

## Totrinsforgasning, uge 47 1999

Forsøgsforløb, kondensat, tryktab over koksbed

**Bentzen, Jens Dall; Brandt, Peder; Hindsgaul, Claus; Ahrenfeldt, Jesper; Henriksen, Ulrik Birk; Fock, Felicia; Gøbel, Benny**

*Publication date:*  
1999

*Document Version*  
Også kaldet Forlagets PDF

[Link back to DTU Orbit](#)

*Citation (APA):*  
Bentzen, J. D., Brandt, P., Hindsgaul, C., Ahrenfeldt, J., Henriksen, U. B., Fock, F., & Gøbel, B. (1999). Totrinsforgasning, uge 47 1999: Forsøgsforløb, kondensat, tryktab over koksbed. Lyngby: DTU Mekanik. (MEK-ET-ES; Nr. 2001-01).

## DTU Library

Technical Information Center of Denmark

---

### General rights

Copyright and moral rights for the publications made accessible in the public portal are retained by the authors and/or other copyright owners and it is a condition of accessing publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

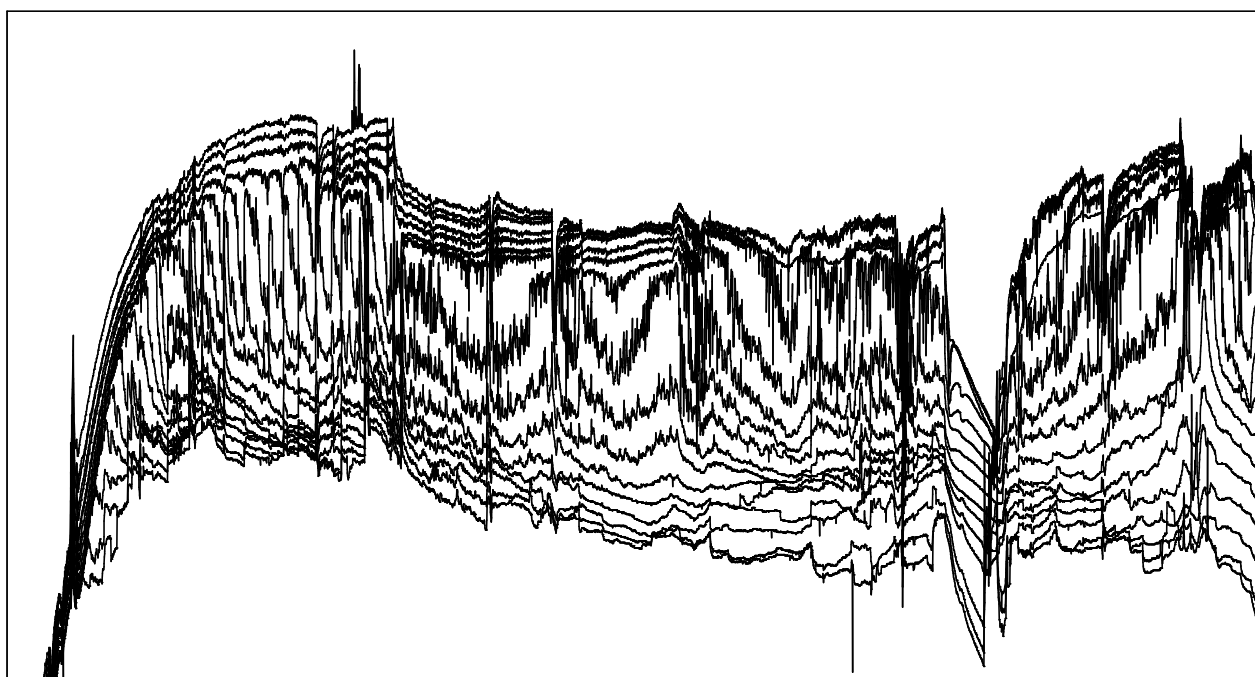
- Users may download and print one copy of any publication from the public portal for the purpose of private study or research.
- You may not further distribute the material or use it for any profit-making activity or commercial gain
- You may freely distribute the URL identifying the publication in the public portal

If you believe that this document breaches copyright please contact us providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.

MEK-ET-ES 2001-01

# Totrinsforgasning, uge 47 1999

*-Forsøgsforløb, kondensat, tryktab over koksbed*



Danmarks Tekniske Universitet  
Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion  
Marts 2001

Jens Dall Bentzen  
Peder Brandt  
Claus Hindsgaul  
Jesper Ahrenfeldt  
Ulrik Henriksen  
Felicia Fock  
Benny Gøbel

## Forord

På Institut for Mekanik, Energi og Konstruktion (tidligere Institut for Energiteknik), DTU har der gennem en årrække været arbejdet med termisk konvertering af biomasse til gas. Formålet har været at anvende denne gas til energiformål, primært til produktion af kraft-varme.

Som et led i dette arbejde er der på instituttet udviklet en forgasningsproces, der betegnes totrinsprocessen. Denne forgasningsproces udmærker sig i forhold til andre forgasningsprocesser på en række områder, bl.a. ved en høj energivirkningsgrad og et lavt tjæreindhold i den producerede gas.

I 1995 blev der bygget et 100 kW (termisk) forsøgsanlæg på DTU. Frem til foråret 1998 blev der kørt en række forsøg på denne 100 kW totrinsforgasser [Bentzen, et al, 1998]. I løbet af sommeren 1998 blev forgasseren ombygget og optimeret, og der blev efterfølgende kørt et forsøg i september 1998 [Bentzen, et al, 1999].

På grund af det meget lave tjæreindhold der blev registreret i gassen under forsøget i september 1998, blev det besluttet at køre et yderligere forsøg hvor nye gasrensningsteknologier baseret på tør partikelfiltrering skulle afprøves.

Efter endnu en ombygning, af især gasrensningssystemet, blev der kørt et forsøg i uge 47 1999.

Adskillige resultater fra forsøget er allerede udgivet, mens denne rapport beskriver ombygningen af forgasningsanlægget, forsøgsforløbet, og samler de resultater der blev opnået ved forsøget der endnu ikke er offentliggjorte.

Af offentliggjorte resultater fra forsøget henvises til:

Emne	Titel	Forfatter	Rapport nummer
Motordrift	Eksperimentelle undersøgelser af motordrift på forgasningsgas	Jesper Ahrenfelt, Troels Pedersen, Ulrik Henriksen og Jesper Schramm.	ET-ES-2000-03
Motordrift	Eksperimental on Wood Gas Engines	Jesper Ahrenfelt, Ulrik Henriksen og Jesper Schramm.	ET-ES-2000-04
Motordrift	Ford VSG 411 Fueled by Producer Gas from a Two-Stage Gasifier	Jesper Ahrenfelt, Troels Pedersen, Ulrik Henriksen og Jesper Schramm.	Paper præsenteret ved 1.st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry. Sevilla juni 2000
Partikelrensning	Low Temperature Particle filtration of Producer Gas with Low Tar Content	Claus Hindsgaul	ET-ES-2000-05
Hvirvelstrømsforgasning	Optimering af koncepter for medstrømsforgasning	Felicia Fock og Kirstine Thomsen	Eksamensprojekt, marts 2000.
Tjæremålinger, partikelrensning.	Optimized Two-Stage Gasifier	Jens Dall Bentzen, Ulrik Henriksen, Claus Hindsgaul og	Paper præsenteret ved 1.st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy

## *Forord*

---

		Peder Brandt.	and Industry. Sevilla juni 2000
Tjæremålinger	Tjæremålinger på totrinsforgasser uge 47 1999	Peder Brandt og Ulrik Henriksen	MEK-ET-ES-2001-02

Herudover forberedes i øjeblikket et SAE-paper med titlen "Experiments with wood gas engines"

Aktiviteterne er finansieret af Energistyrelsen under såvel EFP som UVE-ordningerne.

DTU den 31. marts 2001

Jens Dall Bentzen

Peder Brandt

Claus Hindsgaul

Jesper Ahrenfeldt

Ulrik Henriksen

Felicia Fock

Benny Gøbel

# Indholdsfortegnelse

Side

Forord

Indholdsfortegnelse

Indledning	1
Kapitel 1 Ombygning af 100 kW forgasser	2
1.1 Ombygning før forrige forsøg	2
1.2 Ombygninger forud for dette forsøg	3
1.3 Oversigt over målte størrelser i dataopsamling	4
Kapitel 2 Forsøgsplan	6
2.1 Formål med forsøget	6
2.2 Beskrivelse af planlagte målinger	6
2.3 Det planlagte forsøgsforløb	8
Kapitel 3 Forsøgsforløb	9
3.1 Beskrivelse af forsøgsforløbet	9
3.2 Driftsforhold under forsøget	11
3.3 Fugtmålinger af flisen	24
3.4 Partikelbalance for produktgassen	25
Kapitel 4 Undersøgelser af kondensat	26
4.1 Baggrund	26
4.2 Formål	26
4.3 Forsøgsopstilling	26
4.4 Resultater	28
4.5 Konklusion	28

Kapitel 5	Målinger af tryktab over koksbed	29
5.1	Tryktab over hele koksbedden	29
5.2	Tryktab ned gennem koksbedden	32
5.3	Konklusion	48
Kapitel 6	Samlende konklusion	49
Referenceliste		51

## Indledning

Denne rapport er en beskrivelse af de resultater, der er opnået på baggrund af forsøgskørslen med 100 kW tottrinsforgasningsanlægget ET, DTU i uge 47 1999, som ikke er offentliggjort tidligere. En oversigt over allerede offentliggjorte resultater ses i tabellen i forordet.

Forud for forsøget var gasrensningssystemet blevet ombygget med det formål at simplificere og optimere gasrensningssystemet. Baggrunden for forsøget var til dels at undersøge effekten af gasrensningssystemerne: Patronfiltre, posefiltre og elektrofilter samt at

- Verificere tjæremåling fra uge 37 1998 og afprøve mere simple tjæremålemetoder (SPA).<sup>1</sup>
- Køre med meget tørt flis samt måle tjære og partikelemission.
- Måle PAH i udstødningsskeden.
- Køre med lav temperatur (ingen pyrolyse) og observere/måle tjæredannelsen.
- Verificere Benny Gøbels modelleringsresultater.
- Måle vertikalt trykprofil i koksbedden.
- Rense kondensat med simpelt aktivt kulfilter.

Rapporten beskriver først ombygningen af gasrensningssystemet på 100 kW tottrinsforgasseren, hvorefter der kommer en beskrivelse af forsøgets forløb og af de udførte forsøg. Resultaterne af de ikke tidligere offentliggjorte undersøgelser præsenteres i de efterfølgende kapitler.

---

<sup>1</sup> SPA: Solid-phase adsorption.

# Kapitel 1 Ombygninger af 100 kW forgasseren

## 1.1 Ombygning før forrige forsøg

Forud for det forrige forsøg, der blev kørt i september 1998, blev 100 kW tottrinsforgasseren ombygget på følgende punkter:

### 1. Optimering af lufttilsætningen

Lufttilsætningen blev udformet, så der blev en bedre opblanding mellem pyrolysegas og luft, og så varmetabet fra denne meget varme del af reaktoren blev reduceret.

### 2. Tætning af reaktor med foring af højtemperaturstål

Ved at tætte reaktoren blev gasstrømningen tvunget gennem koksbedden med det hovedformål at reducere tjæremængden. Herudover ville varmetabet i reaktoren tillige reduceres.

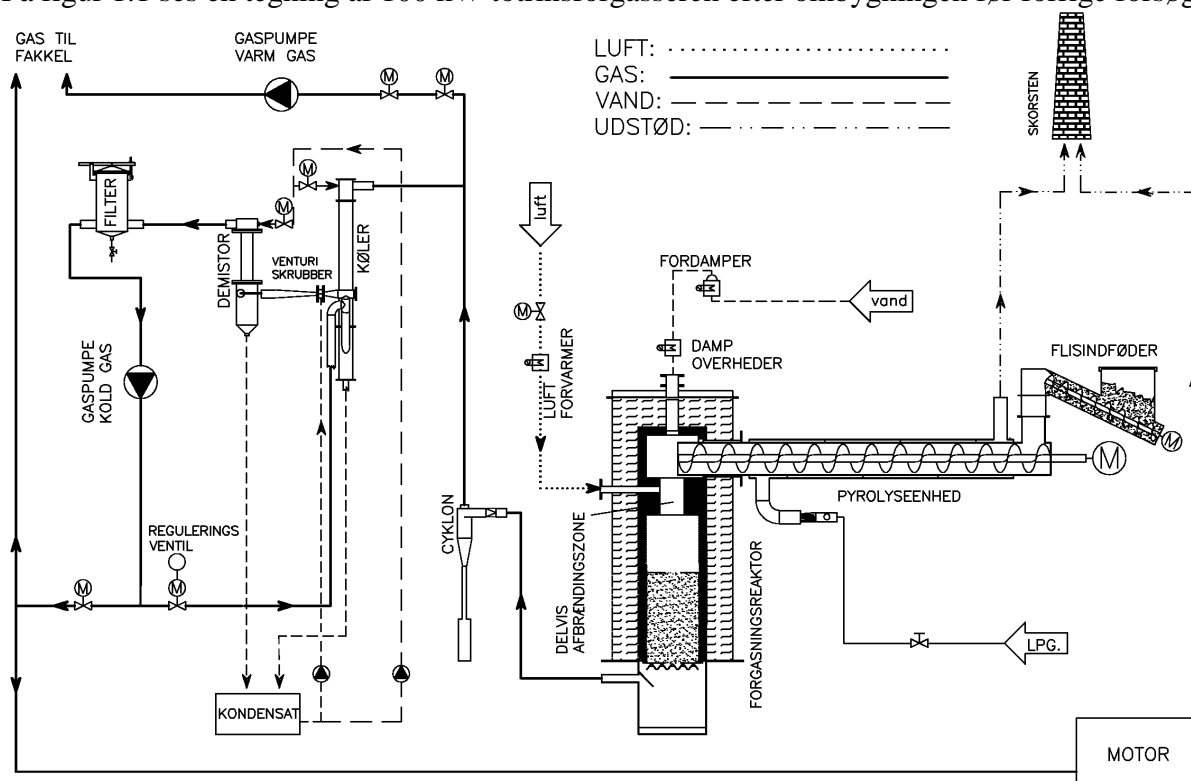
### 3. Temperatur, tryk og gassammensætning i bedden

Der blev konstrueret udtag i metalforingen for hver 6. cm i vertikal retning, i alt 15 udtag. Hvert udtag blev konstrueret således, at en sonde kunne forskydes i horisontal retning. Med de enkelte sonder kunne den lokale temperatur og det lokale tryk måles, og gasprøver kunne udtages til gasanalyse.

### 4. Ny køler

Den gamle køler var lavet af AISI 304, og var korroderet flere steder. Der blev konstrueret en tilsvarende køler i syrefast rustfrit stål (AISI 316).

På figur 1.1 ses en tegning af 100 kW tottrinsforgasseren efter ombygningen før forrige forsøg.



Figur 1.1 100 kW forgasningsanlægget efter ombygningen for forsøget i september 1998.



Forsøget i september 1998 viste dels, at tjæreindholdet i den urensede gas var meget lavt (under 25 mg/Nm<sup>3</sup>) og dels, at hovedparten af partiklerne var under 1 µm. [Optimering af 100 kW tottrinsforgassingsanlæg på DTU; ET-ES 99-02].

## **1.2 Ombygninger forud for dette forsøg**

Da tjæreindholdet efter tottrinsforgasseren nu er meget lavt, og da partiklerne hovedsageligt er submikrone, blev det besluttet, at man i det kommende forsøg skulle ombygge gasrensningssystemet så gasrensningssystemet, der er velegnede til små, tørre partikler kunne afprøves. Forgasseren skulle samtidig forberedes, så man kunne lave tjæremålinger med forskellige tjæremålemetoder.

### **Ombygning af gasrensningssystemet.**

Gasrensningssystemet blev ombygget, så forskellige tørre gasrensningssystemer kunne afprøves. Det blev besluttet at følgende renseteknikker skulle afprøves:

- Posefilter
- Patronfilter
- Elektrofilter

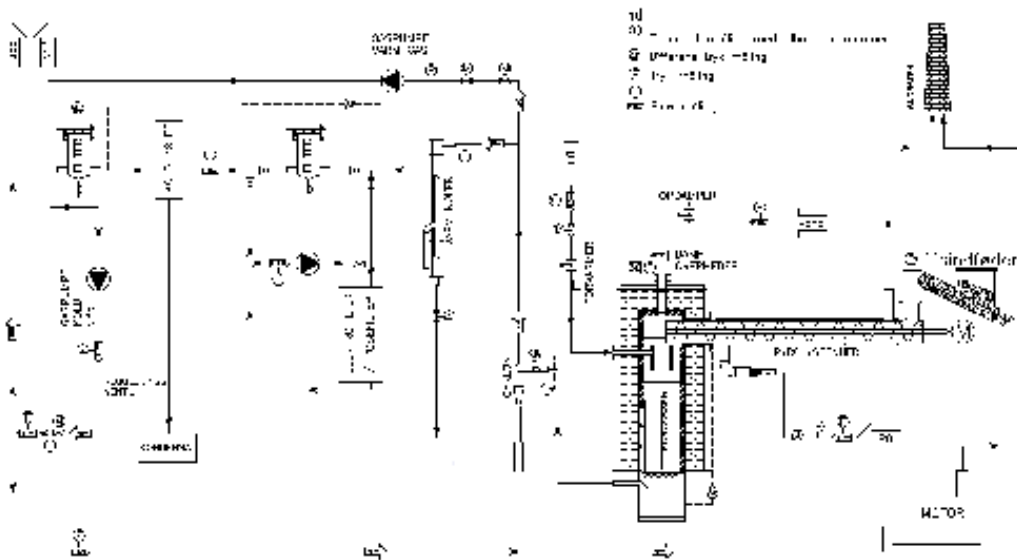
Den oprindelige køler blev tracet og isoleret og benævnt "varm køler" eller "køler 1". Denne køler skal køle gassen til en forudindstillet temperatur over vanddugpunktet, således at ud-kondensering af vand i det efterfølgende filter undgås. Efter "varm køler" blev der indsat en ventil, der kunne afspærre gasrensningssystemet ved skift mellem gasrensningenhederne. Der blev indsat flexible koblinger, så man nemt kan skifte mellem posefilter og elektrofilter. Patronfilteret blev fast monteret på stilladset.

Efter gasrensningenheden blev der indsat en ekstra køler "kold køler"/"køler 2" som kunne køle gassen ned til 30-50°C.

### **Målepunkter til SPA-tjæremålemetode**

Der blev indsat målestudse til tjæremålinger ved brug af SPA metoden i rågassen (før den varme køler) og i den rene gas (efter filtrene).

På figur 1.2 ses en tegning af 100 kW tottrinsforgasseren efter ombygningen forud for dette forsøg.



Figur 1.2 100 kW forgasningsanlægget efter ombygningen for forsøget i november 1999.

### Ændringer af dataopsamling og styring.

Dataopsamlingen og styringen blev tilpasset ombygningen af gasrensningssystemet. Der skulle fortsat styres efter trykket ved indfødningen, således at der er atmosfæretryk ved indfødningen. Men fra at være styret ved en konstant volumen blæser og et bypass af noget af gassen, blev styringen ændret, så blæserens omdrejninger nu styres af en frekvensomformer, som får signal fra PLC'en.

### 1.3 Oversigt over målte størrelser i dataopsamling

I dataopsamlingen på anlægget opsamles data omkring temperatur, tryk og flow hvert minut. Gassammensætningen blev målt med gasanalytatorer med separat dataopsamlingsprogram koblet på. De fem gasanalytatorer måler  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  og  $CH_4$ . Dataopsamlingen til analytatorerne opsamler disse data hvert minut og beregner  $N_2$ -indholdet som rest. Herefter beregnes øvre og nedre brændværdi. Herudover målte Teknologisk Institut (TI)  $O_2$ ,  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CO_2$  med deres gasbænk.

### Temperaturer

#### Pyrolysereaktor.

- T 1-6 I pyrolyserøret øverst (T1 ved indfødning, og T6 ved forgasser).
- T 8 Ved udløb af røggaskanal.
- T 9 Midt på røggaskanal.
- T 10 Ved indløb til røggaskanal.

#### Forgasser.

- T 11-12 Øverst i forgasser over indsnævring.
- T 13-14 I indsnævringen under lufttilsætningen.

T 15-29	Temperaturfølerne yderst i de bevægelige sonder. Der er 6 cm. mellem sonderne.
T 30	Temperaturen måles på risten. Føler placeret under mellemste risteelement.
T 31-32	Temperatur i bunden af forgasser.
T 33-35	Temperaturen af de tre luftindblæsninger.
T 36	Temperaturen af overhedet vanddamp.
T37	Temperatur ved cyklon.

**Gasrensning.**

T 38	Kølevand til køler 1.
T 39	Gas før køler 1.
T 40	Kølevand fra køler 1.
T 41	Gas efter køler 1.
T 42	Gas før køler 2.
T 43	Temperatur i filter.
T 44	Gas efter køler 2.
T 45	Gas efter sikkerhedsfilter/ lige før kapselblæser.
T 46	Gas efter flowmåler 2.

**Tryk (mmVS)**

P_filter	Differenstryk over filter.
p_b	Differenstryk over koksbed.
p_i	Trykket i indføderen.

**Flow**

f_prod	Gasproduktionen.
--------	------------------

## Kapitel 2 Forsøgsplan

### 2.1 Formål med forsøget

Først og fremmest var formålet med forsøget at afprøve nye gasrensningssystemer:

- Posefiltre
- Patronfiltre
- Elektrofilter.

Sekundært var formålet med forsøget (ikke prioriteret rækkefølge):

- Verificere tjæremåling fra uge 37 1998 og afprøve mere simple tjæremålemetoder (SPA).
- Køre med meget tørt flis samt observere tjære og partikelemission.
- Måle PAH i udstødningsgassen.
- Køre med lav temperatur (ingen pyrolyse) og observere/måle tjæredannelsen.
- Verificere Benny Gøbels modelleringsresultater.
- Måle vertikalt trykprofil i koksbedden.
- Rense kondensat med simpelt aktivt kulfilter.

### 2.2 Beskrivelse af planlagte målinger

I dette afsnit beskrives kort baggrunden for de enkelte forsøg. Resultaterne af målingerne ses i de nævnte arbejdsnotater, rapporter og artikler.

#### Gasrensning

Idet partiklerne fra totrinsprocessen fra forsøg kørt i foråret 1998 var blevet karakteriserede som sod, og da tjæreindholdet i gassen efter ombygningen af forgasningsreaktoren er meget lavt, skulle alternativer til den hidtil benyttede venturiskrubber afprøves. Der blev afprøvet:

- Posefiltre
- Et elektrofilter
- Patron filtre.

Resultater fra de forskellige gasrensningssystemer ses i rapporten "Low temperature Particle Filtration of Producer Gas with Low Tar Content" Claus Hindsgaul, June 2000. ET-ES 2000-03.

#### Tjæremålinger

Under forsøget i september 1998 blev der af DTU og RISØ målt et meget lavt tjæreindhold i gassen: 3-16 mg/Nm<sup>3</sup>. DTI målte betydeligt mere tjære: 346-615 mg/Nm<sup>3</sup>. Disse store afvigelser, fundet ved inddampning tyder på, at DTI's prøver bestemt gravimetrisk har haft et stort indhold af partikler, som ikke er fanget ved filtreringen af dichlormethanudvasket (se også "Optimering af 100 kW totrinsforgasningsanlæg på DTU".)

Under dette forsøg skulle DTU og DTI måle samtidig og undersøge, hvorvidt der kunne blive bedre overensstemmelse.

Desuden skulle man afprøve den meget simple SPA (Solid Phase Adsorption) tjæremålemetode, som er udviklet på KTH i Stockholm.

Resultater fra tjæremålingerne ses i rapporten ”Tjæremålinger under forsøg med totrinsforgasser uge 47-1999. Afprøvning af SPA metoden”.

### **Kørsel på tørt flis**

Tidligere forsøg havde vist, at partikelemissionen er større når forgasseren kører på tørt flis, end når der er fugt i brændslet. Det skulle undersøges, om længere tids drift på tørt flis havde indflydelse på partikelmængde, tjæremængde og tryktab over koksbedden. Da planlægningen af VIKING forgasseren var i sin vorden, skulle forsøget være med til at afgøre, om der skulle en tørreenhed foran VIKING forgasseren, eller om pyrolyseenheden kunne tørre flisen ned.

### **PAH i røggassen fra motoren**

PAH-forbindelser (polyaromatiske hydrocarboner) er kræftfremkaldende. Da der kan være PAH-forbindelser i produktgassen og da PAHer kan dannes i motoren, er det relevant at undersøge, hvor mange PAH-forbindelser der er i røggassen. Da der samtidig ved dette forsøg blev målt tjære, og herunder PAHer i gassen før motoren, var der særdeles relevant at få målt mængden af PAHer i røggassen efter motoren, hvorved man kan søge at finde ud af, om der sker en netto dannelse eller netto nedbrydning af PAH-forbindelser i motoren.

Analysen af opsamlet materiale er ikke færdigbehandlet.

### **Lav temperatur i pyrolysereaktoren**

Totrinsprocessen er kendt for sit lave tjæreindhold, hvilket traditionelt begrundes i, at pyrolysen foregår et veldefineret sted før den partielle oxidation. For at opnå høj pyrolyseringsgrad kræves en høj røggastemperatur, som ikke opnås i udstødningsgassen ved høje luftoverskudstal.

Da lufttilsætningen i 100kW forgasseren er udformet, så den afgasning der finder sted øverst i koksbedden, bliver transporteret op til den delvise afbrænding, skulle det undersøges, om tjæreindholdet i gassen fortsat ville være lavt, hvis pyrolysetemperaturen blev sænket. Det skulle endvidere undersøges hvorvidt tjæreindholdet ville stige, hvis der helt blev slukket for varmetilførslen til pyrolyseenheden. Det såkaldte hvirvelstrømsprincip skulle afprøves.

