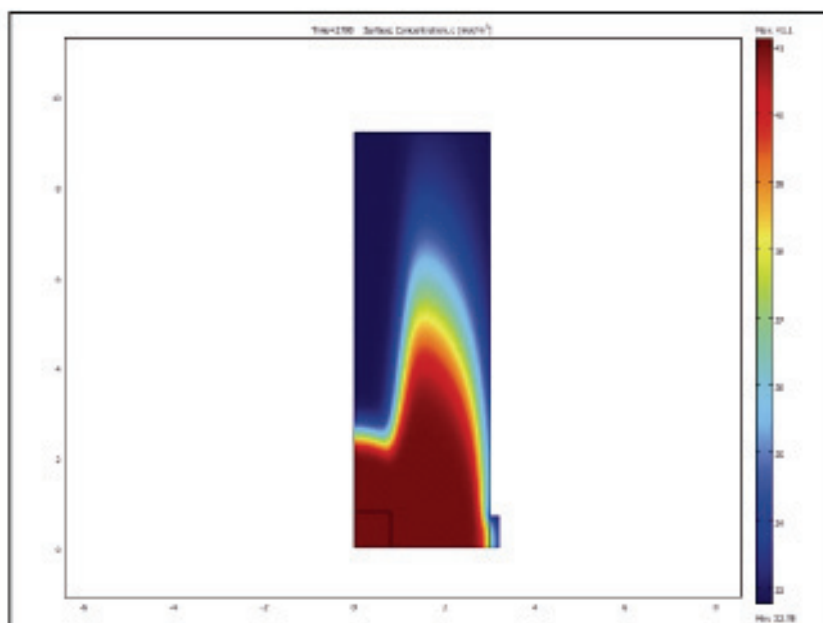
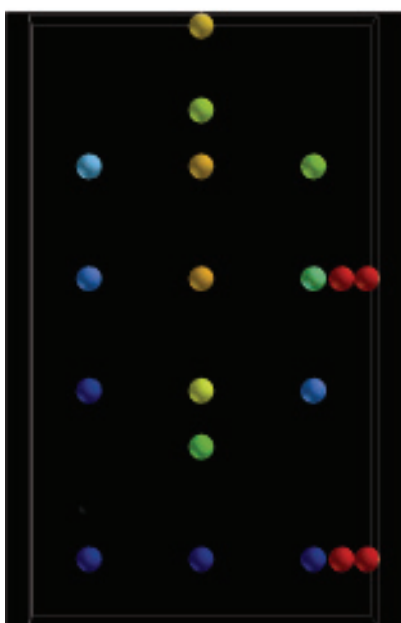


Inertering av siloanläggningar med kvävgas- Gasfyllnadsförsök och simuleringar

Henry Persson, Per Blomqvist, Heimo Tuovinen

BRANDFORSK projekt 602-071



Inertering av siloanläggningar med kvävgas-Gasfyllnadsförsök och simuleringar

Henry Persson, Per Blomqvist, Heimo Tuovinen

Abstract

Inerting of silos with nitrogen-Gas filling tests and simulations

A series of five gas filling tests have been conducted in a 300 m³ silo filled with wood pellets. The aim was to study the gas distribution inside the bulk material in order to optimize a silo fire fighting operation. In parallel to the experiments, mathematical simulations were made of the gas distribution using the CFD-programme SIMTEC and the FEM-programme COMSOL. Based on the experiments and the simulations, recommendations are given about suitable gas flow rates, number of gas inlets and several other aspects that might be of importance. The results of this project will be used for the preparation of specific guidelines for silo fire fighting both for silo operators and fire brigades.

Key words: silos, fire extinguishment, inerting, nitrogen, gas distribution, experiments, simulations

SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut
SP Technical Research Institute of Sweden

SP Rapport 2009:10
ISBN 978-91-85829-87-3
ISSN 0284-5172
Borås 2009

Innehållsförteckning

Abstract	3
Innehållsförteckning	4
Förord	6
Sammanfattning	7
Summary	8
1 Bakgrund och syfte	9
1.1 Projektets syfte och målsättning	9
1.2 Val av scenarier för simuleringar respektive gasfyllnadsförsök	10
2 Genomförda simuleringar	12
2.1 Simulering serie 1 – Simulering av ett enskilt gasinlopp i en stor silo – Förutsättningar	12
2.1.1 Simulering serie 1 – Resultat	13
2.1.1.1 Resultat, scenario 1 (6280 kg/tim, 3 m/s, 770 mm)	14
2.1.1.2 Resultat scenario 5 (628 kg/tim, 3 m/s, 243 mm)	16
2.1.1.3 Summering av samtliga simuleringar samt inverkan av inloppshastighet	18
2.2 Simulering serie 2 – Förhandssimuleringar av försökssilon i Ulricehamn – Förutsättningar	20
2.2.1 Försöksscenario 1 – gasinlopp i centrum, lågt flöde	20
2.2.2 Försöksscenario 2 – gasinlopp i centrum, högt flöde	22
2.2.3 Gasinlopp vid siloväggen	25
3 Verifierande gasfyllnadsförsök	27
3.1 Försökssilo – uppställning och fyllning	27
3.1.1 Instrumentering och mätningar	28
3.1.2 Gasutrustning	32
3.2 Försöksprogram	34
3.3 Tömning av silon	35
4 Försöksresultat från gasfyllnadsförsök	36
4.1 Generella procedurer vid försöken	36
4.2 Bakgrundsmätningar efter fyllning av silon respektive inför varje försök	37
4.3 Gasfyllnadsförsök 1	40
4.4 Gasfyllnadsförsök 2	43
4.5 Gasfyllnadsförsök 3	46
4.6 Gasfyllnadsförsök 4	49
4.7 Gasfyllnadsförsök 5	53
4.7.1 Förändringar av inertgaskoncentrationen efter avslutad gasinmatning	57
4.8 Tryckfallsmätningar över gasinlopp och silobädd	59
5 Permeabilitetsbestämning och karaktärisering av pellets	62
5.1 Tryckfallsmätningar vid genomströmningsförsök	62
5.1.1 Försök med olika halt finfraktion	63
5.1.2 Försök med förbränningsförhållanden i pelletsen	66

5.2	Karaktärisering av pellets från försökssilon	69
6	Jämförelse av försök och simuleringar	72
6.1	Simuleringar av försöken i Ulricehamn med isotropa förhållanden i silon	72
6.1.1	Gasinlopp i centrum	73
6.1.2	Gasinlopp vid siloväggen	76
6.2	Simuleringar av försöken i Ulricehamn med anisotropa förhållanden i silon	76
6.2.1	Antagna förhållanden i silon	76
6.2.2	Resultat av simuleringarna och jämförelser med försöksdata	77
7	Simuleringar av tillämpade fall	81
7.1	Gasfördelning i silo med pågående glödbrand	81
7.1.1	Stor silo	81
7.1.2	Tornsilo	83
7.2	Gasfördelning från ett eller flera inlopp samt inverkan av flöde och silovägg	84
7.2.1	Fördelning av gasinmatningen på flera inlopp	84
7.2.2	Inverkan av silovägg	86
7.2.3	Tryckfall vid inlopp	87
7.2.4	Inverkan av inloppets detaljutformning	88
8	Diskussion	90
8.1	Stämmer genomförda beräkningar av gasdistribution med verifierande försök?	90
8.2	Hur påverkar silons täthet/otätheternas placering inerteringsprocessen?	91
8.3	Eventuella skaleffekter mellan genomförda försök och fullskaliga simuleringar?	92
8.4	Hur skall gasinföringssystemet utformas för optimal gasfördelning?	92
8.5	Hur skall gasinföringen utformas för bästa funktion?	94
9	Slutsatser och rekommendationer	95
10	Referenser	97
	Bilaga 1. Lista över mätkanaler	98
	Bilaga 2. Resultat av bakgrundsmätningar	99
	Bilaga 3. Bilder av uppmätt koncentrationsfördelning	108

Förord

Detta projekt har syftat till att ta fram underlag till anvisningar för hur inertgas skall föras in i en silo i samband med släckning/kvävning. Arbetet har omfattat ett antal gasfyllnadsförsök i en ca 300 m³ silo fylld med träpellets för att se hur en inertgas fördelas inne i silon. Parallellt med detta arbete har datasimuleringar av fyllnadsförloppet genomförts vid LTH med CDF-programmet SIMTEC samt vid SP med FEM-programmet COMSOL.

Projektet har finansierats av BRANDFORSK, Aarhus Karlshamn, Wood Pellets Association of Canada (WPAC), Värme- och Kraftföreningen, Lantmännen, Dong Energy, Öresundskraft samt Vattenfall-Danmark. Utöver detta har Lantmännen-Agroenergi bidragit genom att ställa en silo och träpellets till förfogande för försökens genomförande och AGA har bidragit med kvävgas samt nödvändig utrustning i form av kvävgastank och förångarutrustning. Dessutom har SVEBAB bidragit med slang som använts mellan förångarutrustningen och silon.

Till viss del har också en samverkan kunnat ske med CECOST-projektet ”Självantändning av biobränslen och biogent avfall”, finansierat genom STEM. Områden där projekten haft starka beröringspunkter är bl a simuleringsarbetet samt karaktäriseringen av pellets. Även produktionen av CO och CO₂ från autooxidation av materialet i silon före gasfyllnadsförsöken har varit av intresse för CECOST-projektet.

Projektet utgör en fortsättning av projektet ”Brand i siloanläggningar” som genomfördes under 2006 och rapporterades i SP rapport 2006:47.

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

Per-Erik Johansson, Brandforsk
 Staffan Melin, WPAC
 Ingvar Hansson, Myndigheten för samhällsskydd och beredskap (MSB)
 Lasse Larsson, Lantmännen
 Thomas Isaksson, Stora Enso
 Ingemar Klasson, Agroenergi
 Dan-Ove Segerkvist, Agroenergi
 Ulf Oscarsson, AarhusKarlshamn
 Tommy Berglund, Öresundskraft
 Niels Jörn Fredriksen, Dong Energy
 Jan Westin, Mälarenergi/Värme och Kraftföreningen
 Philip Rydén, EON
 Lars-Göran Björhagen, Jönköping Energi
 Håkan Edoff, If
 Sture Gullbring, Zürich
 Per Modin, Räddningstjänsten Bergslagen
 Tom Sörensen, AGA
 Peter Stjernberg, Air Liquide
 Mogens Berg, Vattenfall DK
 Patrick van Hees, LTH Brandteknik (projektdeltagare)
 Ulf Göransson, LTH Brandteknik (projektdeltagare)
 Zhenghua Yan, LTH Energivetenskap (projektdeltagare)

Sammanfattning

Projektet är en fortsättning på tidigare genomförda studier kring släckning av bränder i silor [1], [2]. Dessa projekt och praktiska erfarenheter har visat att inertering med kvävgas som matas in nära silons botten är en mycket lämplig släckmetodik vilket innebär att syret successivt trängs undan och på så sätt dämpar en pågående glödbrand.

Syftet med detta projekt har varit att utreda hur kvävgasen skall föras in i en silo för att uppnå optimal gasfördelning och på så sätt säkerställa att hela siloinnehållet inerteras. Vid större silodiametrar kan det behövas flera införselpunkter för att nå en jämn fördelning men kunskap och rekommendationer kring detta har helt saknats.

Projektet har dels omfattat praktiska gasfyllnadsförsök i en 300 m³ silo fylld med träpellets (diameter 6 m, fyllnadshöjd 9,2 m), dels omfattande simuleringar av gasdistributionen inne i bulkmaterialet med hjälp av CFD-programmet SIMTEC respektive FEM-programmet COMSOL. Experimenten har genomförts i en ”kall” silo, dvs utan brand medan simuleringarna delvis också inkluderat tänkta brandförhållanden i en silo.

De simuleringar som genomförts har dels haft till syfte att ge en uppfattning av förväntad gasfördelning i försökssilon, dels att studera gasfördelningen i mycket stora silor under olika förutsättningar. Simuleringar av försökssilon genomfördes innan försöken för att på så sätt kunna optimera försöksupplägg, mätpunkternas placering, etc., men också efter försöken med rådande försöksförutsättningar för att kunna jämföra med erhållna försöksdata. Vid de storskaliga simuleringarna antogs en silodiameter på 40 m och en fyllnadshöjd på 30 m.

Gasfyllnadsförsöken omfattade totalt fem försök där gasen matades in från silons botten; i centrum av silon eller alternativt i en punkt längs siloväggen. Inmatningshastigheten var 0,9 kg/m² tim respektive 4,4 kg/m² tim i de olika försöken. I det sista försöket provades även inertering med koldioxid från silotoppen senare följt av kvävgasinmatning från botten.

Försöken visar att användning av kvävgas är en förhållandevis enkel metod att inertera en silo och att inmatningshastigheten, 5 kg/m² tim, både ger förutsättningar för en bra gasfördelning och effektiv inertering. Försöken visade också att det kan råda mycket varierande (anisotropa) förhållanden inne i en silo, bl a beroende på ansamling av finfraktion från fyllning av silon och temperaturvariationer inne i bulkmaterialet, vilket i sin tur markant kan påverka gasfördelningen.

Både försöken och simuleringarna visar att gasspridningen i sidled från ett enskilt gasinlopp är begränsad och att det i större silor är sannolikt att full inertering inte kan uppnås med endast ett inlopp. Gasfördelningen begränsas också av siloväggen vilket gör att det kan vara svårt att nå en effektiv inertering inom 0,5-1 m från väggen. Dessa samlade observationer från försöken bekräftas också av genomförda simuleringar. Om silodiametern är stor kommer därför gasen att behöva matas in genom flera inlopp för att erhålla en bra gasfördelning inne i silon.

Användning av inertgas inne i silon medförde ingen nämnvärd kvalitetsförsämring av pelletsen. Detta innebär att inertering i förebyggande syfte, t ex vid en misstänkt men ej verifierad brand, kan genomföras utan att siloinnehållet skadas.

Summary

The project is a continuation of previous studies on the extinguishment of silo fires [1], [2], [3]. These projects and practical experience have shown that inerting with nitrogen injected close to the silo bottom is an appropriate extinguishing method which means that the air, and therefore the oxygen, is gradually replaced by nitrogen which thereby suppresses an ongoing smouldering fire.

The purpose of this project has been to investigate how the nitrogen can be injected into a silo in order to achieve optimal gas distribution and thus ensure that the entire silo is inerted. In silos with a large diameter, multiple gas inlets will be needed to ensure an even distribution, but thus far knowledge and recommendations on this subject have been lacking.

The project has involved practical gas filling tests in a 300 m³ silo filled with wood pellets (diameter 6 m, filling height of 9.2 m), and extensive simulations of the gas distribution inside the bulk material using the CFD program SIMTEC and the FEM program COMSOL. The experiments were carried out in a "cold" silo, i.e. without fire, while the simulations also included fire conditions in a silo to a certain degree.

The simulations carried out have partly been intended to give an idea of the expected gas distribution in the test silo, and partly to study the gas distribution in very large silos under a variety of conditions. Simulations of the test silo was carried out, both before the gas filling tests in order to optimize the experimental approach, measurement locations, etc., but also after the tests with more exact test conditions to compare with the experimental data obtained. In the large-scale simulations, a silo diameter of 40 m and a filling height of 30 m was assumed.

In total, five gas filling tests were conducted, where the gas was injected from the silo bottom, in the centre of the silo or alternatively at a point along the silo wall. The injection rate was 0.9 kg/m² h and 4.4 kg/m² h in the various tests. In the last test, carbon dioxide was injected into the void volume in the silo top, followed by nitrogen injection from the silo bottom.

The experiments show that the use of nitrogen injection is a relatively simple tactical method to inert a silo. The recommended injection rate, 5 kg/m² h, provides both a good gas distribution and an effective inerting. The experiments also show that the conditions may vary considerably (anisotropic) in a silo depending, for example, on the accumulation of fines from the filling of the silo and temperature variations inside the bulk material, which in turn can significantly affect gas distribution.

Both the experiments and the simulations show that the radial gas distribution from an individual gas inlet is limited and that in larger silos it is likely that full inerting can not be achieved with only one inlet. The gas distribution is also limited by the silo wall, which means that it can be difficult to achieve an effective inerting within 0.5-1 m from the wall. The combined observations from the tests were also confirmed by the simulations. If the silo diameter is large, it is therefore necessary to inject the gas through several inlets to obtain a good gas distribution inside the silo.

The use of inert gas caused no significant deterioration of the pellets. This means that inerting could be used as a preventative measure without risk of damage to the silo contents, for example when a fire is suspected but not fully verified.

1 Bakgrund och syfte

I en förstudie [1] genomförd 2004 på uppdrag av Räddningsverket (numera MSB) påvisades de stora problem och den kunskapsbrist som råder kring släckning av silo-bränder. Bränderna uppstår oftast på grund av självantändning i det lagrade organiska materialet men varmgång i transportutrustningar eller gnistbildning från metalliska föremål kan också vara en orsak. Till skillnad från en brand i en byggnad innebär en silo-brand mycket begränsade insatsmöjligheter.

Mot denna bakgrund genomfördes därför under 2006 ett experimentellt projekt med syftet att ta fram kunskap kring hur bränder i siloanläggningar kan detekteras på ett tidigt stadium samt hur släckinsatsen skall genomföras på ett effektivt sätt. Fyra försök genomfördes i en skalmodell av en ”tornsilo” som var 1 m i diameter och ca 6 m hög. Som bränsle användes 2,4 ton träpellets. En glödbrand etablerades inne i pelletsbulken under ca 30 timmar varefter släckinsatsen inleddes. Försök genomfördes med både kvävgas och koldioxid.

I rapporten från projektet [2] listas en rad konkreta åtgärder som bör vidtas i händelse av brand och vissa dimensionerande data för en släckinsats presenteras. Den rekommenderade insatstaktiken går primärt ut på att täta eventuella öppningar på silon, dels för att förhindra lufttillträde till branden eftersom detta kan underhålla pyrolysen, dels för att minimera läckaget av släckgasen. Släckinsatsen genomförs därefter genom att föra in inertgas vid silons botten och låta denna pressas uppåt i materialet för att på så sätt reducera syretillgången. Gasen måste föras in i gasfas och ur praktisk synpunkt har det därför visat sig att kvävgas är mer lämplig än koldioxid. Släckning av en silo är en långsam process där man normalt får räkna med en insats på flera dagar.

Projektet genererade en mängd nya kunskaper vilka redan visat sig mycket värdefulla vid misstänkta respektive inträffade silo-bränder [4], [5], [6] men det identifierades också ett antal viktiga områden där kunskap fortfarande saknas.

Ett sådant område är hur gasfördelningen sker inne i silon vilket varit målet att studera inom det projekt som redovisas i denna rapport.

1.1 Projektets syfte och målsättning

Syftet med projektet har således varit att utreda hur inertgas skall föras in i en silo för att uppnå optimal gasfördelning och på så sätt säkerställa att hela siloinnehållet inerteras. En framtida målsättning är att alla silor förbereds för en släckinsats med inertgas, t ex genom att ett fast rörsystem monteras på silon så man i händelse av en brand och släckinsats på ett enkelt sätt kan ansluta en kvävgasutrustning. Beroende på silons diameter kan det behövas flera införselpunkter för att nå en jämn fördelning men kunskap och rekommendationer kring detta saknas helt.

Målsättningen med projektet har därför varit att ta fram kunskap som kan ligga till grund för konkreta rekommendationer hur denna typ av gasdistributionssystem skall utformas i silor av olika diametrar. Projektet har dels omfattat praktiska gasfyllnadsförsök i en 300 m³ silo fylld med träpellets, dels omfattande simuleringar av gasdistributionen med hjälp av CFD-programmet SIMTEC [7] respektive FEM-programmet COMSOL [8]. Experimenten har genomförts i en ”kall” silo, dvs utan brand medan simuleringarna delvis också inkluderat tänkta brandförhållanden i en silo.

De konkreta frågeställningar som experimenten och simuleringarna förväntades besvara var:

- Hur skall ett gasinföringssystem utformas för att nå en optimal gasfördelning med minimal gasförbrukning?
- Hur skall gasinföringen utformas för bästa funktion?
- Stämmer genomförda beräkningar av gasfördelning med verifierande försök?
- Hur påverkar silons täthet/otätheternas placering inerteringsprocessen?
- Indikerar beräkningarna på fullskaliga silor några ”skaleffekter” hos pyrolysis- och släckförloppet jämfört med tidigare genomförda försök?

Både beräkningar och försök har utgått ifrån de erfarenheter, resultat och rekommendationer som erhöles vid tidigare modellskaletförsök [2]

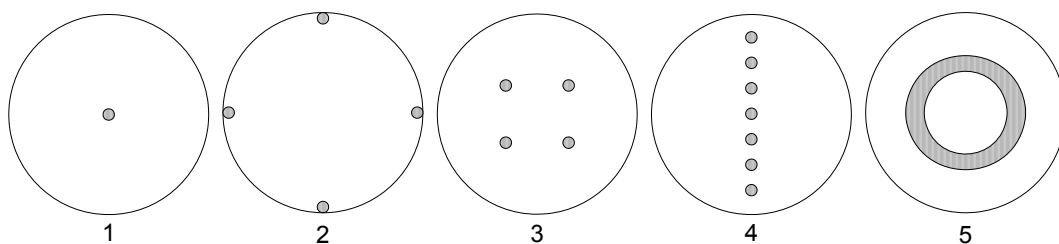
Parallellt med det genomförda projektet pågår ett fortsatt arbete åt MSB med att ta fram rekommendationer kring vilken utrustning som behövs för en släckinsats i en fullskalig silo. SP Brandteknik ansvarar även för detta arbete som bedrivs i samarbete med silo-ägare och gasleverantörer. Syftet är att ta fram ett koncept för en mobil släckutrustning som kan användas på ett nationellt plan vid släckinsats i silor. Som förebild för detta arbete finns den fullskaliga utrustning för släckning av cisternbränder som ägs och drivs av Släckmedelscentralen SMC AB som är ett dotterbolag till Svenska Petroleuminstitutet. Arbetet inom detta MSB-projekt är fokuserat på den utrustning som krävs för att kunna leverera erforderlig mängd gas till silons gasdistributionssystem. Detta innebär att de båda projekten tillsammans kommer att kunna ge information för att nå en helhetslösning för ett effektivt silobrandskydd.

1.2 Val av scenarier för simuleringar respektive gasfyllnadsförsök

Målsättningen med en inertering av en silo är att så snabbt och effektivt som möjligt nå en jämn fördelning av inertgasen över hela silons höjd och tvärsnittsyta. På detta sätt minimeras risken för att det kan uppstå områden inne i bulkmaterialen där inertgasen inte når och som kan leda till att en brand kan fortgå trots inmatning av inertgas.

Fördelen med ett fast system är att släckinsatsen kan komma igång mycket snabbt, utan behov av komplicerade håltagningar, provisoriska rördragningar, etc., vilket dessutom kan vara riskfyllt att genomföra i en brandsituation. Förutsättningarna för att designa ett sådant system varierar, dels beroende på silons diameter, dels om det är en befintlig silo som skall kompletteras med ett gasdistributionssystem eller det är en silo under projektering /byggnation där större valmöjligheter erbjuds. För små silodiametrar kan det sannolikt vara tillräckligt med en enda inmatningspunkt medan större silor kräver flera inmatningspunkter.

Exempel på några tänkbara alternativ framgår av Figur 1 men information saknas alltså när de olika alternativen behöver tillämpas, maximalt avstånd mellan inmatningspunkterna, etc. Förutom silodiametern finns det också många andra faktorer som kan påverka behovet, bl a silons höjd, fyllnadshöjd, lagrat material (porositet, permeabilitet, etc.), typ av gas och dess temperatur (kvävgas eller koldioxid, samt dess temperatur/densitet), bulkmaterialens temperatur (temperaturfördelning) och silons täthet samt eventuella otätheternas belägenhet.



Figur 1 Planvy av silobotten som visar principiella gasinmatningsarrangemang i en silo, 1) centruminlopp, 2) inmatning längs silons mantel 3) flera symmetriskt distribuerade inlopp, 4) diametralt distribuerade inlopp 5) utbrett inlopp

Att genomföra praktiska försök för att mäta gasfördelningen inne i silor av olika storlek, olika gasinmatningsarrangemang, etc. skulle vara mycket komplicerat och kostsamt. I detta projekt valdes därför att utnyttja två avancerade beräkningsprogram för att få en indikation på hur gasdistributionen kan se ut inne i en silo och att jämföra dessa beräkningar med några praktiska försök i en verklig silo.

Simuleringarna har genomförts i 3 steg enligt följande:

1. Gasfördelning inne i en silo försedd med endast ett inlopp i silons centrum.
2. Gasfördelning i den silo som användes för de praktiska gasfyllnadsförsöken.
3. Gasfördelningen i en storskalig silo, dels med olika gasinmatningsarrangemang och dels där inverkan av brand (stora temperaturvariationer inne i bulkmaterial) inkluderades i simuleringarna.

