en luftomsättning på ca 1/2 gång per timme på grund av otätheter i huset. Senare har man genomfört försök, där man via perforerade slangar under plantornas lövmassa fördelat CO₂-tillförseln jämnt över hela arealen upp till den naturligt förekommande nivån, dvs 330 ppm. På så sätt har man ersatt den CO₂ som plantorna förbrukar utan att tillförd CO₂ "läcker ut" utanför växtmassan. Detta beror på att CO₂ flyttas med hjälp av de gradienter som uppstår mellan växtmassans inre och växthusets i övrigt. Med samma koncentration på båda ställena blir gradienten noll och då sker ingen transport.

Med nya möjligheter att på ett enkelt och billigt sätt skaffa CO₂ från de avgaser som annars skulle gått ut i atmosfären via skorstenen, är det ekonomiskt försvarbart att höja CO₂-koncentrationen i växthusen även om dessa ventileras med luftningsfönster.

Från utländska försök vet man att vid kontinuerlig CO₂-tillförsel under den ljusmäsigt gynnsamma sommarperioden kan merutbytet bli 10-20 %. Det är därför inte orealistiskt att räkna med ett merutbyte (merproduktion) på minst 10 % i de ekonomiska kalkylerna.

Produktionens koppling till CO₂-koncentrationen är i stort sett oberoende av vilken växtkultur det rör sig om, men i några kulturer kan man lättare utnyttja den större produktionen än i andra.

Kulturer som tomater och gurkor, där skörd pågår hela sommaren, är väl lämpade för CO₂-gödsling. Det är i sådana kulturer man får den största förräntningen av tillförseln. Det är också med dessa kulturer som de flesta försök gjorts och överallt i Europa arbetar man nu med att nyttiggöra CO₂ och inte enbart se CO₂ som ett problem.

I Danmark finns för närvarande ca 500 ha växthus, varav 100 ha används för ätbara produkter, typ tomater, gurkor och sallad, medan övriga 400 ha används för krukväxter.

Sett med europeiska ögon är den danska arealen liten. I Holland finns 9.500 ha växthusyta, varav 5.000 ha används för ätbara produkter. Växthusarealen i England är 2.000 ha, i Frankrike 7.000 ha och i Belgien 2.000 ha. Genom att använda en del av den CO₂ som är en följd av el- och värmeproduktion till gödsling fördröjs utsläppet till atmosfären.

I tidigare nämnd Energiplan 95 pekas också på att förutom den energibesparing som övergång till kraftvärme innebär, så sker en primärenergibesparing vid användning av avgas-CO₂ i stället för produktion av CO₂ på flaska. För framställning av 2,2 kg ren CO₂ åtgår motsvarande 1 m³ naturgas. En stor del av CO₂ framställs dock vid jäsnings och här är besparingen knuten till kompression och transport.

4. Uppdragsbeskrivning

Målsättningen för projektet var att demonstrera att industriell kraftvärme, baserad på lean-burn gasmotorer kan installeras i

trädgårdsmästerier med den extra funktionen att producera avgaser, som efter rening i en GREENOX katalysatoranläggning, kan användas för CO₂-gödsling i växthus.

På den installerade GREENOX-anläggningen har genomförts ett korttidsmätprogram bestående av ett antal mätserier, vilka dokumenterat anläggningens funktion genom mätning av avgasernas renhet. I rapporten beskrivs även anläggningen generellt inklusive regler- och övervakningssystemet.

Mätningarna genomfördes i två etapper. Etapp 1 genomfördes när anläggningen gått i drift och fungerat tillfredsställande under en tid och etapp 2 genomfördes efter tre månaders drift. Mätningarna under etapp 1 skedde under två dagar vid start, normaldrift och i samband med stopp. Det skall observeras att de renade avgaserna släpptes ut i växthusen endast under normaldriftförhållanden och då avgasernas renhet var tillfredsställande.

DGC utförde mätningar på avgaserna före och efter katalysatoranläggningen. Mätningarna omfattade O₂, CO₂, CO, NO_x och totalt oförbrända kolväten (UHC). Dessutom togs gasprover för analys med avseende på etyleninnehåll (C₂H₄).

Haldor Topsøe utförde analyser på spårämnen som är typiska för processen. Analyserna omfattade etylen (C₂H₄), ammoniak (NH₃), lustgas (N₂O), isocyansyra (HNCO) och cyanid (HCN).

5. Anläggningsbeskrivning

Kraftvärmeverket består av två identiska gasmotorer som levererar värme till trädgårdsmästeriet. Avgaserna från motor 2 kan renas i en katalysatoranläggning och utnyttjas för gödsling i växthusen.

5.1 Kraftvärmeanläggningen

Anläggningen är en självständig värmeenhet som överför sin värme till växthus m m via en huvudvärmeväxlare.

Kraftvärmeanläggningen fungerar som grundlastverk med ca 5.600 drifttimmar under ett normalår. Under januari till och med april kompletteras värmeproduktionen med värme från gaseldade pannor, se bilaga 4. Totalt värmebehov under ett normalår är $Q_{tot} = 48.900.000$ kWh (48,9 GWh).

Gasmotorerna är av fabrikat Niigata med beteckningen 18V26HX-G och vardera med en effekt på 3.133 kWe. Värmeproduktionen från de båda motorerna är 5.300 MWh/månad, dvs högre än vad som anges i bilaga 4.

