Danmarks
Tekniske
Universitet

OKTOBER 2005

# Langtidsforsøg med totrinsforgasseren ”Viking”

Ulrik Henriksen

Jesper Ahrenfeldt

Jens Dall Bentzen

Institut for
Mekanik,
Energi og
Konstruktion

MEK

Energiteknik

MEK-ET-2005-07

# Langtidsforsøg med totrinsforgasseren ”Viking”

Oktober 2005

Ulrik Henriksen, DTU

Jesper Ahrenfeldt, DTU

Jens Dall Bentzen, COWI

Institut for Mekanik Energi og Konstruktion (MEK)
Danmarks Tekniske Universitet
Nils Koppels alle
Bygning 402
2800 Kongens Lyngby

ISBN: 87-7475.331-2

**Indhold**

Indhold…… 2

Forord…….. 4

Indledning…… 5

Procesbeskrivelse…….. 6

Anlægsbeskrivelse……. 7
Indfødning……. 7
Pyrolyseenhed……7
Koksreaktor……7
Rislen og bunden af forgasseren……7
Gasvarmevekslere……..7
Posefilter…….. 8
Kondensator……. 8
Mixertank…… 8
Motor…… 8
Styring…….. 8

Resultatoversigt……. 9
Erfaringer med langtidsdrift…… 11

Inspektionsrapporter…… 18

Undersøgelse af belægninger og askebestanddele…….18
Additivtilsætning…… 18

Forbedring af styring…….. 19

Nyt tændingssystem…….. 19

Forbedret styring af pyrolysesnegl…….. 19

Optimering på baggrund af modellering……. 20

Afprøvning af forskellige brændsler…… 20

Forbedring af konstruktionsmaterialer…… 20
Murværk…….. 21
Metaldele……. 21

Konklusion……. 21

Liste over bilag…….. 23

Liste over præsentationer…… 24

Referenceliste……. 25

Bilag 1. inspektionsrapporter…… 26

## Forord

Denne rapport, inklusiv bilag og præsentationer, udgør den faglige afrapportering af projektet: ”Langtidsundersøgelser af totrinsforgasser” FU 3201.
Projektet er gennemført med økonomisk tilskud fra Elkraft System under PSO – ordningen. Projektdeltagerne er MEK, DTU og COWI A/S.

Udover en række nationale rapporter og internationale publikationer indeholder afrapporteringen en række beregningsnotater, analyseresultater samt de inspektionsrapporter der hver måned er udarbejdet vedrørende Vikingforgasseren.
En af rapporterne (”Verifikation og optimering af totrinsforgassermodel”) er resultatet af et polyteknisk midtvejsprojekt og blev afsluttet med karakteren 11.

Nærværende arbejde er gennemført som et samarbejde mellem Biomasseforgasningsgruppen, MEK, DTU og COWI A/S. Endvidere har eksterne danske aktører bidraget med bistand til projektet, herunder Jørgen Beck Christensen vedrørende murværk, Force Technolgy vedrørende korrosion af metaller, Risø og Teknologisk Institut vedrørende Tjæremålinger og målinger af kondensat, Erik Hansen vedrørende styring og Lasse Holst Sørensen som har bidraget med analyser af de kemiske forhold i forgasningtrinet.

Arbejdet efterfølges af projektet ”Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem” som gennemføres i øjeblikket.

Arbejdet har i stor udstrækning dannet baggrund for samarbejdet med indutrivirksomheden Weis A/S om opskalering og kommercialisering af totrinsforgasseren.

## Indledning

Gennem de seneste 16 år har der været arbejdet med totrinsforgasning på DTU. Arbejdet førte bl.a. til bygning af den totrinsforgasser der benævnes 100 KW forgasseren (Ref 1, 2, 3, 4). Med denne forgasser blev der opnået overordentlige lovende resultater ved anvendelse af træflis som brændsel. Også forsøget med halmpiller viste gode resultater. Med resultaterne fra denne forgasser blev totrinsforgasseren egentlig betragtet som færdigudviklet, og produktmodning og kommercialisering ville naturligt være de næste skridt. De gode resultater var imidlertid ikke tilstrækkeligt til at gøre industrivirksomheder interesseret i kommercialisering, og selv om dette nok hovedsageligt skyldtes de økonomiske og markedsmæssige forhold, blev det vurderet, at også den teknologiske risiko havde en betydning. Det var også klart, at selv om 100 kW anlægget havde forgasset i sammenlagt 400-500 timer, delt op på mange forsøg, så ville der være en betydelig udviklings- og forskningsmæssig indsats, før et færdigt kommercielt produkt ville eksistere.
På denne baggrund blev det besluttet at bygge en lille demonstrationsforgasser på DTU. Målet med denne forgasser var i al sin enkelthed at bygge en totrinsforgasser, der skulle forgasse træflis og køre fuldautomatisk og uovervåget. Anlægget skulle køre med indfødning af brændsel i minimum 1000 timer.

For at undgå alle de forskellige krav og interesser, der følger med et traditionelt eksternt finansieret projekt, blev det besluttet at anvende Halmfortets opsparede midler suppleret med midler fra UVE- ordningens opfølgningsprogram.

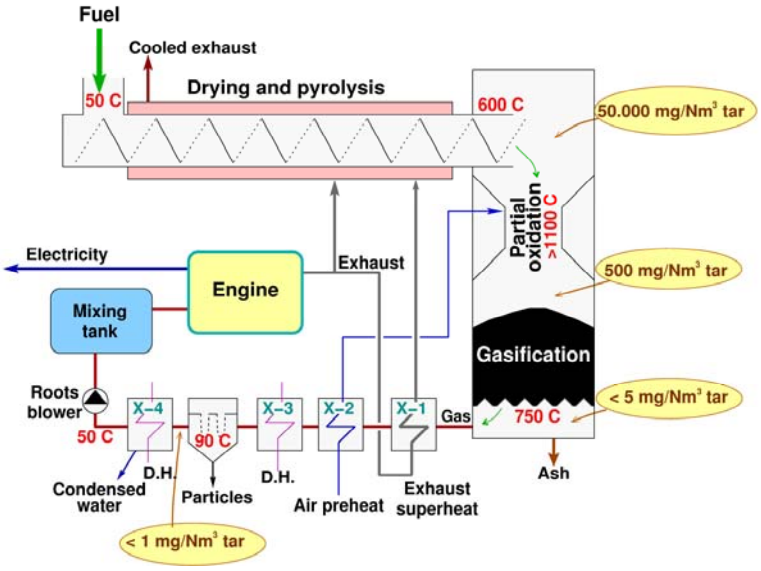
Figur 1. Foto af facaden på forgasningsanlægget Viking. Det fejres at Vikingforgasseren har passeret 1000 drifttimer.

Som de fleste allerede ved blev målet nået og mere til. Resultaterne der er opnået har bevirket at VIKING forgasseren blev udvalgt som en af 5 succeshistorier inden for forgasning af det europæiske forgasningsnetværk GAS-NET (se bilag 9). Resultaterne er blevet præsenteret ved en række internationale seminarer og konferencer (se liste over præsentationer).

## Procesbeskrivelse

For at præsentere sig bedst muligt blev der arbejdet en del med anlæggets udseende og komponenternes placering i forhold til hinanden. På figur 1 ses et foto af anlæggets front.

Det blev valgt at bygge anlægget som en traditionel totrinsproces med eksternt opvarmet pyrolyseenhed. Procesdiagrammet ses på figur 2.




Figur 2. Procesdiagram for Viking forgasningsanlægget.

Flisen kommer ind i en doseringsenhed hvor en snegl doserer flisen til pyrolyseenheden. Brændslet ledes gennem pyrolyseenheden ved hjælp af en snegl. Når flisen således er tørret og pyrolyseret falder koksen ned i koksforgasningsreaktoren.
De flygtige pyrolyseprodukter blandet med vanddampen fra tørringen af flisen møder den forvarmede luft, og den partielle oxidation finder sted. Produkterne strømmer ned og reagerer med koksen. Den herved producerede gas ledes ned gennem risten og videre ud i gassystemet.

Gassen passerer først en cyklon og ledes derefter til en varmeveksler, hvor en del af motorens udstødningsgas forvarmes. Herefter ledes gassen gennem luftforvarmeren og videre til en termostateret køler, der køler gassen ned til en ca. 90°C, hvilket er noget over gassens vanddugpunkt. Gassen ledes herefter til posefiltret og gennem et

patronfilter, der fungerer som sikkerhedsfilter og videre til den kondenserende køler, hvor en del af vanddampen i gassen udkondenserer og bortledes. Gassen strømmer herefter gennem endnu et patronfilter, der fungerer som demistor og fjerner vanddråber fra gassen. Gassen ledes herefter gennem gasblæseren, der er en volumetrisk maskine (Rootsblæser) gennem mixertanken og til motoren. Mixertanken opblander gassen over ca. 5 minutter. Herved opnås en mere ensartet gassammensætning til motoren.

Ved motoren blandes gassen med luft i et T-stykke  Herefter opblandes luft og gas i et blandelegeme, hvorefter blandingen ledes til motorens indsugningsmanifold. Udstødningsgassen fra motoren deles således at en del opvarmes ved vermeveksling med produktgassen før den ledes til pyrolyseenhedens kappe i den varme ende. Denne del af udstødningsgassen blandes sammen med resten af udstødningsgassen hvor denne ledes til pyrolyseenhedens kappe, se figur 2. Herved opnås bedre pyrolysering og højere energivirkningsgrad af hele anlægget. Denne konfiguration er udviklet på baggrund af modelberegninger.

Efter pyrolyseenheden køles udstødningsgassen i en varmeveksler, før den ledes til skorsten. Et vandsystem er tilknyttet forgasningsanlægget svarende til et fjernvarmeanlæg. Se bilag 2 og 4.

## Anlægsbeskrivelse

### Indfødning

Flissiloen blev indkøbt som en standardkomponent. Siloen var med automatisk udtræksystem og med en kapacitet til ca. to ugers forbrug.
Indfødningssystemet blev baseret på snegle og et slusesystem bestående at to spjæld. Indfødningensneglen der føder flis i pyrolyseenheden varetager doseringen ved styring af omløbsfrekvensen.

### Pyrolyseenhed

Pyrolysesneglen består af et rør med sneglefremføring af brændslet. Opvarmningen sker ved at udstødningsgas fra motoren strømmer i en kappe omkring røret. Pyrolyseenheden er udført i rustfrit stål.

### Koksreaktor

Koksreaktoren består af en øvre del hvor den partielle oxidation finder sted. Her er tre luftdyser placeret, og delen er udført i murværksmateriale.
Længere nede i reaktoren  hvor koksbedden findes, er det anvendte materiale højtemperaturstål.

### Risten og bunden af forgasseren

Risten er en vipperist som kan lade fast materiale og gas passere igennem. I bunden af forgasseren leder to snegle aske ud gennem en ventil til en container. Containeren er lukket i forhold til omgivelserne, men kan tømmes under drift. Rist og bund er lavet af højtemperaturstål.

**Gasvarmevekslere**
Gassen ledes nu gennem en varmevekslere (X-1 på figur 2) der opvarmer en del af udstødsgassen fra motoren. Gassen ledes herefter gennem luftforvarmeren (X-2 på figur 2). Disse vekslere er fremstillet i højtemperaturstål. Herefter ledes gasen til 90°C veksleren (X-3 på figur 2) der køler gassen ned til ca. 90 °C. Denne veksler er fremstillet i rustfrit stål. Veksleren er monteret med tråd-rensesystem der fjerner belægninger, bestående af sodpartikler, fra rørene.

**Posefilter**
Gassen ledes herefter til et posefilter. Dette er købt kommercielt og monteret med almindelige polypropylen poser. Partiklerne akkumuleres i en container under bunden af filteret, og kan udtages gennem en ventil under drift.
Efter posefilteret er et politifilter bestående af et almindeligt papirpatronfilter, placeret. Dette filter findes for at rense gassen hvis posefiltret skulle fejle.

**Kondensator**
Denne veksler (X-4 på figur 2) køler gassen ned ved hjælp at returvand fra varmekredsen. Herved udkondenseres vand fra gassen. Gassen ledes herefter gennem et patronfilter svarende til politifilteret for at fange dråber i gassen. Kondensatet ledes til en palletank.

**Mixertank**
Herefter ledes gassen til en 5 $m^3$ stor opblandingstank placeret efter rootsblæseren, for at få ensartet gassammensætning.

**Motor**
Gassen ledes nu til motorens karboreringssystem og videre til motoren
Motoren er en trecylindret DEUTZ gasmotor incl. generator.
Udstødningsgassen ledes gennem varmeveksleren hvor den opvarmes af forgasningsgassen, gennem pyrolyseenhedens kappe. (Se bilag 4)

**Styring**
Anlægget styres automatisk. Styresystemet er PLC baseret og bygger på valg af en af en række mulige drifttilstande (opvarmning, opstart, ren gas til fakkel, motordrift, nedlukning).
Forgasseren kan reguleres efter tre forskellige strategier:

1) Enten kan luftindblæsningen holdes konstant, hvorefter gasstrømmen reguleres således at trykket i forgasseren ved indfødningen holdes på atmosfæretryk. Dette svarer til styringen af 100 kW anlægget.