Målsättningen vid valet av försöksscenarioer var dels att åstadkomma förhållanden som försöksmässigt kunde ge så stor skillnad i gasfördelning som möjligt, dels att dessa skulle kunna utgöra en bra utgångspunkt ur simuleringssynpunkt. Eftersom den silo som användes i försöken hade en relativt begränsad diameter (6 m) valdes följande två olika scenarier för gasinmatning:

1. inmatning i en punkt silons centrum
2. inmatning i en punkt längs silomanteln.

Det första scenariot innebär helt symmetriska förhållanden medan det andra scenariot medför ett ytterlighetsfall där gasen måste spridas över hela silons diameter för att täcka hela tvärsnittet.

2 Genomförda simuleringar

De beräkningsprogram som använts i detta projekt är COMSOL Multiphysics® respektive SIMTEC (även betecknat FIRCOSIM respektive SMAFS).

COMSOL är ett kommersiellt beräkningsprogram av typen FEM för multifysikmodellering och innehåller flera olika moduler vilka kan användas beroende på vilken typ av beräkningar man avser utföra. Den programmodul som använts i dessa simuleringar är ”Heat Transfer”. I de simuleringar som redovisas i detta kapitel användes programversion 3.4 medan simuleringarna efter försöken är gjorda med version 3.5 som släpptes under hösten 2008.

SIMTEC är ett ”universitetsprogram” av typen CFD och som utvecklats med inriktning mot brandsimuleringar [7]. Ansvarig för programutveckling och beräkningar är Zhenghua Yan vid LTH. Delar av utvecklingen av SIMTEC har skett inom ramen för CECOST [9] och har tidigare använts för att bl a simulera de siloexperiment som genomfördes 2006 [2].

Oavsett beräkningsprogram, så har simuleringarna bara omfattat gasfördelningen i själva pelletsbulken, dvs tomtrycket uppe i silotoppen har ej varit inkluderat i simuleringarna.

2.1 Simulering serie 1 – Simulering av ett enskilt gasinlopp i en stor silo – Förutsättningar

Syftet med dessa simuleringar var att undersöka vilken gasfördelning som kan förväntas från ett enskilt inlopp beroende på gasflöde och inloppshastighet under ”icke brandförhållanden”, dvs både bulkmaterialet och siloväggarna hade en temperatur av 20 °C. För att i möjligaste mån undvika randeffekter av silomanteln, etc. valdes en mycket stor silo för dessa simuleringar, där silodiametern vara 40 m (tvärsnittsytan 1256 m²) och lagringshöjden 30 m. Både silons botten och materialet på toppen antogs vara plana ytor. Totalt definierades 8 beräkningsfall, där inmatningsflödet varierades i fyra steg. För varje inmatningsflöde simulerades dessutom två olika inloppshastigheter, 3 m/s respektive 30 m/s genom att variera antagen inloppsdiameter. De inmatningsflöden som användes var baserade på rekommendationerna från tidigare siloförsök [2] och motsvarade 5 kg/m² tim vid det högsta flödet. I samtliga fall har simuleringarna genomförts med förutsättningarna att silon var fylld med träpellets och att kvävgas användes som inertgas.

Det högsta flödet, 6280 kg/tim, är således dimensionerat för att invertera hela silon från ett inlopp. Vid följande simuleringar har flödet reducerats för att motsvara ett delflöde via flera inlopp, dvs 1256 kg/tim motsvarar flödet uppdelat på fem inlopp, 628 kg/tim motsvarar 10 inlopp och 251 kg/tim motsvarar 25 inlopp. Simuleringarna omfattade dock i samtliga fall, bara ett inlopp i silons centrum för att se hur gasfördelningen ser ut runt ett enskilt inlopp vid olika inmatningshastigheter.

Tabell 1 Förutsättningar för simuleringarna i serie 1. Scenario 1, 5 och 6 genomfördes med både SIMTEC och COMSOL

Scenario nr	Inmatningsflöde (kg/h)	Inmatningsflöde (m ³ /h) *)	Inloppshastighet (m/s)	Inloppsdiameter (mm)
1	6280	5024	3	770
2	6280	5024	30	243
3	1256	1005	3	344
4	1256	1005	30	109
5	628	502	3	243
6	628	502	30	77
7	251	201	3	154
8	251	201	30	49

*) Gastemperaturen hos kvävgasen antagen till 0 °C vilket motsvarar 0,8 m³/kg

2.1.1 Simulering serie 1 – Resultat

Simuleringar genomfördes för samtliga 8 scenarier med programmet COMSOL medan simuleringar av tre scenarier (1, 5, 6) genomfördes med SIMTEC. I båda fallen har beräkningarna varit av typen två-dimensionella, genom att anta axi-symmetri. Detta innebär alltså att gasinloppet i silons centrum är beläget i det nedre vänstra hörnet i presenterade animationer.

Vid simuleringarna antogs helt isotropa förutsättningar inne i silon och använd indata vid simuleringarna summeras i Tabell 2. Som framgår av tabellen skiljer sig viss indata mellan de båda simuleringarna.

Tabell 2 Använd indata vid genomförda simuleringar

	SIMTEC	COMSOL *)
Kompaktdensitet (pellets-torr) (kg/m ³)	1190	1190
Specifik värme (pellets) (J/kgK)	-	1100
Värmeledningsförmåga (pellets) (W/mK)	-	0,4
Specifik värme (bulk) (J/kgK)	1700	-
Värmeledningsförmåga (bulk) (W/mK)	0,17	-
Porositet (bulk)	0,52	0,5
Permeabilitet (bulk) (m ²)	8,0E-08	3,28E-08
Bulk och väggtemperatur (°C)	27 (300 K)	20
Gastemperatur (°C)	0	0

*) Andra indata använda vid simuleringarna av försökssilon efter genomförda försök (se kapitel 6)

Nedan ges en summering av simuleringens resultaten från de båda programmen medan mer detaljerade data och resultat finns redovisade i SP-Arbeitsrapport 2008:02 [10] respektive i en teknisk rapport från LTH [11].

Resultaten nedan presenteras dels i form av ett diagram som visar koncentrationen av kvävgas på olika höjder längs silons centrumlinje och dels i form av bilder som visar koncentrationsfördelningen i silon vid olika tidpunkter.

Det bör noteras att koncentrationsdiagrammen har olika skalor (tidsskala i sekunder i båda fallen) och bilderna visar inte exakt samma tidpunkter. Färgskalan för gaskoncentrationen är dock den samma där rött representerar 100 % kvävgas (0% syrgas) medan blått representerar luft, (ca 21 % syrgas).

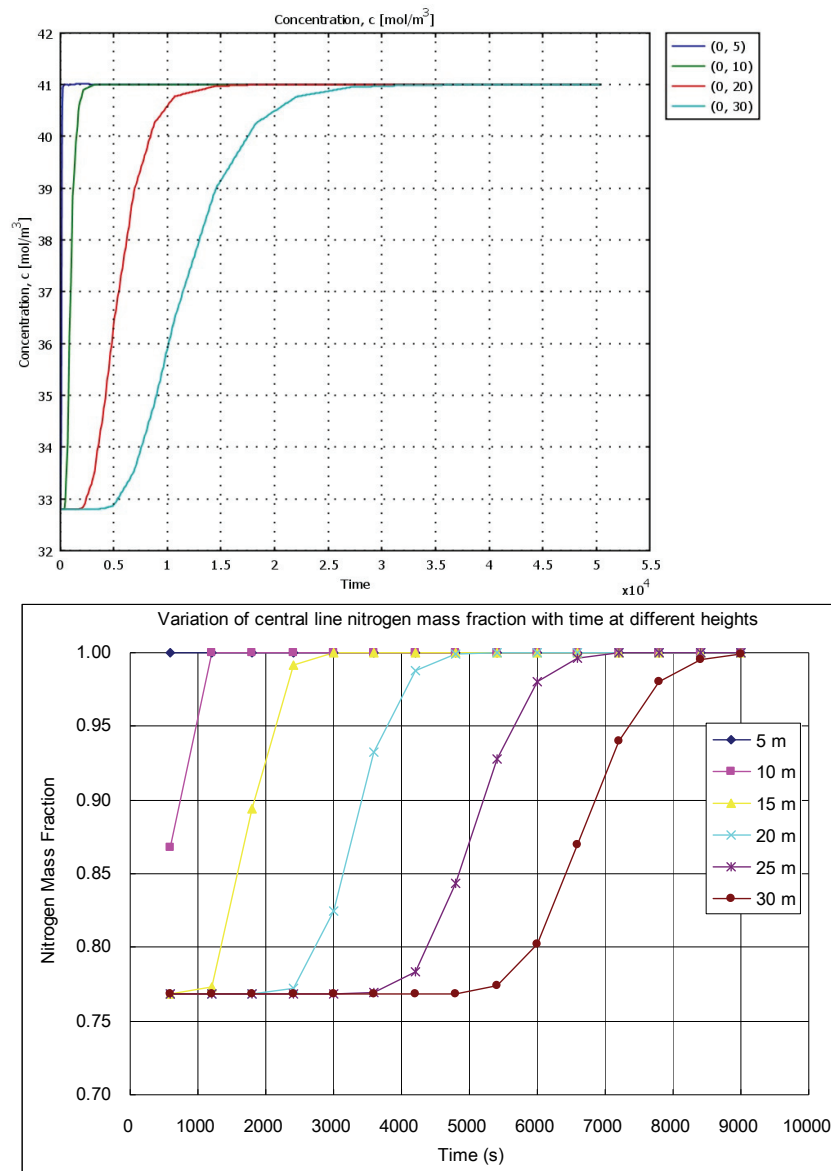
2.1.1.1 Resultat, scenario 1 (6280 kg/tim, 3 m/s, 770 mm)

Simuleringarna visar på förhållanden när ett flöde, dimensionerat för hela silon ($5 \text{ kg/m}^2\text{tim}$), matas in i ett enda inlopp i silons centrum. I Figur 2 redovisas koncentrationen på olika höjder längs silons centrumlinje som funktion av tiden och i Figur 3 visas bilder koncentrationsfördelningen under fyllnadsförloppet.

Om gasfördelningen vore helt perfekt och det inte vore någon omblandning mellan luften i silon och inmatad kvävgas skulle man få ett ”pluggflöde” dvs gasen skulle röra sig sakta uppåt i silon som en kolv. Med en inmatningshastighet av $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$, en gastemperatur på $0 \text{ }^\circ\text{C}$ (specifik volym för kvävgas $0,8 \text{ m}^3/\text{kg}$) och 50% porositet så innebär detta teoretiskt en plugghastighet av 8 m/tim . Att fylla silon upp till 30 m skulle därmed ta ca 3,75 tim.

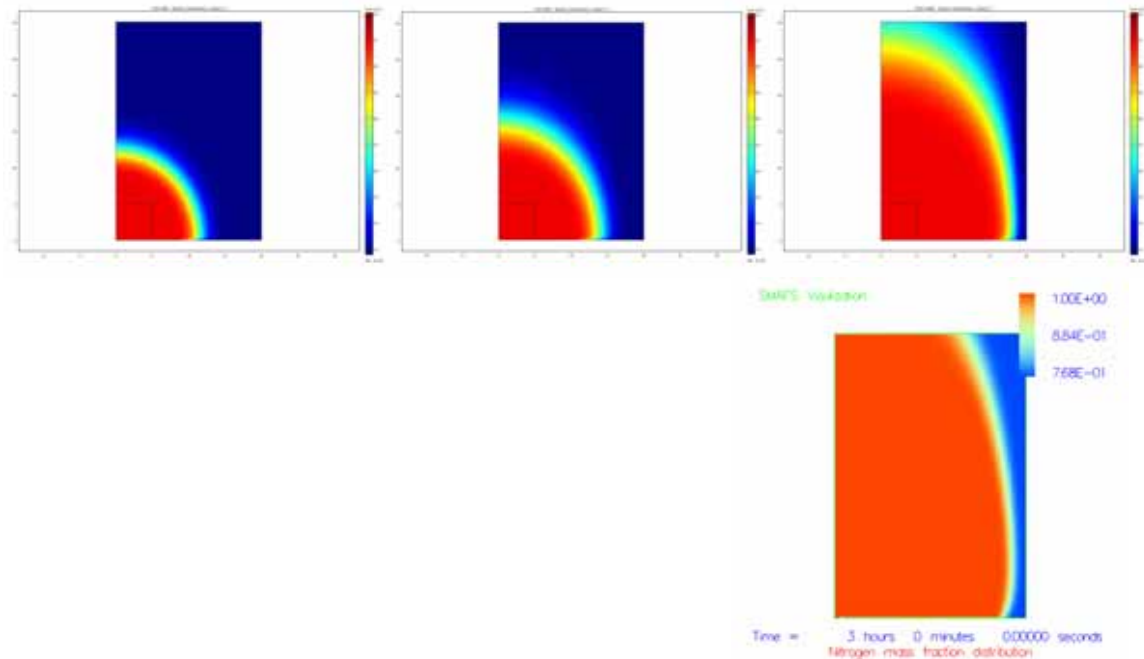
Som framgår av bilderna i Figur 3 sker inte distributionen i form av ett pluggflöde utan gasen fördelar sig i en parabolisk form runt inloppet. Gränsskiktet mellan kvävgasen och luften utökas också med tiden så man får en zon där syrgaskoncentrationen varierar från 0 % syrgas (100 % kvävgas) upp till ca 21 % syrgas, dvs syrgasinnehållet i ren luft.

Jämförs resultaten kan man både se likheter men också tydliga skillnader mellan de båda simuleringarna. I båda fallen kan man se att gasfronten breder ut sig som en våg uppåt längs silons centrumlinje och en första antydning till att denna når silotoppen, dvs att kvävghalten börjar öka, erhålls vid ca 5000 sek, dvs ca 1,4 timmar (se Figur 2). Därefter skiljer sig dock resultaten och enligt COMSOL så sker ökning av kvävgaskoncentrationen mycket långsammare än vad SIMTEC predikterar. Full inertering i toppen uppnås först efter ca 25000 sekunder, dvs knappt 7 timmar enligt COMSOL medan motsvarande tid enligt SIMTEC endast är ca 8500 sekunder, dvs ca 2,4 timmar. Skillnaden tycks dels bero på att COMSOL predikterar en mer parabolisk spridning, dvs gasen sprids ungefär likvärdigt i sidled som uppåt samtidigt som gränsskiktet mellan luft och full inertering (0% syrgas) är betydligt större. Enligt SIMTEC rör sig gasen mer koncentrerat uppåt längs silons centrumlinje och gränsskiktet mellan luft och full inertering är betydligt smalare. I båda fallen kommer dock kvävgas att strömma ut i silotoppen under en lång tid innan kvävgasen lyckats sprida sig ända ut till siloväggen. En tänkbar orsak till noterade skillnader kan vara de skillnader i indata som föreligger, där framförallt permeabiliteten (gasgenomsläpligheten) är mycket högre i SIMTEC-simuleringarna jämfört med COMSOL. Vidare kan eventuellt den något högre bulktemperaturen ha en viss inverkan.



Figur 2

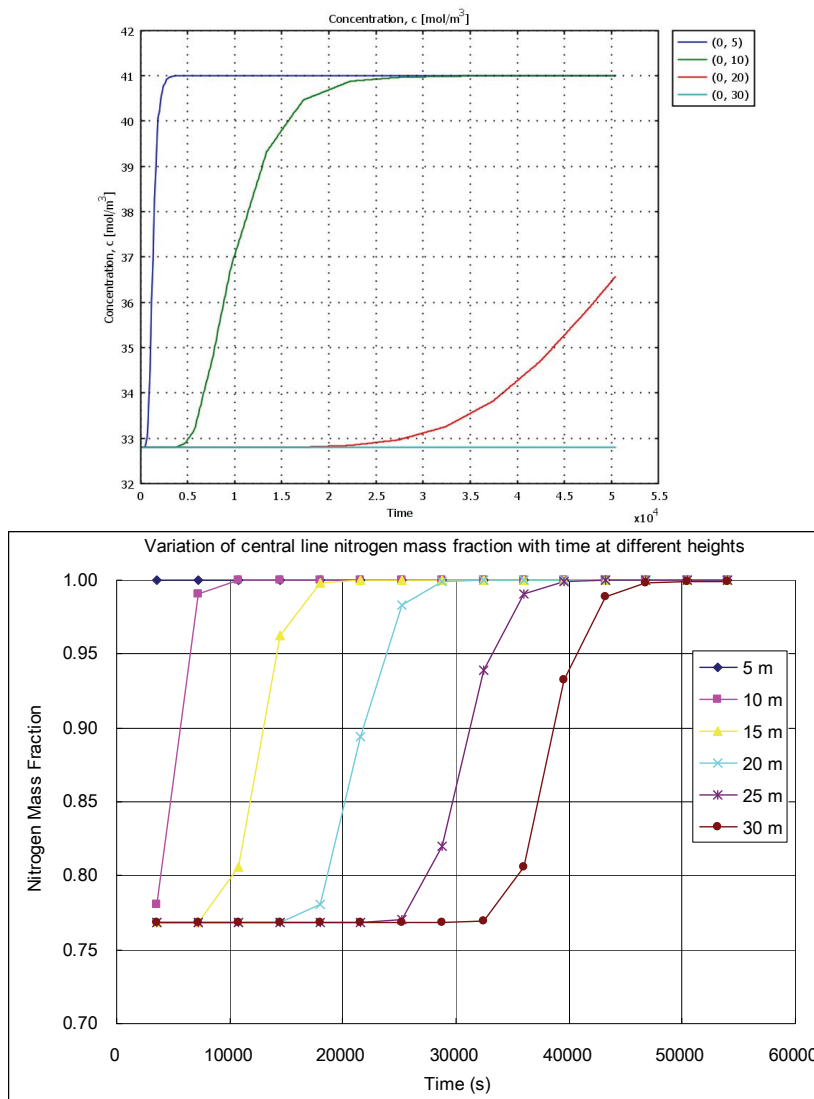
Diagram som visar kvävgaskoncentration (mol/m^3 respektive mass fraction) på olika höjd längs silons centrumlinje (rakt ovanför gasinloppet) som funktion av tiden (OBS olika tidsskala). I COMSOL-simuleringen (övre diagrammet) tar det ca 7 timmar (ca 25000 sek) för kvävgasen att nå ytan medan det endast tar ca 2,4 timmar (ca 8500 sek) i SIMTEC-simuleringen (nedre diagrammet).



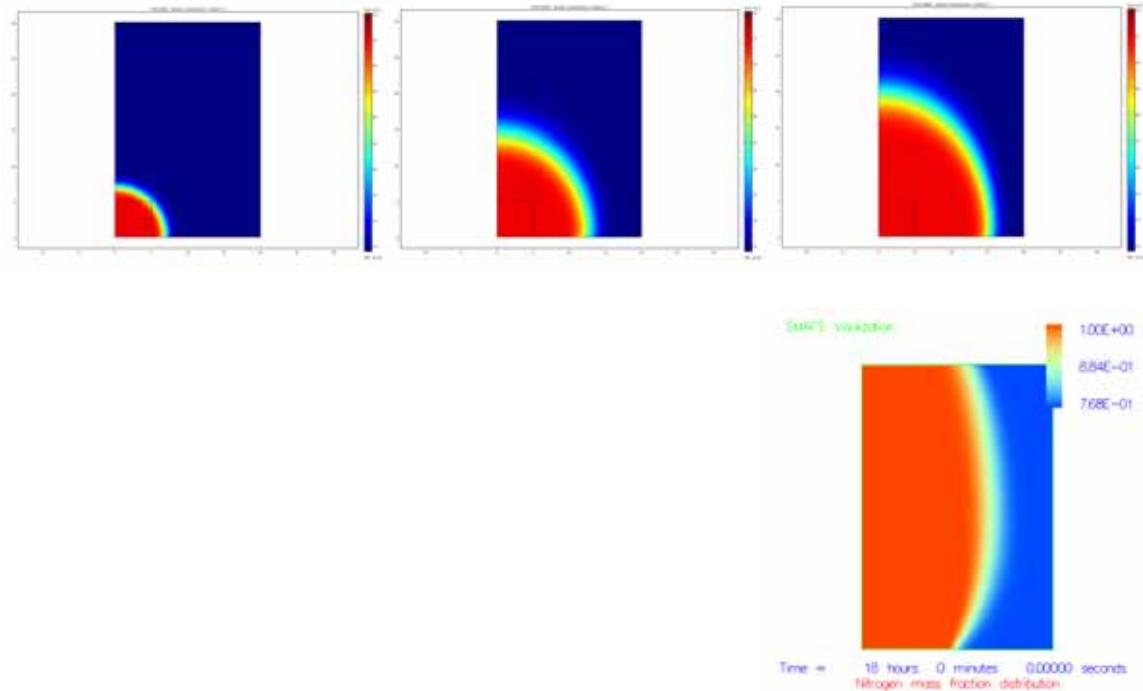
Figur 3 Bilder av inerteringssekvensen efter 30 minuter, 1 timma, resp 3 timmars gasfyllnad med COMSOL (överst) resp 3 timmar med SIMTEC (nederst). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

2.1.1.2 Resultat scenario 5 (628 kg/tim, 3 m/s, 243 mm)

I detta fall visar simuleringarna på förhållandena runt ett gasinlopp lokaliserat i silons centrum när ett delflöde, motsvarande 1/10 av dimensionerande totalflöde matas in. I Figur 4 redovisas koncentrationen på olika höjder längs silons centrumlinje som funktion av tiden och i Figur 5 visas bilder av fyllnadsförloppet. På grund av det lägre gasflödet i detta enskilda inlopp går fyllnadssekvensen naturligtvis betydligt långsammare och här är skillnaden ännu mer markant mellan de båda modellerna. COMSOL indikerar som tidigare en mer parabolisk gasfördelning och en betydligt mer utdragen gasfront medan gasutbredningen enligt SIMTEC endast når ut till silons ca halva radie. Jämförs gasfrontens läge på 20 m höjd när den dit efter ca 15000 sekunder (ca 4,2 tim) enligt SIMTEC medan det tar ca 22000 sekunder (ca 6 tim) enligt COMSOL. Enligt SIMTEC når gasfronten siloytan efter ca 33000 sekunder (ca 9 tim) och full inertering uppnår efter ca 45000 sekunder (ca 12,5 tim). Motsvarande uppgifter saknas för COMSOL då simuleringarna avbröts efter 50000 sekunder (knappt 14 tim). Enligt SIMTEC-simuleringen indikerar detta alltså på att det inte är möjligt att intertera hela silon med detta lägre flöde och endast ett inlopp, även om kvävgasinmatningen skulle pågå under en mycket lång tid.



Figur 4 Diagram som visar kvävgaskoncentration (mol/m^3 respektive mass fraction) på olika höjd längs silons centrumlinje (rakt ovanför gasinloppet) som funktion av tiden. (COMSOL-resultat överst och SIMTEC-resultat nederst (OBS olika tidsskala)).



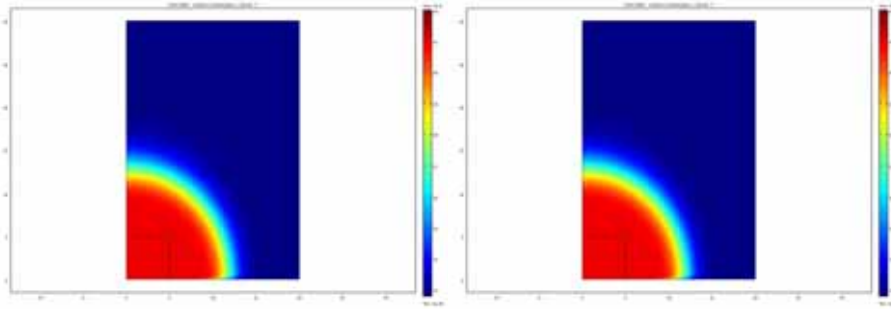
Figur 5 Bilder av inerteringssekvensen efter 1, 7 respektive 14 timmars gasfyllnad med COMSOL (överst) resp efter 18 timmar med SIMTEC (nederst). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

2.1.1.3 Summering av samtliga simuleringar samt inverkan av inloppshastighet

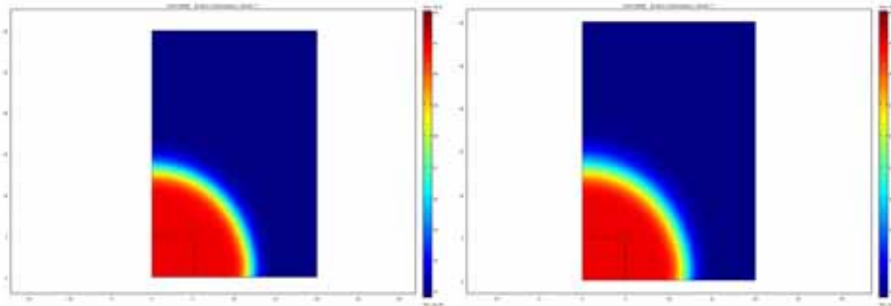
Nedan redovisas några exempel på resultat där effekten av olika hastigheter i själva inloppsöppningen studerats med programmet COMSOL. Totalt har alltså fyra grundscenarier simulerats (se Tabell 1), där hastigheten i inloppsöppningen sedan varierats för respektive grundscenario, dvs totalt åtta simuleringar.

