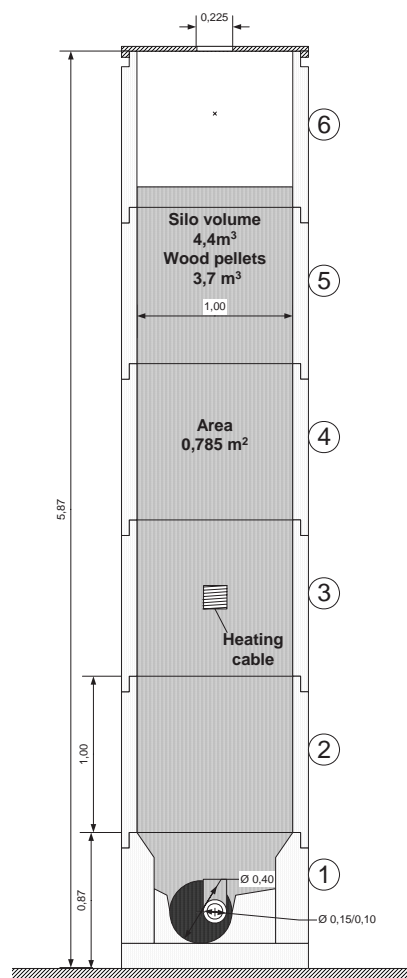


Brand och brandsläckning i siloanläggningar

En experimentell studie

BRANDFORSK projekt 632-051

VÄRMEFORSK projekt A5-510



Henry Persson, Per Blomqvist, Zhenghua Yan-LTH

Brand och brandsläckning i siloanläggningar

En experimentell studie

BRANDFORSK projekt 632-051

VÄRMEFORSK projekt A5-510

Abstract

Fire and fire extinguishment in silos-an experimental study

A series of four silo fire experiments was conducted in an intermediate scale to provide guidelines regarding fire fighting of silo fires. The silo construction used was 1 m in diameter, about 6 m high and filled with approx. 3.7 m³ of wood pellets. The fire was initiated with a coiled heating wire placed centrally in the pellet bulk and after a preburn period of about 30 hours, the smouldering fire was extinguished using inert gas (N₂ or CO₂), and in some tests, in combination with foam. During the preburn period, the pyrolysis development and the possibilities for detection were studied.

Key words: silos, fire extinguishment, nitrogen, carbon dioxide

**SP Sveriges Provnings- och
Forskningsinstitut**
SP Rapport 2006:47
ISBN 91-85533-35-1
ISSN 0284-5172
Borås 2006

**SP Swedish National Testing and
Research Institute**
SP Report 2006:47

Postal address:
Box 857,
SE-501 15 BORÅS, Sweden
Telephone: +46 33 16 50 00
Telex: 36252 Testing S
Telefax: +46 33 13 55 02
E-mail: info@sp.se

Innehållsförteckning

	Abstract	2
	Innehållsförteckning	3
	Förord	5
	Sammanfattning	6
	Summary	7
1	Bakgrund och Syfte	9
1.1	Problembeskrivning	9
1.2	Grundläggande forskning kring självantändning	9
1.3	Syfte och målsättning	10
2	Erfarenhet från försök/bränder	11
2.1	Data från inträffade bränder	12
2.2	Dimensioneringsunderlag för försöken	13
3	Simuleringar med CFD-koden SMAFS	14
4	Försök	15
4.1	Förförsök	15
4.1.1	Uppställning	15
4.1.2	Tändkälla	16
4.2	Huvudserie	17
4.2.1	Uppställning	17
4.2.2	Instrumentering, mätningar	19
4.2.2.1	Temperaturmätningar	19
4.2.2.2	Gasanalyser	20
4.2.2.3	Detektionsutrustning	22
4.2.3	Utrustning för inertering-släckning	23
4.2.4	Försöksprogram	25
5	Resultat	26
5.1	Förförsök	26
5.2	Huvudserie	28
5.2.1	Temperaturmätningar - utbredning av pyrolysis och fuktvandring	29
5.2.2	Gasanalyser i pelletsbulken under förbrinntiden	32
5.2.3	Gasanalyser/detektion i silotoppen under förbrinntiden	34
5.2.4	Släckning	40
5.2.4.1	Försök 1 - Släckning med kvävgas	40
5.2.4.2	Försök 2 - Släckning med koldioxid	45
5.2.4.3	Försök 3 - Släckning med skum i kombination med begränsad ventilation och kvävgas	50
5.2.4.4	Försök 4 - Forcerad genomluftning, samt släckning med skum i kombination med begränsad ventilation och kvävgas/koldioxid	54
5.2.5	Observationer vid demontering och tömning av silon	61
5.2.6	Resultat från kemiska analyser av gasprover	64
5.3	Resultat av CFD-simuleringar	70
5.3.1	Jämförelse mellan simuleringar och experiment	71

6	Diskussion	73
6.1	Antändning, pyrolysförlopp och detektering	73
6.2	Släckning och dimensioneringsfaktorer	74
6.3	Jämförelse av försökserfarenheter och silobränderna i Härnösand 2004	79
6.4	Simulering av självantändningsförlopp, pyrolysis och släckinsats	81
6.5	Inverkan av andra lagringsgeometrier	81
7	Slutsatser och rekommendationer	82
8	Behov av fortsatta forskningsinsatser	83
9	Referenser	84
	Annex 1 Mätdata från hela försöksförloppet	85

Förord

Detta projekt har finansierats av BRANDFORSK, VÄRMEFORSK, försäkringsbolaget If samt Lantmännen. Genom en fortsättning av CECOST-projektet ”Självantändning av biobränslen och biogent avfall”, finansierat av STEM, har även en mindre del av projektet bekostats denna väg. Utöver detta medverkade AGA med släckgaser samt SBE Svensk Brikettenergi med träpellets. Dessutom ställde Firefly en MGD branddetektorutrustning till förfogande under försöken samt genomförde en analys av insamlad data från denna.

Syftet med projektet har varit att genomföra en serie brand- och släckförsök i en silo i reducerad skala för att skapa ett bättre kunskapsunderlag kring brandförlopp, detektion och släckning av silobränder. Parallellt med experimenten har simuleringar genomförts vid LTH, med CDF-programmet SMAFS, av det initiella pyrolysförloppet och efterföljande släckinsats. Den utökning som har varit möjlig genom CECOST-projektet har inriktats mot utökade gasanalyser under den inledande fasen av pyrolysen i silon för att undersöka möjligheten för tidig detektion av en pågående självuppvärmning och begynnande pyrolysis.

Projekt utgör en fortsättning på den litteraturstudie kring släckning av silobränder som tidigare genomförts på uppdrag av Räddningsverket och rapporterats i SP-Arbeitsrapport 2004:16.

Som stöd för projektledningen har följande personer medverkat i en referensgrupp:

Hans Andersson, Akerkvaerner (VÄRMEFORSK)
 Peter Baeling, Lantmännen
 Gullvi Borgström, VÄRMEFORSK
 Henrik Brodén, TPS (VÄRMEFORSK)
 Ulf Erlandsson, SRV
 Robert Gunnarsson, EON (VÄRMEFORSK)
 Ingvar Hansson, SRV
 Göran Holmstedt, Brandteknik LTH (projektledare CECOST-projektet)
 Tomas Isaksson, svensk Brikettenergi
 Per Johnsson, Arbetsmiljöverket
 Kjell-Åke Källström, Räddningstjänsten Höga Kusten-Ådalen
 Lars Larsson, Lantmännen
 Ronnie Lindberg, Luleå Räddningstjänst
 Jan Mongs, If
 Sven Måhlstedt, If
 Christoffer Romnäs, Firefly
 Daniel Rydholm BRANDFORSK
 Jonathan Sjöberg, Helsingborgs Räddningstjänst
 Tom Sörensen, AGA
 Mats Thelenius, Vattenfall (VÄRMEFORSK)

Kommentarer: En språklig frågeställning som dykt upp under projektets gång är hur ordet pellets skall hanteras. Svenska språknämnden rekommenderar att använda ordet *pellett* som grundform (jfr *pollett*, *tablett*). Pluralformel blir då *pelletter* och den bestämda formen *pelletterna*. Efter samråd med referensgruppen har dock beslutats att behålla beteckningen *pellets* respektive *pelletsen* då detta tycks vara de vedertagna benämningarna inom industrin.

För att göra rapporten mer tillgänglig är texten i figurer/diagram på engelska.

Sammanfattning

En serie om fyra brand- och släckförsök i en silo i reducerad skala har genomförts för att skapa ett bättre kunskapsunderlag kring brandförlopp, detektion och släckning av silobränder. Projektet var en fortsättning av en förstudie kring släckning av silobränder som utförts på uppdrag av Räddningsverket [1] vilken visade på riskerna med silobränder och den bristande kunskap som råder hos anläggningsägare och räddningstjänsten.

Modellsilon som användes vid försöken var utförd av betong och hade en diameter på 1 m, var knappt 6 m hög och hade en bruttovolym på ca 4,4 m³. Vid försöken var silon fylld med träpellets till en höjd av ca 5 m. En liten pyrolysisbrand initierades i silons mitt med hjälp av en värmekabel för att simulera förhållanden vid självantändning, vilket är den vanligaste brandsorsaken vid silobränder. Efter mindre än en timma var pyrolysisbranden etablerad och den fick därefter utvecklas fritt. För att kunna följa pyrolysisförloppet och senare även släckförloppet var silon instrumenterad med nära 100 termoelement utplacerade på olika nivåer i silon. Dessutom genomfördes gasanalyser, både i det fria utrymmet i silotoppen, samt på fyra olika nivåer inne i pellets materialet. Syftet med gasanalysen var att studera möjligheten till att detektera en självantändning och begynnande glödbland i ett tidigt skede.

Efter ca 30 timmars förbrinntid hade pyrolysiszonen vuxit till drygt 1 m i höjddet vilket valdes som kriterium för att påbörja släckinsatsen. Som släckmetoder provades injicering av kvävgas respektive koldioxid i silons botten. I två försök kombinerades detta också med skumbegjutning av silotoppen.

Försöken visar att pyrolysis (branden) företrädesvis sprider sig nedåt i silon medan det utvecklas en ”våg” av fukt, värme och brännbara gaser som sakta sprider sig uppåt. Innan denna våg bryter igenom pelletsytan i silotoppen är det mycket svårt att detektera branden genom gasanalyser i silotoppen och i försöken tog detta drygt 20 timmar. Utbredningen av pyrolysis nedåt är ännu långsammare och eftersom denna tenderar att sprida sig endast marginellt i sidled innebär detta att det tar lång tid innan man kan detektera någon värmeutveckling på silons nedre väggar/bottenkåpa. Detta är således en förklaring till varför silobränder ofta är relativt omfattande när de väl upptäcks, då branden vid den tidpunkten sannolikt har pågått i ett antal dygn.

Inertering av silon med gas är en släckmetod som visade sig fungera bra vid försöken. Kvävgas och koldioxid är två fungerande alternativ. Gasen skall matas in sakta i gasfas så nära silobotten som möjligt. En effektiv insats förutsätter att silon är tät för att undvika ”tjuvluft” som kan underhålla pyrolysis samtidigt som släckgasen läcker ut. En silo bör därför utformas så att den kan stängas till lufttätt vid släckning, släckeffekten kan ytterligare förstärkas genom att stänga till lufttillgången ovanifrån genom skumbeläggning i silotoppen. I ett inledningskedje kan det också vara aktuellt att inertera silotoppen för att undvika risk för gas-/dammexplosion. Generellt sett gäller att tömning inte skall inledas innan branden är avsevärt dämpad och att silon skall hållas inerterad under tömningsfasen. Vatten skall inte användas som släckmedel då detta kan leda till kraftig svällning av materialet. Svällning kan leda till att silokonstruktionen sprängs, alternativt till att material fastnar högt upp i silon vilket kan leda till att situationen blir ännu besvärligare och farligare.

Summary

A series of four tests have been conducted with wood pellets stored in a reduced size silo. The tests were conducted in order to increase the knowledge on fire development, detection and extinction technique in silo fires. The project originated from a pre-study [1] on the extinction of silo fires made for the Swedish Rescue Service Agency (SRV).

The silo used for the tests was built of concrete rings, had a diameter of 1 m, and a height of almost 6 m, which gave a volume of 4.4 m³. The silo was filled with wood pellets up to a height of 5 m. Self heating, leading to local auto ignition, is a frequent reason for silo fires. In the tests, the local auto ignition was simulated by a coiled heating wire placed in the pellet bulk centrally in the silo. A self sustaining pyrolysis zone was rather quickly established and the heating wire could be turned off after one hour. The silo was instrumented with almost 100 thermocouples as a means to follow the development of the pyrolysis zone and later the efficiency of the extinguishment. Gas analyses were further made, both in the free space in the top of the silo, and at four different heights levels in the pellets. One aim of the gas analysis was to investigate the possibilities for early detection of an incipient self ignition.

After 30 hours the pyrolysis zone had spread vertically in the silo over a distance of 1 m, which was chosen as the criteria for initiation of the extinguishment. The gases, carbon dioxide (CO₂) and nitrogen (N₂), were injected into the silo from the bottom. Tests were also conducted where gas injection was combined with a layer of fire fighting foam placed on top of the material in the silo.

The tests showed that the pyrolysis zone preferably spreads downwards in the silo, while moisture and gases produced from the pyrolysis form a wave that slowly spreads upwards. It was difficult to detect the fire by measurements in the top of the silo. It took considerable time before the main "gas wave" reached the pellet surface in the silo top, and detection time was about 20 hours in these tests. The spread of the pyrolysis zone, downward, was even slower. The extension of the pyrolysis zone was further mainly in the vertical direction, and only marginally in the horizontal direction, which resulted in a long time period of time before it was possible to detect elevated temperatures on the walls or on the bottom of the silo. The slow development is probably an explanation for why real silo fires often are rather extensive when they are discovered.

Inerting the silo by gas injection is an extinguishing method that worked out well in the silo tests. Nitrogen gas and carbon dioxide are two alternative gases that both are suitable. The extinguishing media, which must be in the gas phase, should be introduced slowly into the silo, as close to the bottom of the silo as possible. An efficient extinction requires an air tight silo, as any holes or leaks will feed the pyrolysis with oxygen, and could further result in losses of extinguishing media. A silo should therefore be designed with the means to close the silo effectively during an extinguishment event. The efficiency of the extinction could be further enhanced by putting a layer of low or medium expansion fire fighting foam on top of the stored material in the silo. It could further be appropriate to inject inert gas in the void space of the silo at an early stage of the fire fighting in order to reduce the risk for gas/dust explosion. Generally, emptying of the silo should not be initiated before the fire is appropriately suppressed, i.e. not before the pyrolysis activity (temperature) has been considerably reduced. An inert atmosphere should further be maintained in the silo during the post extinction emptying phase. Water should not be used as an extinguishing media, as water could result in considerable expansion (swelling) of the porous material in the silo. This could both damage the silo construction and make the stored material to stick to the silo walls.

1 Bakgrund och Syfte

1.1 Problembeskrivning

Silolagring av olika brännbara produkter förekommer inom en rad olika verksamhetsgrenar. Enskilda silor kan variera i storlek från 10-tals m³ till 1000-tals m³ och inom vissa verksamhetsområden finns stora silokomplex med totala lagringsvolymerna på 50 000-100 000 m³.

Vid lagring av finfördelade fasta organiska material i silo föreligger risk för självuppvärmning. Värmegenereringen kan härröra från exoterma kemiska reaktioner, biologisk metabolism samt fysikaliska processer som t ex fukttransport, och beroende på bl a lagringsvolymen och lagringssättet så finns det risk för att självuppvärmningen kan leda till självantändning. Vid en brand i en silo finns det oftast också en överhängande risk för dammexplosion vilket kan leda både till stora materiella skador och till omfattande personskador eller dödsfall.

En brand i en silo försätter räddningstjänsten i en besvärlig situation. För att bistå räddningstjänsterna pågår därför ett arbete inom Räddningsverket med att ta fram ett kunskapsmaterial kring hur silobränder skall hanteras. En första litteraturgenomgång av inträffade silobränder samt rekommendationer kring detektion och släckning har utförts av SP Brandteknik och rapporteras i SP-AR 2004:16 [1].

Litteraturstudien visar att en silobrand oftast upptäcks först när det finns en omfattande glödbland etablerad i materialet. I många fall leder branden till betydande skador, inte bara i den drabbade silon utan också genom brandspridning till angränsande siloceller och i vissa fall ut i omgivande anläggning. Släckningen, ofta i kombination med tömning av innehåll, kan vara komplicerad och långdragen. Röken från branden kan också vara besvärande för omgivande bebyggelse/verksamheter och sannolikt är den också ohälsosam med tanke på att det handlar om en dålig förbränning.

1.2 Grundläggande forskning kring självantändning

Betydande insatser för att öka den grundläggande kunskapen kring självantändning av biobränslen har genomförts inom CECOST-projektet "Självantändning av biobränslen och biogent avfall". Projektet bedrivs i samarbete mellan Lunds Tekniska Högskola (LTH), Växjö Universitet (VXU) samt SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut (SP). Projektet startades 2002 och arbetet i den första fasen t o m 2005 finns rapporterat av Holmstedt [2]. En andra fas av projektet har påbörjats som omfattar perioden 2006-2009.

Målsättningen med projektet är att utveckla en beräkningsmodell för att kunna simulera självuppvärmningsförlopp i olika biobränslen och under givna lagringsbetingelser. För att skapa de indata som behövs för modellen har VU arbetat med att utveckla metoder för att kvantifiera den biologiska aktiviteten i olika material medan SP på motsvarande sätt inriktat sig mot att utveckla metoder för kvantifiering av de kemiska oxidationsprocesserna och värmeledningsegenskaper. LTH är ansvariga för utvecklingen av själva beräkningsmodellen vilket också inbegriper inverkan av de fysikaliska parametrarna såsom fuktinnehåll, fuktvandring, värmetransport inom bränslebädden, m m. För beräkningarna används en CFD-modell, SMAFS (Smoke Movement and Flame Spread), som anpassats och vidareutvecklats för denna typ av beräkningar [3, 4].

I projektet har man primärt arbetat med träpellets som referensmaterial men på sikt är tanken att kunna ta fram indata och simulera självuppvärmningsförlopp i andra material och olika lagringskonfigurationer för att därifrån kunna bedöma risker för självtändning, föreslå riskreducerande åtgärder, etc.

1.3 Syfte och målsättning

Syftet med projektet har varit att genomföra en serie försök i reducerad skala för att skapa ett bättre kunskapsunderlag kring brandförlopp, detektion och släckning av silobränder. CFD-simuleringar av försöksförloppet genomfördes dessutom med beräkningsmodellen SMAFS med syfte att få en uppfattning om det förväntade brandspridningsförloppet. Simuleringarna genomfördes därför före försöksserien, dels för att så långt som möjligt optimera instrumenteringen i försökssilon, dels för att sedan kunna jämföra resultaten med erhållna mätdata.

Ett långsiktigt mål med projektet är att detta skall ligga till grund för framtagning av specialutrustning för släckning av silobränder. En sådan utrustning skulle kunna vara mobil och finnas som en nationell resurs. Som en direkt följd av projektet har Räddningsverket påbörjat ett arbete med att ta fram ett konkret koncept för en mobil släckutrustning. Bli innebär detta att tillsammans med gasleverantörer avgöra vilken utrustning som behövs vid t ex användning av koldioxid respektive kvävgas för att undvika alla de direkta problem som uppmärksammats vid olika bränder. Även säkerhetsaspekter, tillgänglighet, kostnadsfaktorer, etc., kommer att undersökas. Lantmännen, som är den största ägaren till siloanläggningar i Sverige, har också erbjudit möjlighet att genomföra fullskaliga brand-/släckförsök i en av deras spannmålssiloanläggningar, dels för att kunna verifiera de slutsatser och rekommendationer som framkommit av detta projekt, dels för att ge möjlighet att utvärdera den specialutrustning som eventuellt kan bli aktuell att anskaffa.

Detta innebär att den vunna kunskapen i detta projekt snabbt kommer att kunna omsättas till praktisk tillämpning.

2 Erfarenhet från försök/bränder

För att genomföra försöken med realistiska förutsättningar, avseende bl a påföringshastighet och total släckmedelsåtgång, gjordes en genomgång av tillgängliga rekommendationer, data från tidigare släckförsök samt några inträffade silobränder. Då storlekarna på silor varierar avsevärt görs nedan en normering av påföringshastighet och total släckmedelsåtgång i förhållande till silons bruttovolym. I vilken mån detta bruttovolymen är ett relevant referensmått diskuteras vidare i kapitel 6.2.

Enligt den litteraturgenomgång som tidigare utförts [1] är det bara i NFPA 850 [5] som det återfinns konkreta rekommendationer kring dimensionering av en släckinsats med gas. Rekommendationerna är riktade mot släckning av silor för kollagring och ett av de släckalternativ som listas är inertering med koldioxid där man rekommenderar påföring av förångad gas via silons botten. Erfarenhetsmässigt anger man en dimensionerande åtgång som motsvarar 3 gånger silons bruttovolym. Omräknat till vikt innebär detta i storleksordningen en åtgång på totalt 6 kg/m^3 . Man nämner också kvävgas som ett alternativ men på grund av sin lägre densitet, i stort sett samma som luft, får man räkna med en högre gasförbrukning. Några konkreta siffror anges dock ej. Det påpekas också att det för kvävgas kan behövas fler injiceringsställen i silons botten för att säkerställa en jämn fördelning av gasen över silons tvärsnittsarea.

Även i Tyskland har problematiken med silobrandsläckning uppmärksamats och i Deutsche Feuerwehr-Zeitung gör Weiss [6] en jämförelse mellan koldioxid och kvävgas. Vissa rekommendationer ges också kring systemuppbyggnad vid släckinsatser, bl a pekar man på behovet av förångarutrustning. Det nämns också att man inom vissa regioner i Tyskland anskaffat nödvändig utrustning för att specifikt användas i händelse av brand. Erfarenheter redovisas från några inträffade bränder, däremot saknas konkreta dimensioneringsrekommendationer.

Vid VTT genomfördes under 1997 ett projekt [7] vars experimentella del hade som syfte att undersöka vilka inertgaskoncentrationer och inerteringstider som var nödvändiga för att nå släckning i porösa material lagrade i t ex en silo. Drygt 40 experiment genomfördes i en försöksvolym på 1 l följt av 9 försök i ett oljefat som försökskärl. Volymen på oljefatet var 178 l och det fylldes till 2/3 med ca 18,5 kg sågspån (torv i något försök). En glödbrand startades med hjälp av en 7,5 cm lång värmekabel (400 W/m) placerad inne i materialet. I dessa försök uppgick förbrinntiden i de flesta fall till ca 20 timmar varefter släckgasen injicerades via ett rörsystem så att gasen kom in antingen i botten, längs sidorna eller i toppen. I varje försök användes en gasmängd på ca 0,27 kg, dvs. motsvarande en total mängd av $1,5 \text{ kg/m}^3$ bruttovolym vilket angavs som en normal dimensioneringsmängd för silor. Påföringstiden var ca 5:30 min:s och normeras detta till volymen innebär det alltså en påföringshastighet av ca $16,4 \text{ kg/m}^3\text{tim}$.

Även om försöken gav mycket kunskap av kvalitativ karaktär konstateras i rapporten att det krävs ytterligare insatser i större skala för att kunna ge kvantitativa rekommendationer. Några av de konkreta slutsatser som drogs av försöken var att alla öppningar skall stängas innan släckinsatsen inleds, att koldioxid var mer effektiv än kvävgas, att man som riktvärde för dimensionering av släckinsatsen bör utgå från en minsta totalmängd på $1,5 \text{ kg/m}^3$ bruttovolym samt att släckmedelsåtgången till stor del kommer att bero på utrymmets täthet.

2.1 Data från inträffade bränder

För att få en uppfattning om hur angivna dimensioneringsvärden från NFPA 850 respektive VTT stämmer med verkliga insatser gjordes en analys av några inträffade bränder där det, åtminstone till viss del, fanns uppgifter om gasförbrukning och inmatningstider.

Träpelletssilo i Luleå, 2005-08-05 [8]

Isolerad stålsilo med volymen 820 m^3 (Ø ca 8 m, höjd ca 16 m), fylld till ca 70 % (550 m^3 , 350 ton) med träpellets. Man beslöt att inertera silon med kvävgas för att sedan kunna genomföra en tömning. Ca 6 timmar innan gaspåföringen inleddes, tätades silons avluftning. Kvävgas påfördes i gasfas via silons ordinarie påfyllningsrör som mynnade i silotoppen. Gasbilen var fylld med 16 ton kvävgas vilken matades in under ca 40 timmar, dvs. med en genomsnittlig inmatningshastighet av ca 400 kg/tim vilket motsvarar en påföringshastighet av ca $0,5 \text{ kg/m}^3\text{tim}$. Tankbilen fick fyllas på nytt en gång under insatsen och totalt förbrukades 20 ton kvävgas, dvs. en total åtgång motsvarande ca 24 kg/m^3 . Silon tömdes långsamt utan större problem och detta var avslutat den 8/8. Som en följd av insatsen påpekas behovet av ett bättre detektionssystem samt att det borde finnas förberedelser gjorda för nödtömning samt gasanslutning.

Kolpulversilo på Gotland, 1990-01-25 [9]

Silo med volymen 300 m^3 , helt fylld (ca 155 ton) med kolpulver med en kornstorlek på 0,09 mm. Till silon fanns ett fast koldioxidsystem med en lagringstank innehållande 7 ton koldioxid. Larm erhöles om hög temperatur vid bottenkonan och strax efter noterades att det automatiska koldioxidsystemet löst ut. Fyra timmar senare startades inmatning av koldioxid via en provtagningsstuds under glödhärden. 3000 kg matades in under 3,5 timmar. Totalt användes 4100 kg koldioxid varav en del också påfördes via toppen. Den initiella inmatningen var ca 860 kg/tim vilket motsvarar en påföringshastighet av $2,9 \text{ kg/m}^3\text{tim}$ och den totala gasåtgången för hela insatsen motsvarade ca $13,7 \text{ kg/m}^3$. Silon tömdes sakta genom att pannan, som normalt eldades med gasol, ställdes om till koleldning.

Silo med kli-pellets, Malmö 1989-01-28 [10]

Betongsilo bestående av 14 celler, höjd 36 m. Cell 67 hade en volym på ca 300 m^3 och var fylld med ca 100 m^3 (60-70 ton) kli-pellets. Branden upptäcktes genom att hela bjälklaget ovanför cellen sprängts bort av en explosion. Släckinsatsen påbörjades genom fyllning av koldioxid via toppen i olika omgångar samtidigt som man försökte tömma silon. Efter problem med flera ”återantändningar” inleddes den 9/2 fyllning med förångad kvävgas via en lans genom silobotten i kombination med inertering av topputrymmet med koldioxid. Efter ytterligare en indikation på ökad pyrolysaktivitet påbörjades den 13/2 en sista och lyckad släckinsats där man under 2 dagar tillförde 5 ton kvävgas. Under den första kvävgasfyllningen (9-11/2) påfördes 3,1 ton kvävgas under netto 32,5 timmar, vilket motsvara en inmatning på 95 kg/tim, dvs. en påföringshastighet av $0,32 \text{ kg/m}^3\text{tim}$. Vid den sista insatsen (13-15/2) påfördes 5 ton under netto 37 timmar vilket motsvarar en inmatning av 135 kg/tim, dvs. en påföringshastighet av $0,45 \text{ kg/m}^3\text{tim}$. Den totala åtgången av kvävgas var således 8,1 ton vilket motsvarar 27 kg/m^3 . Utöver detta tillkommer en koldioxidmängd för fyllning via toppen på ca 5 ton (ej inräknat övrig koldioxidförbrukning före den 9/2) vilket motsvarar $16,7 \text{ kg/m}^3$. Den totala gasåtgången var således ca 44 kg/m^3 . Tömningen inleddes först efter att man konstaterat att silon var helt släckt.

2.2 Dimensioneringsunderlag för försöken

Baserat på uppgifterna från inträffade bränder och på att vår försökssilo förutsågs vara i princip helt tät beslöts att som utgångsvärde använda en påföringshastighet på ca 0,5-0,75 kg/m³tim vid försöken. Med en silovolym på 4,4 m³ innebar detta en inmatningshastighet av ca 2,2-3,3 kg/tim. Baserat på en totalåtgång på max 20 kg/m³ så innebar detta en åtgång på max ca 90 kg gas vid respektive försök.

3 Simuleringar med CFD-koden SMAFS

I projektet har, förutom ett antal inledande beräkningar, två fullständiga simuleringar genomförts av hela försöksförlopp. Den första simuleringen genomfördes tidigt i projektet, innan de experimentella insatserna påbörjats, och den senare genomfördes efter det att geometrin för själva huvudförsöken i det närmaste var helt fastställda. Detta innebär att simuleringarna är ”blinda”, dvs. att de inte kunnat korrigeras baserat på erhållna experimentella resultat. I båda fallen har simuleringarna utgått ifrån användning av 8 mm träpellets med en fukthalt på 8 %.

I den första simuleringen antogs silons diameter till 1,1 m och höjden 5,7 m. I botten fanns ett inlopp med diametern 10 cm och i silons topp en öppning på 22 cm. För att underlätta simuleringen fanns inget tomutrymme i silotoppen utan här antogs alltså att fyllnadshöjden var lika med silohöjden, 5,7 m. Båda öppningarna antogs vara centriskt placerade i botten respektive toppen. Tändkällan antogs ha en effekt på 460 W, vara cylinderformad med diametern 14 cm och reglerad så att den maximala temperaturen på dess yta uppgick till 400°C.

I den andra simuleringen, när den slutliga försöksuppställningen var mer definierad gjordes vissa modifieringar. Silons diameter sattes här till 1,0 m och fyllnadshöjden till 5,1 m. I detta fall antogs silotoppen vara helt öppen för att bättre motsvara förhållandet med det 0,9 m höga tomutrymme som fanns vid experimenten. Ventilationen i botten var centriskt placerad med en diameter av 10 cm men tillfördes genom ett rör 18 cm in i pelletsbädden, dvs. ungefär som i experimenten. Tändkällans effekt sattes till 778 W och dess maximala temperatur till 300°C.

Eftersom silon var helt cirkulär har simuleringarna utförts med ”halvsymmetri”. I den första simuleringen användes en beräkningdomän med 55x285 celler i den andra simuleringen användes 50x255 celler. Simuleringarna var upplösta med 1 sekunds tidssteg.

Resultaten av simuleringarna presenteras i kapitel 5.3. Ytterligare detaljer kring CFD-programmet och förutsättningarna för simuleringarna ges av Yan [11].

4 Försök

Försöken har genomförts i två serier. I den första serien genomfördes två förförsök med en kubisk låda med en volym på ca 0,5 m³ och i själva huvudserien genomfördes fyra försök i en betongsilo på ca 4,4 m³. Syftet med förförsöken var att verifiera att den tändkälla som användes fungerade enligt plan, samt att få en uppfattning om pyrolysens spridningshastighet så att instrumenteringen av huvudförsöken kunde optimeras. Det första försöket i huvudserien startades 2006-04-03.

Samtliga försök utfördes med 8 mm träpellets från Svensk Brikettenergi. Träpelletsen levererades 2006-02-27 i 16 kg plasticsäckar till SP Brandteknik. Materialets fukthalt bestämdes (2006-03-30) till 8,3 vikt-% på pellets tagna från en säck med märkningen "06 02 23 16:09". Materialets benägenhet för kemisk oxidation undersöktes med den s.k. "crossing-point" metoden. Denna undersökning redovisas i SP Rapport 2006:41 [12].

4.1 Förförsök

4.1.1 Uppställning

Försöken genomfördes med en kubisk låda med måtten 0,7 m x 0,7 m x 1 m, dvs. en volym på ca 0,5 m³. Lådan var tillverkad av obrännbara skivor (10 mm Promatect[®]-H), se Figur 1. I lådans botten respektive lock fanns vardera en öppning för att medge en viss ventilation. Avståndet mellan locket och pelletsbädden var ca 40-50 mm vid försöksstart.

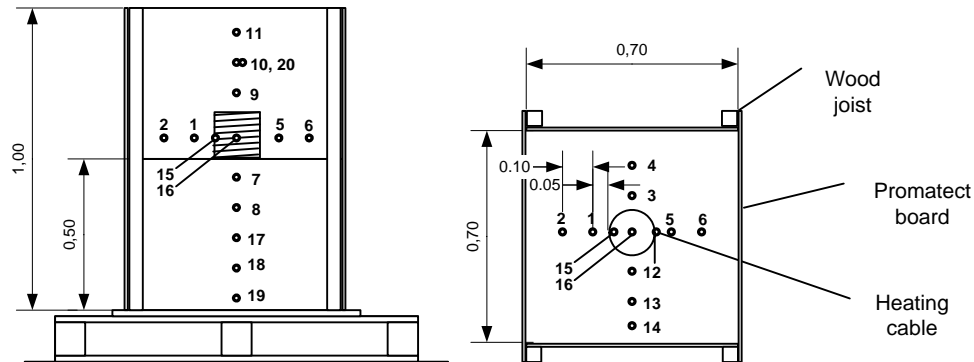


Figur 1 Foto av den låda, (ca 0,5 m x 0,5 m x 1,0 m) som användes vid förförsöken. På bilden har ännu inte locket lagts på plats.

I förförsöken användes två olika ventilationsförhållanden. I försök 1 hade tilluften sitt utflöde i centrum av lådans botten genom ett stålrör med 25 mm invändig diameter. Röret var ca 0,5 m långt och kunde även användas för att introducera inertgas i slutet av försöket. I lådans lock fanns ett hål med diametern 50 mm. I försök 2 ökades ventilationsöppningarna så att hålet i lådans botten var 80 mm i diameter och hålet i locket 160 x 160 mm. Öppningarna motsvarade i det första försöket 0,1 % respektive 0,5 % av lådans tvärsnittsarea medan de i försök 2 motsvarade 1 % respektive 5 % av tvärsnittsarean.

Lådan fylldes med 320 kg (20 säckar) träpellets och tändkällan placerades mitt i pelletsbädden såsom visas i Figur 2 nedan. För att kunna följa pyrolysförloppet placerades termoelement ut i pelletsbädden, dels i centrum över- respektive under tändkällan, dels horisontellt i nivå med centrum av tändkällan. I försök 1 användes 16 termoelement och i

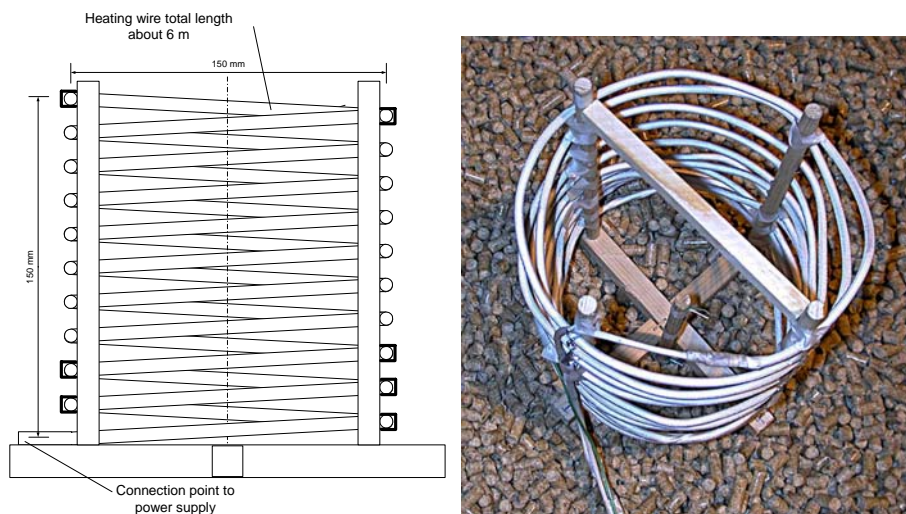
försök 2 ökades antalet till 20 termoelement. Dessa var av typ K där ledarna svetsades samman. Ledningsdiameter var 0,5 mm.



Figur 2 Skiss av låda som användes vid förförsöken. Termoelementsplacering avser den vid försök 2. Generellt sett var samtliga termoelement placerade 50 mm från värmespiralen och därefter med 100 mm inbördes avstånd.

4.1.2 Tändkälla

Som tändkälla användes en värmekabel av typ Winkler WK401/150/060. Denna ger en nominell uteffekt på 150 W/m och med en längd på 6 m innebar detta en maximal nominell uteffekt på 900W. Kabeln lindades upp på ett trästativ så att den bildade en cylinder med en diameter på ca 150 mm och en höjd på ca 150 mm. Ett termoelement monterades på värmekabel och med hjälp av en reglerutrustning kunde kabelns ytemperatur regleras genom att spänningen kopplades på respektive av. Tändkällan visas i Figur 3. Vid försöken ställdes temperaturen in på 300°C, vilket uppnåddes efter ca 10-15 minuter och därefter höll reglersystemet temperaturen med en noggrannhet på ca $\pm 1^\circ\text{C}$ ända tills pyrolysen i träpelletsen i sig själv gav upphov till högre temperatur. I praktiken tillfördes värme i sjunkande omfattning under den första timmen av försöket och tillförd effekt uppgick till mindre än 0,5 kWh.

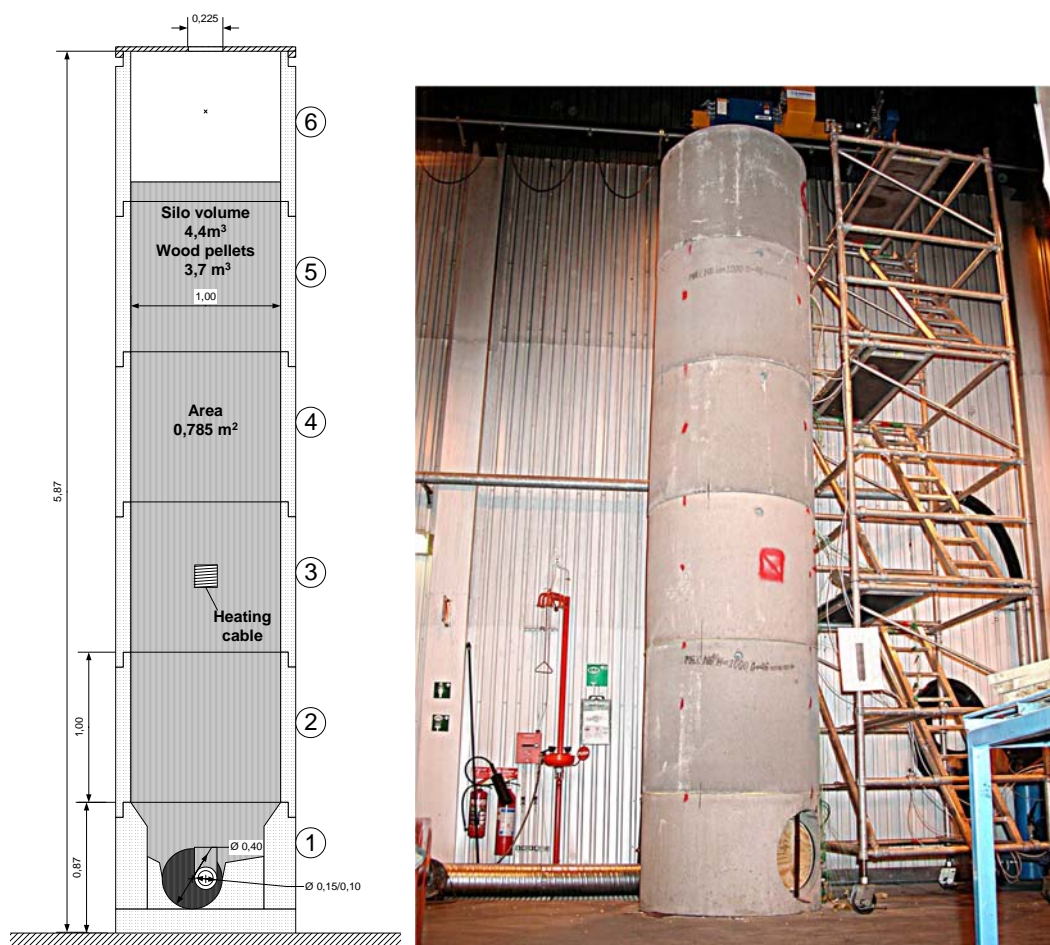


Figur 3 Skiss respektive foto av den värmekabel som användes som tändkälla.

4.2 Huvudserie

4.2.1 Uppställning

Försöken utfördes i en betongsilo med inledningsdiametern 1 m, en total höjd av ca 5,8 m och volymen 4,4 m³. Silokonstruktionen bestod av betongringar (typ MAX-brunn, Nordform Mark- och VA-System AB) avsedda för dagvattensystem. Bottensektionen till dessa brunnssystem är utformad med en tät botten och i detta fall med två anslutningsöppningar för 400 mm betongrör. Botten var också välvd för att undvika slamavlagringar. Detta medförde att botten i silon inte var helt plan och inte hade samma diameter som övriga brunnringar, se Figur 4. Båda anslutningsöppningarna i bottensektionen pluggades för att få denna helt tät. I den ena pluggen monterades dock ett 150 mm spirorör som avslutades inne i silon med en 90° böj uppåt och med en perforerad plåt i ändan för att förhindra pellets att komma in i röret. Totalt hade plåten ca 325 hål med diametern 5 mm vilket ger en inloppsarea på ca 0,0064 m². I den yttre ändan av röret monterades en förminskning så att öppningen var 100 mm (0,00785 m²). Spiroröret tjänade som ventilationsöppning under ”förbrinntiden” och vid släckförloppet monterades ett lock på inloppet med en slanganslutning för inertgasen.



Figur 4 Utformning och uppställning av försökssilo som bestod av en bottendel (Nivå 1) och fem brunnringar (Nivå 2-6). Spirokanalen är monterad i motsatt röran-slutning och är inte synlig på fotografiet.

Silon fylldes med ca 2400 kg pellets (150 säckar) vilket motsvarar en volym på 3,7 m³. När silon var fylld var det fria utrymmet i toppen ca 0,9 m. Toppen av silon täcktes med ett lock försett med en ventilationsöppning med diametern 225 mm. Detta innebär att ventilationsöppningarna i botten respektive i toppen motsvarade 0,8 % respektive 5 % av silons tvärsnittsarea.

Genom att silokonstruktionen bestod av cementringar möjliggjorde detta att silon kunde monteras under pågående fyllning. Allt eftersom silon fylldes med pellets placerades termoelement och tändkälla ut på avsedda platser, se Figur 5. För att undvika läckage i skarvarna tätades dessa med isoleringsmaterial (fönsterdrev). Vid demonteringen lyftes cementringarna av på motsvarande sätt vilket också gav en bra möjlighet att studera pelletsinnehållet och pyrolysens utbredning efter försöket, se kapitel 5.2.5.