2) Herudover er der mulighed for at holde gasproduktionen konstant. Lufttilsætningen reguleres i dette tilfælde således at trykket i forgasseren er atmosfæretryk.

3) Endelig er det muligt ved hjælp af en lambdasonde at regulere gasblæseren således, at iltkoncentrationen i motorens udstødningsgas holdes konstant. Lufttilsætningen reguleres samtidig således at trykket i forgasseren holdes konstant. Denne strategi anvendes i situationen vist på figurerne 3 og 4.

Koksbeddens højde over risten registreres ved hjælp af temperaturmålinger i koksbeddens side. Indfødningsraten reguleres således at det tilstræbes at holde koksbedhøjden konstant.
Risten aktiveres når tryktabet over koksbedden overstiger en indstillet værdi.
Driften er gennemført helt overvejende automatisk og uovervåget. Under opstart fra kold tilstand har anlægget været bemandet. Ved de seneste opstarter har anlægget været bemandet omkring 16 timer hvorefter anlægget er slået på automatisk drift. Opstart i varm tilstand f.eks. efter en alarm kræver bemanding i kort tid alt efter temperaturen i reaktoren. Opstart er ikke søgt automatiseret. Nedlukning af anlægget foregår automatisk og kræver ikke bemanding.

**Resultatoversigt.**

Der er opsamlet data for temperatur, trykdifferencer, gassammensætning, effekter osv. Udvalgte data ses af bilag 2, 3 og 4.

Tilførsel af brændsel er målt præcist i to perioder. Den ene er under forsøget i april 2003, og den anden er under forsøget i september 2003. I disse perioder er masse og energibalancen for anlægget opstillet (se bilag 6). Mellem de to forsøg er en supplerende elmåler monteret for at sikre rigtigheden af resultaterne. Energivirkningsgrader er udregnet og for begge perioder findes at virkningsgraden fra biomasse til leveret el på nettet er på 25%. Anlæggets egetforbrug af el er på ca. 2 procentpoint hvilket betyder at der produceres 27% el.

Anlægget kører fuldautomatisk og der er opnået over 2800 drifttimer.
Anlægget kører godt og stabilt.

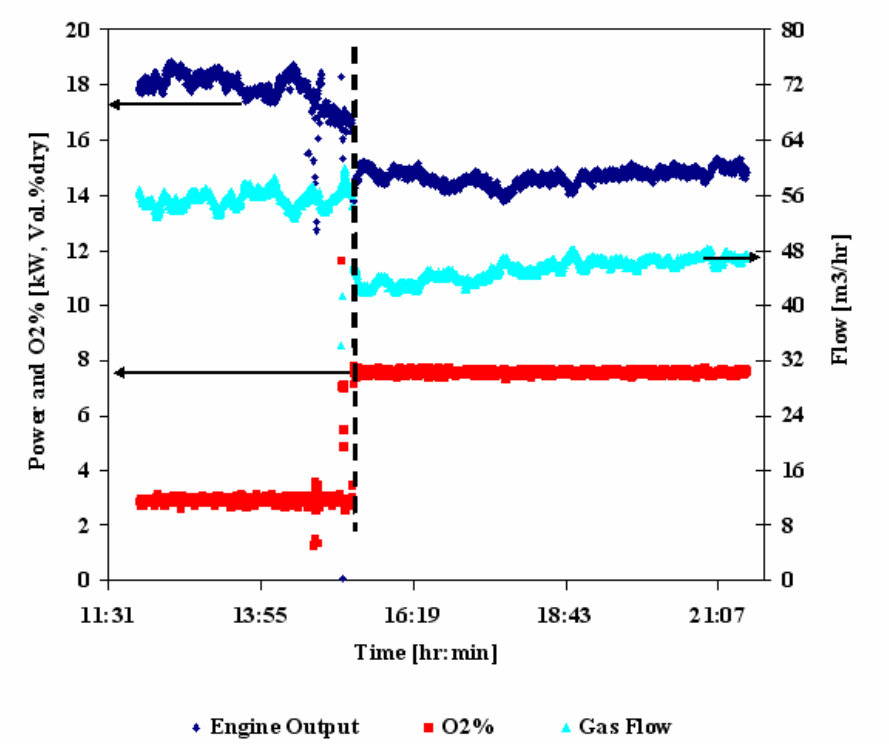
De afprøvede reguleringsstrategier (beskrevet under anlægsbeskrivelse) fungerer tilfredsstillende. Reguleringen af indfødningsraten fungerer ligeledes tilfredsstillende. Tryktabet over bedden har vist sig kun i få tilfælde at overstige den værdi hvorved risten aktiveres og i disse tilfælde falder tryktabet som det skal som følge af ristens bevægelse. Imidlertid kræves flere bevægelse med risten for at få al aske ud. Dette er søgt løst ved også at aktivere risten på faste tidspunkter.

En del af det flis, der er anvendt, stammer fra Junckers Industri i Køge. Flisen er affald fra gulvproduktionen og træ til gulvproduktion bliver under oplagringen overhældt med vand for at undgå revnedannelse. Hos Junckers anvendes havvand og derfor er der i flisen målt op til 25 gange mere natrium og klor end i almindeligt skovflis. Dette har ført til belægninger i forskellige varmevekslere mm. af salte og karbonater. Imidlertid kan disse belægninger let fjernes ved skyldning med vand.

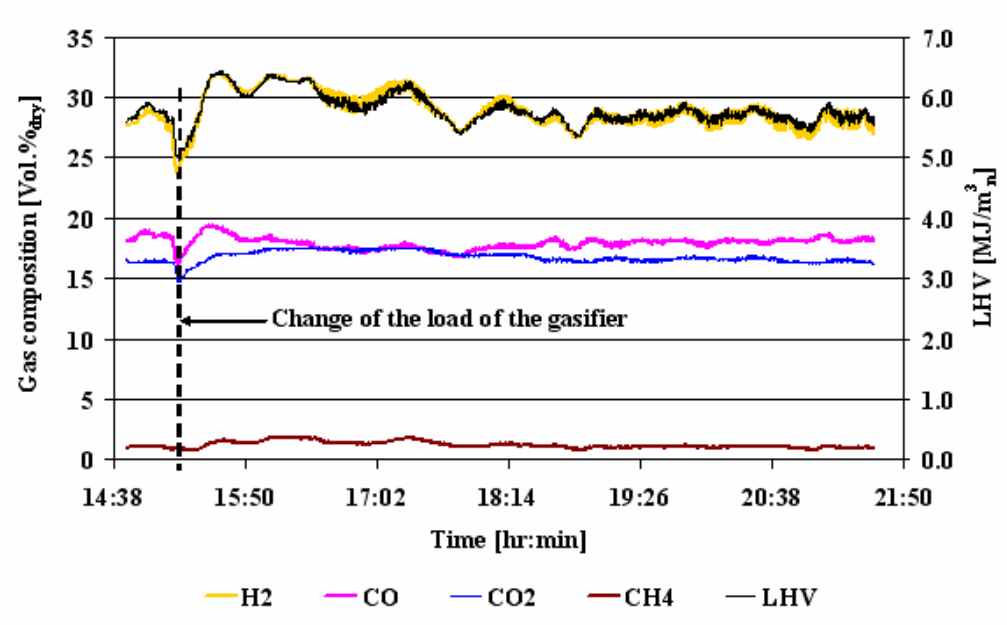
Tjæreindholdet i rågassen er målt af Teknologisk Institut, Århus, Stuttgart Universitet og DTU/Risø. Alle målinger viste at der stort set ikke var tjære i gassen. Korrosionsmæssigt viser undersøgelser at metaldelene (253 MA) i koksbedden og i gassystemet ikke er påvirket. Materialerne i toppen af forgasseren består af murværk. Det må konstateres at dette har krævet ombygning. Det må formodes at der stadig er mulighed for at forbedre levetiden for materialerne på dette sted, hvilket der arbejdes med i øjeblikket.

Kulstofindholdet i den udtagne aske udgjorde mellem 0,1 og 1 % af den indfødte tørre biomasse. Dette er lavt sammenlignet med andre forgasningsanlæg og yderst tilfredsstillende (se bilag 4).

Anlægget har vist glimrende dellastegenskaber med høj dellastvirkningsgrad. Anlægget er hurtig til at ændre belastning. På figur 3 og 4 ses resultaterne ved en last ændring. Dette foregår ved at ændre setpunktet for iltindholdet (lambda) i udstødningsgassen. Det fremgår at gaskvaliteten hurtig stabiliseres efter et spring i belastning.




Figur 3: Figuren viser ændringerne ved en ændring af setpunktet af iltindholdet i motorens udstødningsgassen. Konsekvenserne for gasflow og ydet effekt ses.




Figur 4. Figuren viser gaskvaliteten i forbindelse med den driftændring der ses på figur 3.

Posefiltret fungerede perfekt de første 1300 timer, dvs til og med aprilforsøget 2003. Herefter opstod det problem at filteret ikke kunne bagskylles under drift. Bagskylning fungerede fint når der ikke var gasflow gennem filteret. Det formodes at ved bagskyldningen blev partiklerne hvirvlet ud i rummet og når der var gasflow gennem filteret samtidig hermed, satte de sig på filteret igen. Når der ikke var gasflow under skyldningen faldt partiklerne ned. Forskellige tiltag er forsøgt for at imødegå problemet (se inspektionsrapporter efter april 2003), men problemet er ikke løst. Skyldning foretages derfor nu (automatisk) ved i ca. 1 minut at koble motoren over på naturgas medens filteret bagskylles. Dette kan i øvrigt ses som spidser på effektkurverne (figurerne 10 og 11).

**Erfaringer med langtidsdrift**

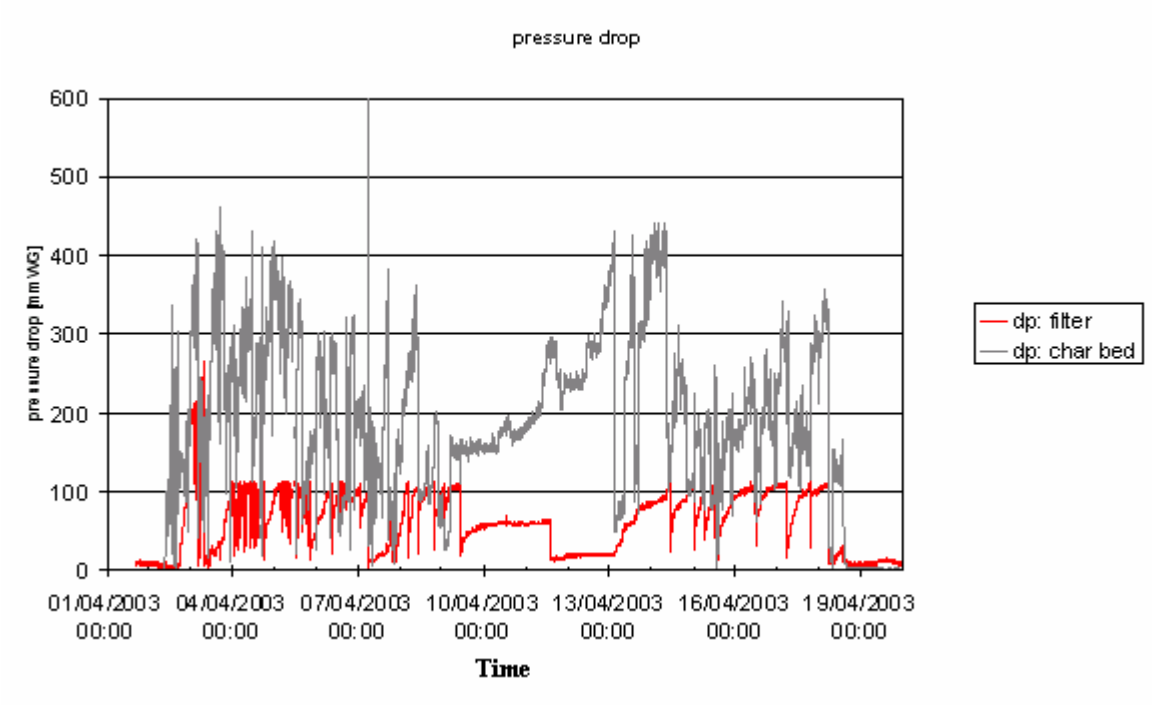
Viking anlægget har i august 2005 ialt kørt 2803 timer med brændsel født ind i forgasseren og 2508 timer med forgasningsgas til motoren.
Der har jævnt hen været drift stop af anlægget som følge af alarmer. De fleste alarmer har skyldtes indfødningsproblemer, og der er foretaget en del ændringer og ombygninger af det færdigt indkøbte kommercielle indfødningesystem.
Længste driftperriode uden alarmer har været på ca. 1 ½ uge. I tabel 1 vises en forsøgsoversigt.