Resultater fra hvirvelstrømsforsøgene er beskrevet i eksamensprojektet: ”Optimering af koncepter for medstrømsforgasning”, ET marts 2000.

### **Verificere Benny Gøbels modelleringsresultater**

Benny Gøbel har i sit Phd.-studie udarbejdet en dynamisk matematisk model af en fixed koksbed. Ved at køre forgasningsreaktoren i forskellige driftssituationer kunne man indhente en række data som kan benyttes til at verificere og/eller modificere den matematiske model.

Den matematiske model af en fixed koksbed og sammenligning med resultater fra tidligere forsøg er beskrevet i phd.-projektet: ”Modellering af fixed koksbed”, ET-PhD 99-04.

### **Rense kondensat med simpelt aktivt kulfilter**

Indledende undersøgelser omkring rensning af kondensat fra medstrømsforgassere viste, at aktivt kul især er velegnet til at fjerne PAH-forbindelser. For ikke at udlede forurenset vand, blev kondensatet fra totrinsforgasseren løbende renses i et simpelt aktivt kulfilter. Der blev taget prøver af kondensatet før og efter rensningen.

Resultaterne omkring rensning af kondensatet ses i kapitel 4: ” Undersøgelser af kondensat”.

### Måle vertikalt trykprofil i koksbedden

For at kunne opskalere en fixed koksbed, er det vigtigt at kunne modellere og forudsige, hvordan flowet udvikler sig. Igennem forsøget blev de lokale tryk langs reaktorvæggen målt.

Disse resultater præsenteres i kapitel 5 ”Tryktab over koksbedden”.

## 2.3 Det planlagte forsøgsforløb

For at få målt og analyseret resultaterne af ombygningen var et stort måleprogram planlagt. Bortset fra få tidsforskydninger og enkelte ændringer blev målinger udført efter planen. Forsøget var planlagt til at vare fra søndag d. 21. november kl. 10 til torsdag d. 25. november kl. 18. Om søndagen skulle forgasseren varmes op, og det forventedes at stabil drift kunne opnås i løbet af natten til mandag. Der skulle således laves forsøg og måles fra mandag til torsdag (se tabel 2.1).

*Tabel 2.1 Det planlagte forsøgsforløb uge 47 1999*

<i>Aktion</i>	<i>Søndag</i>	<i>Mandag</i>	<i>Tirsdag</i>	<i>Onsdag</i>	<i>Torsdag</i>
Styring og overvågning: Erik Hansen Freddy Christensen Steen Nielsen	14-22 22-6	06-14 14-22 22-6	06-14 14-22 22-6	06-14 14-22 22-6	06-14
Indfødere: Bjarke Dam Jesper Pedersen Rune Jensen	16-22 22-06	14-22 22-06 06-14	14-22 22-06 06-14	06-14 22-06 14-22	06-14
Drift af forgasser	Tørt flis, ingen vanddamp.	Tørt flis, ingen vanddamp.	Tørt flis, ingen vanddamp.	Utørret flis, vanddamp som under uge 37 1998. Skift efter nattens PAH-målinger.	Højere ydelse (150-200 kW), lav pyrolyse-temperatur.
Gasrensning og partikelmåling Claus Hindsgaul		Claus får erfaring med de forskellige filtre.	Langtidstest af diverse filtre.	Langtidstest af diverse filtre.	Langtidstest af diverse filtre.
Jesper Ahrenfeldt Motor		Virkningsgrad og emissioner.	9-12,12-15,15-18 måling af PAH med lambda 1,6.	9-12,12-15,15-18 måling af PAH med lambda 1,1.	
Jan Motor			19-22,22-1,1-4 måling af PAH med lambda 1,1.	19-22,22-1,1-4 måling af PAH med lambda 1,6.	
Finn Pedersen DTI Tjæremålinger			2 x måling (rågas + rengas) 12:00 til 14:00 2 x måling 19:00 til 21:00.	2 x måling (rågas + rengas) 12:00 til 14:00 2 x måling 19:00 til 21:00.	
Peder Brandt Tjæremålinger		2 x SPA-måling 12:00 til 12:30.	2 x SPAmåling (rågas + rengas) 12:00 til 14:00 2 x SPAmåling 19 til 21.	Tjæremåling (rågas) 12 til 14 samt 19 til 21 10 x SPA-målinger i samme tidsrum.	6 x SPA-målinger. Tidspunkt ikke fastlagt, men først efter 10:00.
Jens Dall Bentzen	Opstart.	Rensning af kondensat.	Rensning af kondensat.	Rensning af kondensat.	Rensning af kondensat.
Gæster		10.00 Nicolaj Sørensen, fra Harrit og Sørensen.	9.00 Insa Tech, Radar-måling.		

## Kapitel 3 Forsøgsforløb

### 3.1 Beskrivelse af forsøgsforløbet

I forhold til det i kapitel 2 beskrevne planlagte forsøg, skete der visse justeringer under forsøget. De væsentligste ændringer var:

- Under opstarten, som blev foretaget på helt tørt flis (6% fugt), skulle risten aktiveres jævnlige for at holde trykfaldet over bedden på et lavt niveau. Det blev derfor besluttet, at man allerede mandag aften skulle skifte driftstilstand til vanddampforgasning, som hidtil har været normal driftform, hvor det ellers var planlagt at skifte tirsdag aften.
- Elektrofilteret blev ikke afprøvet, idet den indbyggede sikkerhed slog filteret fra ved drift på forgasningsgas. Årsagen hertil blev ikke afklaret.

I det følgende gennemgås forsøget og målinger af temperaturer, tryk, gasstrøm og gassammensætning præsenteres.

#### Søndag 21. november (opstart)

Opvarmningen af reaktoren blev påbegyndt søndag 21. november 1999, kl. 12.00. Klokkeren 16.25 blev gasbrænderen, der opvarmer pyrolyserøret, tændt, og kl. 17.00 blev flisindfødingen startet. Der blev indfyret 19,25 kg flis i timen. Indfødningsmængden var bestemt ud fra et fugtindhold i flisen på 6 % (våd basis) og med ønsket om at indfyre 100 kW (øvre brændværdi). Der blev i modsætning til tidligere forsøg ikke tilsat damp under opstarten.

Allerede i løbet af to timer var tryktabet over koksbedden steget til 250 mmVS, hvilket normalt tager flere døgn. Det blev besluttet at beholde driftstilstanden "tør forgasning" og holde tryktabet nede ved at aktivere risten. Frem til kl. 20 blev risten aktiveret ved en aktuator, hvorefter man gik over til manuel betjening, da aktuatorens udslag var utilstrækkeligt til at stabilisere tryktabet.

#### Mandag 22. november

I løbet af mandagen blev der udført en række forsøg med gasrensning. Tryktabet over koksbedden blev holdt nede ved jævnlig aktivering af risten. Om eftermiddagen blev det besluttet at se om tryktabet ville stabiliseres, hvis risten blev holdt i ro, men tryktabet steg til 1000 mmVS mellem kl. 16 til kl. 19. Herefter blev der tilsat 16,5 kg vanddamp/time til forgasseren svarende til et samlet biomasse:vanddamp masseforhold på 1:1.

#### Tirsdag 23. november

Kl. 8.40 stoppede anlægget, da der var et stort vakuum før kapselblæseren, så vandet fra en vandlås var suget ned i sikkerhedsfilteret. Sikkerhedsfilteret blev tømt for vand og skiftet, og anlægget blev startet op igen. Det store vakuum skyldes at der var udkondenseret vand på

poserne i posefilteret, så temperaturen i posefilteret blev justeret op for at forhindre kondensat problemer heri.

Om formiddagen var Insa-Tech på besøg for at afprøve radarteknik som bedhøjde måler. Der var desværre ikke ordentlig plads til måleenheden, som skulle kigge gennem skueglasset ovenpå reaktoren. Over et kort tidsrum blev der målt en afstand, som kunne være afstanden til koksbedden, så teknikken bør afprøves ved et senere forsøg, hvor der er bedre plads til måleren.

Fra kl. 18.30 blev der tilført utørret flis med en fugtighed på ca. 32%. Damptilsætningen blev justeret ned til ca. 8 kg/time, hvilket fortsat svarer til et biomasse:vanddamp masseforhold på 1:1.

### **Onsdag 24. november**

Mellem kl. 12.50 og 13.10 var anlægget standset på grund af vand i sikkerhedsfilteret. Tryktabet over bedden voksede dagen igennem og risten blev vanskelig at aktivere. Det blev formodet, at bunden under risten var fyldt med koks. Kl. 16.45 gik anlægget i nedlukning. Fra kl. 17.45 blev der tilledt 10 liter/minut luft til bunden for at forgasse koksen i bunden, og derved gøre plads til at aktivere risten. Kl. 18.00 blev luftmængden til bunden justeret op til 25 liter/minut.

Kl. 21.30 blev anlægget startet igen. Kl. 23.20 blev gasrensningen aktiveret. Gasproduktionen var dog for høj, til at kapselblæseren kunne følge med, hvorfor flismængden blev justeret ned til 16 kg/time og damptilsætningen blev slukket. Kl. 0.10 blev flismængden justeret op på 18 kg/time, men damptilsætning forblev slukket. Der blev således kørt på utørret flis (fugtindhold ca. 32%) uden ekstra vandtilsætning, hvilket svarer til et vanddamp:tør biomasseforhold på 1:2.

### **Torsdag 25. november**

Natten til torsdag blev der lavet forsøg med elfilteret, som dog ikke ville aktiveres med forgasningsgassen.

Kl. 12.00 var den sidste flisindfødnings med utørret flis. Kl. 12.10 blev varmetilførslen til pyrolyseenheden slukket. Kl. 12.25 blev der tilført tørt flis og 16 kg/t damp, hvirvelstrømsprincippet med damptilsætning skulle afprøves.

Kl. 13.05 blev der konstateret gennembrænding i kanten rundt langs reaktorvæggen. Bedden blev herefter udjævnet.

Kl. 13.50 blev der igen tilført tørt flis, uden forpyrolyse og denne gang uden damptilsætning, hvirvelstrømsprincippet uden damptilsætning skulle afprøves. Kl. 14.50 blev aktuatoren til risten sat på automatik med sætpunktet 450 mmVS. Forgasseren kørte som en hvirvelstrømsforgasser frem til kl. 18.00, hvor anlægget planmæssigt blev lukket ned.

**Tabel 3.1 Opsummering af driftstilstande**

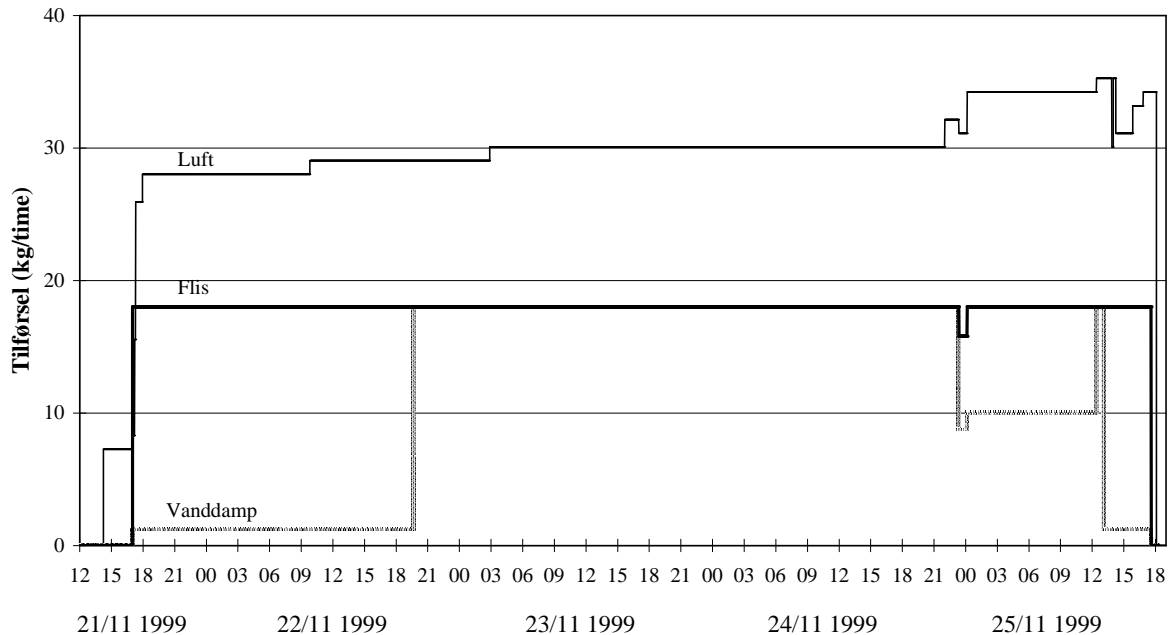
<b>Fra</b>	<b>Til</b>	<b>Driftstilstand</b>	<b>Benævnelse</b>
21/11 12.00	21/11 17.00	Opvarmning af forgasser og pyrolyse	Opvarmning
21/11 17.00	22/11 19.00	Tør flis 18 kg/t, damp 1,25 kg/t	Forgasning uden vanddamp
22/11 19.00	25/11 0.10	Tør flis 18 kg/t, damp 18 kg/t	Forgasning med vanddamp
25/11 0.10	25/11 12.00	Tør flis 18 kg/t, damp 9 kg/t	Forgasning med ½ vanddamp
25/11 12.00	25/11 13.00	Tør flis 18 kg/t, damp 18 kg/t	Hvirvelstrømsforgasning med vanddamp



25/11 13.50	25/11 18.00	Tør flis 18 kg/t, damp 1,25 kg/t	Hvirvelstrømsforgasning uden vanddamp
-------------	-------------	----------------------------------	---------------------------------------

### 3.2 Driftsforhold under forsøget

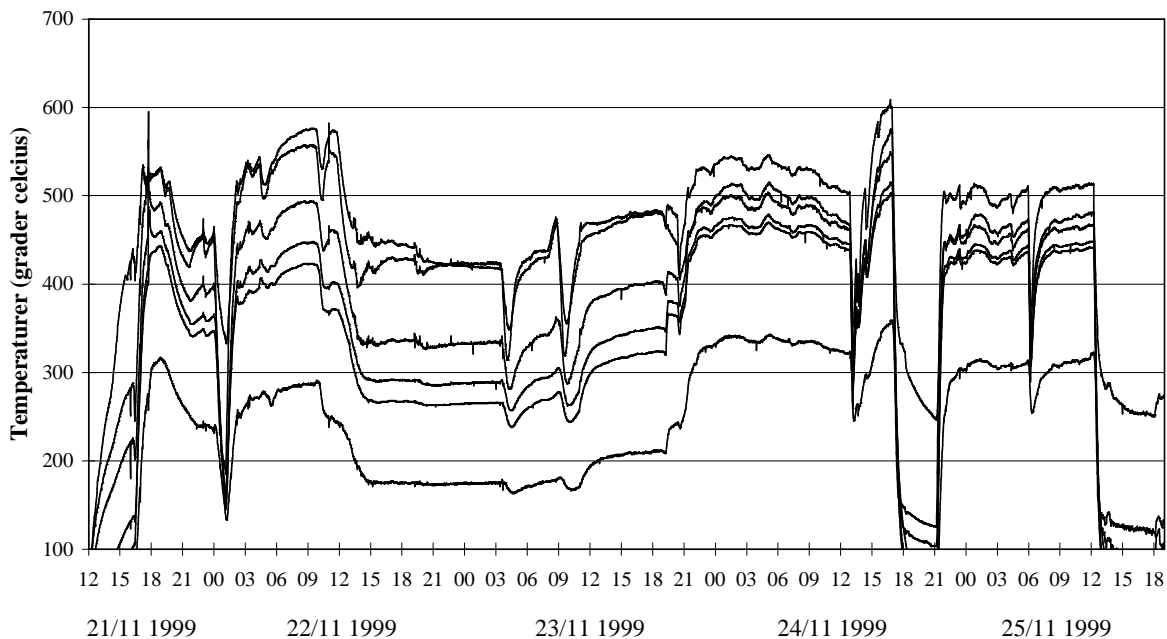
Tilførsel af flis, luft og vanddamp til forgasser under forsøg



Figur 3.1 Tilførsel af luft, flis og vanddamp.

Det ses på figur 3.1, hvornår der er kørt med tørret flis, og hvornår der har været vanddamptilsætning. Kurven for flis afbilder mængden af helt tørt flis, og kurven for vanddamp viser total mængden af vanddamp, hvilket er summen af vand fra flisen og vanddamp tilsat. De korte stop, der var under forsøget, er ikke afbildet på figur 3.1.

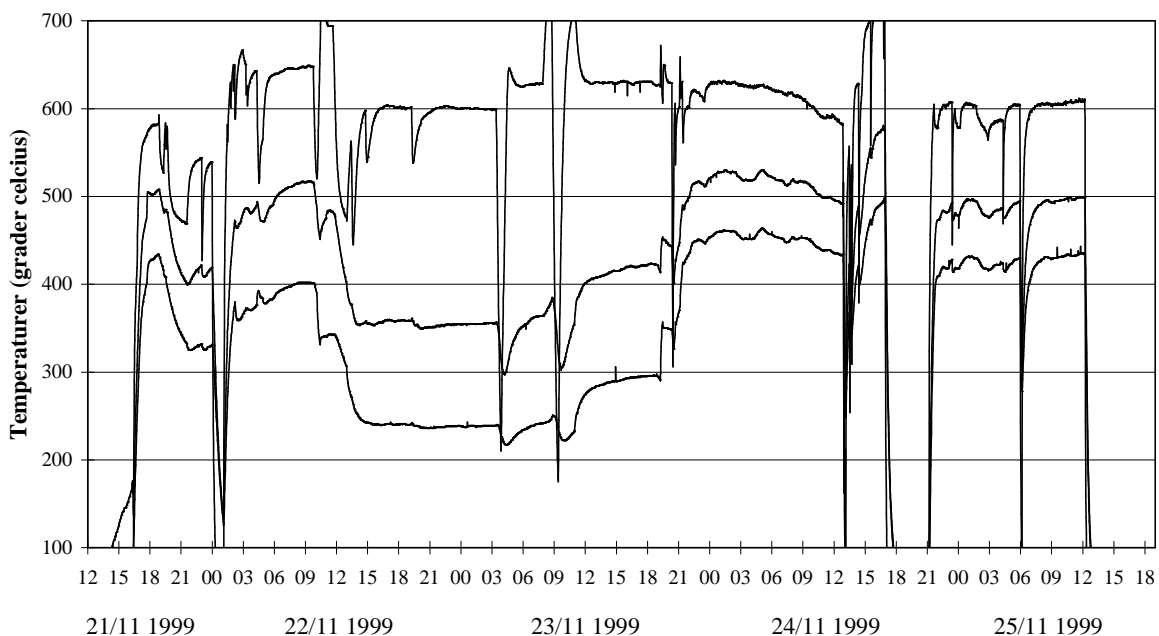
### Temperaturer i pyrolyseenheden



Figur 3.2 Temperaturer i pyrolyseenheden.

Det ses på figur 3.2, at temperaturspringet på langs af pyrolyserøret er større, når der er kørt med utørret flis, end når der er kørt med tørt flis.

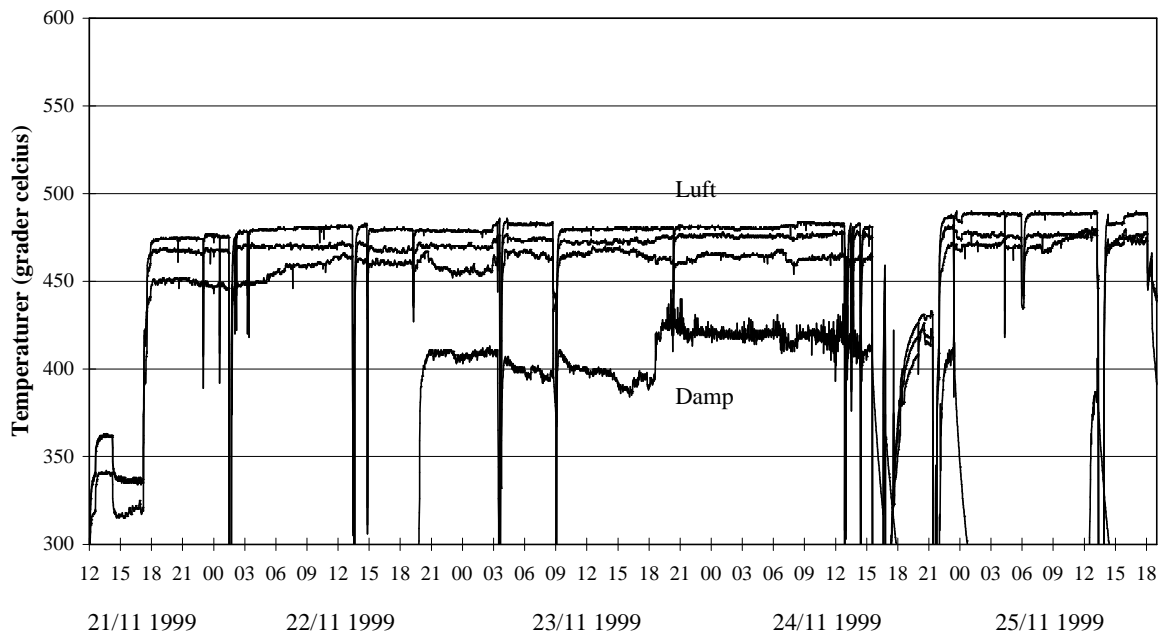
### Temperaturer af røggassen i pyrolyseenhedens røggaskanal



Figur 3.3 Temperaturer af røggassen i pyrolyseenhedens røggaskanal.

Tilsvarende figur 3.2 ses det på figer 3.3, at temperaturspringet i røggaskanalen er større, når der køres med utørret flis. Det ses, at der 25. november, blev kørt en eftermiddag efter "hvirvelstrømsprincippet", hvor varmetilførslen til pyrolysen var slukket. [Optimering af koncepter for medstrømsforgasning, Felicia Fock og Kirstine Thomsen, marts 2000].

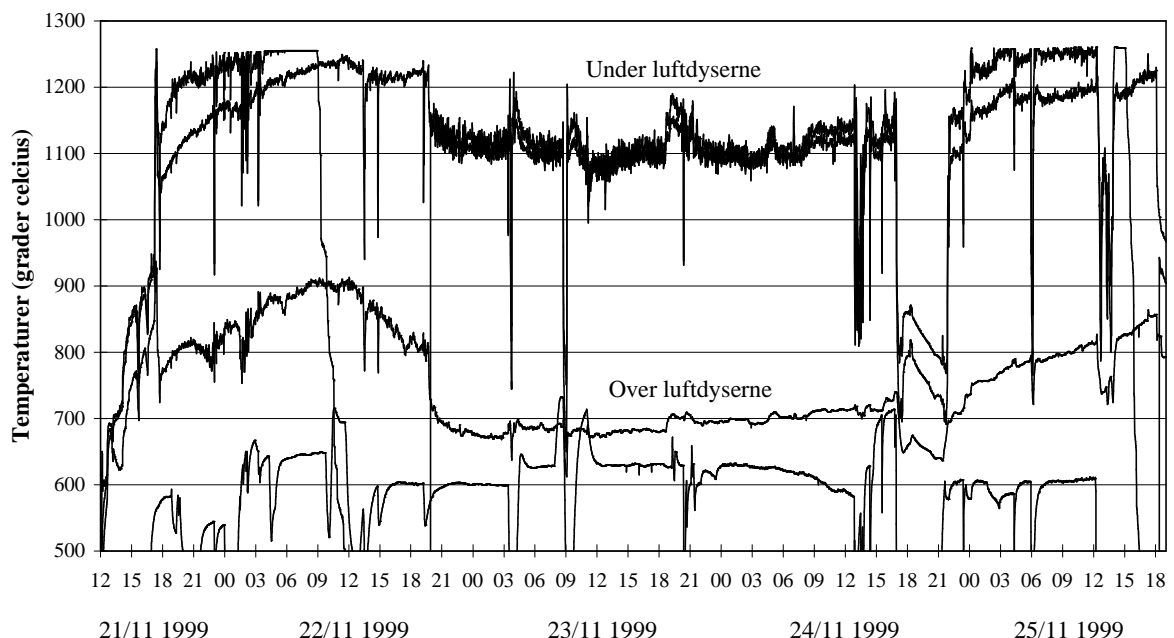
### Temperaturer af damp og luft der tilsættes forgasseren



Figur 3.4 Temperaturer af damp og luft der tilsættes forgasseren

Det ses på figur 3.4, at temperaturen af luft- og damptilsætningen har været meget stabil forsøget igennem.