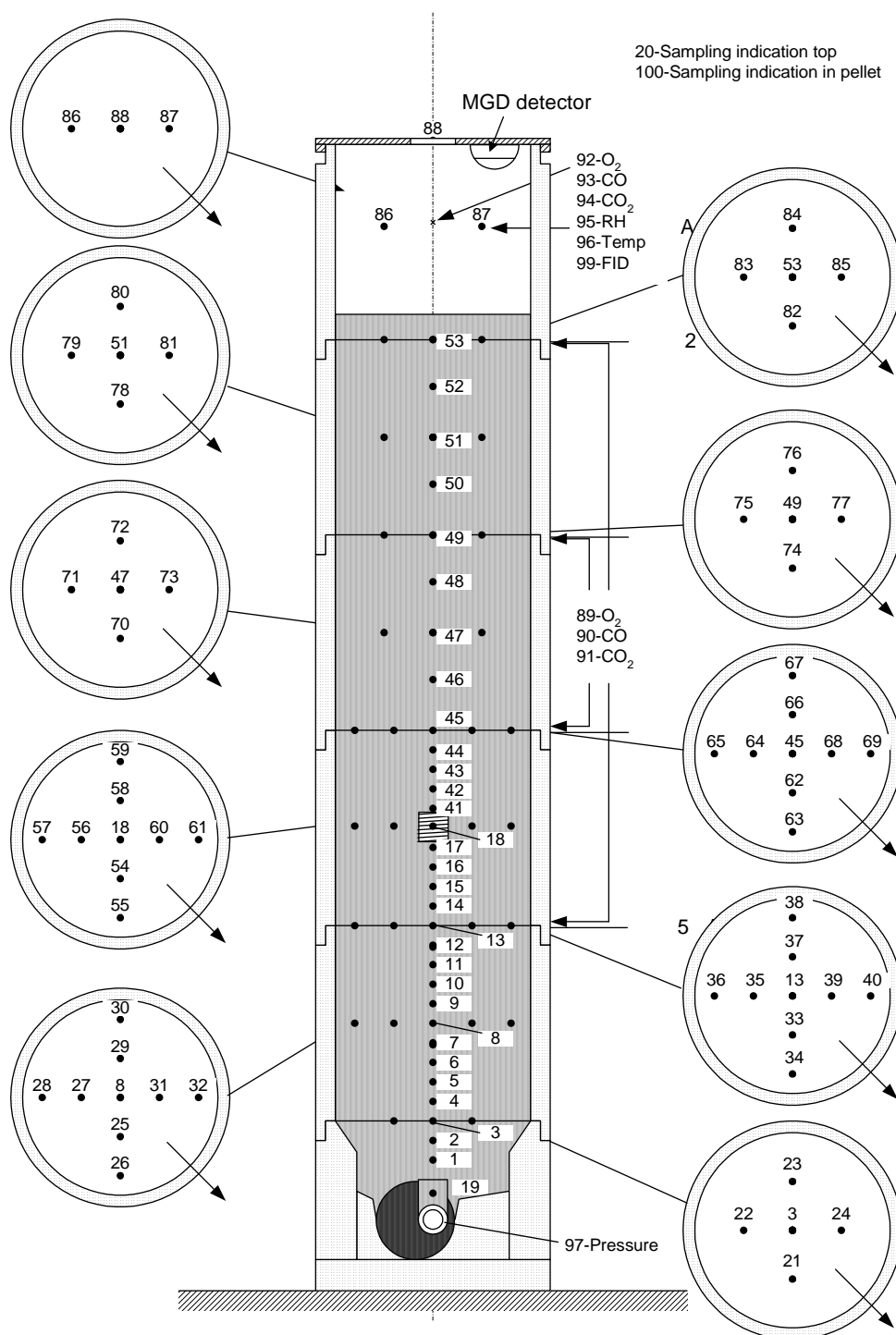


Figur 5 Fotografier av försöksuppställning under pågående montering/fyllning. Som bränsle användes 3,7 m³ träpellets. Bilderna visar (1) spirokanal för ventilation och inertgasinföring, (2) gasinlopp med bottensektion fylld med pellets, (3) termoelementstapel i centrum och radiellt, (4) tändkälla med radiella termoelement, (5) toppsektionen av silon samt (6) locket på silotoppen med öppning och Firefly MGD branddetektor.

4.2.2 Instrumentering, mätningar

4.2.2.1 Temperaturmätningar

För att kunna följa händelseförloppet inne i silon både under förbrinntiden och under efterföljande släckförlopp mättes temperaturen i träpelletsen på drygt 80 positioner med 10 sekunders intervall, se Figur 6. Dels fanns en stapel med termoelement monterade i silons centrum från 0,1 m ovanför ventilations-/gasinloppet i silobotten till ca 0,1 m under träpelletsytan i silotoppen. Avståndet mellan termoelementen i höjddled var 0,1 m upp till 0,5 m ovan tändkällan, därefter var det inbördes avståndet 0,25 m. På varje 0,5 m placerades också termoelement horisontellt ut från centrum i fyra olika riktningar. I de flesta positioner var det åtta termoelement, två i vardera riktningen 0,2 m respektive 0,4 m från centrum. Från och med 1 m ovanför tändkällan var det dock bara ett termoelement i vardera riktningen, 0,25 m från centrum. Utöver dessa termoelement inne i pelletsen fanns ett termoelement i ventilations-/gasinloppet, två i tomtrymmet i silotoppen och ett i ventilationsöppningen i silotoppen.

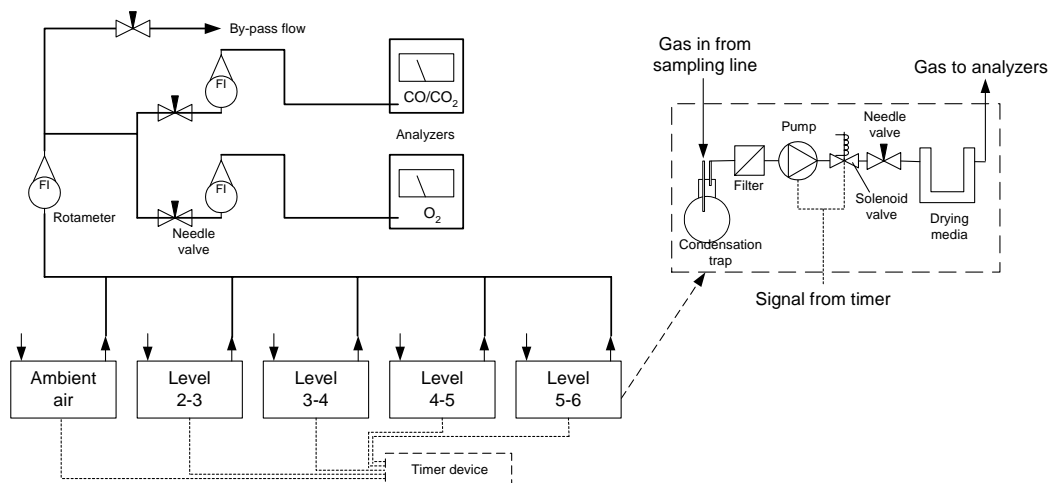


Figur 6 Placering av termoelement samt lokalisering av samplingspositionerna för gasanalyserna. Numrering avser kanalnummer i datalogg-systemet.

4.2.2.2 Gasanalyser

Utöver temperaturen registrerades också halten av syrgas (O₂), koldioxid (CO₂) samt kolmonoxid (CO), både i silons topp och på fyra olika positioner i centrum av pelletsbulken. I silotoppen mättes även halten oförbrända kolväten (FID) samt relativ fuktighet (RH). En Multi-Gas Detektor, MGD, tillverkad av företaget Firefly, var också placerad i toppen av silon. Se Figur 6.

För gasanalysen inne i pelletsen användes en uppsättning instrument (O_2 och CO/CO_2) för alla fyra mätpunkterna, varför samplingsgasen från de olika utsugspunkterna leddes till instrumenten via ett ventilsystem, se Figur 7. För att minimera påverkan av gasrörelser inuti pelletsbulken på grund av utsugna gaser till analysinstrumenten, genomfördes dessa mätningar intermittert. Evakueringspumparna aktiverades i sekvenser om 1.5 min per mätpunkt, 2 ggr/timma, enligt ordningen: avstängt → omgivningsluft → nivå 2-3 → nivå 3-4 → nivå 4-5 → nivå 5-6 → avstängt. För att kunna identifiera aktuell analysposition vid utvärdering av resultaten loggades dessutom en unik ”styrsignal” för varje position.



Figur 7 Skiss av gaspumpsarrangemang och instrument för gasanalyser inne i silon.

I silotoppen var gaspumpen kopplad till ett O_2 - respektive CO/CO_2 -instrument och aktiverades i sekvenser om 3 minuter, 5 ggr per timma. Anledningen till den intermitterta provtagningen var här främst att man ville undvika att byta torkmedel till instrumenten för ofta. Provtagningsystemet var uppbyggt efter samma princip som det i pelletsbulken (Figur 7), med skillnaden att man bara hade en provtagningspunkt i silotoppen. Oförbrända kolväten (THC) mättes kontinuerligt i silotoppen med en THC-analysator (flamjonisationsdetektor, FID). THC-analysatorn tog provgasen genom ett uppvärmt filter och en 7 m lång uppvärmd teflonslang (båda $180^\circ C$). Den relativa fuktigheten mättes kontinuerligt i silotoppen.

Ytterligare två typer av gasanalyser utfördes under några av försöken. Under försök 3 och försök 4 togs gasprover ut från silotoppen på Tenaxrör för analys av individuella oförbrända kolväten, s.k. flyktiga organiska ämnen (VOC). Den huvudsakliga analysen utfördes sedan på Växjö Universitet, där man gjorde en kvalitativ/semi-kvantitativ analys med GC-MS teknikⁱ. Några få prover analyserades också på SP Kemi- och Materialteknik där man hade möjlighet att utföra kvantitativ analys med GC-MS/FID teknikⁱⁱ. Tenax-provtagning är främst lämpad för kolväten från C_6 och uppåt. Mycket lätta kolväten innefattas inte i analysen.

Under försök 2 och försök 4 togs gasprover ut från silotoppen, respektive silobulken, i Tedlarpåsar (påse gjord av ett gastätt och ickereaktivt polymermaterial) för analys av bl a vätgas (H_2). Analysen utfördes på SP Kemi- och Materialteknik med GC-TCDⁱⁱⁱ teknik.

ⁱ GC-MS: Separation med gaskromatograf följt av detektion med mass-spektrometer [21].

ⁱⁱ GC-MS/FID: Separation med gaskromatograf där de separerade ämnena splittas till MS för detektion och till en FID (flamjonisationsdetektor) för kvantifiering [21].

ⁱⁱⁱ GC-TCD: Separation med gaskromatograf följt av detektion med termisk konduktivitets detektor [21].

Anledningen till analysen var att man ville undersöka risken för bildande av brännbar vätgas genom den s.k. vattengasreaktionen vid t.ex. injicering av vatten i silons pyrolyszon.

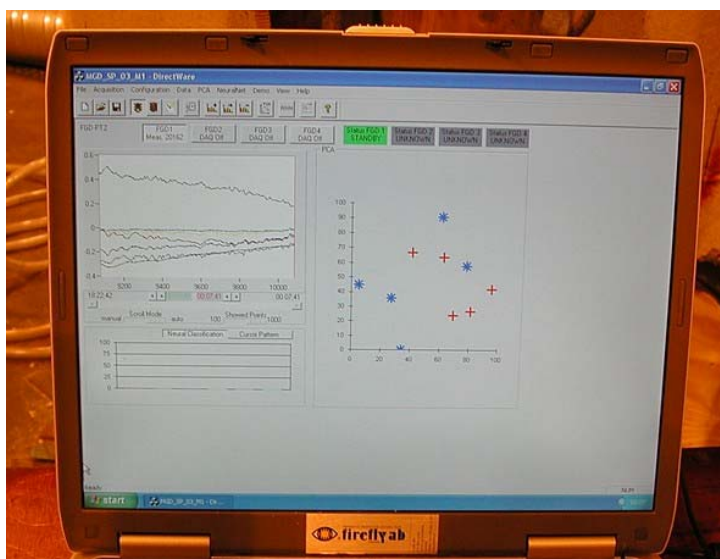
En mer detaljerad beskrivning av provtagning och analys för VOC ämnen och vätgas ges i samband med redovisningen av resultaten i kapitel 5.2.6.

4.2.2.3 Detektionsutrustning

MGD detektorn (Firefly) som var placerad i silotoppen (se Figur 8) är avsedd för tidig branddetektering samt för övervakning av skadliga och farliga ämnen i både industriella och publika applikationer [13]. Arbetsprincipen är baserad på att efterlikna människans luktsinne på elektronisk väg. MGD detektorn var ansluten till en PC som loggade mätvärden från MGD detektorn (se Figur 9). Tekniskt mäter MGD-detektorn den aktuella gassammansättningen via en matrisuppbyggd kemisk gassensor (MOS thick film technology), där respektive matrisområde på gassensorn är känsliga för olika typer av gaser.



Figur 8 MGD-detektorn (orange) monterad genom taket på silotoppen.



Figur 9 Användargränssnittet på mät datorn till MGD-detektorn.

MGD detektorn reagerar snabbt på de kemiska förändringar som sker i ett tidigt skede av en brand. Detektorn jämför hela tiden den aktuella gasprofilen mot de olika mönster av profiler detektorn kan klassificera. Detta gör att detektorn kan särskilja på riktiga brandrelaterade gaser från andra i gaser luften, som kan komma av olika typer av störningar/fenomen såsom t ex förbränningsavgaser från ett dieseldrivet fordon.

Detektorn anpassar sig till långsamma förändringar av gassammansättningen som kan förekomma, t ex säsongsvariationer. Snabba förändringar däremot, som ett startförlopp på en brand, reagerar detektorn för. Med hjälp av mönsterigenkänning via neurala nätverk med statistiska parametrar, verifierar detektorn aktuell gassammansättning. Vid en för stor avvikelse från ”normal profil”, samt att denna avvikelse klassificeras som en av i dagsläget två klassificeringar, öppen brand samt glödbbrand, och inte en störning, ges utgående signal. Utgående signal kan vara i form av ett förlarm eller ett skarp larm, brandlarm.

På grund av det neurala nätverket är detektorn självlärande, dvs. kompensation sker med vad som tidigare har uppmäts. De statistiska parametrar som används som styrparametrar till de neurala nätverken har lärts dels via definitioner av typiska gassammansättningar vid typiska brandscenarier och dels via typiska gassammansättningar vid störningar som inte ska klassas som en öppen respektive glödbbrand. Resultaten från mätningarna med MGD detektorn redovisas i kapitel 5.2.3.

4.2.3 Utrustning för inertering-släckning

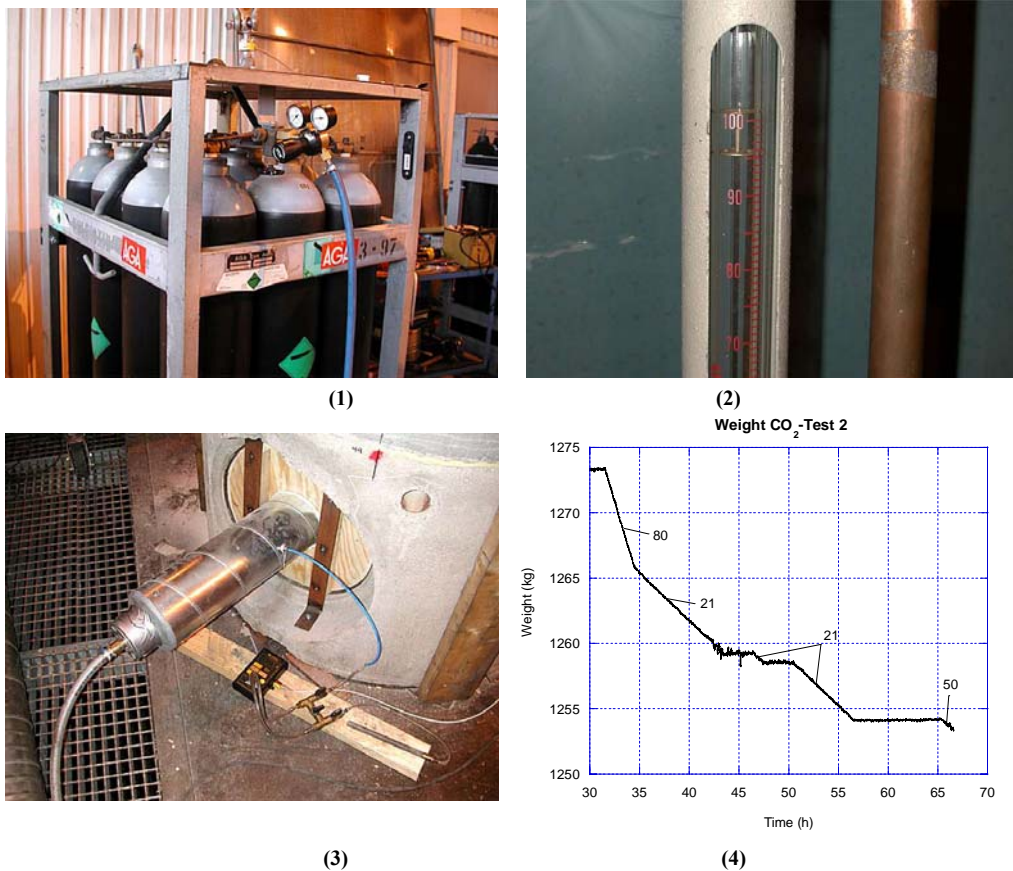
I samtliga fall matades släckgasen (kvävgas respektive koldioxid) in via ventilationsöppningen i silobotten. Ett tättslutande lock med en slanganslutning monterades på ventilationsröret så att släckgasen kunde föras in denna väg. Samtidigt innebar det att tilluften till silon ströps helt och den enda ventilationsmöjligheten var via öppningen i silotoppen.

Baserat på den utvärdering av tidigare erfarenheter som beskrivits i kap 2.2 användes komprimerad gas i form av flaskpaket, vilka ställdes till förfogande av AGA. Vid släckningen med kvävgas användes ett paket med 12 flaskor (komprimerad till ca 200 bar), totalt innehållande nominellt 120 m³ fri gas (ca 100 kg). Även koldioxiden förvarades i ett flaskpaket med totalt 12 flaskor, totalt innehållande 450 kg koldioxid (ca 250 m³ fri

gas). I båda fallen togs gasen ut via en reducerventil där utgående gastryck reglerades till ca 1,5 bar. Gasen leddes därefter till en rotameter försedd med en strypventil på dess inlopp. Efter rotametern leddes gasen i en 25 mm slang till slanganslutningen på ventilationsröret i silon, se Figur 10. Eftersom koldioxiden förekommer i kondenserat tillstånd i flaskorna måste denna förgasas kontinuerligt. Eftersom gasflödet var lågt i förhållande till den totala flaskvolymen kunde detta ske utan någon extern förångarutrustning. För att undvika isbildning på reducerventilen användes dock en mindre byggfläkt som blåste varm luft förbi reducerventilen och toppen av flaskpaketet.

Rotametern som användes var kalibrerad för luft. För att få specifika data vid användning av kvävgas respektive koldioxid och med den matningsslang som var monterat efter rotametern genomfördes en första kapacitetskontroll innan försöksserien startades. En enskild gasflaska med kvävgas respektive koldioxid placerades på en vågutrustning varefter viktminskningen mättes vid olika rotameterinställningar under en kortare tidsperiod. Dessa försök visade att 100 skaldelar på rotametern motsvarade ca 2,75 kg/tim, dvs. 0,63 kg/m³tim vilket låg väl inom det spann som tidigare definierats som rimligt. För att nå motsvarande kapacitet med koldioxid indikerade försöken att detta motsvarades av 80 skaldelar.

För att få en noggrannare uppgift om faktisk inmatningshastighet under försöken hängdes hela flaskpaketet upp i en lastcell så att viktminskningen kunde registreras under en lång tidsperiod, se Figur 10, (4) respektive Tabell 1.



Figur 10 Gasinmatningssystemet bestod av: (1) flaskpaket bestående av 12 flaskor innehållande kvävgas alternativt koldioxid, (2) en rotameter för att kontrollera gasflödet, (3) slangmatning till ventilationsröret i silobotten. (4) Faktisk inmatningshastighet bestämdes genom att väga hela flaskpaketet under pågående försök.

Tabell 1 Faktisk inmatningshastighet och påföringshastighet under försöken.

Relativ inmatning (%)	Kvävgas			Koldioxid		
	Inställning rotameter (skaldelar)	Kapacitet (kg/tim) resp. (m ³ /tim)*	Påföringshastighet (kg/m ³ /tim) **	Inställning rotameter (skaldelar)	Kapacitet (kg/tim) resp. (m ³ /tim)*	Påföringshastighet (kg/m ³ /tim) **
25	25	0,69 / 0,59	0,16	21	0,72 / 0,39	0,16
50	50	1,37 / 1,18	0,31	42	1,39 / 0,76	0,32
100	100	2,75 / 2,37	0,63	80	2,54 / 1,39	0,58

*) Specifik volym vid 1,013 bar och 21°C: Kvävgas 0,862 m³/kg, Koldioxid 0,547 m³/kg [14].

**) Baserat på silons bruttovolym 4,4 m³.

4.2.4 Försöksprogram

Totalt genomfördes fyra försök i den 4,4 m³ stora silon. I försök 1-3 var förutsättningarna i princip helt identiska under förbrinntiden, dvs. värmekabeln initierades och därefter fick pyrolysen inne i silon utvecklas helt fritt med öppen ventilation både i silons botten respektive topp som beskrivits i kapitel 4.2, fram till dess att termoelement nr 7, 1,1 m under tändkällans centrum, nåtts av pyrolyszonen, dvs. efter drygt 30 timmar.

Släckningstaktiken som undersöktes i de olika försöken var följande:

- Försök 1, inertering enbart med kvävgas.
- Försök 2, inertering enbart med koldioxid.
- Försök 3, här provades en kombination av skumbeläggning av träpelletsen i silotoppen, ingen ventilation via silobotten samt aktiv inertering med kvävgas.
- Försök 4, här vidtogs vissa åtgärder även under förbrinntiden, bl a injicering av luft via gasinmatningssystemet i silobotten för att studera olika möjligheter att förbättra möjligheten till en snabb detektion. Detta innebar att släckningen genomfördes i flera sekvenser, både med kvävgas och med koldioxid.

Mera detaljer kring varje försök framgår i kapitel 5.2.

Försöken tilläts pågå i totalt ca 65 timmar för att få en bild av inverkan på temperaturerna och gassammansättningen inne i silon under en längre tid. Efter detta demonterades försökssilon för att på ett kontrollerat sätt kunna verifiera pyrolyszonens utbredning, etc. Under släckningens gång varierades inmatningshastigheten av inertgaserna och i vissa fall gjordes avbrott i inmatningen för att studera gasens förmåga att bibehålla inert miljö i silon.

5 Resultat

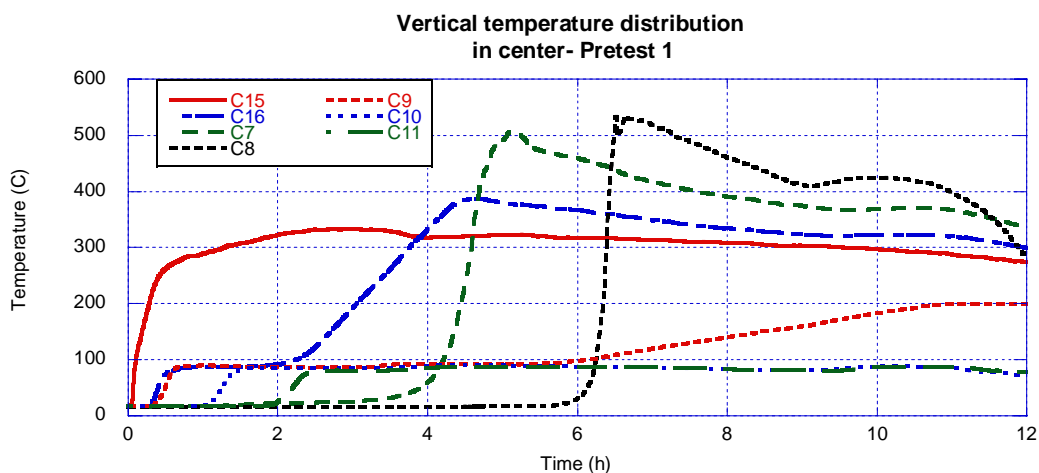
I följande kapitel redovisas resultaten från förförsöken, huvudförsöken samt simuleringarna. Presentationen av huvudförsöken har dessutom delats upp så att förbrinntid, släckfas respektive tömning/rivning av silon efter varje försök redovisas samlat. Därefter redovisas resultaten av simuleringarna och jämförs med experimenten.

Ytterligare detaljinformation i form av temperaturdiagram samt resultat från gasanalyser redovisas i Annex 1.

5.1 Förförsök

Vid försöken initierades värmekabeln 1:30 (min:s) efter start av temperaturmätningen. Efter mindre än 10 minuter nådde värmekabeln den inställda temperaturen på 300°C vilket innebar att termostatregleringen trädde in och drog ner inmatad effekt. Efter ca 1 tim hade termoelementet placerat vid sidan av kabeln (TC15) nått 300°C och vid denna tidpunkt var pyrolysisprocessen självgående och i princip matades ingen ytterligare energi in via värmekabeln, se Figur 11. Temperaturen inne i centrum av tändkällan (TC 16) nådde efter 30 min ca 90°C och planade sedan ut på denna nivå vilket antyder att det pågick en uttorkningsprocess. Efter drygt 2 timmar steg temperaturen åter inne i centrum av tändkällan och efter drygt 4 tim respektive 6 tim kunde man notera en temperaturhöjning på termoelementen under tändkällan (TC 7, 8) vilket indikerade att pyrolyszonen vandrade nedåt. Efter drygt 6 timmar ökade temperaturen 50 mm ovanför tändkällan (TC 9) sakta till max 200°C medan övriga termoelement ovanför tändkällan ej översteg 100°C under hela försöksperioden.

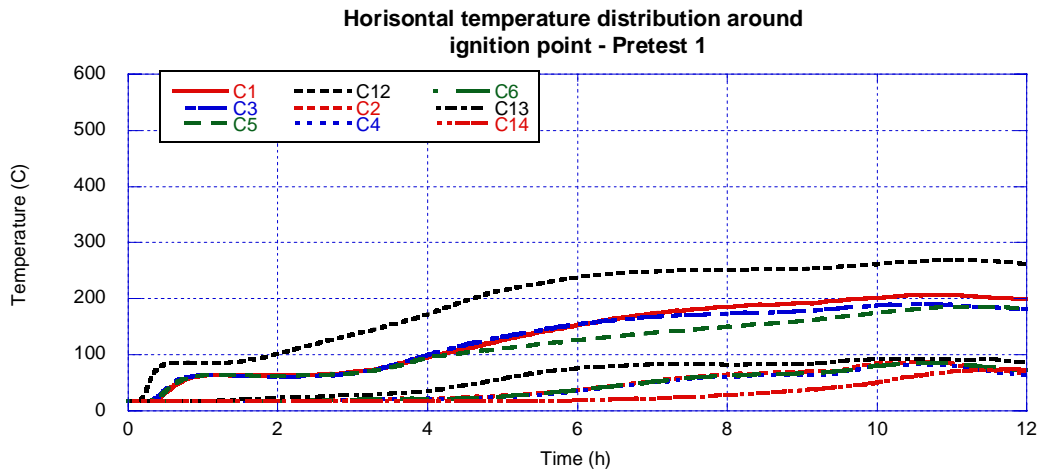
Resultaten indikerade således att pyrolyszonen bredde ut sig nedåt medan fuktvandringen gick uppåt. Detta var också tydligt då pelletsen på ytan svällde och föll sönder på grund av kondenserande vattenånga. Detta medförde att ventilationsöppningen i locket tätnade varför locket höjdes efter drygt 9 timmar så att det blev en springa på ca 40 mm runt om kanten. Vid tiden ca 10:48 tim:min matades kvävgas in i botten av lådan vilket kan noteras på några termoelement. Försöket avbröts efter ca 12 timmar.



Figur 11 Vertikal temperaturfördelning i pelletsen under förförsök 1.

Försöket visade också att utbredningen av pyrolyszonen i horisontell riktning var relativt begränsad, se Figur 12. Termoelementen 50 mm utanför värmekabeln nådde efter ett antal timmar över 100°C medan övriga termoelement ytterligare längre ut aldrig överskred 100°C. Temperaturmätningen visade också att pyrolyszonen drog sig åt ett håll

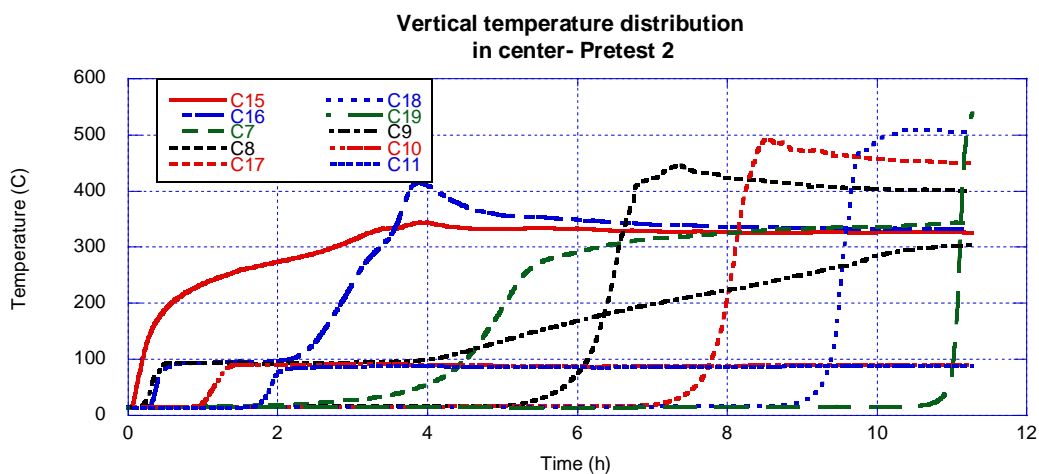
och involverade TC 12 i ett tidigare skede än övriga termoelement på samma avstånd och detta kunde också bekräftas när lådan tömdes på pellets efter försöket.



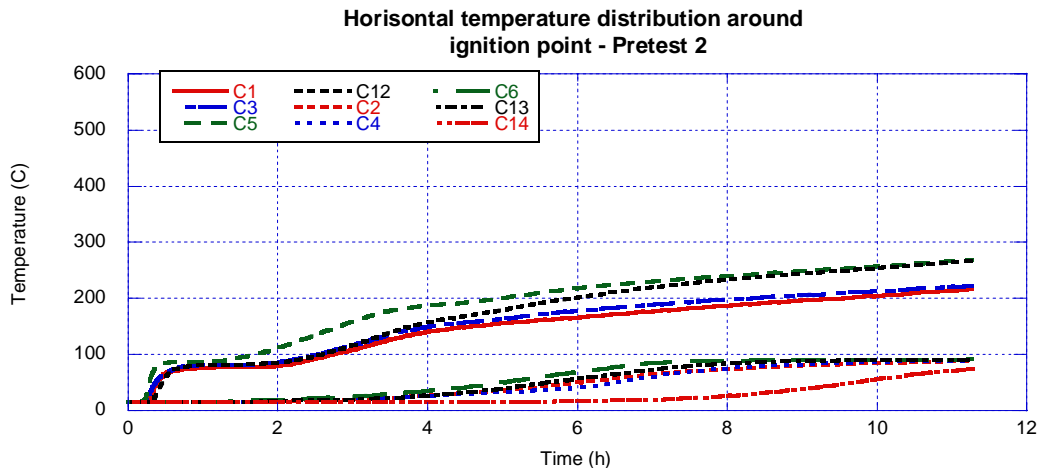
Figur 12 Horisontell temperaturfördelning i pelleten under förförsök 1.

Baserat på resultaten från det första förförsöket beslöts att flytta upp tändkällan något så att det gav utrymme för ytterligare tre termoelement (TC 17, 18, 19) under denna. På detta sätt kunde en bättre mätning erhållas på pyrolyszonens utbredningshastighet. För att verifiera att termoelementstråden inte påverkades av fukten i pelleten placerades ett mantlat termoelement (TC 20) parallellt med ett termoelement (TC 10) ovanför värmekabeln.

Som framgår av Figur 13 - Figur 14 så gav förförsök 2 i princip samma resultat som i det första försöket. Pyrolyszonen vandrade nedåt med en relativt konstant hastighet medan det endast erhöles en fuktvandring uppåt där temperaturen aldrig översteg 100°C förutom på det termoelement som ligger alldeles ovanför tändkällan. Utbredningen i sidled var begränsad och det var bara termoelementen på 50 mm avstånd från värmekabeln som överskred 100°C. Det noterades heller ingen skillnad mellan termoelementstråden och det mantlade termoelementet.



Figur 13 Vertikal temperaturfördelning i pelleten under förförsök 2.



Figur 14 Horisontell temperaturfördelning i pelletsen under förförsök 2.

Baserat på temperaturmätningarna gav också förförsök 2 ett bra mått på utbredningshastigheten av pyrolyszonen. Som referens valdes att ta tidpunkten när respektive termoelement passerade 100°C och baserat på avståndet mellan termoelementen (0,1 m) så ger detta en genomsnittlig pyrolyshastighet på 0,06 m/tim efter ”uppstartningsförloppet” på ca 4,5 tim. Även om antalet termoelement var begränsat i förförsök 1 så indikerar detta på en pyrolyshastighet på knappt 0,05 m/tim. Den något lägre hastigheten kan bero på de mindre ventilationsöppningarna i det första försöket.

5.2 Huvudserie

Erfarenheterna från förförsöken användes för detaljplanering och instrumentering av huvudförsöken. Försöken visade att värmekabeln fungerade väl som tändkälla och att tillförd energi var mycket begränsad och bedömdes därför inte påverka efterföljande pyrolysförlopp.

Den viktigaste erfarenheten var att vi primärt kunde förvänta en spridning av pyrolysen nedåt. Detta var också något som bekräftades av den första simuleringen som gjordes vid LTH. Värmekabeln placerades därför ungefär mitt i silon för att medge en maximal utbredning av både ”pyrolyszonen” och ”fuktzonen”. Temperaturmätningarna var också det primära sättet att följa utvecklingen av försöket då det inte gavs möjlighet till några visuella observationer. Temperaturmätningarna hade därför en mycket stor betydelse, både under det pågående försöket och för den mera grundläggande kunskapen om pyrolysförloppet och resultaten presenteras i kapitel 5.2.1.

Det tomma utrymmet i silotoppen var i praktiken det enda stället där man hade möjlighet att detektera en begynnande brand. Här mättes därför temperatur, luftfuktighet samt gasammansättning. Som komplement monterades också en branddetektor typ MGD från Firefly i locket ovanpå silon.

Lokaliseringen av gasanalyserna inne i pelletsen förlades primärt uppåt med en samplingspunkt under och fyra samplingspunkter ovanför värmekabeln, då en vertikal gasströmning genom pelletsen förväntades. Resultaten från gasanalyserna i pelletsbulken respektive i toppen presenteras i kapitel 5.2.2 respektive 5.2.3.

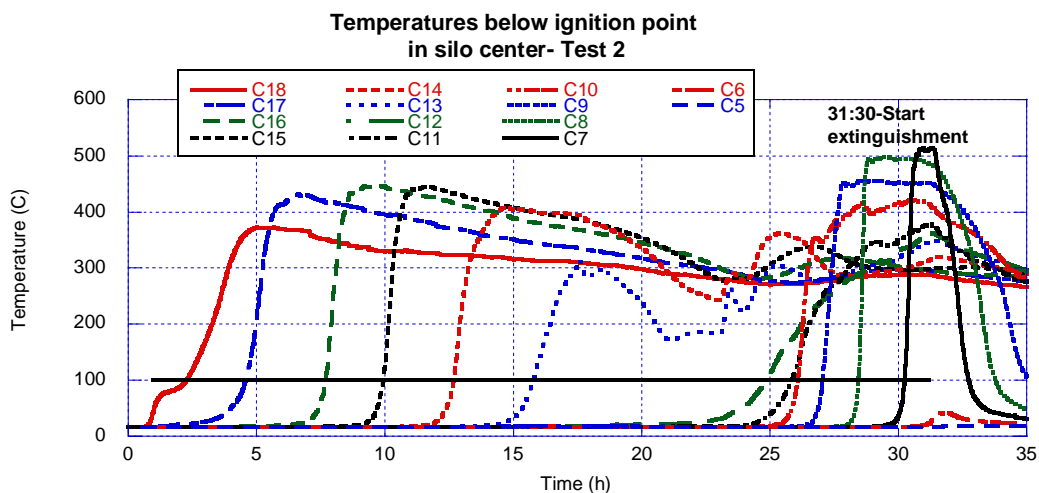
Förutsättningarna och resultaten av genomförda släckinsatser redovisas i kapitel 5.2.4. De generella observationer som gjordes i samband med demonteringen och tömningen av silon efter respektive försök redovisas i kapitel 5.2.5.

5.2.1 Temperaturmätningar - utbredning av pyrolys och fukt-vandring

Siloförsöken bekräftade till stora delar de observationer som gjordes i samband med förförsöken, dvs. att pyrolyszonen sprider sig nedåt medan det i huvudsak sker en fukt-vandring uppåt.

Spridningen av pyrolyszonen registrerades primärt med hjälp av de termoelement som var placerade i silons centrum. I Figur 15 redovisas temperaturen från försök 2 hos de termoelement som var lokaliserade i centrum av värmekabeln och nedåt (TC 18-5) under de första 35 timmarna, dvs. hela förbrinntiden och den begynnande delen av släckinsatsen (se vidare kapitel 5.2.4.2). I dessa försök startades mätningen 30 minuter innan värmekabel kopplades in för att få bakgrundsdata och chans att kontrollera alla instrument. Som framgår av Figur 15 så passerar pelleten 100°C i tändkällans centrum (TC 18) efter knappt 2,5 tim och därefter kommer temperaturstegringen nedåt i silon i relativt jämn takt. Efter drygt 15 timmar tycks dock pyrolyshintensiteten avta och alla temperaturer sjunker fram till ca 23-24 timmar då intensiteten tilltar igen och alla berörda termoelement börjar registrera ökande temperatur. Spridningen nedåt tar ny fart och mellan 25-30 timmar kan man notera ett något kortare tidsintervall mellan temperaturstegringen hos termoelementen, dvs. pyrolyshastigheten har ökat. Man kan också notera att temperaturen har stigit i pyrolyszonen för varje termoelement som den passerar.

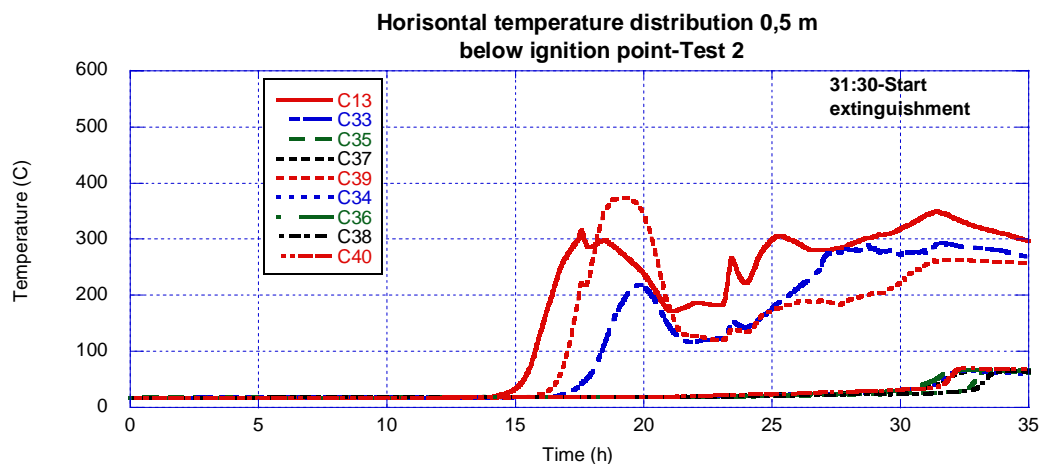
I försök 1-3 valdes termoelement nr 7, lokaliserat 1,1 m under centrum av värmekabeln som referenspunkt för att påbörja släckningen. Släckningen inleddes när temperaturen stabiliserats på sin högsta temperatur. Som framgår av Figur 15 uppgick då temperaturen hos TC 7 till drygt 500°C och släckningen inleddes vid tiden 31,5 tim (se vidare kapitel 5.2.4.2).



Figur 15 Temperaturen i centrum av silon, under tändkällan (Test 2). TC 18 var placerat i centrum av tändkällan, övriga termoelement var lokaliserade med 0,1 m inbördes avstånd. 100°C användes som referens temperatur för att beräkna pyrolyshastigheten nedåt i silon.

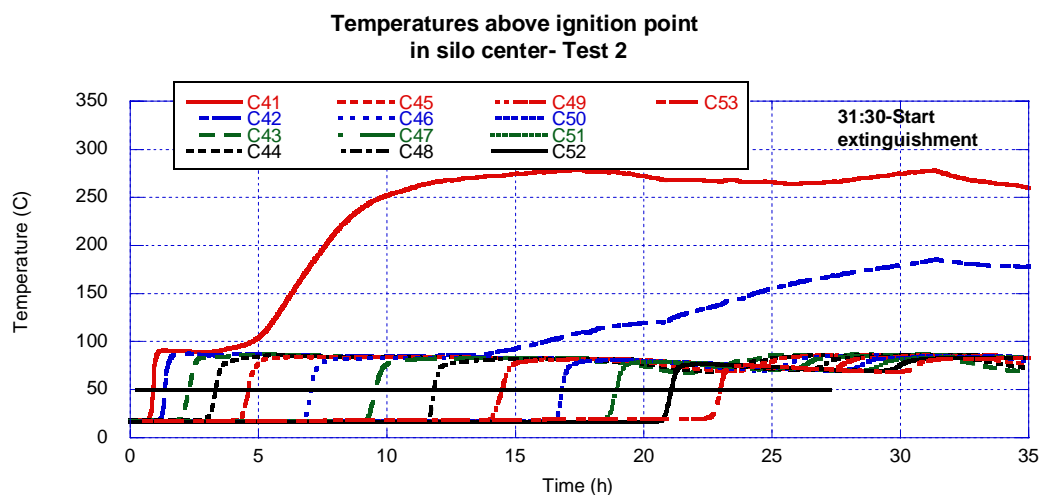
Försöken bekräftade också att pyrolyszonens spridning i sidled var marginell vilket innebar att den i princip hade en cylinderform med en diameter på ca 0,4-0,5 m. Gränss-zonen mot opåverkad pellets var relativt skarp, i storleksordningen max 0,1 m mellan pellets fullt involverad i pyrolyszonen och pellets som i princip var helt opåverkad (se vidare kap 5.2.5-tömning). Termoelementen lokaliserade 0,2 m från centrum låg precis i

gränsszonen där vissa kom in i pyrolyszonen medan andra låg utanför, se Figur 16. Detta berodde på att pyrolyszonen fick en svag dragning åt ena sidan, eventuellt beroende på att ventilationsinloppet i silons botten inte var exakt centrerad i försök 2-4. Termoelementen 0,4 m från centrum (0,1 m från siloväggen) var med några få undantag helt opåverkade.



Figur 16 Temperaturen i horisontell led 0,5 m under tändkällan. TC 13 var lokaliserad i centrum av silon medan TC 33, 35, 37, 39 var lokaliserade 0,2 m från centrum och TC 34, 36, 38, 40 var 0,4 m från centrum.

Temperaturfördelningen i silon från tändkällan och uppåt i silon redovisas i Figur 17. Temperaturen planar ut runt 90°C inledningsvis för att sedan sjunka något ju längre upp i silon värmevågen kommer. Det är endast TC 41, placerat precis ovanför värmekabeln och TC 42, lokaliserat ytterligare 0,1 m högre upp i silon, som överstiger 100°C. Att temperaturen inte överstiger 100°C tyder på att det sker en värme och fuktvandring uppåt i pelletsen vilket väl överensstämmer med förförsöken. Jämfört med värmevågen nedåt i silon så sker transporten uppåt med en högre och något jämnare takt.