Motorerna kräver ett gstryck på 3,6 bar (ö), varför en separat gasledning har dragits från en mät- och reglerstation.

I samband med installationen av kraftvärmeverket byggdes växthusens värmesystem om så att returtemperaturen sänktes från 70 à 90°C till högst 50°C. Därmed kan värmen från laddningsluftkylaren utnyttjas fullt ut och avgaserna kylas ner till 60°C i två avgasvärmeväxlare (Danstoker).

Följande värden gäller per motor:

Producerad eleffekt	3.133 kW
Egenförbrukning och förluster	<u>117 kW</u>
Netto säljbar effekt	3.016 kW
Värmeproduktion	3.623 kW
Tillförd gaseffekt	8.165 kW (750 m ³ /h gas)
Elverkningsgrad	36,9 %
Värmeverkningsgrad	<u>44,3 %</u>
Totalverkningsgrad	81,2 %

Besparingen i primärenergi i förhållande till den värmeproduktion som har överförs till kraftvärmens blir 90 %. Då har räknats med att de värmepannor som ersatts hade en verkningsgrad på 85 % och att det kraftverk som "avlastas" har en verkningsgrad på 42 %.

5.2 Utrustning för avgasrening

Reningsutrustningen är endast i drift när behov av CO₂-gödsling förekommer, dvs i praktiken ett par timmar före soluppgången och fram till solnedgången. Tidsmässigt sammanfaller således CO₂-behovet med höga eltariffer. När det inte är behov av CO₂-gödsling leds avgaserna förbi reningsanläggningen för att förlänga utrustningens livslängd.

I bilaga 1 visas schematiskt reningsanläggningen.

Installationen består av:

Katalysator: GREENOX-anläggning bestående av DENOX/CATOX katalysatorer för rening av avgaserna.

Analyssystem: Instrumatic, NO_x-NH₃ och CO.

Spjäll och fläktar för CO₂-doseringen styrs av växthusens klimatstyrningsdator.

Kapaciteten är 18.000 Nm³/h svarande till avgasmängden från en motor. Motorers naturgasförbrukning är 750 m³/h motsvarande 8.165 kW. Det bildas 2,2 kg CO₂ per m³ förbrukad naturgas, vilket innebär att motorn levererar 1.650 kg/h CO₂.

5.2.1 Topsøe SCR-process

DENOX är Topsøes SCR-process för selektiv katalytisk reduktion av NO_x. NO_x-reduktionen åstadkommes genom insprutning

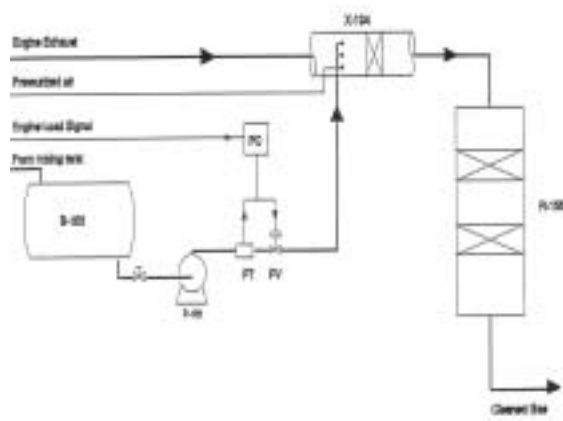
av det reducerande ämnet urea i de varma avgaserna. Gasen skall ha en temperatur på 300-425°C. NO_x omvandlas då till fritt kväve (N₂) och H₂O på katalysatorytan.

I ett mellanled av processen produceras ammoniak, som omsätts till kväve och vatten. En del av ammoniaken omsätts emellertid ej utan följer med avgaserna ut som ammoniakslip. I ett optimalt system ligger ammoniakslippet under 10 ppm vid 90-95 % NO_x-konvertering, men försöker man pressa konverteringen högre upp genom att öka ammoniakförhållandet så ökar ammoniakslippet drastiskt.

Ett ammoniakslip på 10 ppm har inte någon ekonomisk betydelse, men det bör å andra sidan inte vara väsentligt högre, eftersom ammoniak i atmosfären omvandlas till sura produkter. Därför har myndigheterna i allmänhet satt en gräns vid 10-20 ppm. Luktgränsen ligger vid 25 ppm.

SCR DENOX-anläggningen:

Anläggningens principiella utformning framgår av nedanstående figur.



Bland större komponenter kan nämnas:

- B-103 Tank för urea-lösningen
- P-101 Pump för urealösningen
- X-104 Mixer för blandning av urea och avgaser
- R-105 SCR reaktor

Den 40 %-iga urealösningen förvaras i tank B-103 vid rumstemperatur och atmosfärstryck. Med pump P-101 matas urealösningen till spraydysor i motorns avgas-system. När urealösningen kommer i kontakt med de varma avgaserna förångas vattnet snabbt och temperaturen i ureadropparna stiger över spaltningstemperaturen, varvid det för varje kmol urea (60 kg) bildas 2 kmol ammoniak (34 kg). I SCR-reaktorn reagerar ammoniaken med NO_x såsom tidigare beskrivits .

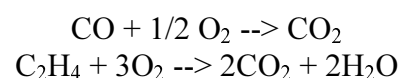
Topsøes SCR-katalysator är av typ DNX, en skorrugerad monolistisk katalysator baserad på keramiska fibrer och förstärkt med titandioxid på vilket det katalytiska aktiva materialet är pålagt.