### Temperaturer i delvis afbrænding

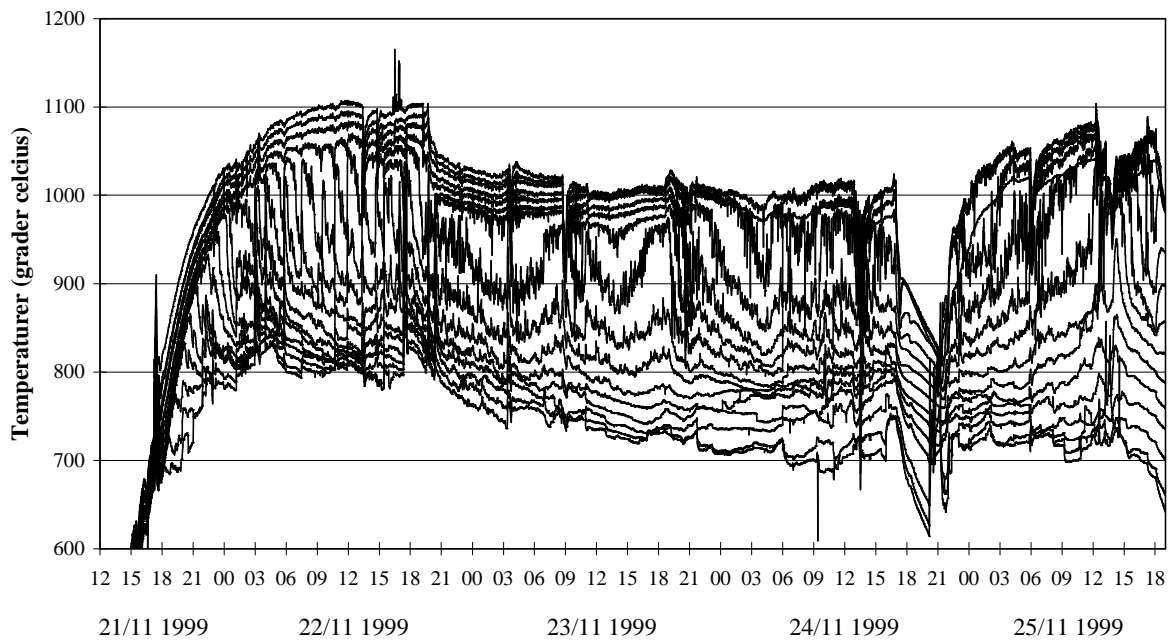


Figur 3.5 Temperaturer i den delvise afbrændingszone.

Det ses på figur 3.5, at temperaturen i den delvise afbrændingszone (under luftdyserne) reduceres væsentligt ved damptilsætning (se tabel 3.1 og figur 3.1). Der ses en klar sammenhæng mellem temperaturen i den delvise afbrændingszone og partikelbelastningen [Hansen, ET-ES-2000-05], hvilket bekræfter tidligere observationer om, at sodproduktionen

er stigende med stigende temperaturen og faldende ved højere dampkoncentrationer [Ravn et. al. 1998], [Hansen, 1998 ], [Bentzen et. al. 1998], [Bentzen et. al. 1999].

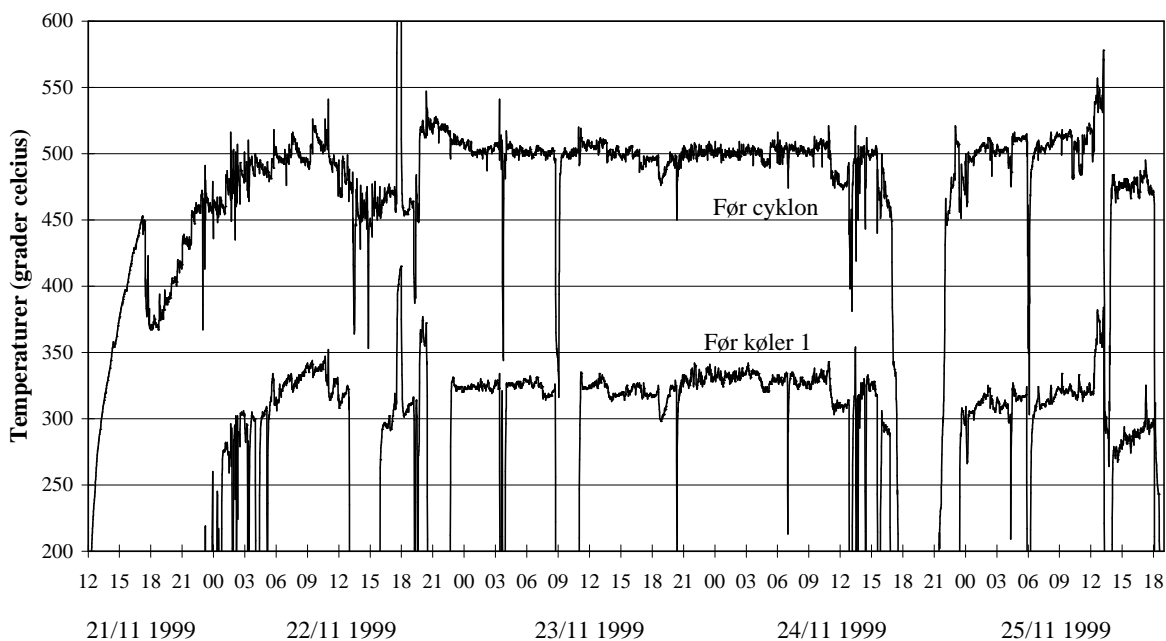
### Temperaturer i koksreaktoren



Figur 3.6 Temperaturer i koksreaktoren.

På figur 3.6 ses temperaturerne i koksbedden under forsøget. Lufttilsætningen blev justeret under opstarten, således at temperaturen i bunden af bedden var ca. 800°C. For at få opbygget en koksbed blev lufttilsætningen justeret lidt ned, hvorved temperaturen i bunden af bedden faldt hen over forsøget. Højden af koksbedden kan bestemmes ud fra temperaturkurverne: Temperaturerne der er 1000°C og derover, er målt i fribordet over koksbedden. Der er ca. 6 cm mellem hver temperaturføler. Det ses af figuren at højden af koksbedden ved reaktorkanten har været ca. 50-60 cm forsøget igennem.

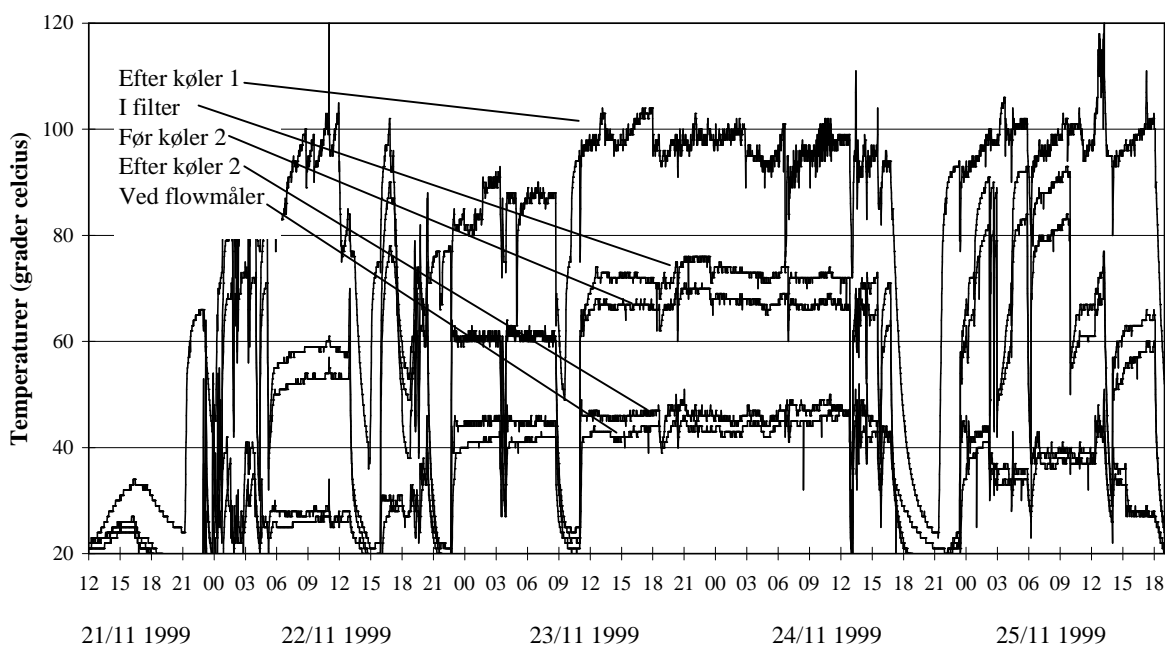
### Temperaturer af produktgas før cyklon og før køler 1



Figur 3.7 Temperaturer af produktgassen før cyklon og før køler 1.

Det ses på figur 3.7, at temperaturen ved cyklonen og køler 1 var stabil igennem forsøget.

### Temperaturer af produktgas i gasrensning

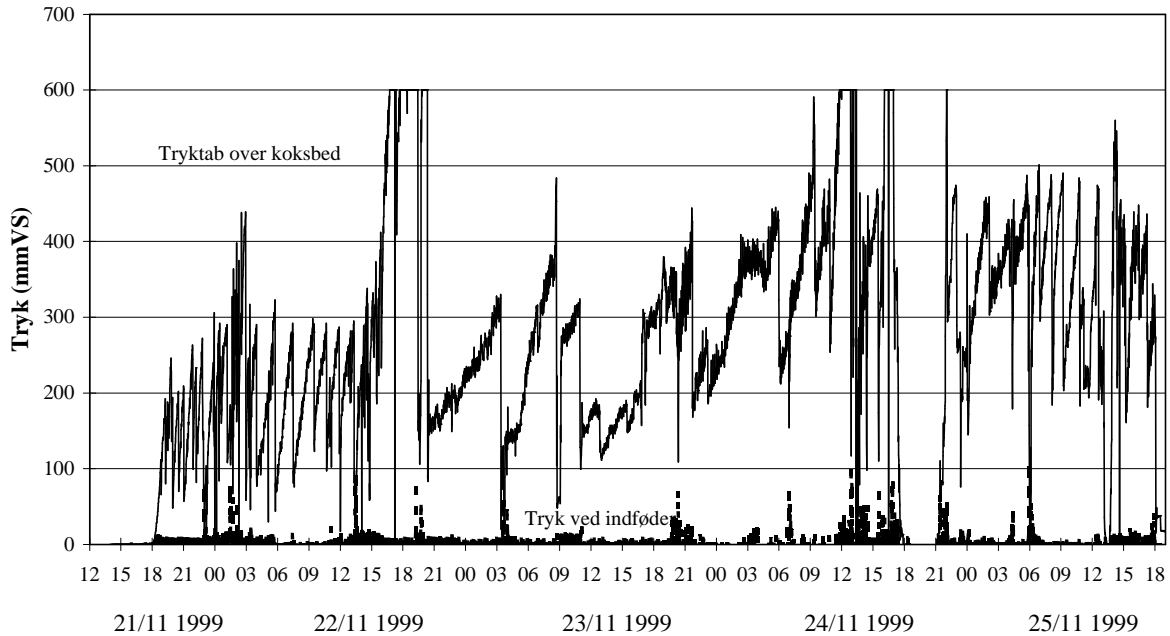


Figur 3.8 Temperaturer af produktgassen i gasrensningsystemet.

Vandkredsen til køler 1 var forud for forsøget blevet opbygget således, at det var muligt at termostat regulere temperaturen efter køler 1, således at filtrene kunne fungere over dugpunktet. Dette system virkede fortrinligt. Dette ses f.eks. ved at temperaturen i filteret er

over dugpunktet (ca. 65 °C ved biomasse:vanddamp forhold 1:1) og tilmed meget stabilt, og ved at man 23. november kunne hæve temperaturen i filteret som ønsket. Temperaturen efter køler 2 er under dugpunktet og der kondenseres ca. 10 liter vand pr. time ud i køleren.

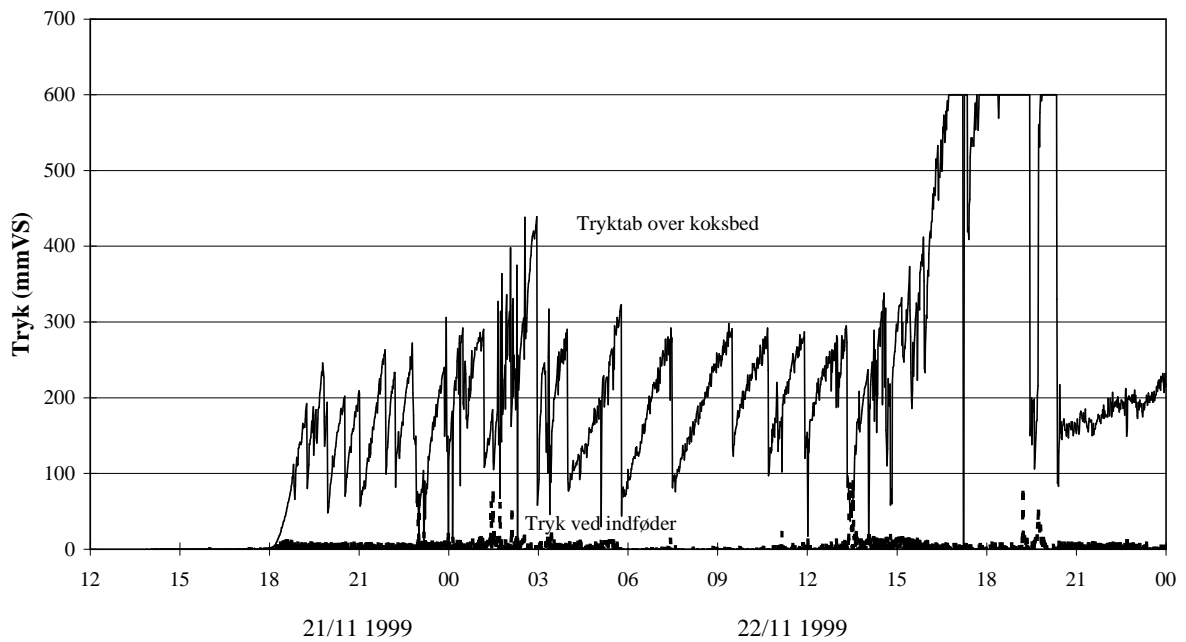
### Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed



Figur 3.9 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbedden i hele forsøget.

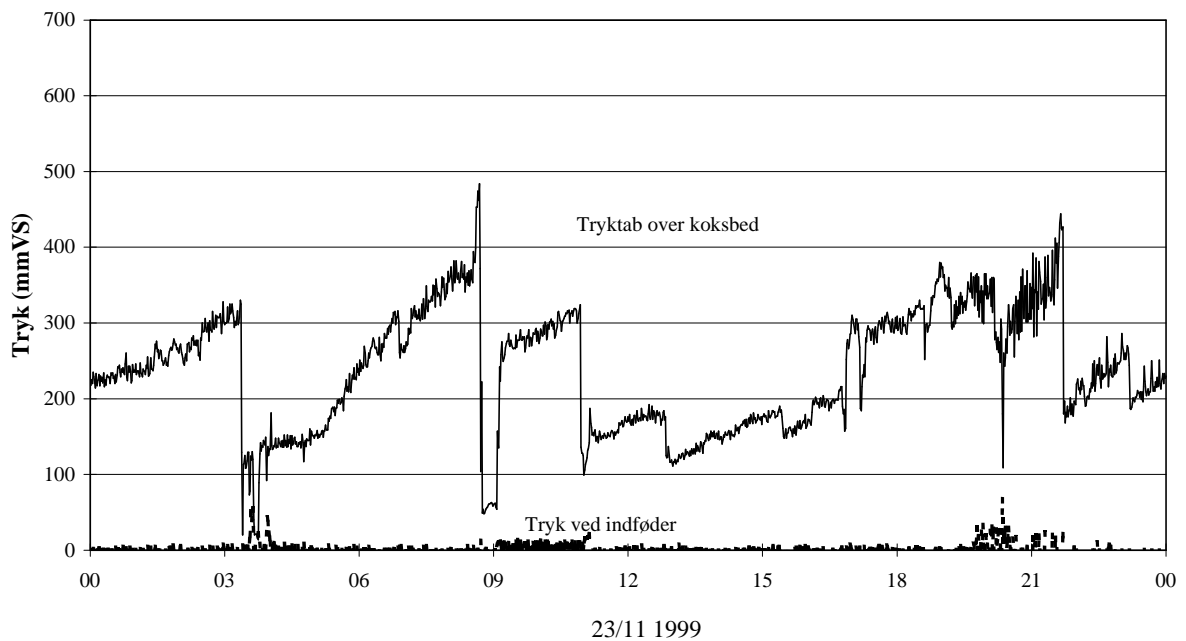
På figur 3.9 ses trykkene i forgasningsreaktoren. I forhold til tidligere forsøg på træflis steg tryktabet voldsomt, og det var igennem hele forsøget nødvendigt at aktivere risten jævnlige. I de perioder hvor der blev tilsat vanddamp, var tryktabsstigningen knap så hurtig som i de perioder, hvor der blev kørt med tørret flis. Differenstrykmåleren der målte tryktabet over koksbedden var på forhånd indstillet til et max. differenstryk på 600 mmVS.

**Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed**



Figur 3.10 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbedden 21-22. november.

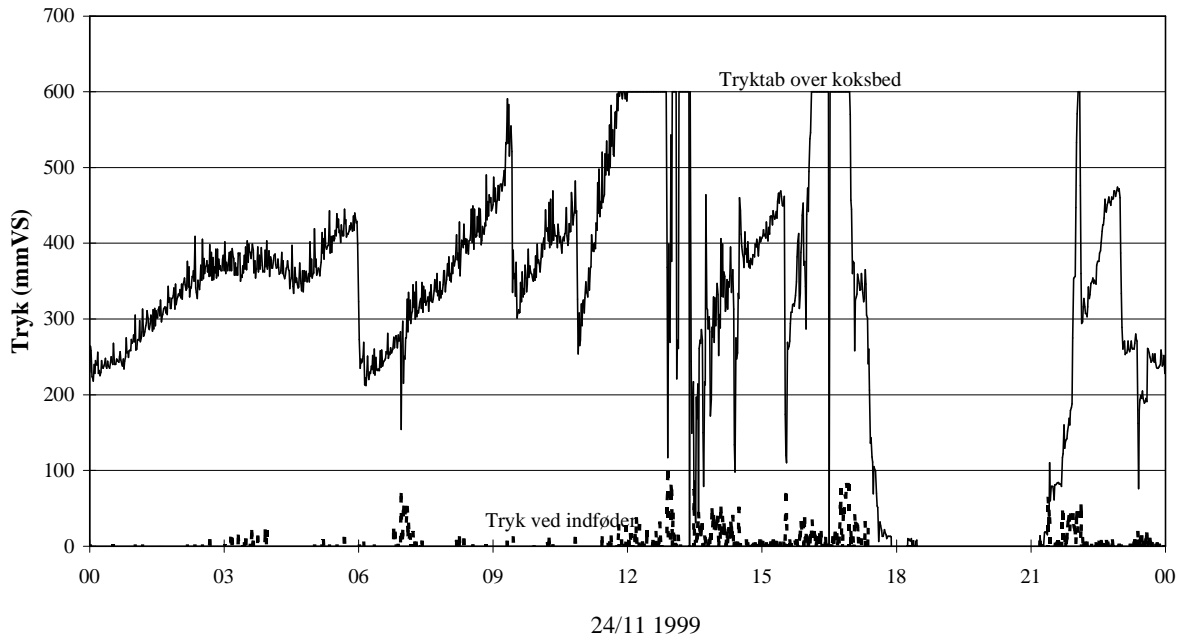
**Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed**



Figur 3.11 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbedden 23. november.

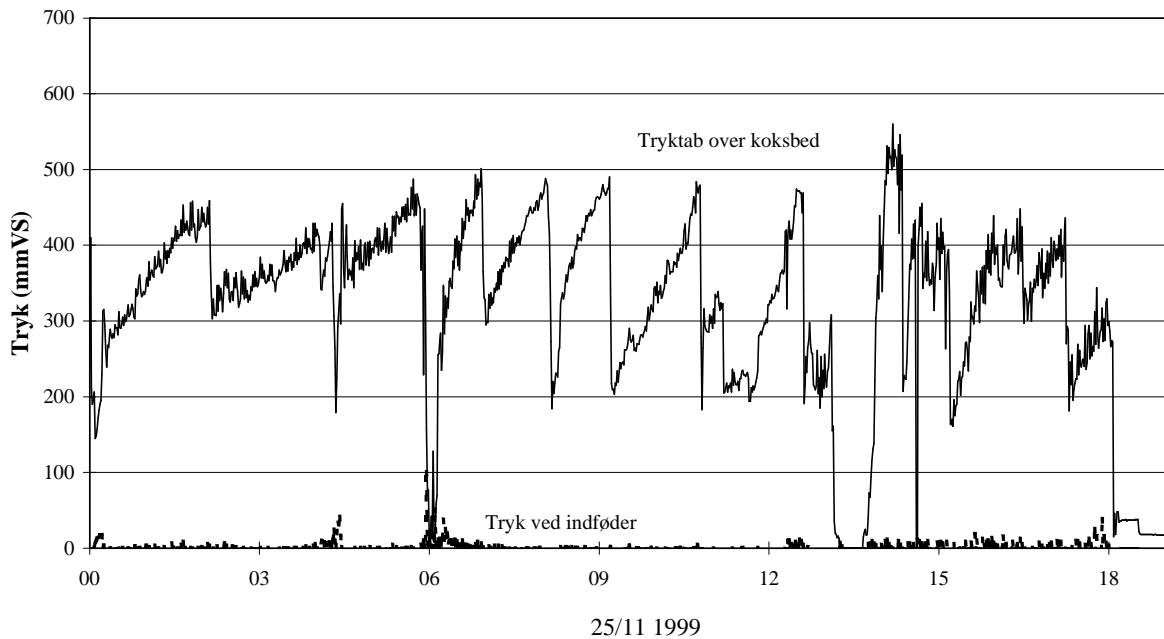
Den 22/11 kl. 19.00 blev der skiftet driftstilstand fra ”forgasning uden vanddamp” til ”forgasning med vanddamp”. Det ses på figurerne 3.10 og 3.11, at tryktabet over koksbedden stiger meget hurtigere under ”forgasning uden vanddamp” end under ”forgasning med vanddamp”.

### Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed



Figur 3.12 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbedden 24. november.

### Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed

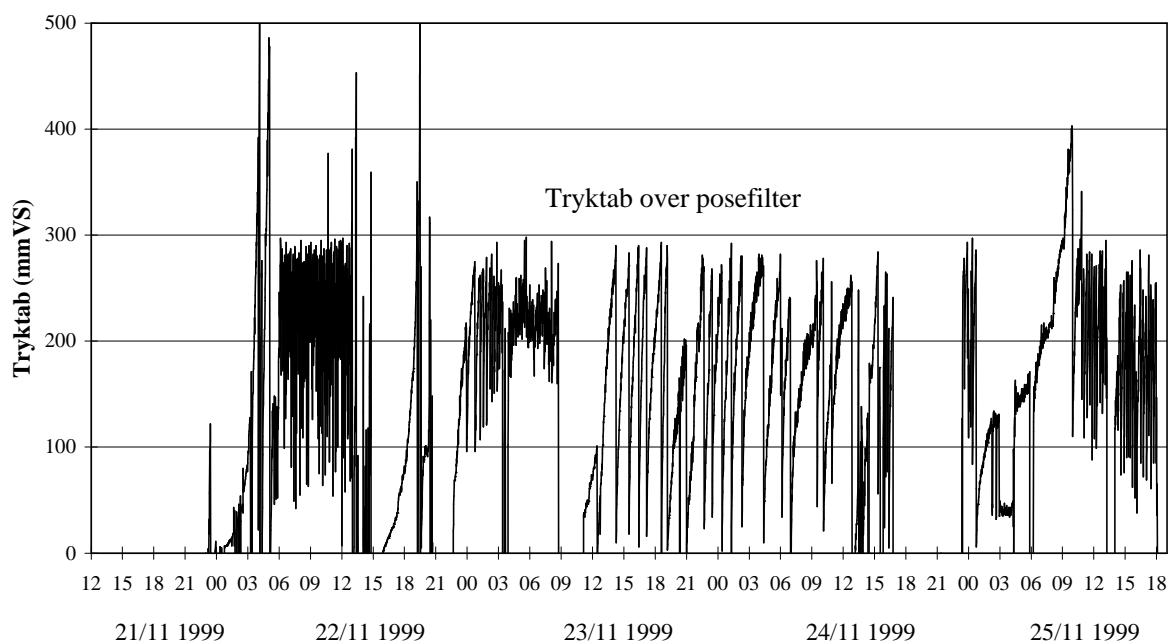


Figur 3.13 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbedden 25. november.

På figur 3.10-3.13 ses trykket ved indfødningen og tryktabet over koksbedden i detaljer for de enkelte forsøgsgage.



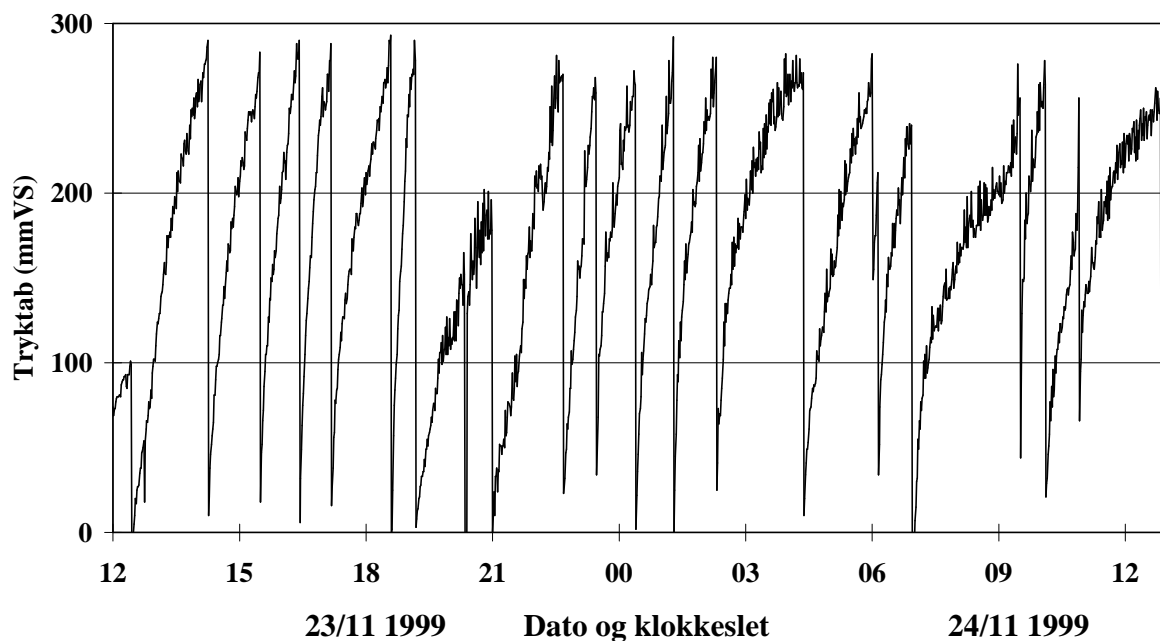
### Tryktab over pose/patron filter



Figur 3.14 Tryktab over pose- og patronfilteret over hele forsøget.