I Figur 6 redovisas gasfyllnadsförloppet för två av dessa grundscenarier, med det högsta resp lägsta gasflödet, och där bilderna visar simuleringsresultatet med inloppshastigheten 3 m/s resp 30 m/s. Tidpunkterna för de redovisade resultaten är valda så att den inmatade gasmängden är lika i samtliga fall. Det innebär således att redovisad tidpunkt för scenario 1 och 2 är 0,56 tim medan den för scenario 7 och 8, där totalflödet bara är 1/25 har förlängts i motsvarande grad, och alltså visar förhållandena vid 14 tim ($0,56 \times 25$).

Som framgår av redovisade bilder visar inte simuleringsresultaten på någon inverkan av hastigheten i själva inloppet utan visar på en parabolisk fördelning av gasen runt inloppet oavsett hastigheten i själva inloppsöppningen.



Scenario 1-2 6280 kg/tim, ca 0,56 tim (2000 sek)



Scenario 7-8 251 kg/tim (delflöde motsvarande 1/25), 14 tim (50400 sek)

Figur 6 Bilder av gasfördelningen vid två olika gasflöden och där respektive gasflöde simulerats med en inloppshastighet på 3 m/s resp 30 m/s med COMSOL. (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

Jämförande simuleringar av olika inloppshastigheter har även gjorts med SIMTEC där scenario 5 respektive 6 jämfördes (628 kg/tim, 3 respektive 30 m/s i inloppshastighet). Även här indikerar beräkningarna att gasfördelningen påverkas mycket marginellt av inloppshastigheten.

2.2 Simulering serie 2 – Förhandssimuleringar av försökssilon i Ulricehamn – Förutsättningar

Syftet med dessa simuleringar var primärt att få en uppfattning av förväntad gasfördelning i försökssilon för att på så sätt kunna optimera försöksupplägg, mätpunkternas placering, etc.

Målsättningen var att simulera fyllnadsförloppet med de förutsättningar och antaganden som fanns under planeringsfasen, dvs gasinmatning i silons centrum respektive på en punkt längs silons mantel. Inmatningshastigheten valdes till $1 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$ respektive $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$. Baserat på en silodiameter av 6,5 m motsvarade detta alltså ett totalt gasflöde på ca 33 kg/tim respektive 166 kg/tim . Antagandena var i övrigt lika tidigare simuleringar (se Tabell 2). Önskad hastighet i inloppsöppningen sattes till 5 m/s vid det låga flödet och 25 m/s vid det höga flödet vilket motsvarade en inloppsöppning på 43 mm. Inloppet i silons botten var i nivå med silons botten (plan botten) och sidoinloppet antogs vara beläget 0,5 m ovanför silobotten. Silon fyllnadshöjd antogs till 9 m.

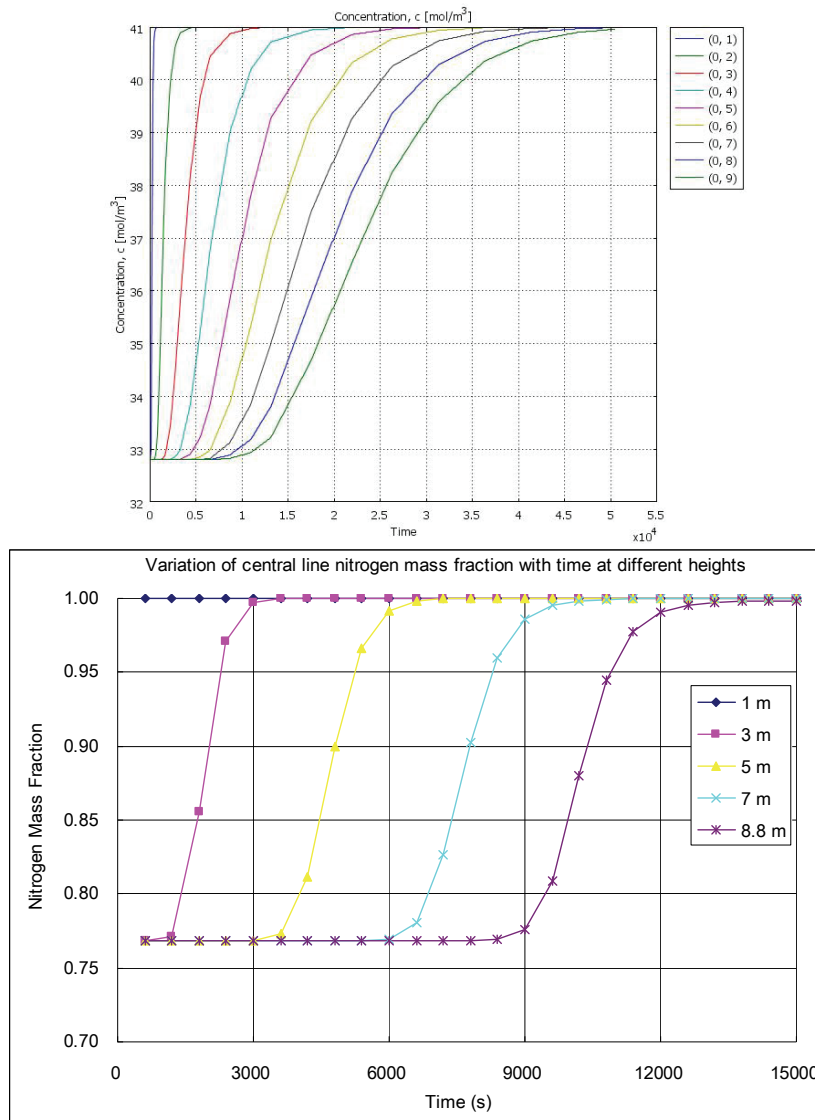
Primärt genomfördes simuleringar med gasinloppet i silons centrum då dessa simuleringar kunde göras med axi-symmetri vilket reducerade beräkningstiden avsevärt. Simuleringen av gasinloppet i silons sida är dock betydligt mer avancerad och kräver en 3-dimensionell modell vilket både kräver mer förberedande arbete och längre beräkningstid. Dessa 3D-simuleringar genomfördes enbart med SIMTEC.

2.2.1 Försöksscenario 1 – gasinlopp i centrum, lågt flöde

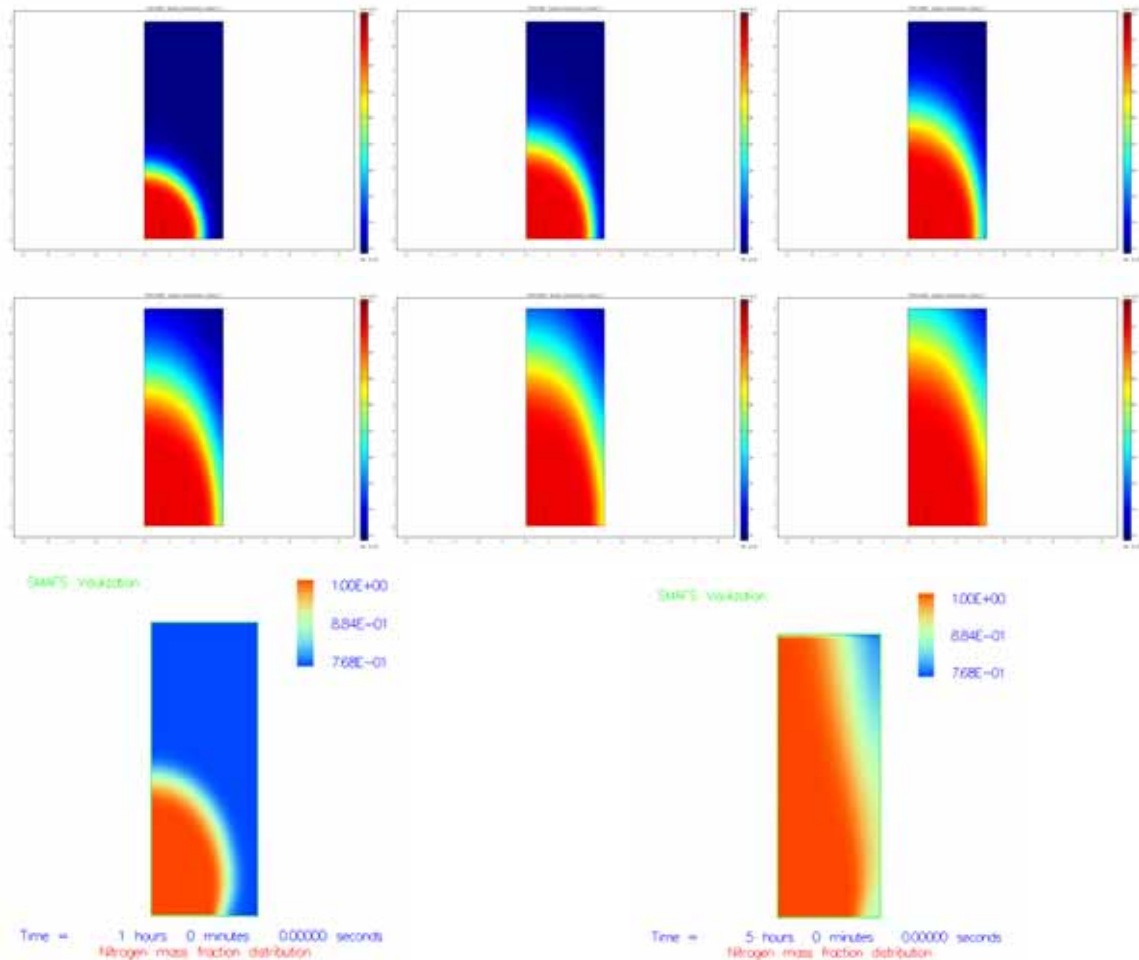
Simuleringarna indikerar förhållandena i försökssilon när ett lågt flöde, 33 kg/tim ($1 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$), matas in vid silobotten i silons centrum. I Figur 7 redovisas koncentrationen på olika höjder längs silons centrumlinje som funktion av tiden och i Figur 8 visas bilder av fyllnadsförloppet.

Liksom i tidigare simuleringar kan man notera en markant skillnad i simuleringsresultaten där COMSOL-simuleringarna ger en mer parabolisk fördelning runt inloppet under hela fyllnadsförloppet medan SIMTEC-simuleringarna indikerar att gasen inte sprids lika mycket i sidled utan sprids snabbare vertikalt i silons centrum.

I båda simuleringarna når gasfronten 9-m nivån vid ca 9000 sekunder (2,5 tim). Liksom i tidigare simuleringar med COMSOL är gasfronten utbredd och silotoppen är helt inerterad efter ca 43000 sekunder (ca 12 tim). Motsvarande tid för SIMTEC är ca 12000 sekunder (ca 3,3 tim).



Figur 7 Diagram som visar kvävgaskoncentration (mol/m³ respektive mass fraction) på olika höjd längs silons centrumlinje (rakt ovanför gasinloppet) som funktion av tiden. (COMSOL-resultat överst, SIMTEC-resultat nederst. OBS diagrammen har olika tidsskala, tidsenhet är dock sekunder i båda.)



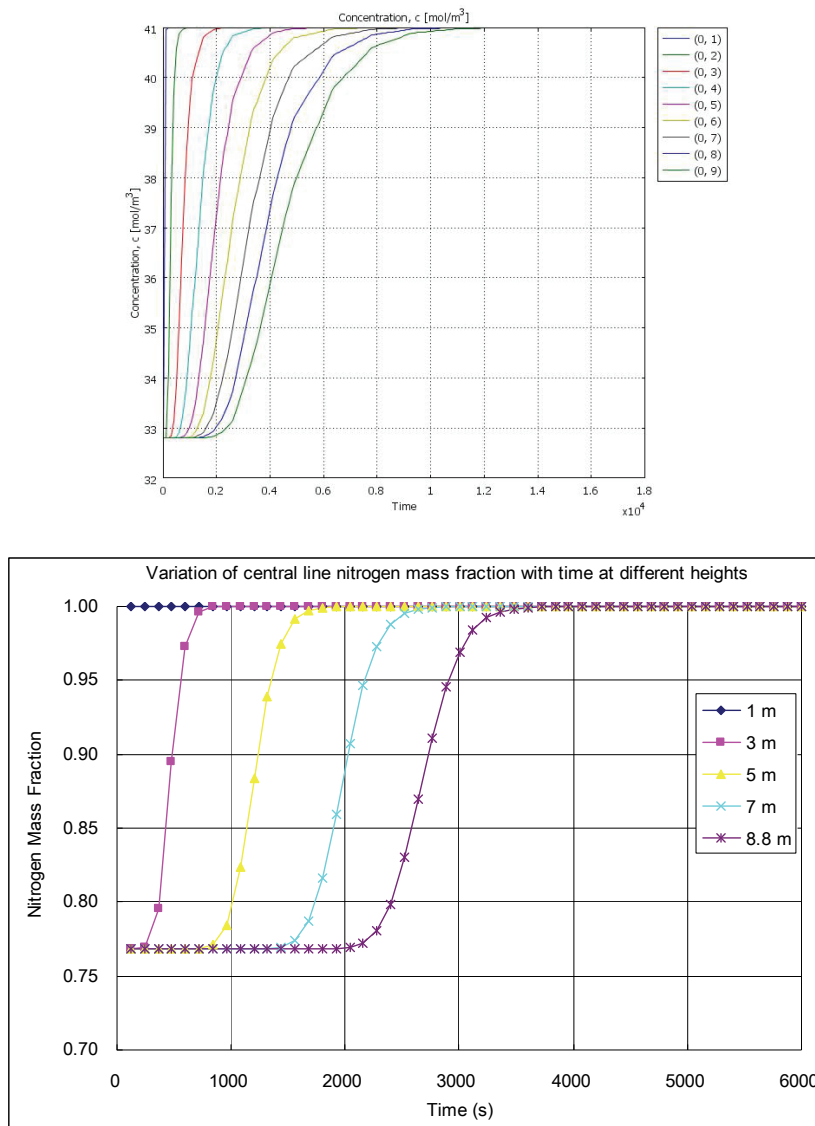
Figur 8 Bilder av inerteringssekvensen där de två översta bildraderna visar resultaten med COMSOL (1, 2, 3, 4, 5 resp 6 tim) och den understa med SIMTEC (1 resp 5 tim) . (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

2.2.2 Försöksscenario 2 – gasinlopp i centrum, högt flöde

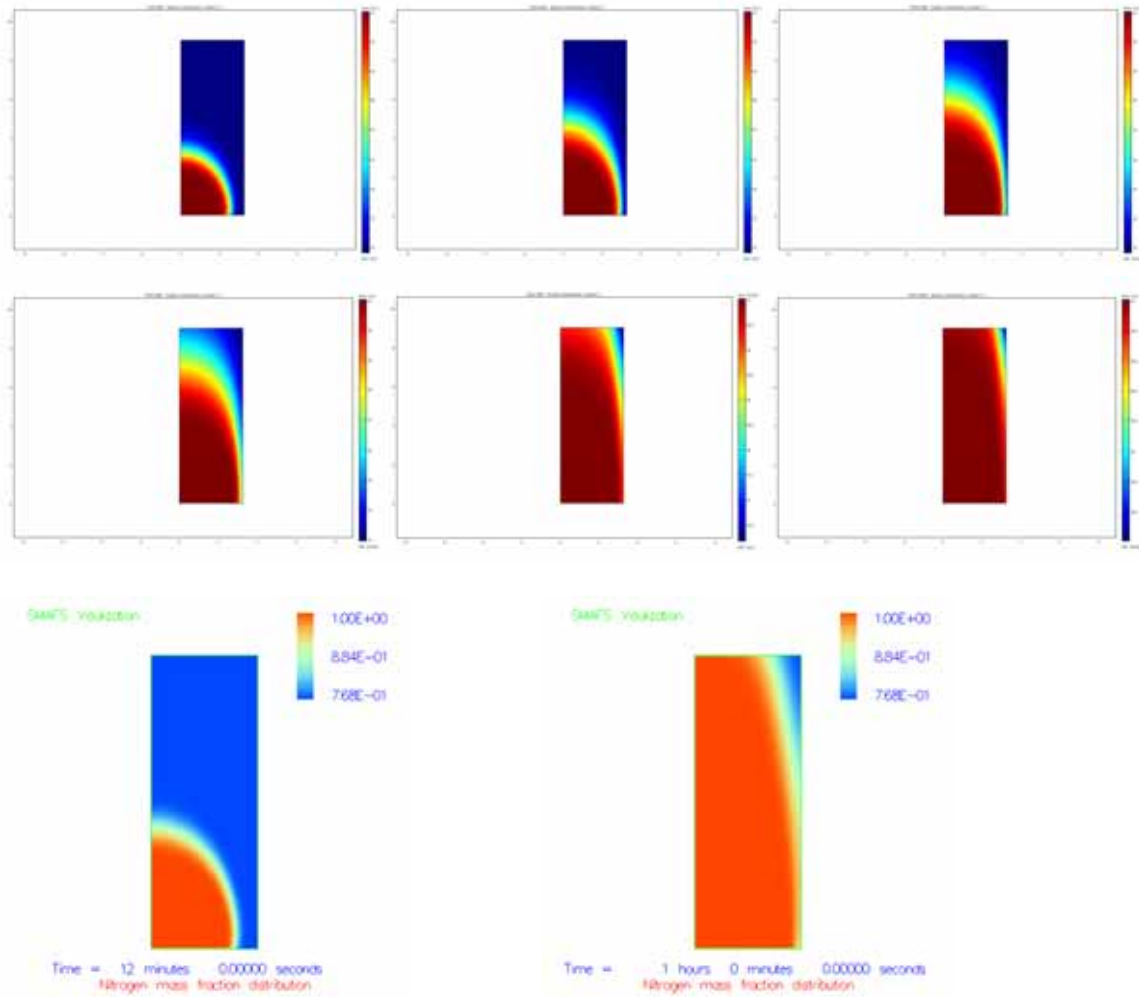
Simuleringarna indikerar förhållandena i försökssilon när ett normalt flöde, 166 kg/tim ($5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$) matas in vid silobotten i silons centrum. Liksom för tidigare simuleringar redovisas i Figur 9 koncentrationen på olika höjder längs silons centrumlinje som funktion av tiden och i Figur 10 visas bilder av fyllnadsförloppet.

Gasfördelningen är i stora drag överensstämmande med de den lägre inmatnings-hastigheten men fyllnaden går naturligtvis betydligt snabbare. Enligt båda beräknings-programmen når gasfronten 9 m-nivån efter ca 2200 sekunder (ca 0,6 tim) och enligt COMSOL uppnås i princip full inertering uppnått efter ca 9000 sekunder (2,5 tim) medan motsvarande tid för SIMTEC är ca 3300 sekunder (ca 0,9 tim).

Som framgår av bilderna i Figur 10 indikerar SIMTEC-resultaten att fyllningen ut mot silons väggar kan ta förhållandevis lång tid.



Figur 9 Diagram som visar kvävgaskoncentration (mol/m^3 respektive mass fraction) på olika höjd längs silons centrumlinje (rakt ovanför gasinloppet) som funktion av tiden. (COMSOL-resultat överst, SIMTEC-resultat nederst. OBS diagrammen har olika tidsskala)



Figur 10 Bilder av inerteringssekvensen där de två översta bildraderna visar resultaten med COMSOL (15, 30 resp 45 min, 1, 2, 3 tim) och den understa med SIMTEC (12 min, 1 tim). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

Sammantaget indikerar alltså simuleringarna att gasen till en början kommer att spridas relativt sfäriskt runt gasinloppet. Trots den relativt begränsade diametern, kommer sedan gasen att spridas företrädesvis uppåt i silon medan det kommer att ta betydligt längre tid att inertera utrymmet närmast siloväggen. Detta beteende är mer påtagligt i SIMTEC-simuleringarna än vad COMSOL predikterar. Det är också en påtaglig skillnad mellan resultaten avseende gasfrontens utsträckning i vertikal riktning. I SIMTEC är denna sammanhållen och tiden relativt kort från det att kvävgasen når t ex silotoppen tills dess full inertering uppnås medan resultaten enligt COMSOL indikerar att gasfronten kan vara relativt utbredd och att det kan ta en avsevärd tid att nå full inertering.

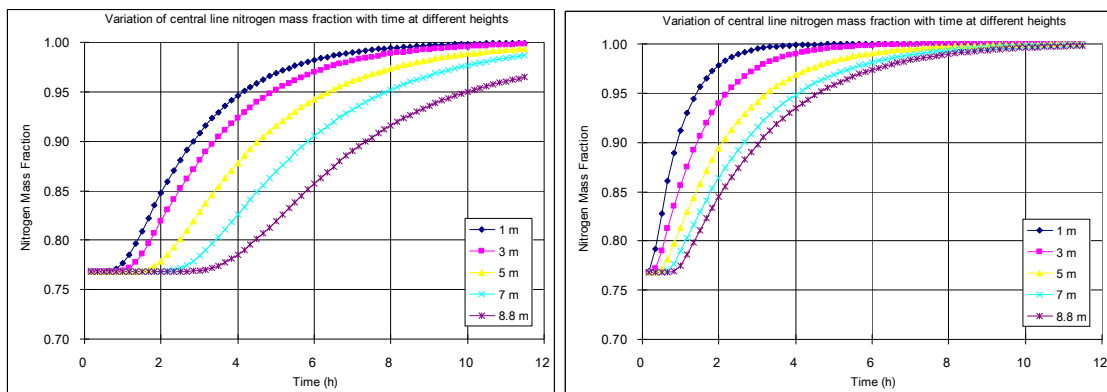
Med dessa preliminära resultat som grund beslöts att lägga den primära instrumenteringen i silons centrum för att kunna följa gasfrontens utbredning uppåt i silon. För att även få en bild av gasdistributionen i sidled beslöts att förlägga ett antal mätpunkter på 1 m avstånd från silomanteln. För att få ytterligare information kring gasfördelningen närmast siloväggen introducerades ytterligare två mätpositioner, 0,5 m respektive 0,05 m från

siloväggen. Dessa två mätpositioner placerades dels på höjden 1 m respektive 6 m ovanför silobotten (se vidare kapitel 3.1.1).

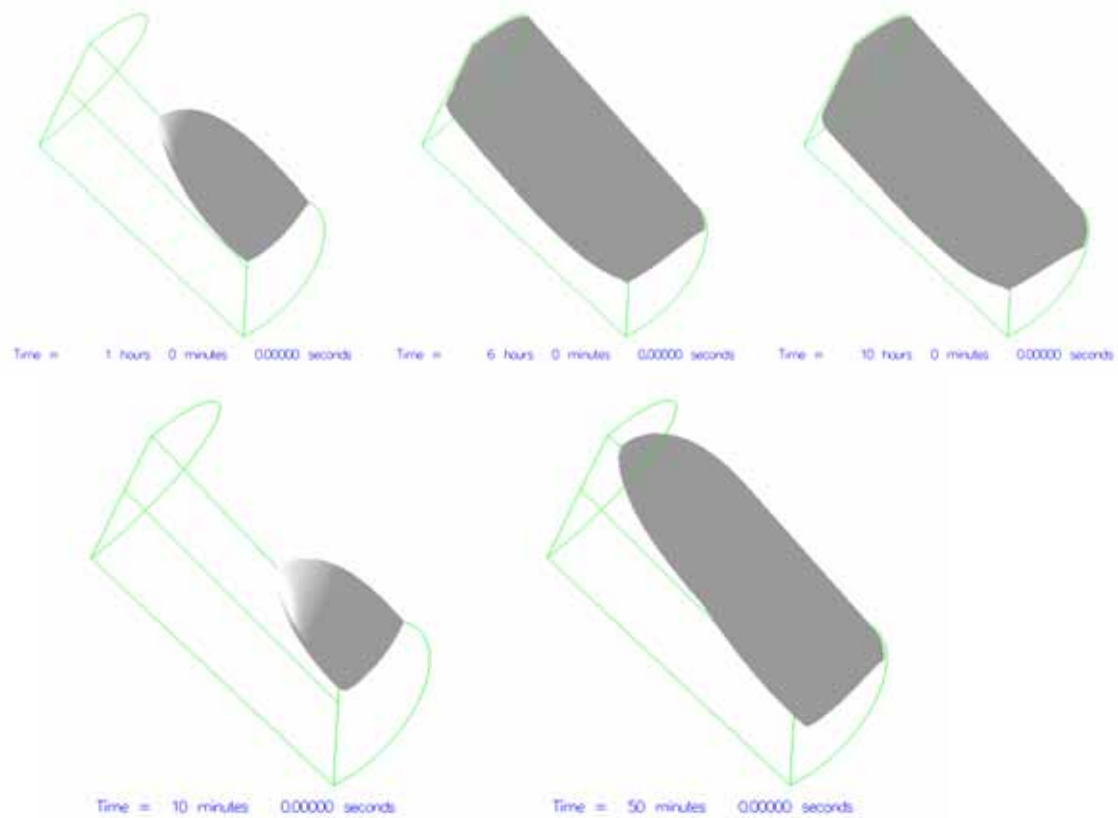
2.2.3 Gasinlopp vid siloväggen

Eftersom axi-symmetri inte råder vid en gasinmatning längs siloväggen var simuleringarna tvungna att genomföras i 3D genom att halva silon simulerades. Dessa simuleringar genomfördes endast med programmet SIMTEC och eftersom beräkningarna var mer omfattande fanns inte dessa resultat tillgängliga när försöken planerades.