| Forsøg | Drifttimer (flisindfød-ning til forgasser) | | Anvendt brændsel | Beskrevet i inspektions-rapport af: |
|---|---|---|---|---|
| Juni 2002 | Ca. 100 | Ialt 942 | Fyr 35% fugt | |
| August 2002 | Ca. 350 | | Bøg 40-45 % fugt | |
| Nov. og Dec. 2002 | Ca. 492 | | Bøg 40-45 % fugt | |
| April 2003 | 379 | | Bøg 25-35 % fugt | april, maj 2003 |
| Juni, juli, aug. 2003 | 46 | | Bøg 25-35 % fugt | Juni, juli, aug. dec. 2003, |
| September 2003 | 503 | | Bøg +Eg mix 40-45 % fugt | september 2003 |
| Oktober 2003 | 354 | | Bøg +Eg + additiv 45 % fugt | oktober 2003 |
| Maj 2005 | 579 | | Poppelmix (pil) 40-45% fugt | maj, juni 2005 |

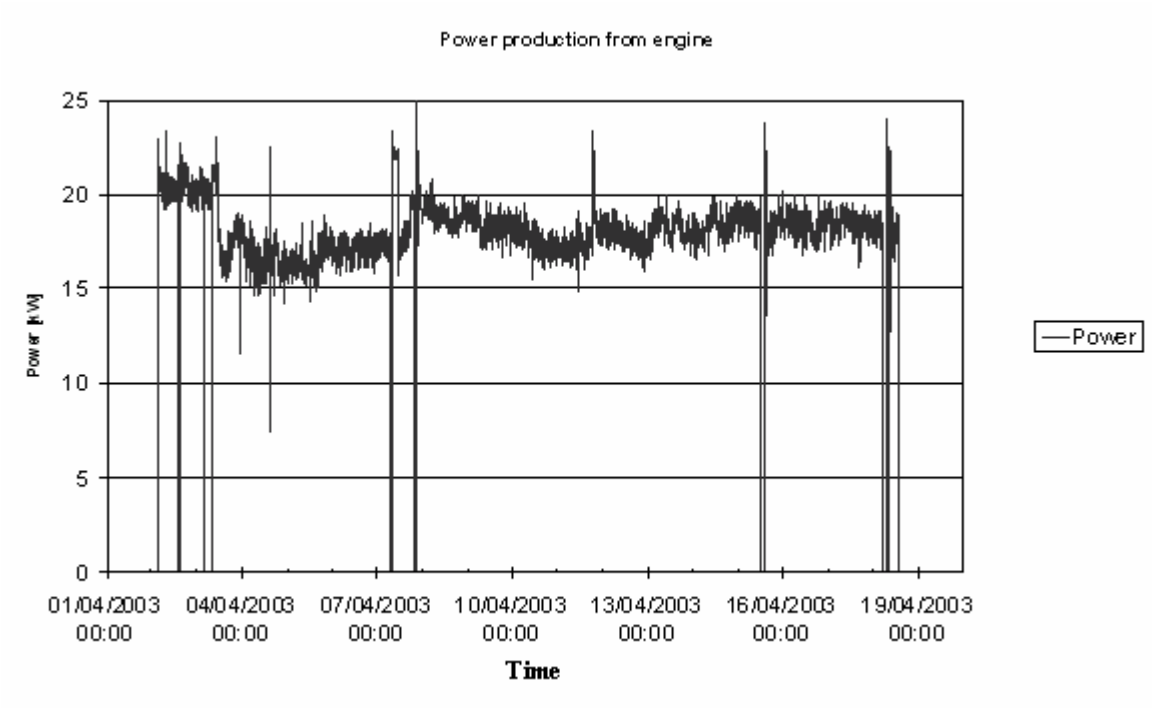
Tabel 1. Oversigt over forsøg med Vikingforgaseren.

Nedenfor vises en række kurver fra tre udvalgte forsøg (april, september og oktober alle 2003). Disse kurver giver et indtryk af anlæggets drift over lang tid.

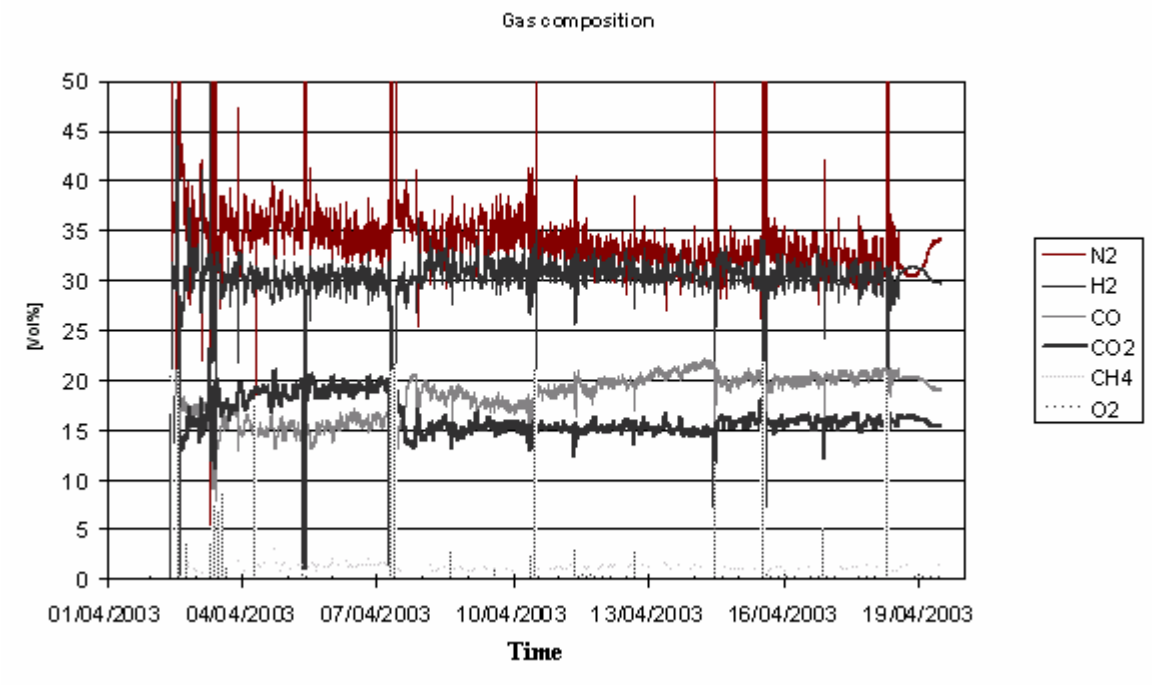
*Forsøget fra april 2003*
Herunder vises kurver fra forsøget der blev udført i april 2003.



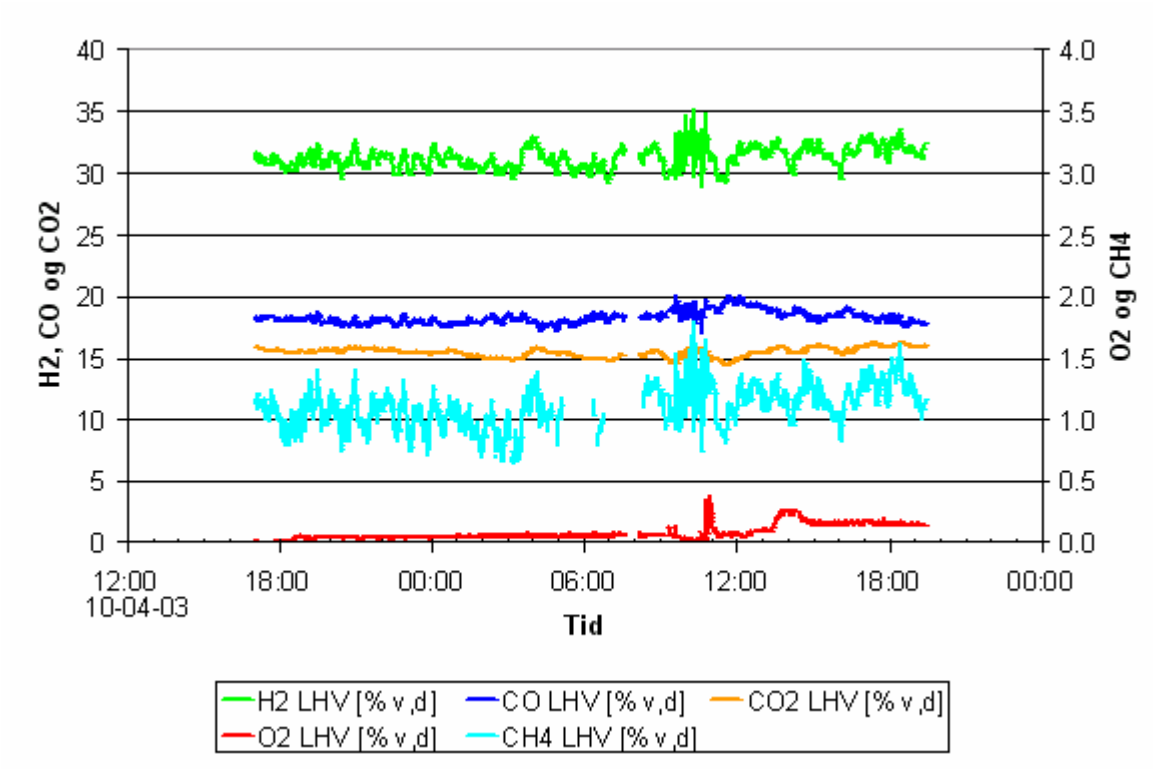

Figur 5. Figuren viser tryktab over koksbedden og over posefiltret gennem hele forsøget i april 2003.



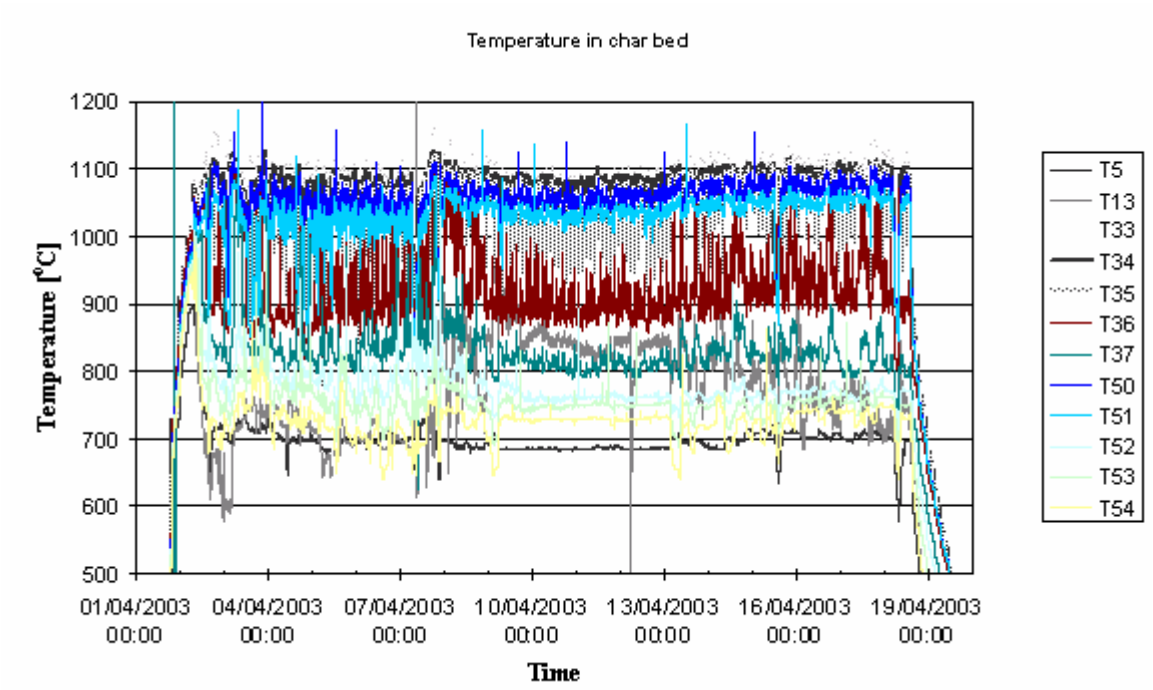

Figur 6. Figuren viser eleffekten fra motoren gennem hele forsøget i april 2003.




Figur 7. Figuren viser gassammensætningen gennem hele forsøget i april 2003.