På figur 3.14 ses trykforløbet i patron og posefilteret under forsøget. Når posefilteret blev afprøvet, var setpunktet for tilbageskyl sat til 300 mmVS, så det kan ses ud fra figuren, til hvilke tider der blev afprøvet hhv. pose- og patronfiltre.

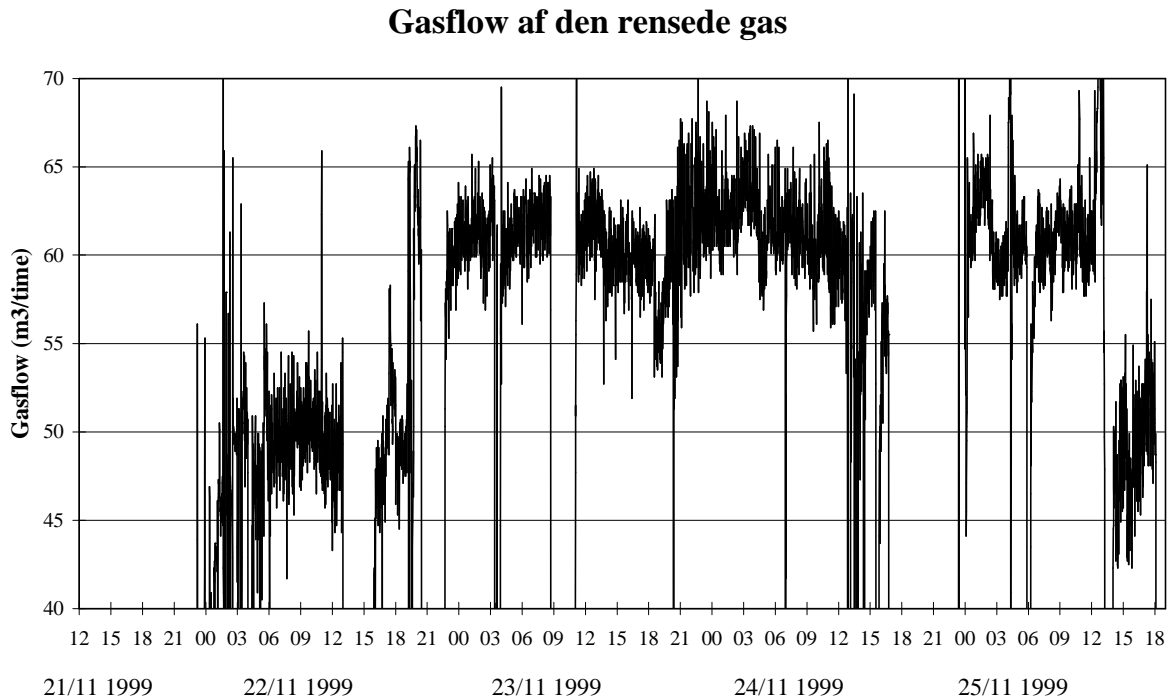
### Tryktab over posefilter



Figur 3.15 Tryktab over posefilteret 24 timers test.

På figur 3.15 ses tryktabet over posefilteret ved en 24 timers test af poserne. Det ses, at poserne er nemme at regenerere, og at frekvensen mellem regenerationerne ikke øges over tiden.

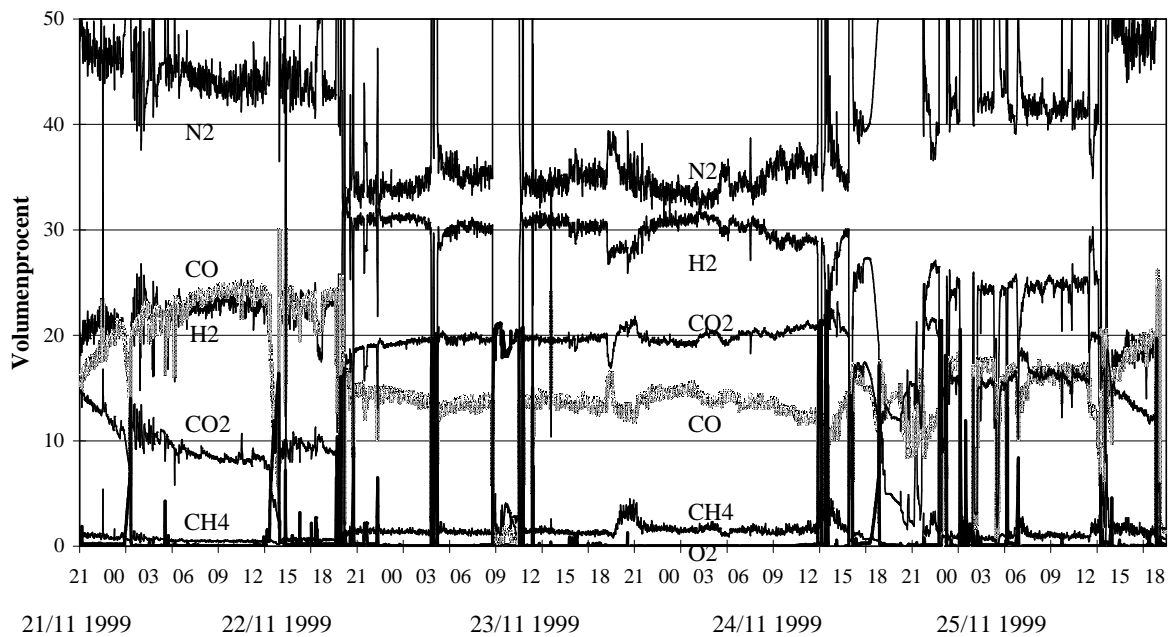
Man skal være forsigtig med at analysere kurven, da der blev eksperimenteret med skylletid og skylletryk, se også [Low Temperature Particle filtration of Producer Gas with Low Tar Content, ET-ES-2000-05].



Figur 3.16 Gasflow af den rensede gas.

På figur 3.16 ses flowet af den producerede rensede gas. Det ses, at gasflowet er højest, når der tilsættes vanddamp til forgasseren.

## Gassammensætning målt med DTU's gasanalyse

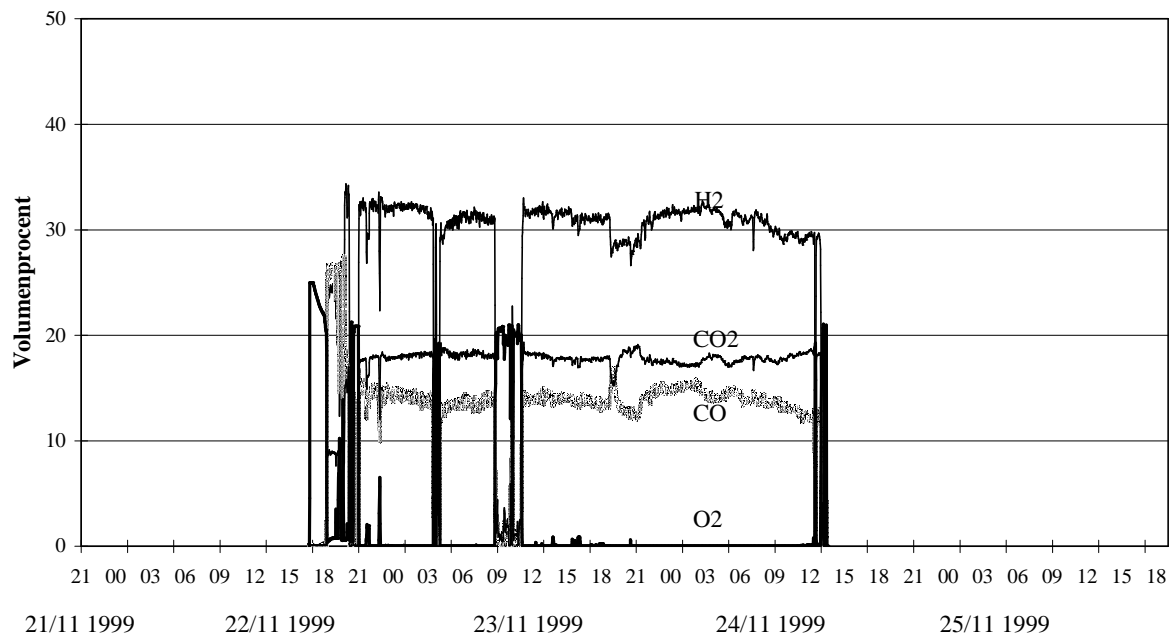


Figur 3.17 Gassammensætning målt med DTU's gasanalyse.

På figur 3.17 ses gassammensætningen under forsøget målt med DTU's gasanalyse. N<sub>2</sub> indholdet er beregnet som differens. Det ses, at gassammensætningen er væsentlig forskellig i de tre forløb:

- Tørt flis ingen vanddamptilsætning frem til den 22. kl. 19.
- Med vanddamptilsætning frem til den 24. omkring midnat.
- Hvirvelstrømsforgasning uden ekstern opvarmet pyrolyse den 25. om eftermiddagen.

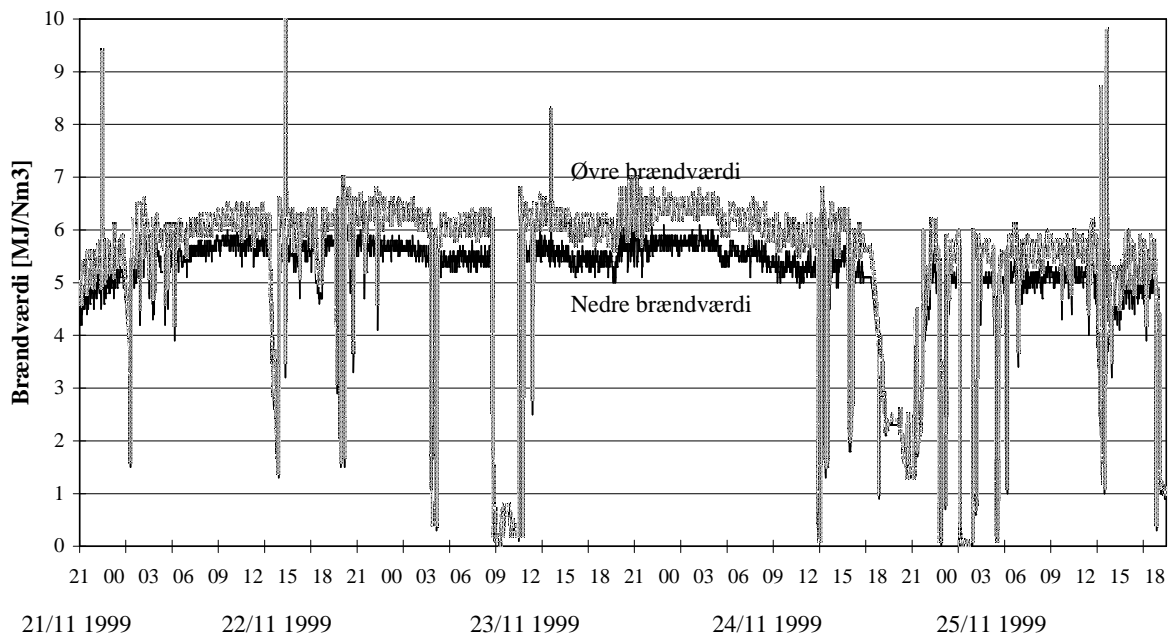
## Gassammensætning målt med TI's gasanalyse



Figur 3.18 Gassammensætning målt med TI's gasanalyse.

På figur 3.18 ses gassammensætningen under forsøget målt med TI's gasanalyse. Det ses, at TI's og DTU's gasanalyse stemmer meget fint overens men hensyn til  $H_2$  og  $CO$ , mens der er en systematisk forskel på et par procent på målingerne af  $CO_2$ .

## Brændværdier beregnet ud fra DTU's gasanalyse



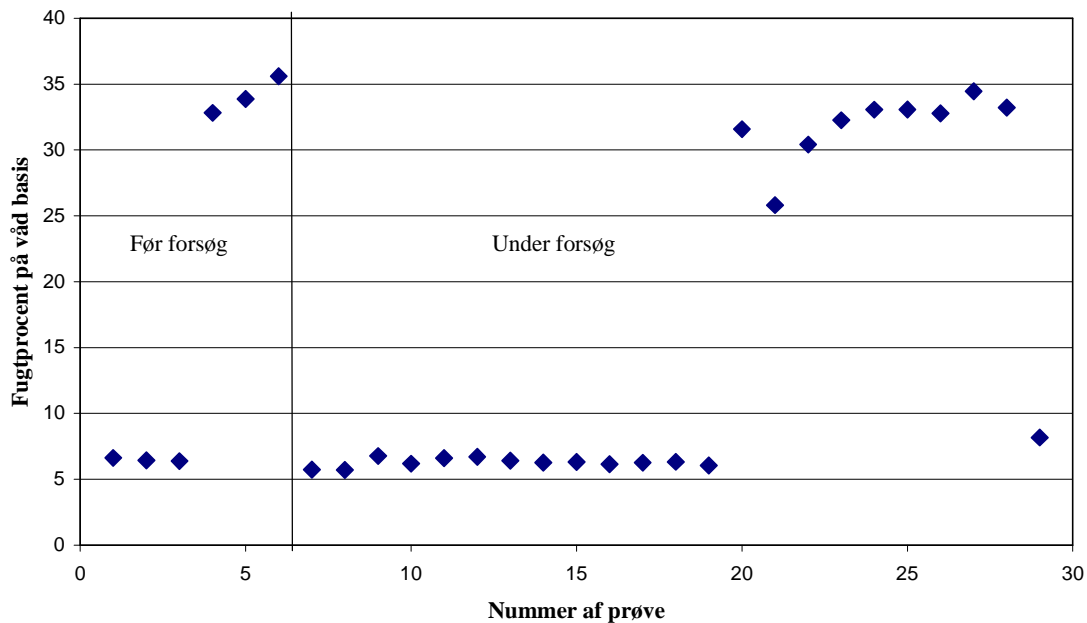
Figur 3.19 Brændværdi af gassen.

Det ses på figur 3.19, at brændværdien af gassen er ganske stabil igennem forsøget. Der ses ingen nævneværdig forskel på brændværdien ved tottrinsforgasning med og uden vandddamp-tilsætning, mens brændværdien ved hvirvelstrømsforgasning er lidt mindre.

### 3.3 Fugtmålinger af flisen

Ca. 7,2 m<sup>3</sup> af flisen blev fortørret forud for forsøget, ved at der blev blæst varm luft op gennem en perforeret bund i en container, hvori der var fyldt flis (L:4,4, B:1,95, H:0,85). Der blev forud for forsøget udtaget tre prøver af det tørrede flis og tre prøver af det ikke tørrede flis. I løbet af forsøget blev der ca. for hver fjerde time udtaget en prøve til bestemmelse af fugtigheden.

Fugt % under uge 47 forsøget, 1999



Figur 3.20 Fugtprocenten af flisen før og under forsøget. Målinger på våd basis.

Fugtprocenten af det utørrede og det tørrede flis blev forud for forsøget bestemt til henholdsvis 34,1% og 6,5% på våd basis. Af prøverne, der blev udtaget under forsøget, var gennemsnittet af fugtprocenten henholdsvis 31,9% og 6,4%.

Det ses på figur 3.20, at fugtigheden var ganske jævnt både i det utørrede, men i særdeleshed i det tørrede flis.

### 3.4 Partikelbalance for produktgassen

Ud fra vejning af de opsamlede partikler fra cyklonen, gasfiltrene og sikkerhedsfiltrene kan partikelbalancen for produktgassen opstilles.

Forsøget forløb over 97 fuldlasttimer, hvoraf der var 72,2 timer med gasrensning. Den gennemsnitlige gasproduktion var ca. 53 Nm<sup>3</sup>/time.

#### Cyklon:

Eftersom risten skulle aktiveres ofte for at holde tryktabet over koksbedden ned, blev der under dette forsøg revet meget koks over i cyklonen. Der blev i alt opsamlet ca. 20.3 kg kokspartikler, hvilket svarer til henholdsvis 209 gram/time (ca. 1% af den indfødte flismængde) eller 3,95 g/Nm<sup>3</sup>. Energitabet ved dette store partikeltab svarer til 1,9% af den indfødte energi.

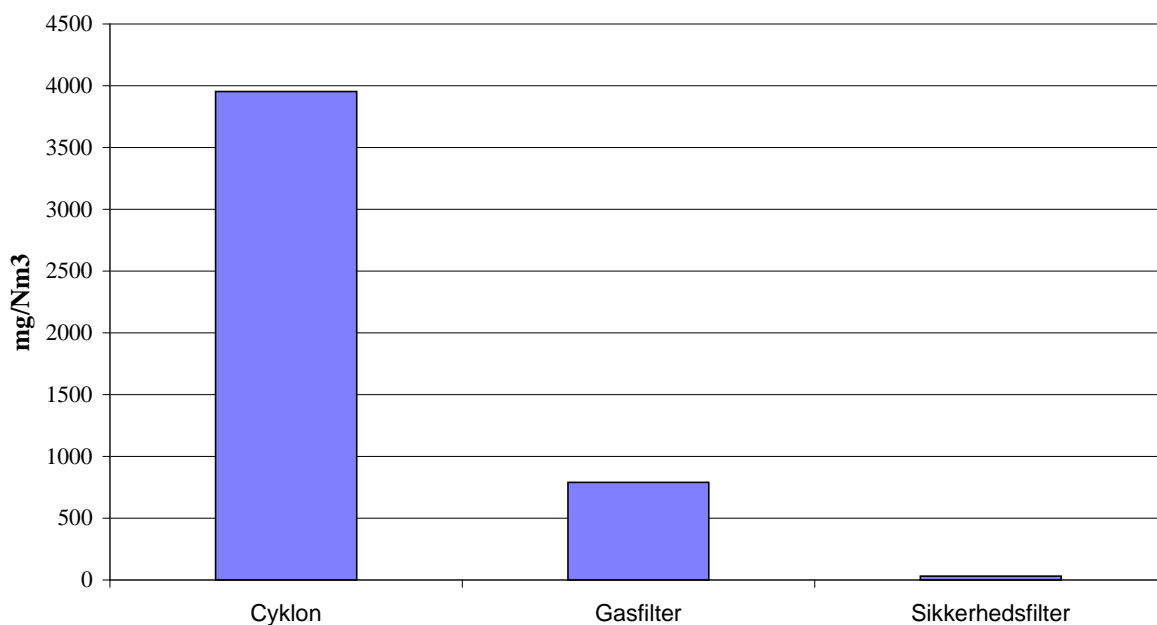
#### Partikelfilter:

Der blev udført 3 forsøg med posefiltre og 5 forsøg med patronfiltre. I alt blev der opfanget partikler i 70 timer. Der blev i alt opfanget 2949 gram svarende til 41,85 gram/time eller 790 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### Sikkerhedsfilter:

Der blev i alt opfanget 124 gram svarende til 1,72 gram/time eller 32 mg/Nm<sup>3</sup>.

#### Partikelbalance for produktgassen



Figur 3.21 Partikelbalance for produktgassen over hele forsøget.

På figur 3.21 ses partikelbalancen for produktgassen over hele forsøget. Det samlede partikeltab svarer ca. til 2% af den indfødte energi.

## Kapitel 4      Undersøgelser af kondensat

### 4.1 Baggrund

Ud fra tidligere undersøgelser af kondensat fra 100 kW forgasseren og fra Høgild forgasseren [Bentzen et. al 1999] kan det konkluderes, at kondensat fra medstrømsforgassere kan renses for eventuelle organiske forbindelser så det vil være miljømæssigt acceptabelt at lede til kloakken.

### 4.2 Formål

Formålet med kondensat undersøgelserne var:

- At opnå erfaringer med større skala on-line rensning af kondensat. Resultater fra undersøgelsen ville evt. kunne benyttes til at dimensionere aktivt kul filtre til medstrømsforgassere.
- At rense kondensatet løbende, så man med god samvittighed kunne aflede en del af det producerede kondensat til kloak under forsøget.

### 4.3 Forsøgsopstilling

Der blev indkøbt et aktivt kulfilter til akvariebrug.



Figur 4.1    Aktivt kulfilter set fra oven fyldt med aktivt kul fra 100 kW forgasseren.



Som aktivt kul blev der benyttet koks fra 100 kW forgasseren fra forsøget i januar 1998. Denne koks er blevet analyseret på NORIT's laboratorium, som konkluderede, at de adsorberende egenskaber fra denne koks er på højde med kommercielle aktive kul. [NORIT, 1998] Der blev fyldt 715 g koks i filteret, se figur 4.1.

Kondensatet blev igennem forsøget opsamlet i 25 l dunke, som blev sat sammen som forbundne kar, hvorved ca. 100 liter kondensat blev rensat samtidigt, se figur 4.2.



Figur 4.2 Aktivt kulfilter (til venstre) under drift. 4 dunke med kondensat renses i serie ved benyttelse af hævertprincippet.

Fem prøver blev efter forsøget sendt til analyse:

**Prøve 1: Urenset kondensat fra forgasning med vanddamptilsætning.**

Prøve af urensset kondensat aftappet før motor.

**Prøve 2: Renset kondensat fra forgasning med vanddamptilsætning.**

Samtidig rensning af fem dunke: tre dunke fra køler 2 (kold køler), en dunk fra kondensat aftapning ved sikkerhedsfilteret og en dunk fra kondensat aftapning efter før motor). Renset med aktivt kul d. 25. november mellem 12.00-16.00.

**Prøve 3: Urenset kondensat fra forgasning uden vanddamptilsætning.**

Der produceres ganske lidt kondensat ved forgasning uden vanddamptilsætning. Samlet var der opsamlet 23 liter fra kold køler fra d. 21-d.22 kl. 19. Denne prøve var fortyndet af det vand, der var i vandlåsen forud for forsøget. Prøven fra forgasning uden vanddamptilsætning var således omtrent fortyndet i forholdet 2 kondensat : 1 postevand.

**Prøve 4: Renset kondensat fra forgasning uden vanddamptilsætning.**

Ved forgasning uden vanddamptilsætning er dugpunktet i rågassen lavere end med vanddamptilsætning, så der var ikke nok vandprøve til at køre kulfilteret. Til Den urensede prøve blev der tilsat 8 liter rent vand for at aktivt kulfilteret kunne køre.

**Prøve 5: Urenset kondensat fra forgasning efter hvirvelstrømsprincippet.**

Prøve 5 blev udtaget fra vandlåsen efter forsøget. Denne kondensatprøve vil være en blanding af kondensat fra vanddampforgasning med pyrolyse af flis og af kondensat fra forgasning efter hvirvelstrømsprincippet.

## 4.4 Resultater

Prøverne blev analyseret af Elfin Larsen Risø.

Alle prøver var klare og farveløse.

Der blev ikke fundet methanol eller eddikesyre.

*Tabel 4.1. Kondensatprøver fra DTU's 100 kW forgasser uge 47, 1999.*

Prøve	1	2	3	4	5
	Urenset (med vanddamptilsætning)	Renset (med vanddamptilsætning)	Urenset (uden vanddamptilsætning)	Renset (uden vanddamptilsætning)	Urenset (Hvirvelstrøm)
Lugt	NH3	NH3	NH3	NH3	NH3 Motoragtig
pH	8,41	8,49	8,73	8,93	8,73
NVOC, mg C/l	4,3	9,4	30,2	11,1	36,9
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Phenol	- *)	- *)	- *)	- *)	3,9
Guaiacol	- *)	- *)	- *)	- *)	0,003
Benzen	0,29	0,04	0,04	0,03	1,07
Naphthalen	0,015	0,014	0,037	0,013	1,13
Phenanthren	0,004	- *)	0,03	- *)	0,002
Pyren	0,001	- *)	0,011	- *)	- *)

\*) max. 0,005 mg/L

## 4.5 Konklusion

Det ses af tabel 4.1, at alle kondensatprøverne har meget lave indhold af organiske komponenter.

Det ses, at prøverne fra forgasning med og uden vanddamptilsætning er sammenlignelige (1 og 3), og at indholdet af PAH forbindelserne (Benzen, Naphthalen, Phenanthren, Pyren) reduceres til ensartet niveau og meget lavt niveau ved aktiv kulbehandling (2 og 4).

Prøven fra hvirvelstrømsforsøget har noget højere værdier, dog fortsat meget lave i forhold til øvrige forgasningskoncepter [Bentzen et. al 1999].