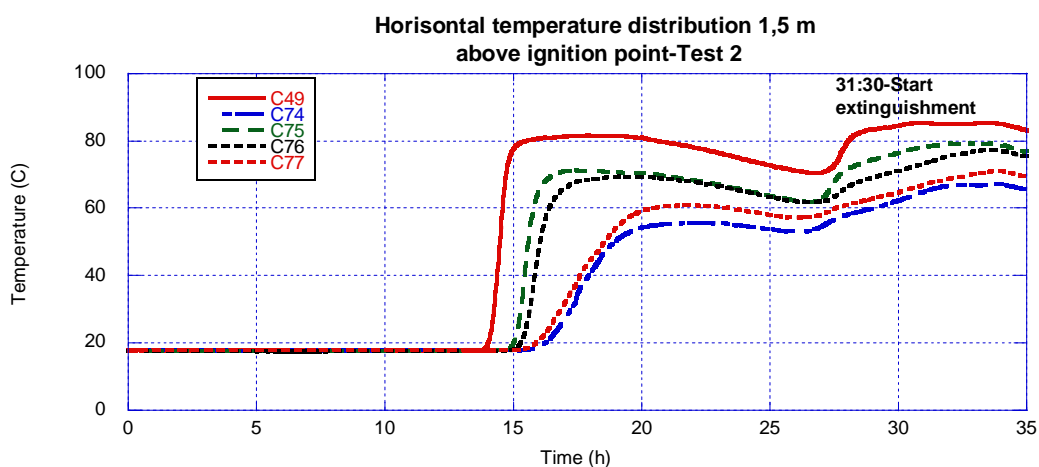


Figur 17 Temperaturen i centrum av silon ovanför tändkällan. TC 41 var lokaliserad 0,1 m ovanför tändkällans centrum (och TC 18). TC 41-45 var lokaliserade med ett inbördes avstånd av 0,1 m, medan avståndet mellan termoelementen därefter (TC 45-53) var 0,25 m. 50°C användes som referenstemperatur för att beräkna hastigheten på fuktvandringen uppåt i silon.

Som framgår av Figur 17 sker det ingen förändring i förloppet runt 15 till drygt 20 timmar som kunde noteras för pyrolysen nedåt i silon. Utgående från en referens-

temperatur på 50°C kan man konstatera att värmevågen passerade TC 53, lokaliserat ca 0,1 m under pelletsytan i silon, efter knappt 23 tim. Man kan alltså här konstatera att denna tidpunkt stämmer väl med tiden för den på nytt tilltagande pyrolysisintensiteten.

Ovanför tändkällan var temperaturfördelningen i horisontell led mer jämt fördelad, se Figur 18. Temperaturen var visserligen lägre ut mot siloväggen men det fanns inga så skarpa temperaturgränser som för pyrolyszonen. Man ser också att det är en viss tidsförskjutning mellan temperaturhöjningen i centrum och längre ut mot väggarna när värmevågen passerar. Det är också uppenbart att det är en avsevärd tidsförskjutning mellan händelseförloppet i pyrolyszonen och längre upp i silon. Mellan 23-24 timmar tilltog intensiteten i pyrolyszonen markant men som framgår av Figur 18 återspeglas detta först efter ca 27,5 tim på nivån 1,5 m ovanför tändkällan.



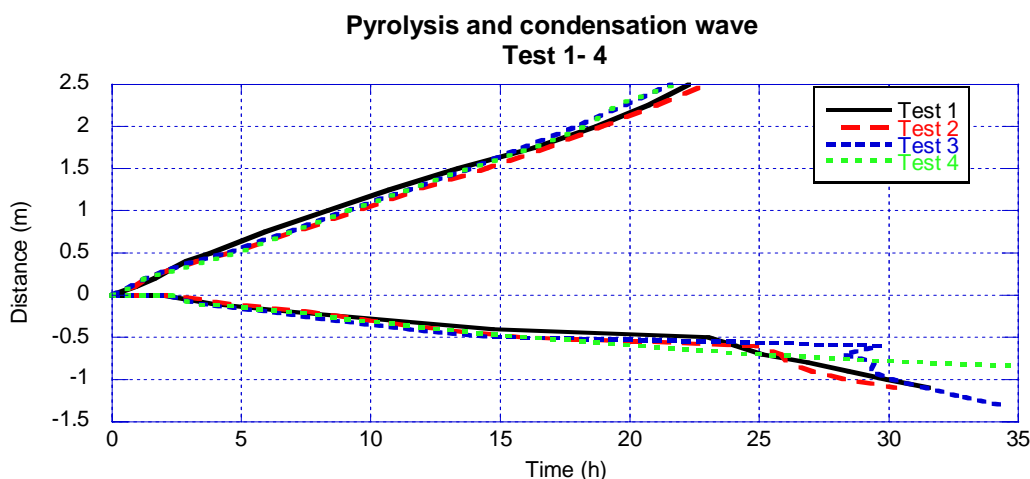
Figur 18 Temperaturen i horisontell led 1,5 m ovan tändkällan. TC 49 var lokaliserad i centrum av silon, TC 74-77 var lokaliserade 0,25 m från centrum.

Temperaturmätningarna redovisade ovan kan användas för att beräkna spridningshastigheten av pyrolysvågen nedåt respektive värmevågen uppåt. För pyrolyszonen har tidpunkten då respektive termoelement passerar 100°C använts och uppåt är motsvarande referenstemperatur 50°C, se Figur 15 och Figur 17.

I Figur 19 redovisas pyrolysvågens respektive värmevågens utbredning med tändkällan som referenspunkt för samtliga fyra försök. Även om försök 4 inte var helt identiskt under förbrinntiden (se kapitel 5.2.1) så kan man konstatera att försöken uppvisar en mycket bra repeterbarhet under hela förbrinntiden. Viss spridning i resultaten för pyrolysvågen förekommer mellan 25 och 30 timmar men detta beror sannolikt på att pyrolyszonen dragit sig något åt ena sidan varför några av termoelementen i silons centrum ”träffades” med viss tidsförskjutning.

Beräknas den genomsnittliga pyrolyshastigheten så uppgick denna till ca 0,04 m/tim fram till ca 16-17 tim varefter den sjönk ner till ca 0,02 m/tim. Efter ca 23-24 timmar tog pyrolysen fart igen och steg då till ca 0,06 m/tim, vilket var i nivå med den pyrolyshastighet som uppmättes i förförsöken.

Som visats tidigare hade värmevågen uppåt i silon en mer konstant hastighet uppgick till i genomsnitt till 0,11 m/tim.



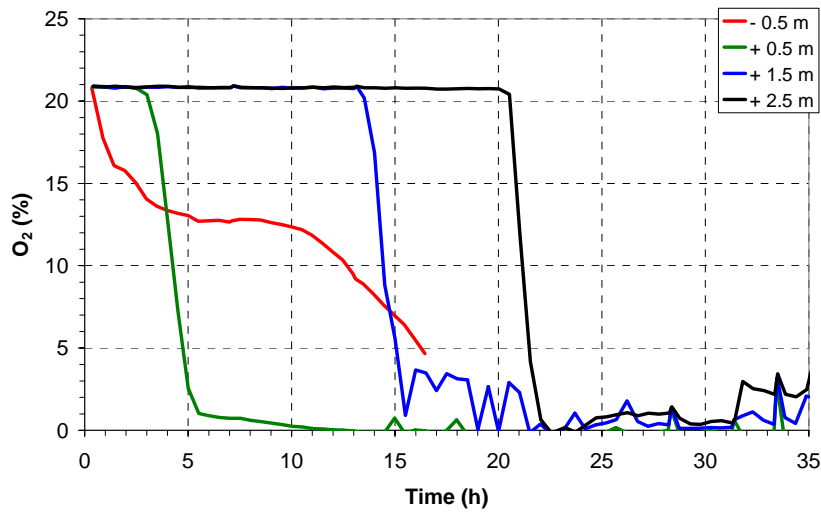
Figur 19 Utbredning av pyrolysvågen nedåt, respektive värmevågen uppåt i silon, under förbrinntiden (drygt 30 tim). Avståndet på Y-axeln är relaterade till centrum av tändkällan.

5.2.2 Gasanalyser i pelletsbulken under förbrinntiden

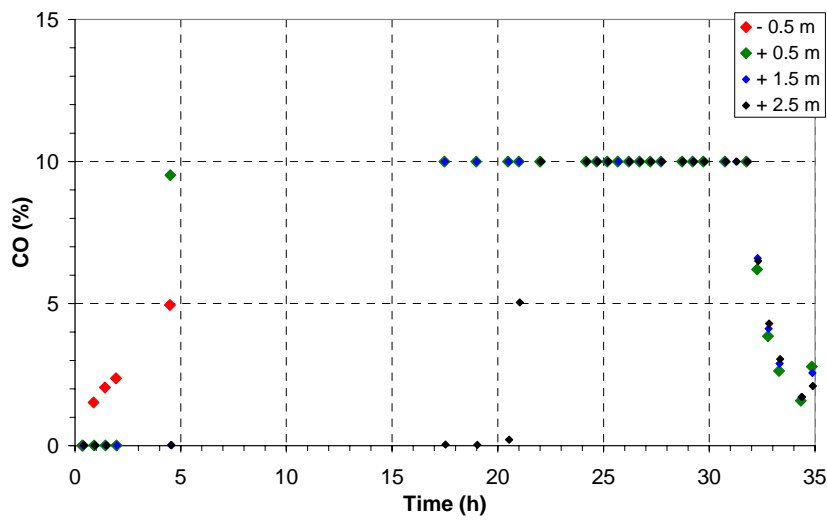
Data från gasanalysen i pelletsbulken visas i Figur 20- Figur 22 för försök 2 under förbrinntiden. Då förloppet under förbrinntiden var förhållandevis repeterbart, har försök 2 valt ut som ett exempel. Fullständig data från samtliga försök återges i Appendix 1.

Mätningen av syrgashalten i fyra mätpunkter fördelade i höjdlängs silons centrumaxel visas i Figur 20. Man ser här att syrgashalten ganska snabbt börjar sjunka i mätpunkten -0.5 m (0.5 m under tändkällan) för att passera under 5 % mellan 15 och 20 timmar. I försök 2 smälte samplingsslangen i mätpositionen -0.5 m ihop efter ca 17 timmar. Detta skedde även i försök 4. Men av mätdatan från försök 1 och försök 3 kan man se att syrgashalten närmar sig noll någon gång efter 20 timmar. Man ser här en koppling till pyrolysisfrontens utbredning nedåt som visas i Figur 19. Pyrolysisfronten passerar -0.5 m nivån någon gång mellan 15 och 20 timmar. I mätpositionerna ovanför tändkällan; +0.5 m, +1.5 m samt +2.5 m, ser man i samtliga fall en mycket tvärt sänkning av syrgashalten ner till en mycket låg syrgashalt. Vid en jämförelse med värmevågen uppåt i silon, som visas i Figur 19, ser man en stark korrelation mellan denna och den tvärsänkningen av syrehalten. Det man kan identifiera är följaktligen en skarp front av pyrolysisgas som långsamt stiger upp i silon för att efter mer än 20 timmar närma sig bränsleytan i silons topp.

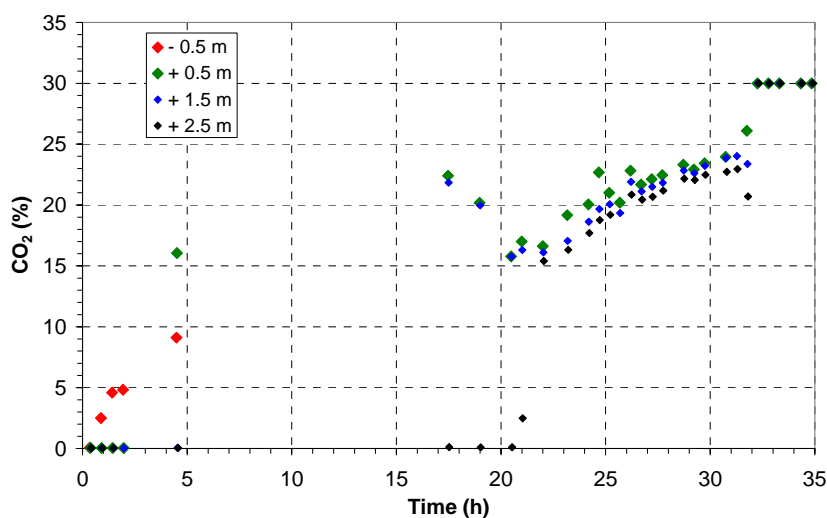
Gasfrontens utbredning och sammansättning ges vidare av CO- (Figur 21) och CO₂-mätningen (Figur 22) i de fyra mätpositionerna. Man ser att CO- respektive CO₂-halten stiger i samband med att syrehalten sjunker. Tyvärr var det ett svårdiagnostiserat fel på CO/CO₂ instrumentets signalutgång, vilket hade till följd att den uppsamlade mätdatan till stor del var oanvändbar. Men som en säkerhetsåtgärd, och för att direkt kunna följa aktiviteten i silon, gjordes också manuella avläsningar av CO/CO₂ instrumentets display, vilken inte var påverkad av felet på signalutgången. Det är de manuellt avlästa värdena som visas i Figur 21 samt Figur 22. Halterna av pyrolysisgaser var höga i pelletsbulken när väl gasfronten passerat en specifik nivå. Halter > 10 % CO och > 20 % CO₂ uppmättes i pelletsen. Man kan notera att en fullständig syreförbrukning (21 % O₂) rent stökiometriskt maximalt kan resultera i en total halt av 21 % CO₂. Den uppmätta höga totala halten av CO₂ + CO tyder följaktligen på en ackumulering av dessa gaser i pelletsbulken och därmed också en tilltransport av syrgas.



Figur 20 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av O_2 på fyra olika höjder i centrum av silon under förbrinntiden.



Figur 21 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av CO på fyra olika höjder i centrum av silon under förbrinntiden. Instrumentets mätområde var max 10 %. (Notera att mätningen vid -0.5 m avbröts före 17 h.)



Figur 22 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av CO₂ på fyra olika höjder i centrum av silon under förbrinntiden. Instrumentets mätområde var max 30 %. (Notera att mätningen vid -0.5 m avbröts före 17 h.)

Syrgashalten i pelletsbulken skiljer sig något under slutet av förbrinntiden för försök 1 jämfört med försök 2 och försök 3 (se Appendix 1). Detta gäller främst positionerna +0.5 m samt +1.5 m, där syrgashalten låg på 2-3 % i försök 1 efter 22 timmar. I försök 2 (Figur 20) och försök 3 var syrgashalten betydligt lägre vid dessa nivåer. Detta kan eventuellt ha berott på ett lokalt läckage längs tätningen av de båda täckluckorna i silons bottendel och som senare resulterade i en lokal brand innanför en av dessa (se vidare kapitel 5.2.4.1). Detta läckage skulle också i så fall kunna ha haft en inverkan på den efterföljande inverteringen av försök 1. Enligt vår bedömning var dock tätningen väl utförd och läckagearean kan endast ha varit en bråkdel av den ordinarie ventilationsöppningen under förbrinntiden.

5.2.3 Gasanalyser/detektion i silotoppen under förbrinntiden

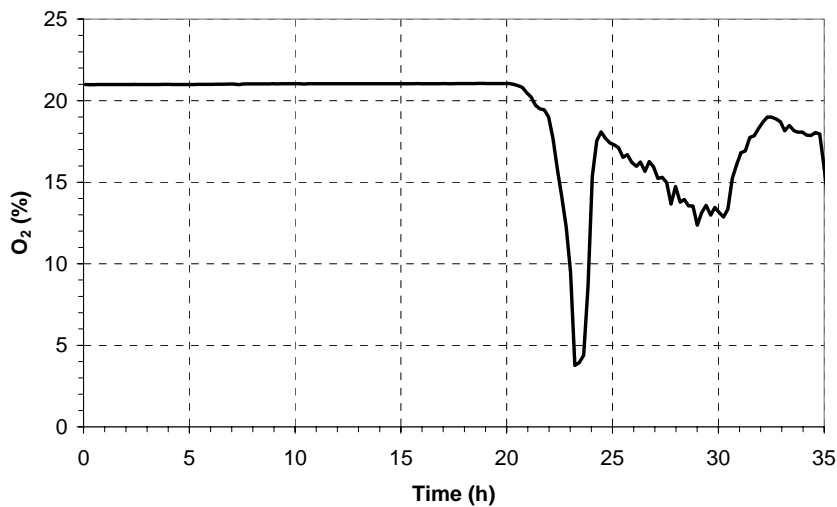
Gasanalyser utfördes på luften i silotoppen för att karakterisera sammansättningen och för att undersöka möjligheter till tidig detektion av ett begynnande pyrolysförlopp inne i silon. Gasanalyserna beskrivs i kapitel 4.2.2.2 och kapitel 4.2.2.3.

Resultaten från analyserna av O₂, CO₂, CO samt THC under förbrinntiden i försök 2 ges i Figur 23 - Figur 28. Försök 2 har här tagits som ett exempel. Fullständiga resultat från samtliga försök ges i Appendix 1.

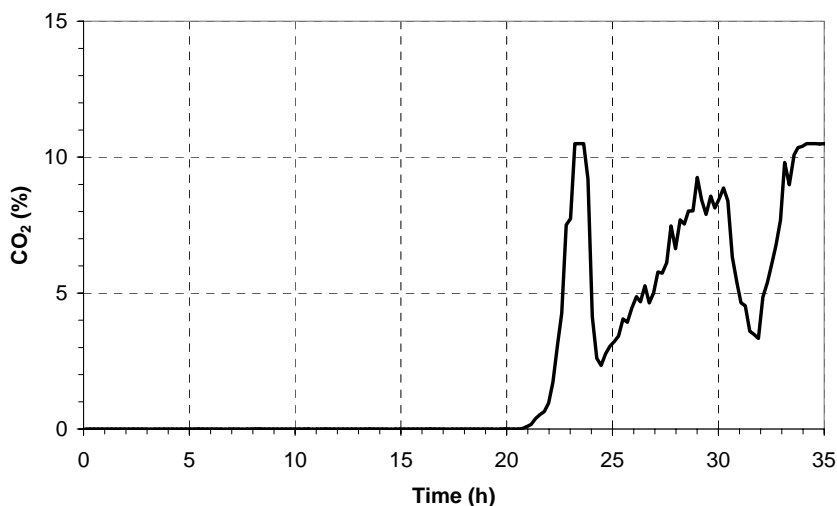
Mätningarna av O₂, CO₂ samt CO i Figur 23 - Figur 25 visar att förbränningsgaserna inne i pelletsbulken når pelletsytan och börjar strömma ut i silotoppen vid 20-21 timmar för att ganska snabbt ge en mycket hög halt av förbränningsgaser med ett maximum runt 23,5 timmar. Efter detta sjunker halten kraftigt för att återigen börja stiga vid ca 24,5 timmar (man kunde se ett liknande beteende i test 1, se Appendix 1). Det är här viktigt att notera, att under denna tidsrymd, ända från start och fram till tiden 31:20 (tim:min), gjordes inga förändringar av förhållandena i och runt silon med det undantag att ventilationen i hallen och ovanför silon startades 28:05 (20000m³/tim) för att sedan sänka flödet 29:10 (15000m³/tim).

En förklaring till beteendet kan vara, att när den varma förbränningsgasen till slut trängde igenom pelletsbulkens yta, skapades ett drag upp genom silon som snabbt fyllde

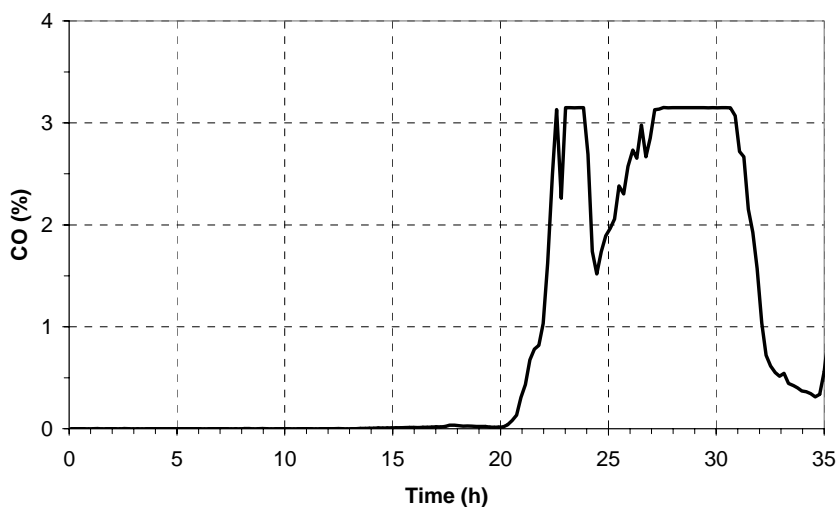
utrymmet i silotoppen med förbränningsgasen som hade ackumulerats i över delen av pelletsbulken. Den koncentrerade förbränningsgasen späddes sedan ut med luft som strömmade in via öppningen i silotoppen. En balans mellan flödet från pelletsbulken och frisk luft in via öppningen i toppen började sedan etableras. Ändringen av ventilationsflödet runt silon verkar bara ha haft marginell påverkan. Något som inte har en förklaring är att syrgashalten började öka momentant vid ca 30:30 samtidigt som CO₂-, CO- respektive THC-halterna sjönk. Släckningen inleddes först 31:20 då locket på ventilationsinloppet monterades och gasinmatningen (CO₂) inleddes 31:30. Detta verifieras också genom en momentan ökning av CO₂-halten ca 31:30. (Se även vidare kommentarer kring gasanalyserna under släckfasen i försök 2 i kapitel 5.2.4.2.)



Figur 23 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av O₂ i silotoppen under förbrinntiden.

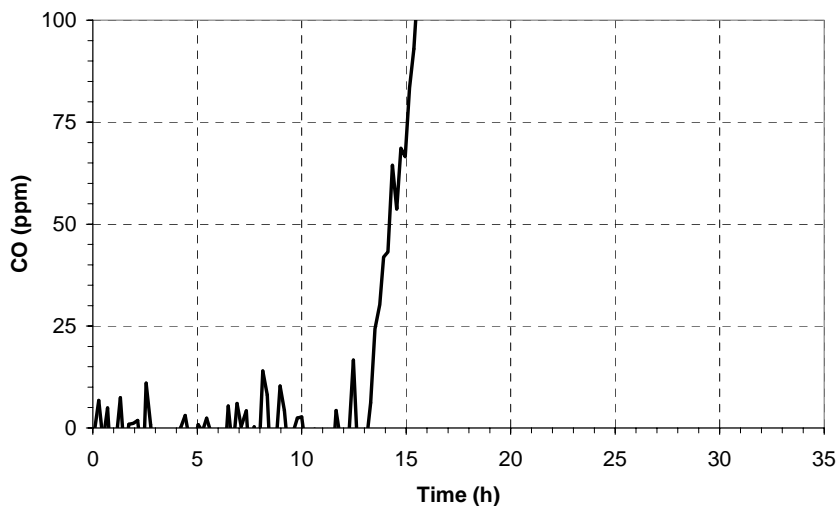


Figur 24 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av CO₂ i silotoppen under förbrinntiden (instrumentets mätområde max 10 %).

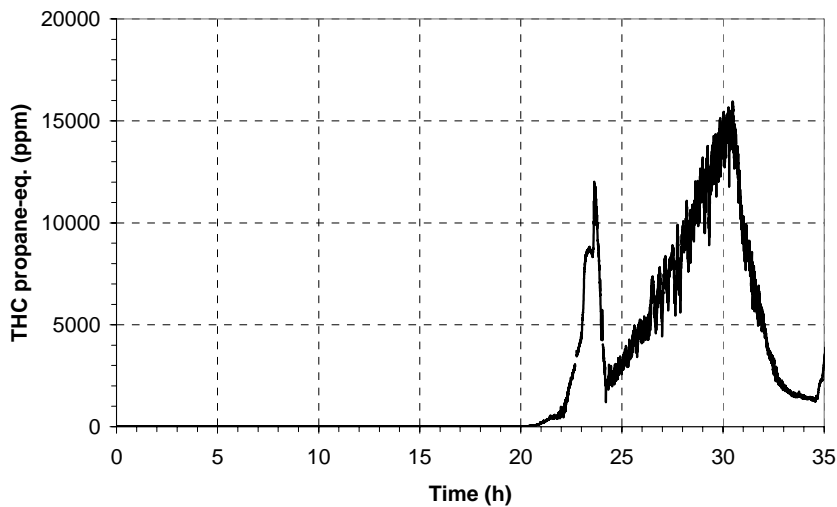


Figur 25 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av CO i silotoppen under förbrinntiden (instrumentets mätområde max 3 %).

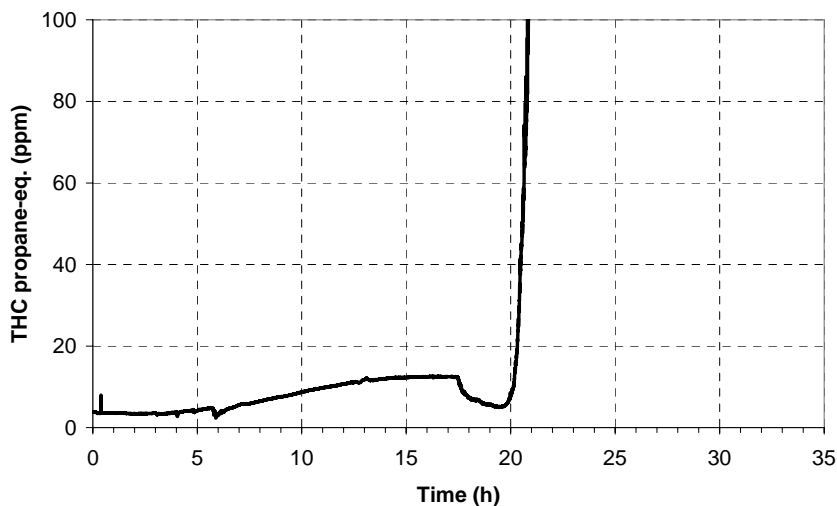
Ur detekteringssynpunkt är det naturligtvis försvarande att den huvudsakliga förändringen av gasatmosfären i silotoppen först sker efter ca 20 timmar från det att pyrolysen startat 2,6 m under pelletsbulkens yta. I Figur 26 kan man se att halten CO började stiga över bakgrundshalter efter 13-14 timmar, dvs. avsevärt tidigare än det riktiga ”gasgenombrottet” vid ca 20 timmar. Även THC-halten (Figur 27) stiger kraftigt från ca 20 timmar på samma sätt som CO och CO₂. För THC ser man under försök 2 en svag stigning (se Figur 28) som börjar redan runt 7-8 timmar, men en tydligt detekterbar höjning av THC-halten kommer alltså först efter 20 timmar. I detta fall ger inte THC-halten någon lika tydlig varning som man kan säga att CO-halten gjorde.



Figur 26 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av CO i silotoppen under förbrinntiden. Diagrammet med enheten ppm (miljondelar av volymen) visar när CO signalen börjar indikera en pågående förbränningsprocess någon gång mellan 13 och 14 timmar.



Figur 27 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av oförbrända kolväten (THC) i silotoppen under förbrinntiden.



Figur 28 Försök 2: Uppmätta koncentrationer av oförbrända kolväten (THC) i silotoppen under förbrinntiden. Diagrammet visar när THC signalen tydligt börjar indikera en pågående förbränningsprocess efter 20 timmar.

Tiden för tydlig detektion av CO respektive THC ges för samtliga försök i Tabell 2. Som jämförelse redovisas också tiden till ”förlarm” erhållna med MGD-detektorn. Kriteriet för tydlig detektion har satts till en halt på 25 ppm i båda fallen, vilket är en nivå som tydligt överskrider de bakgrundsvärden som mättes upp under försöken. Man kan se från Tabell 2 att CO detekterades betydligt tidigare jämfört med THC i försök 1 och försök 2. Under försök 3 och försök 4 skedde detektionen av CO vid en avsevärt senare tidpunkt. Det finns ingen uppenbar förklaring till detta, då förhållandena under förbrinntiden inte skiljde sig åt mellan försöken. När det gäller försök 4, så gjordes en genomluftning av pelletsbulken genom att blåsa in luft från botten med start 18:11. Detta syns på detektionen av THC som inträffade strax efter, vid 18:19.

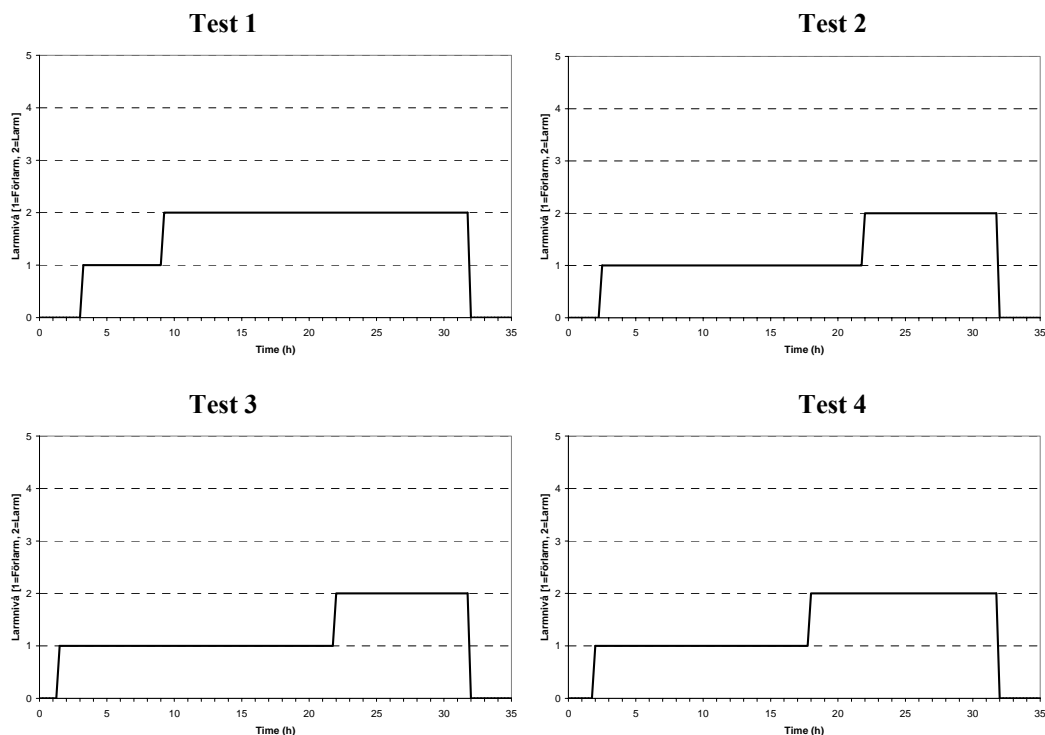
Tabell 2 Tid för detektion av CO respektive THC samt ”förlarm” med MGD-detektorn i de fyra försöken.

Försök	Tid för CO > 25 ppm (tim:min)	Tid för THC > 25 ppm (tim:min)	Tid till ”förlarm”/ ”brandlarm” med MGD-detektorn (tim:min)
1	10:30	21:14	ca 3:00 / 9:00
2	13:44	20:21	ca 2:30 / 21:30
3	19:45	19:46	ca 1:30 / 21:30
4*	17:16	18:19	ca 2:00 / 18:00

* Försök 4 skiljde sig från de andra försöken genom att man här genomluftade silon genom att spola luft från botten med start 18:11.

Sammansättningen av gasen i silotoppen efter ”gasgenombrottet” karakteriseras av låg syrehalt, hög halt av CO₂, samt höga halter brännbara ämnen som CO och kolväten (THC). I försök 2 har man en CO-halt som överstiger 3 % och en halt oförbrända kolväten på ca 1,5 %. Undre brännbarhetsgränsen för CO ligger på 12,5 % och vad gäller kolväten ligger undre brännbarhetsgränsen för propan på 2,1 % [15]. I de utförda försöken var det oförbrända kolväten i silotoppen som låg nära brännbarhetsgränsen i flera av försöken. En slutsats av detta är således att gassammansättningen i det tomma utrymmet i toppen av en silo utgör en allvarlig risk för explosion vid en utvecklad pyrolys (brand) i en silo.

Resultat från mätningarna med MGD detektorn ges i form av utvärderade larmsignaler för de fyra försöken i Figur 29 [13]. Resultatet presenteras i grafisk form där en signal på 1 motsvarar ett förlarm och ett värde på 2 motsvarar ett skarpt brandlarm.



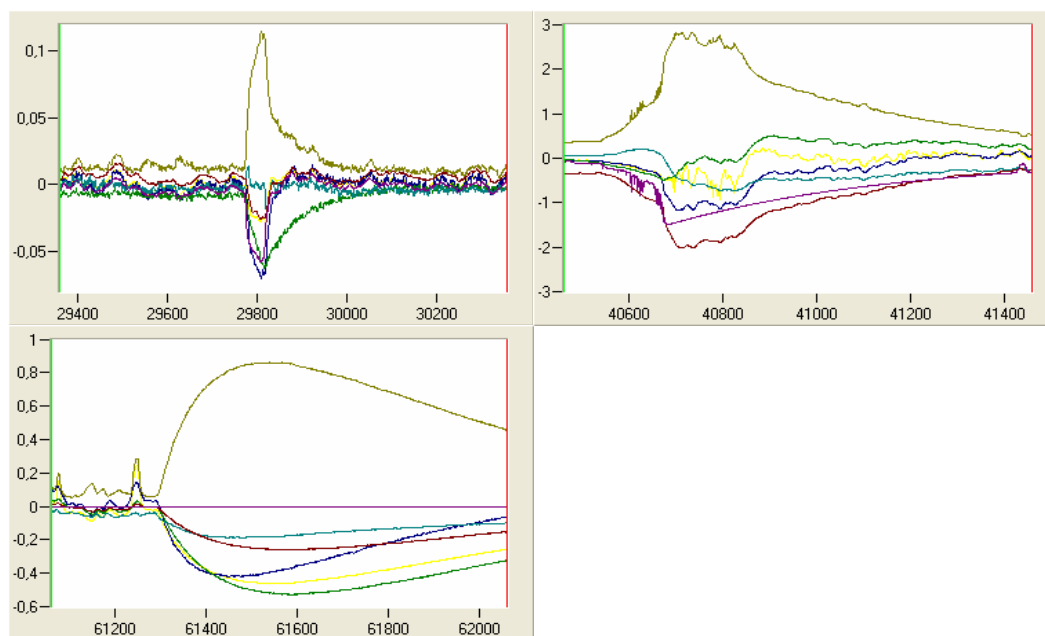
Figur 29 Utvärderad data från MGD detektorn i de fyra försöken.

Man kan se att ett förlarm (signal = 1) utlöses mycket tidigt vid alla försök. I t ex försök 2 utlöstes förlarmet efter ca 2,5 timmar från det att tändkällan initierades i pelletsbulken. Vid denna tidpunkt kan man inte ens se någon tendens på onormala förhållanden från CO-mätningen (Figur 26) respektive THC-mätningen (Figur 28). Ett brandlarm (signal = 2) ges från MGD detektorn vid tiden ca 21,5 timmar. Det är tiden för ”gasgenombrottet” i försök 2 och MGD detektorn gav alltså larm först vid en hög koncentration förbränningsgaser. I försök 2 kunde man detektera CO redan efter 13:44, men THC kunde inte detekteras tidigare än 20:21 (dvs. ungefär när MGD detektorn larmar).

I samtliga försök erhålls brandlarmet i samband med ”gasgenombrottet”, utom i försök 1 där larm ges betydligt tidigare. I försök 1 steg också halten CO till detekterbar halt tidigt i försöket. Halten mättes till >25 ppm redan vid tiden 10:30 (se Tabell 2). Den enda rimliga förklaringen till denna skillnad vid försök 1 är det möjliga läckage som tidigare diskuterats i kapitel 5.2.2.

Under tiden mellan första detektering, förlarm, och till dess att släckning utförs, larmar detektorn ett flertal gånger, dels i form av förlarm och dels i form av brandlarm, oberoende av test. Insamlad mätdata är komplex och hänsyn måste tas dels till uppmätta gasers inbördes förhållande och dels till tidigare insamlade mätvärden för en korrekt analys.

Den egentliga detektorsignalen från de 6 olika gassensorerna som bygger upp MGD detektorn visas i Figur 30 för försök 1. I figurerna nedan presenteras detaljerad mätdata från tre intressanta tillfällen från Test 1: första detektering (förlarm), huvuddetektering (brandlarm) och släckning. Y-axeln visar ett relativt värde på risknivån medan x-axeln är tidsaxel (i diagrammen antalet insamlade värden)



Figur 30 Exempel på detaljerad mätdata för MGD-detektorn från försök 1 vid förlarm (övre-v), brandlarm (övre-h) samt vid start släckning (nedre).

5.2.4 Släckning

I försök 1-3 valdes termoelement TC7, lokaliserat 1,1 m under centrum av tändkällan, som referenspunkt för att inleda släckningen. Detta innebar en förbrinntid på drygt 30 timmar vilket kan kopplas till den lägre och ojämna pyrolyshastighet som noterades under förbrinntiden jämfört med förförsöken.

Släckningen inleddes när temperaturen vid TC7 stabiliserats på sin högsta temperatur vilket gav en bra möjlighet att följa den momentana effekten av släckinsatsen. I något av försöken noterades samtidigt en begynnande temperaturstegring hos TC6 vilket gav ytterligare information om hur pyrolysens utbredning påverkades.

Följande förutsättningar för släckinsatsen gällde för respektive försök.

- Försök 1, inerteringen enbart med kvävgas.
- Försök 2, inerteringen enbart med koldioxid.
- Försök 3, skumbeläggning av träpelletsen i silotoppen, ingen ventilation via silobotten samt aktiv inertering med kvävgas.
- Försök 4, släckningen genomfördes i flera sekvenser, både genom inertering med kvävgas, koldioxid samt skumbegjutning av silotoppen. Under förbrinntiden injicerades luft genom injicering av luft via gasinmatningssystemet i silobotten för att studera möjligheten till en snabbare detektion.

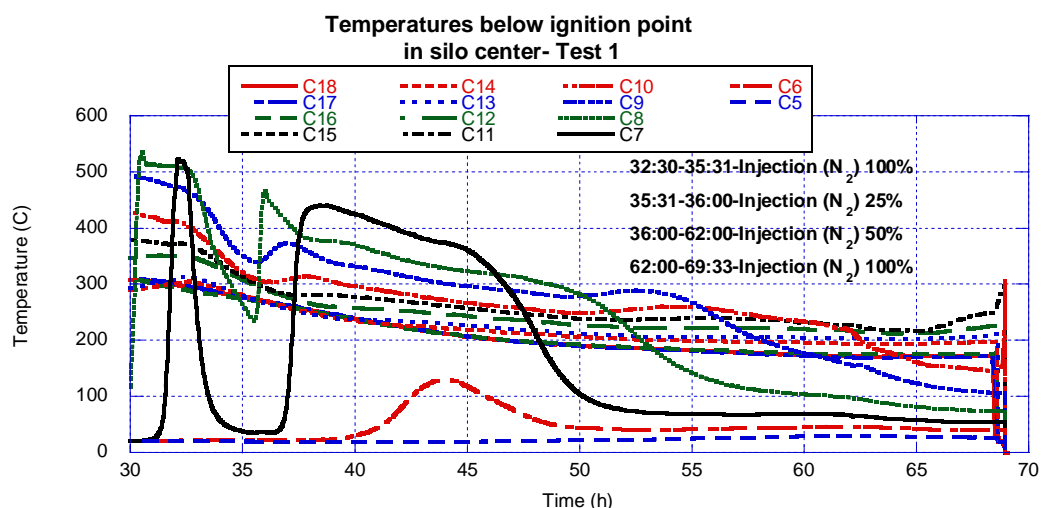
I följande kapitel redovisas mer i detalj utförda släckåtgärder och gjorda observationer för respektive försök.

5.2.4.1 Försök 1 - Släckning med kvävgas

I försök 1 användes kvävgas som släckmedel. Släckinsatsen inleddes vid tiden 32:22 (tim:min) med att täcklocket med anslutningen för gasslangen monterades på inloppet av ventilationskanalen i silons botten vilket ströp all lufttillförsel in i silon nerifrån. Kvävgas påfördes därefter 32:30 genom den tillslutna ventilationskanalen, inledningsvis med den högsta förutbestämda påföringshastigheten, 2,75 kg/tim (100 %, motsvarar 0,65 kg/m³tim). Vid tiden 34:58 placerades ett lock över ventilationshålet på silotoppen för att om möjligt hålla kvar gasen bättre inne i silon. Locket var dock inte helt tätt utan det fanns en 5-10 mm springa runt dess kant.

Eftersom påföringen ledde till en markant minskad pyrolyaktivitet, framförallt i området närmast pyrolysisfronten (se Figur 31) beslöts att efter 3 timmar dra ner påföringshastigheten till 25 %, dvs. till 0,69 kg/tim. Syftet var att se om denna påföring var tillräcklig för att underhålla släckprocessen. Termoelement TC8 reagerade med en momentan ökning igen och även TC10 började stiga omgående. Efter 30 minuter ökades därför påföringshastigheten till 50 %, dvs. 1,37 kg/tim. TC8 reagerade återigen momentant med en sänkning av temperaturen och efter en dryg halvtimme började även temperaturstegringen på TC10 dämpas. Efter ca en timme (ca 37:00) kunde konstateras att temperaturen hos TC7 återigen ökade och efter ytterligare en timme indikerade detta ca 450°C. Efter ca 39:00 började även en svag ökning noteras på TC6 vilket indikerade en fortsatt långsam spridning av pyrolysisfronten. Ökningen var dock långsam och efter ca 44:00 började temperaturen sjunka långsamt igen. Påföringen av kvävgas hölls därför konstant på 50 %-värdet fram till 62:00 då påföringen ökades till 100 % igen. En orsak till ökningen av påföringshastigheten var att en brand upptäcktes efter drygt 61:00 i det ena täcklocket (gjort av 3x15 mm plywood) i silons bottensektion. En glödhärd noterades

bakom locket varför vatten försiktigt injicerades via en smal lans igenom hålet i den genombrunna luckan. Hålet tätades därefter provisoriskt med isolering. Ca 64:00 påbörjades demonterings- och tömningsprocessen genom att locket på silon lyftes av. Rivningen var avslutad ca 69:30 varvid kvävgaspåföringen avbröts. Orsaken till glödbranden bakom täcklocket var att det tydligen fanns ett litet läckage i tätningen runt kanten vilket möjliggjort ett litet luftinsläpp. Detta hade i sin tur underhållit en liten pyrolysisbrand vilken letat sig ifrån "huvudpyrolysen" ut mot siloväggen och ner till luckan.



Figur 31 Temperaturer i silon under släckfasen (försök 1).

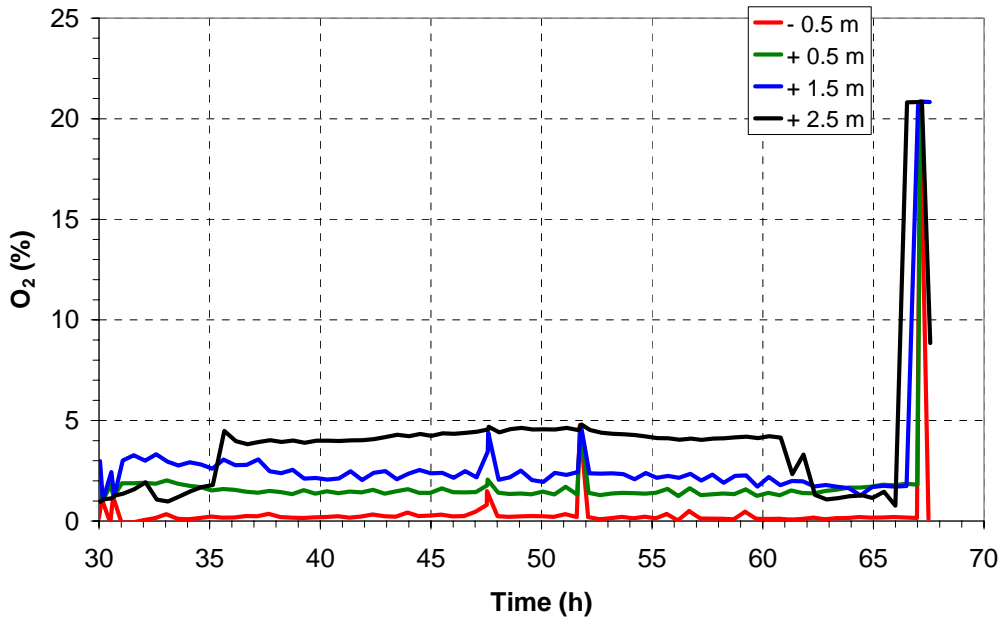
En summering av utförda åtgärder och påförda gasmängder ges i Tabell 3. Som framgår av denna användes totalt 49,7 kg kvävgas för släckinsatsen fram till dess att demontering/tömnings inleddes. Observationer gjorda i samband med demonteringen/tömnings sammanfattas i kapitel 5.2.5.