Katalysatorn tillverkas med ett antal olika håldiametrar från 3 till 6 mm. Den optimala håldiametern sammanhänger med stofinnehållet i avgaserna samt med restriktioner vad avser tryckfallet.

Den normala drifttemperaturen för DNX-katalysatorn är 300-425°C. Ju högre temperatur ju mindre katalysatorvolym. Katalysatorerna levereras inkapslade i kassetter med dimensionerna (L) 466 x (B) 466 x (H) 572 mm.

5.5.2 Topsøe CATOX process för oxidation av CO och Etylen

CATOX är Topsøes process för oxidation av CO och kolväten såsom etylen. CATOX-katalysatorn är placerad efter DENOX-katalysatorn i samma reaktor och arbetar vid samma temperatur som denna. Katalysatorprocessen består i en oxidation av CO och etylen till CO₂ och H₂O:



Vid oxidationen stiger temperaturen några få grader, exakt värde sammanhänger med innehållet av CO och kolväten i rökgasen.

Katalysatorn kan också reducera innehållet av spårämnen från SCR-processen, varvid dock innehållet av NO₂ stiger något, Katalysatorn kan endast förbränna en obetydlig del av den oförbrända naturgasen i avgaserna vid den aktuella temperaturen, men metan har ingen inverkan på plantorna.

Katalysatorn består, liksom NO_x-katalysatorn, av en bärare som i detta fall med en monolitisk katalysator består av aluminium på keramiska plattor. Aluminium är poröst och med stor yta varpå de aktiva komponenterna är pålagda. Normal livslängd för en katalysator är 3-5 år, exakt tid beror på den relativa katalysatorvolymen i förhållande till gasmängden och de aktuella driftförhållanden som råder.

5.3 Styrning och övervakning

Växthusets klimatstyrning ombesörjs via en central dator (PC) som också företar överordnade start och stopp av GREENOX-anläggningen samt styr spjäll och fläktar till CO₂-doseringen. Larmsignaler från GREENOX-styrningen sänds till klimatstyrningen som reagerar genom att stoppa inblåsningssläktarna till växthusen och stänga spjäll nr 3, se bilaga 1. På så sätt säkerställs att inte orenade avgaser skickas in i växthusen.

Styrningen säkerställer också att inte spjällen 1 och 2 stängs samtidigt, eftersom det annars kan ske en tryckupbyggnad i avgaskanalen.

DGC har provat övervakningssystemet genom felsimulering och avsiktliga strömavbrott. Allt fungerade som det skulle med bl a stopp av CO₂-fläktarna och stängning av spjäll 3. Motsvarande prov har även utförts på GREENOX-anläggningen.

6. Utförda mätningar/använd utrustning

Efter intrimning av anläggningen i mars 1995 utförde Topsøe analyser den 4 och 5 april 1995 och den slutsats som kunde dras var att kvarvarande föroreningar i den rena gasen låg väl inom uppsatta specifikationer.

Första fasen av anläggningsmätningarna utfördes av DGC och Topsøe den 27 april 1995. Andra fasen utfördes 22 augusti 1995 och 17 oktober 1995. DGC har utfört mätningar på avgaserna före och efter katalysatorn. Mätningarna utfördes med DGC:s mätutrustning som kalibrerats mot medförda certifierade provgaser. Mätutrustning och kalibrering beskrivs närmare i bilaga 2.

Mätningarna före katalysatorn skedde på en speciell provstuds på avgasröret från motor nr 2. Studsen var placerad 5 meter före ureainjektionsdysan och reaktorn. Mätningarna efter katalysatorn skedde omedelbart efter avgasvärmväxlaren, nära uttaget till anläggningens analysystem. DGC har dessutom samlat in gasprover för analys av etyleninnehåll.

Mätningarna omfattade:

O₂
CO₂
CO
NO
NO_x (summan av NO och NO₂)
UHC (totalt oförbrända kolväten)

Topsøe har utfört analyser på spårämnen som är karaktäristiska för processen. Analyserna har gjorts före och efter katalysatorn i samma mätstudsar som DGC använt.

Analyserna omfattade:

NH₃

N₂O
HNCO
HCN
C₂H₄

nen. Mätningen påbörjades efter CO₂-klarsignal från kontrollpanelen och start av fläkten för dosering till växthuset (etylenprov IV).

6.1 DGC:s mätresultat

Första mätfasen utfördes den 27 april 1995.

Båda kraftvärmeverkets motorer körde oavbrutet hela dygnet på full last. Motor nr 2 körde 102 %, men då och då sjönk effekten med 5 -10 %, vilket emellertid återhämtades inom loppet av 5 minuter. Kontrollpanelens skrivare visade att ureadoseringens lastföljsamhet var god.

Vid mättillfället var katalysatoranläggningen i drift från kl 05.00 till kl 20.00, dvs motsvarande den tid då det finns behov av CO₂ i växthusen. Under övrig tid leddes avgaserna genom en by-passledning till skorstenen.

Katalysatorn var i stabil drift innan mätningarna påbörjades och ureadoseringen var inställd för rening ned till 7-10 volym-ppm NO_x.