## Kapitel 5 Målinger af tryktab over koksbedden

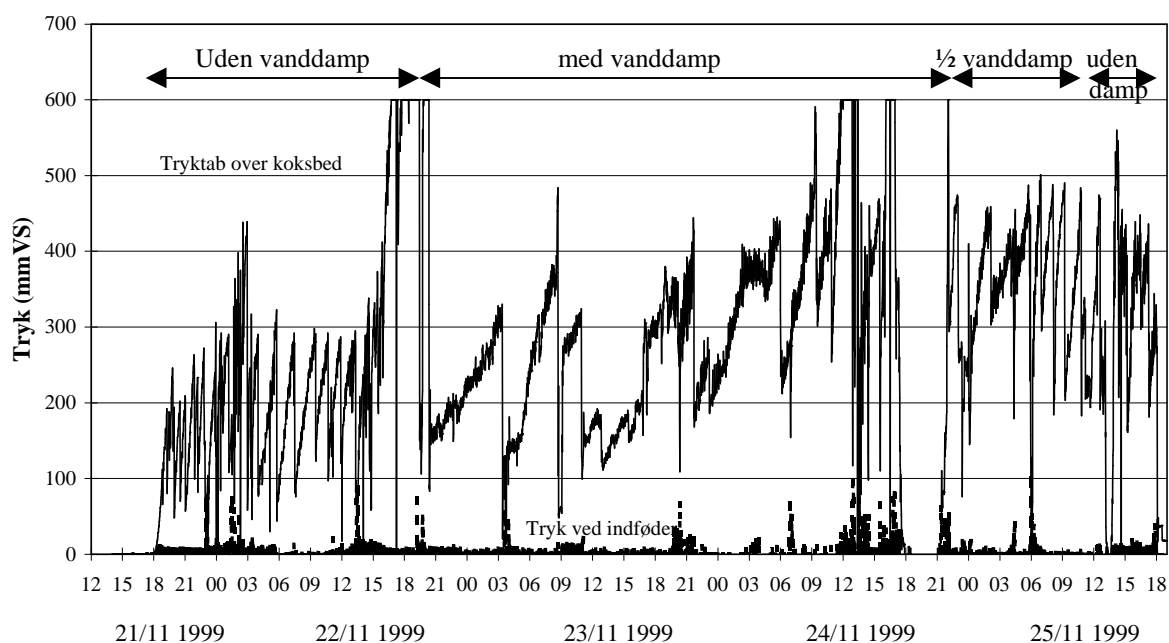
I dette arbejdsnotat præsenteres de målinger af tryktab over koksbedden, der blev foretaget under forsøget. I første afsnit præsenteres målinger af tryktabet over hele koksbedden, mens der i andet afsnit præsenteres målinger af tryktabet målt ned gennem koksbedden.

### 5.1 Tryktab over hele koksbedden

Dette forsøg adskilte sig fra tidligere forsøg ved, at tryktabet over koksbedden hurtigt blev så stort, at risten måtte aktiveres; og at risten løbende gennem forsøget skulle aktiveres, for at tryktabet kunne holdes tilpas lavt.

På de følgende figurer ses tryktabet over hele koksbedden: først over hele forsøget og derefter for de enkelte dage. Trykmåleren var forud for forsøget indstillet til et maksimalt tryktab på 600 mmVS, og tryktab herover blev derfor vist som værende på 600 mmVS.

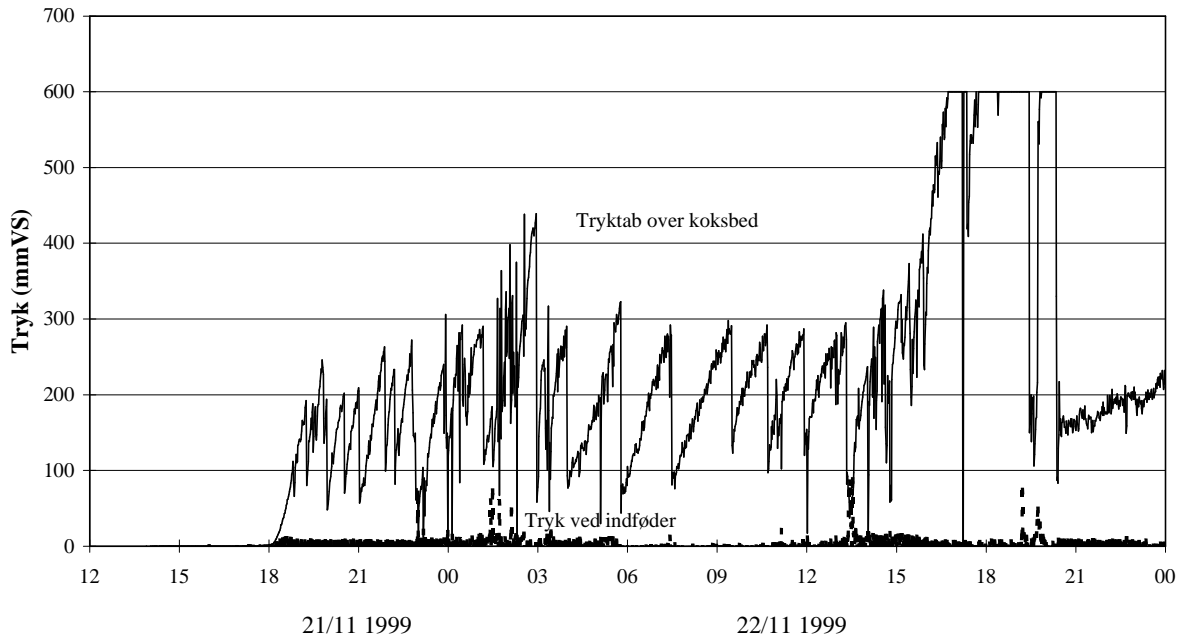
Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed



Figur 5.1 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed over hele forsøget.

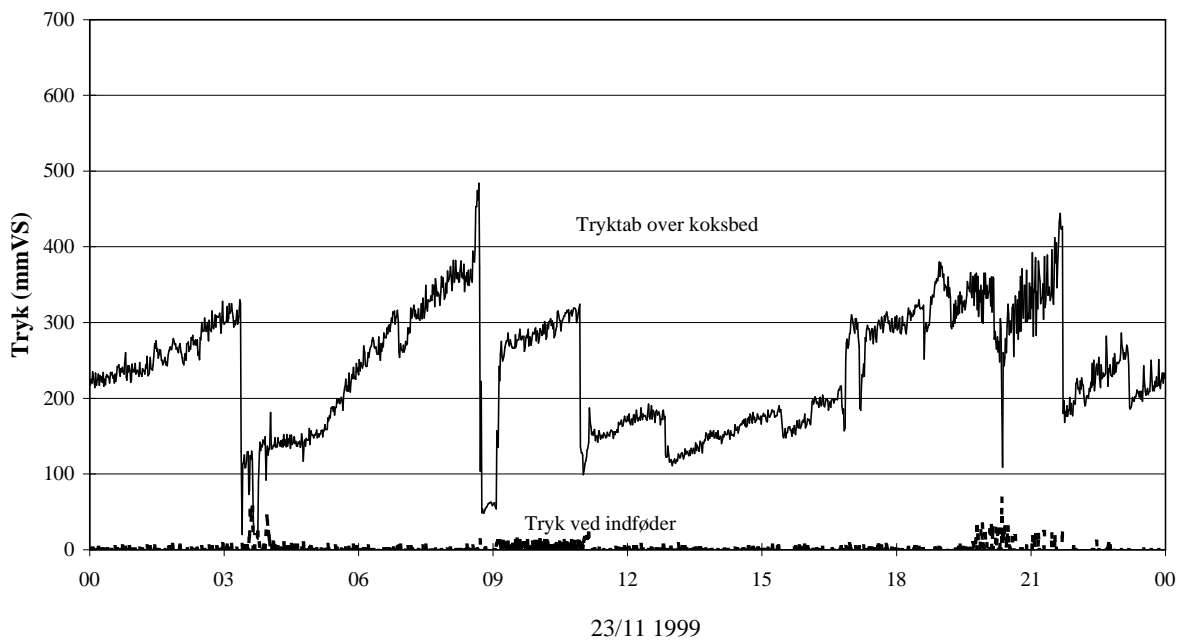
Det ses på figur 5.1, at trykket hurtigt steg, hver gang det var blevet reduceret ved ristaktivering. Det ses at trykstigningen var langsommere i den periode, hvor der var vanddamptilsætning (22/11 kl. 19 – 24/11 kl. 24), hvilket kan relateres til, at sodproduktionen fra den partielle oxidation af flygtige gasser over koksbedden er lavere ved vanddamptilsætning [Hansen, 2000].

### Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed



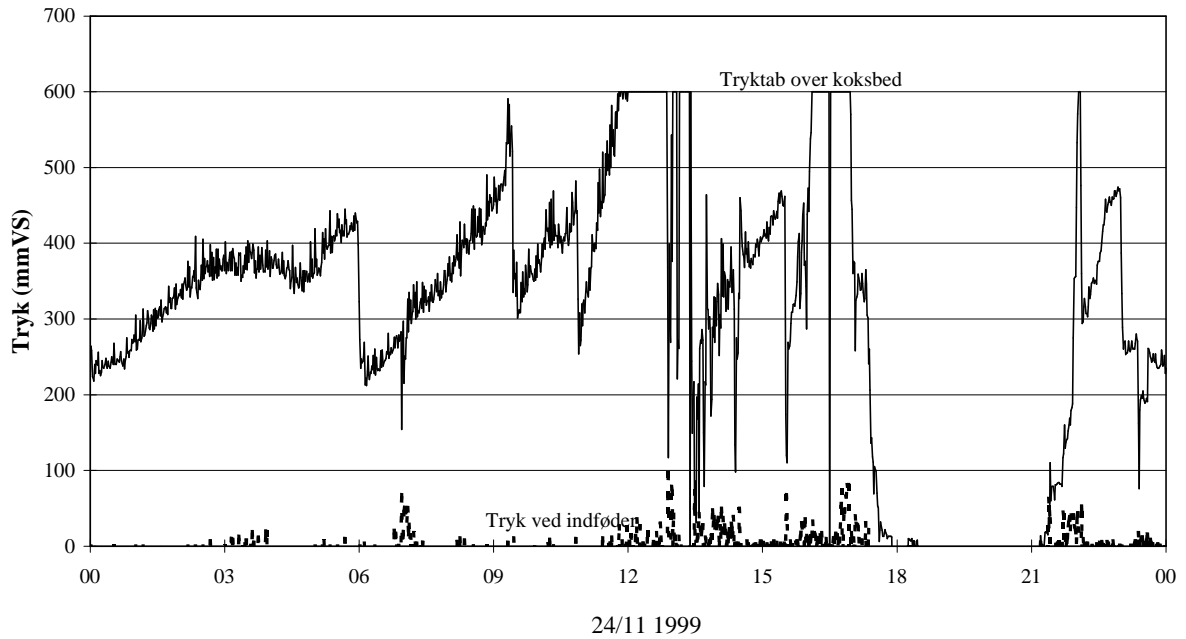
Figur 5.2 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed under opstart samt den første forsøgsdag.

### Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed



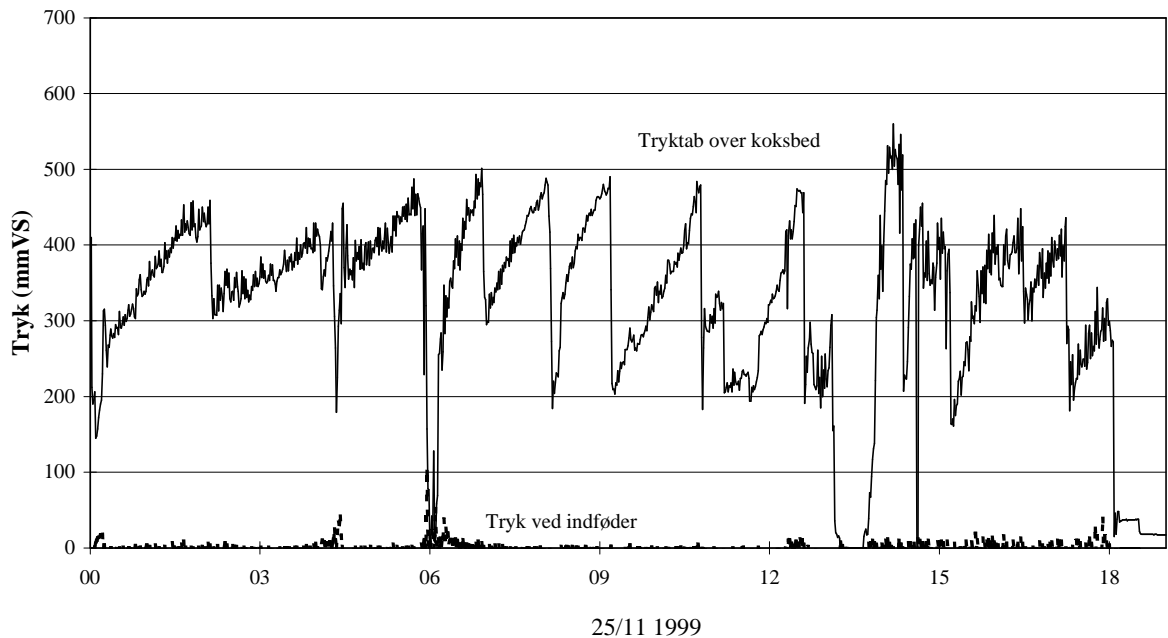
Figur 5.3 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed den 23. november 1999.

### Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed



Figur 5.4 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed den 24. november 1999.

### Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed

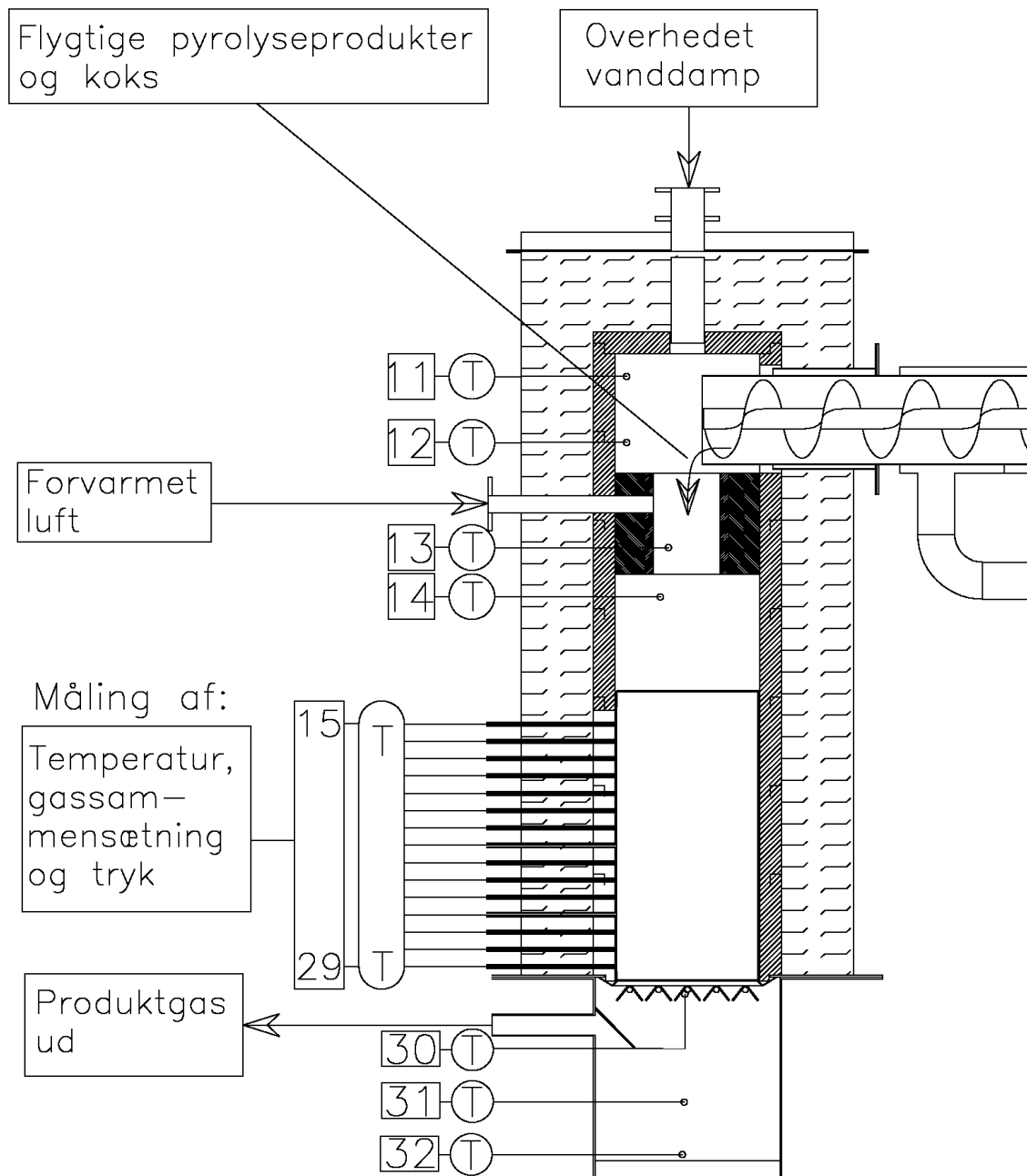


Figur 5.5 Tryk ved indfødning og tryktab over koksbed den sidste forsøgsdag d. 25. november 1999.

På figur 5.2-5.5 ses trykket over koksbedden og ved indfødningen for de enkelte forsøgsdage. Det ses, at trykket var hurtigt stigende, og at risten blev aktiveret ca. en gang i timen.

## 5.2 Tryktabet ned gennem koksbedden

På de følgende kurver ses tryktabet ned gennem koksbedden målt gennem de termofølerporte, der blev sat i forgasseren i forbindelse med ombygningen i 1998, se figur 5.6.



Figur 5.6 Snittegning af 100 kW forgasningsreaktor efter ombygningen i 1998 med højtemperatur metalforing, målesonder, bedre isolering ved lufttilsætning og bedre opblanding mellem luft og flygtige pyrolyseprodukter.

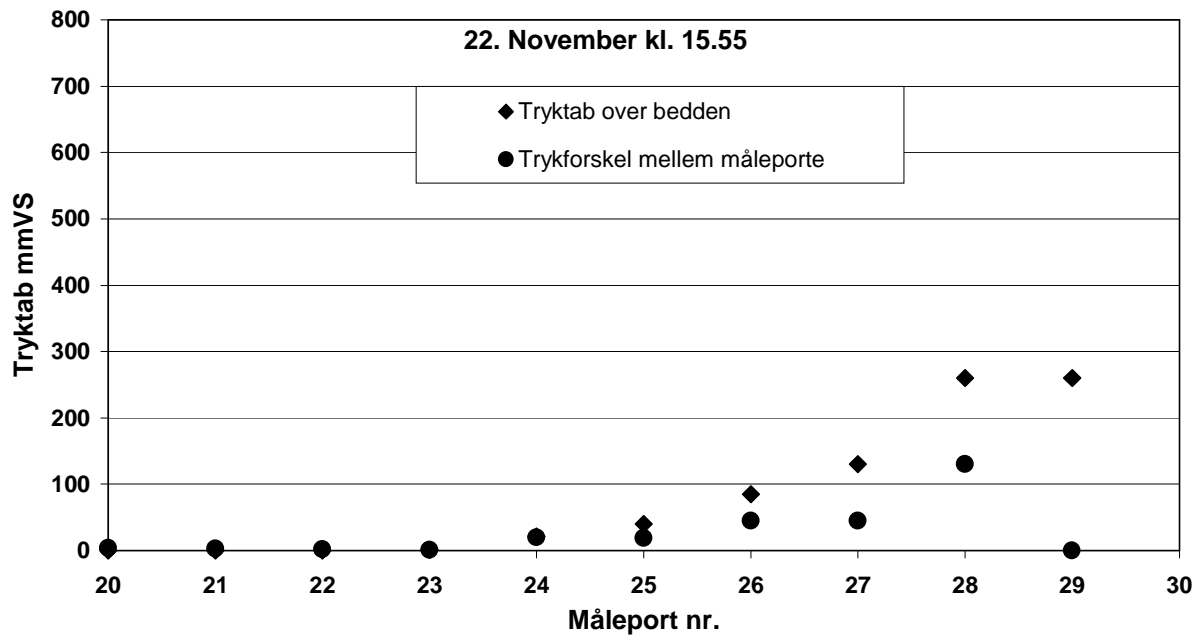
På figur 5.6 er de nye måleporte 15-29 skitserede. Igennem disse porte blev trykket i siden af koksbedden under forsøget målt. Målingerne blev hovedsageligt målt med trykket i toppen

(port 15) som reference, men enkelte målinger blev udført som differencemålinger mellem de på hinanden følgende porte.

På de følgende figurer viser firkanterne det totale tryktab mellem den aktuelle port og fribordet over koksbedden målt i port 15.

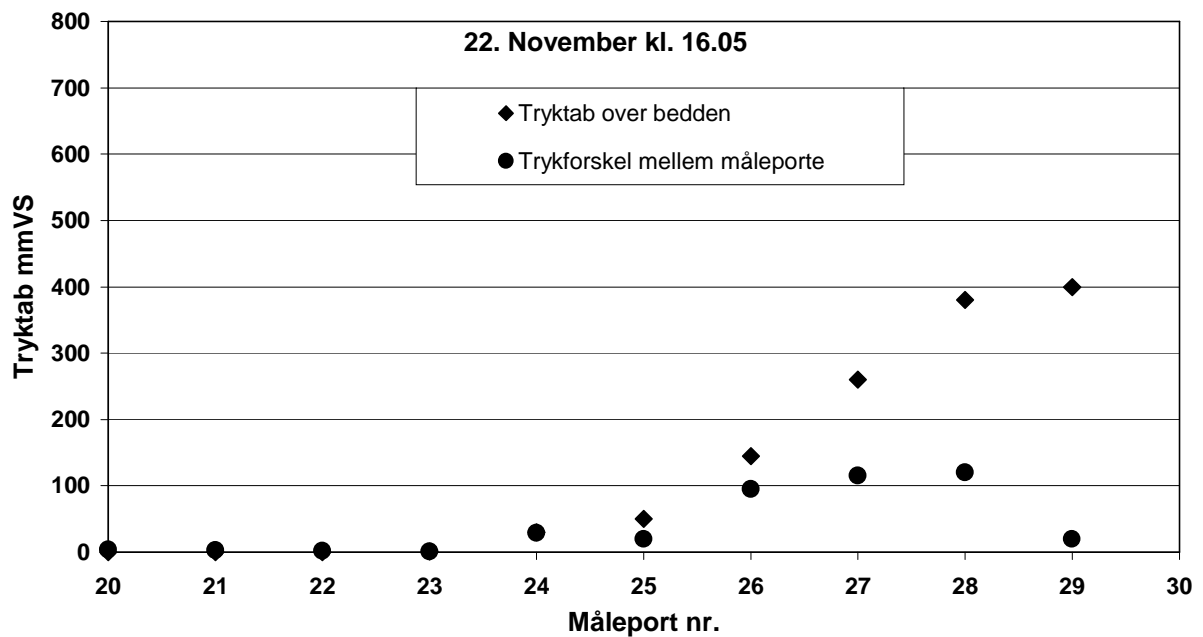
De runde mærker viser tryktabet mellem den aktuelle port og den foregående port.

### Tryktab over bed og mellem måleporte



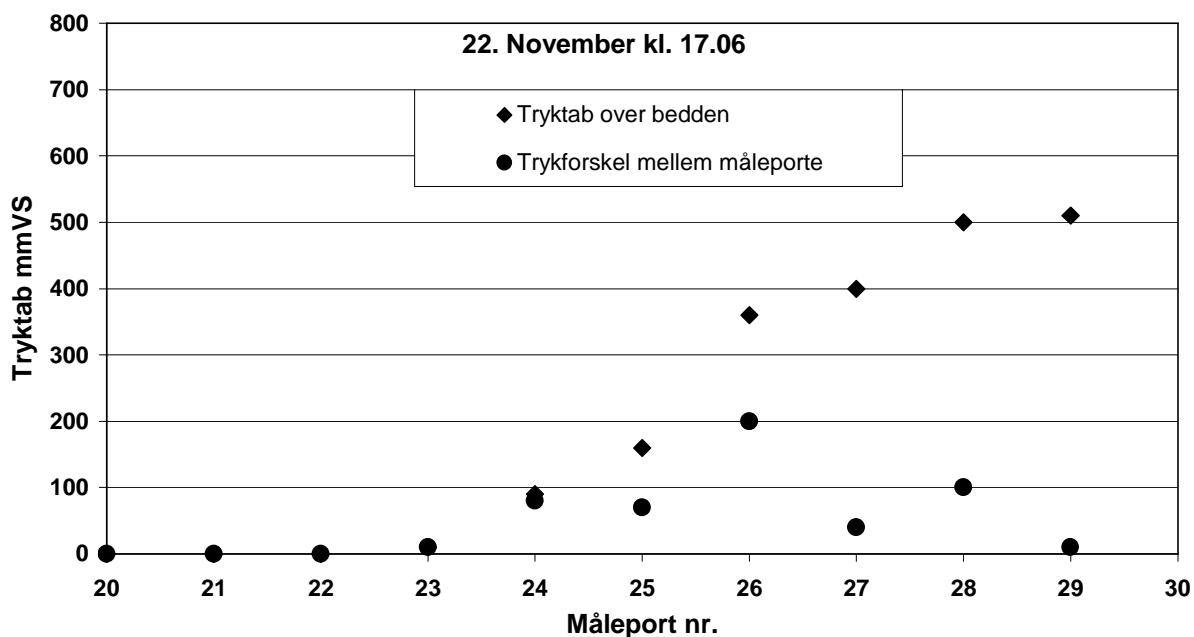
Figur 5.7 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 22. november kl. 15.55.