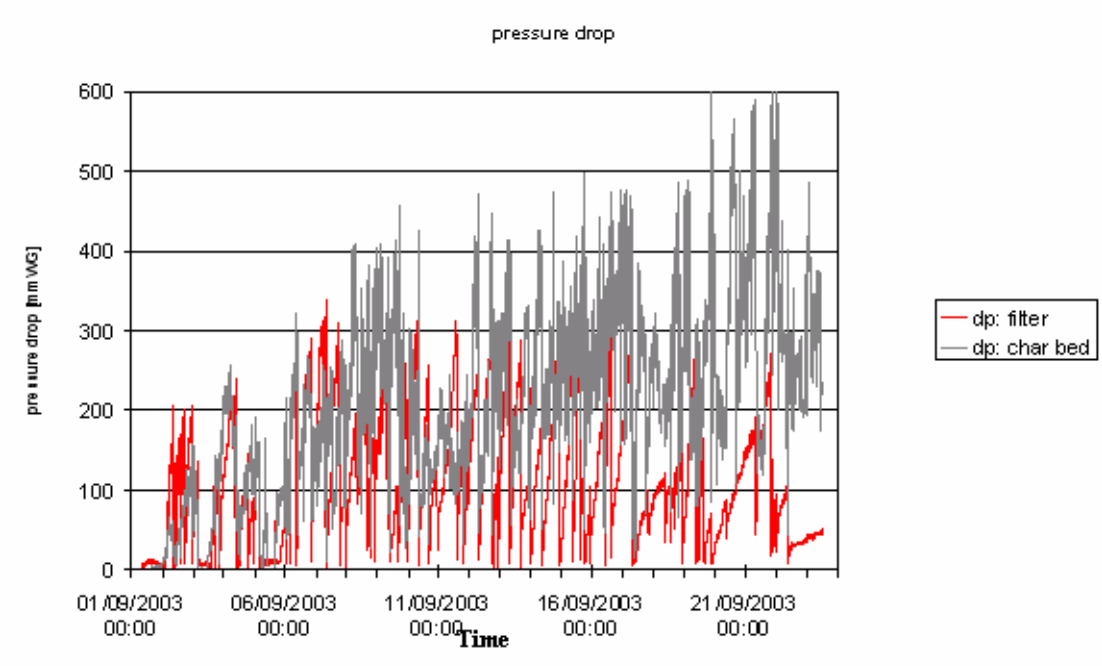



Figur 8. Figuren viser gassammensætningen målt af Teknologisk Institut Århus. Gassammensætningen er her vist i en kortere periode, således at variationerne kan ses. April 2003.

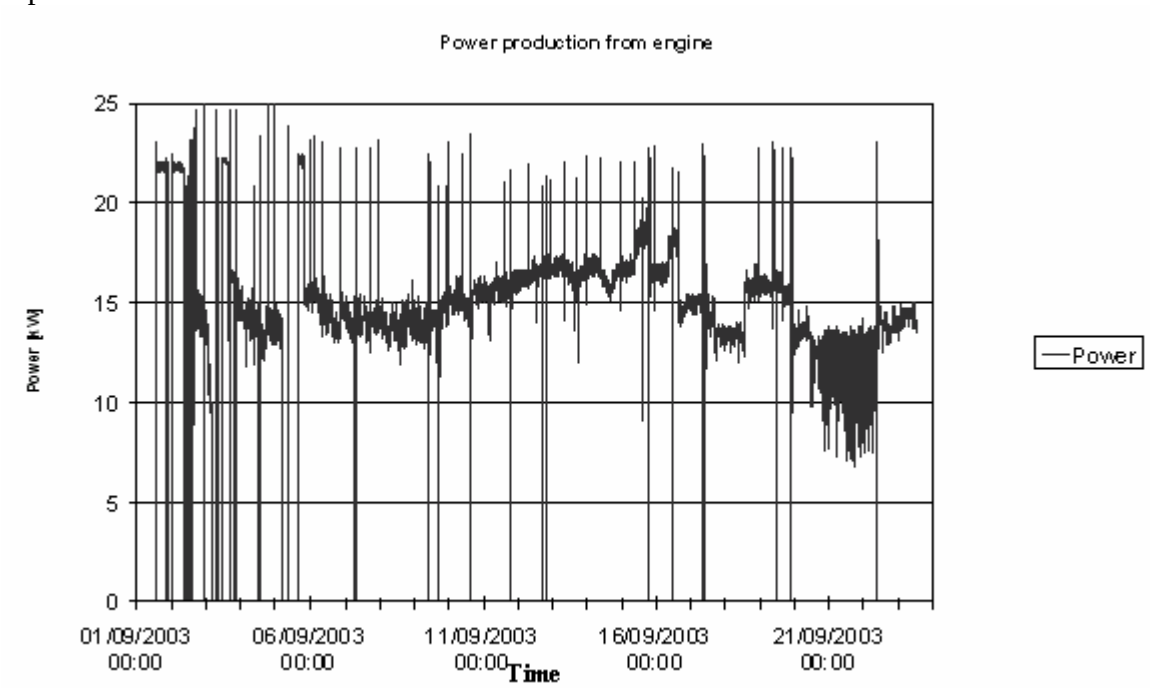



Figur 9. Figuren viser temperaturerne ned gennem koksbedden under forsøget i april 2003.

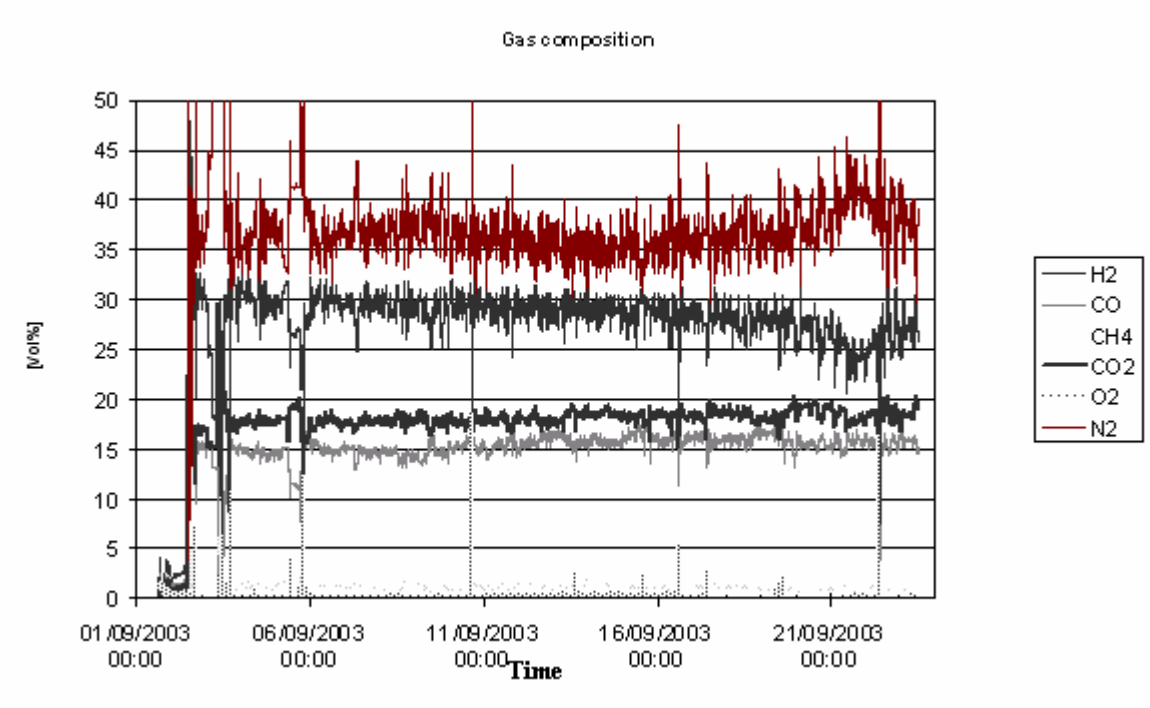
*Forsøg fra september 2003*
Herunder vises kurver fra forsøget der blev udført i september 2003.




Figur 10. Figuren viser tryktab over koksbed og over posefilter for forsøger i september 2003.

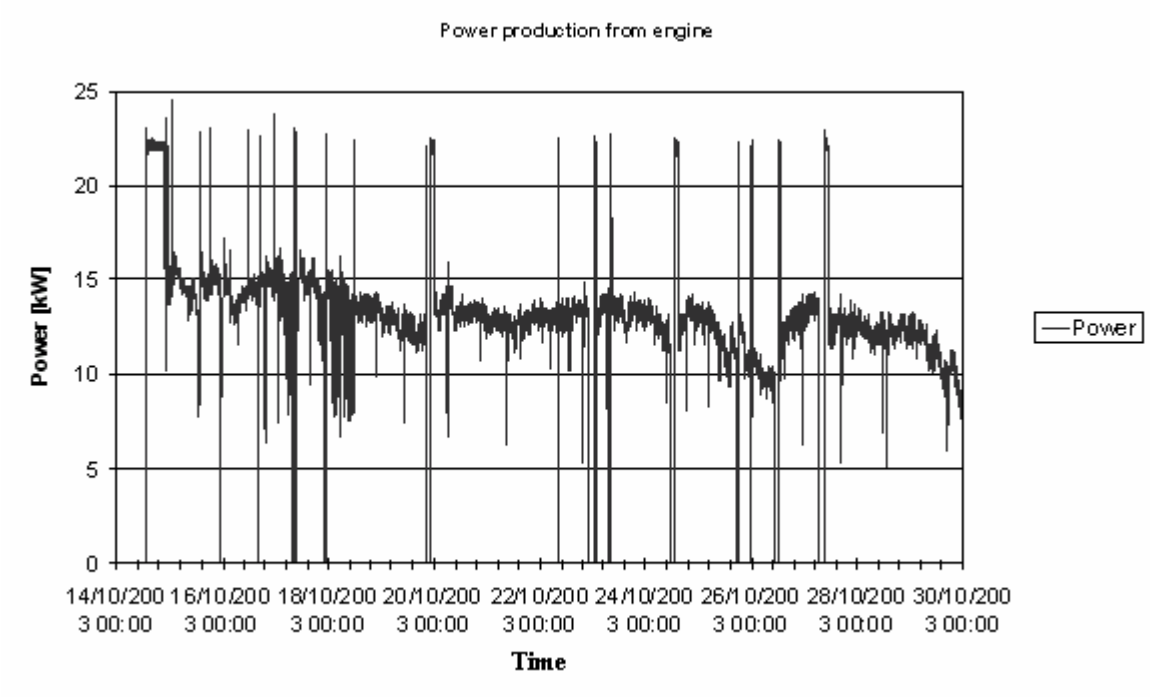



Figur 11. Figuren viser eleffekt fra motoren under forsøget i september 2003. De mange ”takker” skyldes at motoren slås over på naturgas når posefiltret skal bagskylle.

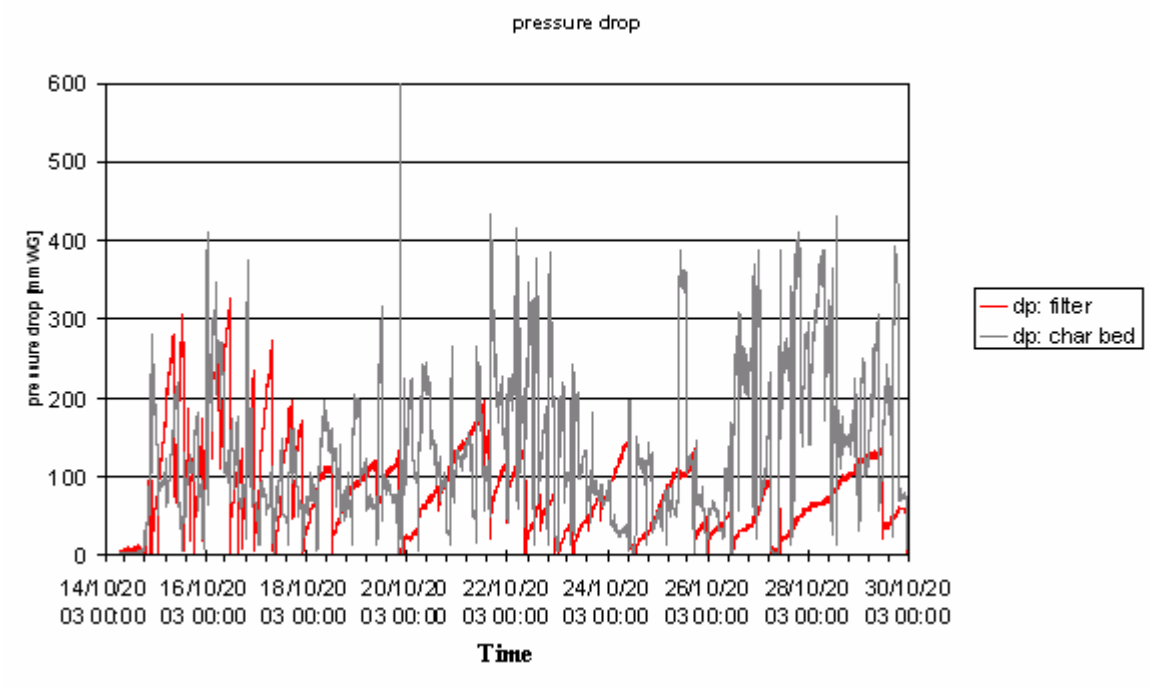



Figur 12. Figuren viser gassammensætningen for forsøget i september 2003.