Följande mätningar utfördes:

1. Entimmes emissionsmätning efter katalysatorn (etylenprov I).
2. Entimmes emissionsmätning före katalysatorn (etylenprov II).
3. Entimmesmätning efter katalysatorn.
4. Emissionsmätning efter katalysatorn vid larmsignal. Avgaserna leds till skorstenen och ureainjektionen stoppas.
5. Start av ureainjektionen.
6. Entimmes emissionsmätning efter katalysatorn efter återstart av ureainjektio-

Etylenanalyserna är utförda hos Haldor Topsøe (se bilaga 3) efter det att Plante-fysiologisk Laboratorium vid Institut for Plantebiologi, Den Kgl Veterinær- og Landbohøjskole, haft problem med att särskilja etan (C₂H₆) och etylen (C₂H₂). Etan ingår i naturgas med 5 % och återfinns som oförbränt i avgaserna.

Mätresultaten återfinns i tabell 1 som okorrigerade volymandelar i torr gas vid den aktuella syrgashalten. Dessutom visas medelvärdena för mätningarna 1, 3 och 6 som volymandelar omräknade till våt gas. Omräkningen har skett genom multiplikation med 0,911 vid aktuell syrgashalt, varigenom medelvärdena omedelbart kan jämföras med garantivärdena (Design basis 30 augusti 1993). Alla uppmätta emissionsvärden ligger under designvärdena.

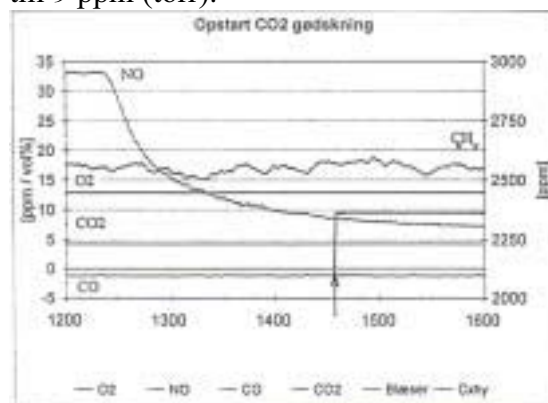
Tabell 1. Emissionsmätningar och designvärden

Mätning (torr)	O ₂	CO ₂	CO	NO	NO _x	UHC	Etylenprov
Nr	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	12,9	4,26	≈ 0	–	7,1	2500	0,19 (I)
2	12,9	4,25	49	51	64	2600	4 (II)
3	13,0	4,21	≈ 0	6,1	10,0	2500	–
4	12,9	4,30	≈ 0	33	61	2500	–
6	12,9	4,30	≈ 0	5,9	10,1	2500	0,17 (IV)
Medel (våt) (11,8 % O ₂) 1, 3 och 6		3,85	≈ 0	5,5	9,1	2300	0,16
Designvärde (aktuell O ₂)	–	–	35	9	10	–	0,5

Mätning nr 2 representerar de orenade avgaserna från motorn som leds till skorstenen via en by-passledning när katalysatorn inte används. Denna emission skall ligga under tillåtet gränsvärde, som anges i mg/nm³ vid 5 % O₂ (torr). De uppmätta värdena för CO och NO_x i punkt 2 blir om de korrigeras till detta tillstånd, CO = 120 mg/nm³ och NO_x = 260 mg/nm³. Båda ligger betydligt under gränsvärdena.

Det skall observeras att motorns emissionsvärden under mätning nr 2 avviker en del från de förutsatta. Värdena vid inloppet till reaktorn är således alla lägre än förutsatt och det torde bero på att motorn levererats med en oxidationskatalysator som reducerar CO- och etyleninnehållet i avgaserna och möjliggör drift med speciellt stort luftöverskott, varvid NO_x-bildningen begränsas. Den procentuella reduktion av NO_x och etylen i GREENOX-anläggningen som gäller som design basis, har därför inte uppnåtts eftersom målet var att ligga under designvärdena med god marginal.

I samband med mätning nr 5, start av urea-injektionen, registrerades hela förloppet med kontinuerliga analysatormätningar. Mätningarna återges i figur 1 där start av fläkten för CO₂-dosering till växthusen är markerad vid tiden 1.460 s. Vid denna tidpunkten hade NO-värdet sjunkit till 9 ppm (torr).



Figur 1. Emissionsmätningar under start av ureainjektion

6.2 Haldor Topsøes mätresultat

Mätresultaten återfinns i bilaga 3.

6.3 Diskussion

Alla uppmätta emissionsvärden ligger under designvärdena, och innehållet av spår-

ämnen är mycket lågt och utan praktisk betydelse.

Emissionsvärden i förhållande till tröskelvärden för skador:

Danska undersökningar över känsligheten för NO och NO₂ hos plantor i krukor utförda vid halter på omkring 1 volym-ppm NO, visar att det är mycket stor skillnad på olika plantors reaktioner, alltifrån stor negativ känslighet till en positiv inverkan.¹⁾

Här skall betydelsen av avgasemissionerna diskuteras mot bakgrund av några generella tröskelvärden för skador. Dansk Erhvervsgartnerforening refererar till holländska undersökningar och anger gränsvärden för långsiktig påverkan enligt tabell 2. Uppgivna värden är viktandelar, vilka omräknats till volymandelar i tabellen. Värdena är generella och inte värderade i förhållande till den faktiska produktionen.