### Tryktab over bed og mellem måleporte



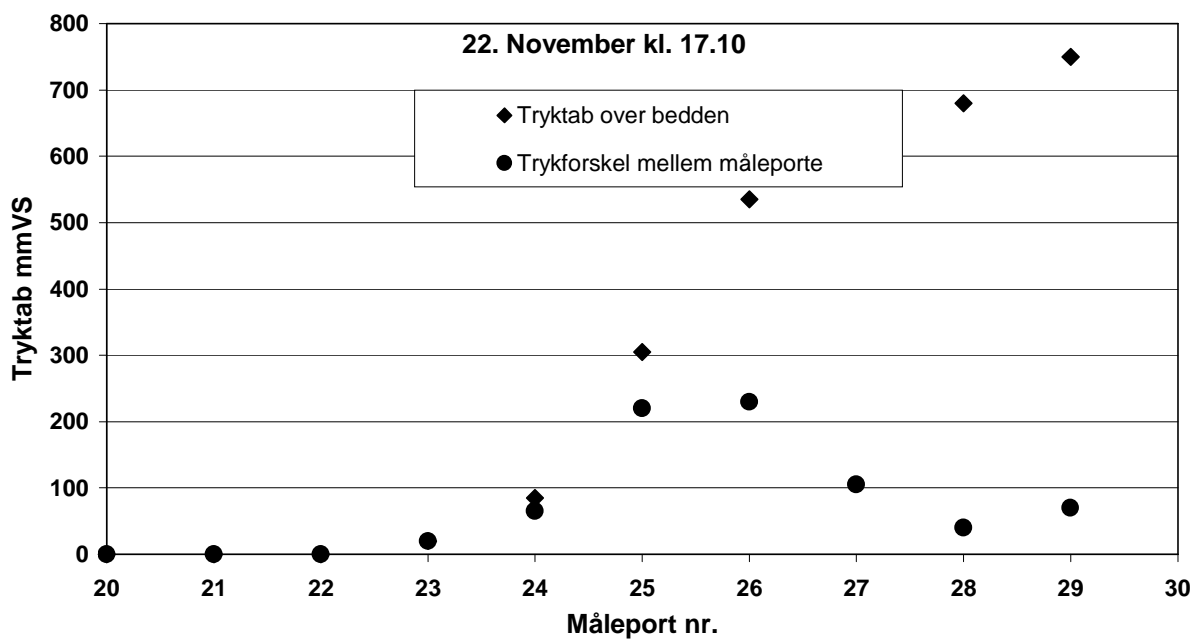
Figur 5.8 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 22. november kl. 16.05.

### Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.9 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 22. november kl. 17.06.

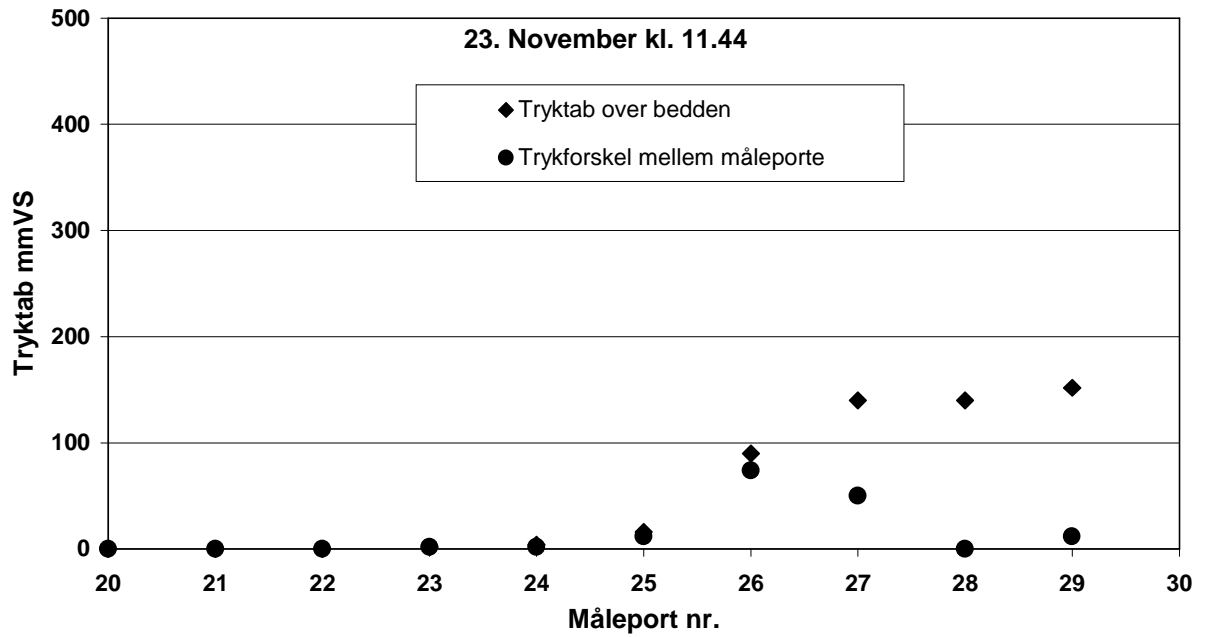
### Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.10 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 22. november kl. 17.10.

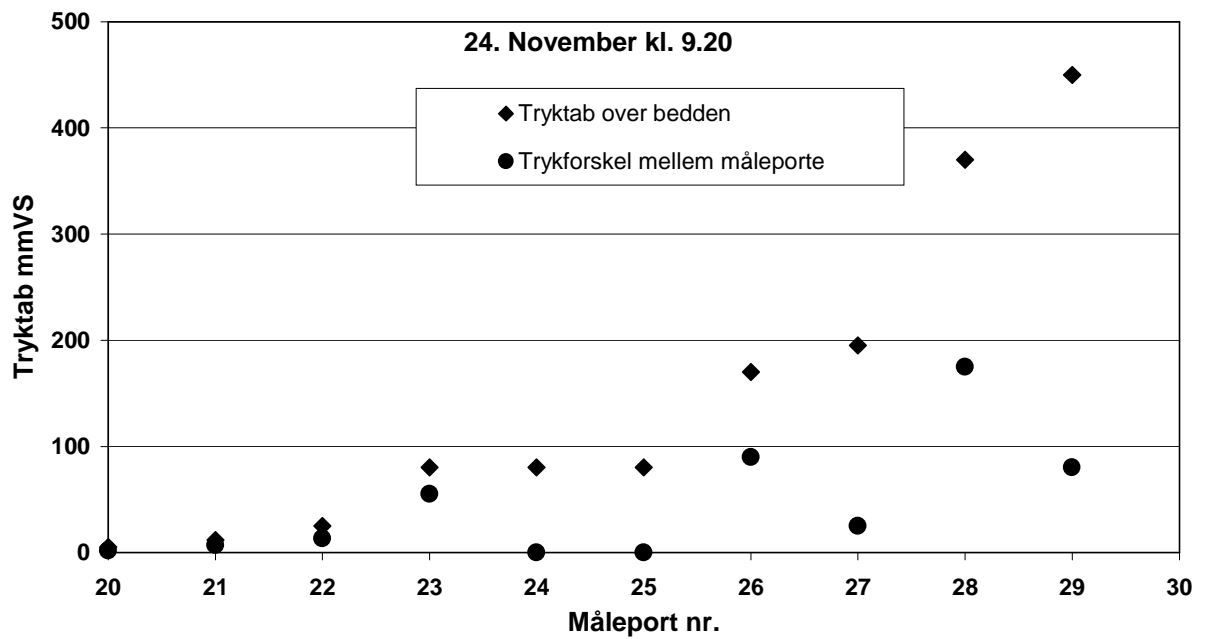


Tryktab over bed og mellem måleporte



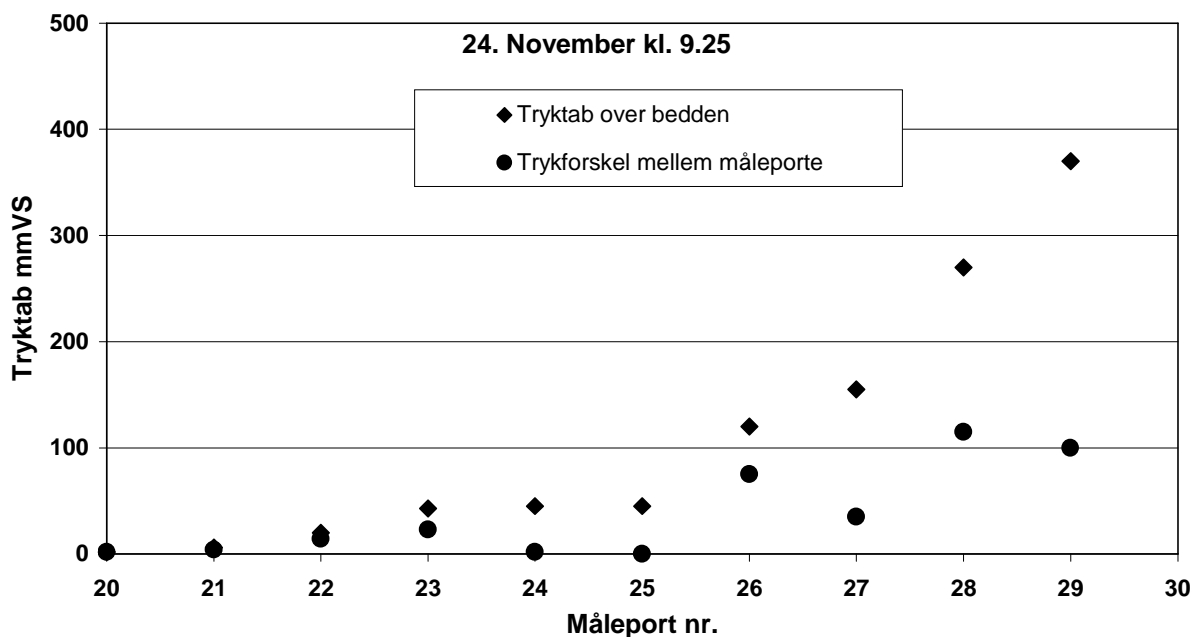
Figur 5.11 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 23. november kl. 11.44.

Tryktab over bed og mellem måleporte



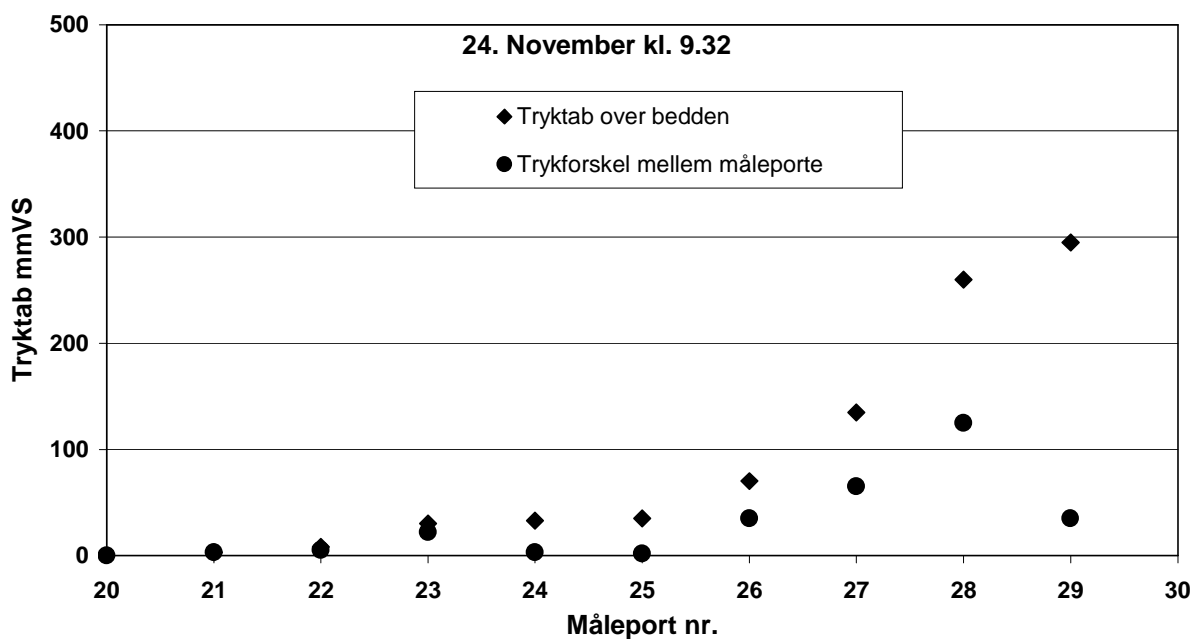
Figur 5.12 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 24. november kl. 9.20.

### Tryktab over bed og mellem måleporte



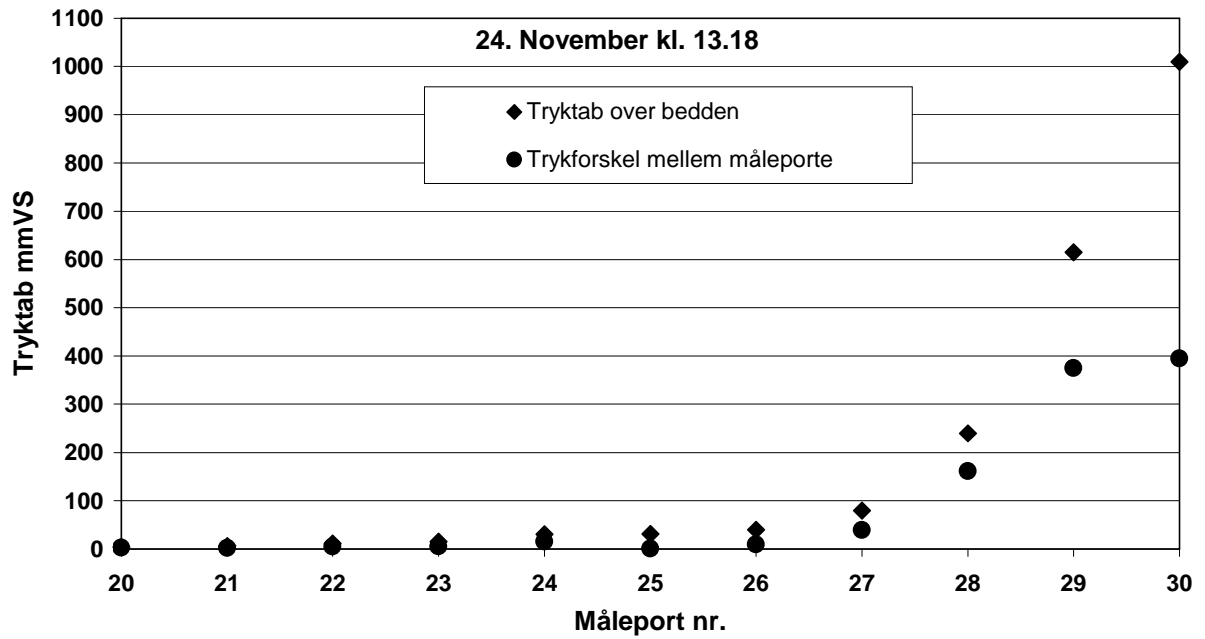
Figur 5.13 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 24. november kl. 9.25.

### Tryktab over bed og mellem måleporte



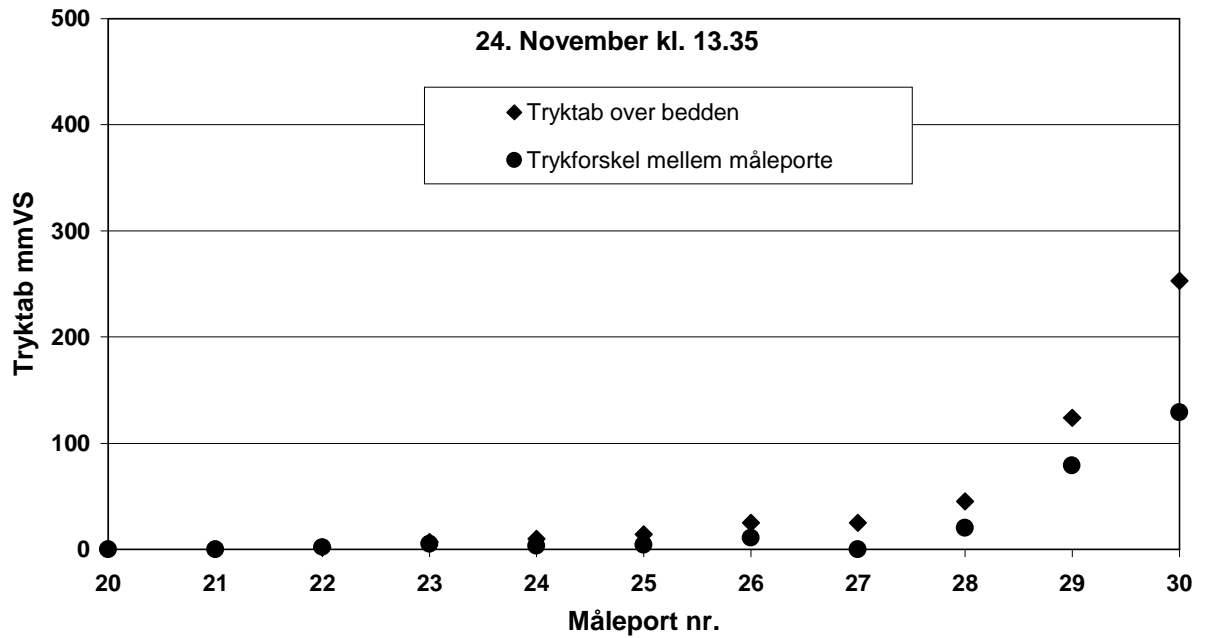
Figur 5.14 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 24. november kl. 9.32.

Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.15 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 24. november kl. 13.18.

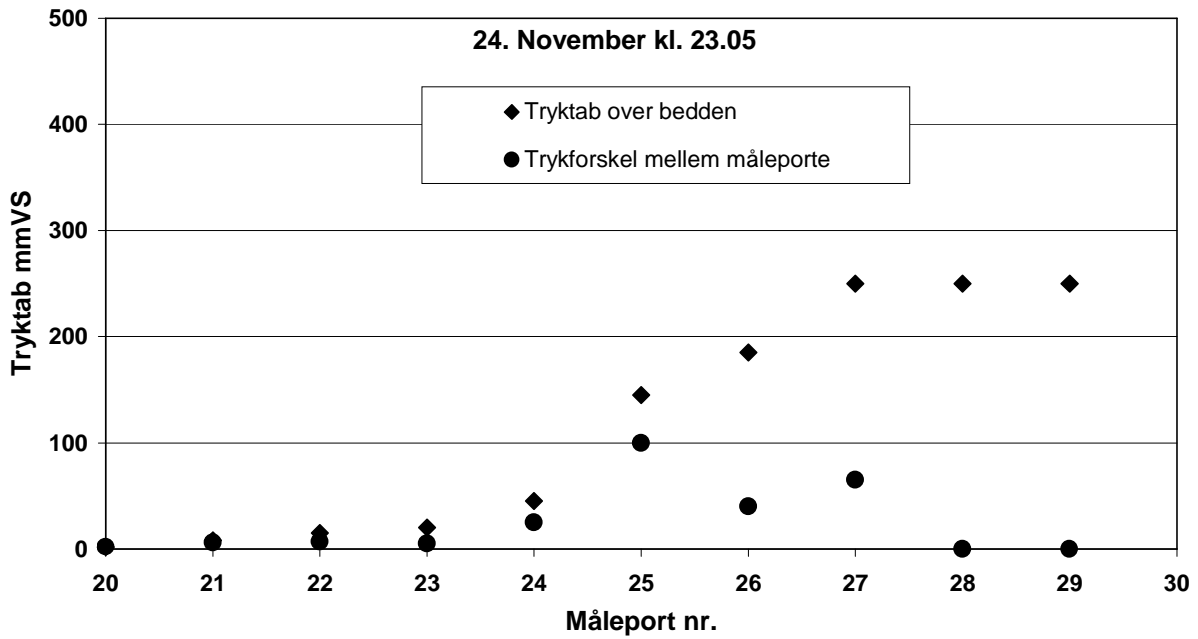
Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.16 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 24. november kl. 13.35

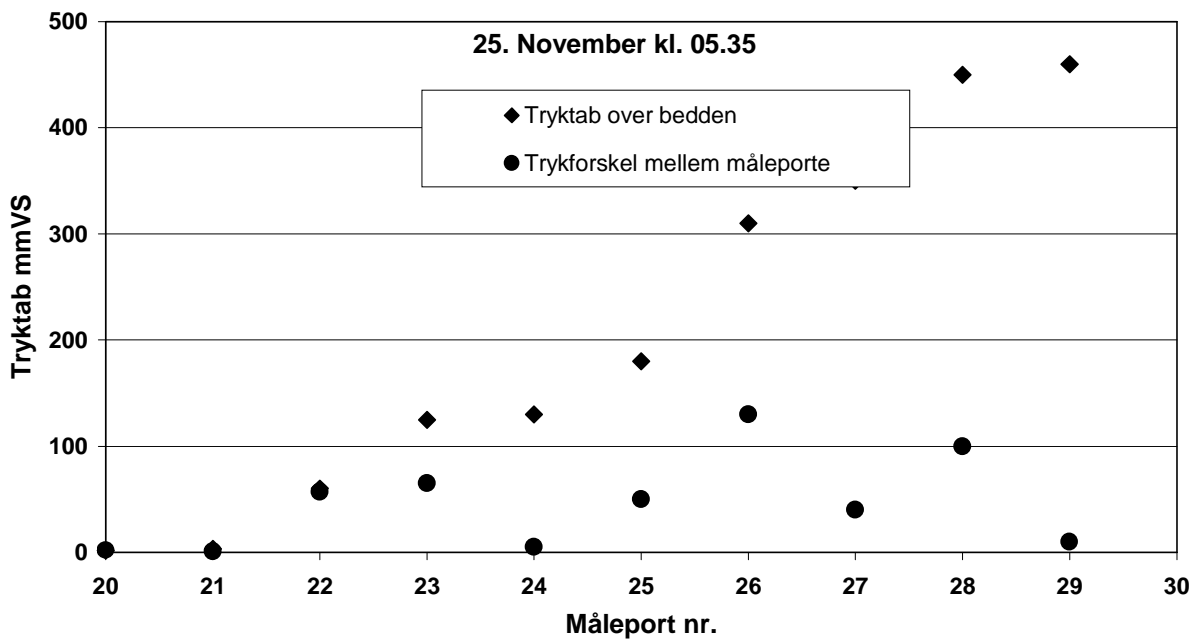
Risten er blevet aktiveret imellem målingerne, der er vist på figur 5.15 og 5.16.

Tryktab over bed og mellem måleporte



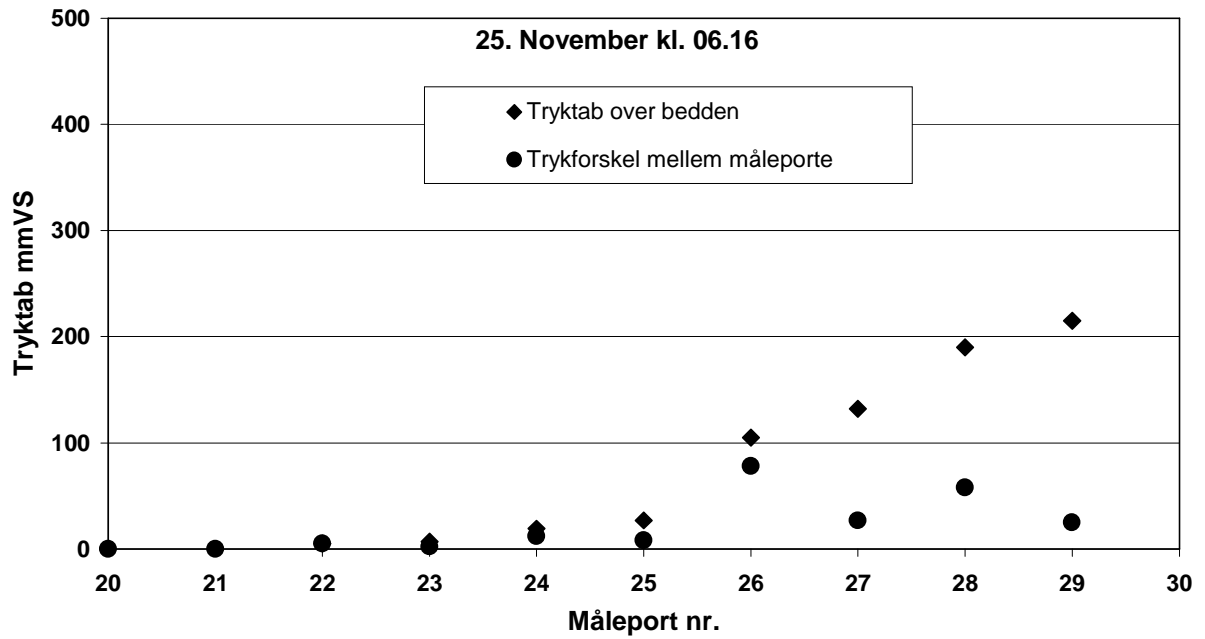
Figur 5.17 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 24. november kl. 23.05.

Tryktab over bed og mellem måleporte



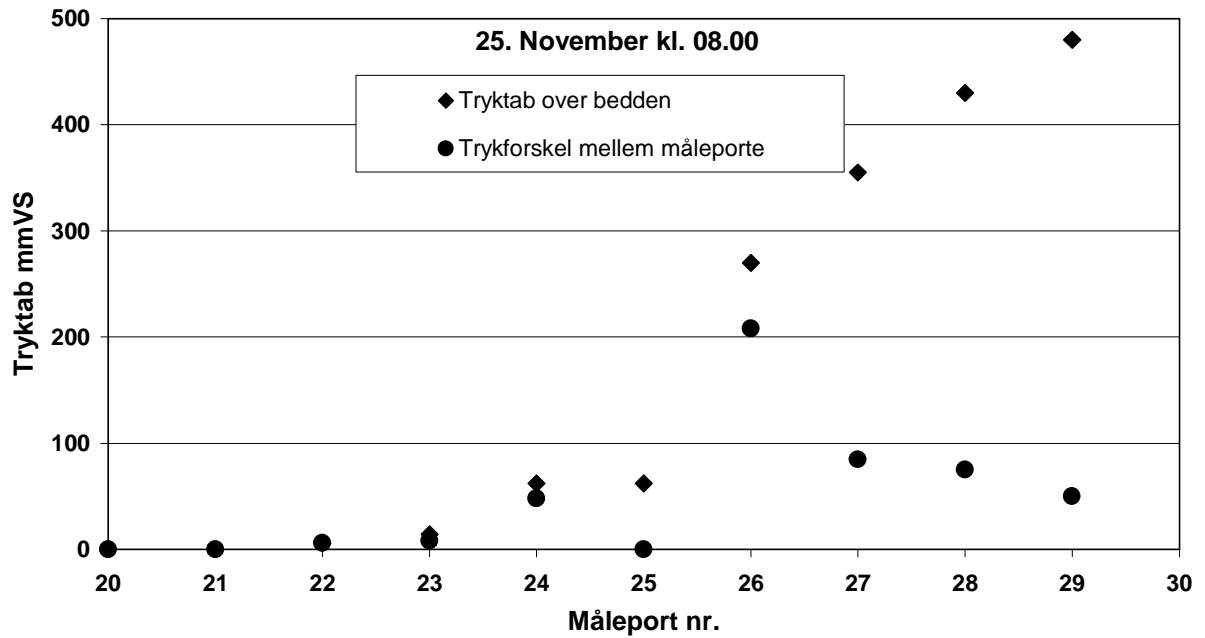
Figur 5.18 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl. 5.35.