Nedan summeras resultaten från simuleringarna, vilka även här genomfördes med lågt (33 kg/tim) respektive högt (166 kg/tim) gasflöde. I Figur 11 visas kvävgaskoncentrationen längs silons centrumlinje vid det låga respektive höga flödet. Som framgår av diagrammen erhålls en tydlig fördröjning innan gasen når silons centrum och därefter stiger kvävgaskoncentrationen betydligt långsammare än vid inmatning i centrum, speciellt vid det låga gasflödet. Detta åskådliggörs också av bilderna i Figur 12 där isokurvor visas för kvävgaskoncentrationen vid olika tidpunkter. För det lägre flödet visas utbredningen som representerar 50% kvävgasfyllning medan för det högre flödet visas utbredningen motsvarande 99% kvävgasfyllning. Bilderna visar tydligt hur gasen snabbt sprider sig upp längs siloväggen ovanför inloppet medan spridningen radiellt går betydligt långsammare. (se även kapitel 6.1.2)



Figur 11 Diagram som visar kvävgaskoncentration (mass fraction) på olika höjd längs silons centrumlinje som funktion av tiden när gasen matas in vid siloväggen. Vänstra diagrammet visar resultaten vid gasflödet 33 kg/tim, det högra vid flödet 166 kg/tim.



Figur 12 Gasfördelningen inne i silon vid gasinmatning från sidan åskådliggjort genom iso-kurvor av kvävgaskoncentrationen vid olika tidpunkter. De övre bilderna visar iso-kurvan för 50% kvävgasfyllning vid gasflödet 33 kg/tim (1, 6 resp 10 tim), de nedre bilderna iso-kurvan för 99% vid flödet 166 kg/tim (10 resp 50 min).

3 Verifierande gasfyllnadsförsök

Försöken genomfördes vid Lantmännen Agroenergi ABs pelletsfabrik i Ulricehamn där en 300 m³ silo ställdes till förfogande. Silon instrumenterades och fylldes med träpellets varefter totalt fem gasfyllnadsförsök genomfördes under loppet av 2 veckor. I följande kapitel ges en mer detaljerad beskrivning av försöksarrangemang, instrumentering och gasutrustning.

3.1 Försökssilo – uppställning och fyllning

Försöken genomfördes i en stålsilo med en diameter av 6 m och en höjd av 10,5 m försedd med en plan botten, se Figur 13. Silon var placerad på ett stålstativ vilket innebar att silobotten var placerad ca 2,5 m ovanför markplan. På grund av ett tidigare utmatningssystem var silomanteln utvidgad 200 mm från silobotten och upp till ca 0,7 m höjd, vilket inom detta område alltså medförde en diameter på 6,4 m. Silobotten var försedd med en centriskt placerad utmatningsöppning med diametern 1 m. Under denna öppning hade en konisk ficka monterats vilket avslutades med ett skjutspjäll. Silomanteln var försedd med två luckor för tillträde, en strax ovanför silobotten och en ca 1,5 m ovanför silobotten. Silotoppen var försedd med totalt sex luckor för tillträde/ventilation. I centrum av silotoppen fanns dessutom en mindre uppbyggnad för tidigare påfyllnadssystem via en elevator. Detta innebar en total bruttovolym på 300 m³.



Figur 13 Försökssilon var 6 m i diameter (6,4 m närmast silobotten) , 10,5 m hög och placerad på ett stålstativ ca 2,5 m ovan mark.

Efter det att silon instrumenterats (se kap 3.1.1) och innan fyllning inleddes tätades alla öppningar så att silon kunde betraktas som helt tät förutom inmatningsöppning och utloppsöppning. Luckorna på silomanteln skruvades fast och tätades med fogmassa, utmatningsspjället tejpades invändigt, toppluckorna på silon tätades genom att klämma en 15 mm PUR isoleringsmatta mellan sargen och luckan. För att tryckavlasta silon under gasinmatningen monterades ett 110 mm utloppsrör centriskt på toppen av silon.

För att i något försök kunna studera inverkan av ett läckage i silomanteln arrangerades en 0,2 x 0,3 m öppning i nedre kanten av silomanteln. På insidan av silomanteln täcktes öppningen med en perforerad plåt (hål 5 mm, delning 7,5 mm, hålarea 40%) för att förhindra att pelletsen strömmade ut. I de försök öppningen ej användes, täcktes denna av en utvändigt monterad stålplåt tätad med fogmassa.

Fyllningen av silon genomfördes med hjälp av en bulkbil som blåste in träpelletsen i silotoppen via ett rörsystem. Pelletsen var av ordinär kvalitet och togs från den ordinarie utlastningssilon som har en volym på ca 75 m³. Pelletsen till denna utlastningssilo tas från en av de två stora lagringssilorna som har en volym på vardera ca 13000 m³. Dessa töms via en bottenutmatning och pelletsen transporteras med bandtransportör och elevator, via en fallsikt, till en mellanlagringssilo på ca 1200m³. Under vintertid fylls denna mellanlagringssilo nattetid, men under sommarhalvåret när försäljningen är mindre fylls den normalt bara varje helg. Även från denna silo tas pelletsen ut i botten och transporteras sedan till utlastningssilon via bandtransportörer och elevatorer och på vägen siktas pelletsen, både med en fallsikt och en mekanisk skaksikt. Från utlastningssilon fylldes pelletsen direkt ner i bulkbilen genom ett störtschakt. Bulkbilen förflyttades därefter till försökssilon där pelletsen blåstes upp till silotoppen. För att inte pelletsen skulle träffa instrumenteringen placerad längs silons centrumlinje, och därigenom också skada pelletsen, var inblåsningöppningen förskjutet ca 0,2 m åt sidan från silons centrumlinje. Innan silon stängdes och fyllningen inleddes, fylldes den koniska fickan i silobotten manuellt med drygt 0,5 m³ pellets från säckar så att hela gasinloppet täcktes med pellets. Detta för att inte orsaka en onormalt hög andel finfraktion när den första pelletsen träffade silobotten, och därigenom riskera igensättning av gasinloppet i silons centrum. Under fyllningen togs några prov av pellets inne i silon för efterföljande analys, se vidare kapitel 5.

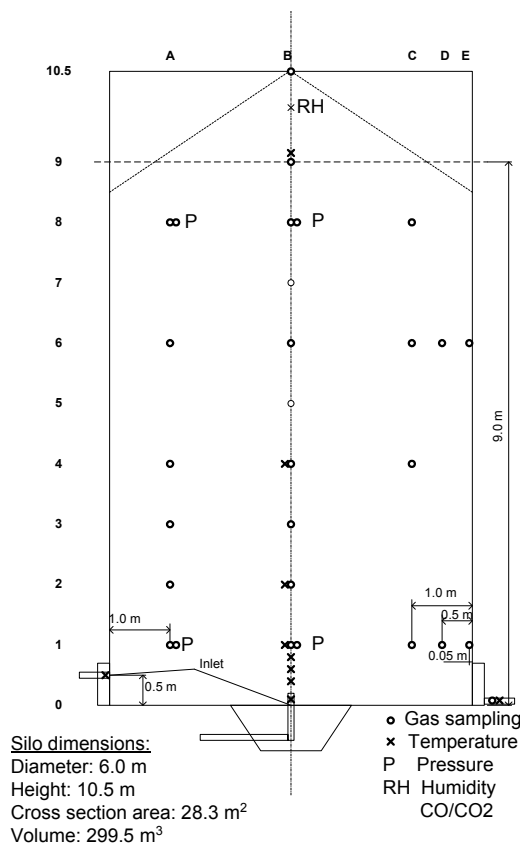
Totalt fylldes silon med ca 171 ton pellets. För att få väldefinierade förhållanden planades pelletsytan ut manuellt efter avslutad fyllning vilket resulterade i ett pelletsdjup på ca 9,2 m. Detta innebär en bulkvolym på ca 263 m³ vilket ger en genomsnittlig bulkdensitet på ca 650 kg/m³.

3.1.1 Instrumentering och mätningar

Det primära syftet med försöken var att följa utbredningen av kvävgas inne i silon under fyllnadsförloppet. Eftersom kvävgas användes kunde detta ske genom att mäta syrgashalten i olika positioner inne i silon. I normalfallet innehåller luften ca 21% O₂ och vid en fullständig inertering är syrgashalten 0 %.

För att få en bild av fördelningen instrumenterades silon utefter dess diameter med mätpositioner längs i huvudsak tre vertikala linjer enligt Figur 14. För att erhålla en entydig definition av samtliga mätpositioner betecknades de vertikala linjerna med A-E och varje horisontell linje med dess nivå, dvs höjd över silobotten (0-10,5). De vertikala huvudlinjerna var placerade i centrum (B) respektive 1 m från mantelytan (A resp C). Utanför linje C placerades också några mätpositioner 0,5 m respektive 0,05 m från silomanteln (D respektive E).

Som grund för denna placeringen av mätpositionerna användes resultaten av de preliminära simuleringar som gjordes under planeringen av försöken (se kapitel 2.2). Huvuddelen av försöken var planerade att genomföras med centrisk gasinmatning, och här kunde en symmetrisk gasfördelning förväntas. För att kunna följa spridningsförloppet vid inmatning från sidan placerades gasinloppet i linje med instrumenteringen för att på detta sätt kunna följa gasfördelningen till silons motstående sida, dvs en horisontell distribution på sex nivåer (1, 4, 6 och 8 m), från gasinloppet via A till E. Den läckageöppning som arrangerades placerades diametralt ifrån sidoinloppet och låg därmed också i linje med instrumenteringen. Anledningen till mätpositioner längs linje D och E var att simuleringarna med de två programmen visade på en skillnad i hur snabbt gasen spreds sig radiellt och därmed hur snabbt hela siloutrymmet ända ut till silomantel kunde inverteras. Med några mätpositioner extra nära siloväggen var målsättningen att detta skulle kunna studeras.



Figur 14 Skiss av silo med instrumentering och tillhörande positionsbeteckningar.

För att kunna mäta syrgashalten drogs ”samplingsslangar” i plast (Ø 4 mm inv, PUR) till varje mätposition. För att möjliggöra en instrumentering arrangerades ett system med vertikala respektive horisontella vajrar inne i silon, se Figur 15. Tre vertikala vajrar spändes från botten till toppen längs linje A, B, C och sex horisontella vajrar diametralt över silon på 1, 2, 3, 4, 6 respektive 8 m höjd. Slangarna drogs därefter ut på de horisontella vajrarna till rätt position och i vissa lägen drogs de också vertikal upp längs vajer B (till position 5B, 7B, 9B samt 10.5B). Samtliga slangar drogs ut mot linje E där ett rörsystem av 110 mm avloppsrör monterades mot siloväggen. Vid varje horisontell vajer placerades ett grenrör med 50 mm anslutning och ett täcklock där slangarna drogs in i röret. Rörsystemet vilade direkt mot silobotten och genom en håltagning kunde slangarna dras ut vid silobotten ner till utrymmet under silon. Anslutningen mellan röret och

silobotten tätades så att ingen gas skulle kunna läcka ut denna väg. Totalt förbereddes silon med 25 mätpositioner för gasanalys (se Figur 14). Tyvärr blockerades slangarna till position 5B respektive 7B vid fyllningen av silon vilket gjorde dem obrukbara.



Figur 15 Foto som visar det vadersystem som användes för att positionera samlings-slangarna och termoelement. Dessa leddes igenom en tätningmuff till ett vertikalt samlingsrör och ner till gassamlingsutrustningen belägen under silon.

För att mäta tryckfallet över pelletsbädden i samband med gasinmatningen drogs extra slangar till position 1A, 1B, 8A resp 8B vilka sedan anslöts parvis (1A-8A respektive 1B-8B) till en differensstryckmätare av typ DIGMA Premo (200 resp 2000 Pa). Mätning av tryckfall genomfördes manuellt några gånger under respektive försök.

Temperaturen mättes på ett antal positioner inne i silon. Primärt placerades ett antal termoelement längs linje B, dvs rakt över gasinloppet i silons centrum. Termoelementens positioner var här 0.4B, 0.6B, 0.8B, 1B, 2B, 4B, 9B samt 10.5B. Den täta placeringen strax ovanför gasinloppet var för att studera hur snabbt temperaturen jämnas ut samt de uttorkningstendenser som kan erhållas när torr kvävgas matas in i pelletsen. Temperaturen på den ingående gasen bestämdes genom ett termoelement placerat i respektive gasinlopp. För att få en uppfattning av påverkan av yttre faktorer (utomhustemperatur, solpåverkan) mättes dessutom temperaturen på 4 punkter på insidan av silomanteln. Två av dessa var placerade i linje med nivå 2 m och två var placerade vinkelrätt från denna linje.

Utöver detta mättes utströmningshastigheten av gas i utloppsröret på silotoppen med en BD-prob kopplad till en differensstryckmätare (± 30 Pa). Utströmningshastigheten kontrollerades även manuellt under försöken med hjälp av en vinghjulsanemometer.

Syftet med dessa mätningar var att kunna variera verifiera flödet av inertgas. Flödet av inmatad gas mättes och reglerades vid gasutrustningen, se kapitel 3.1.2.

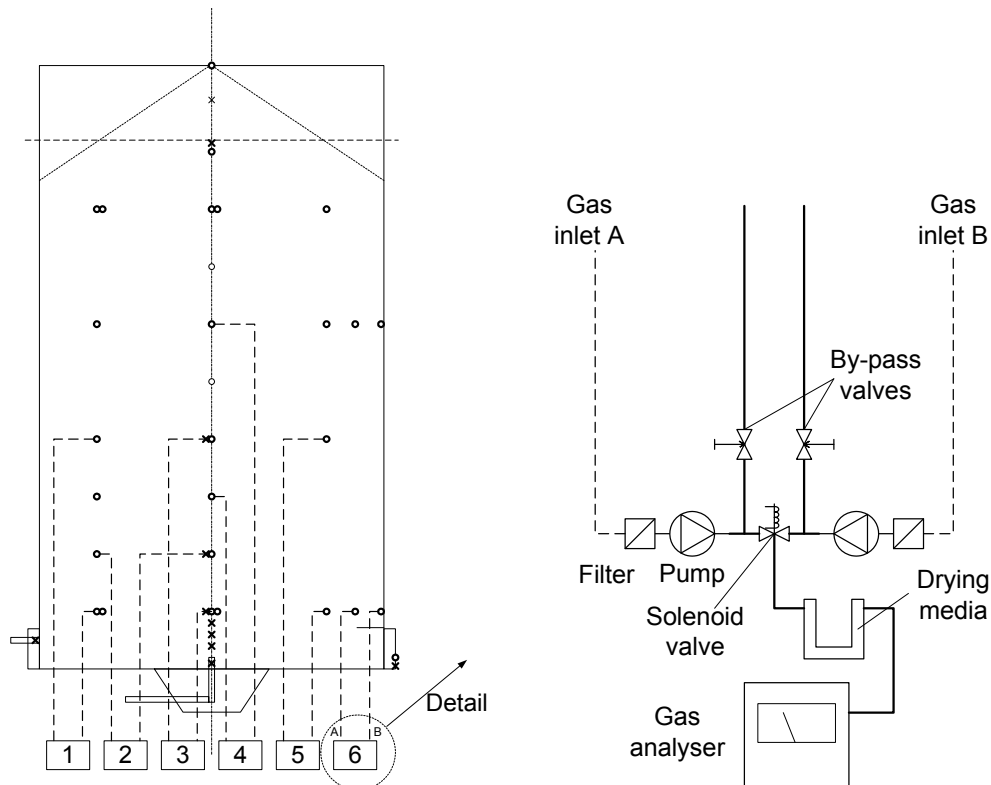
Slutligen fanns en manometer monterad på gasledningen strax före respektive inlopp i silon för att manuellt kunna avläsa det mottryck som erhöles vid gasinloppet (se kapitel 4.8).

I silotoppen mättes också luftfuktighet/temperatur med en fuktighetsgivare. Givaren skadades dock efter försök 1 och värdena därefter är osäkra. Mätningarna i försök 1 och visuella observationer visade dock på en tydlig fukttransport vilket medförde fuktmättnad i silotoppen och kondensbildning på siloväggarna under hela resterande försöksperioden

En komplett lista över samtliga givare/instrument och använda mätkanaler presenteras i Bilaga 1.

Under försöken kunde mätningar ske i princip parallellt i 12 mätpositioner med hjälp av sex syrgasanalyser. Detta innebar alltså att varje analysator användes för att mäta i två olika positioner vilket arrangerades med ett gasväxlingssystem enligt Figur 16. Var och en av de 12 mätgångarna var försedda med ett partikelfilter och en samplingspump som kontinuerligt evakuerade ett gasflöde på ca 2 l/min. Efter samplingspumpen leddes gasen till en två-vägs magnetventil som antingen styrde gasen vidare till en av de sex gasanalyserna eller via en by-pass-ledning ut i det fria. När gasen pumpades vidare till syrgasinstrumenten, belägna inne i en närbelägen mätvagn, torkades gasen med hjälp av torkmedel (Drierite) innan det passerade respektive mätinstrument. Varje mätinstrument var försedd med en rotameter så att ett korrekt gasflöde kunde upprätthållas. Växlingen mellan de två inkopplade positionerna styrdes med ett tidrelä så att varje period (mätning/by-pass) varade i 2 minuter. Vilken ingång som var aktiverad registrerades med hjälp av en styrsignal från tidreläet.

Vilka mätpositioner som var inkopplade till analyserna bestämdes löpande under försökets gång. Generellt sett var mätpositionerna närmast gasinloppet inkopplade vid försökets inledning, men allt eftersom gasinmatningen fortskred och syrgashalten reducerades till nära 0% i dessa mätpositioner, kunde nya mätpositioner kopplas in till respektive instrument. Detta gjordes manuellt genom att ansluta slangen från aktuell mätposition till frikopplad ingång på växlingssystemet. Protokollsanteckningar fördes löpande för att dokumentera vilken mätposition som var kopplat till vilken gasanalysator. Under försökens gång kontrollerades/justerades också gasflödena till respektive instrument, kondensvatten i slangar och filter tömdes, torkmedel byttes, etc.



Figur 16 Principskiss av gassamlingsutrustning. 12 positioner kunde mätas parallellt med hjälp av ett gasväxlingssystem och sex syrgasmätare. Varje mätposition var inkopplad i två minuter, följt av två minuter i bypass-läge, osv.

Som ett komplement var en av syrgasmätarna ihopkopplad med ett CO/CO₂-instrument. På detta sätt kunde även CO/CO₂-halten bestämmas i de positioner som vid det aktuella tillfället var inkopplad på denna syrgasmätare. Mätningarna av CO/CO₂ var dock främst inriktat mot att kartlägga gassammansättningen inne i silon före varje försök. (se kapitel 4.2)

3.1.2 Gasutrustning

Gasutrustning som användes ställdes till förfogande av AGA och omfattade i princip all den utrustning som är nödvändig för gasförsörjningen, se Figur 17. Kvävgasen förvarades i en kryotank vilken levereras utan innehåll och efter uppställning på plats fylldes den från en tankbil med ca 5,5 ton flytande kvävgas. Innehållet i tanken kunde i grova drag kontrolleras med en nivågivare. Kryotanken kopplades därefter samman med en luftförlångare med en nominell kapacitet på ca 1000 Nm³/tim. Efter denna placerades en regler- och mätstation där ingående gastryck reducerades från tankens tryck (ca 6 bar) till ca 3,1 bar. Gasen passerade därefter en flödesmätare och en reglerventil varefter den via en slang leddes till respektive gasanslutning på silon. Kryotank, förlångare och mätstation kopplades ihop med en metallslang medan slangens efter mätstationen var en flatrullad 53 mm slang betecknad "Snowtex", försedd med en Camlock-koppling och levererad av SVEBAB.

Gasflödesmätaren var av svävkroppstyp (Platon Metal Tube VA, DS1220) med ett mätområde på 0-600 kg/tim. Mätarens skala var kalibrerad för syrgas vid ett tryck på 6 bar vilket medförde att flödet i efterhand omräknats, dels med hänsyn till densitets-

skillnaden mellan syrgas och kvävgas (faktor 1.07), dels med hänsyn till tryckskillnaden (faktor 0,77). Den sammanlagda korrigeringen av avläst värde blev således 0,824 ($1,07 \times 0,77$). Vid försöken användes två flöden, ”lågt flöde” respektive ”normalt flöde”. Vid ”lågt flöde” reglerades flödet till ca 30 kg/tim på flödesmätaren (något osäker värde då lägsta skalstrecket motsvarade 50 kg/tim) och vid ”normalt flöde” reglerades flödet till 150 kg/tim. Efter att dessa mätvärden omräknats till gällande förhållanden för kvävgas motsvarar detta alltså ca 25 kg/tim respektive 124 kg/tim. Detta motsvarar en inmatningshastighet av ca 0,9 kg/m² tim respektive 4,4 kg/m² tim. Det senare flödet stämmer relativt väl med det nedre spannet av rekommenderad inmatningshastighet (5-10 kg/m² tim) vilken var baserat på tidigare försök [2]. Anledningen till att det lägre flödet användes var att skapa en långsammare fyllning och därmed förbättrade möjligheter att följa fyllnadsförloppet.

Inför respektive försök provkördes anläggningen under ett antal minuter för att fylla upp ledningar och förångare med gas så att ett stabilt flöde kunde erhållas. Gasen matades då ut i det fria via ett löst gasinlopp av samma typ som var monterade inne i silon (se kapitel 4.8).

Gasflödet från anläggningen var mycket stabilt och efter att önskat flöde ställts in enligt gasflödesmätaren låg detta kvar på samma värde under hela försöket. Tryck och nivå i kryptanken, tryck efter reducentventil samt flödesmätaren, kontrollerades och dokumenterades visuellt vid ett flertal tillfällen under försöken.



Figur 17 Gasutrustning som användes vid försöken bestod av a) en kryptank med 5,5 ton flytande kvävgas kopplad med en metallslang till en luftförångare. Efter förångaren placerades b) en mät- och reglerstation för tryck och flöde innan gasen leddes in i silon via en flatrullad slang.

I försök 5 provades effekten av en koldioxidpåföring via silotoppen. För detta ändamål användes tre 50 l gasflaskor försedda med stigrör för att kunna mata ut gasen i vätskeform, vilket är det normala förfarandet vid verkliga insatser, se Figur 18. Varje gasflaska innehöll ca 37 kg gas vilka lyftes upp på silotoppen strax innan försöket inleddes. Gasen matades in i silon via en ca 2 m slang vilken normalt sett var avsedd för en motsvarande handbrandsläckare, dock var ”snöröret” demonterat från slangen. Flaskorna ställdes upp på en vågutrustning så att inmatad gasmängd kunde registreras.



Figur 18 Vid försök 5 matades koldioxid in i silotoppen från tre flaskor försedda med stigrör.

3.2 Försöksprogram

Totalt genomfördes 5 försök under loppet av ca 2 veckor enligt följande:

1. Inmatning i silons centrum, ”lågt flöde” (2008-06-09)
2. Inmatning i silons centrum, ”normalt flöde” (2008-06-11)
3. Inmatning från sidan, ”normalt flöde” (2008-06-13)
4. Inmatning från sidan, läckage på motstående sida, ”normalt flöde” (2008-06-16)
5. Koldioxidpåföring via silotoppen följt av kvävgasinmatning i silons centrum, ”normalt flöde” (2008-06-18)

Silon fylldes med träpellets 2008-06-04. Eftersom samma pellets användes i samtliga försök, genomfördes försöken med minst ett dygns mellanrum. Detta innebar en möjlighet att ”spola” silon med luft mellan varje försök för att utgångsförhållandena skulle vara så lika som möjligt vid start av samtliga försök. Detta gjordes genom att mata in torkad tryckluft från pelletsfabrikens ordinarie tryckluftssystem i något av gasinloppen under ca 6-8 timmar med ett flöde motsvarande ungefär ”normalt gasflöde”. Silon fick därefter stå orörd i drygt ett dygn, där båda gasinloppen och utloppet på silotoppen lämnades öppna för att medge ytterligare självventilering av innehållet. För att kontrollera och dokumentera förhållandena innan respektive försöksstart genomfördes därför en inledande kontroll av gassammansättningen i samtliga mätpositioner före försöken.

Efter att försök 5 avslutats, gjordes en mätning av syrgaskoncentrationen i samtliga mätpositioner. Därefter tilläts silon stå orörd under natten (ca 13 timmar) varefter mätningen upprepades igen för att studera hur koncentrationen av koldioxid respektive kvävgas förändrades när silon lämnades orörd utan forcerad ”spolning”. I detta fall var gasinloppen tätade (slangar anslutna) och den enda ventilationen var genom utloppsriöret på silotoppen.