Tabell 2. Tröskelvärden för skador samt erforderlig minsta utspädning av avgaserna

Ämne	Skadetröskel	Skadetröskel	*) Orenad rök-gas	*) Renad rök-gas
(torr)	ppm _{vik}	ppm _{vol}	ppm	ppm
CO ₂	1600	1050	500	1000
NO	0,250	0,240	0,230	0,092
NO ₂	0,100	0,060	0,059	0,060
SO ₂	0,015	0,007	0,002	0,007
beräkn				
Etylen	0,020	0,021	0,018	0,003
CO (human)		35	0,022	0
F _{min} (utspädning)			220	60

* Beräknad koncentration i utspädd rök-gas

För att visa betydelsen av gränsvärdena kan man tänka sig att avgaserna späds ut med vanlig luft till dess att inget av gränsvärdena överskrids. Utspädningen anges med en minsta "förtunningsfaktor" F_{min} som alltså behövs för att undvika skador på plantorna.

1) Saxe H: Relative Sensitivity of Greenhouse pot plants to long-term exposures of NO- and NO₂-containing air. Environmental Pollution 85 (1994) pp 283-290

I ett växthus är förhållandena mer komplicerade, i det att utspädningen varierar med avståndet från dysorna och till följd av väd-ring. Plantornas upptagning av CO₂ minskar också innehållet av denna gas, så det är inte möjligt att använda CO₂-innehållet som ett nöjaktigt mått på utspädningen. Under vädringsperioder kan det dock ge en viss vägledning.

De orenade avgaserna kan användas för en begränsad CO₂-gödning. Den minsta utspädningen (förtunningsfaktorn) har beräknats till 220 gånger och det är innehållet av såväl NO som NO₂ som är gränssättande. Den utspädda blandningen innehåller då 500 ppm CO₂ och då har medräknats luftens naturliga CO₂-innehåll på 300 ppm. Värdena efter utspädning är markerade med *) i tabell 2.

De renade avgaserna behöver endast spädas 60 gånger och här är det innehållet av NO₂ och SO₂ som är gränssättande. Förhållandet NO₂/NO är högre efter katalysatorn och det torde bero på att det återbildas en del NO₂ i oxidationskatalysatorn. Innehållet av SO₂ är inte uppmätt utan beräknat utifrån svavelinnehållet i naturgasen och i den smörjolja, som förbränns i motorn (0,45 g/kWh_el).

Övriga komponenter ligger långt under gränsvärdena vid en utspädning på 60 gånger innehåller blandningen 1.000 ppm CO₂ inkl luftens naturliga innehåll på 300 ppm.

Det skall noteras att den minsta utspädning som beräknas med utgångspunkt från NO₂-innehållet är på den säkra sidan, eftersom NO₂ är vattenlösligt och en del därför tvätas ut i kondensvatten eller binds på våta ytor i växthuser.

6.4 Uppföljande mätresultat

Andra mätfasen utfördes 22 augusti 1995 och 17 oktober 1995.

Den 22 augusti var katalysatoranläggningen i stabil drift innan mätningarna påbörjades, och ureadoseringens inställning var samma som under första mätfasen.

Följande mätningar utfördes:

1. Emissionsmätning efter katalysatorn (Etylenprov I)
2. Emissionsmätning före katalysatorn (Etylenprov II)

Två prover togs från varje mätställe och etylen-analyserna gjordes vid Plantefysiologisk Laboratorium ved Institut for Plan-tebiologi.

Mätresultaten framgår av tabell 3 som okorrigerade volymandelar i torr gas vid aktuell syreprocent. Dessutom är värdena omräknade till våt rökgas, varigenom de direkt kan jämföras med garantivärdena. Resultaten visar att avgaserna inte har ändrat sammansättning sedan första mätetappen.

GREENOX-katalysatorn klarar designvärdena för oxidation av CO och etylen samt NO_x-reduktionen.

Tabell 3. Uppföljningsmätningar och designvärden

Mätning (torr)	O ₂	CO ₂	CO	NO	NO _x	UHC	Etylenprov
Nr	%	%	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
1	12,9	4,34	≈ 0	9	9,2	2400	0,15 (I)
2	13,0	4,57	40	54	70	2600	2,18 (II)
nr 1 (våt) (11,8 % O ₂)							
	3,95	≈ 0	5,1	8,4	2200	0,14	
Designvärde							
	–	35	9	10	–	0,5	

Topsøes mätningar redovisas i bilaga 5.

7. Drifterfarenheter

Erfarenheterna från kraftvärmeverket och GREENOX-anläggningen är mycket goda och anläggningen motsvarar förväntningarna.

Förekommande praktiska problem har snabbt avhjälpats och i det avseendet är man mycket nöjd med Haldor Topsøes insatser. Driftstörningarna har i stort varit knutna till urea-dysans funktion.

Trädgårdsmästeriets överordnade klimatstyrning registrerar inte alla felmeddelanden från GREENOX-styrningen, och felmeddelanden som erhålls kan gå förlorade om printern inte fungerar. Därför är det inte alltid möjligt att spåra ett felförlopp.

Under uppföljningsmätningarna konstaterades en förhöjd NO_x-nivå utan att anläggningsinstrumenteringen indikerade detta. Detta visar hur viktigt det är med löpande kalibrering av analysatorerna och att det

regelmässigt utförs kontrollmätningar som också omfattar provtagningen .

Höglast 12.200 MWh/år à 35 öre/kWh
Låglast 11.400 MWh/år à 14 öre/kWh

8. Ekonomi

Ekonomi redovisas för dels kraftvärme-
produktionen, dels avgasreningen och ba-
seras på beräknade kostnader. Alla kostna-
der är i danska kronor.