Tabell 3 Sammanställning av gaspåföring och övriga åtgärder under släckförsök 1.

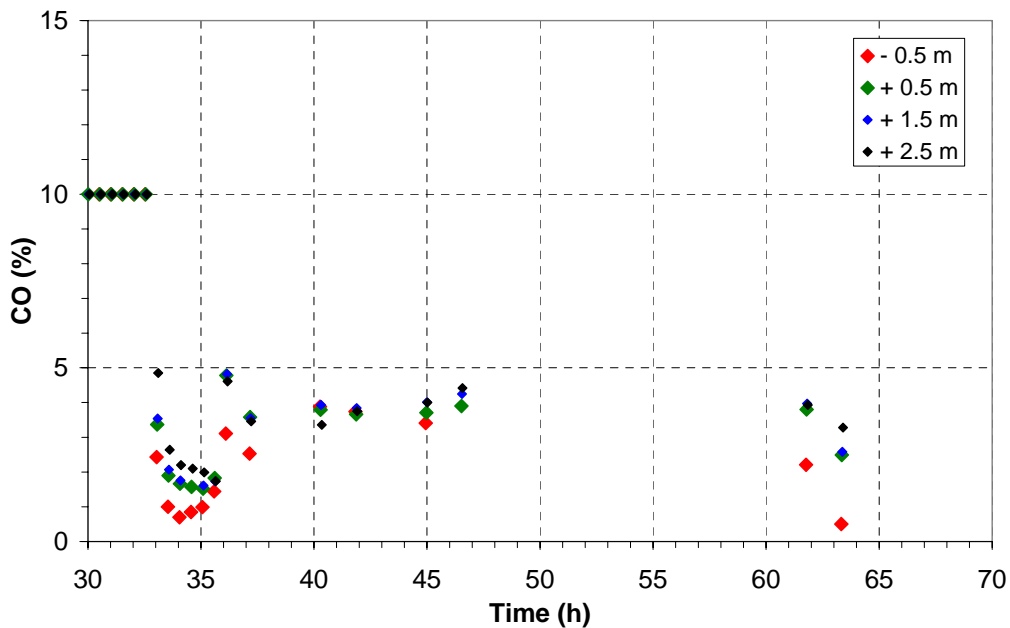
Tid (tim: min)	Påförings-hastighet (kg/tim)	Total påförings-tid (tim: min)	Total påförings-mängd (kg) *	Noteringar
32:22				Ventilationsinlopp stängt
32:30-35:31	2,75	3:01	8,3	
34:58				Lock på ventilationsöppningen i silotoppen
35:31-36:00	0,69	0:29	0,3	Temperaturökning noteras
36:00-62:00	1,37	26:00	35,6	
61:10				Brand upptäcks vid täcklock
61:30-				Släckning av branden i omgångar med lokal vatteninjicering
62:00-69:33	2,75	7:33	5,5 (20,8)	
Summa			49,7 (65)	

*) siffror inom parentes inkluderar även gasförbrukningen under tömning/demontering av silon.

Data från gasanalysen i pelletsbulken under släckfasen visas i Figur 32 - Figur 34. Mätningen av syrgashalten i fyra mätpunkter fördelade i höjddled längs silons centrumaxel visas i Figur 32. Man ser här att syrgashalten är nära noll under hela släckförloppet vid mätpunkten -0.5 m från tändkällan. I mätpunkterna ovanför tändkällan finns det dock en del syre tillgängligt under hela släckförloppet. Syrehalterna i pelletsbädden i försök 1 är generellt högre under släckfasen i försök 1 jämfört med försök 2 (se Figur 38) och avsevärt högre jämfört med försök 3 (se Figur 45).

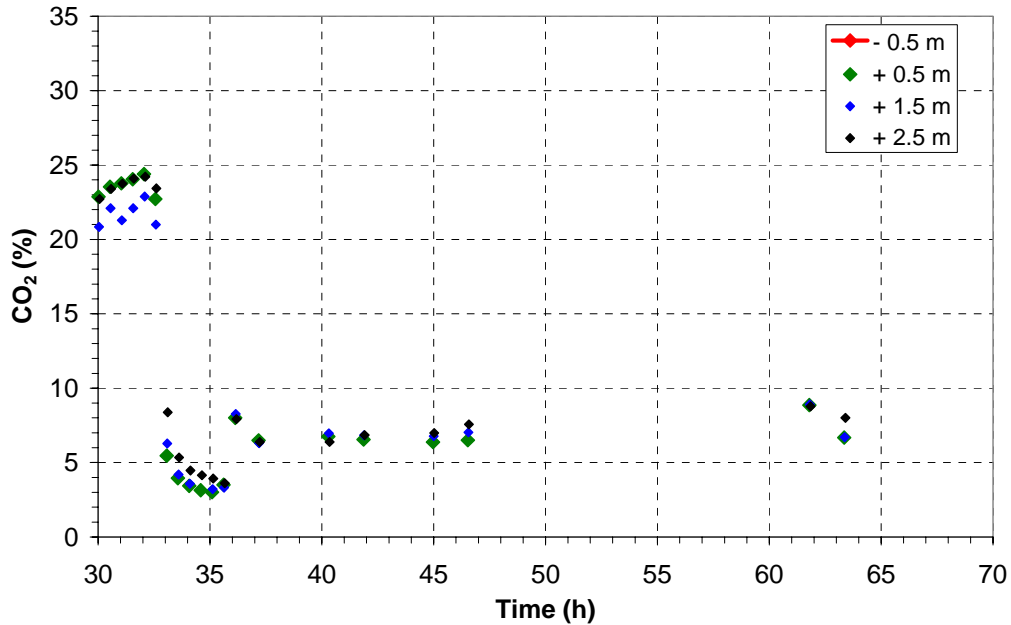


Figur 32 Uppmätta koncentrationer av O₂ på fyra olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 1).



Figur 33 Avlästa koncentrationer av CO på fyra olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 1). Instrumentets mätområde max 10 %.

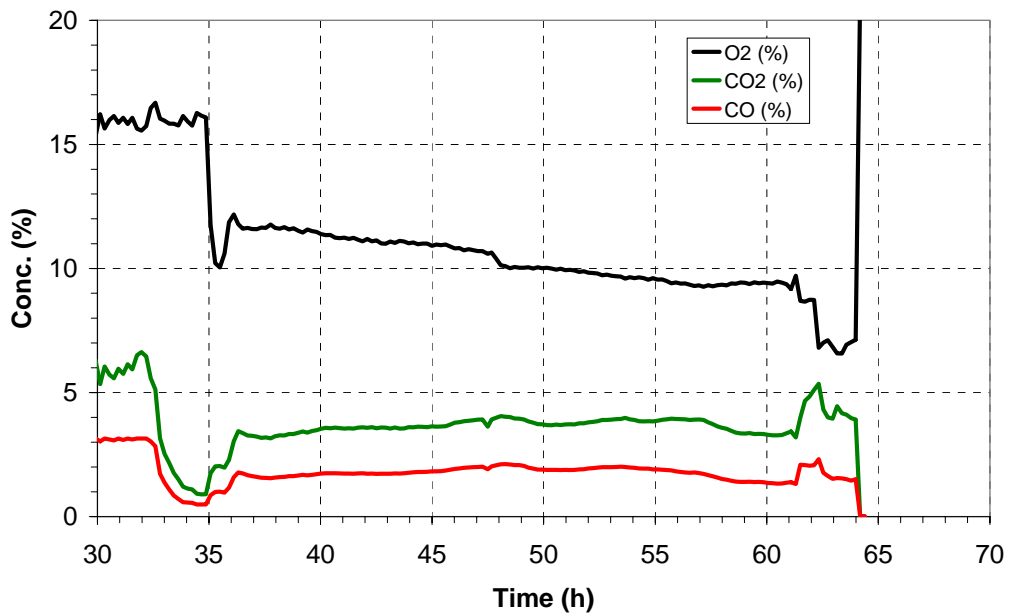
Avlästa koncentrationer av CO samt CO₂ i pelletsbulken under släckfasen visas i Figur 33 respektive Figur 34. Halterna av båda dessa ämnen sjönk kraftigt när silon fylldes nedifrån med kvävgas.



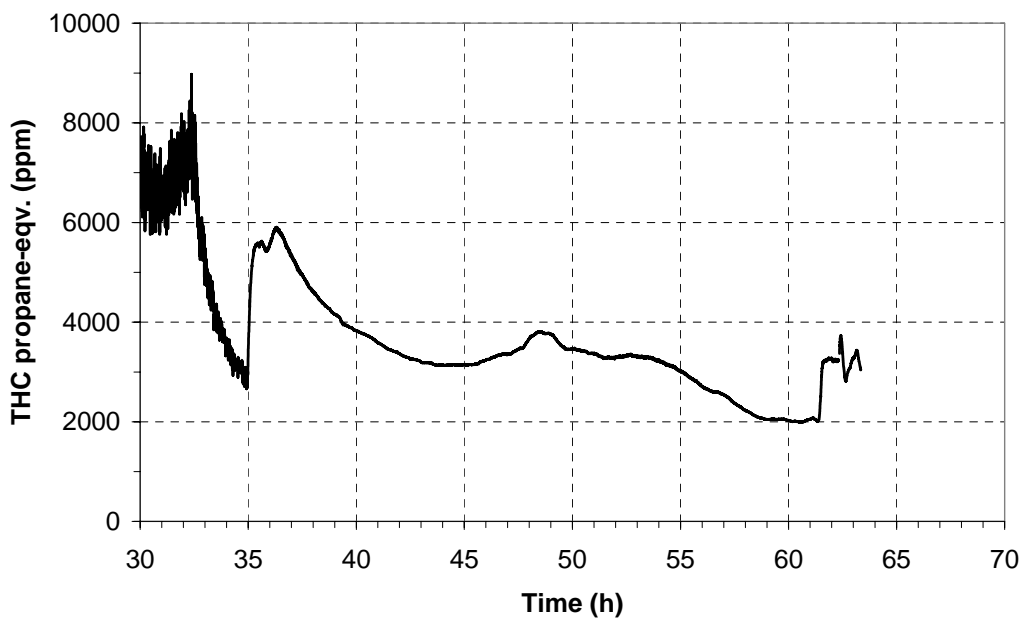
Figur 34 Avlästa koncentrationer av CO₂ på fyra olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 1).

Gaskoncentrationer uppmätta i silotoppen under släckfasen visas i Figur 35 samt i Figur 36. Figur 35 visar både O₂, CO₂ samt CO. Man ser en tydlig sänkning av CO₂ och CO i samband med att man startar inerteringen. O₂ påverkas inte inledningsvis, men sjunker kraftigt vid 35 timmar när locket läggs på öppningen i silotoppen samtidigt som CO₂ och CO stiger något.

THC-koncentrationen (Figur 36) sjunker också i samband med inerteringen, men stiger även denna ganska kraftigt i samband med att locket läggs på toppen.



Figur 35 Uppmätta koncentrationer av O₂, CO₂ samt CO i silotoppen under släckfasen (försök 1).



Figur 36 Uppmätt koncentration av oförbrända kolväten (THC) i silotoppen under släckfasen (försök 1).

5.2.4.2 Försök 2 - Släckning med koldioxid

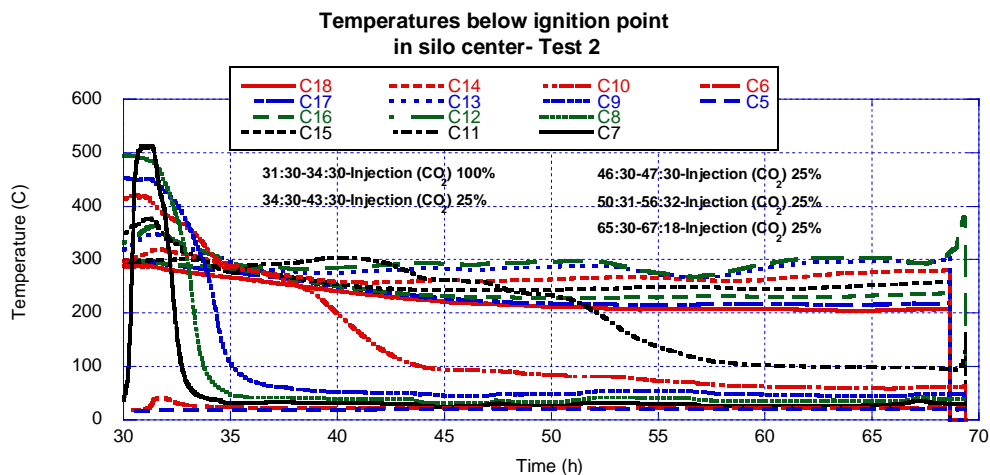
I försök 2 användes koldioxid som släckmedel. Släckinsatsen inleddes vid tiden 31:20 (tim:min) med att täcklocket monterades på inloppet av ventilationskanalen i silons botten vilket ströp all lufttillförsel till silon nerifrån. Koldioxid påfördes därefter (31:30) genom ventilationskanalen, inledningsvis med en den högsta förutbestämda påföringshastigheten, 2,54 kg/tim (100 %, motsvarar 0,60 kg/m³ tim).

Påföringen ledde till en markant minskad pyrolysaktivitet, framförallt i området närmast pyrolysisfronten (Figur 37). Det beslöts därför efter 3 timmars påföring (34:30), att dra ner påföringshastigheten till 25 %, dvs. till 0,72 kg/tim. Syftet var att se om denna påföring var tillräcklig för att underhålla släckprocessen. Sänkningen av påföringshastigheten gav ingen märkbar påverkan på förloppet i silon varför denna lägre påföring användes fortsättningsvis.

Vid 34:53 placerades ett lock över ventilationshålet på silotoppen för att om möjligt hålla kvar gasen bättre inne i silon. Locket var dock inte helt tätt utan det fanns en 5-10 mm springa runt dess kant.

Vid 43:30 stängdes inmatningen av koldioxiden av under 3 timmar med syftet att se om detta ledde till en ökad aktivitet i silon. Någon markant påverkan erhöles inte, men man kunde notera att temperaturminskningshastigheten avtog, t ex vid TC11. 46:30 startades gaspåföringen igen under 1 timma för att sedan avbrytas igen 47:30. Varken påföringen eller avbrytandet gav dock någon markant påverkan på temperaturerna. Vid 50:31 återupptogs gaspåföringen igen. Detta var sannolikt inte nödvändigt, utan gjordes som en säkerhetsåtgärd för att kunna lämna silon obevakad under natten. Detta skulle också ge en indikation på om gaspåföringen bidrog till en snabbare temperatursänkning genom borttransport av den lagrade värmen. 56:32 avbröts gasinmatningen. Några termoelement hade registrerat en viss temperatursänkning, i övrigt var läget i silon i stort sett oförändrat. Gaspåföringen hade således inte bidragit till en markant, generell temperatursänkning i silon. Mellan 65:30 och 67:18 påfördes gas igen för att säkerställa att silon var inverterad när demontering/tömning inleddes.

Ca 66:35 påbörjades demonterings- och tömningsprocessen genom att locket på silon lyftes av. Under den sista delen av rivningen påfördes ytterligare lite gas för att undvika onödigt ökande intensitet när själva pyrolysbädden frilades.



Figur 37 Temperaturer i silon under släckfasen (försök 2).

En summering av utförda åtgärder och påförda gasmängder ges i Tabell 4. Som framgår av denna användes totalt 19,9 kg för släckinsatsen fram till dess att demontering/tömning inleddes.

De observationer som gjordes i samband med demonteringen/tömningen sammanfattas i kapitel 5.2.5.

Tabell 4 Sammanställning av gaspåföring och övriga åtgärder under släckförsök 2.

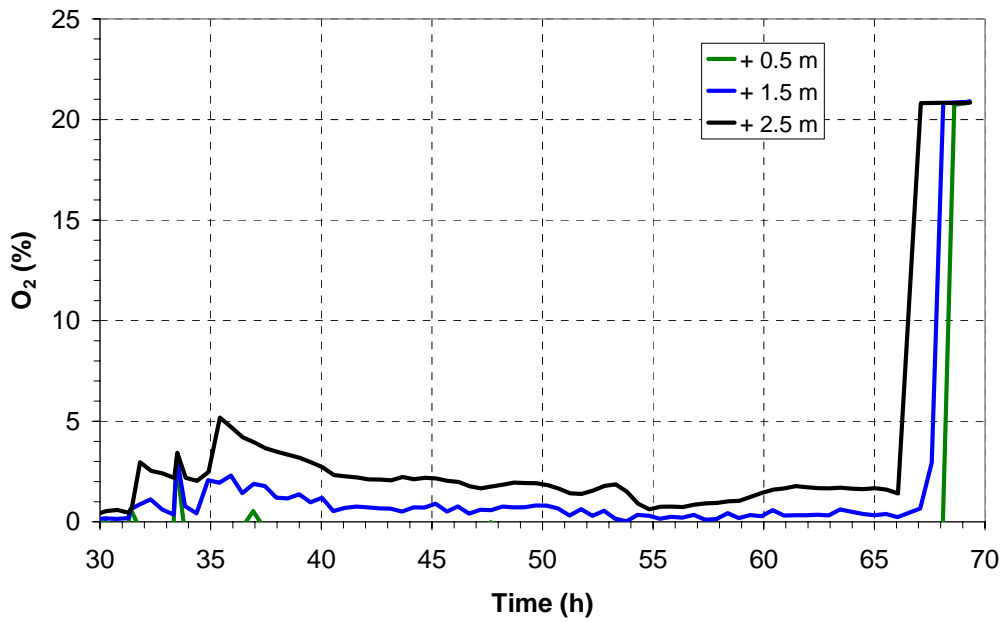
Tid (tim:min)	Inmatningshastighet (kg/tim)	Total tid (tim:min)	Total mängd (kg) *	Notering
31:20				Ventilationsinlopp stängt
31:30-34:30	2,54	3:00	7,6	
34:30-43:30	0,72	9:00	6,5	
34:53				Lock på ventilationsöppningen i silotoppen
43:30-46:30	-	3:00	-	Paus i inmatning
46:30-47:30	0,72	1:00	0,7	
47:30-50:31	-	3:01	-	Paus i inmatning
50:31-56:32	0,72	6:01	4,3	
56:32-65:30	-		-	Paus i inmatning
65:30-67:18	0,72	1:48	0,75 (1,3)	
67:18-69:18	-	2:00	-	Paus i inmatning
69:18-ca 70:30	1,64		(2,2)	
Summa			19,9 (22,6)	

*) Siffror inom parentes inkluderar även gasförbrukningen under tömning/demontering av silon.

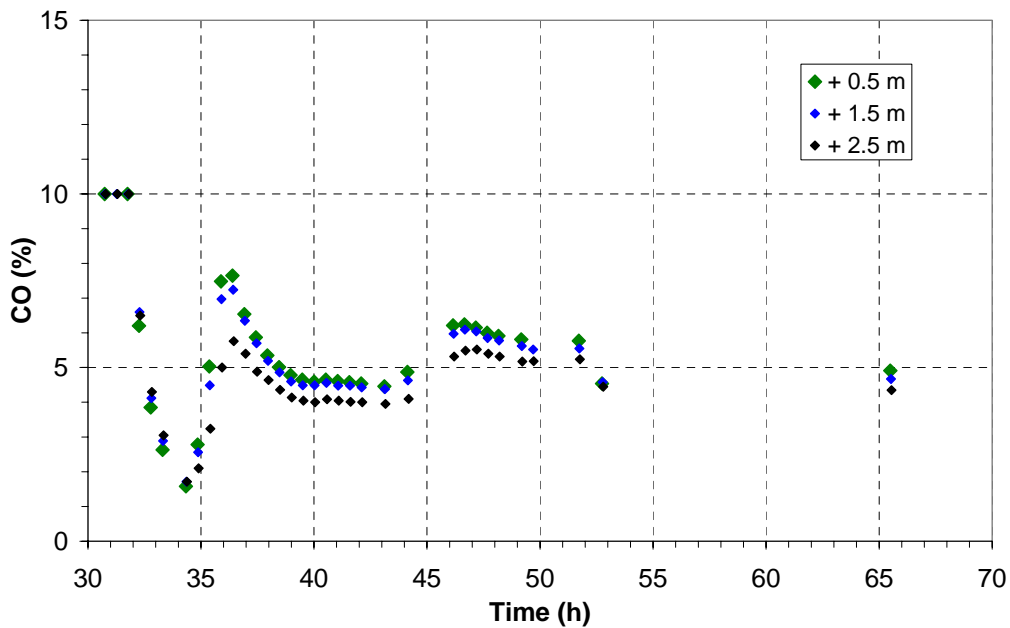
Data från gasanalysen i pelletsbulken visas i Figur 38 - Figur 40 för försök 2 under släckfasen. Mätningen av syrgashalten i tre mätpunkter fördelade i höjdlängs silons centrumaxel visas i Figur 38 (mätpositionen -0,5 m var inte tillgänglig då samplings-slangen smält ihop). Man ser att syrehalten i pelletsbulken var lägre jämfört med försök 1. Speciellt i mätpositionen +0,5 m ovanför tändkällan är syrgashalten nere på noll under största delen av inerteringen.

Avlästa koncentrationer av CO samt CO₂ i pelletsbulken under släckfasen visas i Figur 39 respektive Figur 40. Halten av CO sjunker snabbt från en halt på 10 % i samband med CO₂-inerteringen, för att sedan stiga och efter några timmar stabilisera sig runt 5 %. Det finns en teoretisk möjlighet till att CO bildas från CO₂ vid hög temperatur i en förbränningsbädd. Halten CO i pelletsbulken under försök 2 är dock endast något högre än den man mätte upp under försök 1. Det finns därför ingen anledning att anta att CO bildats termiskt från CO₂ i någon större omfattning.

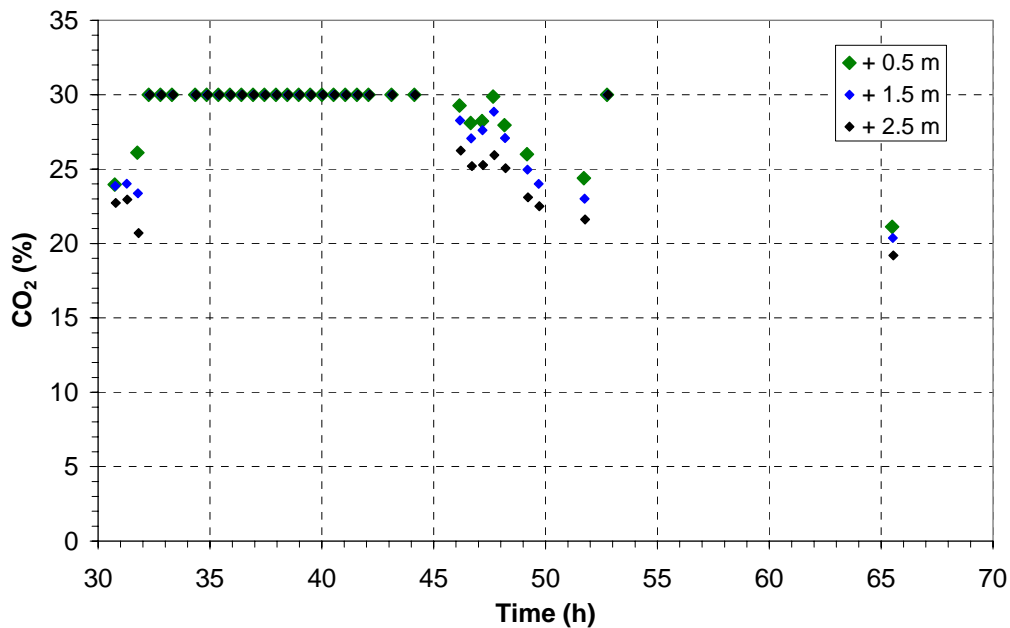
Halten CO₂ stiger som sig bör till en hög nivå i samband med inerteringen med CO₂-gas. Vid tiden 43:30 till och med 50:31 påfördes endast en mindre mängd CO₂. Det avspeglas också i den avlästa CO₂-halten inne i pelletsbulken som sjunker under 30 % under denna tidsrymd.



Figur 38 Uppmätta koncentrationer av O₂ på fyra olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 2).



Figur 39 Avlästa koncentrationer av CO på tre olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 2). Instrumentets mätområde max 10 %.

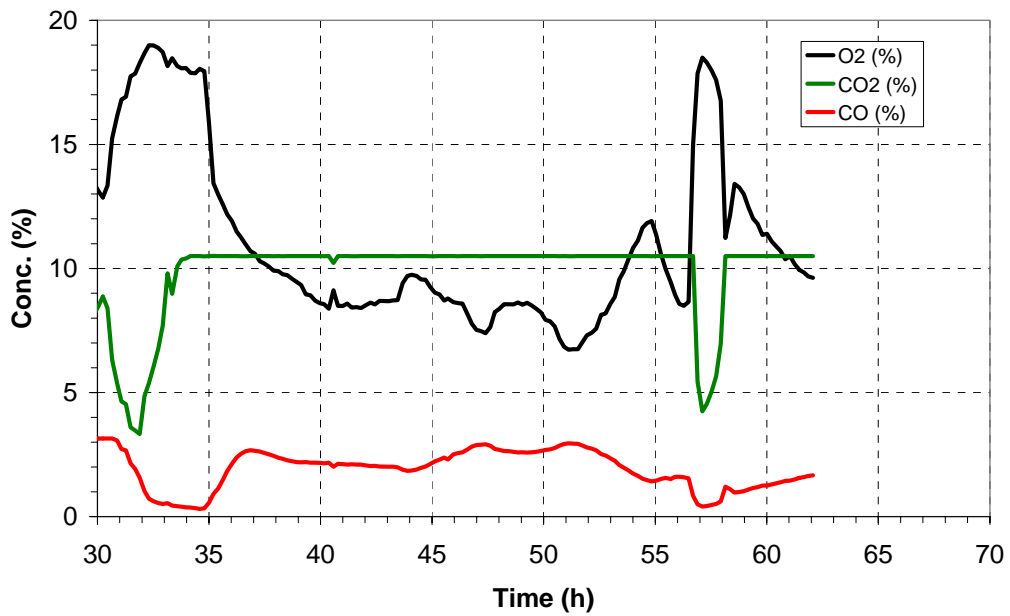


Figur 40 Avlästa koncentrationer av CO₂ på tre olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 2). Instrumentets mätområde max 30 %.

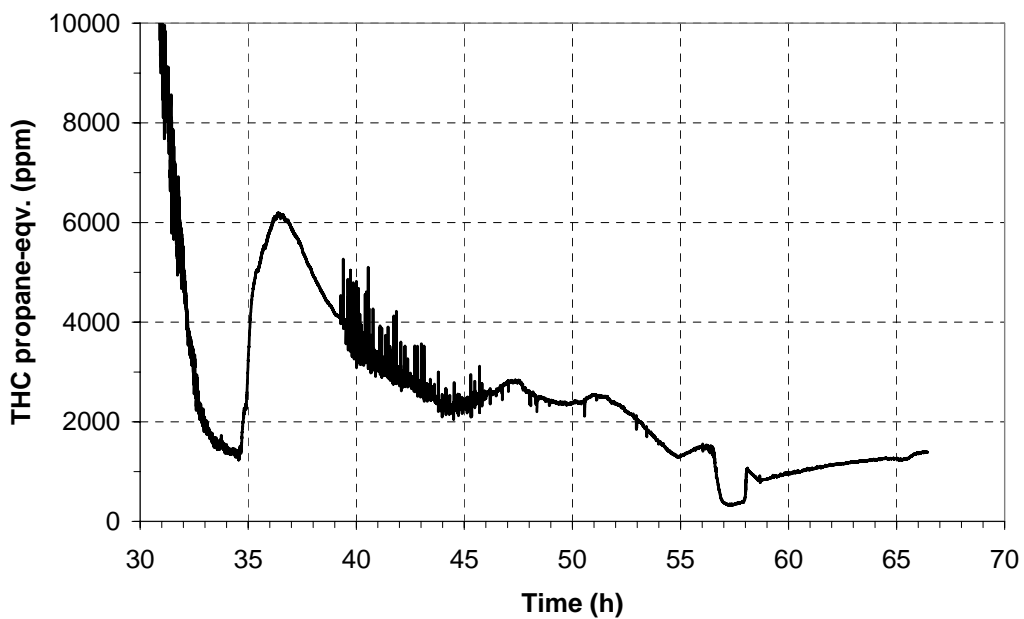
Gaskoncentrationer uppmätta i silotoppen under släckfasen visas i Figur 41 samt i Figur 42. Figur 41 visar både O₂, CO₂ samt CO. CO₂ halten stiger ganska snabbt till en nivå över 10 % (analysatorns övre mätgräns) och stannar på denna höga nivå under hela släckförloppet.

Såsom tidigare diskuterades i kapitel 5.2.3 finns det tydliga tecken på att det sker ett visst inflöde av luft genom öppningen i silotoppen, även när inertgasinmatningen startat. Detta verifieras av att syrgashalten sjunker momentant vid ca 35 tim efter att öppningen i silotoppen täckts för vid 34:53. Samtidigt kan man notera att CO halten börjar stiga för att efter ca 37 timmar stabiliseras på en nivå runt 2-3 % i topputrymmet.

THC-koncentrationen (Figur 42) sjunker snabbt i samband med inerteringen men börjar stiga momentant vid 34:30, vilket sannolikt beror på att inmatningen av CO₂ minskas till 25% vid denna tidpunkt vilket ger mindre spädning av förbränningsgaserna. Temperaturmätningarna (Figur 37) visar dock inte på någon tilltagande pyrolysaktivitet varför en stor del av den kraftiga ökning som noteras sannolikt verifierar att inläckaget av luft reduceras när öppningen i silotoppen täcks över på vilket gör att koncentrationen kan stiga ytterligare. Efter ca 36-37 timmar noteras en fallande koncentration vilket precis som temperaturmätningarna indikerar en dämpad pyrolysaktivitet. Den svaga ökning som kan noteras vid ca 46 timmar respektive 51 timmar är sannolikt en följd av att gasinmatningen startas vilket pressar upp ackumulerad gas från pelletsbulken. Förändringarna mellan 56-58 timmar har dock ingen verifierad förklaring men troligen har täcklocket över öppningen plockats bort under denna period då både CO och CO₂ halt sjunker och O₂ halten ökar.



Figur 41 Uppmätta koncentrationer av O_2 , CO_2 samt CO i silotoppen under släckfasen (försök 2).



Figur 42 Uppmätt koncentration av oförbrända kolväten (THC) i silotoppen under släckfasen (försök 2).

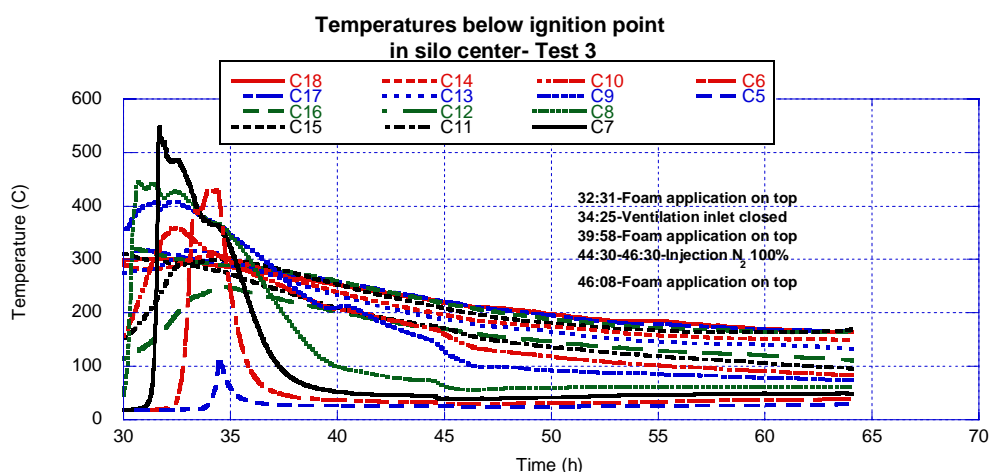
5.2.4.3 Försök 3 - Släckning med skum i kombination med begränsad ventilation och kvävgas

I försök 3 inleddes släckinsatsen vid tiden 32:31 (tim:min) med att skumbegjuta pelletsytan i silotoppen med tryckluftsgenererat skum (skumtal ca 20), se Figur 43 (1). Påföringen tog ca 1:20 min:s och gav ett ca 30 cm tjockt skumtäck. Temperaturen vid termoelement TC7, det termoelement som var involverat i den mest aktiva delen av pyrolysisfronten, sjönk ganska momentant (Figur 44), dock inte så snabbt som tidigare noterats vid gaspåföringen i försök 1-2. Även temperaturökningstakten dämpades i positionerna för ett antal termoelement och i några fall började temperaturen att sjunka. Samtidigt som skumbegjutningen inleddes kunde man notera en begynnande temperaturökning för TC6. Denna ökning påverkades endast marginellt av skumbegjutningen och temperaturen steg till drygt 400°C. Efter ca 34 timmar bekräftades att pyrolysisfrontens utbredning ej stoppats av skumbegjutningen då även TC5 började stiga i snabb takt, detta trots att skumtäckets i princip var helt opåverkat förutom en liten expansion på grund av värmen underifrån. Vid 34:25 monterades täcklocket på inloppet av ventilationskanalen i silons botten vilket ströp all lufttillförsel in i silon nerifrån. Detta resulterade i en mer eller mindre momentan temperatursänkning hos alla termoelement, mest markant för TC 5-6.



Figur 43 (1) Skumbegjutningen av silotoppen genomfördes med tryckluftsgenererat skum för att minimera dräneringen av vatten. (2) Skummet har en mycket långsam nedbrytning men skumtäckets behöver förnyas när öppningar börjar uppstå.

Vid tiden 40 timmar (ca 7,5 timmar efter den första skumbeläggningen) förnyades skumtäckets i silotoppen genom en skumbegjutning under ca 1 minut. Temperaturerna hade då sjunkit konstant i pelletsbulken och det hade således inte behövts någon inmatning av inertgas. Vid 44:30 startades kvävgasinmatning med 100 % (2,75 kg/tim), inte för att det var nödvändigt ur släcksynpunkt utan mer med syftet att återigen studera inverkan på borttransport av värme från silon. Ca 46:08 förnyades skumtäckets igen genom en skumbegjutning under ca 1 minut. Påföringen av gas pågick i 2 timmar och avbröts således 46:30. Temperaturminskningshastigheten i samband med kvävgaspåföringen påverkades tydligt för vissa termoelement (TC11-7) för att efter det att påföringen stoppats fortsätta att sjunka långsamt. Silon fick därför stå orörd fram till ca 63:30 då demontering och tömning påbörjades, se kapitel 5.2.5.



Figur 44 Temperaturer i silon under släckfasen (försök 3).

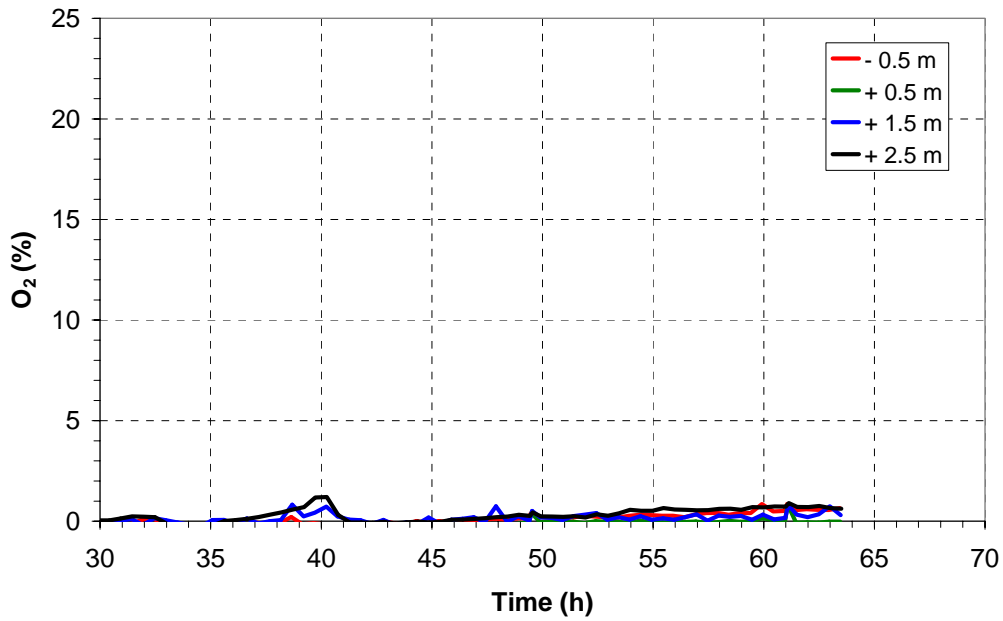
En summering av utförda åtgärder och påförda gasmängder ges i Tabell 5. Som framgår av denna användes endast 5,5 kg kvävgas för släckinsatsen i kombination med skumbejugtning av silotoppen och tillslutning av all ventilation av silon.

Tabell 5 Sammanställning av släckåtgärder och gaspåföring under släckförsök 3.

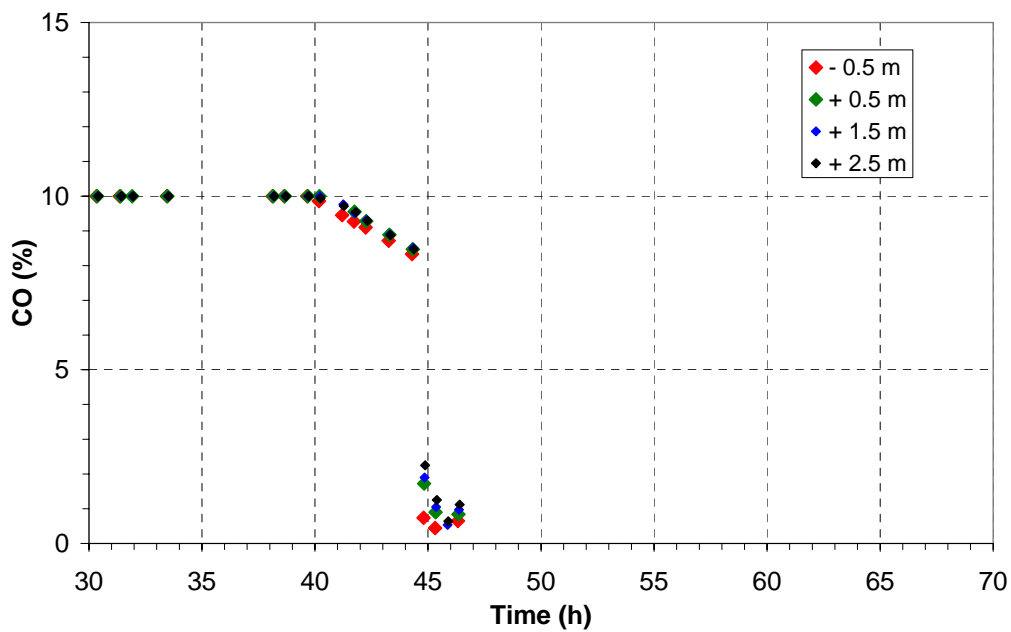
Tid (tim:min)	Inmatnings-hastighet (kg/tim)	Total tid (tim:min)	Total mängd (kg)	Notering
32:31				Skum på topp ca 30 cm Skumtal ca 20
34:25				Ventilationsinlopp stängt
39:58				Nytt skumtäck
44:30-46:30	2,75	2:00	5,5	Kvävgas
46:08				Nytt skumtäck
Summa			5,5	

Data från gasanalysen i pelletsbulken visas i Figur 45- Figur 47 för försök 3 under släckningsfasen. Mätningen av syrgashalten i fyra mätpunkter fördelade i höjddled längs silons centraxel visas i Figur 45. Syrgashalten var nära noll i samtliga mätpunkter redan före det att släckinsatsen initierades och stannade på en mycket låg nivå under hela släckförloppet.

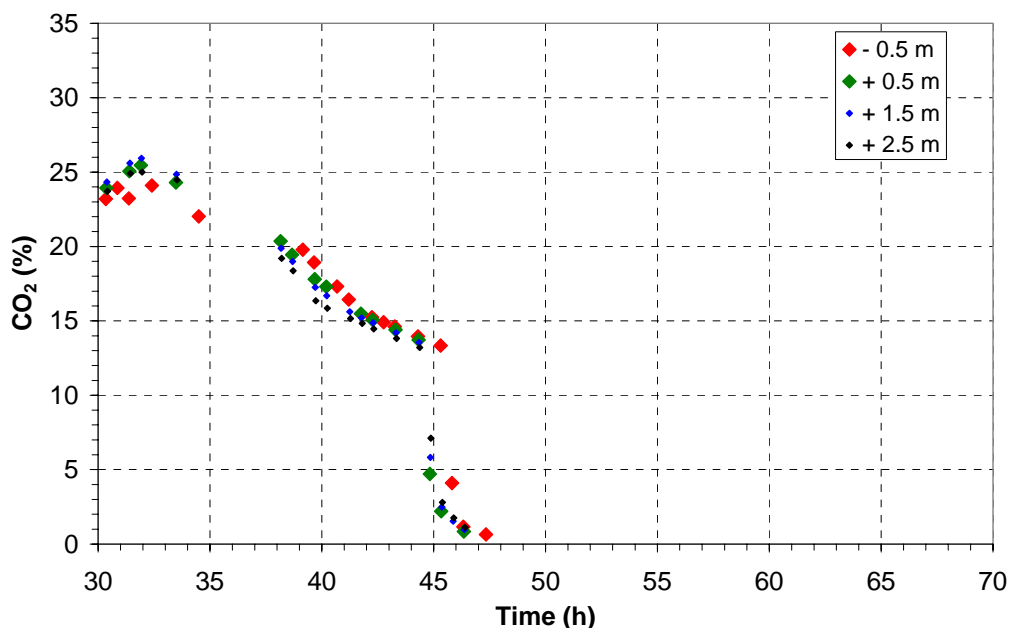
Avlästa koncentrationer av CO samt CO₂ i pelletsbulken under släckfasen visas i Figur 46 respektive Figur 47. Halterna av både CO och CO₂ är höga i pelletsbulken vid tiden 30 timmar. Vid tiden 32:32 då silotoppen beläggs med ett skumtäck för första gången, börjar halten CO₂ att minska. Det är troligt att detta också gäller CO, men halten är över analysatorns maxvärde under denna period och man kan först vid tiden 40 timmar se att också CO sjunker. Vid tiden 44:30 startar inertering med kvävgas. Detta syns mycket tydligt både på CO och på CO₂, vilka båda sjunker kraftigt till mycket låga nivåer.



Figur 45 Uppmätta koncentrationer av O₂ på fyra olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 3).

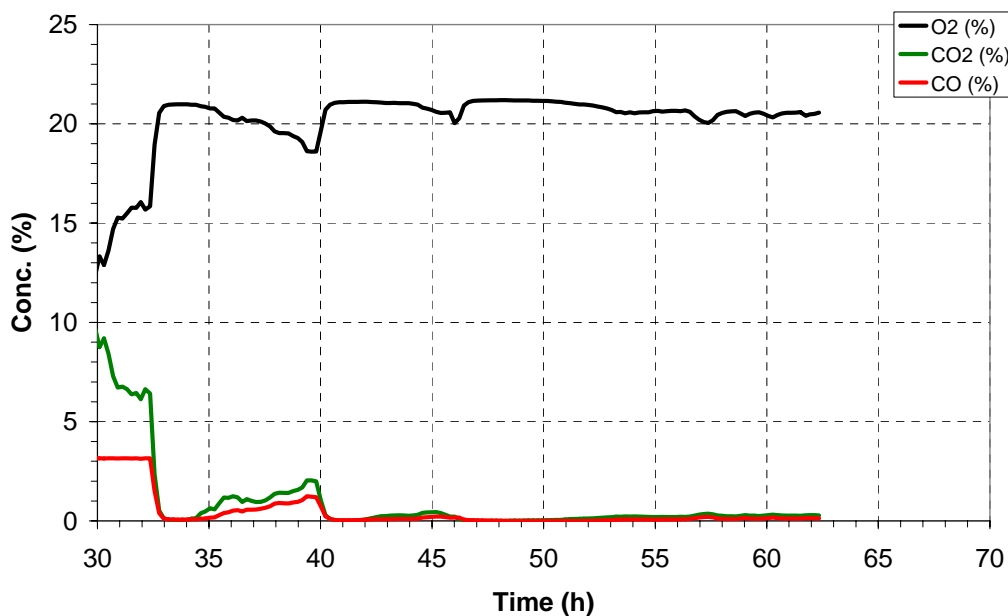


Figur 46 Uppmätta koncentrationer av CO på fyra olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 3). Instrumentets mätområde max 10 %.