Ytterligare detaljinformation kring varje försök respektive erhållna resultat presenteras i kapitel 4.

3.3 Tömning av silon

Efter avslutad försöksserie tömdes silon 2008-07-01 genom att en bandtransportör placerades under silon och dess utmatningsöppning. Tömningsflödet reglerades med skjutspjället och utmatad pellets leddes via bandtransportören till lastskopan (ca 6 m³) på en stor lastmaskin. Under utmatningen togs ett antal prover av pelletsen när dessa rann ner på transportbandet. Syftet var att försöka få en bild av pelletskvalitén, andel finfraktion, fukthalt, etc och för att se om gasinmatningen respektive ”spolningen” med luft under försöksserien påverkat kvalitén. Det är naturligtvis omöjligt att veta exakt var i silon respektive pelletsprov härstammar men baserat på erfarenhet hos Agroenergis personal antogs att pelletsen i inledningsskedet av tömningen sjunker rakt ner, dvs den första pelletsen härrör från silons centrum. Allt eftersom pelletsnivån sjunker i toppen och det bildas en grop på pelletsytan, rinner mer och mer pellets in från sidorna. Av denna anledning koncentrerades provtagningen till tömningens inledningsskede. Som komplement till denna analys gjorde också en övergripande kvalitetsbedömning av Agroenergi.

Resultaten från dessa provtagningar redovisas i kapitel 5.2.

4 Försöksresultat från gasfyllnadsförsök

I följande kapitel redovisas detaljerade förutsättningar, eventuella observationer under pågående försök samt erhållna resultat från respektive försök. I kapitel 4.1 nedan beskrivs den generella arbetsgången, i kapitel 4.2 resultaten från bakgrundsmätningarna inne i silon och i kapitel 4.3-4.7 försöksresultaten från respektive gasfyllnadsförsök. I kapitel 4.8 redovisas resultaten av tryckfallsmätningar över gasinlopp och pelletsbulken. Bilder av uppmätt koncentrationsfördelning vid olika tidpunkter redovisas dessutom i Bilaga 3. En mer övergripande diskussion av erhållna resultat ges i kapitel 8.

4.1 Generella procedurer vid försöken

Den generella arbetsgången var att samtliga gasanalyser kalibrerades inför varje försök. Även tryckgivare, fuktighetsmätare samt termoelement kontrollerades.

Därefter genomfördes en bakgrundsmätning av halten O_2 , och i de flesta fall även av CO samt CO_2 , i ett utvalt antal mätpositioner inne i silon (se sektion 4.2).

När detta var avslutat kopplades samtliga sex O_2 -analyser in på de mätpositioner som ansågs mest relevanta vid start av gasfyllnaden. Gasväxlingsfunktionen aktiverades och gasflödena genom varje analysator kontrollerades/justerades. Därefter startades dataloggsystemet för att under 20 minuter mäta bakgrunden i inkopplade positioner.

Gasinmatningen påbörjades efter 20 min och som ett komplement till dataloggsystemet avlästes mätarna visuellt med ca 5-10 minuters mellanrum och resultaten protokollfördes för att hela tiden kunna följa gasfördelningen inne i silon. Allt eftersom mätpositionerna indikerade ”full inertering”, dvs en låg syrgashalt, kopplades denna mätposition bort och en ny mätposition, normalt sett högre upp i silon, kopplades in. Denna omkoppling pågick under hela försöket och vilka positioner som var inkopplade avgjordes alltså löpande och alla förändringar protokollfördes löpande.

Parallellt med dessa mätningar kontrollerades/protokollfördes inmatat kvävgasflöde, tryck, etc på gassystemet, utloppshastigheten på silotoppen respektive vindhastigheten mättes med vinghjulsnemometern, tryckfall över silobädden mättes, etc.

När försöken ansågs avslutade avbröts gasinmatningen och samtliga mätpositioner kopplades bort från instrumenten. En förnyad kontroll av gasanalyserna gjordes med kalibreringsgaserna för att åter verifiera funktionen hos instrumenten. När allt var klart påbörjades ventileringen av silon inför nästa försök.

I resultatredovisningen och i diagrammen redovisas försökstid, dvs tiden från start av mätningarna. För att få verklig gasfyllnadstid måste man således dra bort de inledande 20 minuter innan gasfyllnaden inleddes. Som referensvärde har 5% syrgasnivå använts vid jämförelsen och diskussionen av de olika försöksresultaten. Detta är en nivå som man ur praktisk synpunkt vill underskrida för att kunna betrakta silon som inerterad.

4.2 Bakgrundsmätningar efter fyllning av silon respektive inför varje försök

Normalt före varje försök genomfördes en bakgrundsmätning i ett utvalt antal mät-positioner inne i silon med gasanalysator 5 vilket också var sammankopplad med en CO/CO₂-analysator. Gasväxlingsventilen ställdes i manuellt läge och slangarna från respektive position anslöts manuellt till den inkopplade ingången varefter mätning pågick tills ett stabilt mätvärde erhållits (ca 1 min). Därefter kopplades nästa slang in, osv tills samtliga utvalda positioner mätts. Direkt efter fyllning samt före försök 1 utfördes mätningar av bakgrundshalten O₂ i ett större antal punkter och man utnyttjade då samtliga syrgasmätare.

Vid bakgrundsmätningarna efter fyllning och till och med försök 3, användes ett CO/CO₂ instrument (inv.nr. 700240) med ett något lägre mätområde (CO: 0-3 vol.%, CO₂: 0-10 vol.%). Då detta instrument visade sig ge en ej försumbar långtidsdrift, ersatte man detta instrument med ett instrument (inv.nr. 701133) med ett högre mätområde (CO: 0-10 vol.%, CO₂: 0-30 vol.%). Det högre mätområdet var också nödvändigt för att kunna mäta de höga CO₂ halterna i försök 5 (där CO₂ användes som inerteringsgas).

Resultaten från bakgrundsmätningarna har sammanställts i tabell Tabell 3-Tabell 6. I tabellerna redovisas företrädesvis resultat från de mätpunkter som innefattades vid samtliga mättillfällen. Resultaten från bakgrundsmätningarna redovisas också grafiskt i bilaga 2. Där finns samtliga uppmätta värden redovisade.

Direkt efter fyllning kunde man konstatera att syrgashalten generellt var reducerad i pelletbulken samt att halterna av koldioxid och kolmonoxid var kraftigt förhöjda. I mätpositionerna längs centrumlinjen (B) fann man en gradvis sjunkande halt O₂ från 2 m, och vid 8 m höjd var halten så låg som 10,5 %. Man kunde se en korresponderande ökning i halterna av CO₂ och CO vilka i centrumlinjen nådde 0.86 %, respektive 0.39 %. Liknande förhållanden sträckte sig ända ut mot kanterna av bulken (se positionerna A respektive C, D och E i Tabell 3-Tabell 5). Man kunde också se att temperaturen i pelletbulken ökade med höjden i centrumlinjen.

Detta tyder sammantaget på att en kraftig oxidationsprocess hade startade under fyllningen av silon vilket resulterade i produktion av värme, koldioxid och kolmonoxid och förbrukning av luftens syre. Mekanismen bakom den kraftiga oxidationen är inte känd, men det finns flera möjliga förklaringar. Pelleten var inte nyproducerad utan kom från en av Agroenergis stora lagringssilor. Det handlar därför inte om den oxidation som ofta observeras relativt kort tid efter tillverkning. I stället är det möjligt att den luftning som pelleten var utsatt för under transport och fyllning i bulkbil, och från bulkbil ner i silon, startat oxidationen. Eventuellt kan också friktionen på pelleten vid fyllning i silon ökat benägenheten till oxidation genom att producera värme och sönderdela delar av pelleten till finfraktion.

Den ”självinertering” som kunde konstateras efter fyllning var intressant men inte till fördel för kommande inerteringsförsök. Utgångspunkten var att ha en pelletbulk med omgivningshalt av syre, dvs 21 %. För att vädra ur oxidationsprodukterna och återställa omgivningshalten av syre ”spolades” silon med tryckluft och vädrades vilket beskrevs i kapitel 3.2. Vädringsproceduren hade avsedd effekt och syrgas halten var återställt relativt nära omgivningshalt före försök 1. Man kan se att det fortfarande var en viss reduktion av syrgashalten före försök 1, men i efterföljande försök ligger man närmare omgivningshalten. Vädringsproceduren hade även effekt genom att reducera halterna av oxidationsprodukter. Halterna av koldioxid och kolmonoxid reducerades avsevärt jämfört

med vad som uppmättes direkt efter fyllning, men halterna var ändå relativt höga. Halten kolmonoxid i mätposition 10.5B (utrymmet i toppen av silon) låg, t ex, på flera hundra ppm före försöken. Takgränsvärdet för CO är 100 ppm, vilket innebär att det var ohälsosamt att exponeras för luften i topputrymmet.

När det gäller temperaturerna som uppmättes i centrumlinjen av pelletbulken (Tabell 6) kan man se en minskning i de lägre positionerna och en ökning från efter fyllning till en stabil temperatur runt 45 °C i den övre delen av bulken. Minskningen i temperaturen i silons lägre delar beror sannolikt i huvudsak på temperaturförluster samt kanske till mindre del på kylning från spolningen och vädringen. Temperaturökningen i bulkens centrala och övre delar är sannolikt resultatet av självuppvärmning från oxidation.

Tabell 3 Uppmätt halt syrgas, O₂, i pelletsbädden vid bakgrundsmätningar före försöken.

Mätposition	Efter fyllning O ₂ - vol.%	Före försök 1	Före försök 2	Före försök 3	Före försök 4	Före försök 5
1B	20.6	20.7	20.9	20.9	20.9	20.9
2B	16.8	20.6	20.8	20.8	20.9	20.8
4B	13.5	20.0	20.6	20.5	20.8	20.7
6B	-	19.8	20.4	20.5	20.7	20.6
8B	10.5	19.6	20.4	20.3	20.7	20.5
10.5B	19.4	19.3	20.2	20.8	20.6	20.3
1A	19.8	19.4	-	20.9	20.8	20.2
4A	15.5	18.7	-	19.7	20.4	20.1
6A	11.5	18.5	20.0	19.6	20.4	20.1
6C	11.9	19.0	-	19.7	20.5	20.2
6D	12.5	19.0	20.2	19.7	20.5	20.2
6E	13.0	19.1	20.2	19.7	20.5	20.3

Tabell 4 Uppmätt halt koldioxid, CO₂, i pelletsbädden vid bakgrundsmätningar före försöken.

Mätposition	Efter fyllning CO ₂ - vol.%	Före försök 1	Före försök 2	Före försök 3	Före försök 4	Före försök 5
1B	0.06	0.03	0.04	0.05	0.05	0.05
2B	0.46	0.09	0.075	0.07	0.05	0.07
4B	0.78	0.20	0.12	0.11	0.09	0.07
6B	0.60	0.30	0.18	0.16	0.11	0.09
8B	0.86	0.32	0.18	0.18	0.11	0.11
10.5B	0.14	0.41	0.21	0.31	0.14	0.13
1A	-	-	-	0.07	0.09	0.14
4A	-	-	-	0.33	0.18	0.14
6A	0.80	0.55	0.25	0.33	0.18	0.14
6C	-	-	-	0.33	0.16	0.14
6D	0.72	0.42	0.22	0.31	0.16	0.14
6E	0.64	0.40	0.21	0.31	0.14	0.13

Tabell 5 Uppmätt halt kolmonoxid, CO, i pelletsbädden vid bakgrundsmätningar före försöken.

Mätposition	Efter fyllning CO - vol. %	Före försök 1	Före försök 2	Före försök 3	Före försök 4	Före försök 5
1B	0.005	0.000	0.007	0.005	0.004	0.005
2B	0.165	0.000	0.020	0.011	0.006	0.011
4B	0.280	0.036	0.043	0.023	0.006	0.017
6B	0.260	0.070	0.062	0.035	0.009	0.017
8B	0.390	0.078	0.062	0.041	0.013	0.023
10.5B	0.065	0.088	0.068	0.078	0.016	0.029
1A	-	-	-	0.005	0.011	0.029
4A	-	-	-	0.078	0.042	0.035
6A	0.320	0.135	0.085	0.084	0.041	0.035
6C	-	-	-	0.078	0.035	0.029
6D	0.320	0.100	0.072	0.080	0.019	0.029
6E	0.290	0.095	0.086	0.078	0.019	0.029

Tabell 6 Uppmätta temperaturer i pelletsbädden vid bakgrundsmätningar före försöken.

Mätposition	Efter fyllning Temp. (°C)	Före försök 1	Före försök 2	Före försök 3	Före försök 4	Före försök 5
Inlopp centrum	23.3	20.0	14.2	14.1	13.5	14.6
0.4B	29.3	22.4	22.1	17.7	18.6	16.6
0.6B	32.2	24.7	17.2	16.0	18.5	18.2
0.8B	32.4	28.0	21.2	18.8	19.8	20.6
1B	31.7	30.9	27.7	24.8	23.9	23.8
2B	37.3	38.4	38.1	37.6	36.4	35.4
4B	38.1	45.8	46.4	45.8	44.3	43.0
9B	34.8	45.9	47.4	47.7	47.5	46.5
Utlopp, topp	20.8	24.8	21.3	26.0	22.8	17.2
Inlopp sida	20.9	28.4	17.6	19.9	~17	~14
Läckage	22.7	18.9	12.3	14.5	~12	14.7
Mantel - S	27.5	19.9	13.8	16.0	14.8	14.0
Mantel - V	31.3	20.9	14.4	17.2	16.0	14.3
Mantel - N	-	27.4	22.1	27.8	25.4	14.6
Mantel - O	23.7	40.9	26.6	28.1	25.5	14.6

4.3 Gasfyllnadsförsök 1

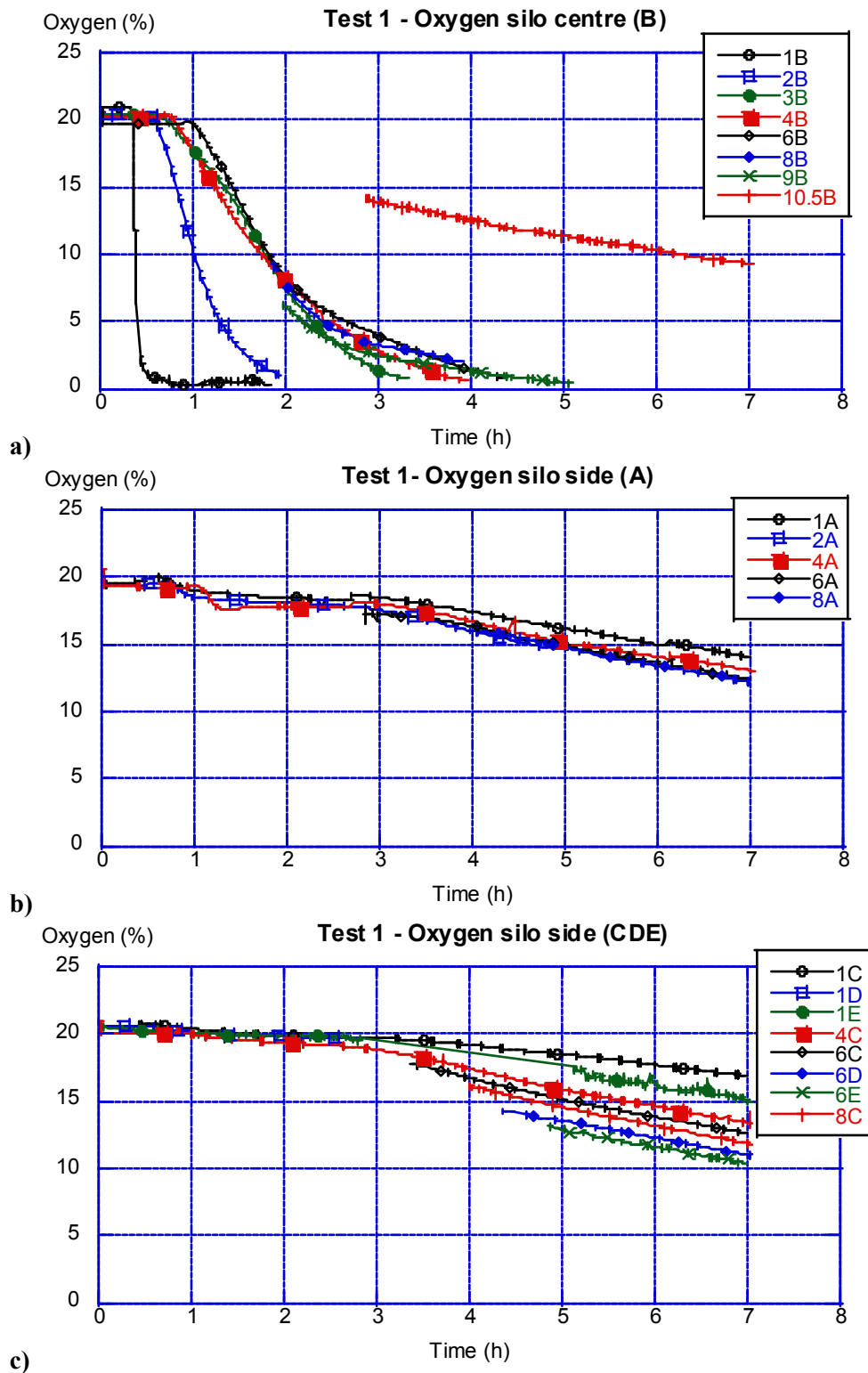
Vid försök 1 matades kvävgas in i silon via det centriskt placerade inloppet i silons centrum. Gasflödet var relativt lågt, ca 25 kg/tim, vilket motsvarar en inmatningshastighet på ca 0,9 kg/m² tim. Gasinmatningen inleddes efter försökstiden 0:20 tim och avbröts vid ca 7:20 tim, dvs gasinmatningen pågick i 7 timmar. Mätningen av syrgaskoncentrationen avbröts dock strax efter tiden 7:00 tim, för att under den sista delen av mätningen kontrollera funktionen hos analysinstrumenten. Mätningarna av bl a temperatur fortgick dock fram till ca 7:40 tim.

Under försöket spred sig kvävgasen företrädesvis rakt upp längs silons centrumlinje medan spridningen i sidled var markant långsammare, se Figur 19. Redan vid försökstiden 0:22 tim (dvs efter 2 min gasfyllnadstid) kunde en markant syrgasreducering registreras i pos 1B, dvs rakt ovanför gasinloppet och efter tiden ca 0:24 tim var syrgaskoncentrationen nere i 5%. Vid försökstiden ca 0:40 tim började pos 2B reagera markant och vid tiden ca 1:20 tim nådde syrgaskoncentrationen 5%. Resterande positioner längs centrumlinjen, dvs pos 3B-9B, följdes i stort sett åt och 5%-nivån nåddes mellan försökstiden 2:10 tim och 2:40 tim. Man kan här notera att reduceringen inte följde positionsordningen helt utan det tog längst tid för pos 6B att nå 5%. Mätningarna längs linje A och C, dvs 1 m från siloväggen, visade spridningen i sidled var mycket begränsad och längs linje A erhöles som lägst en syrgaskoncentration på 12-14%. Längs linje C, D och E varierade syrgashalten mellan ca 10% och 17% och lägst halt uppmättes faktiskt i pos 6E, dvs 5 cm från siloväggen. En summerande slutsats av försöket är således att gasfördelningen inte var jämn över tvärsnittet, och att en stor del av silons periferi inte inreterades på ett effektivt sätt, inte ens efter en relativt lång tid. Som komplement till diagrammen nedan presenteras också bilder av koncentrationsfördelningen baserat på uppmätta värden i Bilaga 3.

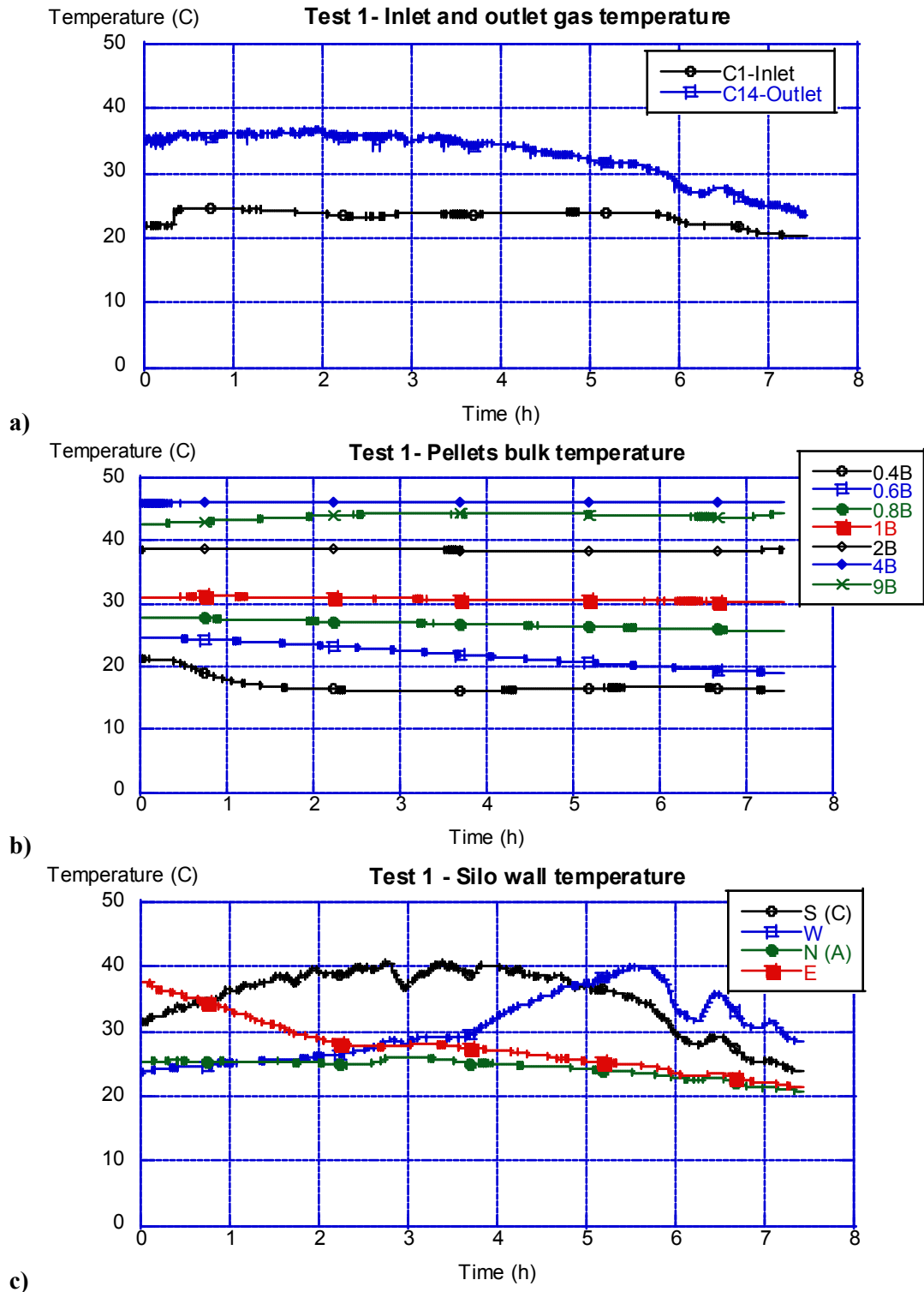
Bakgrundsmätningarna av temperaturen inne i silon (se Figur 20) visade att delar av pelletbulken hade en förhöjd temperatur, upp till max ca 46 °C i pos 4B. Temperaturen vid siloväggarna varierade mellan ca 20 °C till 40 °C, där variationen främst var en effekt av solinstrålningen. Temperaturen i pelletsbulken vid och strax ovanför gasinloppet var dock endast ca 22 °C vid försöksstart och temperaturen av inmatad gas varierade kring ca 24-25 °C under hela försöket. Under gasinmatningen kunde man trots detta notera att temperaturen närmast gasinloppet (pos 0,4B) sjönk från ca 22 °C och planade ut på ca 17 °C efter ca 2 tim vilket kan förklaras av den uttorkning som erhöles av den torra kvävgasen. Även pos 0,6B resp 0,8B visar på en svag temperatursänkning. Utströmmande gas i utloppsröret på silotoppen hade en temperatur av ca 35-37 °C under större delen av försöket.

Fuktmätningarna i silotoppen indikerade att den relativa fuktigheten nådde 100% efter ca 4 timmars gasinmatning. Detta kunde även verifieras visuellt efter försöket genom att vatten kondenserade ut på väggarna och i taket uppe i silotoppen.

Vid försöket mättes även tryckfallet över silobädden (1A, 1B relativt 8A, 8B) men avläsningarna var alldeles för ostabila för att kunna rapportera ett signifikant värde. Detta gällde även om trycket i respektive position inne i silon mättes gentemot omgivningen. I samtliga fall varierade avlästa värden mellan ca +15 Pa till -25 Pa. Motsvarande mätningar med max inmatningsflöde (se kapitel 4.8) genom silon indikerade att tryckfallet var mycket lågt vid de gasflöden som användes i försök 1-5 och att det sannolikt var yttre vindförhållanden som orsakade svängningarna.