8.1 Industriell kraftvärme

Driftintäkter	Elförsäljning	9.340 KDKK
	Statsbidrag	<u>3.090 KDKK</u>
	Totalt	12.430 KDKK
Driftkostnader	Drift o underhåll	1.050 KDKK/år
	Ökade bränsle- utgifter	<u>3.250 KDKK</u>
	Totalt	4.300 KDKK/år
Investeringar	Projektering	1.600 KDKK
	Utrustning	20.600 KDKK
	Installation	<u>11.500 KDKK</u>
	Totalt	33.700 KDKK

En del av investeringskostnaden har finan-
sierats av staten.

Kalkylen bygger på bl a följande förut-
sättningar:

*Bränsle m m till existerande pannanlägg-
ning:*

Naturgas	4.300.000 m ³ /år
Köp av el	50 Mwh/år

Bränsle m m till kraftvärmealternativet:

Naturgasmotorer	7.600.000 m ³ /år
Naturgaspannor	1.260.000 m ³ /år
Elköp till KV	300 MWh/år
Elköp till pannor	20 MWh/år

Elförsäljning till nätet:

Spetslast 7.300 MWh/år à 48 öre/kWh

8.2 Avgasrening

Total anlägg.kostnad 3.250.000 DKK

Även här har staten lämnat ekonomiskt bi-
drag, vilket ingår i angiven kostnad ovan.

Anläggningens drifttid antas vara 3.600
h/år och med en CO₂-kapacitet på 1.650
kg/h produceras det 6.000 t/år CO₂. Skulle
denna CO₂-mängd köpts på flaska skulle
den kostat 10 MDKK/år. I praktiken hade
man dock inte gödlat med så stor CO₂-
mängd.

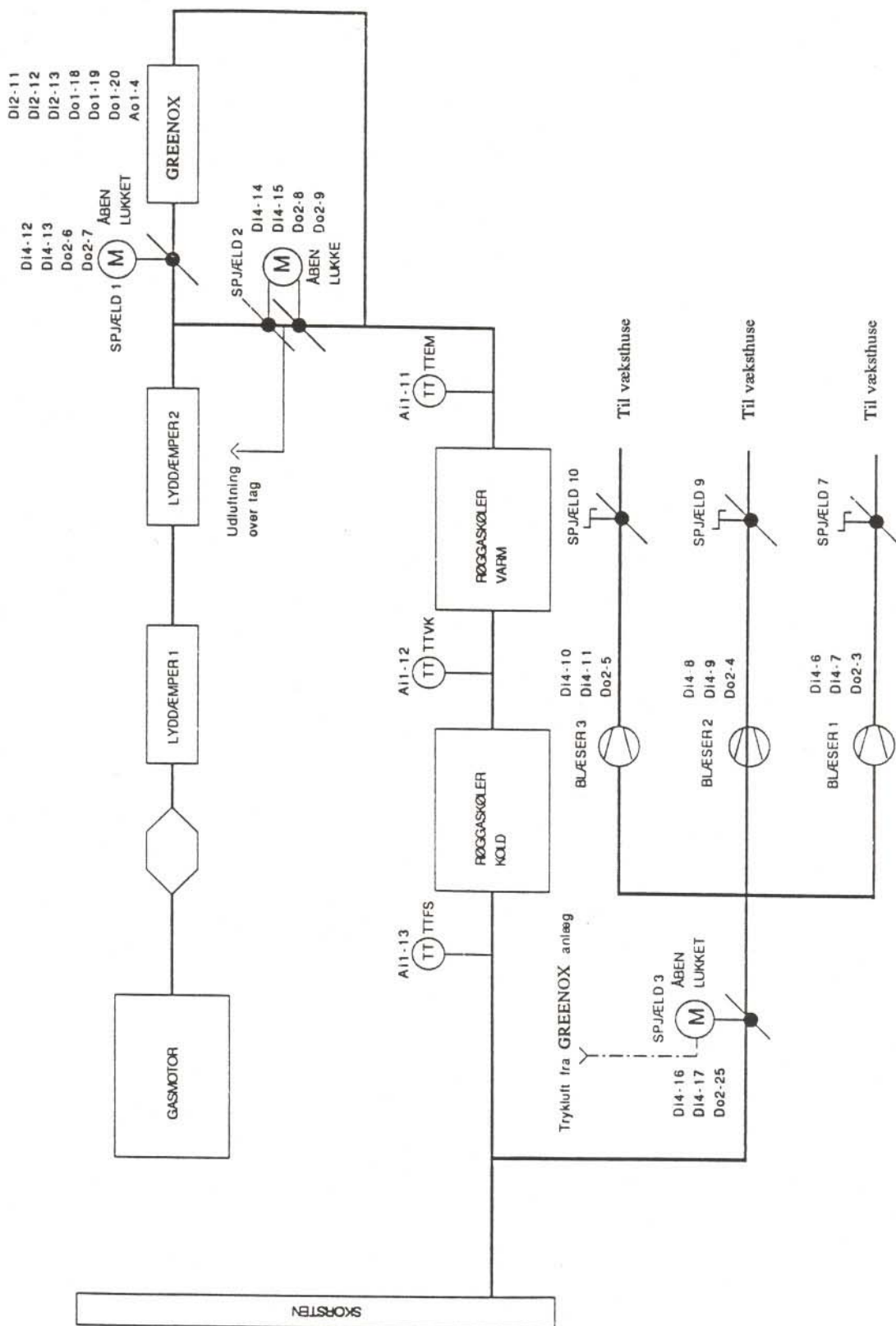
Trädgårdsmästeriet har tidigare använt av-
gaserna från pannorna för CO₂-dosering
men pannorna kan bara utnyttjas för spets-
last om man skall ha rimlig drifttid på
gasmoterna. Det är därför rimligt att ta
med investeringen i avgasrening utrust-
ningen i kraftvärmeverkets pris och be-
räkna återbetalningstiden med utgångs-
punkt från detta pris .