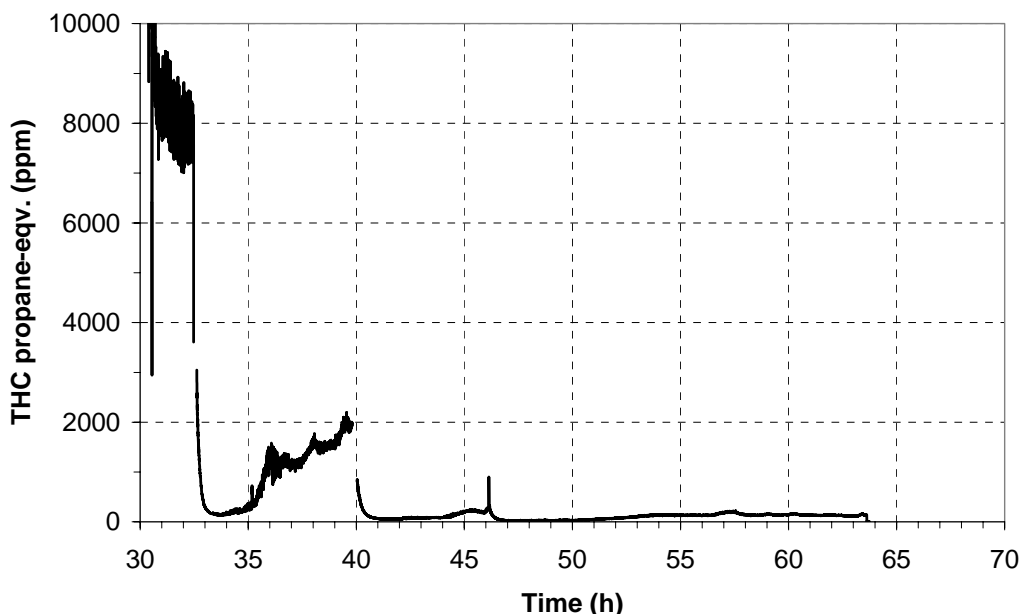


Figur 47 Uppmätta koncentrationer av CO₂ på fyra olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 3).

Gaskoncentrationer uppmätta i silotoppen under släckfasen visas i Figur 48 samt i Figur 49. Figur 48 visar O₂, CO₂ samt CO. Man ser här att skumbeläggningen av pelletsytan i silotoppen 32:31 var mycket effektiv på att hålla nere halterna av förbränningsgaser i topputrymmet. Halterna av förbränningsgaser stiger sedan långsamt för att åter sjunka snabbt vid den kompletterande skumbeläggningen vid tiden 40:00. Man ser i Figur 48 att THC-koncentrationen hålls nere med samma höga effektivitet av ett skumtäck.



Figur 48 Uppmätta koncentrationer av O₂, CO₂ samt CO i silotoppen under släckfasen (försök 3).



Figur 49 Uppmätt koncentration av oförbrända kolväten (THC) i silotoppen under släckfasen (försök 3).

5.2.4.4 Försök 4 - Forcerad genomluftning, samt släckning med skum i kombination med begränsad ventilation och kvävgas/koldioxid

De tre första försöken hade uppvisat mycket bra repeterbarhet under förbrinntiden (med avseende på pyrolyszonens utbredning) och en av de primära iakttagelserna var svårigheten att detektera branden på ett tidigt stadium. I försök 4 valdes därför att undersöka effekten av att ventilera silon med luft under pågående pyrolysis för att på så sätt ”lyfta upp” pyrolysgaserna för en tidigare detektion. Vidare planerades ett antal andra undersökningar i samband med släckinsatsen vilka redovisas nedan.

Ventilering för tidigare detektion:

Den inledande delen av förbrinntiden förlöpte på samma sätt som i Försök 1-3. Efter tiden 18:11 (tim:min) ventilerades silon under 1 timma genom botten på samma sätt som vid gaspåföring, men i det här fallet med luft. Ventilationsmängden motsvarade samma flöde som 100 % inerteringsflöde med kvävgas, dvs. 2,75 kg/tim (ca 2,2 m³/tim). Ventilationen innebar en momentan ökning i pyrolysisintensiteten med ökande temperaturer som följd (TC13) (se Figur 52, diagram 15-40 tim). Samtidigt tog det endast ca 5 min innan gasanalysinstrumenten i silotoppen (MGD-detektorn ännu snabbare) började reagera (se Figur 56 - Figur 57). Temperaturen ovanför tändkällan påverkades marginellt, möjligen medförde det att värmevägen nådde TC52 något snabbare än förväntat. Vid 19:11 avbröts den forcerade luftinmatningen och inloppet till ventilationsröret öppnades igen. Temperaturstegringen i de mest berörda termoelementen (TC13-14) avtog då snabbt. Gaskoncentrationerna i silotoppen började också sjunka och förhållandena i silon tycktes ganska snabbt återgå till ”det normala”, dvs. förhållandena liknande de som rådde vid denna tidpunkt i de tidigare försöken. Något innan 23:00 började gashalterna stiga igen beroende på det tidigare observerade ”genombrottet” när värmevägen nått ytan i silotoppen.

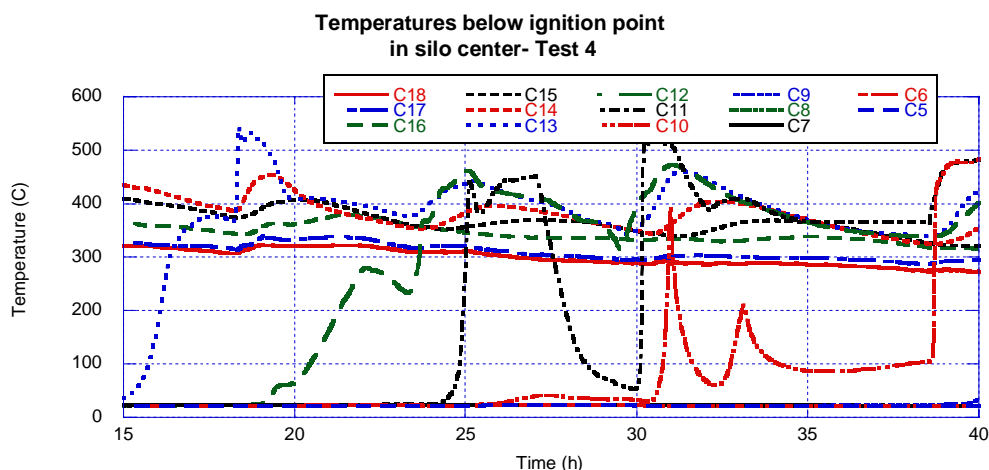
Inmatning av koldioxid:

Vid 24:45 inleddes en ny forcerad ventilering av silon med luft (100 %). Detta var för att ”rensa” silon från olika typer av pyrolysgaser som i sig verkar inerterande. 25:01 ersattes luftinmatningen av koldioxid med en påföringshastighet av 50 % (1,39 kg/tim). Temperaturerna påverkades något i vissa punkter men inmatningen innebar ingen markant förändring. Vid 27:01 ökades därför påföringshastigheten av koldioxid till 100 % (2,54 kg/tim) vilket gav en markant sänkning av framförallt TC11. Den begynnande temperaturökningen hos TC 10 stoppades också. Efter 29:20 avbröts påföringen av koldioxid och inloppet till ventilationsröret öppnades igen för att studera ”hålleffekten” hos koldioxiden. TC 12 registrerade en temperaturökning ganska omgående och vid ca 30:00 erhöles en mycket snabb temperaturökning av TC11 vilket indikerade att pyrolysen tagit fart igen.

Inmatning av kvävgas:

Vid 30:25 påbörjades en forcerad ventilering av silon igen för att ”rensa” denna och få upp pyrolysisintensiteten till ”normal nivå” innan nästa släckförsök inleddes. 30:56 startades en ny påföring med kvävgas. Vid denna tidpunkt var det full pyrolysisaktivitet vid TC 11-12 och TC 10 var mycket snabbt på väg uppåt. Inledningsvis var påföringshastigheten 1,37 kg/tim (50 %) vilket gav en markant temperatursänkning hos TC 10-12. Vid 32:05 sänktes påföringen till 25 % vilket ganska omgående medförde en temperaturstegring igen. Detta bekräftade således erfarenheterna från Försök 1 där samma effekt erhöles när påföringen sänktes till 25 %. Vid 33:05 ökades därför kvävgaspåföringen till 50 % vilket återigen medförde en temperatursänkning.

Vid 38:30 avbröts kvävgasinmatningen och inloppet till ventilationsröret öppnades igen för att studera ”hålleffekten” hos kvävgasen. Även här registrerades en omedelbar temperaturökning vilket indikerade en förnyad pyrolysisaktivitet.



Figur 50 Temperatur i silon under en del av förbrinntid och den inledande släckfasen (försök 4). Se Tabell 6 för sammanfattning av utförda åtgärder.

Skumbegjutning och kvävgasinmatning:

Pyrolysen tilläts att få förnyad intensitet och efter drygt 42 timmar hade pyrolysisfronten spridit sig vidare nedåt och just passerat TC8 (Figur 52). Vid 42:09 skumbelades pelletsen i silotoppen under ca 1 minut vilket gav ett skumtäck på 0,25-0,30 m. Ca 42:13 startades kvävgaspåföring med 50 % (1,37 kg/tim). Temperaturen sjönk momentant på termoelementen närmast pyrolyszonen och övriga sjönk sakta eller planade ut.

Gasprovtagning vid vatteninjicering:

För att undersöka eventuell vätgasbildning vid kontakt mellan vatten och det pyrolyserande materialet injicerades vatten kortvarigt in i pyrolyszonen följt av en gasanalys.

Vid 45:15 borrar därför ett 10 mm hål i betongsilon ungefär vid TC 28 (se Figur 6). Det kan därvid konstateras att det råder ett svagt övertryck inne i silon vilket också verifieras av tryckmätaren på gasinloppet som visar +2,5 Pa.

46:15 avbryts kvävgaspåföringen och 46:23 öppnas skumtäckets i silotoppen upp manuellt för att möjliggöra genomventilation in genom det uppborrade hålet. Åtgärden leder till en omedelbar ökning av pyrolynsaktiviteten igen. 47:00 ökas håldiametern till 12 mm för att senare kunna få in ett tunt rör och injicera vatten. 47:51 injiceras vatten in i silons centrum (i pyrolyshärden) med ca 0,9 l/min i totalt två perioder om 5 sekunder vardera, dvs. totalt ca 0,15 l. I stort sett omedelbart efter vatteninjiceringen (47:52) tas ett gasprov till en påse från injiceringspositionen för senare analys. Analysresultaten redovisas i kapitel 5.2.6.

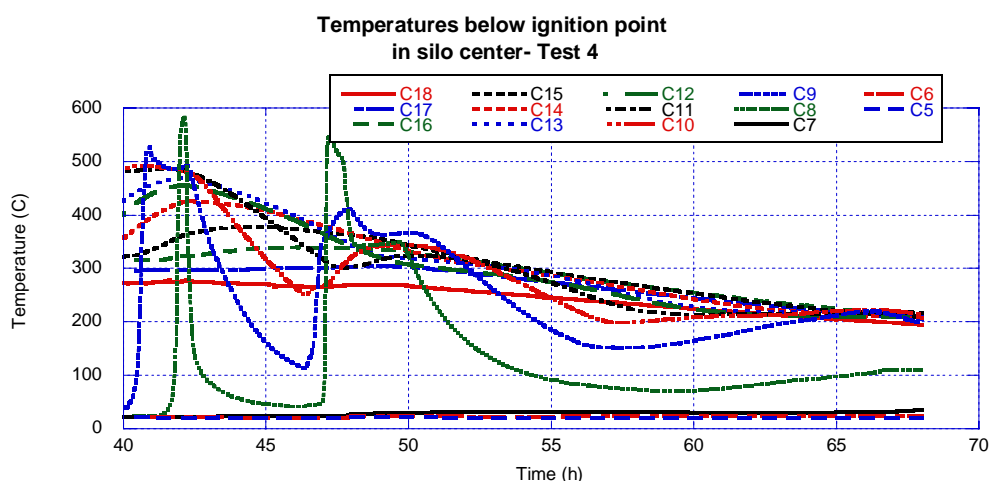


Figur 51 Provtagning av gas genom siloväggen direkt efter vatteninjicering in i pyrolyszonen.

Skumbegjutning och kvävgasinmatning:

Vid 49:40 påbörjas kvävgaspåföringen igen med 50 % flöde och 49:45 utförs en förnyad skumbegjutning av silotoppen. När kvävgaspåföringen inleddes uppmättes ett tryck på minus 2,8 Pa i gasinloppet. Strax efter skumpåföringen avslutats var trycket +0,7 Pa vilket indikerar att skumtäckets förhindrar självdrag genom silon och istället ger ett litet flödesmotstånd.

Vid 66:17 förnyas skumtäckets på silotoppen med skumbegjutning under ca 45 sekunder. Temperaturen vid TC8-10 har då under de senaste ca 10 timmarna uppvisat en viss ökning, troligen på grund av att skumtäckets då långsamt brutits ner och medgav en ökad genomventilation. Skumpåföringen innebar att temperaturerna långsamt började sjunka igen. Ca 67:00 inleds demontering/tömning av silon och 68:00 avbryts kvävgasinmatningen.



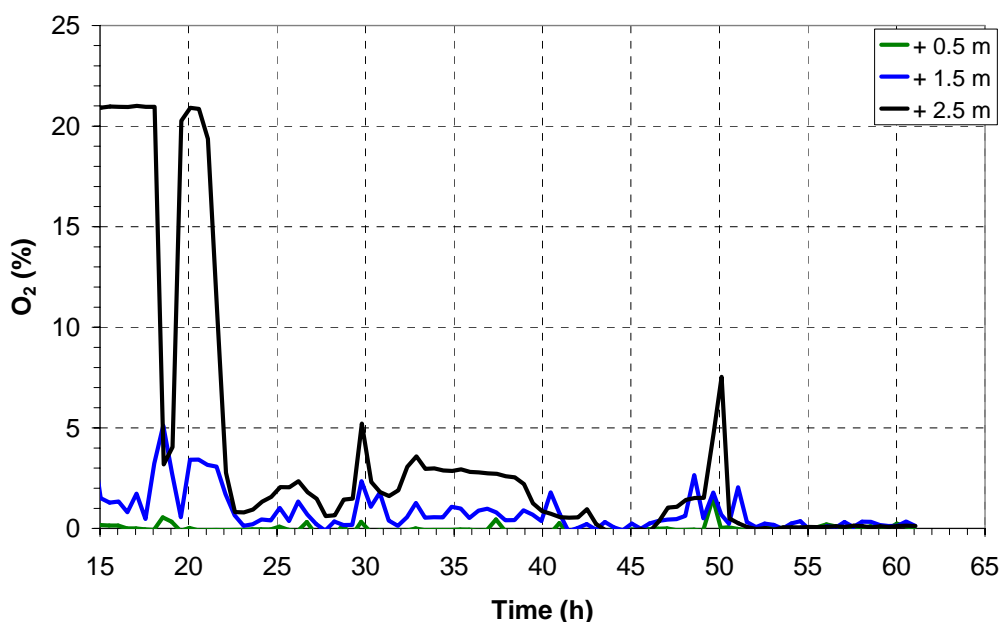
Figur 52 Temperaturer i silon under senare delen av släckfasen (försök 4). Se Tabell 6 för sammanfattning av utförda åtgärder.

Tabell 6 Sammanställning av släckåtgärder och gaspåföring under släckförsök 4.

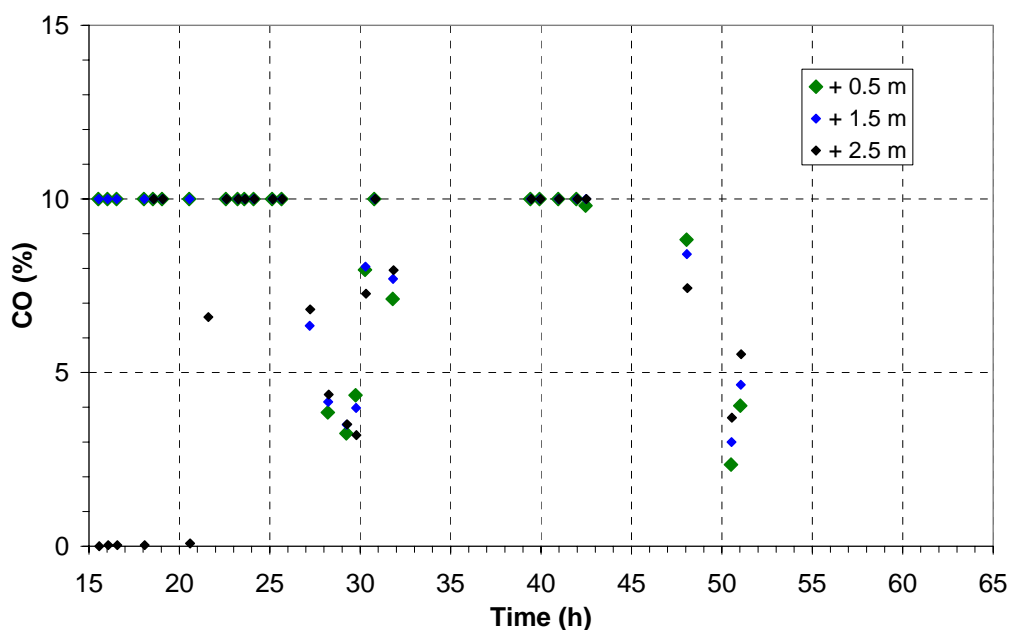
Tid (tim:min)	Inmatnings-hastighet (kg/tim)	Total tid (tim:min)	Total mängd (kg)	Notering
18:11-19:11	(100 skd)			Luftinmatning
24:45-25:01	(100 skd)			Luftinmatning
25:01-27:01	1,39	2,0	2,8	CO ₂
27:01-29:20	2,54	2,33	5,9	CO ₂
29:20	-	-	-	Öppna ventilationsinlopp
30:25-30:56	(100 skd)			Luftinmatning
30:56-32:05	1,37	1,15	1,6	Kvävgas
32:05-33:05	0,69	1,0	0,7	Kvävgas
33:05-38:30	1,37	5,42	7,4	Kvävgas
38:30	-	-	-	Öppna ventilationsinlopp
42:09	-	-	-	Skum på toppen
42:13-46:15	1,37	4,03	5,5	Kvävgas
46:23	-	-	-	”Öppnar” skumtäckte topp
47:51	-	-	-	Injicerar vatten (0,15 l) för gasprov
49:40-68:00	1,37	17,3 (18,3)	23,7 (25,1)	Kvävgas
49:45	-	-	-	Skum på toppen
66:17	-	-	-	Skum på toppen
Summa	-	-	CO ₂ : 8,7 kg N ₂ : 38,9 kg (40,3 kg) Totalt:47,6 kg	

Data från gasanalysen i pelletsbulken visas i Figur 53- Figur 55 för försök 4 under delar av förbrinntiden samt släckfasen. Mätningen av syrgashalten i tre mätpunkter fördelade i höjddled längs silons centrumaxel visas i Figur 53 (mätpositionen -0,5 m var inte tillgänglig då samplingsslangen smält ihop). Syrehalten var generellt låg i pelletsbulken under förbrinntiden och släckfasen. Man kan här konstatera att ventileringen med luft, som gjordes under tidsperioden 24:45-25:01, inte gav någon större effekt på syrehalten i mät-punkterna över tändkällan. Inerteringen med CO₂ vilken inleddes 25:01 sänker syrehalten fram mot 28 timmar något i samtliga mätpunkter. Man ser vidare att inerteringen med kvävgas, som utfördes 30:56-38:30, faktiskt resulterade i en höjning av syrehalten i positionen +2,5 m. När ventilationsinloppet öppnades 38:30 sjunker syrgashalten i bulken och vid den andra inerteringen, som utfördes med kvävgas (42:13-46:15), i kombination med skum på toppen av silon, resulterade detta i mycket låga syrehalter i alla mätpunkter. Man kan vidare se en kortvarig ökning av syrehalten för positionen +2,5 m runt 50 timmar. Runt denna tidpunkt öppnades ett litet hål i silomanteln för vatteninjektion och provtagning. Därefter startades en ny inerteringsperiod med kvävgas (49:40) i kombination med att skumtäckets förnyades (49:45).

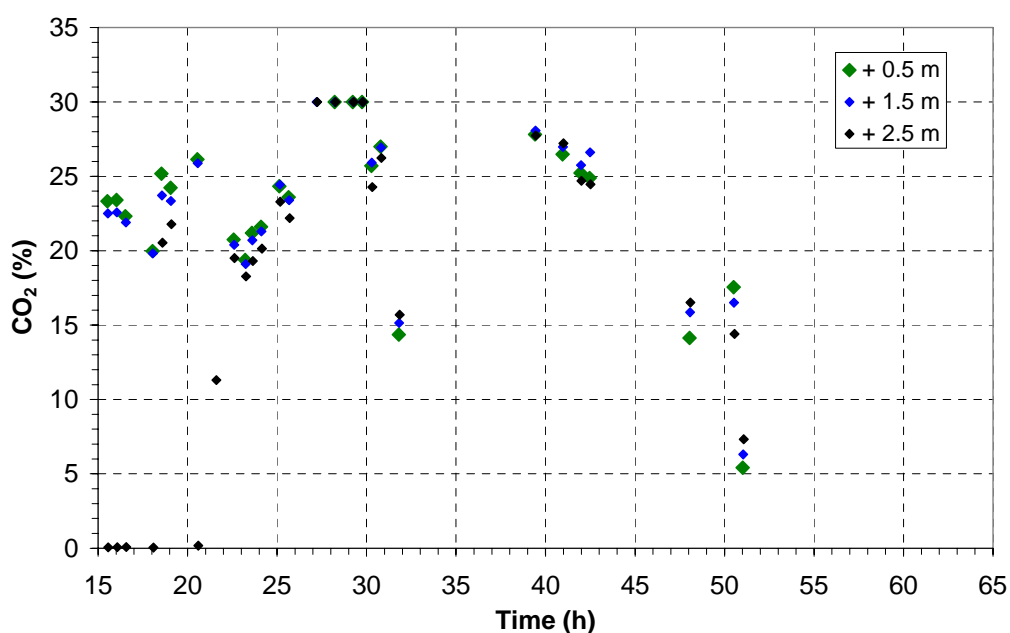
Avlästa koncentrationer av CO samt CO₂ i pelletsbulken under släckfasen visas i Figur 54 respektive Figur 55. För CO kan man se att halten sjunker snabbt i och med inerteringen med CO₂ i början av släckningsperioden (25:01-29:20), för att sedan snabbt stiga under genomluftningen 30:25-30:56. Under perioden ca 32-39 timmar saknas avläsningar. Efter ca 42,5 timmar finns endast avläsningar vid ca 48 respektive 51 timmar. Man kan dock notera att halten CO är något reducerade runt 48 timmar och att de sedan reduceras ytterligare efter det att N₂ inerteringen startats igen (49:40). Halten CO₂ ökar till över 30 % under CO₂ inerteringen för att sedan följa ett förlopp motsvarande det för CO.



Figur 53 Uppmätta koncentrationer av O₂ på tre olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 4).

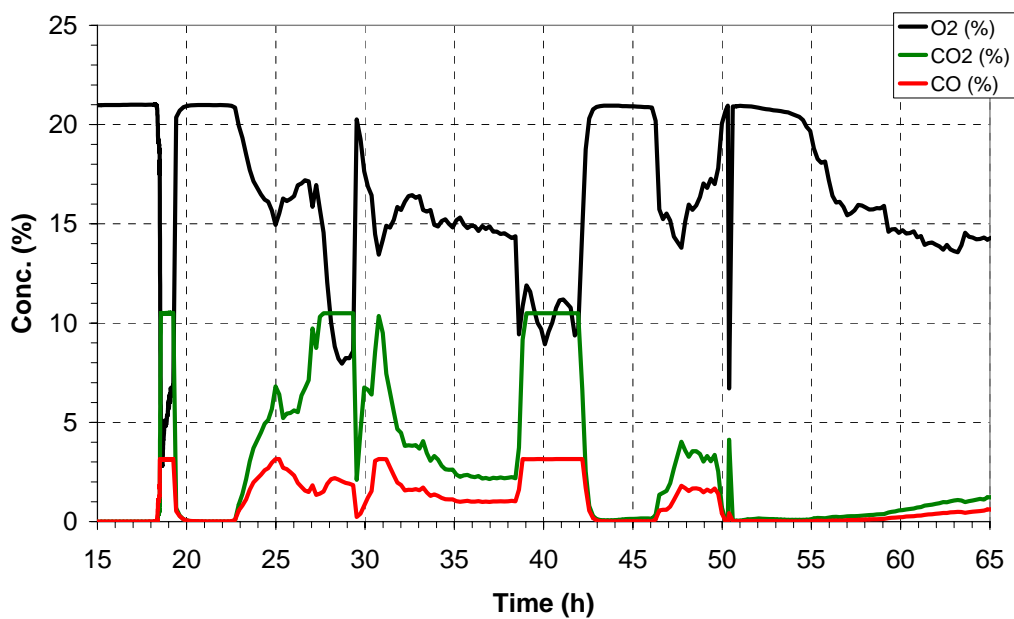


Figur 54 Uppmätta koncentrationer av CO på tre olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 4). Instrumentets mätområde max 10 %.

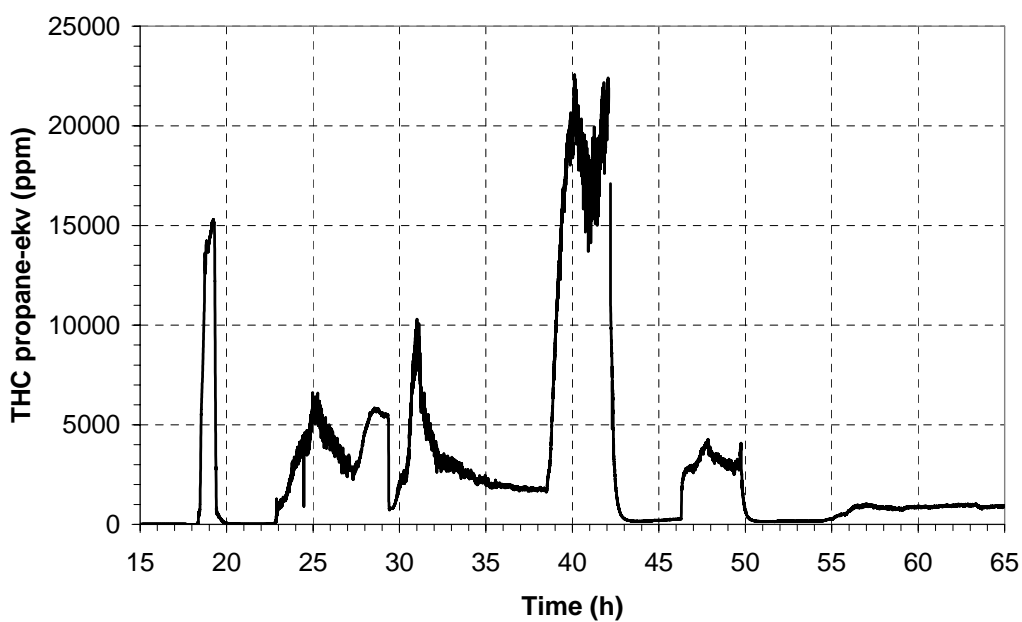


Figur 55 Uppmätta koncentrationer av CO₂ på tre olika höjder i centrum av silon under släckfasen (försök 4).

Gaskoncentrationer uppmätta i silotoppen under delar av förbrinntiden och släckfasen visas i Figur 56 samt i Figur 57. Liksom i försök 3 ser man här att skumbegjutning av silotoppen (42:09) i kombination med inertering (42:13) leder till mycket snabb respons och låga halter av förbränningsgaser i silotoppen. De högsta halterna av förbränningsgaser, framför allt THC, uppmättes efter det att N₂ inerteringen avbröts och ventilationsinloppet öppnades vid 38:30.



Figur 56 Uppmätta koncentrationer av O₂, CO₂ samt CO i silotoppen under släckfasen (försök 4).



Figur 57 Uppmätt koncentration av oförbrända kolväten (THC) i silotoppen under släckfasen (försök 4).

5.2.5 Observationer vid demontering och tömning av silon

Efter varje försök demonterades silon successivt genom att lyfta av en cementring i taget rakt upp och låta pelletsen strömma ut genom skarven mot underliggande ring. Detta gav en mycket bra möjlighet att få en bild av hur pelletsen inne i silon påverkats av branden samt pyrolyszonens exakta utbredning. Även effekterna av fuktvandringen uppåt i silon var tydligt märkbara. Bildsekvensen i Figur 58 ger en sammanfattning av de generella iakttagelser som gjordes efter varje försök.

Efter försöken kunde man tydligt notera att pelletsen på ytan i silotoppen påverkats av fukttransporten uppåt i silon. Pelletsen hade tappat sin hållfasthet och återgått till formen av fuktigt sågspån. I försök 1-2, där ingen skumbegjutning genomfördes, kunde man tydligt se en 10-15 cm bred ring med opåverkad pellets ca 10-15 cm från siloväggen (Figur 58-1). Fuktpåverkan längs siloväggen var sannolikt ett resultat av kondensering längs siloväggen i topputrymmet, eftersom denna påverkan bara kunde noteras på de översta 10-15 cm av pelletsen.

När ring nr 5 lyftes av framkom att pelletsen i silons centrum hängde samman och bildade en konformad pelare av pellets liknande en "termitstack". Denna var konformad uppåt och dess diameter i basen var 40-50 cm. När nästa ring (nr 4) lyftes av konstaterades att pelaren fortsatte nedåt samtidigt som den växte något i diameter (Figur 58-3,4). Stacken med pellets var inte speciellt hård utan bröts lätt sönder vid mekanisk påverkan och det bildades inga klumpar utan återgick direkt till "pelletsformen". Pelletsen var dock påverkad av fukten och hade inte en lika hård yta som opåverkad pellets.

När ring 3 lyftes, dvs. den ring där tändkällan var placerad, så bekräftades att pyrolyszonen bara sträckte sig precis ovanför denna. Under tändkällan kunde noteras en cylinderformad pyrolyszon i silons centrum. I försök 1 (Figur 58-5) och försök 4 hängde den övre halvan av pelletsen i ringen kvar när denna lyftes och materialet fick då "spettas" loss underifrån. I de övriga två försöken rann materialet ut utan problem.

Pyrolyszonen kunde sedan följas nedåt i silon och i de försök temperaturmätningarna indikerat en viss dragning åt ena sidan så kunde detta också verifieras (Figur 58-6). Det var också tydligt att övergången mellan pyrolyszonen med helt förkolnade pellets och helt opåverkad pellets var mycket skarp och utgjordes av en ca 5 cm zon med mer eller mindre brunfärgade pellets. Nedåt var gränsen ännu mer distinkt och gränsskiktet utgjordes här bara av någon cm. Detta framgick också av skadorna på den träpinne som höll termoelementen på plats i silons centrum (Figur 58-7).



(1)



(2)

Bildtext, se nästa sida



(3)



(4)



(5)



(6)



(7)

Figur 58 Bildsekvens från demontering och tömning av silon efter ett försök. Fotona visar: (1) pelletsytan i silotoppen innan tömning påbörjas, (2) pellets som strömmar ut när en cementring lyfts, (3-4) sammanhängande pellets i ring 5 respektive ring 4 pga. fukt, (5) lyft av ring 3 med tändkällan och en del pellets hängande kvar, (6) pyrolyszonens utbredning i överkant av ring 2 (motsvarande läge för TC13), (7) förkolnad resp. opåverkad termoelementstapeln i centrum av silon vid pyrolysfrenten.

Som tidigare redovisats i kapitel 5.2.4.1, upptäcktes en brand i ett täcklock av trä i silons botten efter ca 61 timmar i försök 1 (Figur 59-1). Bakom täcklocket konstaterades en glödhård och för att kunna köra färdigt försöket som planerat, injicerades vatten via ett stålrör samtidigt som hålet i täcklocket tätades med isolering (Figur 59-2).



Figur 59 Pyrolys- och brandspridning på grund av otät silokonstruktion i försök 1. Fotona visar: (1) brand på utsidan av täcklucka, (2) vatteninjicering, (3) pyrolyszon efter siloväggen, (4) pyrolyserad pellets innanför täckluckan, (5) liten pyrolyszon längs silobotten på väg mot andra sidan, (6) sotspår på betongen.

När silon demonterats och ring 2 lyfts av efter försöket, kunde man notera att en liten pyrolyszon letat sig ut mot siloväggen och därefter följt denna ner mot luckan (Figur 59-3). Sannolikt var orsaken att luckan inte varit helt tät i anläggningen mot betongen. Detta medförde ett litet inläckage av luft som kunde underhålla och sprida en begränsad pyrolyshård, trots att silon kontinuerligt inerterades med kvävgas. Vid ytterligare undersökning av pelletsen bakom luckan kunde man konstatera att pyrolyszonen var på gång

att sprida sig vidare längs silobotten mot den motstående luckan (Figur 59-5,6) vilket också indikerade ett visst läckage även där.

Misstaget med en inte helt tät lucka gav trots allt värdefull information och visade på vikten av att ha en så tät konstruktion som möjligt. Kan ”tjuvluft” komma in i silon under den nivå där pyrolysen pågår, så är sannolikheten stor att denna hjälper till att sprida pyrolysen på ett oväntat sätt och skapar på så sätt problem. Sannolikt medförde också läckaget att släckinsatsen försämrades.

I försök 3-4 användes en kombination av skumbegjutning av silotoppen och tillslutning/inertering. Syftet med skumbegjutningen i försök 3 och 4 var att åstadkomma ett tätslutande ”lock” på silon för att hindra ett luftflöde ner i silon via toppen. Dessutom kan ett lock av skum ge ett motstånd som gör att den släckgas som påförs i botten av silon inte ventileras bort så lätt. Detta är sannolikt viktigast vid kvävgasanvändning då densiteten i princip är lika med den för luft. För att minimera de negativa konsekvenserna med vatten på pelletsytan användes ett tryckluftsgenererat skum (CAF, Compressed Air Foam) med ett skumtal på ca 20-25. På detta sätt kan ett mycket stabilt skum alstras där dräneringstiden uppgår till ett antal timmar. Den långa dräneringstiden leder också till att en stor andel av skummet hinner förångas istället för att dränera. I de genomförda försöken kunde man vid tömningen konstatera att det översta lagret av pellets påverkats och de översta ca 10 cm av pelletsen hade tagit åt sig vatten och expanderat till ca 30 cm (Figur 60). Fukten kan i detta fall ha kommit både från det dränerade skummet och från fuktvandringen inne i silon, där de fuktiga gaserna förhindrades att ventileras bort på grund av skumtäcket.



Figur 60 Skumbegjutningen av silotoppen medförde att det översta skiktet av pelletsen svällde och expanderade från 0,1 m till ca 0,3 m.

5.2.6 Resultat från kemiska analyser av gasprover

Kvalitativ analys av VOC

Provtagning med Tenax TA adsorbentrör (Supelco) gjordes vid försök 3 och 4. Blankrör förvarades jämte provtagningsrören fram till analys, för kontroll av kontaminering som eventuellt kan uppstå vid frakt av rören. Analysen av blankrören visade att det inte var några problem med kontaminering.

Vid provtagningen seriekopplades två stycken rör, ett huvudrör och ett back-up rör, för att försäkra sig om en minimering av provtagningsförluster. Vid varje provtagning under försök 3 togs först ett prov med ett lägre flöde och sedan ett prov med högre flöde (se

Tabell 7). Anledningen till att man tog två prover med olika totalvolym, var att man försökte få en lämplig provtagen mängd för den efterföljande analysen. En för låg provtagen mängd är svår att detektera, en för stor provtagen mängd ger provtagningsförluster. Flödena varierade mellan 30-100ml/minut, samplings tiden mellan 1-15 minuter, samplad volym blev därmed 30-1500 ml.

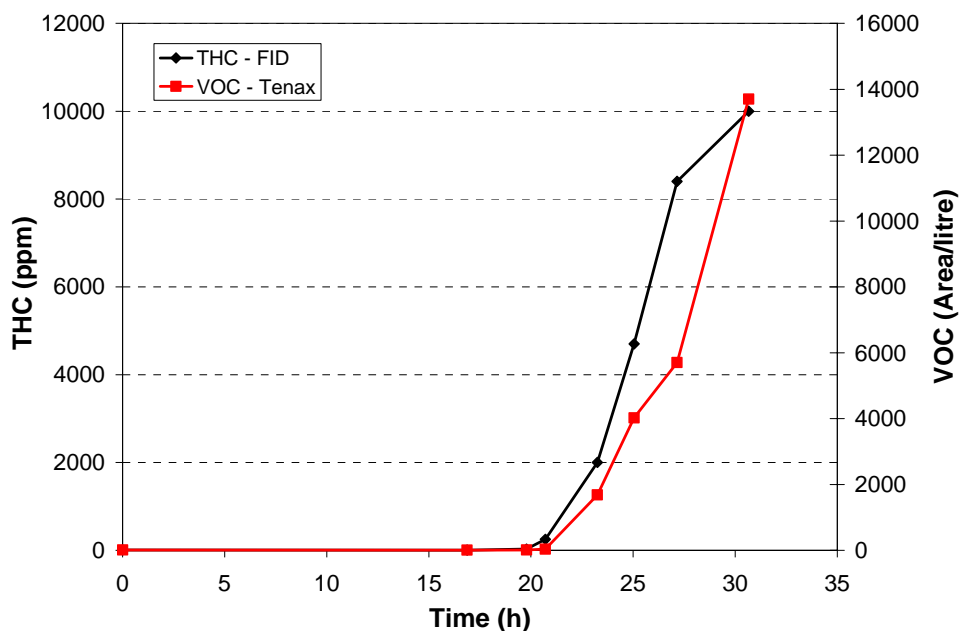
Vid provtagningen under försök 4 samplades endast med ett flöde då man hade erfarenhet från försök 3. Flödet var 100 ml/minut och samplings tiden varierade mellan 1-5 minuter. Provtagen volym varierade därigenom mellan 100-500 ml (se Tabell 8).

De provtagna Tenaxrören desorberades termiskt med hjälp av en *Perkin-Elmer ATD 400* och analyserades med en *Varian* gaskromatograf *CP-3800* med masspektrometer *MS Saturn 2000* [16]. Analysen gav kvalitativ/semikvantitativ information, då det inte fanns någon kalibrering tillgänglig för individuella VOC ämnen.

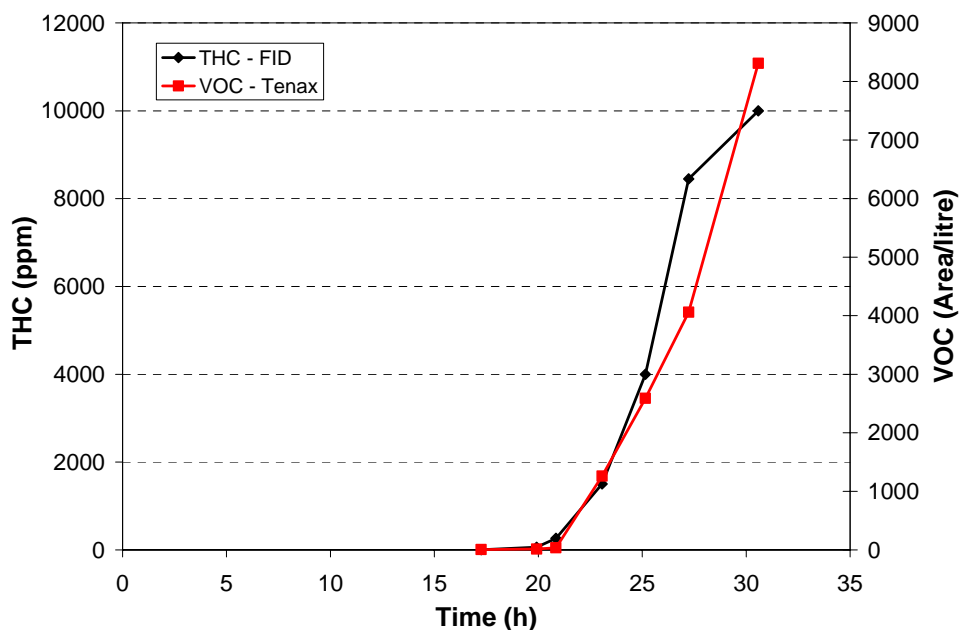
Den första provtagningen under försök 3 skedde precis efter det att silon fyllts med pellets. Provtagningen därefter påbörjades vid tiden 16:50 (tim:min). Provtagningen pågick fram till tiden 30:40, precis innan släckningen påbörjades. En kvantifiering av den sammanlagda topparean (signal i MCounts) från GC- analysen överensstämmer trendmässigt väl med totalkolvätehalten (THC) uppmätt med FID (se Tabell 7 samt Figur 61 och Figur 63). Detta visar att provtagningen fungerat bra och att man inte har haft några signifikanta provtagningsförluster.

Tabell 7 Resultat från försök 3. Semikvantitativ analys av VOC på Tenax jämförd mot THC uppmätt med FID-analysator.

Försökstid (tim:min)	THC från FID (ppm)	Tenax samplad volym (liter)	Topparea VOC, Tenax låga flöden (Area/liter)	Topparea VOC, Tenax höga flöden (Area/liter)	Händelse
0:00	6	1,5	8,6		Silon fylld med pellets
16:52	4	1,5	4,6		Pyrolysen ökande
17:15	4	1,5		5,3	— ”—
19:47	27	0,5	11,0		— ”—
19:55	58	1,5		15,0	— ”—
20:42	250	0,5	39,4		— ”—
20:51	260	1,5		34,6	— ”—
23:04	1500	0,5		1260	— ”—
23:15	2000	0,3	1680		— ”—
25:03	4700	0,1	4020		— ”—
25:09	4000	0,3		2590	— ”—
27:09	8400	0,1	5700		— ”—
27:14	8450	0,3		4060	— ”—
30:35	10000	0,1		8310	— ”—
30:40	10000	0,03	13700		Släckning påbörjas



Figur 61 Totalkolvätehalt (THC) uppmätt med FID och total topparea/liter samplad gas från Tenaxmätning. Låga samplingsflöden, försök 3.

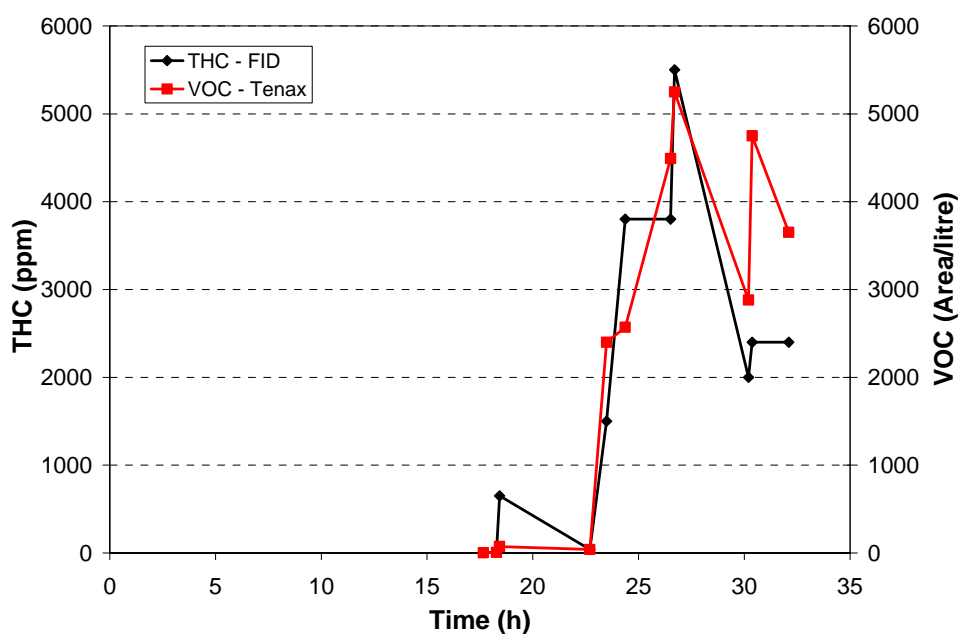


Figur 62 Totalkolvätehalt (THC) uppmätt med FID och total topparea/liter samplad gas från Tenaxmätning. Höga samplingsflöden, försök 3.