Figur 19 Syrgaskoncentration i de olika mätpositionerna vid försök 1. Gasinmatning i silons centrum, ca 25 kg/tim, inleddes vid tiden 20 minuter.



Figur 20 Uppmätt temperatur i försök 1, a) hos inmatad respektive utgående gas, b) på olika höjd inne i pelletbulken samt c) på siloväggarna.

4.4 Gasfyllnadsförsök 2

Vid försök 2 matades kvävgas in i silon via det centriskt placerade inloppet i silons centrum. Gasflödet var ”normalt”, ca 124 kg/tim, vilket motsvarar en inmatningshastighet på ca 4,4 kg/m² tim. Gasinmatningen inleddes efter försökstiden 0:20 tim och avbröts vid ca 3:20 tim, dvs gasinmatningen pågick i 3 timmar. Mätningen av syrgaskoncentrationen avbröts strax efter tiden 3:20 tim, för att under den sista delen av mätningen kontrollera funktionen hos analysinstrumenten medan mätningarna av bl a temperatur fortgick fram till ca 3:35 tim.

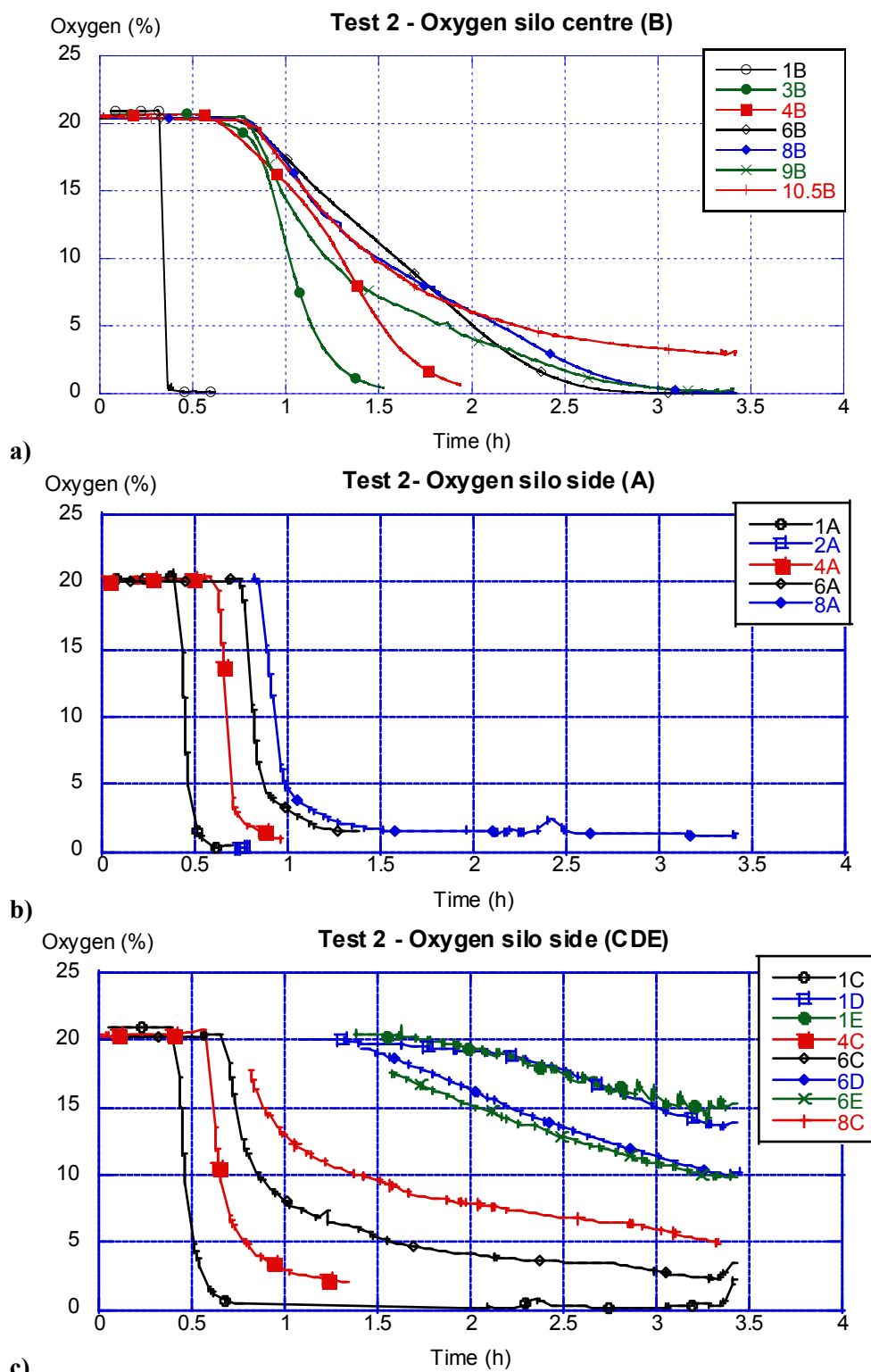
Under detta försök erhöles naturligtvis ett snabbare förlopp på grund av det betydligt högre gasflödet, men det resulterade också i ett helt annat förlopp jämfört med försök 1. Kvävgasen spred sig företrädesvis i sidled innan den började spridas vertikalt vilket medförde en snabbare inertering vid sidan av silons centrumlinje. Liksom i försök 1 var det pos 1 B, rakt ovanför gasinloppet, som blev inerterad snabbast, 5% underskreds redan efter försökstiden 21 min (1 minut gasfyllnad) (se Figur 21). Pos 3B understeg 5% vid tiden 1:08 tim och pos 4B efter ca 1:30 tim. Nästa position där 5% underskreds var 9B (tid ca 1:50 tim) medan position 6B och 8B inerterades vid tiden ca 2:00 tim respektive 2:10 tim.

Snabbast gasfördelning erhöles dock längs linje A om man bortser från den allra första fasen av gasinmatningen. Pos 1A underskred 5% vid tiden 0:27 min och därefter spred sig gasen snabbt uppåt i silon och redan vid tiden 0:59 tim var syrgaskoncentrationen under 5% i pos 8A, dvs drygt en timma snabbare än längs centrumlinjen. Gasfördelningen längs linje C var inledningsvis ganska likvärdig linje A och tiderna till 5% var ungefär de samma för pos 1C respektive 2C. Därefter gick gasfördelningen långsammare på denna sidan och pos 8C understeg 5% först vid tiden 3:20 tim. Längs linje D och E var syrgaskoncentrationen som lägst ca 10% (pos 6D och 6E) respektive ca 15% (pos 1D och 1E). Liksom i försök 1 erhöles lägst koncentration i pos 6E, dvs 5 cm från siloväggen.

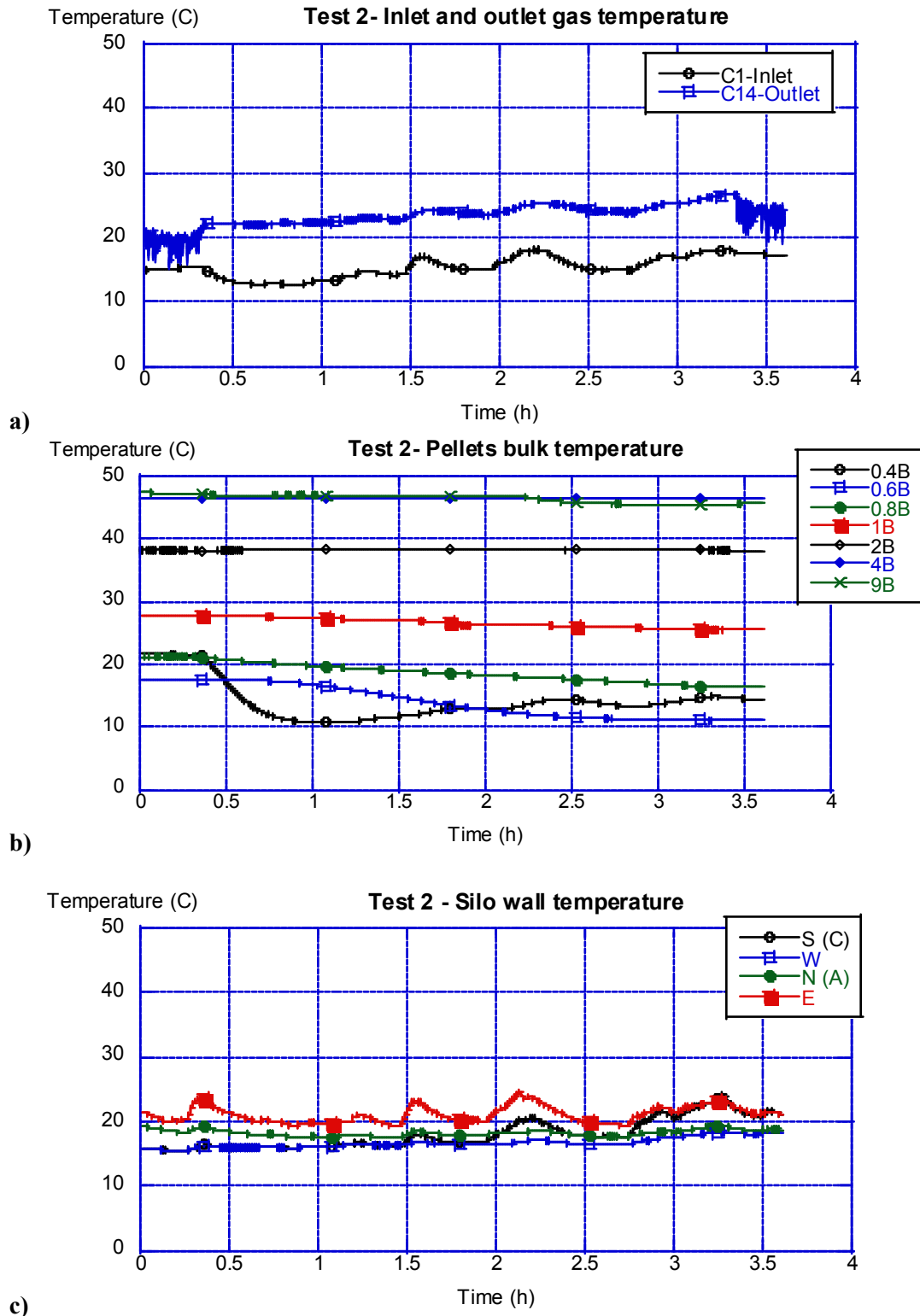
En summerande slutsats av försöket är således att gasfördelningen inte heller i detta försöket var jämn över tvärsnittet. Gasen spred sig mer i sidled och men fortfarande erhöles inte en effektiv inertering längs hela silons periferi. Som komplement till diagrammen nedan presenteras också bilder av koncentrationsfördelningen baserat på uppmätta värden i Bilaga 3.

Temperaturmätningarna inne i silon visade inte på några dramatiska skillnader gentemot försök 1 (se Figur 22 a-c). Delar av pelletsbulken hade fortfarande en förhöjd temperatur och i detta försök hade t o m temperaturen stigit något längst upp i silon så att både pos 4B och 9B låg på max temperatur, ca 46 °C. Temperaturerna närmast gasinloppet (pos 1B och nedåt) var dock lägre. Temperaturen vid siloväggarna var lägre (ca 15 °C till knappt 25 °C) och mer stabila, främst beroende på väderförhållandena med relativt mycket moln. Temperaturen i pelletsbulken vid och strax ovanför gasinloppet var ca 22 °C vid försöksstart och temperaturen av inmatad gas varierade kring från ca 12 °C till ca 18 °C under hela försöket. Under gasinmatningen kunde man notera att temperaturen närmast gasinloppet (pos 0,4B) sjönk från ca 22 °C ner till ca 10 °C vid ca 1:00 tim, delvis på grund av gasens lägre temperatur, delvis på grund av uttorkning. Även pos 0,6B resp 0,8B visade på en tydlig temperatursänkning. Temperaturen på utströmmande gas i utlopps-röret på silotoppen ökade sakta från ca 22 °C till ca 27 °C under försöket.

Visuellt kunde noteras att gasen inne i silotoppen var fuktmättad liksom i senare delen av försök 1. Även i detta försöket var tryckfallet över silobädden för lågt för att kunna registreras då de yttre vindförhållandena medförde betydande fluktuationer.



Figur 21 Syrgaskoncentration i de olika mätpositioner vid försök 2. Gasinmatning i silons centrum, ca 124 kg/tim, inleddes vid tiden 20 minuter.



Figur 22 Uppmätt temperatur i försök 2, a) hos inmatad respektive utgående gas, b) på olika höjd inne i pelletbulken samt c) på siloväggarna.

4.5 Gasfyllnadsförsök 3

Vid försöket matades kvävgas in i sidan av silon, närmast linje A. Gasflödet var ”normalt”, ca 124 kg/tim, vilket motsvarar en inmatningshastighet på ca 4,4 kg/m² tim. Gasinmatningen inleddes efter försökstiden 0:20 tim och avbröts vid ca 3:35 tim, dvs gasinmatningen pågick i 3:15 timmar. Mätningen av syrgaskoncentrationen avbröts ca 3:45 tim, för kontroll av funktionen hos analysinstrumenten. Mätningarna av bl a temperatur fortgick fram till ca 3:55 tim.

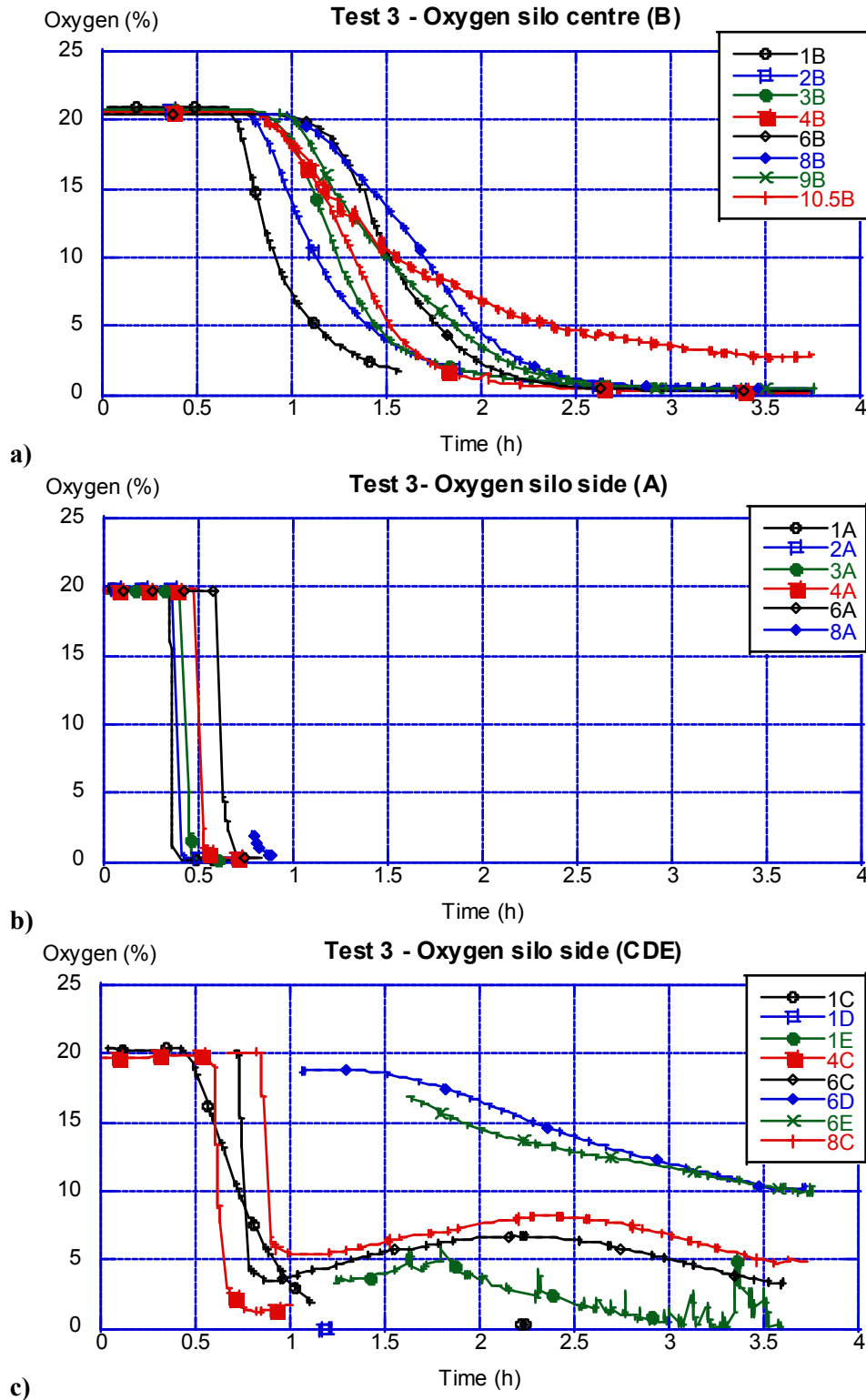
I detta försök erhöles en mycket snabb gasfördelning längs linje A, dvs närmast gasinloppet (se Figur 23). Pos 1A inerterades snabbast och 5% syrgashalt underskreds redan vid tiden 0:21 tim (1 minuts gasfyllnad). Gasen spreds sedan mycket snabbt uppåt och redan vid tiden 0:37 tim var pos 6A inerterad. När mätningarna i pos 8A kopplades in var syrgashalten redan mycket låg men man kan uppskatta att 5%-gränsen uppnåddes vid försökstiden ca 0:45 tim.

Gasfördelningen längs silons centrumlinje var betydligt långsammare och pos 1B understeg 5% först vid tiden 1:07 tim. Gasen spreds sig därefter uppåt och 5% underskreds i pos 9B vid tiden ca 1:52. Det bör här noteras att pos 6C inerterades sist, strax före försökstiden 2:00 tim.

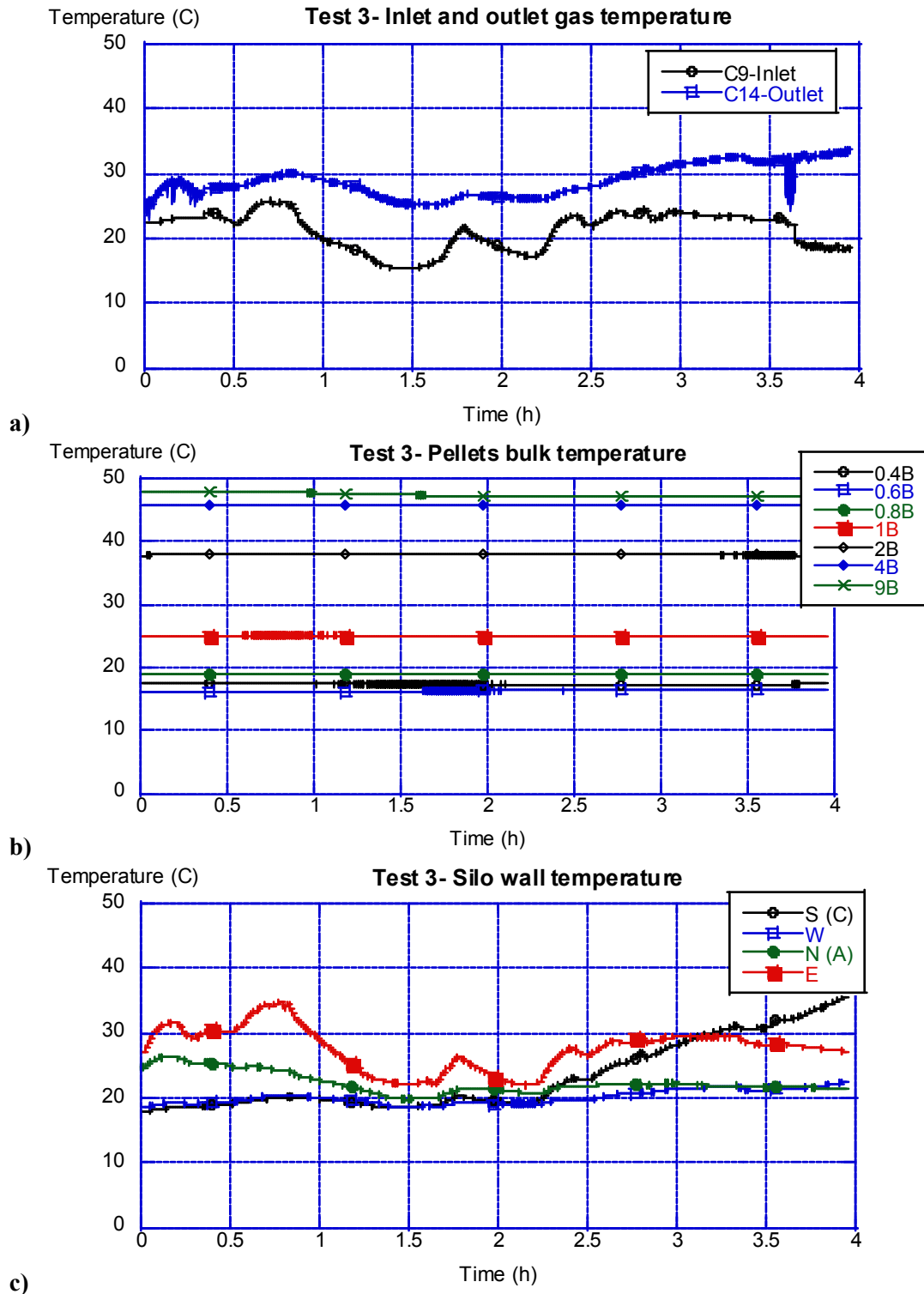
Det som var mycket förvånande vid försöket var att inerteringen längs linje C (och delvis D samt E) var betydligt snabbare än i silons centrum. Pos 4C understeg 5% syrgashalt redan vid tiden ca 0:40 tim och pos 8C nådde i princip 5%-gränsen vid 1:00 tim. Inerteringen i pos 1C hade inte samma snabba karaktär som i övriga positioner vilket också var något förbryllande. En enstaka mätsekvens gjordes i pos 1D vid tiden ca 1:12 tim vilket visade att syrgashalten i princip var 0%. När denna position inerterades kan dock inte sägas. Efter tiden 1:00 tim noterades en långsam ökning av syrgashalten igen i pos 6C och 8C och uppgick som mest till 6 resp 8%. Mätningarna i pos 6D respektive 6E visar liksom tidigare att syrgaskoncentrationen var betydligt högre längs denna del av siloväggen och halten var som lägst ca 10% i båda positionerna när gasinmatningen avbröts.

Förklaringen till den oväntade gasfördelningen erhöles vid tömningen av silon då det noterades att en luftkanal bildats vid fyllningen av silon överst i den utvidgning silon hade upp till 0,7 m höjd. Denna fungerade som en ”ringledning” runt silomanteln vilket ledde till noterade effekter. En summerande slutsats av försöket är således att gasfördelningen inte heller i detta försök var jämn över tvärsnittet. Gasen spred sig mycket snabbt rakt upp från sidoinloppet medan spridningen längs silons centrumlinje var betydligt långsammare. Utan hjälp av den bildade ”ringledningen” är det tveksamt om motstående sida (linje CDE) hade inerterats alls inom rimlig tid. Som komplement till diagrammen nedan presenteras också bilder av koncentrationsfördelningen baserat på uppmätta värden i Bilaga 3

Temperaturmätningarna inne i silon visade inte på några dramatiska skillnader gentemot försök 2 (se Figur 24a-c). Temperaturen i pos 9B hade ökat något till ca 47-48 °C medan pos 4B sjunkit marginellt. Längre ner i silon noteras en svag sänkning av temperaturerna. Gasinmatningen gav ingen temperaturpåverkan eftersom gasinloppet var längre ifrån mätpunkterna. Temperaturen vid siloväggarna låg mellan ca 20 °C och 30 °C under större delen av försöket. Något högre temperatur uppmättes dock åt öster respektive söder under delar av försöket på grund av solinstrålning. Temperaturen av inmatad gas varierade från ca 16 °C till ca 25 °C, också här till största delen beroende av solinstrålningen. Liksom i tidigare försök var silotoppen fuktmättad.



Figur 23 Syrgaskoncentration i de olika mätpositioner vid försök 3. Gasinmatning vid silomanteln (närmast linje A), ca 124 kg/tim, inleddes vid tiden 20 minuter.



Figur 24 Uppmätt temperatur i försök 3, a) hos inmatad respektive utgående gas, b) på olika höjd inne i pelletbulken samt c) på siloväggarna.