Kostnad kraftvärmeverk	33.700 KDKK
Kostnad avgasrening	<u>3.250 KDKK</u>
Totalt	36.950 KDKK

Intäkter minus utgifter

för KVV	8.130 KDKK/år
Kostnad för rening	<u>100 KDKK/år</u>
Nettointäkt	8.030 KDKK/år

Rak pay-off tid 4,6 år



Data för mätutrustningen

Avgaskonditionering

Den delström av motoravgaserna som togs ut till analysatorerna konditionerades på följande sätt:

- Grov fuktighet uppsamlades i en droppavskiljare.
- Avgaserna torkades i en kyltork med kapaciteten 0-10 l/min med sänkning av daggpunkten till $2 \pm 1^\circ\text{C}$.
- Avgaserna filtrerades i ett partikelfinfilter med en avskiljningsgrad på $> 99,9\%$ för partiklar på $0,3\ \mu\text{m}$.
- Avgaserna fördelades via flödesmätare till de enskilda analysatorerna.

Avgasernas syreinhåll

Syrgasinnehållet mättes med en paramagnetisk mätare på torkade avgaser. Mätaren hade följande data:

Fabrikat	SERVOMEX
Typ	572-paramagnetisk
Mätområdet	0 - 25 vol %
Noggrannhet	$\pm 0,1$ vol %
Kalibrering	N ₂ och atmosfärisk luft

Koldioxid i avgaserna

Koldioxidhalten mättes med non dispersiv infraröd absorption på torra avgaser. Mätaren hade följande data:

Fabrikat	Mannesmann, Hartmann & Braun
Typ	Uras 3K

Bilaga 2

Mätområde	0-10-20 vol % CO ₂
Reproducerbarhet	≤ 0,5 % av mätområdet
Linearitet	≤ 1 % av mätområdet
Kalibrering	N ₂ och ”span”-gas (10 % CO ₂ i kväve och syre)

Kväveoxider i avgaserna

Innehållet av kväveoxider mättes med en kemiluminiscensanalysator som bygger på mätning av ljusemissionen från kväveoxidernas reaktion med ozon. Mätningen utfördes på torra avgaser. Analysatorns data var följande:

Fabrikat	Thermo Environmental Instruments
Inc	
Typ	10 A/R-kemiluminiscens
DGC-nr	S/N 00301
Mätområde	0-2,5 till 0-10.000 ppm i 8 områden
Reproducerbarhet	1 % av fullskaleutslag
Linearitet	± 1 % från 0,05 - 2.000 ppm med luft till ozongeneratoren ± 1 % från 0,05 - 10.000 ppm med syre till ozongeneratoren
Kalibrering	N ₂ och kalibreringsgas med 215 ppm NO i kväve

Kolmonoxid i avgaserna

Mätning skedde med en infraröd absorptionsanalysator på torr gas. Data för analysatorn:

Fabrikat	Hartmann & Braun AB
Typ	Uras 3 G
Mätområde	0-200 till 0-20.000 ppm i 4 områden
Reproducerbarhet	≤ 0,5 % av mätområdet
Linearitet	≤ 1 % av mätområdet
Kalibrering	N ₂ och kalibreringsgaser med 86 och 198 ppm CO i kväve.

Datalogger

Fabrikat	Analog Devices
I/O	RTI-820
Modules	5 B Series

Bellinge Gartneri
Målinger foretaget den 27/4 95

NH₃-slip målinger:

Dato	Placering	Tid start/stop	Vo Nl	NH ₃ mol	NH ₃ ppm
27/4 95	Efter V.V.	10.00-10.38	109.2	< 1.5*E-6	< 0.3
27/4 95	Efter V.V	10.45-11.25	116.3	< 1.5*E-6	< 0.3

Cyansyre :

Dato	Placering	Tid start/stop	Vo Nl	Cyansyre mol	Cyan syre ppm
27/4 95	Efter V.V.	11.34-12.15	119.5	< 0.6*E-6	<0.1

Cyanid (drægerrør):

Dato	Placering	Tid	HCN ppm
27/4 95	Efter V.V	12.30	< 0.1
27/4 95	Efter V.V	13.40	< 0.1