Tryktab over bed og mellem måleporte



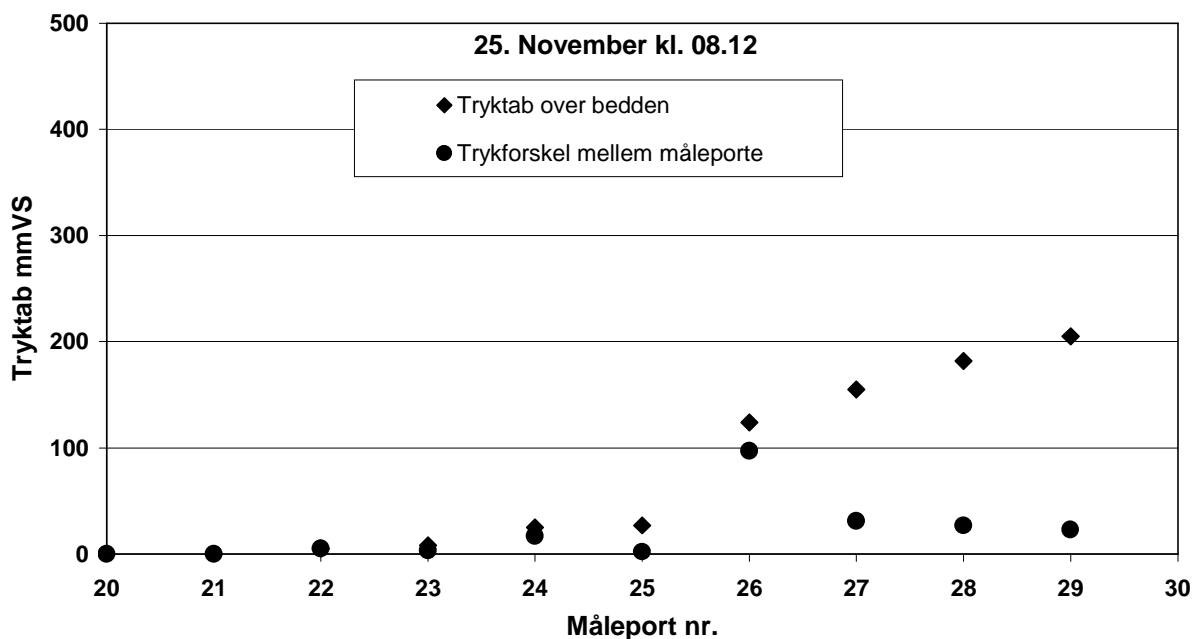
Figur 5.19 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl. 6.16.

Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.20 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl. 8.00.

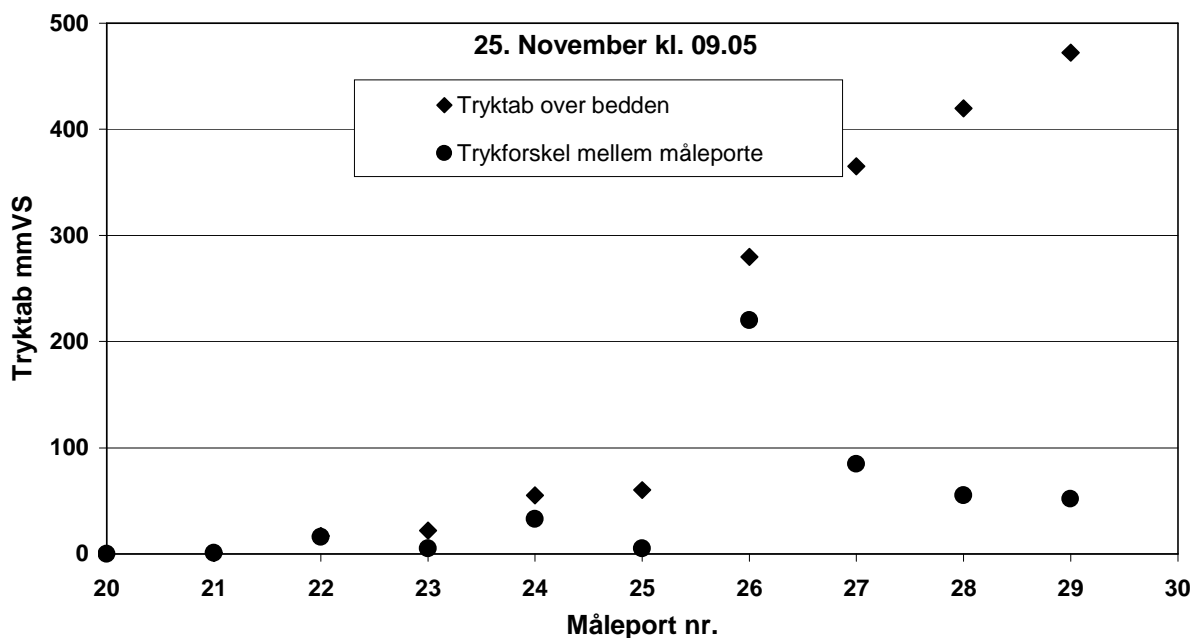
### Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.21 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl. 8.12.

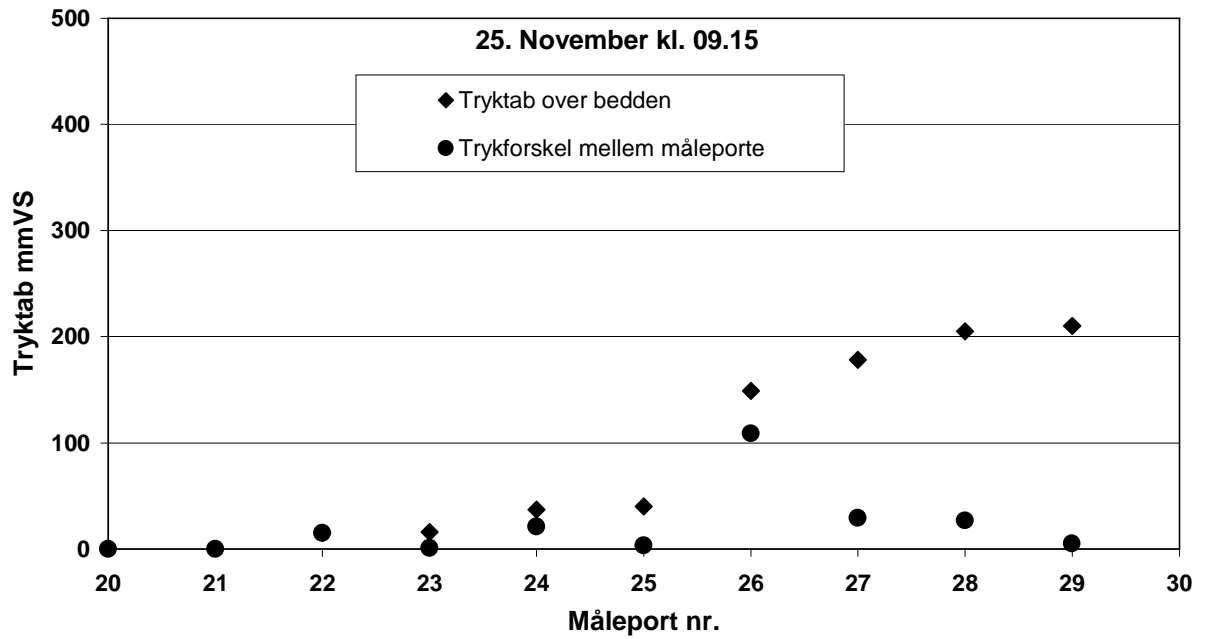
Risten er blevet aktiveret imellem målingerne, der er vist på figur 5.20 og 5.21.

### Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.22 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl. 9.05.

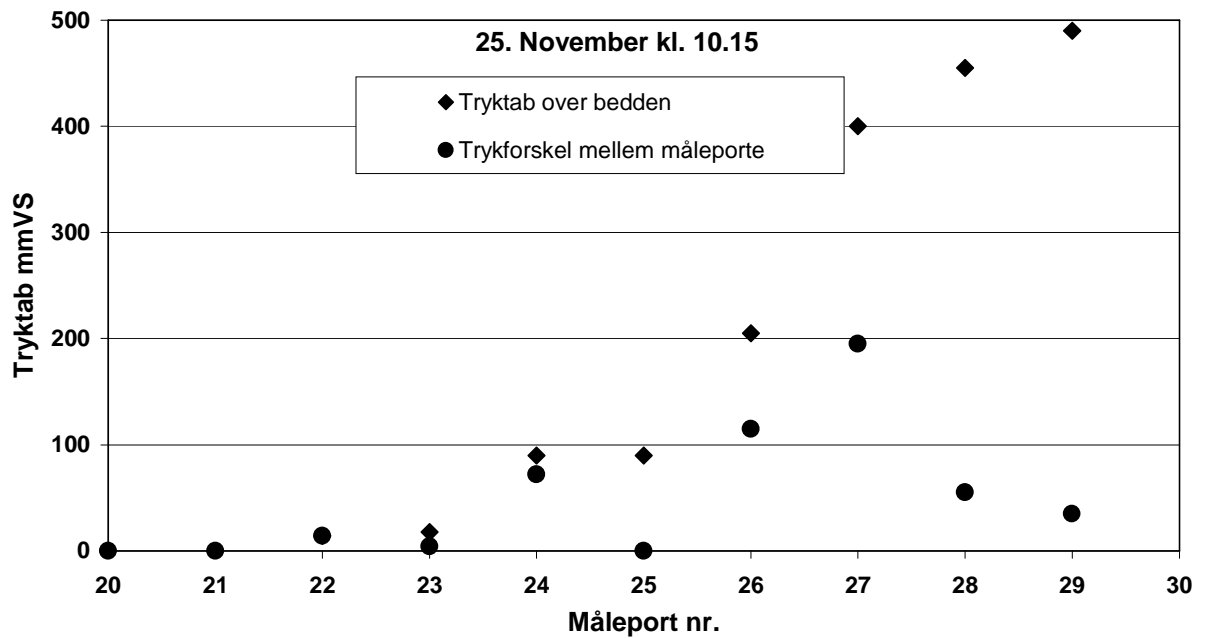
Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.23 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl.9.15.

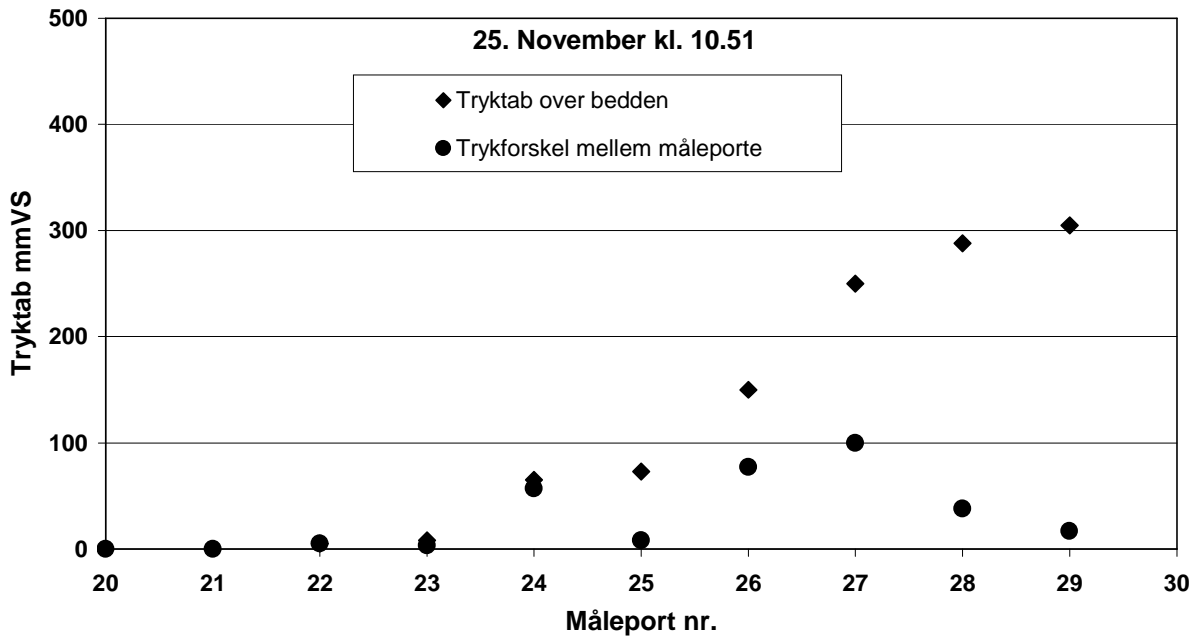
Risten er blevet aktiveret imellem målingerne, der er vist på figur 5.22 og 5.23.

Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.24 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl. 10.15.

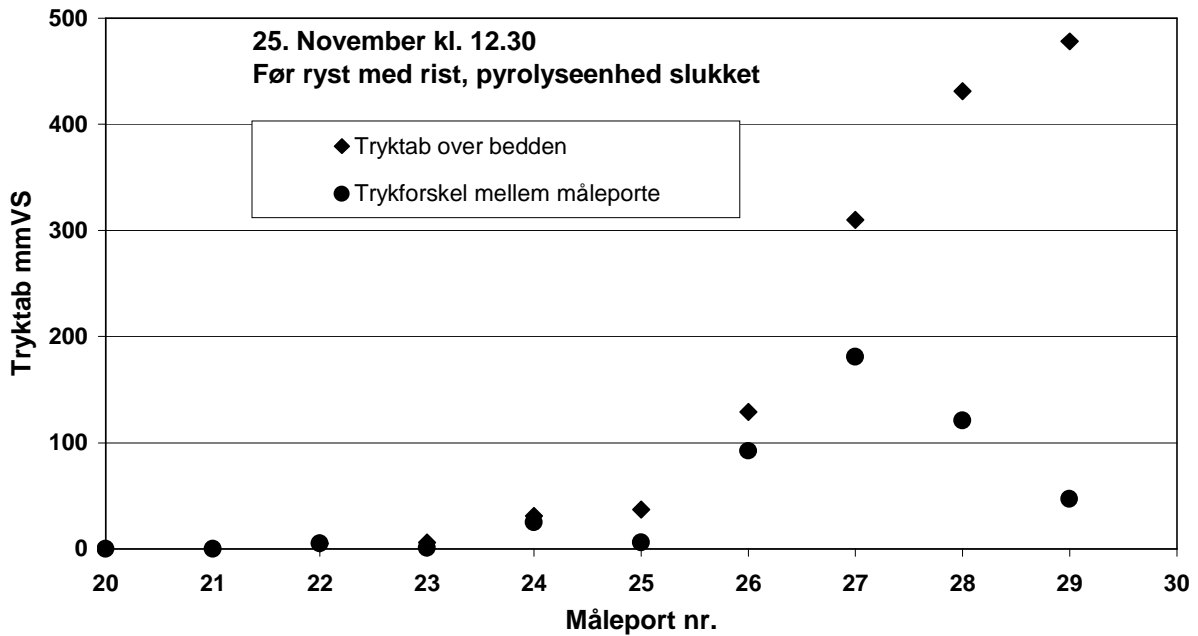
### Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.25 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl.10.51.

Risten er blevet aktiveret imellem målingerne, der er vist på figur 5.24 og 5.25.

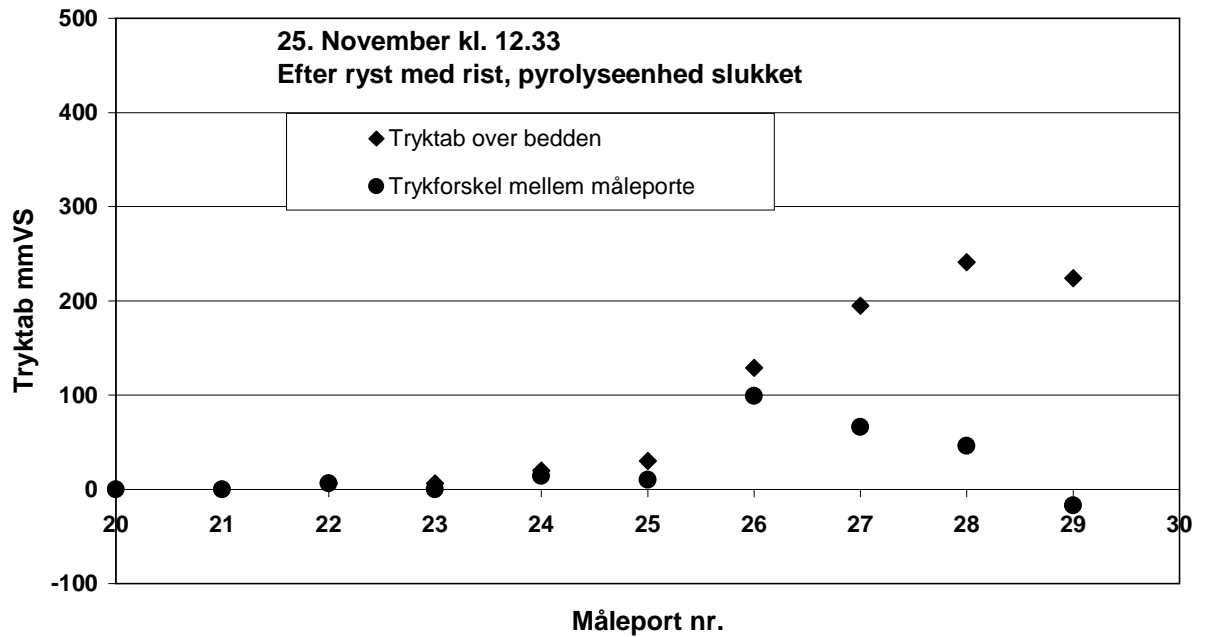
### Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.26 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl.12.30.



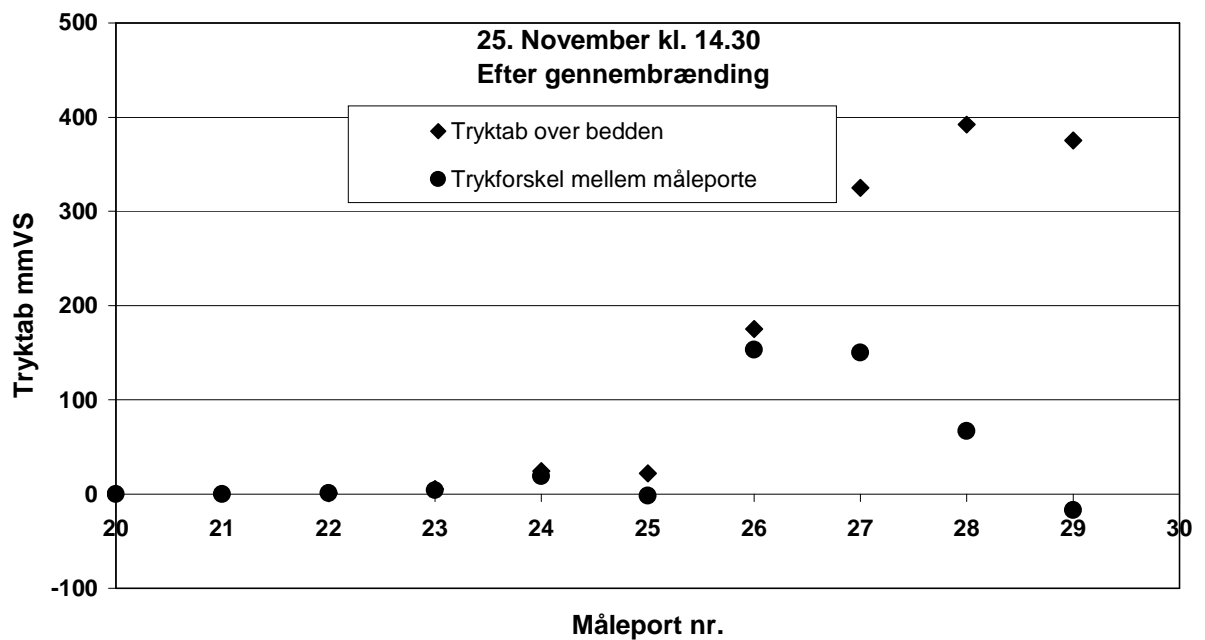
Tryktab over bed og mellem måleporte



Figur 5.27 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl.12.33.

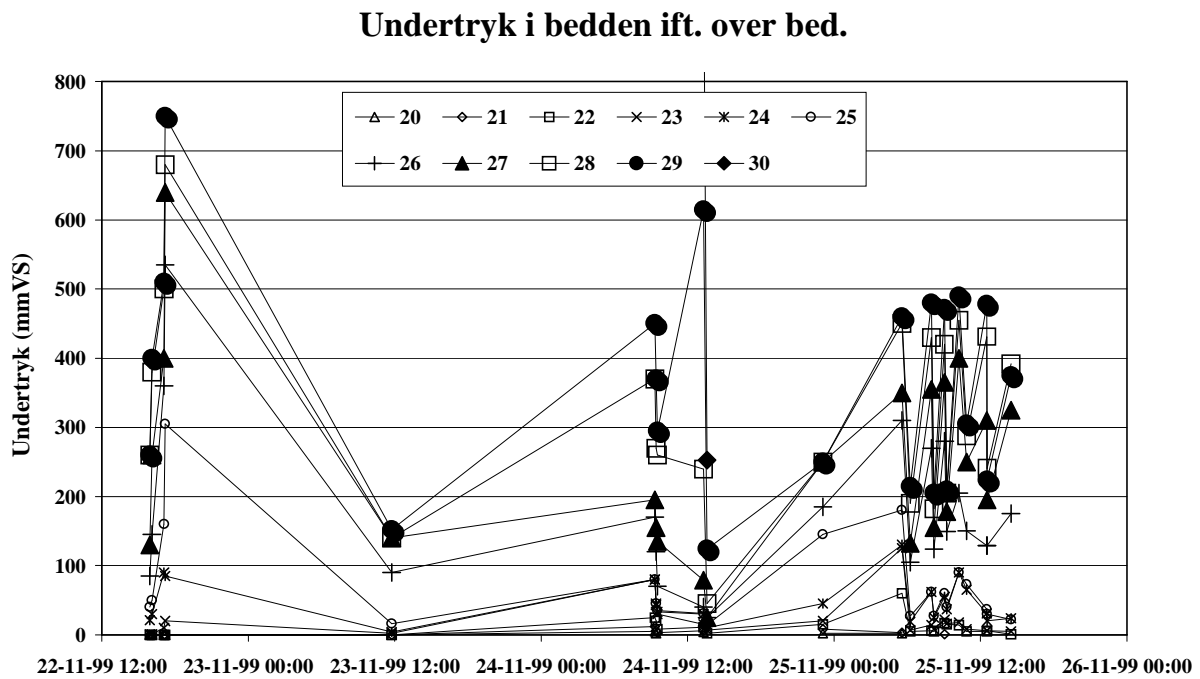
Risten er blevet aktiveret imellem målingerne, der er vist på figur 5.26 og 5.27, og målingerne er taget i perioden med pyrolyseenheden slukket (hvirvelstrømsforgasning).

Tryktab over bed og mellem måleporte

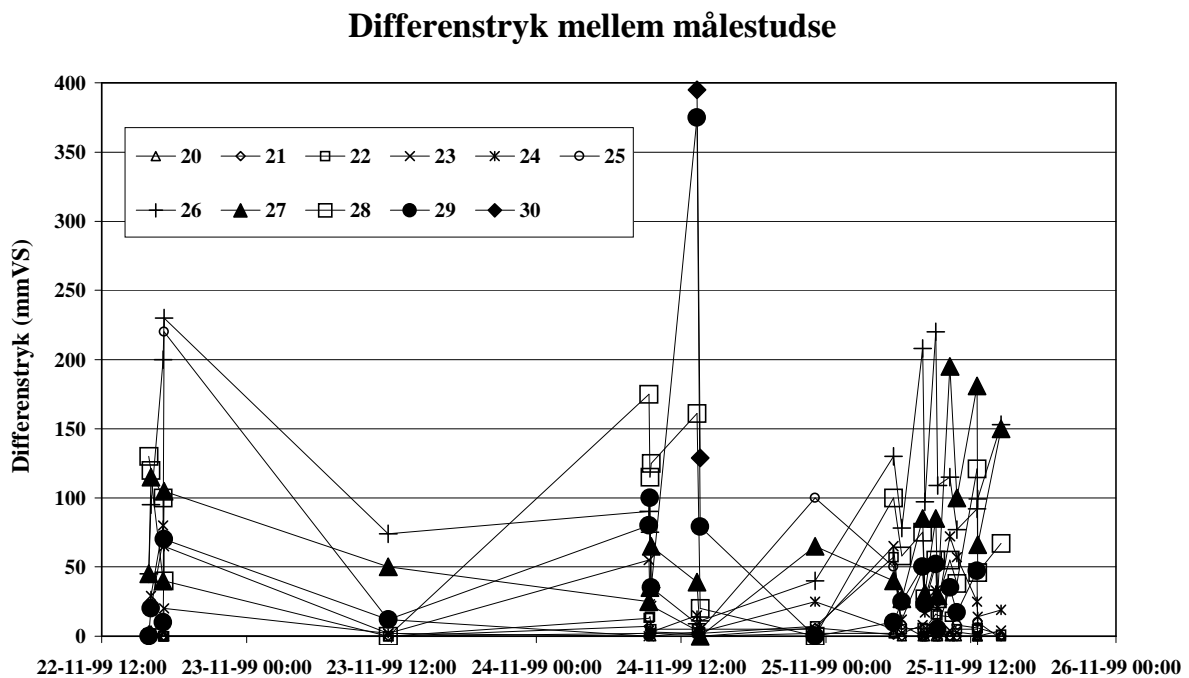


Figur5.28 Tryktabet over bedden og mellem målepunkterne d. 25. november kl.14.30.