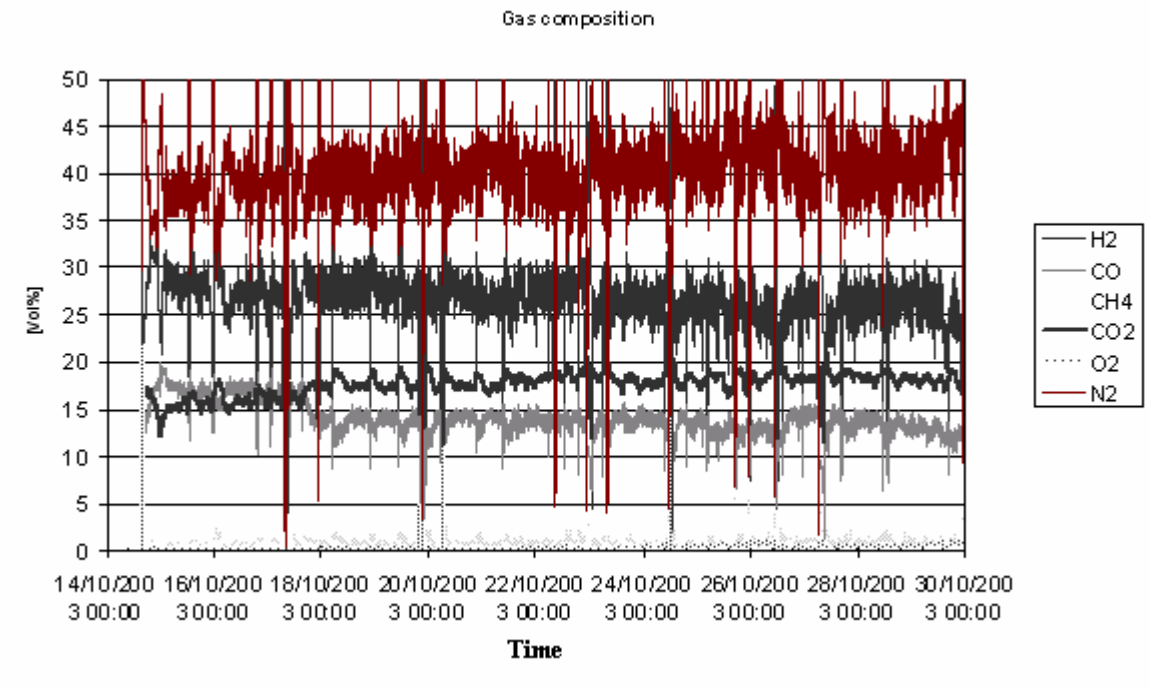
*Forsøg fra oktober 2003*




Figur 13. Figuren viser eleffekt fra motoren under forsøget i oktober 2003
De mange ”takker” skyldes at motoren slås over på naturgas når posefiltret skal bagskylle.




Figur 14. Figuren viser tryktab over koksbed og over posefilter for forsøget i oktober 2003.




Figur 15. Figuren viser gassammensætningen gennem hele forsøget i oktober 2003.

Af figurerne 5, 10 og 14 ses, at tryktabet over koksbedden varierer en hel del. Tryktabet over posefiltret ses at stige jævnt for derefter at falde som følge af bagskyldning. Det fremgår at hyppigheden af bagskyldning falder med tiden. Motorens effekt ses på figurerne 6, 11 og 13. Variationerne skyldes varierende styrestrategier. For forsøgene i september og oktober 2003 ses spidser i effektkurverne som følge af drift på naturgas under bagskyldning af posefiltret.

## Inspektionsrapporter

Der er en gang om måneden skrevet en inspektionsrapport om Vikinganlægget. Disse er samlet i bilag 4. Inspektionsrapporterne udsendes til interesserede firmaer og institutioner.
Inspektionsrapporterne beskriver de aktuelle aktiviteter gennemført i løbet af den forløbne måned. Rapporterne beskriver planlagte forsøg, forsøg, resultater fra forsøgene og vurderinger af anlæggets tilstand. Ved at læse inpektionsrapporterne fås et godt indtryk af projektets gang og resultater i kronologisk orden.
Det skal bemærkes at fra juni 2004 omhandler inspektionsrapporterne såvel nærværende projekt som projektet ”Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem”.

## Undersøgelse af belægninger og askebestanddele

Under forsøgene er der observeret belægninger i varmevekslere samt ophobning af askebestanddele på reaktorens rist.
Der er udtaget prøver af belægningerne og analyser (se bilag 1 og 5).
Belægningerne består af store koncentrationer karbonater og salte. Dette skyldes det store indhold af havvand i den anvendte flis der leveret fra Junckers i Køge. Her anvendes træet til gulvproduktion, og under oplagringen af træstammerne overrisles træet med havvand for ikke at revne mm.
Belægningerne fjernes let ved skylning med vand.

Askeklumper er fundet på risten efter forsøgene.
Der er gjort forskellige tiltag for at fjerne dette under forgasningen. Der blev indføjet perriodiske aktiveringer af risten (en eller tre gange daglig) selv om tryktabet over risten ikke er over den værdi hvor risten skal aktiveres. Dette har vist sig ikke at være tilstrækkeligt til at fjerne materialet.

Der er forsøgt under forgasningsforsøgene at prikke hul i askeklumpen medens denne er varm. Asken virker da som blød varm småkagedej. Når forsøget er afsluttet og asken er kold er den hård som sten, men hullerne der blev prikket medens den var varm kan ses. Opvarmning af den kolde aske gør den atter blød (se bilag 1, inspektionsrapport september 2003). Det må sluttes at den bløde aske er svær at håndtere i forgasseren.

### Additivtilsætning

Der er under forsøget oktober 2003 tilsat additivet CAP til brændslet ved indfødningen. Additivet var i vandig opløsning og blev doseret med en slangepumpe. Efterfølgende blev det konstateret at belægningerne var langt mere løse og bløde end ved forsøgene uden additiv. Der blev fremdeles set aske klumper på risten efter

forsøget, men disse var bløde og kunne komme gennem risten. Konklussionen var at additivtilsætningen fungerede, men at der nok skulle doseres lidt større mængder.

## Forbedringer af styring

Indfødningen reguleres således at koksbeddens højde holdes konstant. Dette system er baseret på temperaturmålinger i koksbedden kombineret med en speciel proportional regulering. Dette betyder at der vil være et of-set som følge af reguleringens natur. Der er derfor indføjet en integrationsdel i denne regulering således at koksbedhøjden kan holdes konstant ved varierende last, flisegenskaber osv.

Herudover er der foretaget en række forbedringer af styringen. Dette drejer sig om aktiveringen af risten også med faste tidsintervaller, mulighed for at køre forgasseren med de forskellige reguleringsstrategier beskrevet under regulering.
Herudover er detaljer i styringen forbedret.

## Nyt tændingssystem

Det oprindelige tændingssystem på motoren var baseret på strømfordeler og central tændspole. Det blev vurderet at en række problemer med tændingsudsættere og backfiring skyldet dette forældede tændingssystem.
Motoren blev forsynet med et nyt moderne tændingssystem med tændspoler på hver cylinder. Dette system fungere perfekt, og tændingsudsætning og back-firing er ikke observeret siden dette er monteret.

## Forbedret styring af pyrolysesneglen

Pyrolyseenheden er som beskrevet konstrueret som et rør med en snegl. Denne snegl rotere ca. en gang hvert 5. minut. Da sneglen ikke er helt fuld af biomasse, vil dette samle sig i portioner foran hver sneglevinding. Pyrolyseret koks vil derfor falde ned i koksforgasseren i portioner en gang hvert femte minut. Når koksen falder ned i reaktoren sker opvarmning af materialet, og en færdigpyrolyse finder sted. Herved påvirkes gassammensætningen (og evt. gasflowet alt afhængigt af styrestrategi). Der opstår altså svingninger med en periode på ca. 5 minutter. Dette er uønsket af hensyn til  målinger på motorens ydelse og emission, og er afhjulpet ved hjælp af en mixer-tank. Imidlertid ville den bedste løsning på problemet være at koksen blev tilført koksreaktoren mere jævnt. Derfor blev der gennemført en ændring af pyrolysesneglens rotation.
Først ønskes koksflowet fastlagt som funktion af omdrejningsvinklen. Dette blev gjort efter et forsøg hvor sneglen kørte med koks fra forsøget, og hvor det blev opsamlet i 10 forskellige bakker. Herefter blev styringen af sneglen modificeret således at omdrejningshastigheden blev varieret over en omdrejning i relation til koksflowet. Herved skulle der opnås mere ensartet koksflow.

Princippet blev afprøvet under næste forsøg, men det måtte desværre konstateres at alle anstrængelserne havde været forgæves, det fungerede ikke, gassammensætningen varierede fremdeles. Det fremgik at når man startede denne nye styrestrategi for

sneglen, udjævnedes gassammensætningen i ca en time hvorefter den atter begyndte at variere. Forklaring herpå er ikke fundet.

## Optimering på baggrund af modellering.

Det har vist sig at anlægget har en virkningsgrad på lidt over 25% fra biomasse til el. Den tilsvarende beregnede værdi baseret på de modelberegninger der er lavet som dimensioneringsgrundlag er på 24%. Der er altså opnået bedre virkningsgrad end forudset, hvilket er ret usædvanligt.
Der blev igangsat et polyteknisk midtvejsprojekt hvor der med udgangspunkt i den oprindelige simuleringsmodel skulle foretages sammenligninger mellem modellering og eksperimenter. Herefter skulle modellen forbedres. Projektet blev gennemført og en forbedret model er frembragt. Der blev opnået god overensstemmelse mellem model og eksperimenter. Rapporten (bilag 9) anbefaler visse forbedringer, bl.a. isolering af fjernvarmerørene for at opnå bedre totalvirkningsgrad. Med hensyn til forgasserens drift og elvirkningsgrad er der ifølge beregningerne ikke noget optimeringspotientale med de nuværende komponenter.
Der er ikke fremkommet ideer om hvordan styringen kunne forbedres for at opnå bedre ydelse eller virkningsgrad.

Det må derfor sluttes at Vikingforgasseren er veldesignet og at den oprindelig anvendte model til optimering af virkningsgraden har fungeret særdeles godt.

## Afprøvning af forskellige brændsler

Der er afprøvet fem forskellige brændsler (se forsøgsoversigt). Flere af dem er baseret på Junkers produkter, Junkers anvender træ til gulvproduktion, og for at træet kan bevare sin kvalitet under lagringen overhældes det med vand. Hos Juncker er dette vand havvand, og derfra får brændslet et højt indhold af natrium og klor. Der er målt op til 25 gange højere koncentrationer end forventet.
Generelt må det siges at de forskellige brændsler kan forgasses i Vikingforgasseren. Der er dog en grænse for vandindholdet på omkring 40% - 45% . Ved højere vandindhold opnås ikke nogen god drift. Den begrænsende virkning fra vandholdet skyldes primært kapaciteten af pyrolyseenheden der jo også fungerer som tørreenhed. Etablering af en sepparat tørreenhed ville give mulighed for at forgasse flis med højere vandindhold.

## Forbedring af konstruktionsmaterialer

Torinsforgasseren er en ret velundersøgt og velkontrolleret forgasningsproces. Derfor er der ret god viden om procesbetingelserne og dermed de lokale krav til materialer i forgasserens forskellige områder og komponenter.
Det område hvor materialerne skal modstå høj temperatur i en kemisk aktiv atmosfære, er der hvor den partielle oxidation finder sted. Her kræves et keramisk materiale. Længere nede i forgasseren findes koksbedden. Her er temperaturen lavere, men gastæthed i reaktorvæggen er her påkrævet. Derfor anvendes højtemperaturstål på dette sted.

**Murværk**
Oprindeligt blev reaktoren ved den partielle oxidation bygget af et kompositmateriale der kun holdt få hundrede timer. Herefter blev et traditionelt murværksmateriale valgt (D-39 fra Hasle) efter ca. 1750 timers drift med dette materiale blev det undersøgt. Først visuelt af eksperter inden for dette område (Jørgen Bech Christiansen og Allan Højdorf) det mentes at materialet så godt nok ud til et par års yderligere drift, men da et lille stykke var brækket af og efterfølgende analyseret (se bilag 5) mente man at det ville fremme forståelsen af lave nærmere analyser af materialet. Reaktoren blev derfor skåret ned og murværket taget ud. Materiale blev gennemskåret, og visuel bedømmelse viste fremdeles at det så godt ud. Nærmere analyser bekræftede dette. Materialet kunne altså godt være anvendt i længere tid, men var dog påvirket.

Da reaktoren nu var afmonteret og da D39 dog var lidt påvirket, blev det besluttet at undersøge 4 andre materialer ved at konstruere en fjerdedel af reaktoren i hver sit materiale Der blev udvalgt 4 materialer (se bilag 1, inspektionsrapport for maj 2003.) Resultaterne heraf er ikke opnået endnu.

**Metaldele**
Korrosionsmæssigt viser undersøgelser foretaget fra FORCE at metaldelene (253 MA) i koksbedden og i gassystemets varme del stort set ikke er påvirket. (se bilag 7). Efterfølgende visuel inspektion af metaldelene i reaktoren medens denne var adskilt viste heller ikke tegn på korrosion.
Der er set korrosion andre steder i systemets rustfrie ståldele. Her ses stilstandskorrosion der skyldes saltbelægninger og efterfølgende opsugning af fugt under stilstand. Problemet kan løses ved at anvende andre materialer eller ved at holde materialerne varme (90°C).