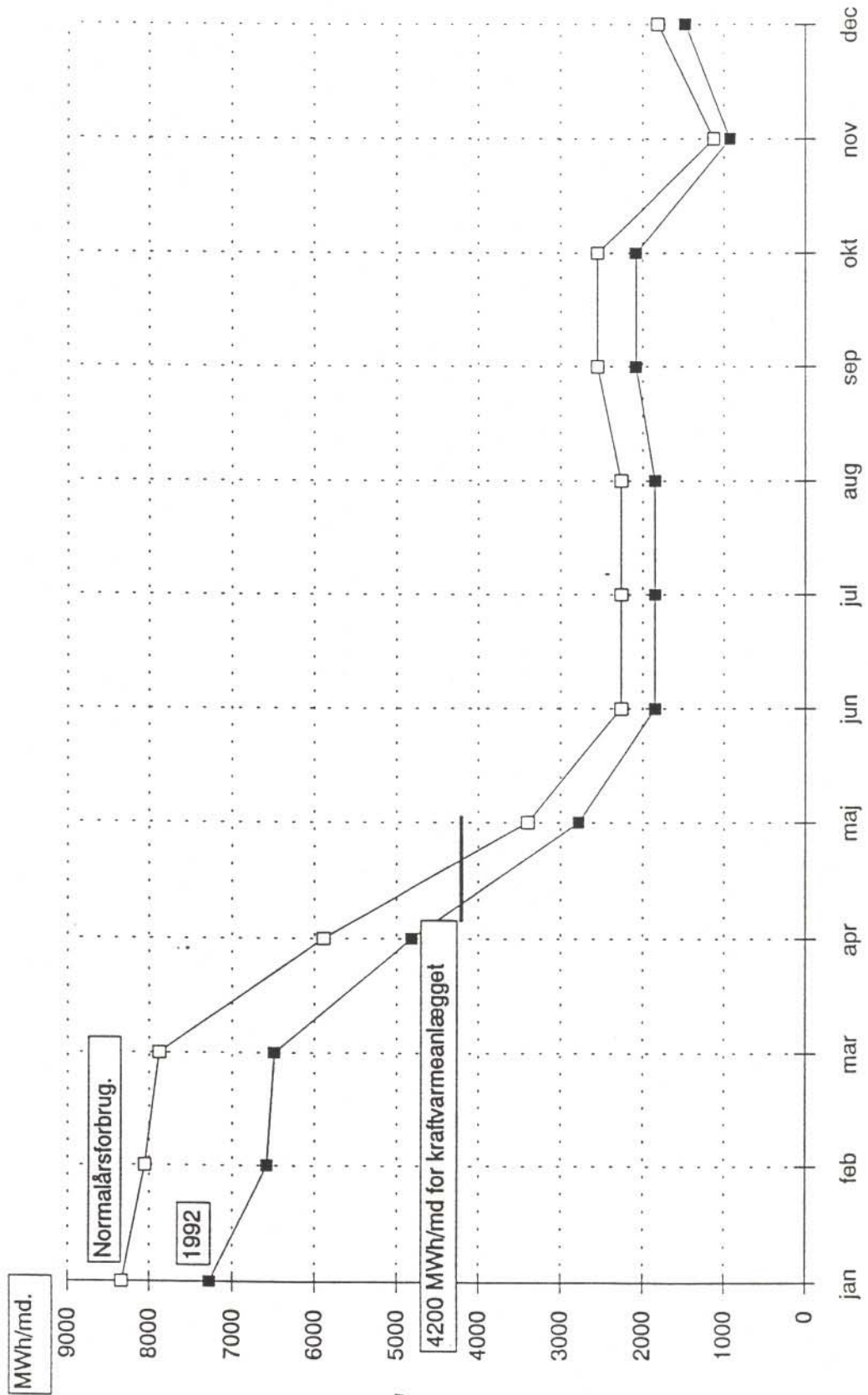
N₂O, Ethylen :

Dato	Prøve Nr.	Målested	Ethylen ppm	N ₂ O ppm
27/4 95	1	Efter V.V	0.16±0.02	< 0.5
27/4 95	2	Reaktor ind	5	< 0.5
27/4 95	3	Reaktor ind	5	< 0.5
	1 (DGC)		0.19±0.02	
	2 (DGC)		4	
	4 (DGC)		0.17±0.02	

9333 Gartneriet Alfred Pedersen, Bellinge

Der er regnet med en kedelvirkningsgrad på 85 %.
 Rådighedstallet for kraftvarmeanlægget er indregnet med 95 %.

Varmeforbrugskurve



Bellinge Gartneri
Målinger foretaget den 22/8-95

NH₃-slip målinger:

Dato	Placering	Tid start/stop	Vo Nl	NH ₃ mol	NH ₃ ppm
22/8-95	Efter kedel	10.35-11.10	91.58	0.89*E-5	2.2
22/8-95	Efter kedel	11.35-11.55	74.88	0.78*E-5	2.3
22/8-95	Efter kedel	12.05-12.40	81.16	0.72*E-5	2.0

Cyansyre:

Dato	placering	Tid start/stop	Vo Nl	Cyansyre mol	Cyansyre ppm
22/8-95	Efter kedel	13.15-13.35	54.3	<0.6*E-6	<0.1

Cyanid (Drægerrør):

Dato	Placering	Tid	HCN ppm
22/8-95	Efter kedel	12.00	<0.1

N₂O, Etylen:

Dato	Prøve Nr.	Målested	Etylen ppm	N ₂ O* ppm
22/8-95	1.	Efter kedel	0.05±0.05	1.4±1
22/8-95	2.	Efter kedel	0.05±0.05	2.0±1
22/8-95	3.	Før reaktor	3.2±0.2	≤ 1
22/8-95	4.	Før reaktor	3.7±0.2	≤ 1

* N₂O er korr. til 4.5% vol.CO₂.



SE-205 09 MALMÖ • TEL 040-24 43 10 • FAX 040-24 43 14
Hemsida www.sgc.se • epost info@sgc.se