4.6 Gasfyllnadsförsök 4

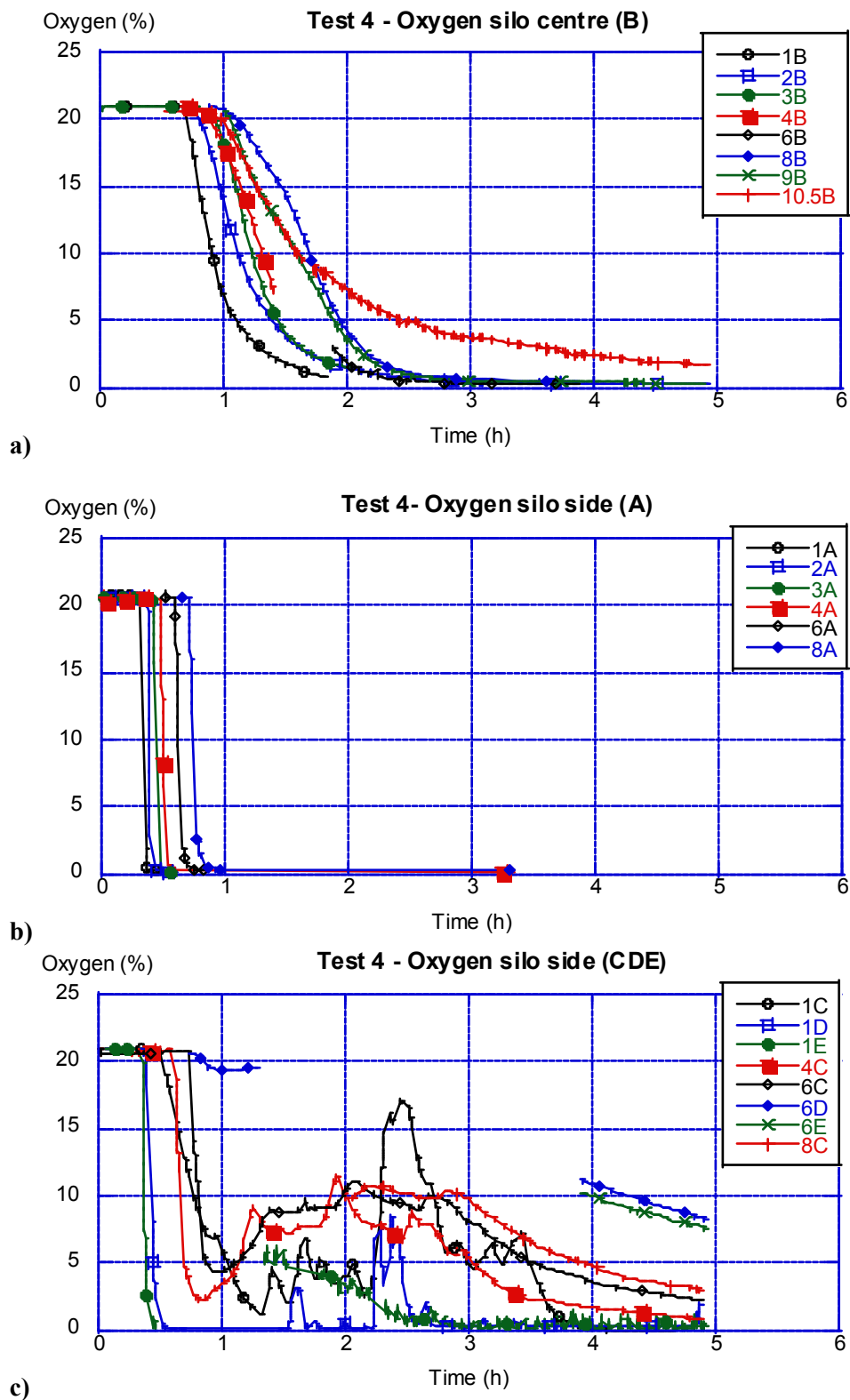
Försöket var identiskt med försök 3 förutom att ett läckage arrangerats vid silobotten diametralt mot gasinloppet. Kvävgas matades in i sidan av silon, närmast linje A med ett gasflöde på ca 124 kg/tim, vilket motsvarar en inmatningshastighet på ca 4,4 kg/m² tim. Gasinmatningen inleddes efter försökstiden 0:20 tim och avbröts vid ca 4:55 tim, dvs gasinmatningen pågick i 4:35 timmar. Läckaget, som var placerat på silons utvidgning var öppet från försöksstart men tätades vid tiden 3:22 tim. Mätningen av syrgaskoncentrationen avbröts också ca 4:55 tim, för kontroll av funktionen hos analysinstrumenten. Mätningarna av bl a temperatur fortgick fram till ca 5:07 tim.

Gasfördelningen var i stort sett helt identisk med försök 3, dvs inerteringen skedde mycket snabbt längs linje A närmast gasinloppet. Tiderna till 5% syrgashalt var i princip helt identiska både längs linje A och i silons centrum (linje B) (se Figur 25). Längs linje CDE var positionerna 1C, 1D respektive 1E inkopplade från start och position 1E, dvs 5 cm från siloväggen understeg 5% redan vid tiden 0:22 tim (2 minuters gasfyllnad) och för pos 1D var motsvarande tid 0:26 tim. Även övriga positioner längs linje C visade på samma resultat som i försök 3 fram till försökstiden ca 1:00 men därefter ökade syrgaskoncentrationen igen i flertalet positioner, som mest till ca 17% i pos 1C.

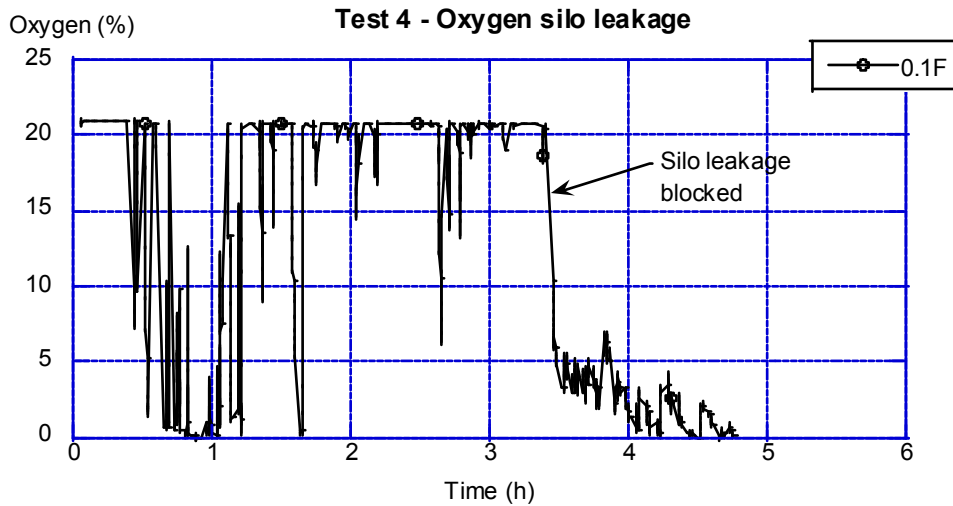
En mätposition för syrgas var även placerad strax innanför läckaget (betecknad pos 0.1F) och mätningarna i denna visar att syrgashalten även här reducerades snabbt efter att gasinmatningen inletts men efter 1:00 tim så steg syrgashalten till 21% igen ända tills läckaget tätades vid tiden 3:22 tim (Figur 26). Tätningen resulterade i mer stabila mätvärden och sakta sjunkande syrgaskoncentrationer. Slutsatsen av detta är att det var ett inflöde av luft genom läckaget vilket påverkade inerteringen inne i silon. Läckageflödet var sannolikt inte konstant utan påverkades av en ganska kraftig, byig vind under försöksdagen.

Mätningarna i pos 6D och 6E indikerar på någon procentenhet högre syrgashalt jämfört med försök 3, vilket kan vara en effekt av inläckande luft, och när gasinmatningen avbröts vid 4:55 var syrgashalten fortfarande ca 7-8%.

En slutsats av försöket är således att läckaget inte hade någon större inverkan under försökets inledning samtidigt som man kan konstatera att repeterbarheten gentemot försök 3 var mycket bra. Denna snabba gasspridningen till pos 1E bekräftar att gasen måste ha transporterats via den bildade "ringledningen" längs silon utbyggnad. Läckaget medförde i detta försök inget större utflöde utan snarare ett inläckage av luft vilket försvårade inerteringen i delarna närmast läckaget. Som komplement till diagrammen nedan presenteras också bilder av koncentrationsfördelningen baserat på uppmätta värden i Bilaga 3

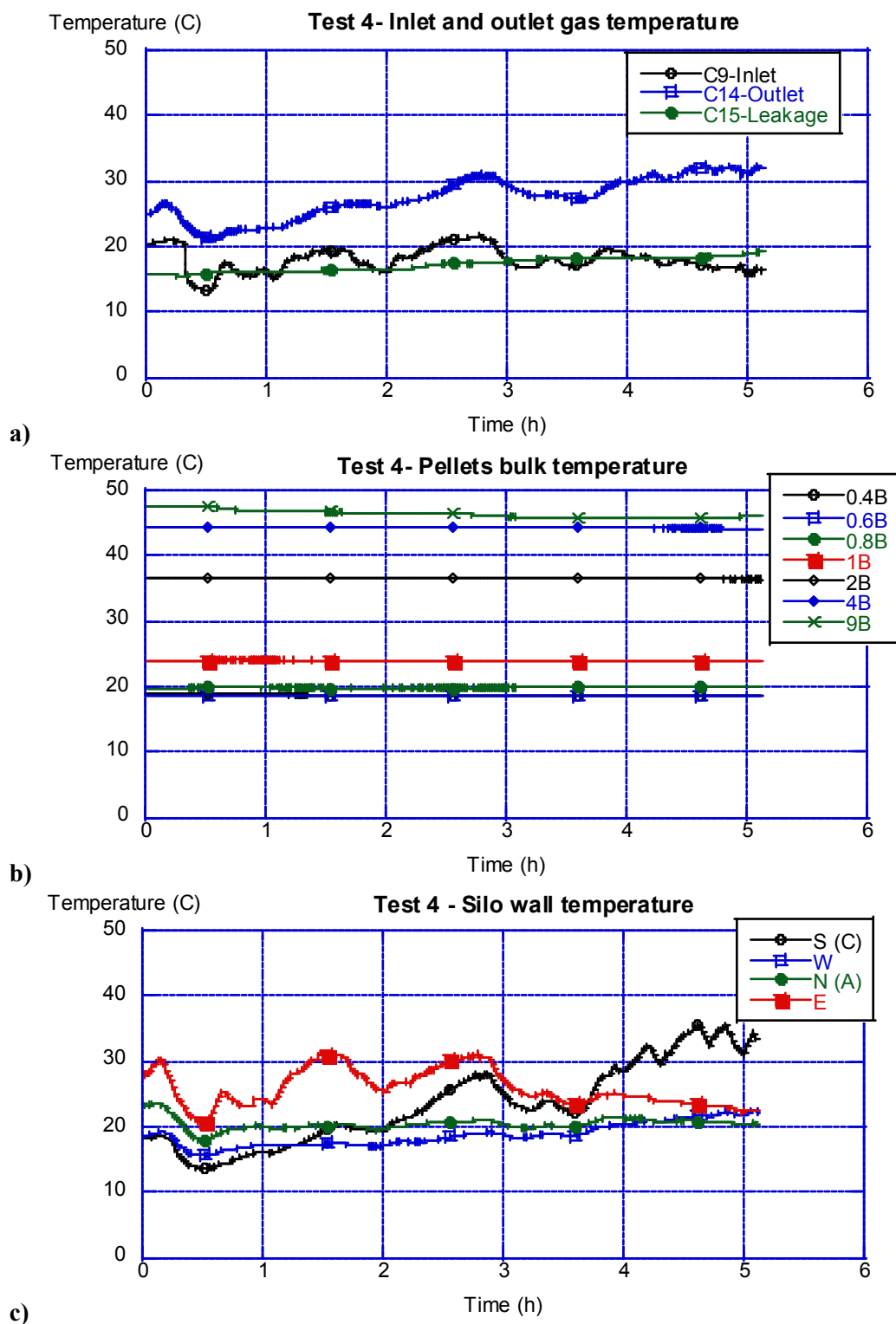


Figur 25 Syrgaskoncentration i de olika mätpositioner vid försök 4 (med läckage). Gasinmatning i silons centrum, ca 124 kg/tim, inleddes vid tiden 20 minuter.



Figur 26 Syrgaskoncentration strax innanför läckageöppningen i försök 4. Läckaget var öppet från start men tätades vid tiden 3:22 tim.

Temperaturmätningarna inne i silon visade i stort på 1-2 °C lägre temperatur i de flesta positioner jämfört med försök 3 (se Figur 27a-c). Närmast silobotten låg temperaturerna stabilt runt ca 20 °C och gasinmatningen gav ingen temperaturpåverkan eftersom gasinloppet var längre ifrån mätpunkterna. Temperaturen vid siloväggarna låg mellan ca 15 °C och 30 °C under senare delen av försöket och variationerna var kopplade till solinstrålningen. Temperaturen av inmatad gas varierade från ca 15 °C till ca 20 °C, också här till största delen beroende av solinstrålningen. Liksom i tidigare försök var silotoppen fuktmättad.



Figur 27 Uppmätt temperatur i försök 4, a) hos inmatad respektive utgående gas samt vid läckage, b) på olika höjd inne i pelletbulken samt c) på siloväggarna.

4.7 Gasfyllnadsförsök 5

Försöket inleddes med en momentan koldioxidfyllning i silotoppen vid försökstiden 0:20 tim varvid tre koldioxidflaskor försedda med stigrör tömdes. Varje flasktömning tog ca 3,5-4 minuter och samtliga tre flaskor var tömda vid tiden 0:34 tim. Totalt hade då 103,3 kg koldioxid fyllts på varefter silon i princip lämnades orörd för att se hur koldioxiden distribuerades inne i silon.

Efter ca 4 timmar påbörjades en kvävgasfyllning via inloppet i silons centrum på samma sätt som i försök 2, dvs ett gasflöde på ca 124 kg/tim, vilket motsvarar en inmatningshastighet på ca 4,4 kg/m² tim. Gasinmatningen avbröts ca 7:00 tim, dvs gasinmatningen pågick i 3 timmar. Läckaget, som var placerat strax ovanför silons botten öppnades vid försökstiden 2:50 och tätades igen vid tiden ca 3:50 tim. Mätningen av syrgaskoncentrationen avbröts vid ca 8:00 tim, för kontroll av funktionen hos analysinstrumenten. Mätningarna av bl a temperatur fortgick fram till ca 8:05 tim.

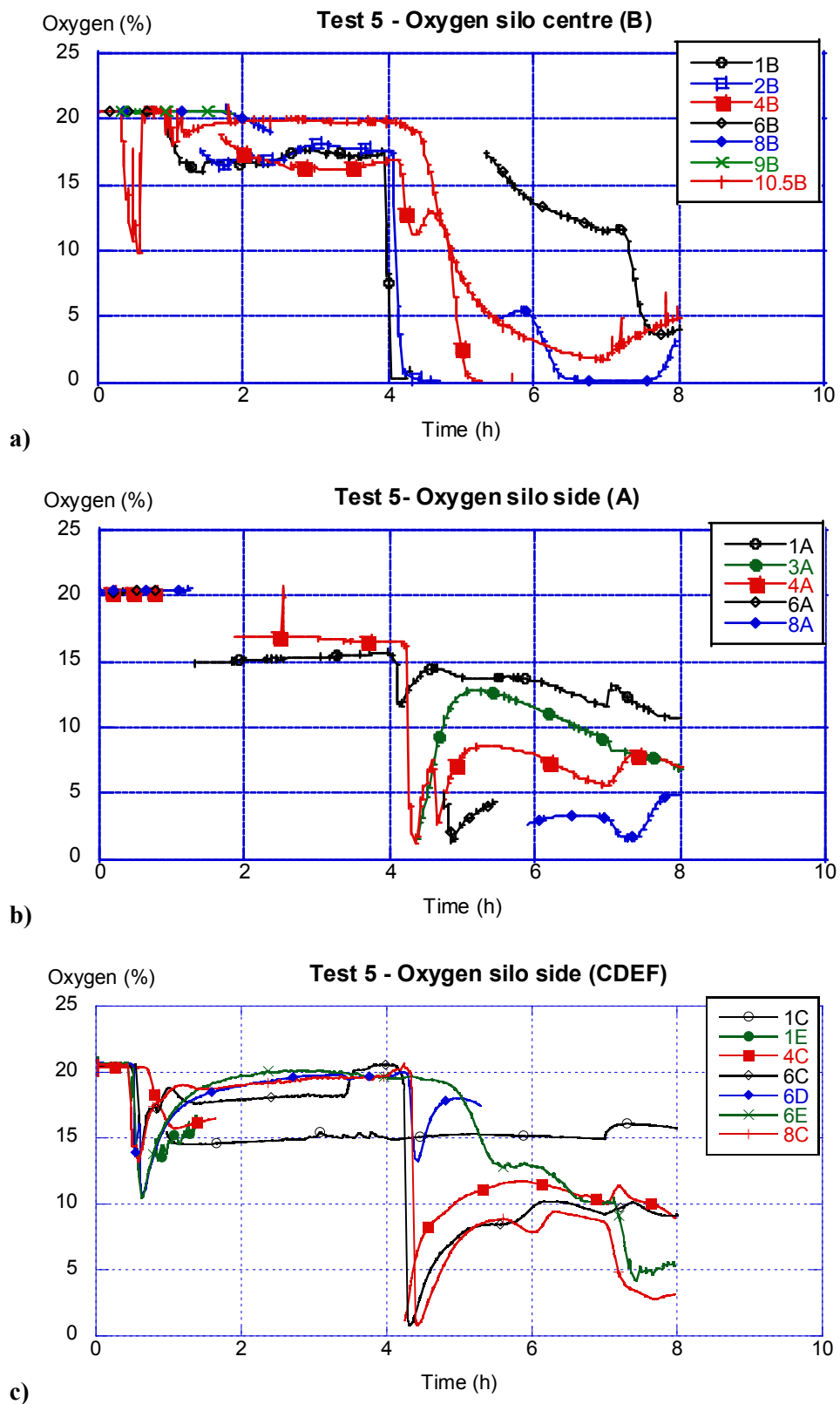
Koldioxidfyllning (0:20-4:00 tim)

Vid pågående tömning av respektive koldioxidflaska noterades en mycket kraftig gasutströmning genom gasutloppet i silotoppen. Mätningar med en anemometer visade på en utströmningshastighet av maximalt ca 10 m/s och en uppskattning är att utströmningshastigheten var ca 8 m/s under 2,5 minuter för vardera flaskan. Detta motsvarar i sin tur en totalt utströmmad volym på ca 25 m³ gas. Mätningarna i gasutloppet visar på en syrgashalt på ca 10-15% (se Figur 28a) vilket indikerar att ca 40% av dessa 25 m³ utgjordes av koldioxid vilket i sin tur motsvarar ca 20 kg vid en genomsnittlig gas-temperatur av 5 °C. Totalt sett innebär detta alltså att ca 20% av koldioxiden ventilerades bort direkt under påföringen.

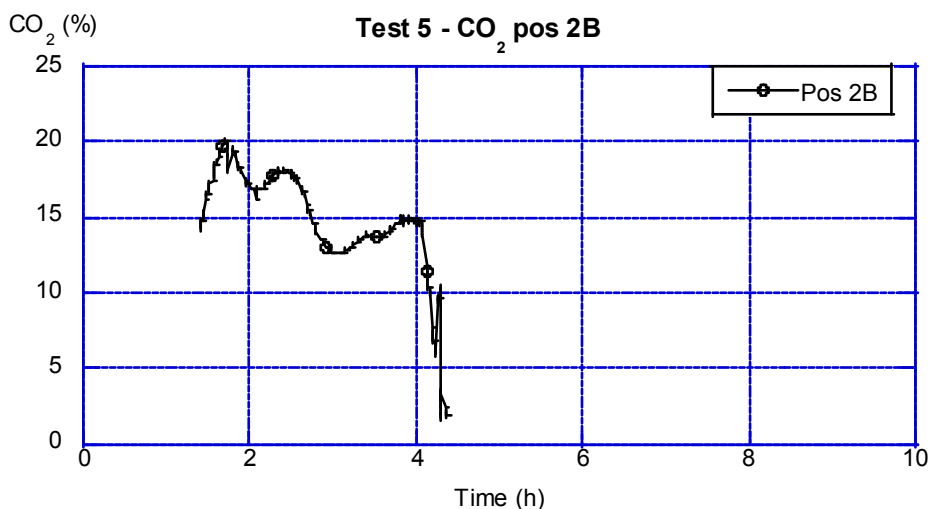
Koldioxidfyllningen ledde till en momentan sänkning av syrgaskoncentrationen och lägst koncentration, ca 10%, erhöles längs silons ena sida (linje CDE, se Figur 28). Syrgashalten ökade därefter igen i de övre mätpositionerna och stabiliserade sig på ca 18-20%. En del gas tycktes sjunka relativt snabbt till silobotten och syrgashalten i pos 1C stabiliserade sig på ca 15% vid försökstiden 1:00 tim. Längs silons centrumlinje noterades ingen påverkan, inte ens i pos 9B, under och strax efter gaspåföringen. Vid försökstiden 1:00 tim uppmättes svagt sjunkande halter i pos 1B, 2B och 4B vilka sedan stabiliserade sig på en syrgashalt av ca 16-18%. Detta framgår även av Figur 29 som visar koldioxidkoncentrationen i position 2B. Koldioxidkoncentrationen uppgick här till maximalt ca 20% strax före 2:00 tim vilket stämmer relativt väl med den uppmätta syrgaskoncentrationen på ca 17% vid samma tidpunkt.

Inte heller längs linje A noterades någon som helst påverkan av gaspåföringen i de övre mätpositionerna men när pos 1A respektive 4A kopplades in efter ca 1:30-2:00 tim uppmättes en stabil syrgashalt på ca 15% respektive 17%.

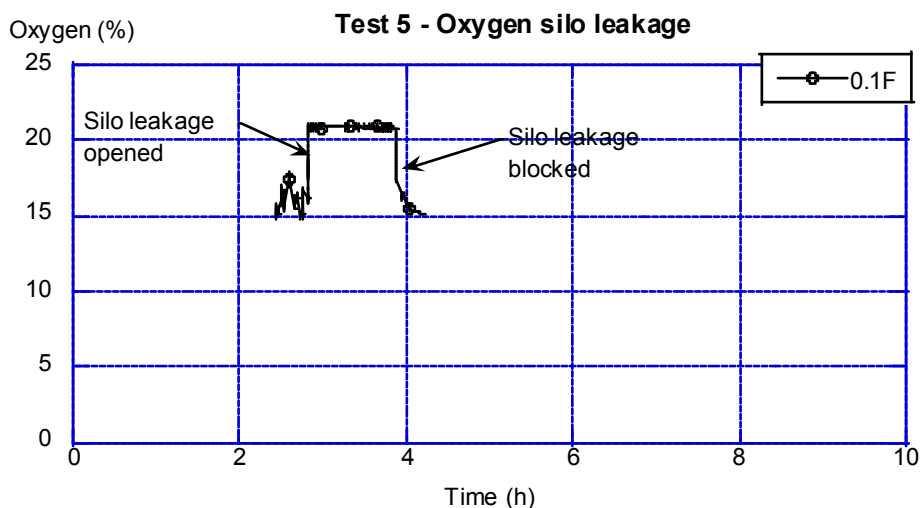
En tolkning av dessa mätdata är att gasen relativt snabbt sjönk ner efter silons ena sida (linje CDE) medan luften i silon pressades upp på silons andra sida längs linje A. Anledningen till att gasen inte sjönk ner längs centrumlinjen kan ha varit att pelletsen där var påverkad på ytan av kondens och att pelletsen sönderdelats till formen av fuktigt sågspån som bildade ett ”lock”. Detta kan ha förhindrat gasen att tränga ner i pelletsen. Gasen som sjönk ner fördelade sig efterhand långsamt i sidled längs silobotten men gav som lägst 15% syrgashalt. Öppnandet av läckaget under tidsperioden 2:50-3:50 tim medförde ingen noterbar påverkan (se Figur 30).



Figur 28 Syrgaskoncentration i de olika mätpositionerna vid försök 5. En momentan gasinmatning med koldioxid gjordes i silotoppen under tidsperioden 20-34 minuter. Gasinmatning i silons centrum, ca 124 kg/tim, inleddes vid tiden 4:00 timmar.