## Konklusion

Der er gennemført langtidsforsøg med totrinsforgaseren ”Viking”, og der er udført inspektion af anlægget cirka for hver 500 timers drift. Anlægget har på nuværende tidspunkt passeret 2800 drifttimer.

Resultaterne er yderst succesfulde. Anlægget har vist sig at være vel-designet og optimeret. Virkningsgraden fra biomasse til el er over 25% hvilket så vidt vides er verdensrekord for anlæg under 100 kW termisk. Anlægget er driftsstabilt, er let at regulere og har gode dellastegenskaber.

Der er foretaget sammenligning af eksperimenter og modelberegninger og det har vist sig at der ikke er det store potentiale for yderligere optimering.

Den producerede gas har et ekstremt lavt tjæreindhold, og er et fortrinligt motorbrændstof.

Gode materialer er fundet til forgasserens forskellige komponenter, og yderligere forbedringer er i gang.

Der er observeret belægninger i anlæggets varme varmevekslere. Belægningerne kan imidlertid let fjernes ved vaskning med vand og tilskrives et ualmindeligt højt saltindhold i en del af det anvendte brændsel. Der er observeret akkumulering af askeklumper i koksreaktoren. Øget risteaktivitet samt at tilsætte additiver har hjulpet, men problemstillingen kan ikke siges at være endelig afklaret.

Der er kørt forsøg med en række forskellige træbrændsler, og det har vist sig, at dette kun i begrænset grad resulterer i forskelle i anlæggets drift.

Projektet har dannet baggrund for opskalering og kommercialisering af totrinsprocessen. Disse aktiviteter gennemføres i samarbejde med COWI og Weis.

**Liste over bilag**

*** International publication with scientific review of the publication.
** International publication with scientific review of the abstract.

**1) Inspektionsrapporter for Vikingforgasseren**
Ulrik Henriksen

**2) The Design and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifier**
*** Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Benny Gøbel, Jens Dall Bentzen, Claus Hindsgaul and Lasse Holst Sørensen in proceedings of 16th International Conference on Efficiency, Costs, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems, ECOS, Copenhagen, Juli 2003. Selected and accepted for publication in special issue of "Energy".

**3) Status - 2000 Hours of Operation with the Viking Gasifier**
** Benny Gøbel, Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Claus Hindsgaul, Jens Dall Bentzen, Lasse Holst Sørensen
Oral presentation and paper OE1.5 in proceedings of 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy and Industry, Rom. June 2004.)

**4) Validation of Continous CHP Operation of a Two-Stage Biomass**
**(***) Gasifyer.**
Jesper Ahrenfeldt, Lars Wiese, Ulrik Henriksen, Prof A.Kather, Torben Kvist Jensen, Benny Gøbel.
Paper submittet to Energy and Fuels.

**5) Eksperimentel undersøgelse af Viking-forgasserens ildfaste materiale**
Lasse Holst Sørensen, Ulrik Henriksen, Dirk Frei, Jens Dall Bentzen
ReaTech, Roskilde Danmark. September 2004

**6) Mass and Energy ballance for the Viking gasifier.**
Biomass Gasification group, DTU.

**7) Metallurgisk undersøgelse af 253 MA fra Viking totrinsforgasseren.**
Dorthe Jacobsen & Piet Jansen FORCE Technology. April 2003.

**8) The Viking Gasifier, DTU, Denmark.**
Succeshistorie Gas Net

**9) Verificering og optimering af totrinsforgassermodel**
Midtvejsprojekt af Henrik Laudal Iversen og Thomas Østergaard Supervisor: Ulrik Henriksen, spring 2004 MEK-ET-MP-2004.

**Liste over præsentationer**

(Præsentationerne kan fås ved henvendelse til Biomasseforgasningsgruppen, MEK, DTU)

London, IEA , Ulrik Henriksen

København, Gas-Net, Ulrik Henriksen

København, IEA, Benny Gøbel

Leipzig, Claus Hindsgaul

Salzburg, Claus Hindsgaul

Rom, Biomassekonference, Benny Gøbel

Hamburg, Jesper Ahrenfeldt

## Referenceliste


1) **100 kW totrinsforgasningsanlæg på DTU. Resultater til og med foråret 1998.**
Jens Dall Bentzen, Peter Brandt, Benny Gøbel, Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen.
Department of Energy Engineering. DTU.
ET-ES-98-11. 106 pages. 1998.

2) **Optimering af 100 kW totrinsforgasningsanlæg på DTU.**
Resultater fra forsøg i uge 37 1998.
Jens Dall Bentzen, Peder Brandt, Benny Gøbel, Claus Hindsgaul, Ulrik Henriksen.
Department of Energy Engineering. DTU.
ET-ES-99-02. 167 pages. 1999.

3) **Optimized Two-Stage Gasifier.**
Jens Dall Bentzen. COWI consult. Lyngby.
Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul. Department of Energy Engineering. DTU.
Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.
In proceedings of the conference: ”1st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry”.
Seville. Spain. June 2000.

4) **High Tar Reduction in a Two-Stage Gasifier.**
Peder Brandt. Brandt-Product & Development. Kyringe.
Elfinnn Larsen. Risø National Laboratory. Roskilde. Denmark.
Ulrik Henriksen. Department of Energy Engineering. DTU.
Article in: ”Energy and Fuels”. Vol. 14, Issue 4. 2000. pp. 816-819.

# BILAG 1

# Inspektionsrapporter

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for april 2003.**

Indledning

Dette er første Inspektionsrapport for Vikingprojektet
Inspektionsrapporter er en månedlig rapportering af resultater og erfaringer med Vikingforgasseren.
Målet er at interesserede ved at læse disse rapporter og ved samtale med Biomasseforgasninsgruppen kan få hurtig viden om de resultater der er opnået under dette projekt.

Dette projekt er startet 1. april, men de kontraktlige forhold er først endelig på plads i juni.

Før dette projekt er der opbygget og kørt forsøg med totrinsforgasseren Viking, og resultaterne er rapporteret i forskellige publikationer bl.a. i Biomasseforgasningsgruppens Nyhedsbrev. Publikationerne kan identificeres på Biomasseforgasningsgruppens hjemmeside (www.bgg.mek.dtu.dk).
Hovedresultaterne er at der er bygget en totrinsforgasser med de indfyret effekt på ca. 75 kw. Anlægget kan køre fuldautomatisk uovervåget, og har før april kørt ca. 800 drifttimer.

Formål

Der startedes et forsøg i april 2003.
Hovedformålet er at afprøve de ændringer der er foretaget, samt at foretage målinger på anlægget i samarbejde med det tekniske universitet i Hamburg TUHH.

Driftsresultater

Overordnet kan de siges at forsøget gik godt uden de store problemer. Anlægget kørte i 379 timer med flisindfødning og heraf 346 med motoren på forgasningsgas.
Totalt er anlægget nu oppe på 1321 timer med flisindfødning og heraf 1127 med forgasningsgas til motoren.
Der var under forsøget 4 nedlukninger hvoraf den ene gav alarmen: For højt tryktab over koksbedded. Anlægget kunne umiddelbart genstartes, og alarmen kunne ikke forklares. De tre andre nedlukninger gav alarmen: Indfødningssystem , og skyldes tilstopning i den lange grønne transportsnegl.
Længste periode mellem to alarmer var ca. en uge.
Det viste sig at varmeveksleren der køler gassen ned til lige over vanddukpunktet i perioder havde forholdsvis høj temperaturdifferens mellem vand og gas. Dette skyldes belægninger af sod indvendig. Dette gav dog ikke anledning til driftstop eller driftforstyrrelser.

Der blev efter forsøget udregnet energiproduktion og virkningsgrader. Dette findes i et arbejdsnotat herom. Det viste sig at der var opnået en virkningsgrad baseret på nedre brændværdi på ca. 25 % fra flis til netto produceret el. Dette er meget tilfredsstillende.
Der blev foretaget analyser på den producerede gas før og efter gasrensningen.

Der blev målt tjære med tre metoder. ”SPA-metoden” som vi forestod, ”Stuttgart-metoden” som folk fra Stuttgart forestod, og ”Guideline- metoden” som TI århus forestod. Alle metoder viste at der ikke var registrerbar tjære i gassen. Alle komponenter lå under detektionsgrænserne ( 1,5 mg/m3).
Kondensatet blev analyseret. Intet organisk stof kunne påvises, men en hel del ammoniak.

Uforbrændt kulstof i asken var ca 30%.

Resultater af inspektion af materialer
Inspektionen af forgasseren efterfølgende gav anledning til få bemærkninger.
I luftdysernes huller var der begyndende belægninger (tilstopninger).
Murværket i reaktoren så fuldstændigt upåvirket ud.
På overfladen af metallet i forgasningsreaktoren (253 MA) kunne der i de varme områder visse steder ses glødeskalsdannelse. På metaldele i koksbedden og under denne ses ingen påvirkning.
Korrorsionsundersøgelse fra FORCE af metalmaterialeprøver (253 MA) fra forgassningsreaktoren viser at der ikke er nævneværdig korrosion i metaldelene i koksbedden og under koksbedden. I området over koksbedden ses lidt glødeskalsdannelse og lidt korrossion. Materialet er overalt kun påvirkes 1 –2 korntykkelser ind i materialet.

Der blev som ved tidligere forsøg fundet ophobning af karbonatholdige askebestanddele på rist og i gassystem.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for maj 2003.**

Der blev afholdt møde på DTU med FORCE. Viking forgasseren blev besigtiget. Sammen med den i sidste inspektionsrapport omtalte korrosionsundersøgelse blev det besluttet at det ikke i øjeblikket er nødvendig at udskære materialeprøver hver 500 timer til analyse, men i stedet at foretage ultralydsbaserede materialetykkelsesmålinger på udvalgte steder.

Ulrik Henriksen blev inviteret til IEA møde i London for at holde et foredrag om erfaringerne med Viking ved IEA- mødets foredragsdag.
Foredraget ( The Viking Gasifier) kan ses som powerpoint præsentation fra publikationslisten på vores hjemmeside (www.bgg.mek.dtu.dk/ publications).

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for juni 2003.**

Luftdyserne blev renset ved at hullerne der oprindelig var 4 mm i diameter, blev fræset op til mellem 1,5 og 3,5 mm i diameter.
Anlægget blev startet og gasrensning gennemførters i ca. 12 timer Heraf var de 5 timer med motoren på forgasningsgas. Herefter måtte forsøget stoppes da luftdyserne stoppede til idet trykket før luftdyserne oversteg hvad luftblæseren kunne klare (ca. 0,3 bar).

Efter nedkøling blev luftdysserne inspiceret og det var tydeligt at de var tilstoppet indvendig hvor luften strømmer ud. Fænomenet skyldes formentlig, at ved dyseranden kan der opstå en hvirvel der trækker gas ind i dyssehullet. Da luften er relativ kold kan lidt aske smelte fast i dyssehullerne. Dyssehullerne blev fræset op til en diameter på 5 mm. Herved reduceredes hastigheden i dyserne (fra ca. 75 til ca. 50 m/s). Dataopsamlingen viste at posefiltret havde vanskeligt ved at regenerere sig ved bagskylning.

Forgasseren blev startet igen og der blev ikke observeret trykstigning før luftdyserne denne gang.
Der opstod hurtigt et forholdsvist stort tryktab over den varmeveksler der køler gassen ned til lige over vanddukpunktet.

Forsøget stoppedes.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for juli 2003.**

Der blev bygget en tryklufthammer der automatisk aktiveredes og slog på den varmeveksler der køler gassen ned til lige over vanddukpunktet. Herved håbede vi at kunne holde denne veksler ren.
Rørdiameteren i den omtalte varmeveksler er 12 mm. Dette er ret småt, og der blev designet en ny varmeveksler med en rørdiameter på 20 mm.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for august 2003.**

Der blev kørt forsøg med den i forrige inspektionsrapport omtalte tryklufthammer til at rense den lodrette varmeveksler der har temperaturen 90°C.
Forsøget viste en stor sodproduktion, rensesystemet fungerede ikke tilfredsstillende og posefiltret ville ikke regenerere sig. Flisen var meget tør (ca 20 – 25% fugt) I et forsøg på at reducere sodmængden tilsattes vand til pyrolyseenheden. Dette gav ikke det ønskede resultat.

Forsøget stoppedes, og et rensesystem til varmeveksleren baseret på kæder der bevæges op og ned i varmevekslerrørene blev konstrueret.

Inspektion af reaktoren efter dette forsøg viste at et lille stykke af murværket (106 gram) var knækket af Dette vil blive analyseret.

Der foreligger resultater (grundstofanalyser og billeder) fra SEM mikroskopi analyserne af prøver fra forgasseren (bl.a. belægninger fra luftdyserne, sodprøver fra 90 °C varmeveksleren, skrab af reaktorvæg forskellige steder.