Målingen, der er vist på figur 5.28, er taget efter, der havde været gennembrænding af koksbedden.



Figur 5.29 Undertryk i bedden i forhold til over bedden, hele forsøget.

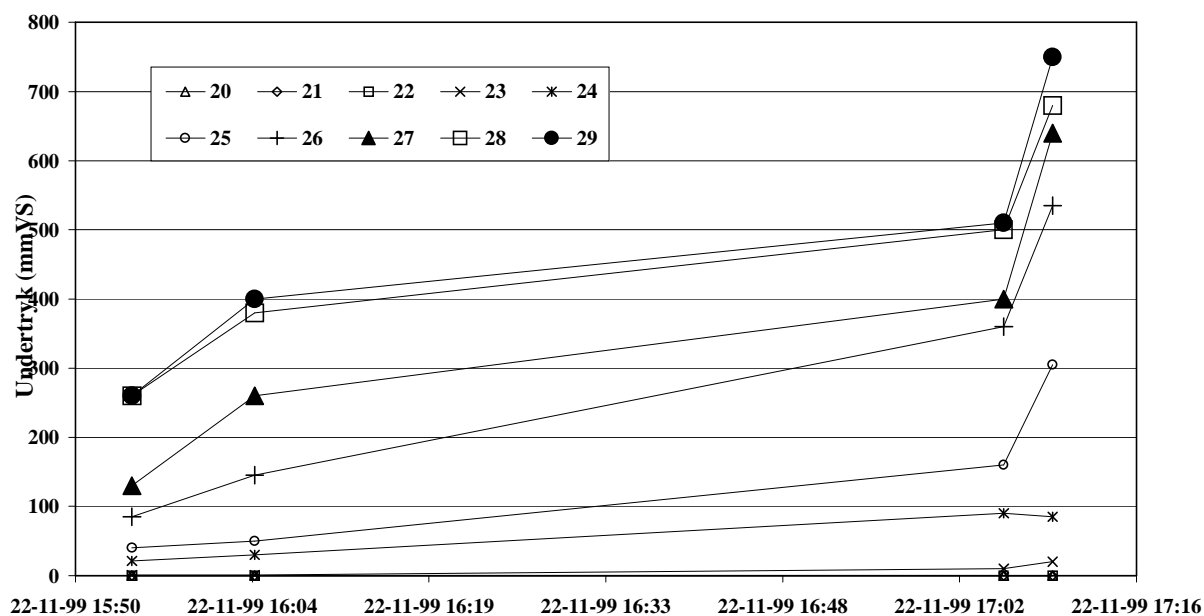


Figur 5.30 Differenstryk mellem målestudse, hele forsøget.

## Målinger af tryktab over koksbedden

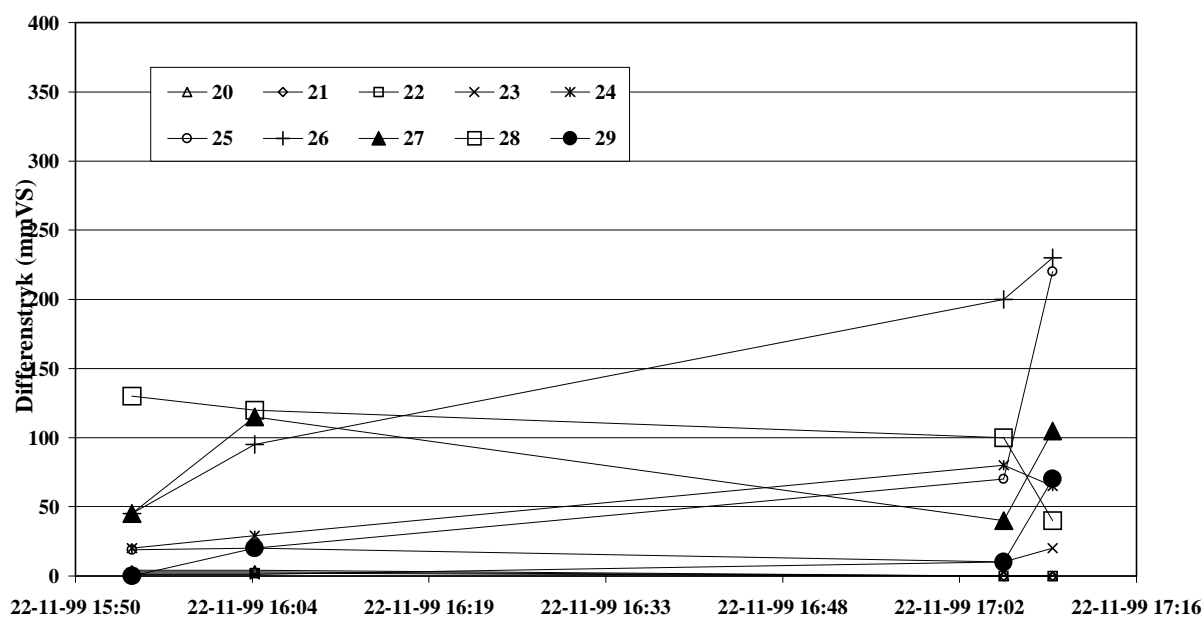
På figur 5.29 og 5.30 ses kurver over hele forsøget, der viser henholdsvis undertrykket i bedden i forhold til over bedden og differenstrykket mellem målestudsene. Afstanden mellem målestudsene er ca. 6 cm. På figur 5.30 ses det, at det største trykfald varierer fra at ligge ved risten og til et stykke op i bedden.

### Undertryk i bedden ift. over bed.



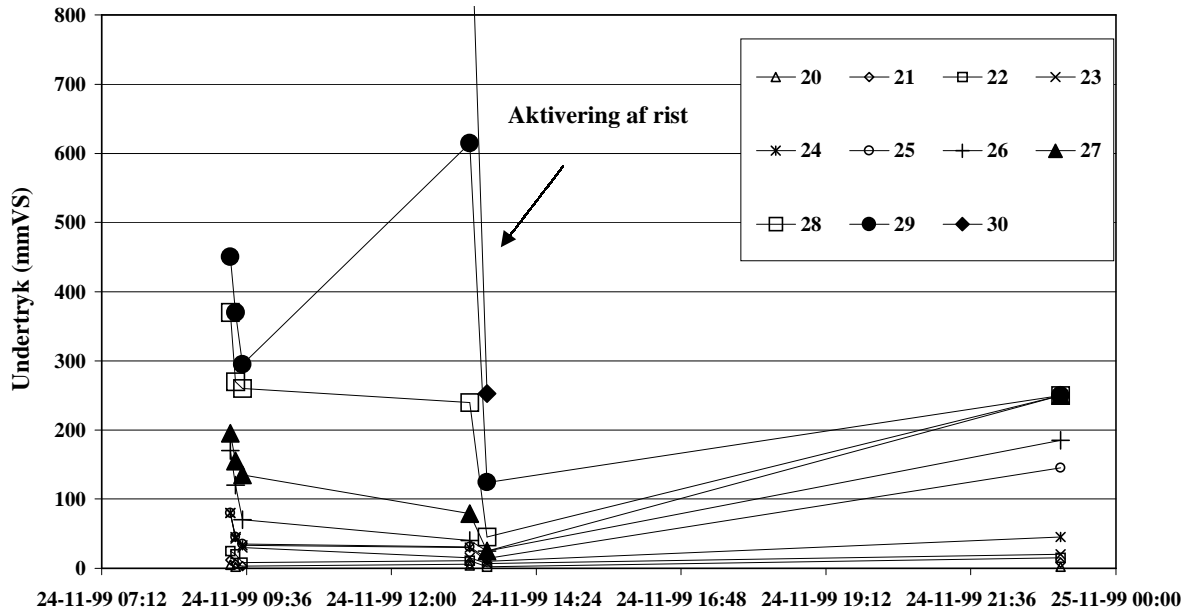
Figur 5.31 Undertryk i bedden i forhold til over bedden, d. 22. november 1999.

### Differenstryk mellem målestudse



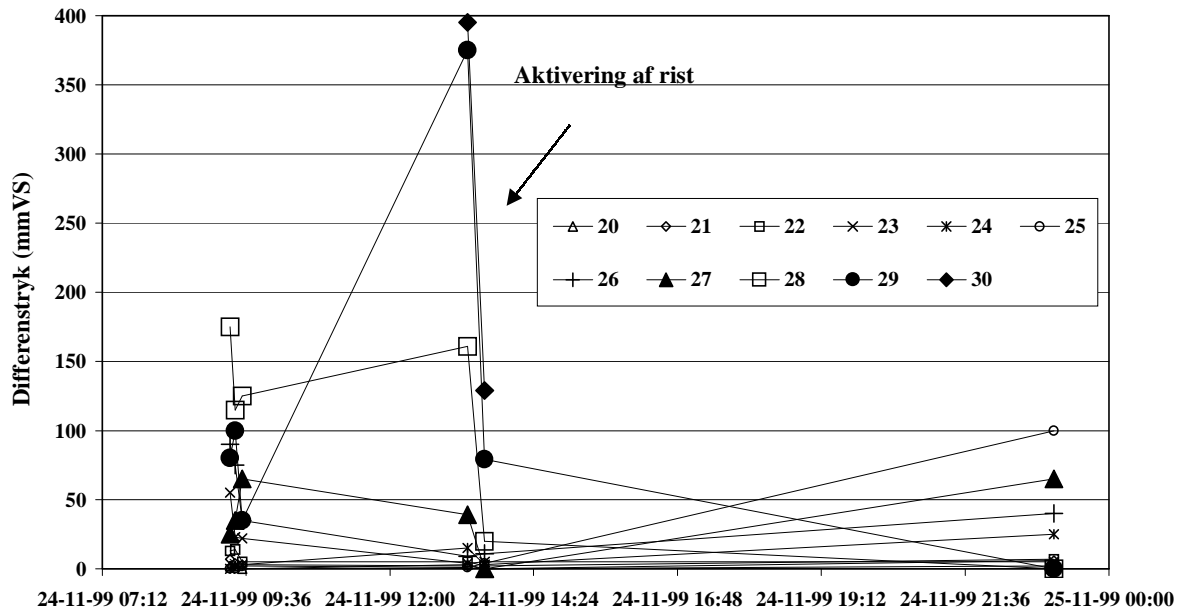
Figur 5.32 Differenstryk mellem målestudse, d. 22 november 1999.

Undertryk i bedden ift. over bed.



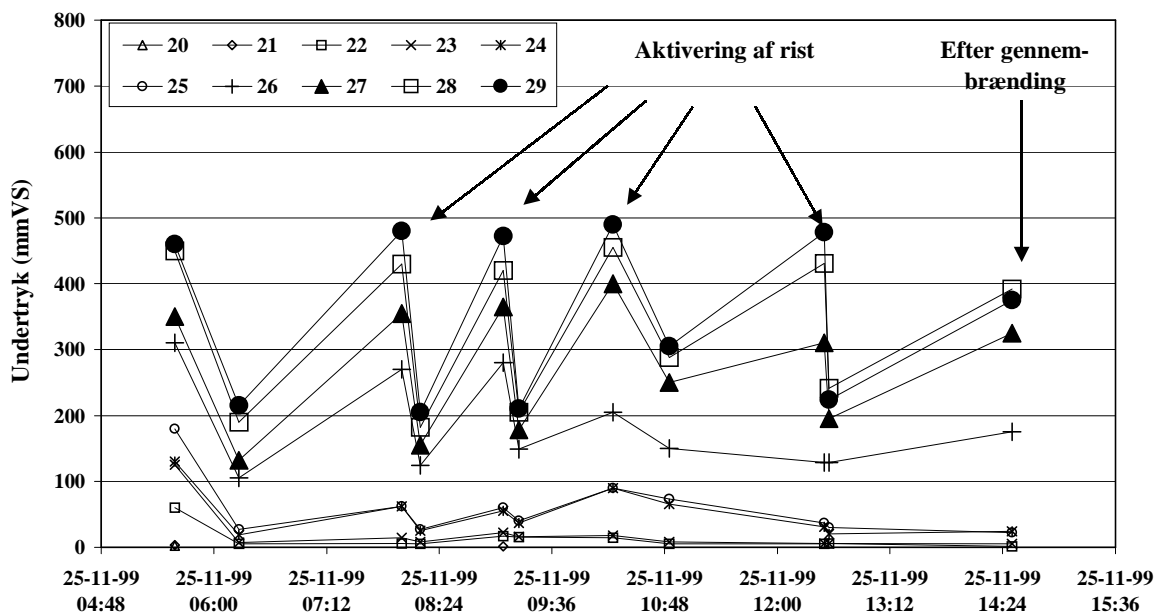
Figur 5.33 Undertryk i bedden i forhold til over bedden, d. 24. november 1999.

Differenstryk mellem målestudse



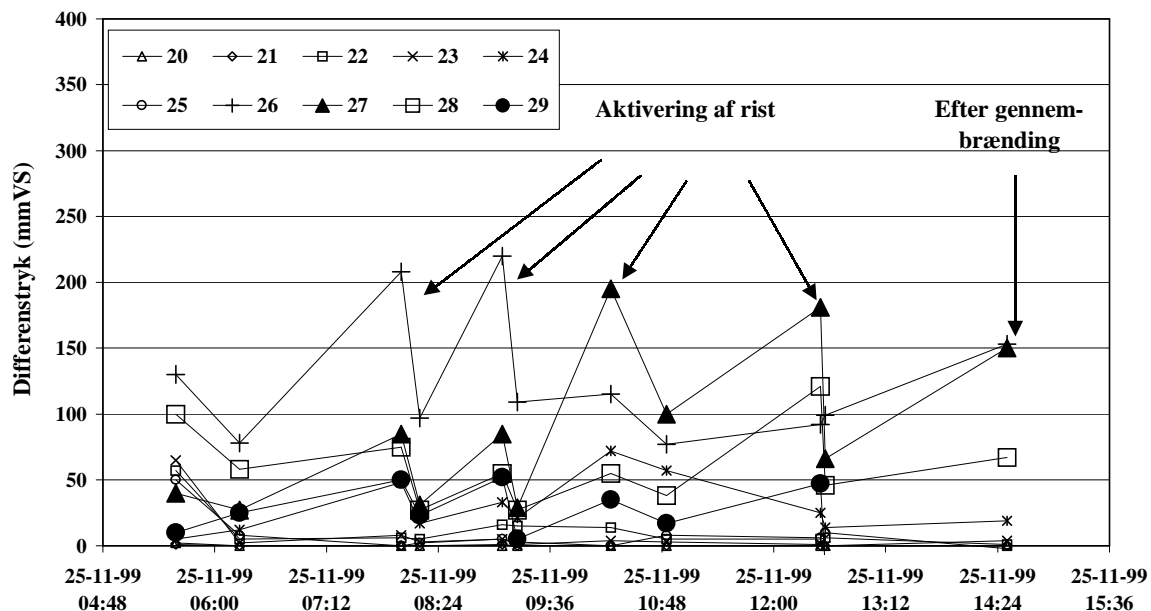
Figur 5.34 Differenstryk mellem målestudse, d. 24 november 1999.

Undertryk i bedden ift. over bed.



Figur 5.35 Undertryk i bedden i forhold til over bedden, d. 25. november 1999.

Differenstryk mellem målestudse



Figur 5.36 Differenstryk mellem målestudse, d. 25 november 1999.

## **5.3 Konklusion**

### **Tryktabet over koksbedden**

Tryktabet over koksbedden udviklede sig anderledes ved dette forsøg end ved tidligere forsøg udført på 100kW forgasseren (figur 5.1-5.5).

Tryktabet steg meget hurtigt og blev det første døgn holdt på et niveau omkring 300 mmVS ved at aktivere risten jævnlige. Dette skyldes formodentligt, at forgasseren blev startet op på tørt brændsel (6% fugt) og at der ikke blev tilsat vanddamp. Herved blev der i den partielle oxidationszone produceret en stor sodmængde, som delvist satte sig i koksbedden. Forhold omkring soddannelse i forgassere undersøges nærmere på instituttet.

Efter tilsætning af vanddamp udviklede tryktabet sig mere moderat, dog hurtigere end ved tidligere forsøg. Dette kan skyldes at koksbedden havde fået en stor dosis sod under det første døgn kørsel, som kun langsomt blev omsat.

### **Tryktabet ned gennem koksbedden**

Tryktabet ned gennem koksbedden blev målt løbende og i flere tilfælde før og efter aktivering af risten.

Det ses ud fra målingerne at det største tryktab ligger i den nederste del af bedden. Igennem forsøget ændrede tryktabsprofilen sig, således at det største lokale tryktab til tider var omkring risten og til tider lå højere oppe i bedden.

Det ses, at aktivering af risten reducerer det totale tryktab over bedden og fordelingen af hvor i bedden trykket kan reduceres kan ses på figurerne (5.15-16, 5.20-21, 5.22-23, 5.24-25, 5.26-27).

I et enkelt tilfælde blev tryktabet ved risten reduceres meget (figur 5.15-16), men i de fleste tilfælde ses det, at det lokale tryktab over hele bedden reduceres ved aktivering af risten (figur 5.20-21, 5.22-23, 5.24-25, 5.26-27). Der kan altså ikke konkluderes noget generelt om hvordan trykfordelingen er over bedden og hvor trykket reduceres ved aktivering af risten.

Forhold omkring strømningsforhold og udvikling af tryktab i koksbeds undersøges nærmere på instituttet.

## Kapitel 6 Samlede konklusion

Forsøget resulterede i en række resultater og ny viden. De fleste resultater er offentliggjort i øvrige rapporter og artikler. De væsentligste konklusioner af undersøgelsen er:

### Gasrensning

Partikler fra tottrinsprocessen kan effektivt fjernes fra gasstrømmen med fiberfiltre som f.eks. posefiltre og patronfiltre. Posefiltre kan effektivt regenereres da partiklerne ikke er klæbrige. Ved denne teknik fjernes også den del af tjæren, som har sat sig på partiklerne.

Resultater fra de forskellige gasrensningsmetoder ses i rapporten "Low temperature Particle Filtration of Producer Gas with Low Tar Content" Claus Hindsgaul, June 2000. ET-ES 2000-03.

### Tjæremålinger

Der blev foretaget målinger med tre tjæremålemetoder under forsøget med 100 kW-forgasseren uge 47-1999. Sammenligning af resultaterne fra GC-analyserne viser god overensstemmelse mellem den på DTU anvendte tjæremålemetode og metoden anvendt af Teknologisk Institut (TI-metoden). Det lave tjæreindhold i gassen har dog givet nogen variation i de målte værdier, bl.a. er der ikke samstemmende tendenser i resultaterne fra TI-metoden når værdier for "total GC" sammenlignes med værdierne "total gravimetrisk" for den samme sampling.

SPA-målingerne var behæftet med en del usikkerhed pga. høje blindværdier, men viste i grove træk samme værdier som målt med TI-metoden. Det kan derfor anbefales at arbejde videre med metoden. Den nemme sampling og prøvehåndtering levede helt op til forventningerne.

Under normal driftstilstand på forgasseren viste målingerne et tjæreindhold i gassen før rensning på 25 mg/Nm<sup>3</sup> eller mindre, hvilket kan betegnes som meget tilfredsstillende.

Resultater fra tjæremålingerne ses i rapporten "Tjæremålinger på tottrinsforgasser uge 47 1999". MEK-ES 2001-02.

### Kørsel på tørt flis

Sodproduktionen var meget stor når forgasseren blev kørt med tørt flis og når der ikke blev tilført vanddamp.

Resultater fra partikelmålinger ses i rapporten "Low temperature Particle Filtration of Producer Gas with Low Tar Content" Claus Hindsgaul, June 2000. ET-ES 2000-03.

Den store sodproduktion resulterede i et stort tryktab over koksbedden.

### Hvirvelstrømsforgasning

Lufttilsætningen i 100kW forgasseren er udformet, så den afgangning der finder sted øverst i koksbedden, bliver transporteret op til den delvise afbrænding. Ved ikke at forpyrolysere brændslet blev forgasseren kørt efter det såkaldte hvirvelstrømsprincip.

Tjæreindholdet i gassen var lavt under kørslen efter hvirvelstrøms princippet, og forgasseren blev kørt stabilt i flere timer frem til at forsøget blev stoppet som planlagt.

Resultater fra hvirvelstrømsforsøgene er beskrevet i eksamensprojektet: "Optimering af koncepter for medstrømsforgasning", ET marts 2000.

### **Rense kondensat med simpelt aktivt kulfilter**

Alle kondensatprøverne fra forsøget har meget lave indhold af organiske komponenter. Prøverne fra forgasning med og uden vanddamptilsætning er sammenlignelige, og indholdet af PAH forbindelserne (Benzen, Naphthalen, Phenanthren, Pyren) reduceres yderligere til et ensartet og meget lavt niveau ved aktiv kulbehandling.

Prøven fra hvirvelstrømsforsøget har noget højere værdier, dog fortsat meget lave i forhold til øvrige forgasningskoncepter.

Resultaterne omkring rensning af kondensatet ses i kapitel 4: "Undersøgelser af kondensat".

### **Tryktabet over koksbedden**

Tryktabet over koksbedden udviklede sig anderledes ved dette forsøg end ved tidligere forsøg udført på 100kW forgasseren.

Tryktabet steg meget hurtigt og blev det første døgn holdt på et niveau omkring 300 mmVS ved at aktivere risten jævnlige. Dette skyldes formodentlig, at forgasseren blev startet op på tørt brændsel (6% fugt) og at der ikke blev tilsat vanddamp. Herved blev der i den partielle oxidationszone produceret en stor sodmængde, som delvist har sat sig i koksbedden. Forhold omkring soddannelse i forgassere undersøges nærmere på instituttet.

Efter tilsætning af vanddamp udviklede tryktabet sig mere moderat, dog hurtigere end ved tidligere forsøg. Dette kan skyldes at koksbedden havde fået en stor dosis sod under det først døgn kørsel, som kun langsomt blev omsat.

### **Tryktabet ned gennem koksbedden**

Tryktabet ned gennem koksbedden blev målt løbende og i flere tilfælde før og efter aktivering af risten.

Det ses ud fra målingerne at det største tryktab ligger i den nederste del af bedden. Igennem forsøget ændrede tryktabsprofilen sig, således at det største lokale tryktab til tider var omkring risten og til tider lå højere oppe i bedden.

Aktivering af risten reducerer det totale tryktab over bedden. I et enkelt tilfælde blev især tryktabet ved risten reduceres meget, men i de fleste tilfælde blev det lokale tryktab over hele bedden reduceret ved aktivering af risten. Der kan altså ikke konkluderes noget generelt om hvordan trykfordelingen er over bedden og hvor trykket reduceres ved aktivering af risten.

Forhold omkring strømingsforhold og udvikling af tryktab i koksbeds undersøges nærmere på instituttet.



## Referenceliste

- Ahrenfelt, Jesper et al "Eksperimentelle undersøgelser af motordrift på forgasningsgas" ET-ES-2000-03
- Ahrenfelt, Jesper et al "Eksperimental on Wood Gas Engines" ET-ES-2000-04
- Ahrenfelt, Jesper et al "Ford VSG 411 Fueled by Producer Gas from a Two-Stage Gasifier" Paper præsenteret ved 1.st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry. Sevilla juni 2000
- Bentzen, Jens Dall et al. 1998 "100 kW Totrinsforgasningsanlæg på DTU". Institut for Energiteknik, DTU. ET-ES 98-11.
- Bentzen, Jens Dall et al. 1999 "Optimering af 100 kW Totrinsforgasningsanlæg på DTU". Institut for Energiteknik, DTU. ET-ES 99-02.
- Bentzen, Jens Dall et al. 2000 "Optimized Two-Stage Gasifier". Paper præsenteret ved 1.st World Conference and Exhibition on Biomass for Energy and Industry. Sevilla juni 2000
- Brandt, Peder & Henriksen, Ulrik. 2001. "Tjæremålinger på totrinsforgasser uge 47 1999" DTU. MEK-ES 2001-02.
- Fock, Felicia & Thomsen, Kirstine 2000. "Optimering af koncepter for medstrømsforgasning". Eksamensprojekt, Institut for Energiteknik, DTU.
- Hansen, Claus Hindsgaul.1998. "Physical and Chemical Characterization of Particles in Producer Gas." Technical University of Denmark. ET-EP 98-12.
- Hansen, Claus Hindsgaul "Low Temperature Particle filtration of Producer Gas with Low Tar Content" ET-ES-2000-05
- NORIT, 1998. Brev fra NORIT's laboratorium med analysresultater og udtalelse om adsorbtionsegenskaber af kul fra 100 kW forgasseren,
- Ravn, Christina og Rousing, Marianne. 1998. "Dannelsen af sod i forgasningsprocesser, Eksamensprojekt", Institut for Kemiteknik.