Första provtagningen vid försök 4 gjordes vid tiden 17:40 (tim:min). Provtagningen pågick under ökande pyrolysisintensitet, under inertering med CO₂, samt under inertering med N₂, fram till 32:06 (tim:min) (se Tabell 8). En kvantifiering av den sammanlagda topparean från GC-analysen överensstämmer trendmässigt bra med totalkolvätehalten uppmätt med FID (se Tabell 8 och Figur 63).

Tabell 8 Resultat från försök 4. Semikvantitativ analys av VOC på Tenax jämförd mot THC uppmätt med FID-analysator.

Försökstid (tim:min)	THC från FID (ppm)	Tenax samplad volym (liter)	Topparea VOC, Tenax (Area/liter)	Händelse
17:40	4	0,5	2,8	Före gasgenombrott
18:17	6	0,3	6,8	Blåser luft underifrån för att få upp bildad gas i toppen av silon för detektion
18:26	650	0,3	74	— ” —
22:42	40	0,5	40	Ingen luft genom silon, pyrolysen ökande
23:29	1500	0,1	2400	— ” —
24:22	3800	0,5	2570	— ” —
26:31	3800	0,1	4490	— ” —
26:42	5500	0,3	5250	Under slutet av inertering med CO ₂
30:12	2000	0,5	2880	Vi låter CO ₂ från inerteringen rinna ut ur silon
30:22	2400	0,1	4750	— ” —
32:06	2400	0,3	3650	Under slutet av N ₂ inertering



Figur 63 Totalcolvätehalt (THC) uppmätt med FID och total topparea/liter samplad gas från Tenaxmätning under försök 4.

De individuella kolväten (VOC ämnen) som fångades på Tenaxrören identifierades genom den mass-spektrometriska analysen. Här kunde man endast ge en grov uppskattning av den relativa förekomsten (som Toppårea/liter), då det inte fanns någon kalibrering tillgänglig för de individuella ämnena.

Vid försök 3 kunde man främst identifiera olika terpen^{iv}, men även olika aldehyder t.ex. pentanal och hexanal och furaner (metylfuran).

När silon fylldes med pellets avgick det i huvudsak olika sorters terpen (alpha-pinen, 3-carene, camphene, limonene), men två andra VOC-ämnen dominerade, ett av dessa var metylfuran. Det första (oidentifierade) ämnet återfanns i kromatogrammet vid 1.8 minuter, och var vid tiden noll en betydande del av de totala ämnen som detekterades. Denna andel ökade fram till tiden 20:42 (tim:min) där den med FID uppmätta THC halten hade ökat från ca 5 ppm till 250 ppm. Vid nästa mätning (23:15) hade THC halten ökat till 2000 ppm men andelen av det oidentifierade ämnet hade då minskat till en åttodel från föregående mätning, andelen var därefter ungefär konstant.

Ämne nummer två som dominerade, metylfuran, utgör ca 2 procent av totala VOC-ämnen från starten av försöket fram till ca 21 timmar. Vid 23 timmar, då THC halten uppgår till ca 2000 ppm, ökade halten metylfuran till att ligga kring 20 procent av den totala VOC-halten.

Terpenen 3-carene's andel av totala VOC-ämnen, varierade mellan 4-5 procent i början av försöket. När THC halten uppmättes till 250 ppm (20:42) sjönk andelen ner till 2 % för att sedan öka och låg därefter kring tre procent.

Terpenen limonen's andel av totala VOC-ämnen, låg kring 3 procent i början av försöket. När THC halten uppmättes till 250 ppm (20:42) sjönk andelen ner till 1,5 % och låg därefter på den nivån.

Det bör noteras att de ovan angivna semikvantitativa måtten på individuella VOC-ämnen är mycket grova, då MS detektorns respons varierar, både med halt och ämne.

Tenax mätningarna från försök 4 hade vid tiden för färdigställande av denna rapport ännu inte utvärderats m.a.p. individuella VOC-ämnen.

Kvantitativ analys av VOC

Vid två tillfällen under försök 3 provtogs Tenaxrör för analys på ett analysystem bestående av en gaskromatograf där den separerade gasen splittas till både en mass-spektrometer (MS) och en flamjonisationsdetektor (FID). MS används för identifiering av individuella VOC ämnen och FID används för kvantifiering. Den stora fördelen med att kvantifiera med FID ligger i att responsen för olika VOC-ämnen är relativt konstant. FID ger även en signal som är proportionell mot halten. Resultaten från dessa analyser ges i Tabell 9.

Vid en jämförelse av den uppmätta totalhalten VOC från Tenaxanalysen med THC från FID-analysatorn kan man notera en dålig överensstämmelse. Totalhalten uppmätt från Tenax ligger långt under FID-värdet. En förklaring kan vara att lätta VOC ämnen (metan, eten, etc.) registreras av FID, men inte fastnar på Tenaxröret. Detta är troligen en delförklaring men inte hela förklaringen till den låga totalhalten från Tenax analysen. Det finns några ytterligare möjliga förklaringar. En förklaring skulle kunna vara att provtagningen

^{iv} Terpen: flyktiga kolväten (C₁₀ – C₁₅) från växtriket med karakteristisk doft. Vissa terpen är alkoholer medan andra terpen är aldehyder. Terpen är uppbyggda av isopren (C₅) enheter.

vid tidpunkten 21:07 misslyckades och att man provtagningen utfördes med ett lägre flöde än det avsedda. Detta skulle i så fall vara ett undantagsfall, då de provtagna rören som analyserades i Växjö ser trendmässigt bra ut (se ovan). Ytterligare en möjlig förklaring kan vara att det förekom något spädningsproblem vid den efterföljande GC-MS/FID analysen. Slutsatsen är att de absoluta haltnivåerna från Tenax-mätningen i Tabell 9 får anses som underskattade.

Vid tiden 21:07 var halterna ovan pelletsytan ökande, då detta var i samband med att "gasfronten" i pelletsbulken var på väg att bryta igenom pelletsytan i toppen på silon. Man kan notera i Tabell 9 att kolvätesammansättningen provtagen med Tenax domineras av enkla alifatiska kolväten, aldehyder och terpen. Det bör dock uppmärksammas att Tenaxprovtagningen främst är lämpad för kolväten från C₆ och uppåt. Mycket lätta kolväten adsorberas inte i Tenaxröret och innefattas således inte i analysen.

Tabell 9 Resultat från försök 3. Kvantitativ analys av VOC.

Försökstid	THC från FID (ppm)	Tenax samplad volym (liter)	Totalhalt VOC (mg/m ³)*	Ingående dominerande ämnen och ämnestypens summahalt*
0:00:00	6	1,5	< 0,1	-
21:07	270	1,5	3,0	Hexan, heptan, oktan: 970 µg/m ³ Pentanal, hexanal: 470 µg/m ³ Terpener (alfa- beta-pinen, 3-karen, limonen, m.m.): 410 µg/m ³ Metylfuran: 180 µg/m ³

* Omvandlingsfaktorn från mg/m³ till ppm (vol.) varierar för olika ämnen, ex. 1 mg/m³ hexan = 0,28 ppm; 1 mg/m³ limonen = 0,17 ppm.

Analys av vätgas (H₂)

Gas provtogs i försök 2 i silotoppen, och i försök 4 i centrum av pelletsbulken i samband med vatteninjicering. Analys av vätgas och andra permanentgaser gjordes efteråt på SP Kemi- och Materialteknik med GC-TCD [17]. Resultaten från analyserna ges i Tabell 10. Analyserna visade att H₂ inte bildades i några signifikanta mängder.

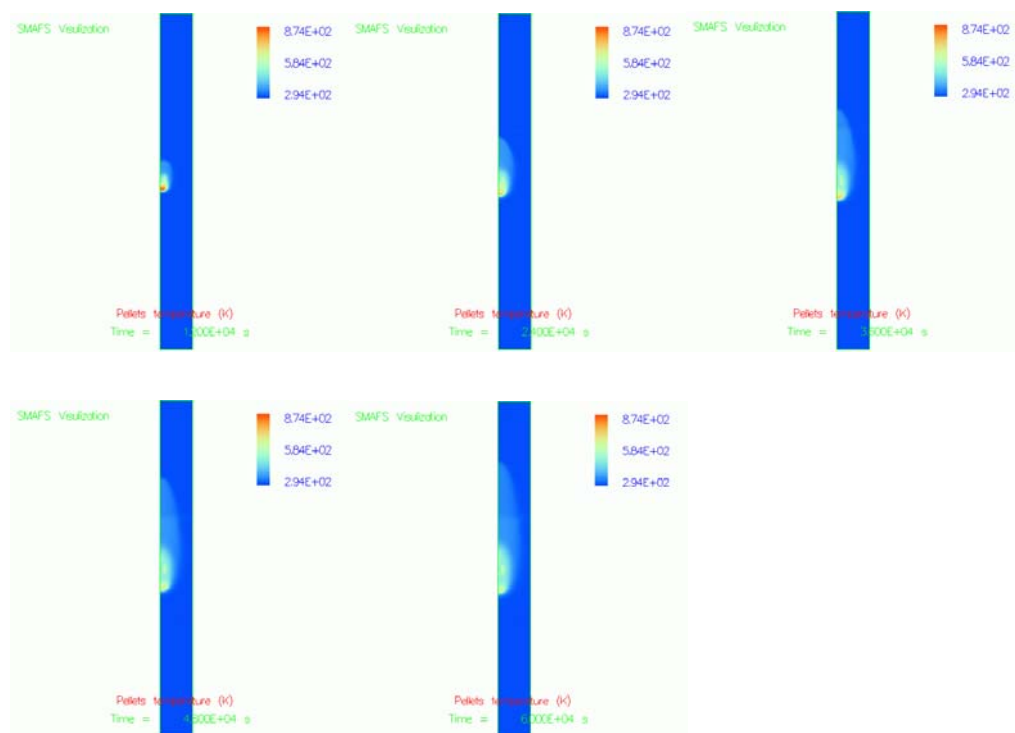
Tabell 10 Analys av H₂ samt andra permanentgaser.

Försök/tid	Händelse	H ₂ (ppm)	O ₂ (%)	N ₂ (%)	Summa analyserade gaser (%)
Försök 2 23:57:00-Silotoppen	Före inertering med CO ₂	1700	14,4	76,2	91
Försök 2 32:36:00-Silotoppen	Efter inertering med CO ₂	70	18,5	72,5	91
Försök 4 47:45:00-Pelletsbulken	Före injicering av vatten	1000	15,5*	75,5	91
Försök 4 47:52:00-Pelletsbulken	Efter injicering av vatten	500-800	19,5*	79,5	100

* Den höga syrgashalten är troligen en följd av håltagningen för lansen för injicering av vatten.

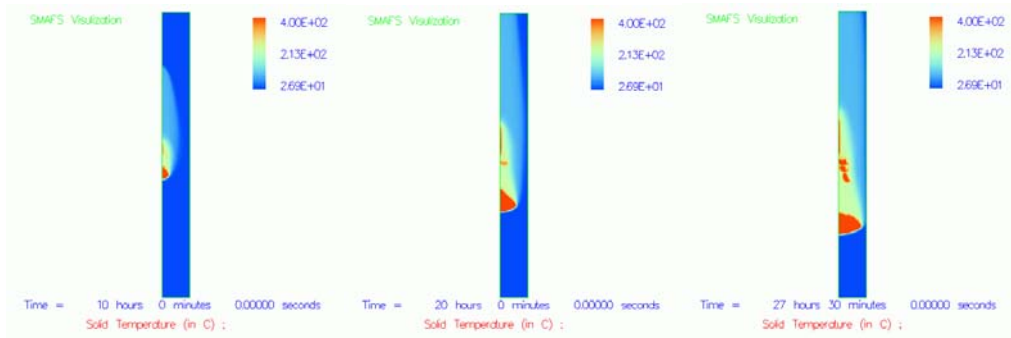
5.3 Resultat av CFD-simuleringar

Resultaten av den första simuleringen visas i Figur 64 i form av fem bilder av beräknad temperaturutbredning i silon vid olika tidpunkter under den inledande pyrolysfasen. Bilderna representerar totalt 16,7 timmars förbrinntid och man kan notera hur en ökande temperatur breder ut sig ifrån tändkällan. Pelletsen runt tändkällan torkar först ut innan oxidationsprocessen leder till ökad temperatur som följd. De varma gaser som produceras innehåller typiska förbränningsprodukter såsom vattenånga, CO₂, etc. Den varma gasen sprider sig i form av en plym uppåt från tändkällan och pyrolyszonen. Men gaserna tränger också undan den ursprungliga luften och därmed också syret vilket förhindrar att antändning erhålls. På grund av flödesmotståndet i materialet begränsas möjligheten att suga in frisk luft in i den varma plymen. Detta medför följaktligen helt andra strömningsförhållanden än vid en traditionell brand. Pelletsen under pyrolyszonen värms huvudsakligen genom värmeledning och strålning vilket är en långsam process. Här finns å andra sidan syre tillgängligt vilket medför att pyrolysen kan sprida sig nedåt, i detta fall med en beräknad hastighet av ca 0,02 m/tim [11].

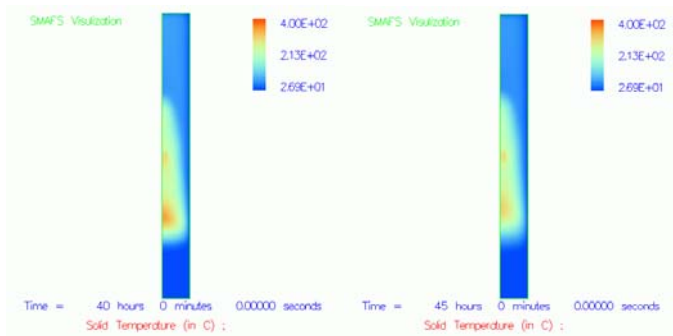


Figur 64 Beräknad temperaturfördelningen i silon (halvsymmetri) baserat på den första simuleringen (OBS! temperaturskala i °K). Tidstegen för de redovisade bilderna är 3,3 tim, 6,7 tim, 10 tim, 13,3 tim samt 16,7 tim.

I den andra simuleringen var förutsättningarna mer lika experimenten och i detta fall inkluderades även släckfasen. Temperaturutbredningen från denna simulering redovisas i Figur 65 vid tiderna 10, 20, 27,5, 40 samt 45 tim. Det bör observeras att temperaturskalan (färgskalan) är annorlunda jämfört med Figur 64, då temperaturerna i Figur 65 redovisas i °C. Förhållandena är i princip lika de i simulering 1, dvs. pyrolyszonen sprider sig nedåt medan en värme/fuktvåg sprids uppåt. Pyrolyshastigheten är högre, ca 0,05 m/tim, vilket kan bero på den ökade ventilationen men det finns också andra faktorer som justerats i beräkningarna som kan medverka till denna ändring. Värme/fuktvågen uppåt hade en utbredningshastighet av 0,2 m/tim.



a) Temperaturprofiler under förbrinntiden.

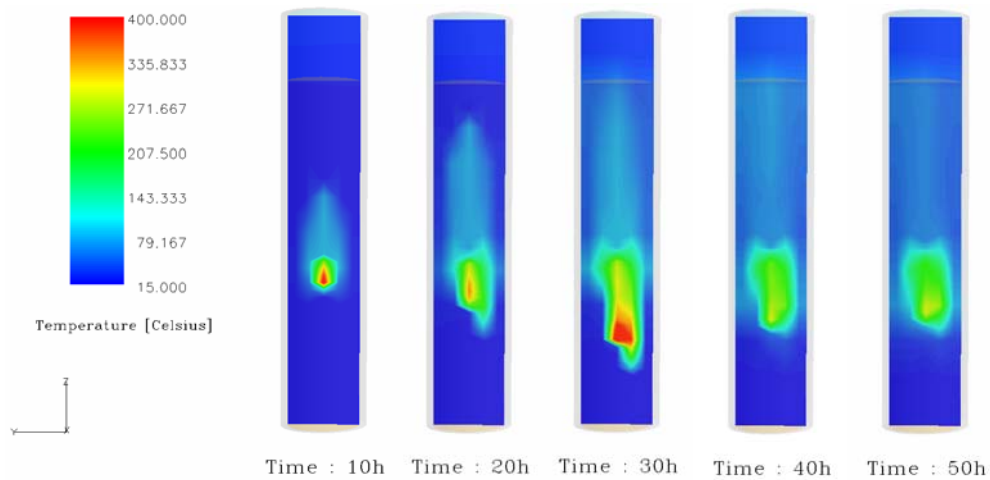


b) Temperaturprofiler efter start av inmatning av N₂.

Figur 65 Beräknad temperaturfördelningen i silon (halvsymmetri) baserat på den andra simuleringen (OBS! temperaturskala i °C). Tidstegen för de redovisade bilderna är a) 10, 20 respektive 27,5 timmar samt b) 40 och 45 timmar.

5.3.1 Jämförelse mellan simuleringar och experiment

Vid en jämförelse av den andra simuleringen med experimenten visar detta på en mycket bra överensstämmelse. I Figur 66 redovisas en visualisering av uppmätta temperaturer i försök 2 med samma temperaturskala som i Figur 65 ovan. Pyrolyshastigheten varierade i försöken men var i genomsnitt 0,04 m/tim, vilket är i samma storleksordning som i simuleringen, 0,05 m/tim. Det som kan noteras visuellt från bilderna ovan är att pyrolyszonen tycks expandera och öka i diameter i simuleringarna medan den i princip behöll samma diameter i försöken. Hastigheten på värme/fuktvågen uppåt i silon var i experimenten i genomsnitt 0,11 m/tim medan simuleringarna visade på en hastighet av 0,2 m/tim.



Figur 66 Visualisering av uppmätt temperaturfördelningen i silon under försök 2. Bilderna är baserade på interpolering av de enskilda termoelementens temperaturer.

Även när det gäller släcksekvensen är samstämmigheten bra och visar att pyrolysisintensiteten dämpas samtidigt som temperaturen i den uppvärmda bulken i övrigt sjunker mycket sakta.

Med tanke på att simuleringarna utförts helt blint utan någon återföring av försöksdata måste resultaten bedömas som mycket bra och intressanta. Det finns dock potential för framtida förbättringar av beräkningsmodellen, bl a med hjälp av erhållna försöksdata.

6 Diskussion

6.1 Antändning, pyrolysförlopp och detektering

I de utförda försöken initierades pyrolysen i pelletsen med en ihoprullad värmekabel som reglerades till 300°C. Detta gav en begränsad pyrolyshård som sedan fick utvecklas fritt i silon. Baserat på erfarenheter från CECOST-projektet, där fenomenen kring självantändning i träpellets studerats i detalj, kan vi konstatera att förhållandena inledningsvis överensstämmer väl med ett verkligt självantänningsförlopp.

För att verifiera simuleringar med beräkningsprogrammet SMAFS, genomfördes i CECOST-projektet en serie självantänningsförsök i ca 1 m³ träpellets [12]. Pelletsen förvarades i ett cylindriskt kärl med diametern 1,1 m och värmdes i de olika delförsöken långsamt upp till olika temperaturnivåer för att se när detta ledde till självantändning. Försöken visade att självantändningen uppstod ungefär i centrum av materialet och ledde snabbt till en lokal temperaturstegring inne i pyrolyszonen. CECOST-försöken avbröts i detta fall när självantändning konstaterats och vid tömning av försökskärl kunde det konstateras en liten pyrolyskärna med svartbrända pellets omgivet av en begränsad zon med mörkfärgade pellets medan övrig pellets syntes vara opåverkad.

Försök i detta projekt har visat att om pyrolysen tillåts fortgå i en tornsilo, kommer denna att utvecklas sakta och spridningen kommer att ske nedåt i materialet medan det sakta utbreder sig en värme/fuktvåg uppåt i materialet. I de genomförda försöken varierade pyrolyshastigheten nedåt mellan 0,02-0,06 m/tim medan värme/fuktutbredningen uppåt spreds med ca 0,11 m/tim. Försöken bekräftade också att pyrolyshastigheten är beroende av ventilationen, där en ökad otäthet i silokonstruktionen också kommer att leda till en ökad pyrolyshastighet. I försöken spreds pyrolysen i stort sett bara nedåt medan spridningen i sidled var marginell. Detta resulterade i en cylinder av pyrolyserat material med en diameter på ca 30-40 cm omgiven av en ca 5 cm bred zon med mörkfärgad pellets och därefter till synes opåverkad pellets.

Försöken visade också att bildade förbränningsgaser, (kolmonoxid, oförbrända kolväten, etc.) följer samma spridningsmönster som värme/fuktvågen och att det därför är mycket svårt att detektera en pågående pyrolys i ett tidigt skede med t ex konventionella gas- eller temperaturmätningar i silotoppen. Det är i princip först när denna värme/fuktvåg når ytan av det lagrade materialet som sådana mätningar ger större utslag, i dessa försök efter ca 20 timmar. Halterna stiger då å andra sidan mycket snabbt och koncentrationerna av kolmonoxid och oförbrända kolväten kan snabbt nå brännbara koncentrationer i silotoppen. I detta skede tycks det också som om ventilationsförhållandena inne i silon förändras och att man får här någon form av termik som medför att pyrolyshastigheten tilltar. Det är troligtvis i detta läge som de flesta silobränder upptäcks och pyrolysen har då sannolikt pågått i flera dygn.

Firefly MGD-detektorn visar dock att det kan gå att upptäcka en pågående pyrolysisprocess i ett tidigare skede. MGD-detektorn var i detta fall snabbast och indikerade ”förlarm” inom 1,5-3 timmar. Även CO-mätningen i silotoppen gav en något tidigare förvarning, som bäst i försök 1 vid ca 10,5 timmar, då bakgrundsnivån började stiga. Bekräftat ”brandlarm” från MGD-detektorn erhöles efter ca 9 till 22 timmar (9 tim i försök 1). Angivna tider avser förhållandena vid försöken, dvs. med att pelletsdjup av ca 2,5 ovan pyrolyshården. Det är därför rimligt att anta att denna tid kommer att öka avsevärt i en verklig siloinstallation.

Ett sätt att snabba på en säker detektering vid misstänkt brand (t ex ”förlarm” med MGD-detektorn) kan vara att ”lufta” silon som gjordes i försök 4. Här matades det in luft i silons botten vilket ”lyfte upp” pyrolysgaserna till toppen så att dessa kunde detekteras. En följdverkan var naturligtvis att pyrolysen intensifierades under denna ”luftning” men å andra sidan är förloppet fortfarande långsamt och skulle en brand detekteras kan man också komma igång med släckinsatsen betydligt snabbare. Det bästa sättet vore naturligtvis att genomföra ”luftningen” med inertgas.

6.2 Släckning och dimensioneringsfaktorer

De släckförsök som genomförts visar att både kvävgas och koldioxid kan användas för att inertera silon för att på så sätt reducera pyrolysentensiteten, vilket på sikt också medför släckning. För att detta skall lyckas är det dock en förutsättning att silon är tät. Ju större otätheterna är, desto mer syre finns tillgängligt för att underhålla pyrolysen samtidigt som en större andel släckgas kommer att läcka ut. När silon tätats så mycket som möjligt skall gasen matas in i gasfas så nära silons botten som möjligt. För att få en så bra fördelning av gasen bör man föra in gasen via en eller flera inlopp/lansar för att optimera fördelningen över silotvärsnittet.

Det är alltså många faktorer som kan påverka släckningen och en utförlig diskussion kring dessa ges nedan. I Tabell 11 ges en summering av erhållna resultat vad gäller inertgasmängder där både inmatningshastigheter och total åtgång redovisas.

För att kunna extrapolera försöksresultaten till fullskaliga silor av olika storlekar krävs att totalförbrukning och påföringshastigheter normeras till någon storleksparameter. Som tidigare nämndes i Kapitel 2 uttrycks ofta den totala gasförbrukningen i relation till silons bruttovolym (kg/m^3), dvs. i princip hur många gånger man behöver omsätta gasvolymen inne i silon under en släckinsats. Här är det uppenbart att denna den totala åtgången kommer att påverkas av silons täthet. Ju större läckage man har, desto mer gas kommer att behöva fyllas på för att upprätthålla en inert miljö inne i silon under hela insatsen.

Även inmatningshastigheten (kg/tim) kan relateras till silons bruttovolym (betecknas här som påföringshastighet, $\text{kg}/\text{m}^3 \text{tim}$) vilket innebär att ju större silo, desto större gasflöde skall användas. Ett problem med denna typ av normering ($\text{kg}/\text{m}^3 \text{tim}$) är att man inte tar hänsyn till förhållandet mellan silons diameter (tvärsnittsarea) och dess höjd. För en given silovolym kommer den vertikala flödeshastigheten (m/tim) hos inertgasen att variera avsevärt. I en tornsilo där höjd/diameter-förhållandet är relativt stort erhålls en förhållandevis hög flödeshastighet medan den i en silo, där diameter och höjd är ungefär lika, blir betydligt lägre. Utöver skillnaden i tvärsnittsarea kommer flödeshastigheten också att påverkas av gasens densitet vid samma inmatningshastighet. I detta fall blir då flödeshastigheten lägre för koldioxid jämfört med kvävgas på grund av koldioxidens högre densitet. Teoretiskt sett skulle inte detta behöva vara något problem, skillnaden blir bara att det skulle ta längre tid innan inertgasen når pyrolyshärden. I praktiken är det dock sannolikt att det finns en ”kritisk flödeshastighet” på grund av att det alltid finns vissa förluster, etc. och underskrids denna så når man inte släckning.

I Tabell 11 har resultaten från de genomförda försöken normerats dels till silovolymen dels har flödeshastigheten inne i silon beräknats. Porositeten för träpellets är ca 50% vilket innebär att flödeshastigheten dubblas i förhållande till en helt tom silo.

Tabell 11 Sammanställning av inmatningsmängder av inertgaser under försöken.

Försök	Släckmedel	Inmatningshastighet (kg/tim) ¹⁾	Total förbrukning (kg)	Norm påför-hast (kg/m ³ tim)	Flödes-hastighet (m/tim) ²⁾	Norm förbruk (kg/m ³)	Kommentar
1	N ₂	2,75-0,69 ³⁾	49,7	0,63-0,16	6,1-1,5	11,3	Luftläckage ökade total gasåtgång
2	CO ₂	2,54-0,72	19,0	0,58-0,16	3,6-1,0	4,5	
3	Skum+N ₂	2,75	5,5	0,63	6,1	1,25	
4	CO ₂ N ₂ skum	1,39 ⁴⁾ -2,54 1,37 ³⁾	Totalt 47,6	0,32-0,58 0,31	2,0-3,6 3,0	10,8	”Luftning” av silon vid flera tillfällen

1) Den högre inmatningshastigheten användes under de första timmarna för att reducera pyrolynsintensiteten medan den lägre siffran anger ”underhållsinmatningen”.

2) Baserad på 50% porositet.

3) 0,69 kg/tim (0,16 kg/m³tim respektive 1,5 m/tim) var inte tillräckligt för att hålla pyrolynsintensiteten reducerad.

4) 1,39 kg/tim var inte tillräckligt för att i inledningsskedet reducera den pågående pyrolysen utan inmatningen fick ökas till 2,54 kg/tim.

Försöksresultaten tyder på en något bättre släckeffektivitet för koldioxid jämfört med kvävgas. Det skall dock noteras att skillnaden i total släckmedelsåtgång som kan noteras mellan försök 1 och 2, åtminstone till viss del, beror på att silon inte var helt tät i försök 1. Vid efterföljande analys av genomförda gasmätningar har noterats högre syrgashalt inne i pelletsbulken jämfört med försök 2 vilket inte kan förklaras på annat sätt än en skillnad i silons täthet. Otätheten fick också praktiska effekter då det medförde en spridning av pyrolynsbranden i riktning mot läckaget trots pågående inertering.

Att det finns en kritisk flödes-hastighet noterades i försök 1 och 4 då inmatnings-hastigheten med kvävgas drogs ner till från 100 % till 25% (2,75 till 0,69 kg/tim) vilket resulterade i en tilltagande pyrolynsaktivitet. När inmatningen ökades till 50% (1,37 kg/tim) dämpades pyrolynsaktiviteten igen. Uttryckt i flödes-hastighet innebar detta således att 1,5 m/tim var för låg flödes-hastighet för kvävgas för att upprätthålla inerteringen av silon medan 3,0 m/tim var tillräckligt. När det gäller koldioxid räckte en flödes-hastighet av 1,0 m/tim vilket alltså tyder på en något bättre förmåga att upprätthålla inert miljö. Eventuellt kan denna skillnad bero på densitetsskillnaden mellan kvävgas och koldioxid, där koldioxiden på grund av sin högre densitet har större förutsättningar att ligga kvar i silon. Även koldioxiden uppvisar i försök 4 en kritisk flödes-hastighet där 2,0 m/tim inte var tillräcklig för att i inledningsskedet reducera den pågående pyrolysen utan här krävdes en flödes-hastighet av 3,6 m/tim.

Om man utgår från erhållna försöksdata med kvävgas så skulle en påförings-hastighet av 1,0 kg/m³tim, motsvarande en flödes-hastighet av ca 10 m/tim i genomförda försök, kunna anses som ett rimligt värde i ett inledningsskede av en släckinsats. Denna dimensionering innehåller då också en säkerhetsmarginal mot observerad kritisk flödes-hastighet. Om dessa dimensioneringsvärden extrapoleras till olika typer av fullskaliga silor så erhålls stora skillnader i inmatnings-hastighet beroende på om extrapoleringen baseras på silons bruttovolym eller flödes-hastigheten. För att åskådliggöra detta visas i Tabell 12 erforderlig inmatnings-hastighet för tre olika silor, i övre delen av tabellen baserat på volym och i undre delen baserat på flödes-hastighet. Som referens visas överst motsvarande värden för

försökssilon. Som framgår av exemplet har dimensionerna för silo 1 och 2 valts så att det fått samma volym men där silo 1 är av typen tornsilo medan silo 2 har ungefär samma diameter som höjd. Silo 3 är av samma typ som silo 2 men med betydligt större volym.

Som framgår av tabellen innebär en dimensionering baserat på bruttovolymen en avsevärd skillnad i flödes hastighet. Eftersom dessa fullskaliga silor är högre än försökssilon så ökar flödes hastigheten i direkt relation till silohöjden och för t ex silo 2 innebär detta att flödes hastigheten ökar ca en faktor 6. Som nämnts tidigare innebär denna dimensionering att den teoretiska fyllnadstiden av en silo blir densamma oavsett storlek eller höjd. Eftersom inmatnings hastigheten står i direkt relation till silovolymen innebär det också mycket höga värden vid större silor.

Baseras dimensioneringen däremot på inertgasens vertikala flödes hastighet inne i silon så kan man notera att inmatnings hastigheten reduceras betydligt. Med denna dimensioneringsprincip erhåller man en längre fyllnadstid ju högre silon är. Resultatet blir att inmatnings hastigheten jämförelsevis blir betydligt lägre. Minskningen av inmatnings hastigheten blir dessutom större för silor av typen tornsilo.

Tabell 12 Jämförelse av erforderlig inmatnings hastighet vid dimensionering baserat på bruttovolym respektive inertgasens vertikala flödes hastighet. Tabellen gäller för kvävgas och ett material med 50% porositet.

Silo	Dia. (m)	Area (m ²)	Höjd (m)	Volym (m ³)	Påför.hast. (kg/m ³ tim)	Flödes hast (m/tim)	Inmatn. hast. (kg/tim)
Normering - Bruttovolym							
SP	1,0	0,785	5,7	4,4	1,0	9,7	4,4
1	10	78,5	36	2826	1,0	62,1	2826
2	15	176,6	16	2826	1,0	27,6	2826
3	25	490,6	25	12265	1,0	43,1	12265
Normering - Flödes hastighet							
SP	1,0	0,785	5,7	4,4	1,0	9,7 *	4,4
1	10	78,5	36	2826	0,156	9,7 *	441
2	15	176,6	16	2826	0,351	9,7 *	992
3	25	490,6	25	112265	0,224	9,7 *	2748

*) Motsvarande flödes hastighet för koldioxid blir 6,1 m/tim (specifik volym 0,547 m³/kg vid 1,013 bar och 21°C).

Exemplet i Tabell 12 baserar sig på resultaten med kvävgas. Om man utgår från försöksresultaten kunde pyrolysen i silon dämpas lika effektivt med koldioxid med lika, eller till och med något lägre, inmatnings hastighet än kvävgas. Även när det gällde att upprätthålla inerteringen kunde en något lägre inmatnings hastighet användas för koldioxid jämfört med kvävgas, detta trots att den vertikala flödes hastigheten för koldioxid var betydligt lägre på grund av koldioxidens högre densitet. Om man utgår från samma säkerhetsmarginal på dimensioneringen som för kvävgas i exemplet ovan, dvs. en inmatnings hastighet av 4,4 kg/tim vilket motsvarar 1,0 kg/m³tim i försökssilon så erhålls en flödes hastighet på 6,1 m/tim (jämfört med 9,7 m/ tim för kvävgas). Flödes hastigheten kan också uttryckas i mer ingenjörsmässiga termer genom att istället ange kilogram gas per tvärsnittsytta och tid (kg/m²tim). Det exempel som ges i nedre delen av Tabell 12 ovan (N₂-9,7 m/tim, CO₂-6,1 m/tim) motsvarar då en påförings hastighet av 5,6 kg/m² tim.

Dimensioneringen baserad på flödes hastigheten förefaller mer logisk men samtidigt skall man då vara medveten om att säkerhetsmarginalerna är mindre. I verkligheten finns det många faktorer som kan påverka resultaten och som försöken tydligt påvisade är silons täthet mycket viktig. Om en silo inte är helt tät, framförallt nära botten, kommer inertgasen att kunna läcka ut samtidigt som frisk luft kan sugas in. Detta kommer både att reducera den vertikala flödes hastigheten hos inertgasen samtidigt som det också kan innebära att syrgashalten inte reduceras lika effektivt. Läckaget kommer att vara beroende av gasens densitet vilket kommer att medföra att läckaget av koldioxid kommer att vara större än för kvävgas. Eftersom koldioxiden ger en lägre flödes hastighet (mindre gasvolym) per kilogram inmatad gas kommer marginalerna att reduceras ytterligare. Å andra sidan får man räkna med ett visst läckage även för kvävgas då gasen vid inmatningen kommer att vara relativt kall i förhållande till förbränningsgaserna inne i silon och därmed också ha en lägre densitet än dessa.

Vid extrapolering av resultaten till större silor måste man också beakta gasfördelningen över tvärsnittsarean. I de genomförda försöken efterliknades en tornsilo, dvs. med förhållandevis liten tvärsnittsarea i förhållande till dess höjd. Gasen matades in via ett 150 mm perforerat rör i silons centrum vilket sannolikt gav relativt goda förutsättningar för en jämn gasfördelning och ett vertikalt ”pluggflöde”. För att uppnå samma jämna fördelning i en storskalig silo krävs att gasen fördelas över tvärsnittet genom flera gasinlopp. I annat fall finns risk att det uppstår inre strömningar i silon där inertgasen pressas uppåt inom en begränsad del av tvärsnittsarean medan det kan uppstå nedåtriktade gasflöden inom andra delar av silon. Betydelsen av en jämn gasfördelning är omöjligt att uppskatta utifrån genomförda försök utan kräver fortsatta insatser i form av både beräkningar och av experimentell karaktär.

Även i de genomförda försöken finns tecken på att det förekom ett inflöde genom öppningen i silotoppen trots pågående inmatning av inertgas i silobotten. Det är också troligt att det förekom ett visst neråtgående luftflöde inne i silon vilket försvårade inerteringen. I försök 3 hindrades detta genom att ett skumtäck applicerades ovanpå träpelletsen i silotoppen i kombination med att ventilationsinloppet i silons botten tätades. Detta gav en mycket effektiv dämpning av pyrolysaktiviteten och visar att man i princip kan nå släckning utan användning av inertgas. Förmodligen hade resultatet av försök 3 varit det samma utan inmatning av den kvävgas som gjordes för att bl a studera gasens förmåga att leda bort värme. Även i försök 4 användes kombinationen med inertgas och skumbegjutning med mycket gott resultat. Ett alternativt sätt, som kanske i många applikationer är lättare att åstadkomma, är att även inertera silons topputrymme i början av insatsen. Detta minimerar samtidigt risken för en eventuell damm- eller gasexplosion. För att detta skall ge en bra effektivitet krävs dock att pyrolys- och inertgasen kan evakueras utan att det sugas in någon friskluft in i silotoppen.

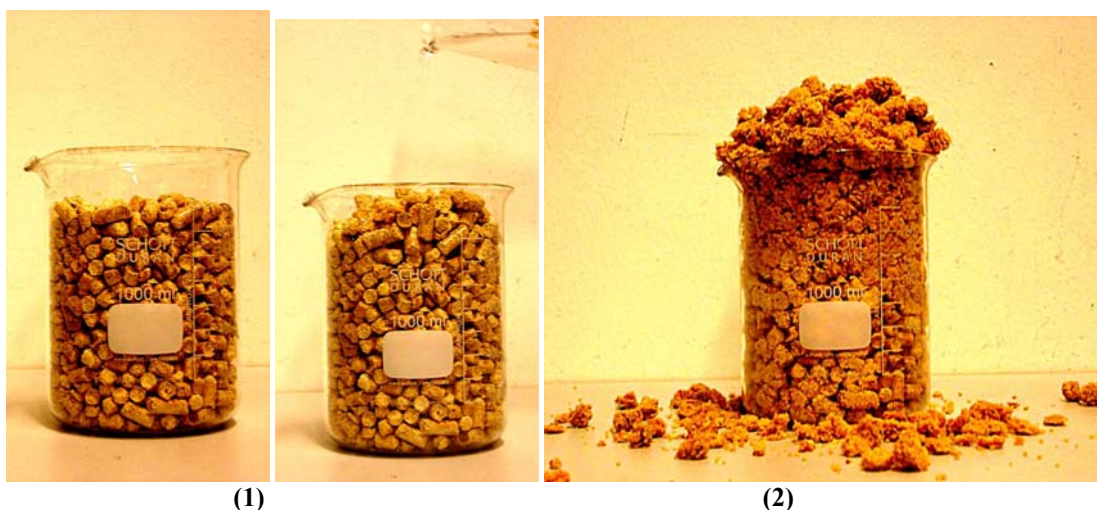
När det gäller den totala gasåtgången i försöken har denna normerats till silons bruttovolym och såsom framgår av Tabell 11 varierade gasåtgången från drygt 1 kg/m^3 till ca 11 kg/m^3 . Det lägsta värdet måste ses som mycket optimistiskt för en verklig insats, men en inerteringsmängd på $5\text{-}15 \text{ kg/m}^3$ är inte omöjligt att uppnå. Förutsättningarna är här naturligtvis att silon är tät eller kan tätas innan insatsen påbörjas och att man har möjlighet att förhindra inläckage av friskluft via silotoppen. Totalförbrukningen stämmer relativt väl med praktiska erfarenheter från lyckade insatser, t ex silobranden i Luleå [8] respektive på Gotland [9]. Är silokonstruktionen otät och svår att åtgärda får man räkna med betydligt högre åtgång, sannolikt upp emot $30\text{-}40 \text{ kg/m}^3$ [10]. I framtiden är det möjligt att man kan utarbeta bättre rekommendationer även för total gasförbrukning, t ex baserat på faktiska mätningar av silons täthet, hur optimal gasfördelning kan åstadkommas, etc.

När det gäller utformningen av mer konkreta rekommendationer, bl a avseende valet mellan kvävgas eller koldioxid är det många praktiska aspekter som också måste övervägas i en verklig insats. Tillgång till gas i de mängder som behövs, tillgång till förångningsutrustning och energitillförsel till dessa, arbetsmiljöaspekter, mm. är några av dessa. En utredning kring detta pågår för närvarande på uppdrag av Räddningsverket vilket kommer att leda till mer konkreta råd för den direkta insatsen. Eventuellt kommer detta också att leda till att en mobil utrustningsdepå upprättas vilket kan utnyttjas i händelse av brand. En aspekt som måste beaktas är jämviktssambandet som medför att CO bildas från CO_2 vid temperaturer över 700°C i kombination med begränsad syretillförsel genom reaktionen $\text{C} + \text{CO}_2 \leftrightarrow 2\text{CO}$ [18]. I sådana fall skulle ett tillskott av CO_2 från inerteringen bidra till produktion av den brännbara gasen CO. Denna effekt kunde dock inte påvisas i de utförda försöken, troligen på grund av för låga temperaturer i pyrolyszonen.

Erfarenheterna från försöken pekar också tydligt på riskerna med att använda vatten som släckmedel inne i silon. Fukt i kombination med värme gör att pelletsen sväller och lätt faller sönder till en form som mer liknar sågspån. Vid silobranden i Luleå 2005 [8] noterades att det kom ut en hel del sågspån vid tömningen av silon. Detta var sannolikt på grund av att varm, fuktig, expanderad pellets från silons övre delar fallit sönder vid utmatningen. Om man noterar ”sågspånshögar” på toppen av pelletsen är detta ett tecken på att det finns en värmeutveckling inne i materialet som lett till en fuktvandring till ytan.

Att använda vattenbegjutning från t ex sprinkler eller strålrör skulle kunna få mycket allvarliga konsekvenser. Materialets svällning kan skapa stora krafter inne i silon och till och med riskera att ”spränga” konstruktionen. En annan följdverkan kan vara att materialet hänger sig fast på siloväggen på grund av expansionen vilket leder till att delar av silons innehåll hänger kvar när silon töms. Detta medför stora risker, både för konstruktionen i sig och för den personal som skall försöka riva ner materialet.

Att varm träpellets är mycket benägen att ta upp fukt samtidigt som den sväller kraftigt kan demonstreras genom att placera en liten mängd pellets i en bägare och värma den till $80\text{-}90^\circ\text{C}$, se Figur 67. Hålls därefter vatten på pelletsen sväller denna mycket snabbt och kraftigt och bildar en mycket hård kaka liknande en fuktig spånskiva.



Figur 67 Demonstration i en glasbägare av hur varm träpellets absorberar vatten mycket snabbt under kraftig expansion. (1) Varm pellets, (2) strax efter start av vattenbegjutning, (3) efter ca 5 minuter.

Injicering av vatten kan också bidra till bildande av explosiva brännbar gas. Den s.k. vattengasreaktionen, $C + H_2O \rightarrow H_2 + CO$ resulterar vid temperaturer över ca 700°C i produktion av vätgas. Vid försöken gjordes några provtagningar av gas inne pelletsbulken för att se om vätgas kunde påvisas. Som framgår av kapitel 5.2.6 kunde dock inte några signifikanta mängder vätgas konstateras i försöken.

Skumbeläggning av silotoppen, som gjordes i två av försöken, kräver att man beaktar problemen med risk för svällning. I försöken noterades en påverkan på de översta ca 10 cm av pelletsen som svällde upp till en tjocklek på ca 30 cm. Detta innebar inte några problem men vid en lång insats kan naturligtvis det dränerande vattnet skapa problem. Skummet bör därför vara av typ mellanskum och så stabilt som möjligt, t ex i form av tryckluftsgenererat skum (CAF), så att dräneringen blir minimal. Påföringen bör också anpassas efter behovet så att inte onödigt mycket appliceras.