Forgasseren gøres klar til forsøgsstart 1. september.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for september 2003.**

Forsøget varede 503 timer med brændselindfødning og 470 med motordrift på forgasningsgas. Forsøget stoppede da der blev slukket for strømmen på Sjælland

Anlægget har efter dette forsøg kørt 1870 timer med brændselsindfødning og 1611 timer med motordrift på forgasningsgas.

Formål:
Formålet med denne kørsel var udover at opnå mange drifttimer og undersøge materialers og komponenters holdbarhed følgende:
-At kortlægge motorens emissioner (NOX, CO, UHC) som funktion af luftoverskudstallet og tændingstidspunktet. Der gennemføres referencemålinger på naturgas.
-At teste kæderensesystemet til rensning af den varmeveksler der køler gassen ned til lige over vanddukpunktet (90 °C veksleren).
-At gentage energimålinger.
-At foretage sodtalsmåling i rågassen.
-At undersøge om rutinemæssig aktivering med risten en gang dagligt kunne forhindre dannelse af klumper af aske på risten.

Brændsel:
Der anvendtes samme flis som fra alle andre forsøg fra og med aprilforsøget.
Flisen var bøg fra Junkers, og nu ret tør (20-30 % fugt).
Der blev doceret vand direkte på flisen ved indløbet til pyrolyseenheden svarende til at fugten i flisen havde været på 35 –40 %.

Resultater:
Forgasseren blev styret i hovedparten af forsøget ved hjælp af en lambdasonde i motorens udstødningsgas således at iltindholdet i motorens udstødningsgas blev holdt konstant på et setpunkt.
Denne reguleringsstrategi fungerede perfekt. Iltindholdet var stort set konstant, og ved ændring af setpunkt f. eks. fra 8 % ilt til 2 % ilt, ændredes dette på få sekunder. Sammen hermed ændredes selvfølgeligt motorens effekt mellem totrediedel til hel last. Anlægget er således hurtig og enkel at ændre last på. Motorens emissioner blev kortlagt, hvilket er en del af Jesper Ahrenfeldts Ph.D. projekt.

Forsøg med kæderens af 90° varmeveksleren viste at man sagtens kunne rense varmeveksleren ved at trække kæder op og ned ca hvert tiende minut.
Temperaturdifferensen mellem vand og gassiden blev herved nogle få grader, pga et godt varmeovergangstal. Til gengæld blev det stabile tryktab ret højt sammenlignet med hvad det var uden kæder ( 400-600 mmVs mod 50-200 mmVs før)
Der var dog mange nedlukninger der skyldes for højt defferenstryk over gassystemet, og efter en uge udskiftedes kæderne med 3 mm tråde.
Dette viste sig at være en god ide. Tråde der trækkes op og ned giver en tilstrækkelig renseeffekt til at holde temperaturdifferensen og tryktabet på et acceptabelt lavt niveau (20-50 mmVs)

Sodtallet i rågassen blev målt med en ældre Bosh sodtalsmåler og tallet giver en relativ mål for partikelindholdet i gassen. Partikelindholdet varierede meget under forsøget og der var en faldende tendens hen mod slutningen af forsøget.

Trykfaldet over luftdyserne steg jævnt gennem hele forsøget hvilket indikerer en gradvis tilstopning af dysehullerne som også set ved de tidligere forsøg. Korrosion af dyserne kunne konstateres.

Der blev observeret tryktabsstigning over den første udstødningsveksler på gassiden i de sidste par dage af forsøget.
Gentagelse af energimålingerne er endnu ikke færdigbehandlet, men følger i næste inspektionsrapport.

På trods af at rensningen af posefiltret fungerede fint de første 1300 timers drift med Vikingforgasseren kunne det nu ikke lade sig gøre at rense filtret ved bagskyldning med kvælstof under drift. Det formodedes at de partikler der falder af filtret ved bagskyldningen blot hvirvles ud i den beskidte gas for derefter atter at sætter sig på filtret. Når man koblede posefiltret fra, bagskyllede og koblede posefiltret til igen, kunne rensningen let lade sig gøre. Dette indebar at motoren kobledes over på naturgas i ca. ½ minut hver sjette time.

Inspektion efter forsøget hvor reaktoren var blevet kold:
Kamerainspektion viste at årsagen til tryktabsstigningen over den første udstødningsveksler var kulstofophobning. Gennemblæsning med luft rensede veksleren. Belægningerne tolkes som et resultat af at cyklonspandens tilløb var lukket.

Inspektion af reaktoren viste som tidligere at nederst var metalkappen upåvirket men øverst i den varme zone var der glødeskalsdannelse.
Hængende kanter af udmuringen var knækket af og enkelte revner blev set.

Umiddelbart efter at forgasseren stoppedes, blev låget fjernet og en metalstang ført ned mod risten for at mærke konsistensen af de formodede askeophobninger. De viste sig at disse mærkedes helt bløde og plastiske, som nybagte småkager.
Efterfølgende tømning af reaktoren efter denne var blevet kold viste helt hårde klumper, men hullerne efter metalstangen sås tydeligt.
Vi prøvede nu at genopvarme prøver af askeklumpen og fandt at denne igen blev helt blød.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for oktober 2003.**

Forsøget varede 354 timer med brændselsindfødning og 339 timer med motordrift på forgasningsgas.

Anlægget har efter dette forsøg kørt 2224 timer med brændselsindfødning og 1956 timer med motordrift på forgasningsgas.

Forsøget havde som hovedformål at undersøge muligheden for at reducere ophobning af askeklumper på risten ved anvendelse af additivet CAP.
Det anvendte brændsel var denne gang løvtræ fra Junker med et vandindhold på 44-46%.

Der blev tilsat CAP kontinuert, og risten blev aktiveret tre gange i døgnet på i forvejen fastlagte tidspunkter (mod 1 gang i døgnet ved septemberforsøget) uanset det aktuelle tryktab.
Anlægget kørte på dellast med et iltindhold i motorens udstødningsgas på 8-11%.

Driftresultaterne var positive. Der var et antal nedlukninger primært pga. problemer med tilstopning af en fotocelle i flisindfødningssystemet. Senere i forsøget var der nedlukning som følge af tilstopning af cyklon og varmeveksler (dette var årsagen til at forsøget stoppede). Der var saltaflejringer i cyklonen.

Der kom betydeligt mere materiale ud af askeudmadningen end tidligere svarende til 1% af indfyret tør biomasse. Askeindholdet var ca. 50% så det totale kulstoftab er under 1 %, inklusiv hvad der kommer fra posefiltret.
Ved inspektion af reaktoren efter forsøget blev det observeret at der var meget løs fin aske nederst i raktoren. Der sås to ikke- hårde klumper, og hele koksbedden kørtes ud gennem risten.

Det konkluderes at additivtilsætningen tilsyneladende virkede efter hensigten, men at hele askemængden ikke blev trukket ud. Mere bevægelse med risten er nødvendig, og det overvejes hvordan dette skal styres.

Der sås en enkelt gang tilstopning af 90 °C varmeveksleren (den med rensetrådene i ). Tilstopningen viste sig at være i kammeret under veksleren formodentlig pga. kondensation af vand forårsaget af lokal dårlig isolering. Selve veksleren var ren i rørene så trådrensningen virker fremdeles fint.

Analyser af prøver af asken følger.

Luftdyserne var tilsyneladende delvist tilstoppet ligesom efter de forrige forsøg.

Reaktorens udmuring så ud som ved forrige inspektion. Metalkappen under udmuringen over koksbedden var yderligere påvirket. Nærmere undersøgelser følger. Metaldele i og under koksbedden ser stadig upåvirkede ud.

Omkring hver anden dag sås at tryktabet faldt til næsten ingenting over koksbedden. Herefter faldt gaskvaliteten i 5-10 minutter. Dette resulterede i at motoren faldt i last (ned til næsten 5 kW enkelte gange).
Fænomenet skyldes formodentlig lidt gennembrænding måske pga. dårlig pyrolyse, luft til koksbedden eller kombinationen med at risten kører på et uheldigt tidspunkt. Fænomenet er ikke kritisk.

Styringen af koksbedhøjden blev udbygget således at lastændringer ikke skulle resultere i ændret stabil koksbedhøjde. Afprøvningen blev ikke færdig, men systemet ser ud til at fungere efter hensigten.

Den 20 oktober var der fremvisning af Viking anlægget for ca. 50 forgasningseksperter som deltager i GasNet –aktiviteterne. Der blev givet to præsentationer i denne forbindelse.
Der var overordentlige positive tilbagemeldinger.

Som forklaret i september-instektionsrapporten var der problemer med rensning af posefiltret. Poserne var skiftet før septemberforsøget, og de gamle sendt til analyse. Analysen viste at poserne hverken havde lidt termisk eller kemisk overlast, og at partiklerne kun i ringe grad var nået ind i bærematerialet. Filterposerne var altså i fin stand efter 1300 timers drift med forgasseren. Det formodes at grunden til at filtrene kun kunne renses under stilstand skyldes at partiklerne der forlod filtret ved bagskyldning blot satte sig på det igen, (såkaldt re-entrainment).

Energibalancen fra forsøget i september er nu udført, baseret på elmålinger med en ny elmåler. Som ved aprilforsøget findes fremdeles en virkningsgrad fra biomasse til elektricitet på 25%.

I oktober i sidste del af forsøget begyndte filtrene igen at kunne renses ved bagskyldning under drift. Der er ikke fundet en forklaring på dette.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for november 2003.**

Der har foregået diskussion med Elkraft og andre aktører på området vedrørende kommunikation og samarbejdsformer.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for december 2003.**

Der er kommet resultater af SEM XRD analyser af aske og der lille stykke murværk der blev fundet i koksbedden efter forsøget i august.
Murværkstykket var påvirket af alkali. Det vurderes hvad dette betyder for holdbarheden af murværket.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for januar 2004.**

Ingen aktivitet.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for februar 2004.**

Med baggrund i observationerne i koksforgasningsreaktoren (se Inspektionsrapport oktober 2003) og analyseresultaterne fra murværksstykket fundet i koksbedden ( se Inspektionsrapport december 2003) blev det besluttet at undersøge murværket i reaktoren nærmere og muligvis ændre valget af murværksmateriale.

Samtidig besluttedes på baggrund af observationer af lokal korrosion af metaldele lige under murværkszonen over koksbedden (se Inspektionsrapport oktober 2003), at udvide området i reaktoren hvor murværk anvendes.

Der er i denne forbindelse indledt samarbejde med Hasle der fremstiller murværksmaterialer, Jørgen Bech Christiansen der er ekspert i murværksmaterialer og Lasse Holst Sørensen der bl.a. har beregningsfaciliteter vedrørende kemiske reaktioner i murværksmaterialer.
Indledende møder og inspektion af reaktoren er gennemført. Vurderingen af den visuelle inspektion var at murværket så rimeligt ud, men kræver nærmere undersøgelser.

Det besluttedes at adskille reaktoren og foretage nærmere analyser af murværket.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for marts 2004.**

Koksforgasnigsreaktoren blev demonteret og skåret i lodrette snit. Herved kunne såvel metaldele, isoleringsmaterialer samt murværk betragtes.
Reaktoren havde været i drift i 1750 timer.

Metaldelene viste sig upåvirket undtaget i den varme zone lige under murværket og over koksbedden.

En luftdyse viste sig at være revnet ved svejsningen til reaktorkappen. Det viste sig at årsagen formodentlig er en svejse/konstruktions-fejl.

Murværketi koksforgasningsreaktoren, (D 39 A) blev adskilt, og dette så upåvirket ud på bagsiden. Dog viste der sig lidt slagge på bagsiden af stenene ved gennemførelsen af luftdyserne. Der kunne ikke gives nogen forklaring på dette.

Den side af murværket der udgør reaktoren kunne nu visuelt vurderes langt bedre end før reaktoren blev adskilt.
Det viste sig at murværket her så fint ud (efter nogle eksperters vurdering kunne det sagtens kører to år til før næste inspektion).

Det filtlag der adskiller stenene viste sig at være intakt fra ydersiden og indtil efter fer og not midt i stenene.

Det anvendte isoleringsmateriale (Super woold og Maf tech) så upåvirket ud.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for april 2004.**

En murværkssten blev flækket og inspiceret. Ud fra en visuel inspektion blev det vurderet at der i beskedens omfang var indtrængninger af alkali og andet, men formodentlig kun få milimeter ind i materialet. Materialet ser således godt ud. Det besluttedes at foretage SEM analyse af et snit fra inderst til yderst i materialet.

Samtidig blev det besluttet at konstruere en ny koksforgasningsreaktor og afprøve fire forskellige andre materialer end D 39 A. Hver materiale ville udgøre en stenrække fra øverst til nederst og danne en fjerdedel af den nye reaktor.

Argumenterne var, at ligevægtsberegninger og de oplysninger de blev hentet fra murværksfabrikanter og eksperter inden for området indikerede at andre materialer burde være bedre egnet.

Artiklen: " The Design, Construction and Operation of a 75 kW Two-Stage Gasifyer" om Vikingforgasningsanlægget som blev præsenteret på ECOS conferencen i København sommeren 2003 er blevet udvalgt til udgivelse i et specielt nummer af det videnskabelige tidsskriftet "Energy".

Artiklen er opdateret og tilpasset samt indsendt og accepteret til udgivelse.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" for maj 2004.**

Vedrørende udvælgelse af fire materialer blev der foretaget undersøgelser dels ved litteraturstudier, kommunikation med fabrikanter og ved anvendelse af de tilknyttede eksperters erfaring.

Det blev tilbudt TK- Energi at levere et af de fire materialer svarende til der TK-Energi anvender, men tilbuddet blev afslået.

Der blev herefter udvalgt de fire materialer:

1. D 1700 A alkaliresistent lav cement støbemasse på basis af Andalusit.
   Producent: Hasle Refractories A/S, Danmark.

2. Ankocast 316 0-6 Mag-Al spinel-bundet Alumina lav cement støbemasse.
   Producent: Veitsch-Radex GmbH, Østrig.

3. Compac Flo-L880SiC 0-6 selvflydende lav cement støbemasse på basis af Bauxit med tilsætning af 15 % SiC.
   Producent: Veitsch-Radex GmbH, Østrig.

4. ERSOL 50 CAST lav cement støbemasse på basis af AZS, Korund og Zirconia i silica fase.
   Producent: Saint-Gobain SEFPRO, Frankrig.

Resultater fra Vikingforgasningsprojektet blev præsenteret ved konferencen: 2nd World Conference and Technology Exhibition on Biomass for Energy, Industry and Climate Protection, 10-14 May 2004, Rom, Italy.

Der blev givet en mundtlig præsentation ved Ulrik Henriksen under Workshopen: Recent Technological and scientific Advances in Biomass Gasification.

Herudover blev et paper præsenteret mundtligt ved Benny Gøbel. Titlen var: Status-2000 Hours of Operation with the Viking Gasifyer.
Forfatterne er: Benny Gøbel, Ulrik Henriksen, Jesper Ahrenfeldt, Torben Kvist Jensen, Jens Dall Bentzen, Lasse Holst Sørensen.

Analyseresultaterne af SEM XRD undersøgelsen af et tværsnit af en murværkssten fra koksforgasningsreaktoren foreligger nu.
Resultaterne viser, at der kun var nævneværdig indtrængen af alkalimetaller mindre end 1 mm ind i materialet. Herudover ser materialet godt ud. Dette er yderst positivt og viser at D 39 A måske er et udmærket materiale til dette formål. Beslutningen om at afprøve de nye materialer fastholdes imidlertid. Det skal erindres at den nye konstruktion også indebære en nødvendig udvidelse af det områder i reaktoren hvor murværk er anvendt.

Analyser af aske og askebelægninger fra forsøget med CAP additiv tilsætning (se inspektionsrapport fra oktober 2003) foreligger. Det vurderes også på denne baggrund at additiveringen fungere efter hensigten, og forårsager ikke korrosion eller lignende.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for juni 2004.**

Der er startet et projekt med titlen : "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem". Projektet er bevilget af PSO Elkraft og kan betragtes som en videreførelse af projektet "Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking".

Der er foretaget konstruktion af den nye koksforgasningsreaktor til viking. Produktion af det nye murværk er igangsat.

Der er konstrueret og fremstillet en ny varmeveksler til erstatning af den gamle på pladsen kaldet 90 $^{o}$C varmeveksler. Den oprindelige varmeveksler havde rørdiametre på 12 mm og som beskrevet i tidligere inspektionsrapporter har der jævnt hen været problemer med tilstopning af denne veksler. Selv om disse tilstopninger er forhindret med et tråd-rense-system besluttedes alligevel at afprøve en veksler med rørdiametre på 22 mm.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for juli 2004.**

Der er foretaget tegning af den nye koksforgasningsreaktor til viking. Der er indkøbt metalmaterialer og produktion af metaldelene er sat i gang.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for august 2004.**

Ingen aktivitet

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for september 2004.**

De nye murværkssten blev leveret fra Hasle.
Der blev arbejdet med indbygning af murværket i koksreaktoren.
Gasrensesystemet på Vikingforgasseren blev renset for belægninger. I forbindelse hermed blev forgasningssystemet inspiceret, og en række tæringsproblemer viste sig. Problemerne viste sig i de rustfrie metaldele, der hvor der havde været lav temperatur og før gasrensningen. Problemet var fremkommet under stilstand hvor fugt fra luften i over et år og saltbelægninger havde angrebet materialet.
Problemet vil ikke finde sted under drift.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for oktober 2004.**

Der blev arbejdet videre med indbygning af nyt murværk i koksreaktoren. Dette arbejde er vanskeliggjort af, at de anvendte sten af de fire forskellige materialer har er lidt uens i størrelse.

Der blev arbejdet på at udskifte de korroderede dele i gassystemet (Dette viste sig at være et ret stort arbejde).

Rapporteringen af analyser af murværk blev færdiggjort. (bilag 1)

Rapportering af over valget af nye murværksmaterialer blev startet. Analyser af det nye murværks porøsitet blev gennemført.

Der blev startet på at fremstille et træktøj til ristesystemet som tillader større bevægelser end det oprindelige. Herved søges at fjerne de klumper af aske der efter tidligere forsøg er set på risten.

Ændringer i styringen er iværksat, således at styringen er forberedt for varierende belastnings kurver.

Der er indkøbt nyt PLC-udstyr til at styre den varierende belastning mm.

Der blev under IEA mødet i København den 25. oktober 2004 holdt to indlæg.

Det ene var af Benny Gøbel, og omhandlede Vikingforgasseren.
(Powerpointpræsentationen er bilag 2)

Det andet var af Jesper Ahrenfeldt og omhandlede motordrift på forgasningsgas bl.a. i forbindelse med Vikingforgasseen. (Præsentationen er bilag 3)

Der var den 26. oktober fremvisning af Halmfortet og af Vikingforgasseren for IEA gruppen. Ca. 15 personer fra forskellige steder i verden deltog.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for november 2004.**

Der blev arbejdet videre med indbygning af nyt murværk i koksreaktorens midterste del.

Rapportering af valget af nye murværksmaterialer er gennemført.

Det nye træksystem til askeristen er fremstillet og afprøvet.

Ændringer i styringen er gennemført, således at styringen er forberedt for varierende varme- eller elproduktion.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for december 2004.**

Arbejdet med fremstilling af koksreaktorens midterste del er gennemført og reaktordelen er under montage.

Der er opbygget programmer i det indkøbte PLC-udstyr til at styre den varierende belastning. Styrestrategien for denne del er fastlagt.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for januar 2005.**

Reaktorens midterste del monteres.
Rørføringer og tilslutninger udføres.
Rørene isoleres og el-opvarmning af de kolde rørstrækninger med partikelholdig gas etableres.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for januar 2005.**

Reaktorens midterste del monteres.
Rørføringer og tilslutninger udføres.
Rørene isoleres og el-opvarmning af de kolde rørstrækninger med partikelholdig gas etableres.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for marts 2005.**

Udskiftning af de tære dele færdiggøres og reaktoren tæthedsprøvet igen. Nu er den tæt.

Måleprober (temperatur og tryk) monteres på de nye dele.

Isoleringsarbejde af reaktoren udføres.

Dataopsamlingssystenm og målesystemet kalibreres. Gasflowmåleren viser sig at være defekt.

Montering af komponenter til regulering af det varierende varme- og el- aftag etableres. Styreprogrammet er gjort næsten færdigt.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for april 2005.**

De manglende opgaver er udført og anlægget er gjort klar til start.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for maj 2005.**

Vikingforgasseren blev startet den 17. maj med det sigte at kører omkring 500 timer.

Formålet med forsøget var primært:

At få flere drifttimer med motoren på forgasningsgas.

At afprøve drift på flis af piletræ (poppel mix)

At afprøve den nye 90 °C varmeveksler med det nye kæderensesystem.

At afprøve poser i posefiltret med elektrisk jording for at forhindre re-entrainment og muliggøre bagskyldning under drift (se inspektionsrapporter september 2003 og oktober 2003)

At afprøve de fire murværkstyper i den nye midterdel til forgasningsreaktoren.

At afprøve det nye luftdysedesign.

At afprøve det nye træksystem til risten der tillader større vinkeldrejning af risteelementerne.

At teste og tilrette ændringerne i Vikings styresysystem, hvilket primært er:
Automatisk omkobling til naturgas under posefilterskyldning.
Ny reguleringstrategi der holder motorens el effekt på en given værdi.

At teste det nye system der simulere varierende varme og el aftag.

At afprøve det nye udstyr til måling af cylindertrykket i motoren

Resultater:
Viking forgasseren blev startet, men der var nogle indfødningsmæssige problemer hvilket skyldtes lang tids stilstand. Problemerne blev løst. Herudover måtte enkelte essentielle styringsmæssige fejl rettes. Herefter gik anlægget i automatisk ubemandet drift.

Der viste sig gennem forsøget, at det var nødvendigt med væsentlige tilretninger og ændringer i de nye dele af styresystemet. Dette blev løbende gennemført.

Det nye træktøj til risten fungerede godt, og gennem hele forsøget faldt tryktabet over risten når denne blev aktiveret. Forsøg på at kører risten hele vejen rundt resulterede i at risten satte sig fast.

Styring af motorens el effekt viste sig at fungere perfekt. I løbet af få sekunder kan elproduktionen ændres fra en værdi til en anden og holdes konstant.

Den 24. maj var der rundvisning af IEAs koordinator gruppe. Her blev forgasseren fremvist i drift. Det fremgik at mange var ret imponeret over at anlægget kørte godt og stabil i ubemandet drift.

Bagskyldning af posefiltret lod sig ikke gøre medens dette var i drift. Men når der ikke var gasflow gennem poserne kunne bagskyldning gennemføres uden problemer. Problemet kunne skyldes statisk elektricitet i partiklerne således at disse ikke ”kagede sammen” medens de sad på posernes overflade, men blev separeret ved bagskyldning for efterfølgende at sætte sig på poserne igen når bagskyldning blev foretaget under drift. Elektrisk jording af poser der var vævet sammen med en elektrisk ledende tråd blev forsøgt, men det viste sig ikke at havde nogen positiv effekt.
Effektiv bagskyldning kræver stadig at der ikke er gasflow gennem poserne imedens bagskyldningen står på. Dette betyder at motoren må køre på natur gas i ca. 1 minut hver gang der skyldes. Dette sker med intervaller på mellem 6 timer og to døgn. Omkoblingen til naturgas sker nu automatisk når posefiltret skal bagskylles.

Forsøg med at måle trykforløbe i motorens cylinder blev gennemført. Databehandling venter.

Systemet til varierende varme og elaftag fungerede godt, men kunne ikke afprøves fuldt ud bl.a. fordi reguleringsventilen i vandkredsen holdt op med at fungere.

**Inspektionsrapport for projektet :"Langtidsafprøvning af totrinsforgasseren Viking" og "Indpasning af totrinsforgasser i et energisystem" for juni 2005.**

Vikingforgasseren blev startet den 17. maj og blev stoppet planmæssigt den 13. juni. Forsøget indebar 551 timer med motoren på forgasningsgas.
Vikingforgasseren har nu ialt kørt 2803 time med brændselsindfødning og 2507 timer med motoren på forgasningsgas.

I sidste del af forsøget blev det observeret at der var lidt tjærelugt i kondensatet.
Der blev samtidig observeret at fugtindholdet i brændslet steg fra omkring 40% i maj måned men steg til over 45% i juni. Det måtte atter konstateres at pyrolyseenheden ved dette fugtindhold fik problemer med at tørre og pyrolysere materialet hvorved upyrolyseret flis kunne nå koksbedden, hvilket må forventes at give lidt tjære i gassen. Samtidig blev der observeret et usædvanligt højt metanindhold i den producerede gas hvilket indikere tjære i gassen.

Det anvendte piletræ har en markant lavere densitet end det bøgetræsflis der sidst er anvendt, og dette kan påvirke varmeovergangsforholdene i pyrolyseenheden i uheldig retning.
For at bekræfte denne teori blev flisindfødningsmængden sænket og motoren kørt på fuld last på naturgas hvilket giver en forøgelse af temperaturen af den udstødningsgas der opvarmer pyrolyseenheden.
Herved blev pyrolyseenhedens mulighed for at tørre og pyrolysere brændslet forbedret.
Resultatet var, at metanindholdet faldt til det sædvanlige niveau. Herved kunne teorien bekræftes og det må konstateres at brændslets vandindhold på omkring 45 % er for højt til en acceptabel drift.

Driften fortsatte dog alligevel, og der blev placeret et aktivt kulfilter i kondensatstrømmen hvilket tilsyneladende rensede denne effektivt.

Efter 551 timers drift blev forgasseren stoppet planmæssigt.
Gassystemet blev inspiceret, og der kunne ikke konstateres tjærebelægninger eller andet i gasstrengen. Motorens indsugningssystem var ligeledes fremdeles fri for tjære.

**MEK-ET-2005-07**

**ISBN: 87-7475.331-2**