6.3 Jämförelse av försökserfarenheter och silobränderna i Härnösand 2004

Den försökssilo som använts i detta projekt kan karaktäriseras som en tornsilo, dvs. diametern är förhållandevis liten i förhållande till höjden. På grund av den begränsade skalan finns naturligtvis risk att de genomförda försöken kan skilja något i förhållande till verkliga silor, men samtidigt tycks erfarenheterna stämma relativt väl med det som rapporterats från verkliga bränder. Nedan ges en jämförelse med observationerna och erfarenheterna från silobränderna i Härnösand 2004 som visar på klara likheter.

Vid branden i Härnösand [19, 20] noterades inledningsvis (7/9 ca 17:00) en skarp lukt från siloparken men man kunde inte notera något tecken på rök eller förhöjda temperaturer. Man antog i detta skede att lukten kom från pelletens ”normala” avgasning av aldehyder. Ett halvt dygn senare (8/9 ca 07:00) konstaterades att läget ändrats radikalt. Från att ha varit gasutveckling med lukt från botten av silo 4 var det nu kraftig rökutveckling från silotoppen. När man inledde en tömning via bottenskruven (ca 07:30) kom det ut mycket varm pellets som antändes nästan omedelbart.

Detta stämmer mycket bra med ”förbrinntiden” i våra försök och indikerar att pyrolysen i Härnösand sannolikt pågått ett antal dygn när man börjar känna lukt. I våra försök noterade vi primärt lite svag lukt från ventilationsöppningen i silons botten medan lukten i toppen kom först när vågen av pyrolysgaser och fukt ”bröt igenom” ytan i silotoppen vilket stämmer väl med iakttagelserna.

Samtidigt har pyrolyszonen vandrat nedåt och när man började tömma silon var den redan helt nere i silons bottenkona. Enligt uppgift var silon inte helt tät, dels fanns det en liten spalt mellan siloväggen i betong och silokonan som var utförd i stål för att medge termiska rörelser. Detta innebar att luft kunde läcka in längs hela silons omkrets i denna skarv. Vidare var inte tömningskruven tät utan luft kunde också sugas in denna väg.

Efter den första korta provtömningen på morgonen den 8/9 tog det ca 18 timmar innan man gjorde en skumbegjutning av toppen (9/9 ca 00:00). Efter ytterligare drygt 5 tim (9/9, ca 05:30) injicerades koldioxid i silon via en lans i botten, dock med stora problem pga. frysning. Kort därefter (ca 06:00) hade man tagit upp ett ca 1-1,5 m² hål i siloväggen strax ovanför livet på bottenkonan och påbörjat tömning. Till en början kom det varm men ej förkolnad/glödande pellets, men efter knappt 2 tim (ca 07:45) antändes den utströmmande pelletsen. Detta stämmer också bra med iakttagelserna från försöken. Till en början rinner pellets ut som legat närmast siloväggen därefter fylls det på med mer pellets uppifrån och från silons centrum där pyrolyshärden sannolikt fanns. När denna

pellets får tillgång till syre leder detta till antändning. Strax efter (ca 08:00) noterades mörk rök ur hålet och problem med igensättning på grund av klumpar av förkolnad pellets, dvs. detta kom från den centrala pyrolyszonen. Efter ytterligare drygt 2 tim (ca 10:20) antändes brandgaserna på silotoppen. I detta läge har syretillförseln genom hålet medfört att pyrolysakтивiteten i silon varit mycket hög och att halten av brännbara pyrolysgaser, både i form av höga halter kolmonoxid respektive oförbrända kolväten, sannolikt var långt över brännbarhetsgränsen. Genom att pelletsen kunde tömmas ut direkt på marken och branden kontrolleras med vattenbegjutning innan borttransport kunde silon tömmas trots full pyrolysakтивitet inne i silon.

Silo 4 var i princip tömd den 10/9, ca 08:00. Ur kontrollsynpunkt gjordes temperaturmätningar i toppen i de andra silorna, någon dm under pelletsytan, men dessa indikerade inga onormalt förhöjda temperaturer. I förebyggande syfte beslöt man trots detta att intertera de övriga silorna med koldioxid. Istället för att undvika en brand i dessa, noterades morgonen efter (11/9) en dramatisk förändring med kraftig rökutveckling från toppen av silo 5. Viss aktivitet noterades också från silo 1 och silo 2. Detta beteende har också likheter med erfarenheterna från försöken. När man mätte temperaturerna i silotoppen hade värmevägen fortfarande inte nått toppen i dessa silor. Förmodligen var det dock ”full aktivitet” i dessa silor utan att det märktes. När man injicerade koldioxid tryckte man också ut en del av de brandgaser som fanns inne i silon. Försöken visade att koldioxidens ”hålltid” (gäller även kvävgas) är mycket kort om man inte samtidigt lyckas täta silon helt. Koldioxiden läckte sannolikt ut ganska snabbt genom otätheterna i silon vilket också innebar att frisk luft sögs in via silotoppen. Detta gav nytt syre till pyrolysen som snabbt ökade i intensitet. Ett tömningförsök visade att pelletsen antändes omedelbart i kontakt med luft. Intensiteten var nu sannolikt så hög att heta, brännbara gaser också pressades ut genom tömningsskruven och ledde till den antändning och de jetflammar som noterades vid ett flertal tillfällen under morgonen/förmiddagen den 11/9.

Jämförs hela händelseförloppet i Härnösand med försökserfarenheterna så finns det delar i händelseförloppet som tycks stämma även om vi inte har alla svar för en fullständig förklaring. Enligt insatsrapporten [19] fylldes samtliga silor under augusti 2004 i enlighet med Tabell 13.

Tabell 13 Uppgifter om fyllnadsförloppet av de fem silorna i Härnösand.

Silo nr	Fyllningsstart/datum	Fyllnadstid
3	4 augusti	15 dagar
2	8 augusti	25 dagar
1	9 augusti	10 dagar
4	16 augusti	7 dagar
5	23 augusti	7 dagar

Den första branden detekterades i silo 4. Denna fylldes näst sist och dessutom under en relativt kort tidsperiod, 7 dagar och avslutades den 23/8. Branden detekterades den 7/9 vilket alltså innebär ca 14 dagar mellan avslutad fyllning och upptäckt. Utgår man ifrån de hastigheter på pyrolysisfronten (genomsnitt 0,04 m/tim) respektive fuktvandringen (0,11 m/tim) uppåt som uppmättes i våra siloförsök, så skulle självantändningen ha startat ca 1/4 upp i silon och efter ca 225 tim (drygt 9 dygn) ha spridit sig ca 9 m nedåt respektive ca 25 m uppåt, dvs. totalt ca 34 m. Detta innebär i så fall att det skulle ha tagit ca 6 dagar för materialet att självuppvärma och nå självantändning och sedan alltså ca 9 dagar tills branden kunde detekteras vilket inte verkar helt orimligt.

Nästa brand som detekterades var i silo 5 den 11/9, dvs. fyra dagar efter silo 4. Denna fylldes direkt efter silo 4 och också under kort tid. I detta fall innebär det ca 11 dagar från avslutad fyllning till detektion och denna något kortare tidsperiod till kan troligtvis för-

klaras av den koldioxidfyllning som gjordes den 10/9. I silo 1, som också konstaterades vara påverkad den 11/9, och som vid tömning visade sig innehålla pyrolyserande pellets, påbörjades fyllningen den 9 augusti och här var fyllnadstiden något längre, 10 dagar. Silo 2 visade sig vid tömning innehålla vissa tecken till självuppvärmning i form av mörkfärgad pellets medan silo 3 var helt opåverkad. Fyllningen av silo 2 påbörjades den 8/8 och pågick under lång tid, 25 dagar, medan silo 3 var den som fylldes först, den 4/8 och där fyllningen pågick i 15 dagar. Den längre fyllnadstiden för dessa båda silor samt kanske någon form av kvalitetsskillnad i pelletsen kan vara orsaken till den mindre självuppvärmningsaktiviteten i dessa.

6.4 Simulering av självantändningsförlopp, pyrolysis och släckinsats

En jämförelse mellan erhållna försöksresultat och genomförda simuleringar med CFD-programmet SMAFS visar på förhållandevis bra överensstämmelse. Eftersom simuleringarna genomförts ”blint”, dvs. utan tillgång till några försöksdata finns det sannolikt stor potential för ytterligare förbättringar av beräkningsmodellen genom att utnyttja erhållna försöksdata. Detta gäller dels själva pyrolysismodellen, dels den gas-/värme-/fukttransport som sker inne i silon till följd av pyrolysen. Faktorer såsom gassammansättning och gasens densitet kan ha relativt stor påverkan på resultaten. Efter sådana justeringar vore det värdefullt att genomföra ytterligare ett antal simuleringar för att jämföra förhållandena mellan försökssilon och fullskaliga silor (t ex Härnösandssilorna) och att mer i detalj studera inverkan av olika otätheter i silon, deras belägenhet, etc. Vidare vore det mycket värdefullt att studera gasfördelningen inne i silon, behovet av antalet inmatningsställen, studera skillnaden mellan kvävgas och koldioxid, etc.

6.5 Inverkan av andra lagringsgeometrier

När det gäller andra silotyper eller lagringstyper är det mer osäkert hur giltiga erfarenheterna från dessa försök är. I dagsläget byggs många, mycket stora silor med en diameter på 20-30 m och en höjd som är av ungefär samma storleksordning och såsom diskuterats i Kapitel 6.2 kan dimensioneringsprinciper ge mycket olika resultat. Ytterligare en lagringsform är planlager och båda dessa senare lagringstyper är vanliga för olika typer av biobränslen, t ex träpellets.

I dessa geometrier är det inte säkert att ett pyrolysisförlopp till följd av en självantändning uppträder på samma sätt som i en tornsilo. Likaså kan problem uppstå vid släckning med inertgas då fördelning av gasen sannolikt kommer att vara mycket avgörande för en effektiv insats. Av denna anledning borde man studera dessa förhållanden på ungefär samma sätt som gjorts i detta projekt, dvs. i form av en kombination mellan CFD-beräkningar och efterföljande försök i rimlig skala. Även andra typer av material borde studeras, t ex träpulver, då de kan uppträda annorlunda, både under pyrolysisfasen och vid efterföljande släckningsfas.

Med hänsyn till att det kan finnas skaleffekter som är svåra att förutsäga borde också vissa försök genomföras i full skala, både för att verifiera genomförda beräkningar och försöksresultat från reducerad skala.

7 Slutsatser och rekommendationer

Följande slutsatser och rekommendationer kan ges som ett resultat av projektet.

- Släckning bör ske genom inertering med kvävgas eller koldioxid.
- Silons täthet, inklusive tätning av övergångar mot tillhörande transportsystem, är mycket viktig för en effektiv släckning.
- Silon skall kunna avluftas mot omgivningen i silotoppen med en kapacitet som motsvarar inmatningen av inertgas. Avluftningen måste dock förhindra inläckage av luft.
- Silon bör vara förberedd för gasinmatning som säkerställer så jämn gas-distribution som möjligt. Detta är sannolikt viktigare ju mindre förhållandet är mellan silons höjd och diameter.
- Silon bör vara förberedd för att kunna nödtömmas till säker plats utomhus.
- Tidig detektion av en pyrolys kräver utnyttjande av avancerade detektorsystem. Trots detta kan det dröja lång tid (dagar) innan brand kan detekteras med säkerhet.
- Ett sätt att verifiera ett ”förlarm” eller annan misstanke om en pågående brand kan vara att ”lufta” silon med inertgas för att på så sätt pressa upp pyrolysgaserna till silotoppen så dessa kan detekteras säkert.
- Släckning bör ske genom inertering med kvävgas eller koldioxid, primärt med inmatning via silons botten. Inledningsvis bör dock även silotoppen interteras. Gasen skall tillföras i gasfas, dvs. det krävs en förångarutrustning.
- Inmatningshastigheten av inertgas bör anpassas till silons tvärsnittsarea och materialets porositet för att uppnå en minsta vertikal flödeshastighet hos inertgasen. Baserat på försöksresultaten så borde en rimlig inmatningshastighet ligga på 5-10 kg/m²tim (silons tvärsnittsarea) vid en tät silokonstruktion. Vid 50% porositet i det lagrade materialet innebär detta en genomsnittlig vertikal flödes-hastighet på ca 9-17 m/tim för kvävgas och 5,5-11 m/tim för koldioxid (1,013 bar, 21°C).
- När en dämpning av pyrolysisintensiteten med säkerhet har noterats kan sannolikt inmatningshastigheten reduceras och/eller intermitterant inmatning utnyttjas.
- Ovanstående dimensionering gäller för både kvävgas och koldioxid. Man bör dock beakta den lägre flödeshastigheten med koldioxid och att en otät konstruktion kan leda till större förluster på grund av koldioxidens högre densitet.
- Koldioxid bör undvikas där pyrolysisintensiteten är mycket hög på grund av risken för bildning av kolmonoxid.
- Släckförloppet måste följas kontinuerligt genom gasanalyser i silotoppen (lämpligtvis CO och/eller oförbrända kolväten) och tömning bör inte inledas innan det säkerställts att pyrolysisaktiviteten är kraftigt reducerad.
- Total släckmedelsåtgång under gynnsamma förhållanden (tidig detektion, tät silo, etc.) kan förväntas uppgå till 5-15 kg/m³ och under mer ogynnsamma förhållanden 30-40 kg/m³ eller mer.
- Vatten är direkt olämpligt som släckmedel. Vattnet kan dels medföra att det lagrade materialet sväller och ”spränger” silon, och dels finns risk för bildning av vätgas och kolmonoxid.

8 Behov av fortsatta forskningsinsatser

Baserat på erhållna erfarenheter och identifierade kunskapsbegränsningar föreligger behov av fortsatt forskning inom följande områden:

- Försökserfarenheterna är begränsade med hänsyn till försökssilons storlek och geometri ("tornsilos"). Föreslagna dimensioneringsvärden och dimensioneringsprincip behöver därför verifieras. Det är i dagsläget oklart hur dimensioneringen skall anpassas för olika silotyper och storlekar.
- Inverkan av silons täthet bör undersökas, både avseende pyrolysförloppet och inverkan på släckinsatsen. Uppmätning av typiska läckageflöden hos verkliga silos vore värdefullt.
- Försöken ger inga svar på hur gasdistributionen ser ut inne i materialet och hur inmatningen/"dysor" skall utformas för optimal fördelning över silons tvärsnittsytta.
- Skillnaden i distribution mellan N_2 och CO_2 bör utredas med hänsyn till densitetskillnaden.
- Hur påverkar olika typer av material (t ex träpulver) pyrolysförlopp och gasdistribution.
- För att kunna ge svar på ovanstående osäkerheter krävs fortsatta forskningsinsatser med simuleringar av pyrolys- och släckförloppet (inklusive gasdistribution) i kombination med välinstrumenterade mellan-/fullskaleförsök.

9 Referenser

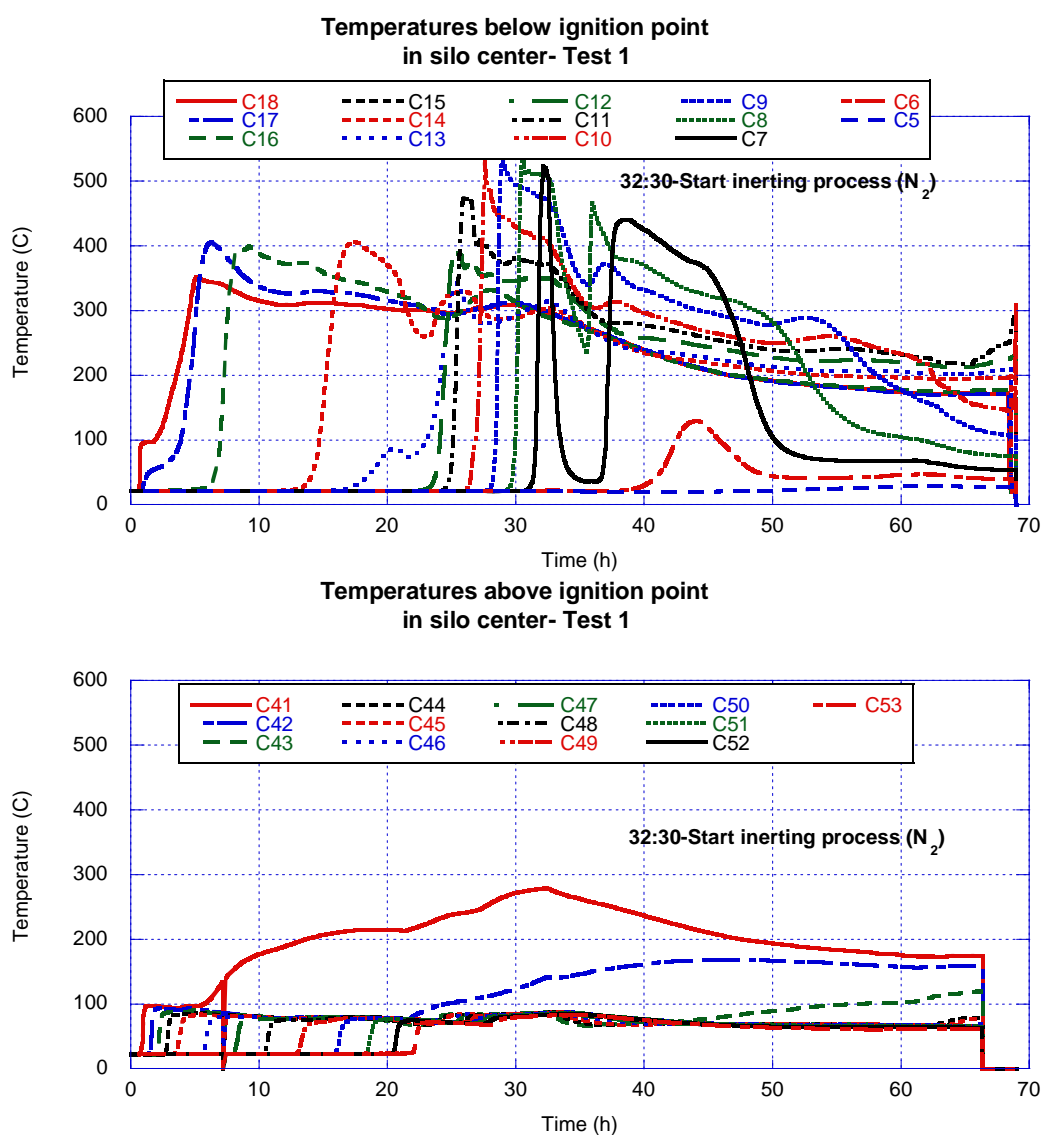
1. Persson, H., Blomqvist, P., "Släckning av silobränder", SP Swedish National Testing and Research Institute, SP-Arbeitsrapport 2004:16, Borås, 2004.
2. Holmstedt, G., "Slutrapport-Självantändning vid lagring av biobränsle och biogent avfall", Lund University, Department of Fire Safety Engineering, Report 3135, Lund, 2005.
3. Yan, Z. H., "SMAFS-A User Guide", 2004.
4. Yan, Z. H., "Validation of CFD Model för Simulation of Spontaneous Ignition in Bio-mass Fuel Storage", 8th IAFSS Symposium, Beijing, 2005.
5. NFPA 850, "Recommended Practice for Fire Protection for Electric Generating Plants and High Voltage Direct Current Converter Stations", 2000 ed., National Fire Protection Association, 2000.
6. Weiss, A., "Inertisierung mit Kohlendioxid oder Stickstoff bei Schwelbränden in Silos", *Brandschutz/Deutsche Feuerwehr-Zeitung*, 11/1981, 390-393, 1981.
7. Tuomisaari, M., Baroudi, D., and Latva, R., "Extinguishing Smouldering Fires in Silos - BRANDFORSK Project 745-961", VTT Technical Research Centre of Finland, VTT Publications 339, Espoo, 1998.
8. Ronnie Lindberg, "Personlig kommunikation", Räddningstjänsten i Luleå, 2006.
9. Flood, Å., "Incidentrapport", Kalkproduktion Storugns AB, 1990.
10. Persson, B., "Anteckningar från ledningsgruppens möten", AB Nord Mills, Malmö, 1989.
11. Yan, Z. H., "CFD Simulation of Spontaneous Ignition Fire and Its Extinguishment", Lund University, Department of Building Science, Lund, 2006.
12. Van Hees, P., Blomqvist, Per "Spontaneous ignition of biofuels - An experimental investigation through small- and large-scale tests", SP Swedish National Testing and Research Institute, SP report 2006:41, Borås, 2006.
13. Romnäs, C., "Personlig kommunikation", Firefly AB, 2006.
14. "Gas Encyclopedia", Air Liquide, <http://encyclopedia.airliquide.com>.
15. Glassman, I., *Combustion*, 3rd ed., Academic Press Inc., 1996.
16. Rugar-Gadd, K., "Personlig kommunikation", School of Technology and Design, Department of Chemistry - Bioenergy technology, Växjö University, 2006.
17. Rosell, L., "Analys av Tenaxrör från Siloförsök", SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, Kemi- och Materialteknik, F6 20821, Borås, 2006.
18. Baeling, P., "Personlig kommunikation", Lantmännen, 2006.
19. "Rapport Silobrand Härnösand 8-13 september 2004. En beskrivning av olycksförloppet, olycksorsaken och våra erfarenheter från insatsen", Räddningstjänsten Höga Kusten-Ådalen, 2004.
20. Källström, K. Å., "Personlig kommunikation", Räddningstjänsten Höga Kusten-Ådalen, 2004-2006.
21. Christian, G. and O'Reilly, J., *Instrumental Analysis*, 2nd ed., Allyn and Bacon Inc., 1986.

Annex 1 Mätdata från hela försöksförloppet

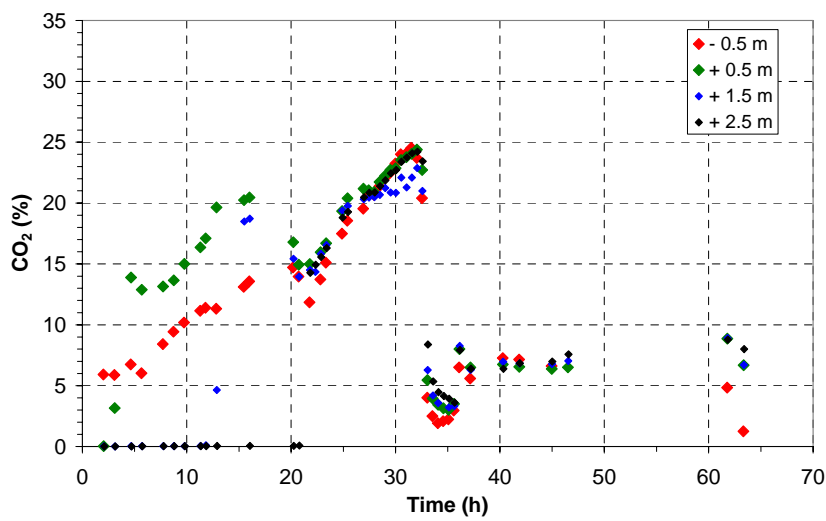
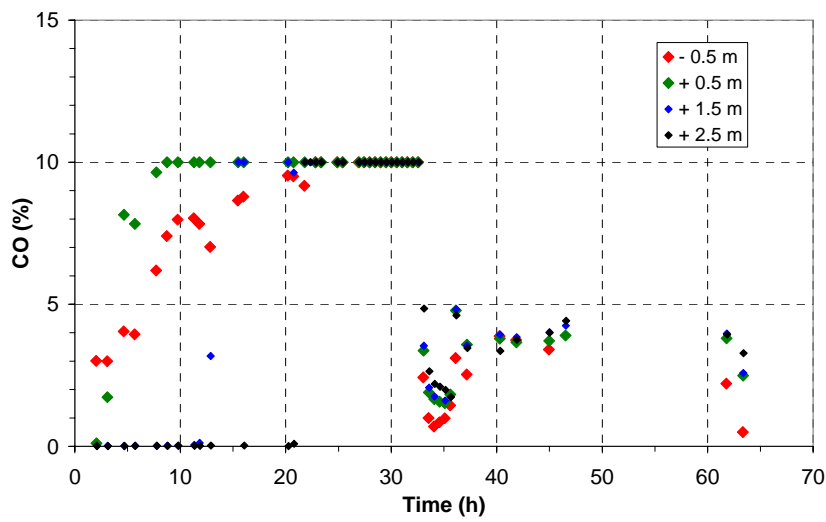
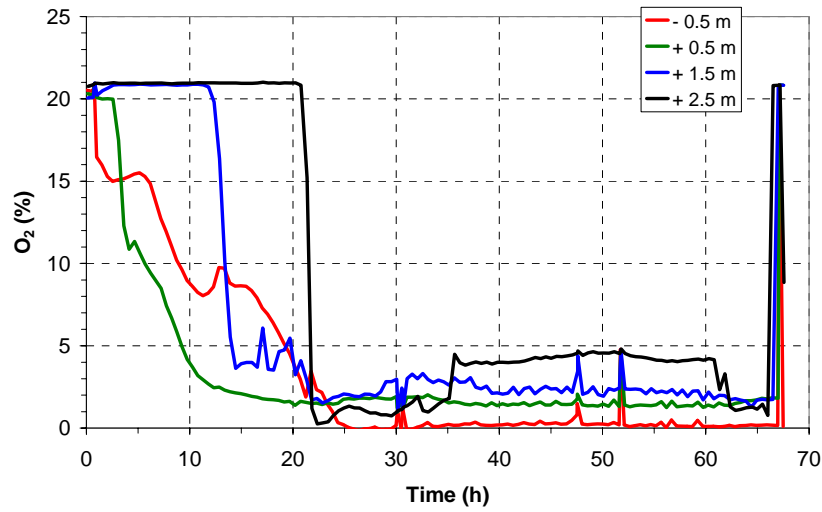
Nedan presenteras mätdata i för hela försöksförloppet, 0-70 timmar, för respektive försök. Redovisade diagram omfattar:

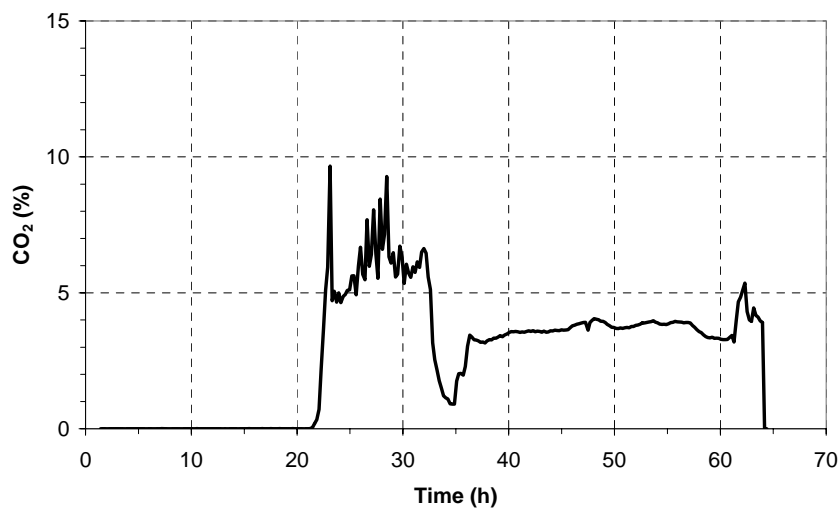
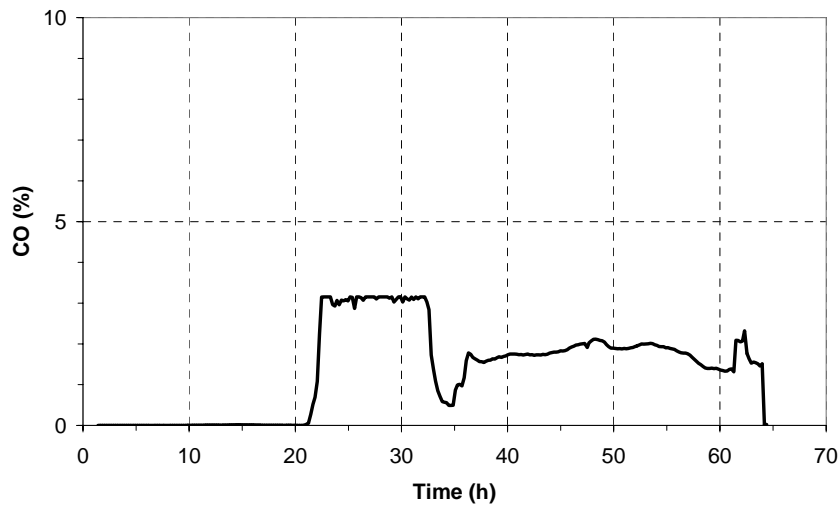
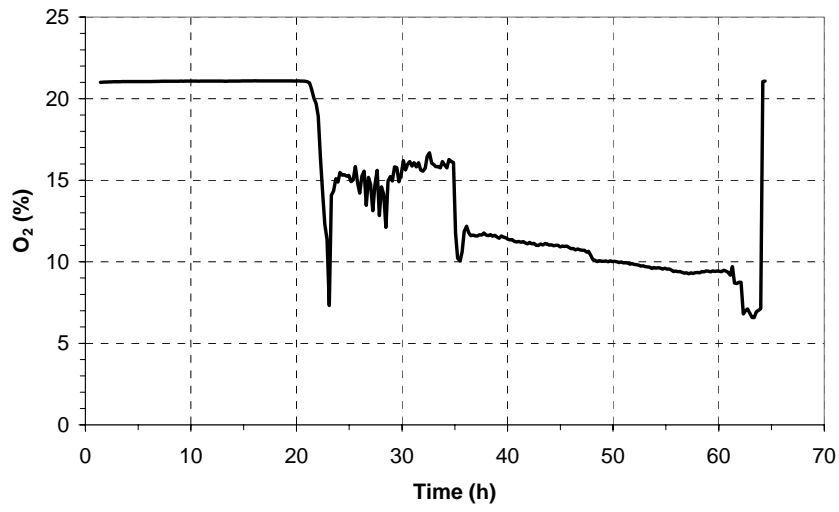
- Temperatur inne i pelletsbulken i centrum av silon under respektive över tändkällan.
- Gaskoncentrationer av O₂, CO samt CO₂ inne i centrum av pelletsbulken (CO samt CO₂ manuellt avlästa).
- Gaskoncentrationer av O₂, CO, CO₂ samt THC i silotoppen.
- Temperatur samt relativ fuktighet i silotoppen.

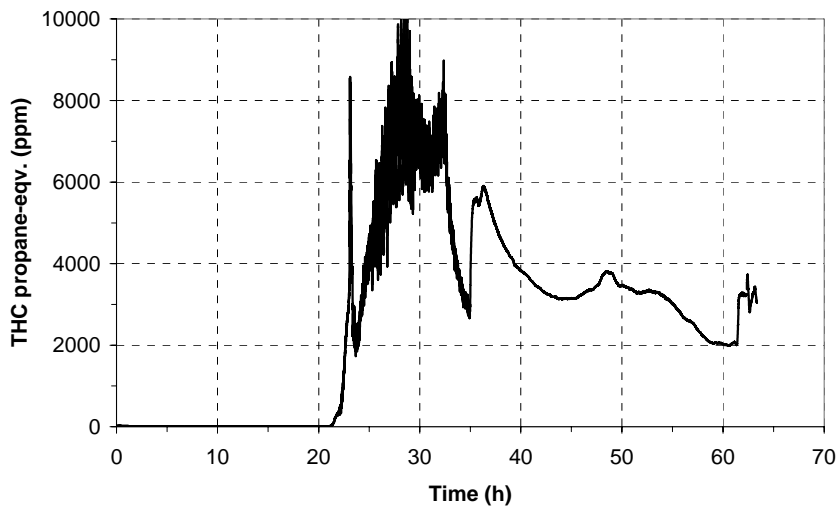
Test 1, temperaturer i pelletsbulken:



Test 1, gaskoncentrationer i pelletsbulken:

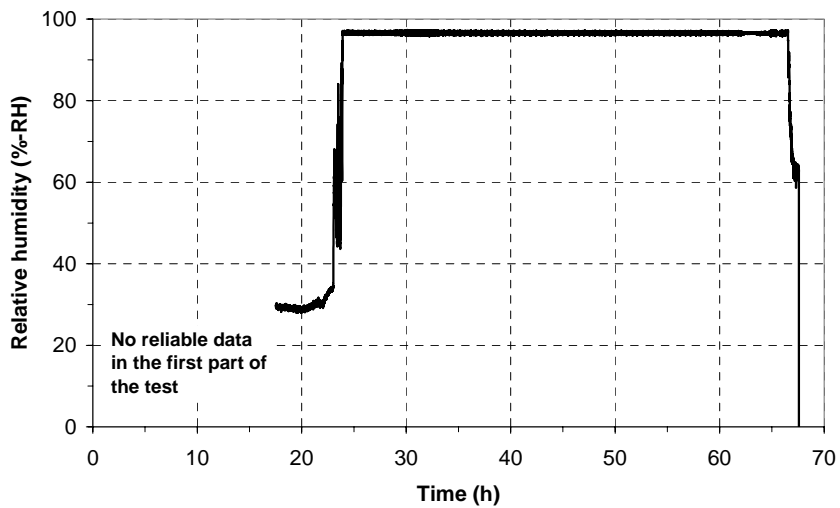
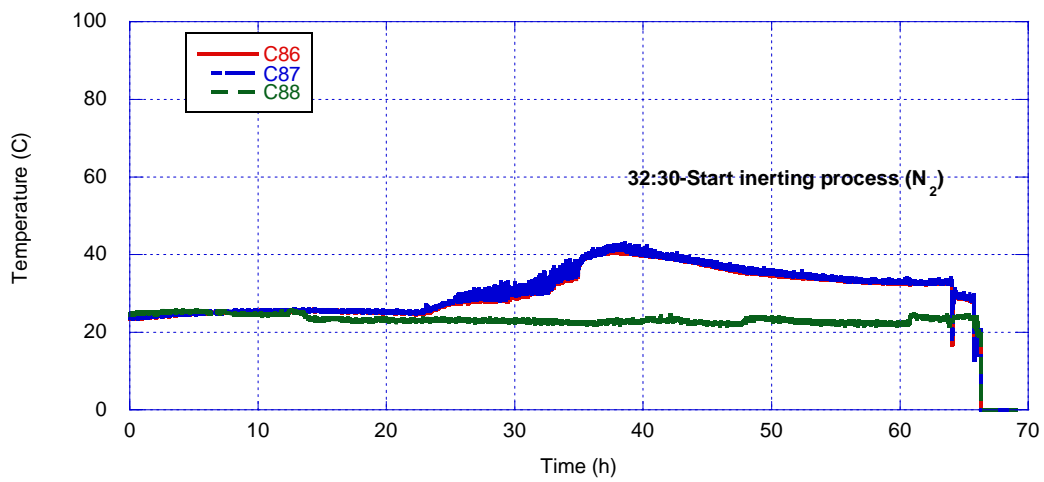


Test 1, gaskoncentrationer i silotoppen:

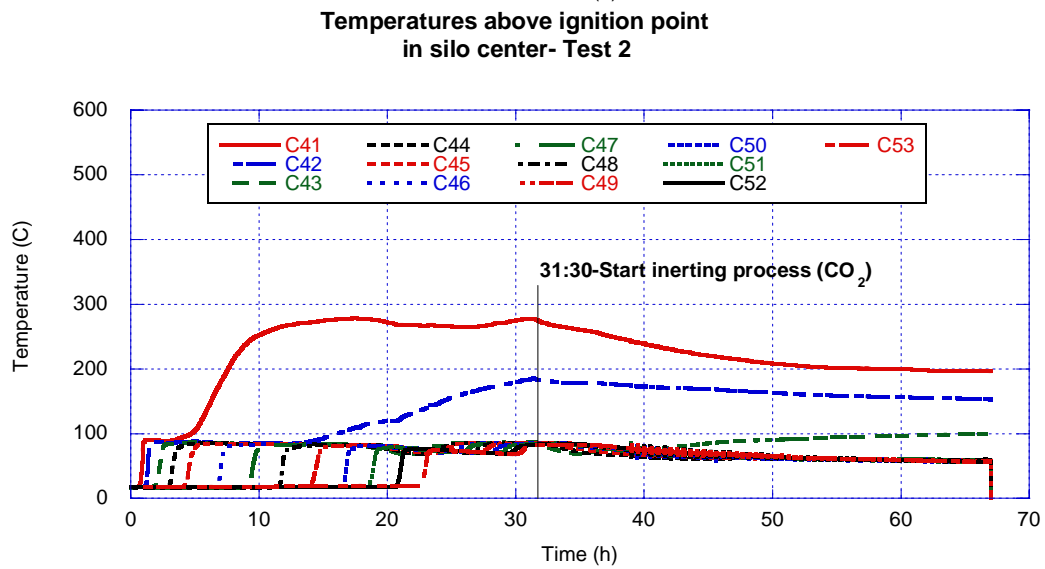
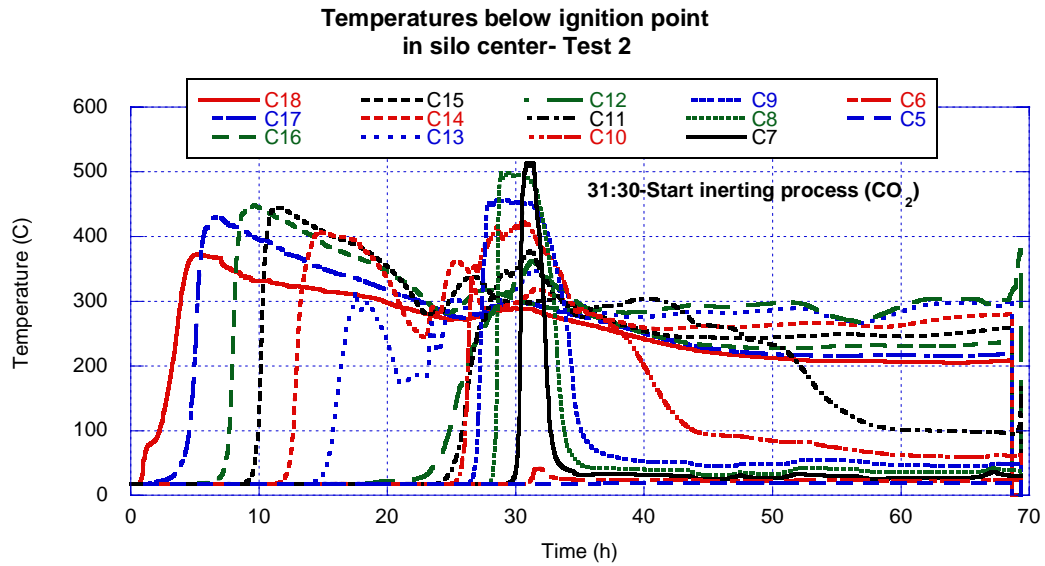


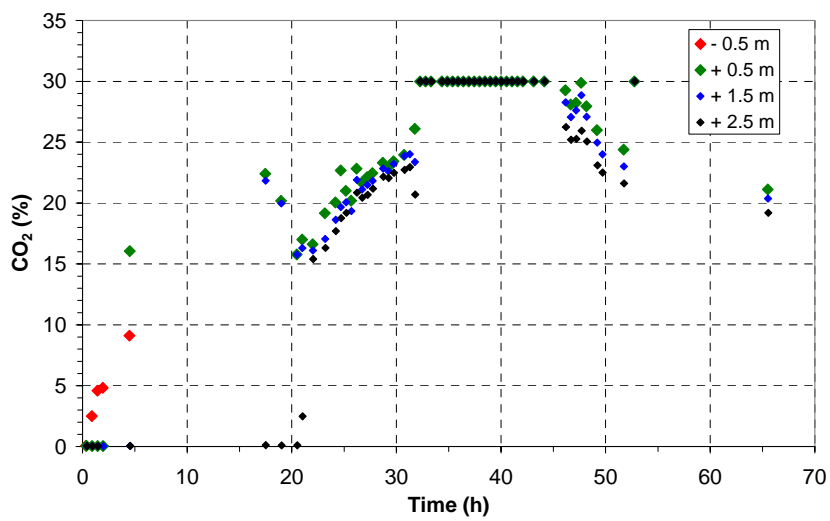
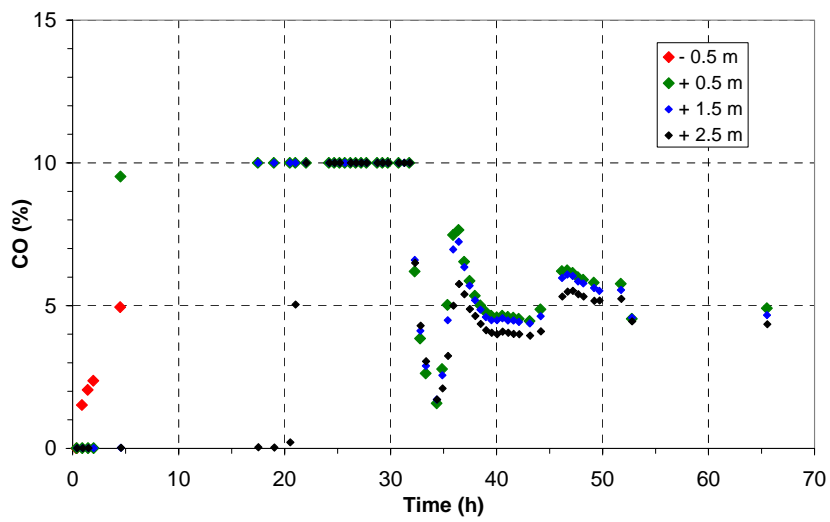
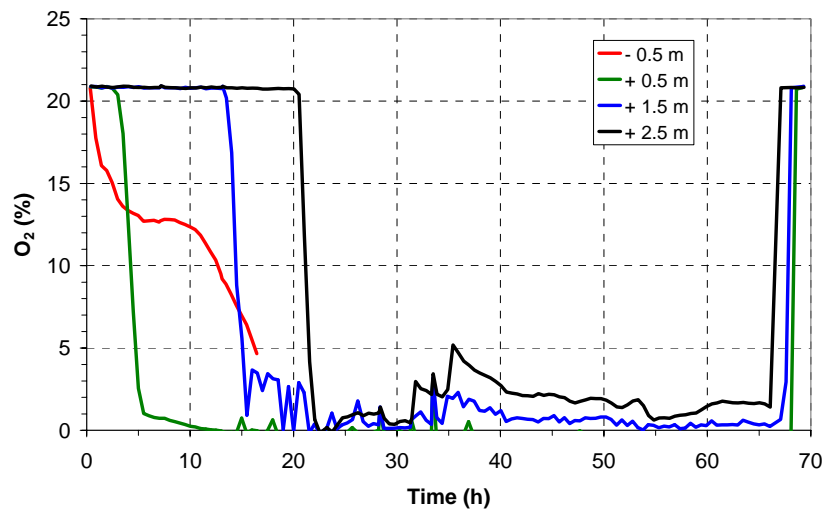
Test 1, temperatur och relativ fuktighet i silotoppen:

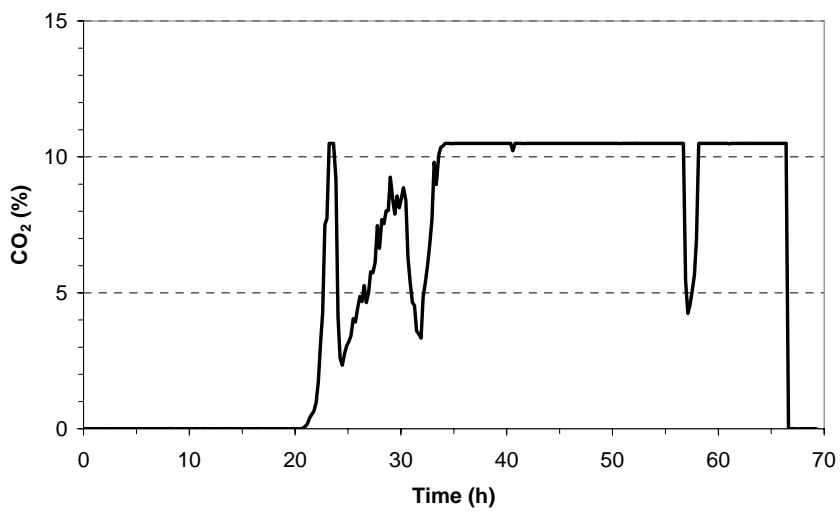
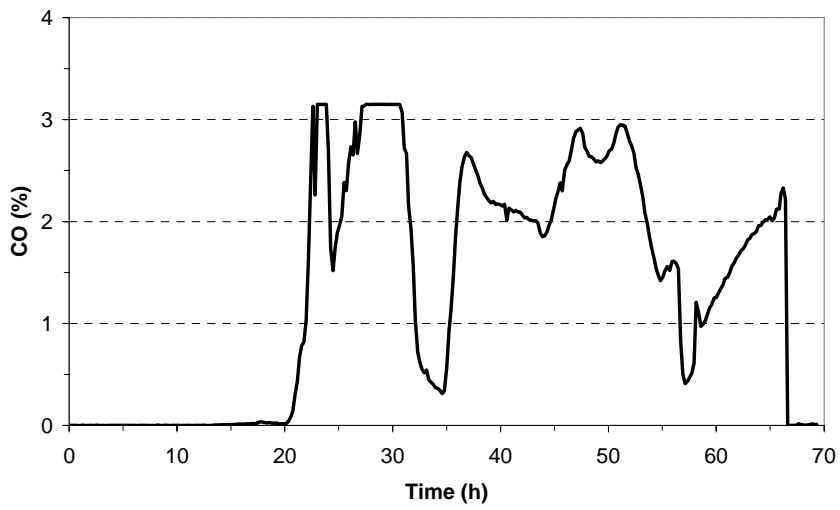
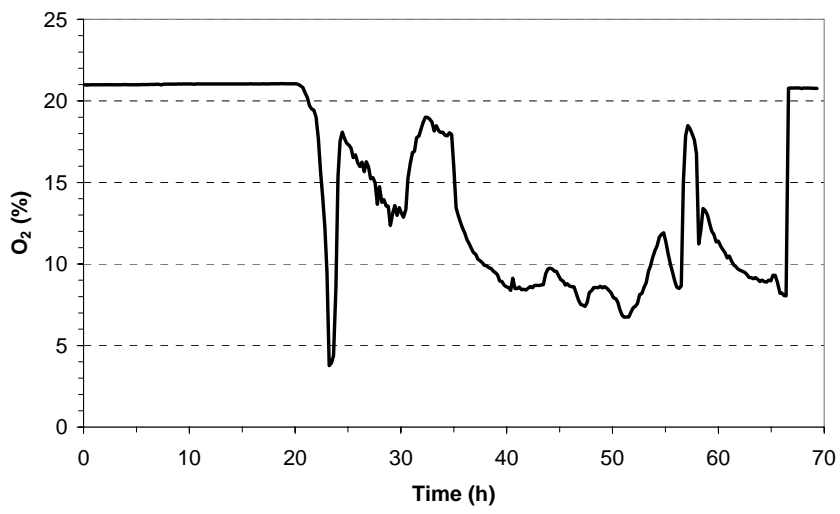
Temperatures in silo top- Test 1

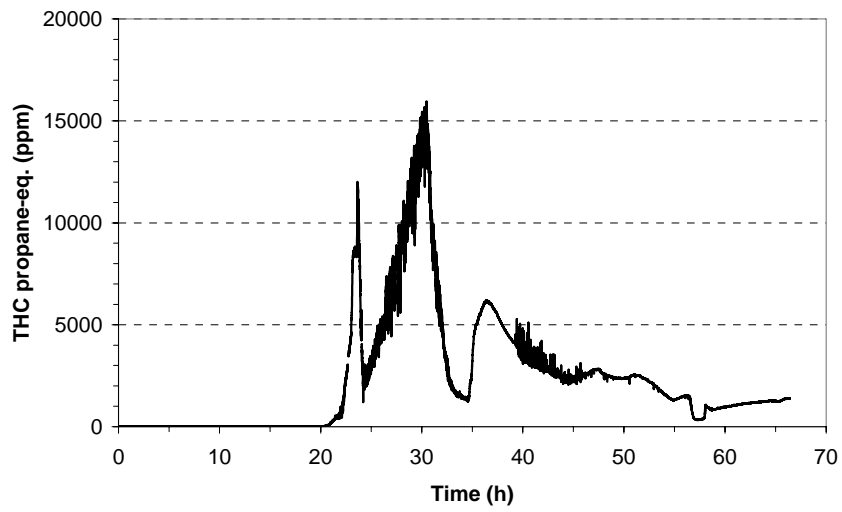


Test 2, temperaturer i pelletsbulken:



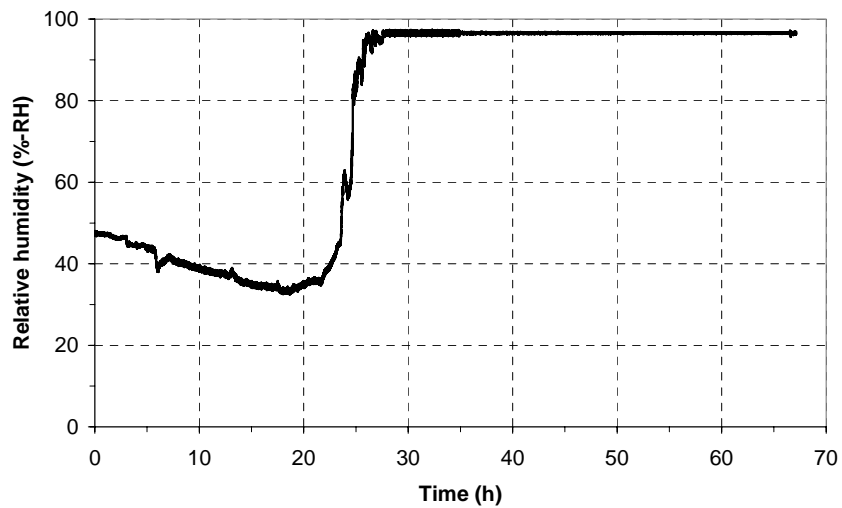
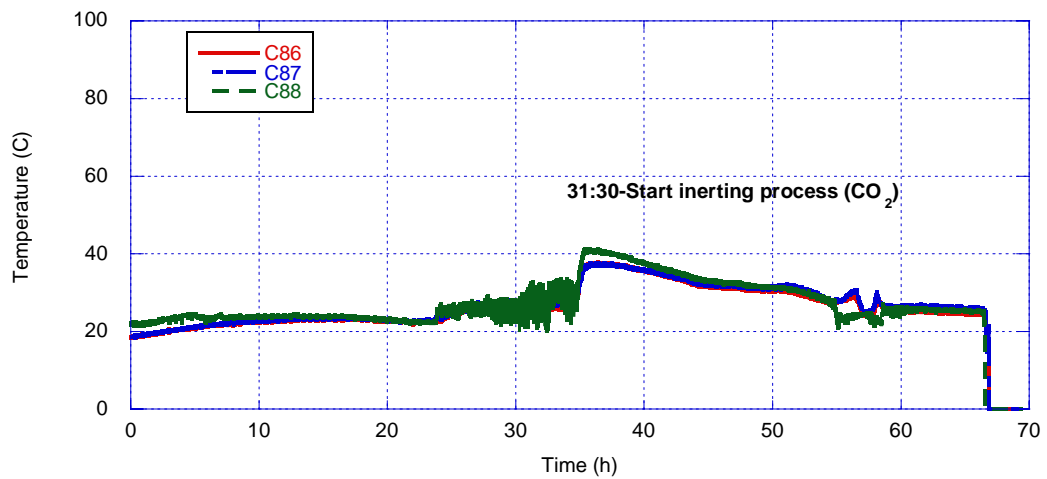
Test 2, gaskoncentrationer i pelletsbulken:

Test 2, gaskoncentrationer i silotoppen:

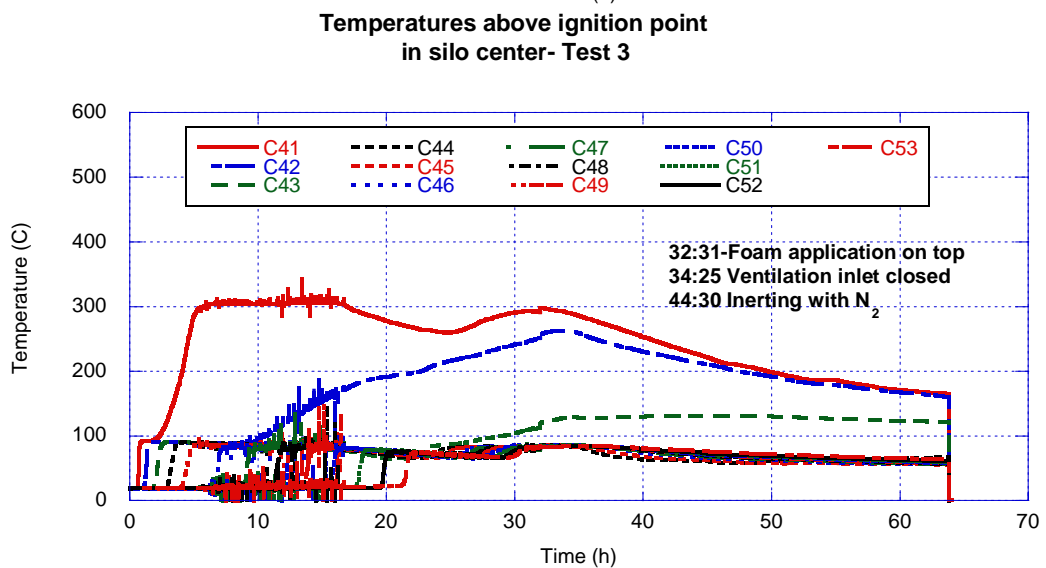
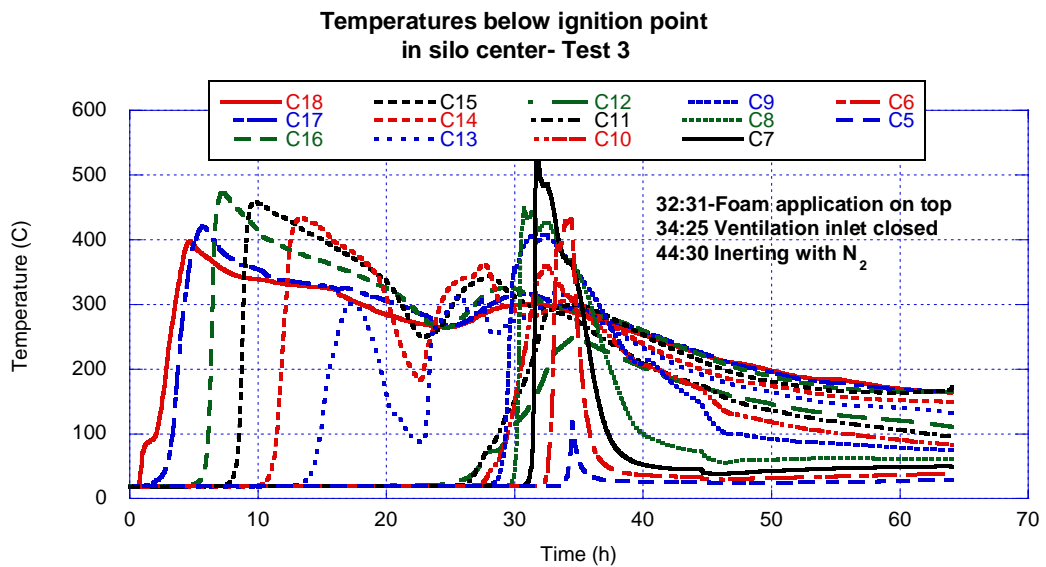


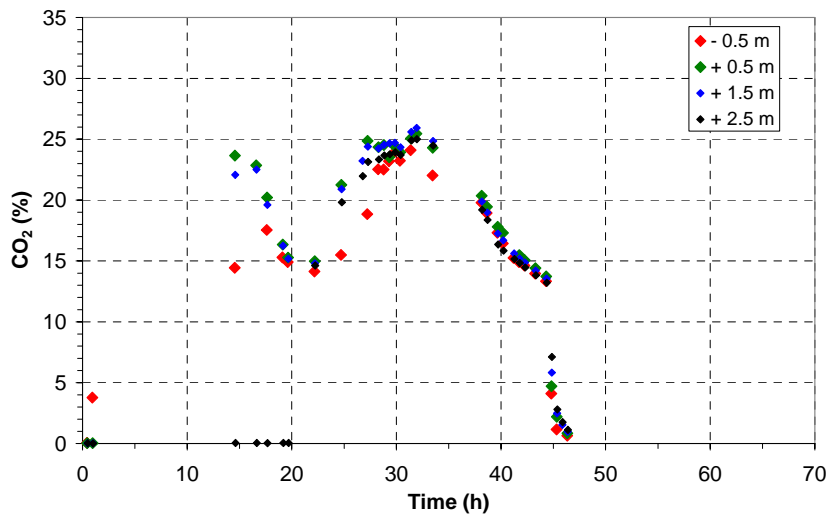
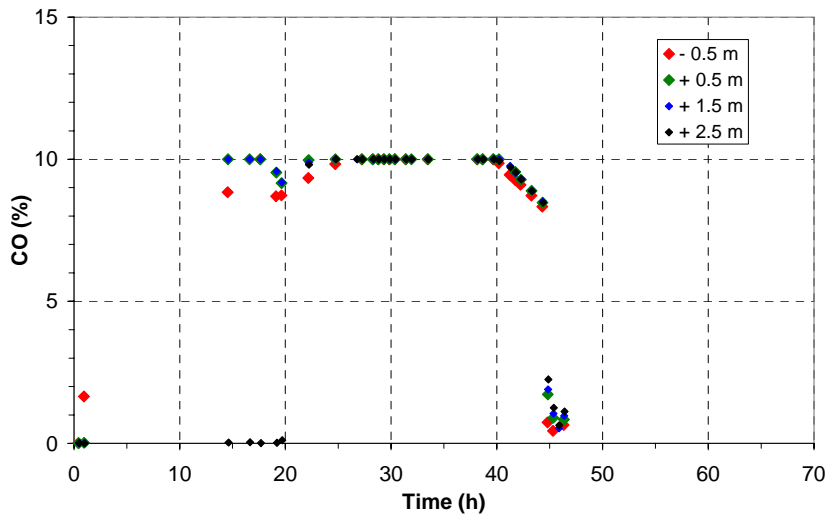
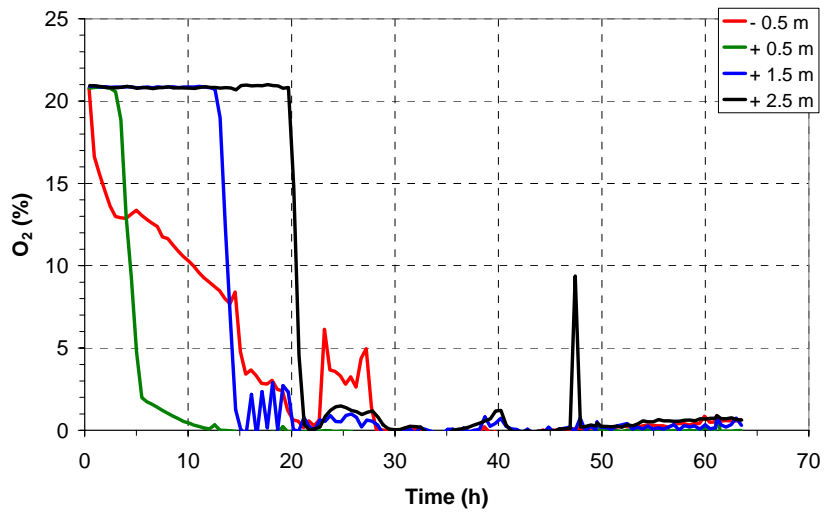
Test 2, temperatur och relativ fuktighet i silotoppen:

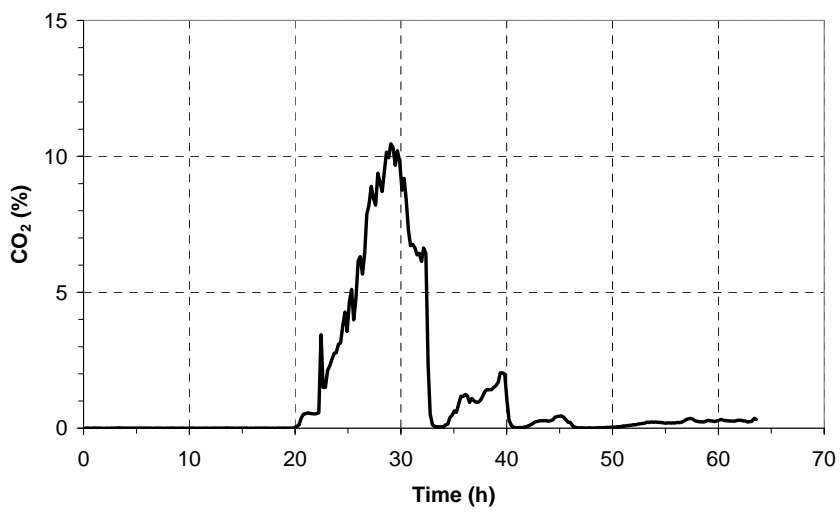
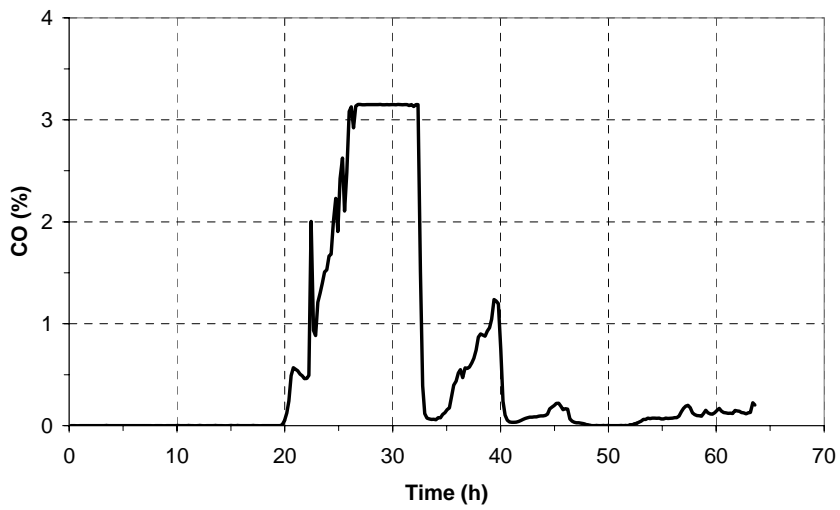
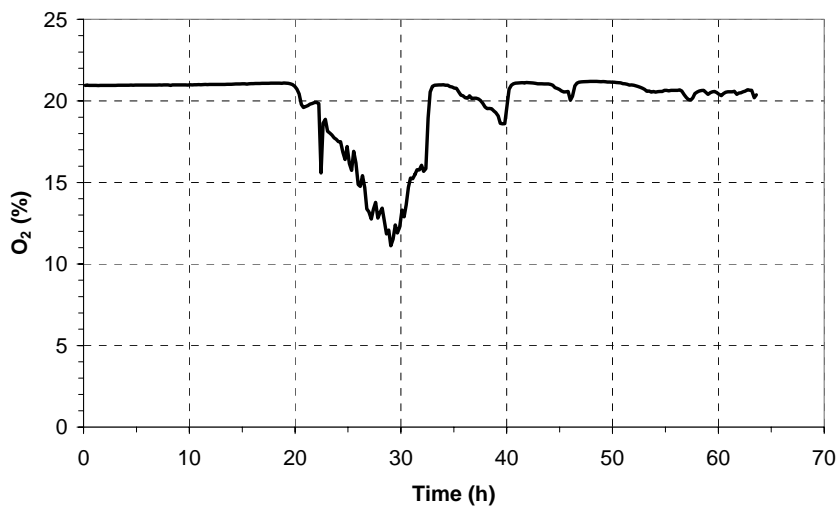
Temperatures in silo top- Test 2

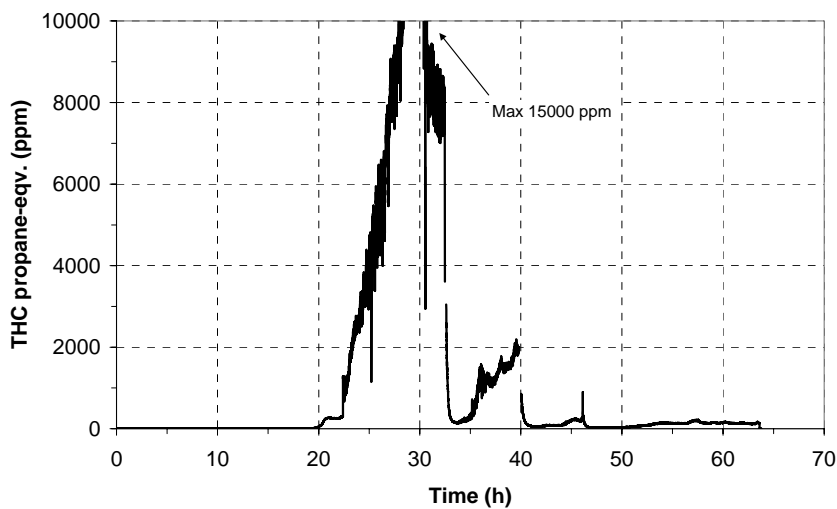


Test 3, temperaturer i pelletsbulken:



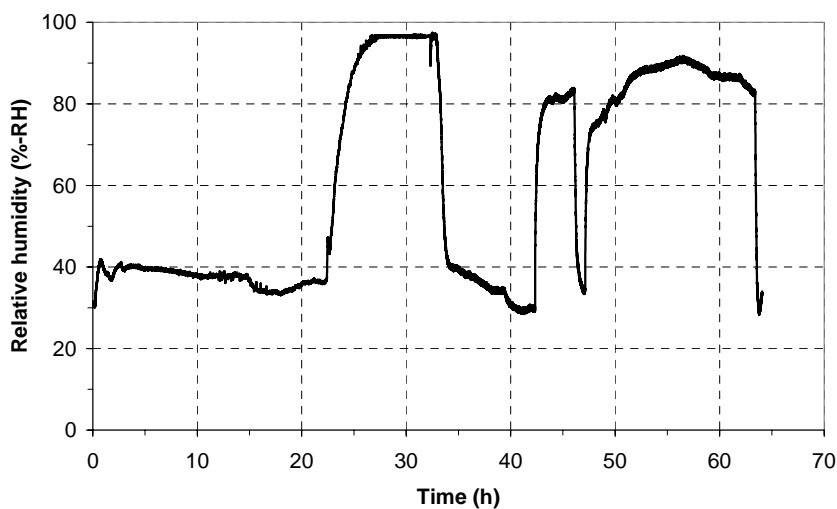
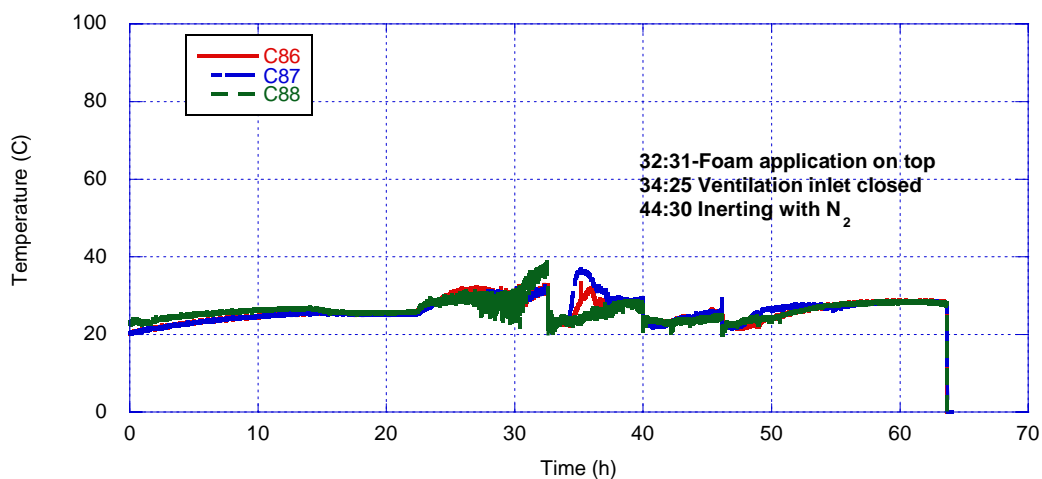
Test 3, gaskoncentrationer i pelletsbulken:

Test 3, gaskoncentrationer i silotoppen:



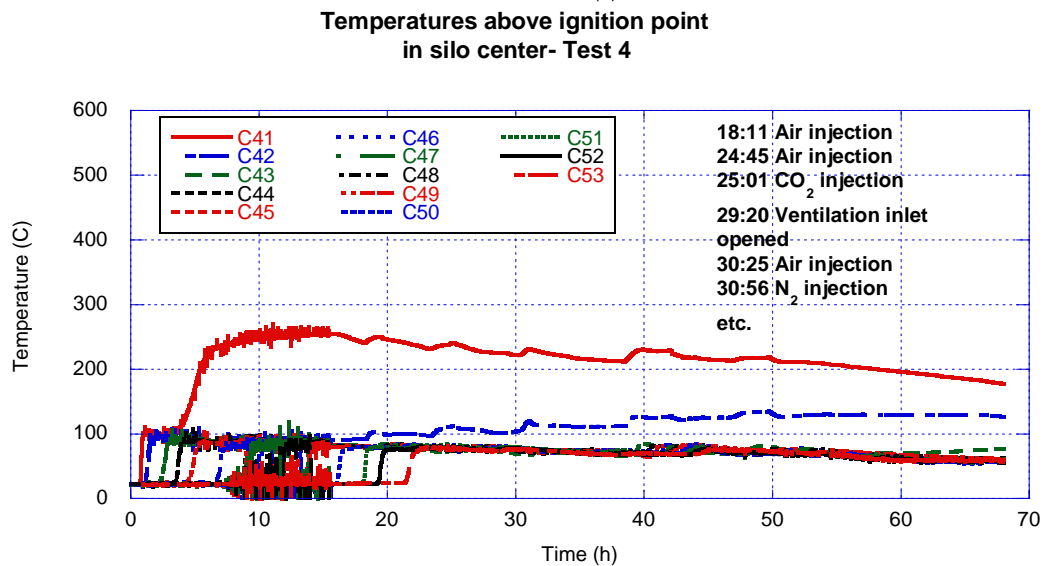
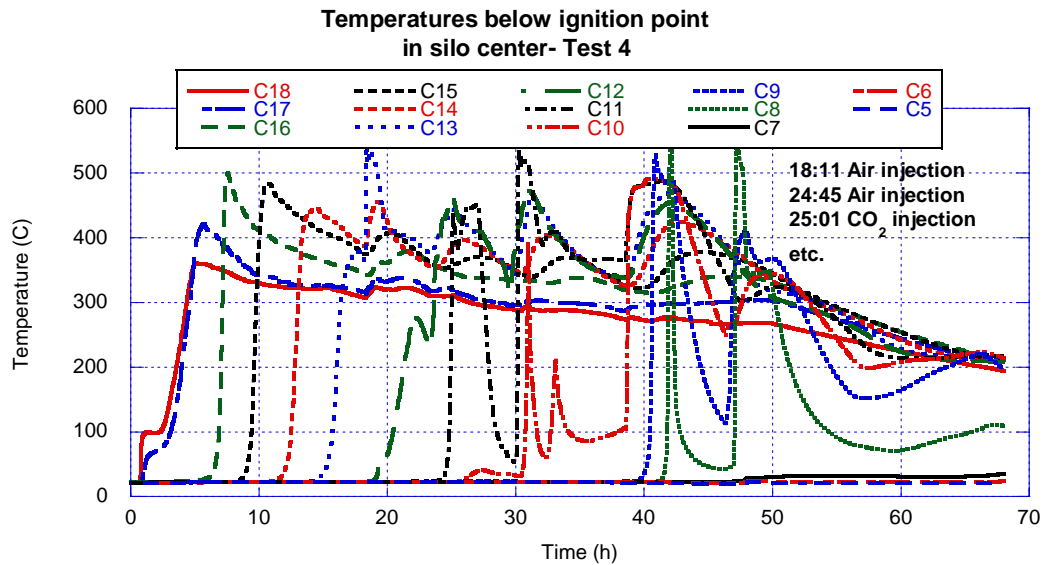
Test 3, temperatur och relativ fuktighet i silotoppen:

Temperatures in silo top- Test 3

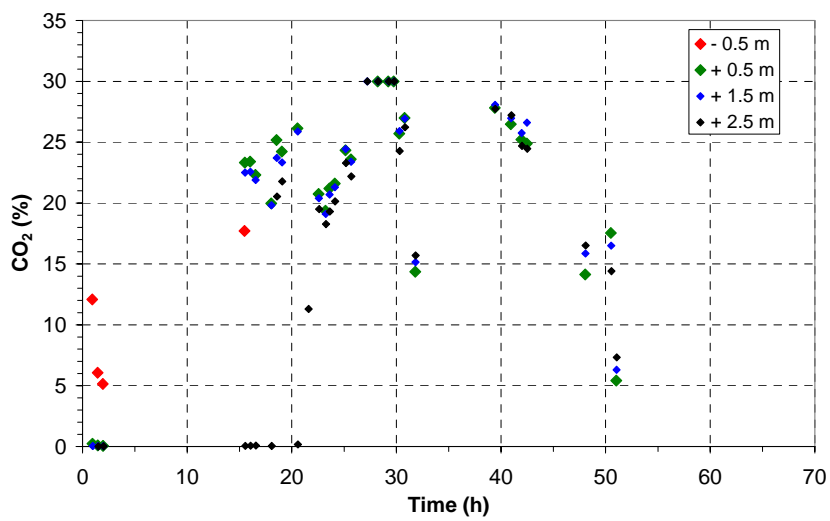
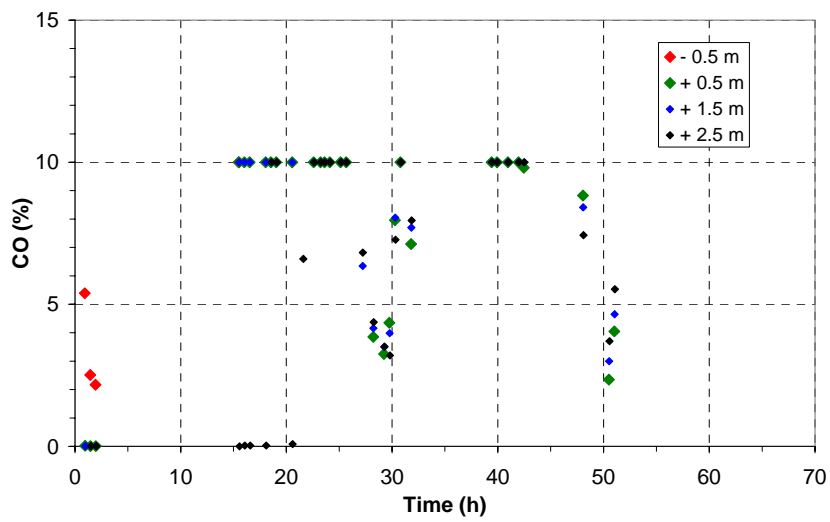
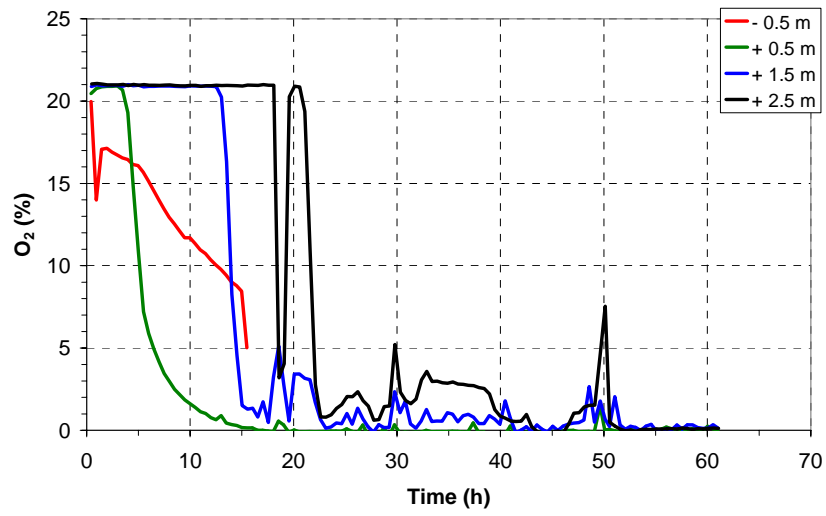


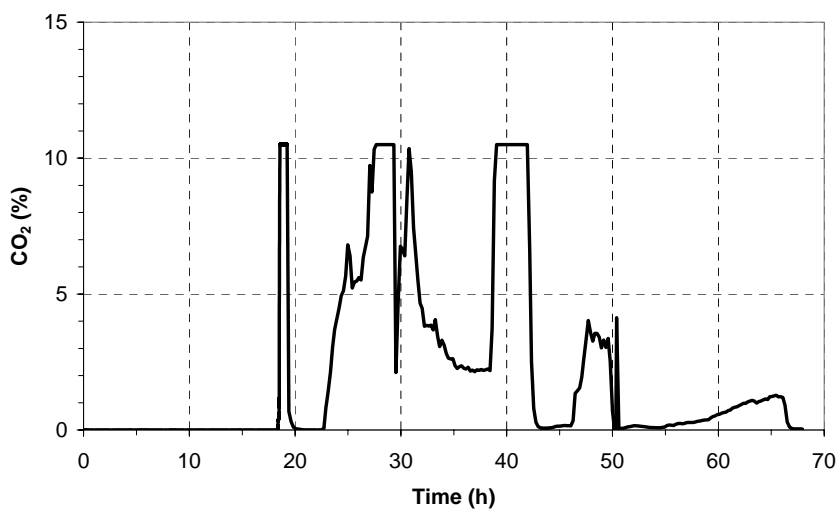
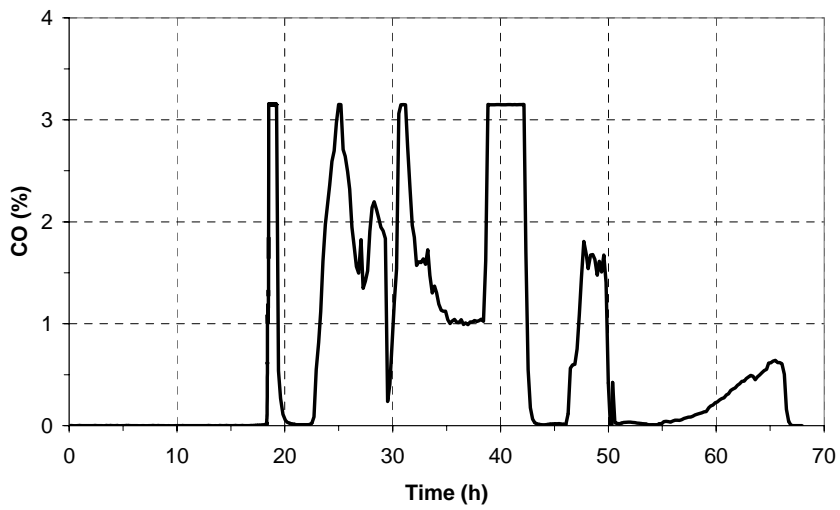
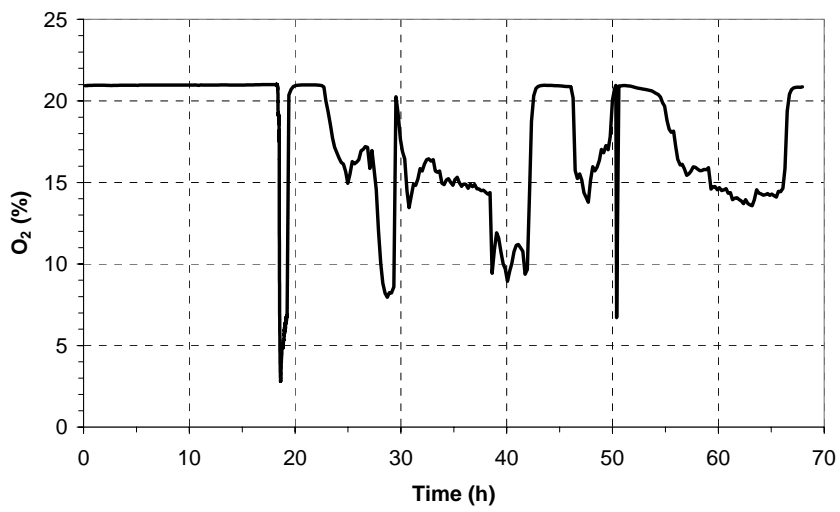
Notering: RH-mätaren togs bort från silotoppen 32:18 och placerades tillbaka 42:20. Togs bort 46:05 och placerades tillbaka 47:08. Tas bort 63:25 inför demontering.

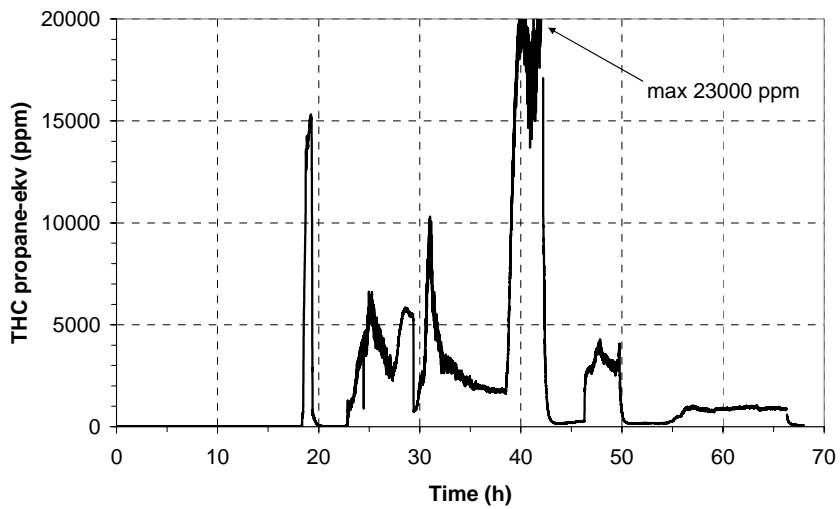
Test 4, temperaturer i pelletsbulken:



Test 4, gaskoncentrationer i pelletsbulken:

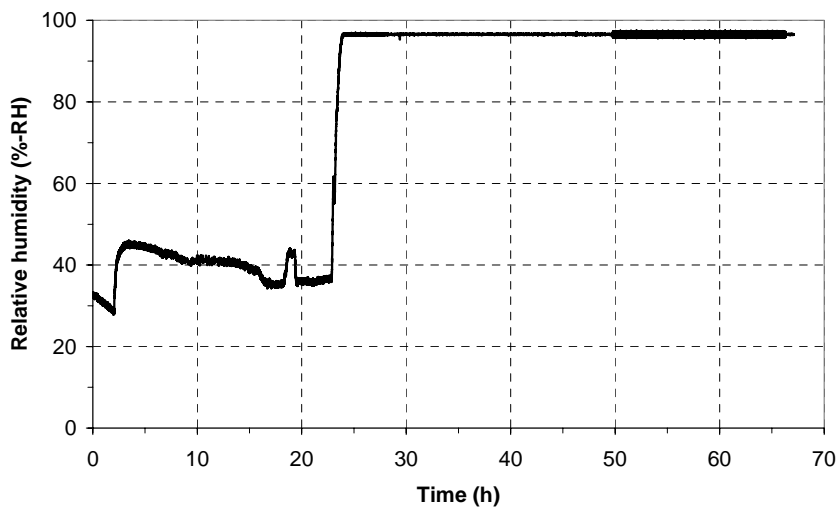
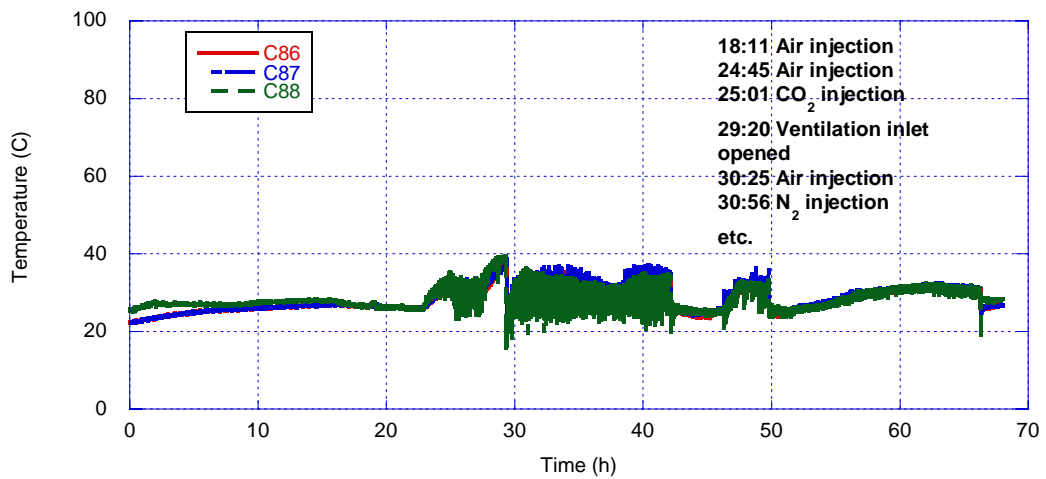


Test 4, gaskoncentrationer i silotoppen:

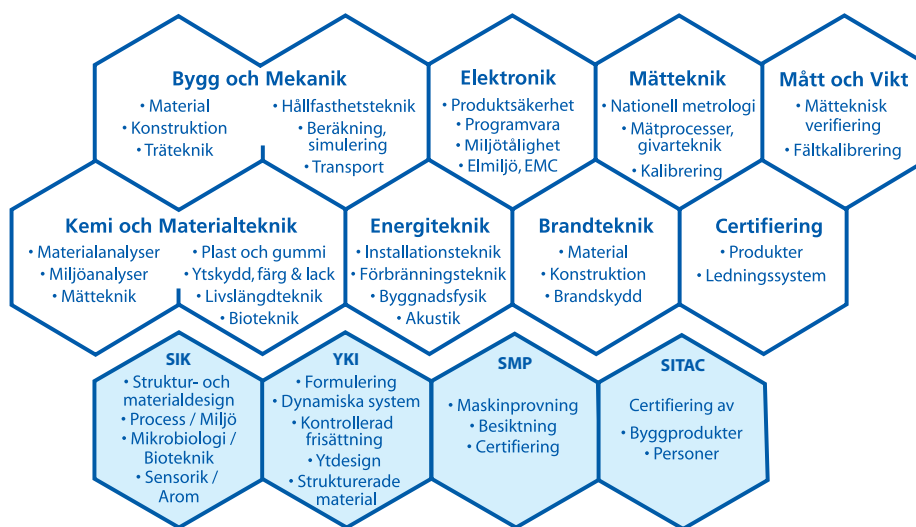


Test 4, temperatur och relativ fuktighet i silotoppen:

Temperatures in silo top- Test4



SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut utvecklar och förmedlar teknik för näringslivets utveckling och konkurrenskraft och för säkerhet, hållbar tillväxt och god miljö i samhället. Vi har Sveriges bredaste och mest kvalificerade resurser för teknisk utvärdering, mätteknik, forskning och utveckling. Vår forskning sker i nära samverkan med högskola, universitet och internationella kolleger. Vi är drygt 830 medarbetare som bygger våra tjänster på kompetens, effektivitet, opartiskhet och internationell acceptans.



SP är organiserat i åtta tekniska enheter och fyra dotterbolag.

SP Brandteknik
 SP RAPPORT 2006:47
 ISBN 91-85533-35-1
 ISSN 0284-5172



SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Box 857
 501 15 BORÅS
 Telefon: 033-16 50 00, Telefax: 033-13 55 02
 E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

A Member of

 **United Competence**