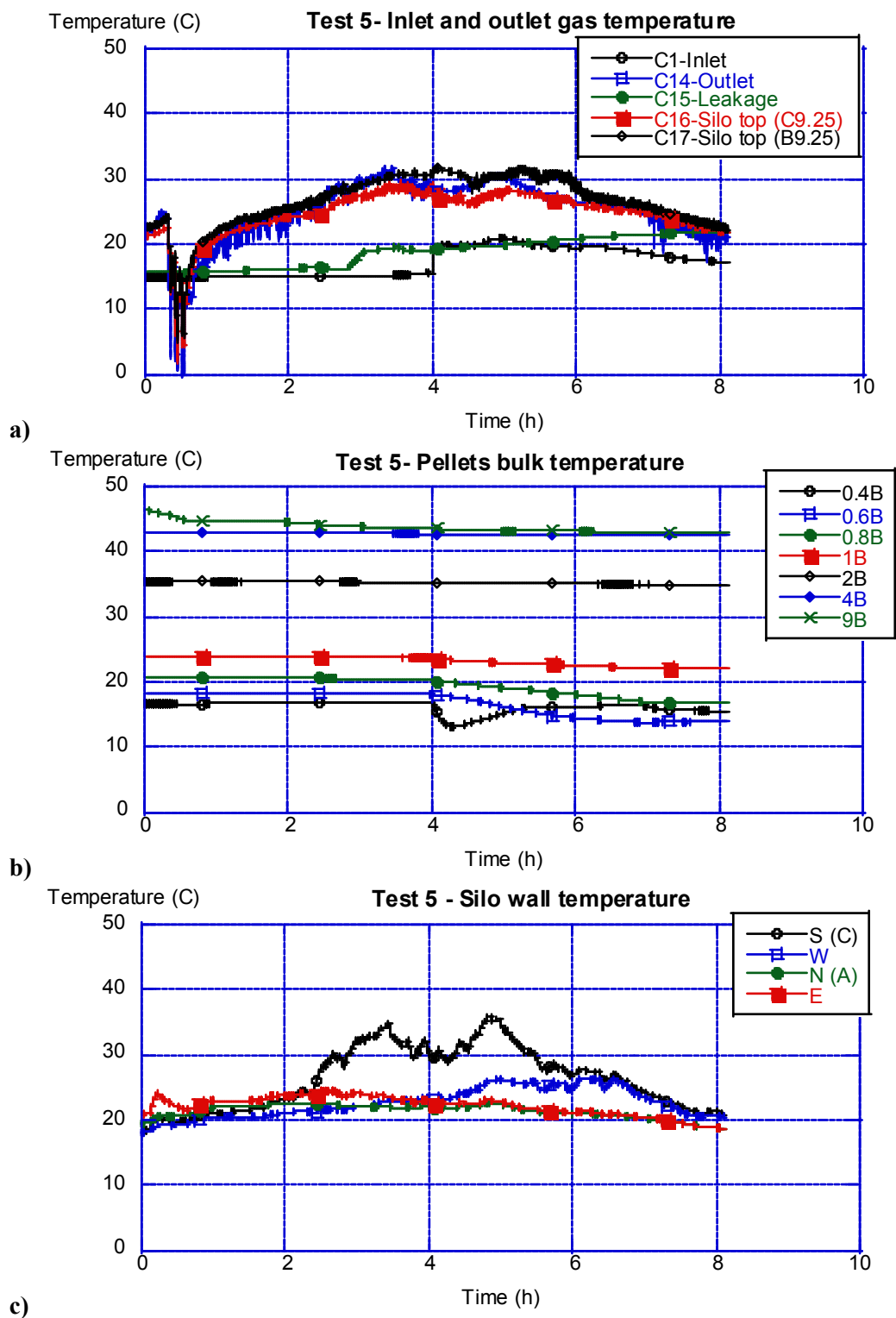
Figur 29 Koldioxidkoncentration i position 2B



Figur 30 Syrgaskoncentration strax innanför läckageöppningen i försök 5. Läckaget öppnades vid tiden 2:50 timmar och tätades vid tiden 3:50 timmar.

Kvävgasfyllning (4:00-7:00 tim)

Kvävgasfyllningen gav som tidigare en omedelbar syrgassänkning i pos 1B och vid tiden 4:08 (ca 8 minuters kvävgasfyllning) var även syrgashalten i pos 2B under 5% (se Figur 28). Inerteringen i positionerna högre upp var dock mer svårtolkad, position 8B understeg 5% syrgashalt vid tiden ca 6:00 tim medan pos 6B fortfarande hade en syrgashalt på ca 12% när kvävgasinmatningen avslutades vid tiden 7:00. Liksom i försök 2 tycktes gasen sprida sig snabbare i sidled och både längs linje A och C sjönk syrgashalten mycket snabbt inom loppet av 15-20 min efter start av gasfyllnaden. Därefter, vid försökstiden ca 4:20, erhålls en markant ökning igen i de flesta mätpositioner längs linje A och C och med något enstaka undantag varierade sedan syrgashalten mellan ca 8-15% fram till kvävgasen stängdes av.



Figur 31 Uppmätt temperatur i försök 5, a) hos inmatad respektive utgående gas, i silotoppen samt vid läckage, b) på olika höjd inne i pelletbulken samt c) på siloväggarna.

Efter kvävgasfyllning

Efter det att kvävgasen stängts av vid försökstiden 7:00 tim kunde man se en markant sänkning av syrgashalten i vissa positioner medan det i andra positioner noterades en höjning. Återigen var detta sannolikt resultatet av att koldioxiden sjönk ner mot botten inom vissa områden i silon medan gas strömmade upp inom andra områden. Denna omfördelning av gas följdes i två separata mätning, dels ca två timmar efter kvävgasinmatningen upphört och dels efter ca 15 timmar. Dessa resultat redovisas i kapitel 4.7.1 nedan.

En summerande slutsats av försöket är att en koldioxidinsats via topputrymmet kan ge en momentan syrgassänkning inom vissa delar av silon men att man inte har någon kontroll över gasfördelningen. En inte försumbar mängd gas förloras också direkt under själva gaspåföringen. En efterföljande kvävgasinmatning tycks påverkas negativt då sannolikt densitetsskillnaden mellan koldioxid och kvävgas påverkar gasfördelningen på ett negativt sätt.

Som komplement till diagrammen nedan presenteras också bilder av koncentrationsfördelningen baserat på uppmätta värden i Bilaga 3.

Temperaturmätningarna inne i silon visade i stort på samma eller något lägre temperatur i de flesta positioner jämfört med försök 4 (se Figur 31a-c). Vid koldioxidinmatningen i silotoppen erhöles en viss sänkning av temperaturen i pos 9B och vid kvävgasinmatningen vid försökstiden 4:00 registrerades också som tidigare en temperatursänkning i pos 0.4B upp till pos 1B.

Som komplement till tidigare instrumentering monterades två extra termoelement ca 5 cm ovanför pelletsytan längs linje B respektive C för att studera koldioxidens kyleffekt. Mätningarna visade att temperaturen i silotoppen sjönk mycket snabbt vid koldioxidpåföringen och var som lägst ca 0 °C. Temperaturen ökade dock snabbt igen och var efter knappt en 1 timma uppe i ca 20 °C igen. Temperaturen steg därefter till som mest ca 30°C på grund av solinstrålning. Solinstrålningen kan också noteras från mätningen av väggtemperaturerna. Liksom i tidigare försök var silotoppen fuktmättad.

4.7.1 Förändringar av inertgaskoncentrationen efter avslutad gasinmatning

Tabell 7 visar uppmätta halter av O₂ och CO₂ i ett stort antal mätpositioner, vid två tidpunkter efter avslutat försök 5. Dessa mätningar gjordes för att se hur koldioxiden som fyllts i silon under försöken fördelade sig efter längre tid.

Efter 2 timmar är O₂ koncentrationen fortfarande relativt hög i den nedre delen av silon, speciellt i den centrala delen. Den övre delen av silon och ytterkanten av bulken (A respektive C, D, E) har lägst O₂ halt och är mest inerterad. Den högsta CO₂-halten hittar man i nedre delen av silon, ut mot sidorna (positionerna 1A, 2A samt 1C). Den centrala kärnan i den nedre delen av silon har alltså inte inerterats. Varken genom koldioxidfyllningen eller genom kvävgasfyllningen.

Efter 15 timmar har det skett en tydlig omfördelning av koldioxiden. Nu har man en relativt jämn fördelning i hela silon från 2 m höjd och uppåt. Man kan notera att den lägsta halten koldioxid återfinns i den nedre delen av den centrala kärnan (positionerna 1B, 2B och 4B) samt att man har en hög syrehalt i dessa mätpunkter. Orsaken till detta är

inte klar men troligen har luft ventilerats in här via centruminloppet i samband med att gasinmatningen avbröts. Man ser också att syrehalten stigit generellt i mätpunkterna längre upp i silon.

Tabell 7 Uppmätt halt syrgas, O₂, samt koldioxid, CO₂, vid två tidpunkter efter försök 5.

Position	+2 tim		+15 tim	
	O ₂	CO ₂	O ₂ *)	CO ₂ *)
10.5B	6.5	1.6	10.5	5.1
9B	8.3	1.3	12.0	6.5
8A	5.1	5.9	9.1	5.3
8B	8.7	1.4	13.2	6.4
8C	4.2	2.7	9.8	5.3
6A	7.4	8.9	9.1	5.1
6B	11.2	1.9	15.4	5.8
6C	9.2	8.3	10.0	5.2
6D	6.3	2.4	10.3	5.2
6E	6.8	1.5	10.4	5.2
4A	6.3	9.5	9.2	5.1
4B	16.7	2.6	17.9	4.4
4C	6.6	8.0	10.1	5.2
3A	6.0	9.6	9.3	5.1
3B	19.3	2.0	19.2	3.0
2A	8.2	11.1	9.7	5.3
2B	20.2	1.6	20.1	1.7
1A	11.2	12.8	10.9	10.9
1B	20.5	1.1	20.6	0.65
1C	16.1	14.0	13.4	11.9
1D	16.3	12.8	14.1	9.9
1E	17.5	8.7	15.7	5.3
0.1F	16.7	16.8	15.9	12.1

*) Grön färgmarkering indikerar ökad koncentration, violett en liten minskning och röd en tydlig minskning.

4.8 Tryckfallsmätningar över gasinlopp och silobädd

Som beskrivits ovan visade mätningar av trycket före gasinloppet respektive tryckfallsmätningarna över bulkmaterialet (mätposition 1A-8A, 1B-8A) på mycket låga tryck i samtliga fem fyllnadsförsök. För att få fram ytterligare uppgifter kring vilka matningstryck som erfordras från kvävgassystemet gjordes ett antal tryckfallsmätningar med högre gasflöden än vad som använts i försöken. Mätningarna gjordes dels över ett friliggande gasinlopp motsvarande de två som användes i försökssilon, dels över det centriskt placerade gasinloppet i silons botten (se Figur 32). Eftersom det i vissa fall kan vara aktuellt att mata in gas via en lans som trycks in i bulkmaterialet från silomanteln, gjordes några mätningar även med en sådan utrustning. Vid inmatningsförsöken i silon mättes även tryckfallet över pelletsbulken mellan mätposition 1B och 8A.

Vid försöken reglerades flödet genom inloppet stegvis till 150, 300, 450, 600 kg/tim samt dessutom maximalt öppet vilket innebär att flödesmätaren på gasutrustningen ”bottnade”. För varje flöde avlästes systemtrycket vid gasflödesmätaren samt gastrycket strax före gasinloppets mynning. Flödet genom lansen reglerades i steg om 50 kg/tim upp till det maximala flöde som kunde uppnås.

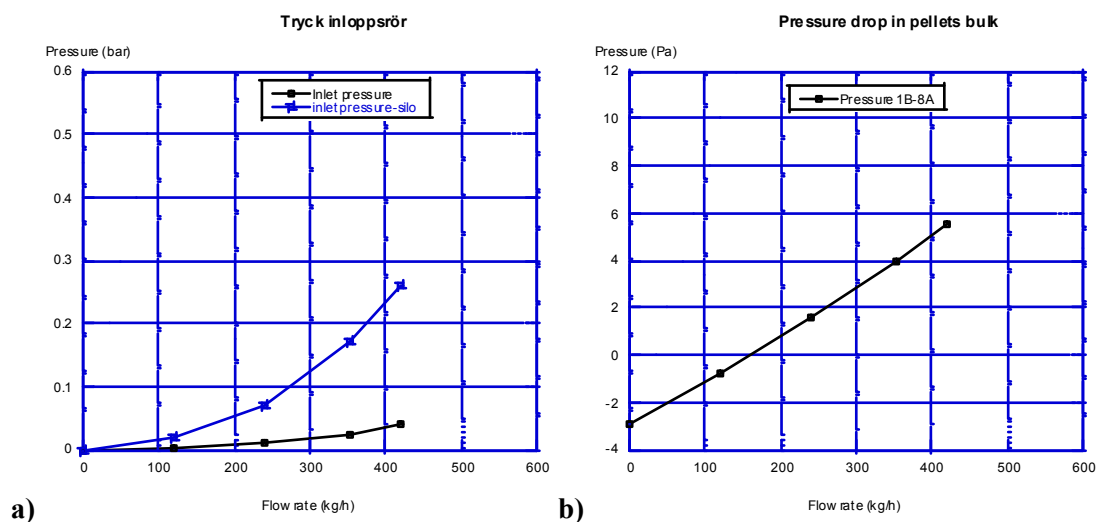


Figur 32 Foto av gasinloppet i silons centrum respektive motsvarande friliggande gasinlopp.

Resultaten från mätningarna redovisas i Figur 33 och Figur 34 där avläst flöde omräknats till verkligt flöde enligt samma princip som redovisats i kapitel 3.1.2. I diagrammet i Figur 33a redovisas dels matningstryck kontra gasflöde för det friliggande gasinloppet och dels matningstrycket vid gasinloppet monterat på silon. Som framgår av diagrammet är tryckfallet över det friliggande gasinloppet relativt lågt, ca 0,05 bar vid ett flöde på ca 420 kg/tim. Vid matning in i silon behövs dock ett betydligt högre matningstryck, ca 0,25 bar, för att erhålla samma flöde. Vid max flöde genom gasutrustningen erhöles ett matningstryck på ca 0,1 bar vid det friliggande inloppet och ca 0,5 bar vid inloppet till silon. Det verkliga gasflödet har ej kunnat bestämmas men uppskattas till ca 550 kg/tim om uppmätta tryckfallskurvor extrapoleras. Skillnaden i erforderligt matningstryck kan alltså tillskrivas det tryckfall som pelletsen i silon ger upphov till, främst närmast inmatningsöppningen.

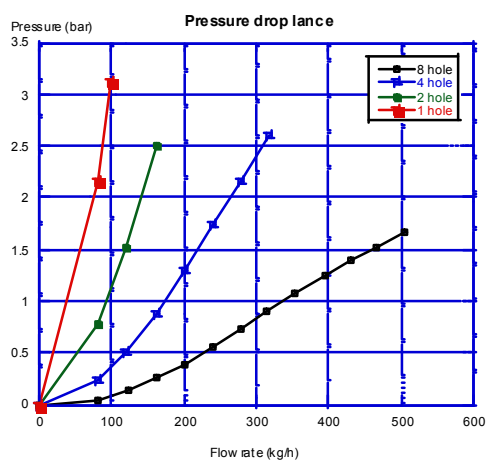
I Figur 33b visar på uppmätt tryckfall över pelletsbulken mellan position 1B och 8A, dvs ett pelletsdjup på ca 7 m. Som framgår av diagrammet uppmättes ett negativt tryckfall vid noll-flöde vilket överensstämmer med mätningarna under fyllnadsförsöken.

När inmatningsflödet ökas erhålls dock ett tydligt tryckfall över pelletsbulken och vid ca 420 kg/tim uppgick detta till ca +5,5 Pa, vilket motsvarar ett absolut tryckfall på ca 8,5 Pa jämfört med noll-flöde. Vid max flöde genom anläggningen (uppskattat till ca 550 kg/tim) uppmättes ett tryckfall på 10,4 Pa, dvs ett absolut tryckfall på drygt 13 Pa.



Figur 33 Diagrammen visar a) erforderligt matningstryck över friliggande gasinlopp respektive motsvarande inlopp i silon, b) tryckfall över pelletsbulk mellan position 1B och 8A

I Figur 34 redovisas uppmätt matningstryck som funktion av gasflödet genom den rörformade lansens försedd med 1 till 8 hål med vardera en diameter av 6 mm. Tryckfallet blev här naturligtvis betydligt högre jämfört med gasinloppet som hade betydligt större fri hålaarea.



Figur 34 Tryckfall över lans med 1 till 8 st Ø 6mm hål

Baserat på ovanstående mätningar kan man grovt beräkna utströmningkoefficienten (k -värdet) för de olika utloppen. K -värdet är specifikt för varje typ av öppning och med hjälp av detta kan flödet beräknas för olika matningstryck med sambandet:

$Q = k \times \sqrt{P}$, där Q är flödet (kg/tim) och P är matningstrycket (bar)

Om man utgår ifrån uppmätta värden så innebär detta att använt gasinlopp har ett k -värde på ca 2100 kg/tim bar⁻² (420 kg/tim vid 0,04 bar). På samma sätt kan k -värdet för ett 6 mm hål beräknas och utgående från genomförda resultat med 1-8 hål så erhålls ett k -värde på ca 45-50 kg/tim bar⁻² per hål. Trots att geometrin skiljer mellan den perforerade plåten och de borrade hålen i lanser så kan man se att det finns en korrelation mellan beräknade k -värden och den sammanlagda hålarean. Den fria hålarean för den perforerade plåten uppgår till ca 13 cm² (64 hål a Ø 5 mm) medan den för ett enskilt Ø 6 mm hål uppgår till 0,283 cm². Detta innebär således att hålarean i gasinloppet motsvarar arean hos 45 st Ø 6 mm hål och om k -värdet för ett enskilt hål multipliceras med 45 hål erhålls ett totalflöde på 2025-2250 kg/tim vid 1 bars tryck. Motsvarande beräknat flöde med mätroret uppgår till ca 2100 kg/tim. Orsaken till denna överensstämmelse beror sannolikt på att varje enskilt hål har nästan samma dimension och samma geometri.

5 Permeabilitetsbestämning och karaktärisering av pellets

En viktig egenskap för att kunna simulera en gasfördelning inne i silon är bulkmateriallets permeabilitet, dvs genomsläpplighet av gas och hur denna varierar inne i silon. Vid hantering av pellets uppstår alltid ett ”slitage” av pelletsen vilket leder till att det bildas en finfraktion bestående av träpulver och små pelletsbitar (i detta projekt definierad som massfraktionen < 4 mm). Vid tillverkningen komprimeras träpulver till pellets vilket ger en densitet som är högre än ursprungligt trä. Den finfraktion som sedan bildas kommer att ha något lägre densitet, sannolikt dock inte så låg som densiteten hos det ursprungliga träpulvret. När materialet fylls i en silo koncentreras finfraktionen till landningszonen inne i silon. Eftersom det bildas en konformad yta innebär detta en ”självållning” så att större partiklar, i detta fall ”rena” pellets rullar ner längs ytan medan finfraktionen stannar kvar. Andelen finfraktion kan variera ganska kraftigt, från mindre än 1 % till över 10 % räknat på en större volym och i vissa positioner, där finfraktionen har en tendens att ansamlas, kan den uppgå till i storleksordningen 25 %. Eftersom finfraktionen till olika grad kommer att blockera utrymmet mellan enskilda pellets innebär detta också att permeabiliteten kan variera inne i silon.

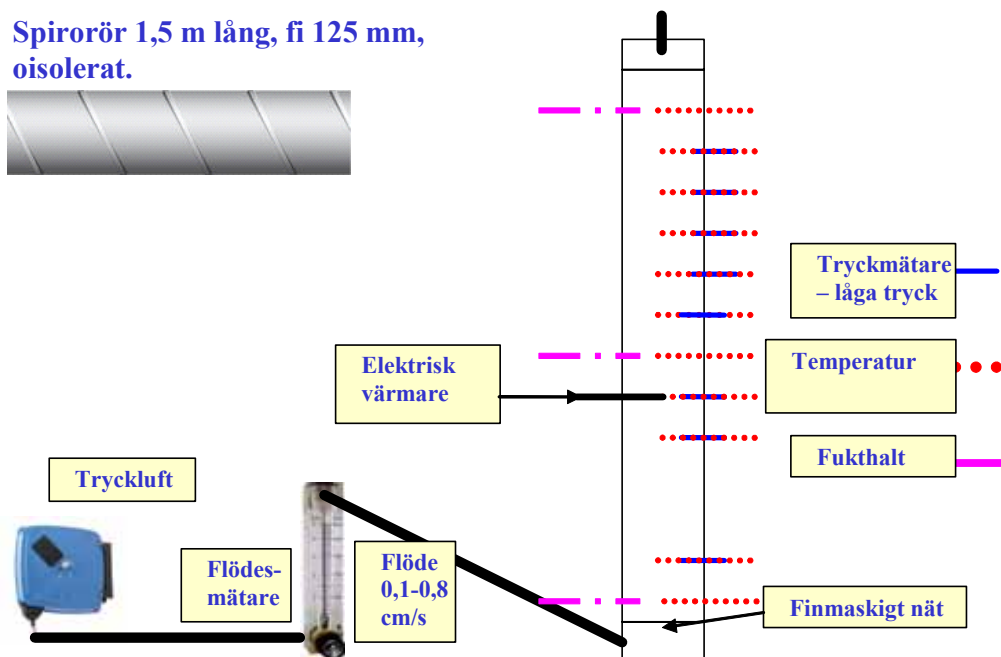
För att kunna beakta detta på ett relevant sätt vid simuleringar av gasfördelningen behövs alltså uppgifter om hur olika andel finfraktion påverkar permeabiliteten. En annan orsak till permeabilitetsförändringar är fuktvandring inne i pelletsen vilket kan uppstå under t ex förstadiet till en självantändning där temperaturgradienter inne i bulkmaterialiet driver på en fuktvandring. När pelletsen blir fuktig kan denna svälla något samtidigt som varje enskild pellets blir mer skör och faller sönder och skapar finfraktion.

För att undersöka dessa faktorer har en serie tryckfallsmätningar genomförts med strömmande luft genom pellets med varierande grad av finfraktion. Några försök har dessutom genomförts där en förbränning startas inne i pelletsen för att studera hur detta påverkar tryckfallet. Baserat på tryckfallsmätningarna har därefter permeabiliteten kunna beräknas vilken sedan använts som indata vid genomförda simuleringar av gasdistributionen inne i en silo. Försöken har genomförts vid LTH-Brandteknik.

Som en del i detta arbete har också den pellets som användes i gasfyllnadsförsöken undersökts, främst avseende andel finfraktion i silon. Baserat på detta kunde bättre uppgifter erhållas om permeabiliteten inne i försökssilon vilket i sin tur skapar bättre förutsättningar för en jämförelse mellan försöksdata och simuleringar.

5.1 Tryckfallsmätningar vid genomströmningsförsök

Försöken genomfördes i ett med pellets fyllt vertikalt stående rör med kontrollerat konstant luftflöde som strömmade genom röret. Både pellets och strömmande luft hade en temperatur av ca 20 °C. Rörets dimension var 1,5 meter högt och ϕ 125 mm motsvarande en tvärsnittsarea av 0,0123 m². Torkad luft från tryckluftssystemet i en kammare i rörets botten och fick sedan strömma upp igenom pelletsen. Trycket mättes på olika höjder genom att 6 mm hål borrades i plåten och plastslang drogs fram till tryckmätaren. I ”förbränningsförsöken” startades en pyrolys inne i pelletsen med hjälp av en elektriskt upphettad kanthaltråd. I dessa försök mättes dessutom temperatur och luftfuktighet inne i pelletsen på olika höjd i röret. En skiss av försökssupställningen framgår av Figur 35.



Figur 35 Skiss av försöksuppställning vid tryckfallsmätningarna. Luft matades in i en kammare vid rörets botten och fick sedan strömma upp igenom pelletsen. Under försöken uppmättes tryckfall och i förbränningsförsöken även temperatur och fuktighet inne i pelletsen.

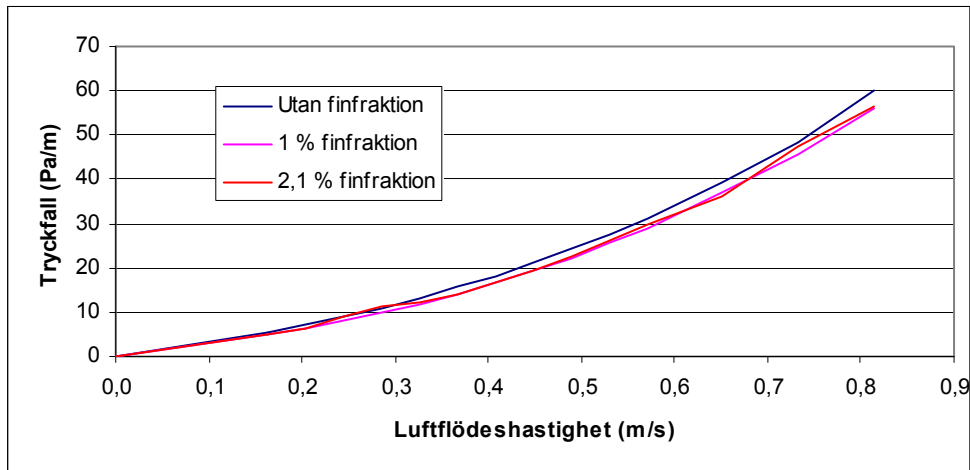
5.1.1 Försök med olika halt finfraktion

Pelletsen som användes vid dessa försök hämtades i Karlshamn från Aarhus Karlshamn AB och bestod av restfraktionen från botten av en silo som tömts. Finfraktionen på pelletsen var därför redan från början hög, igenomsnitt ca 10 %.

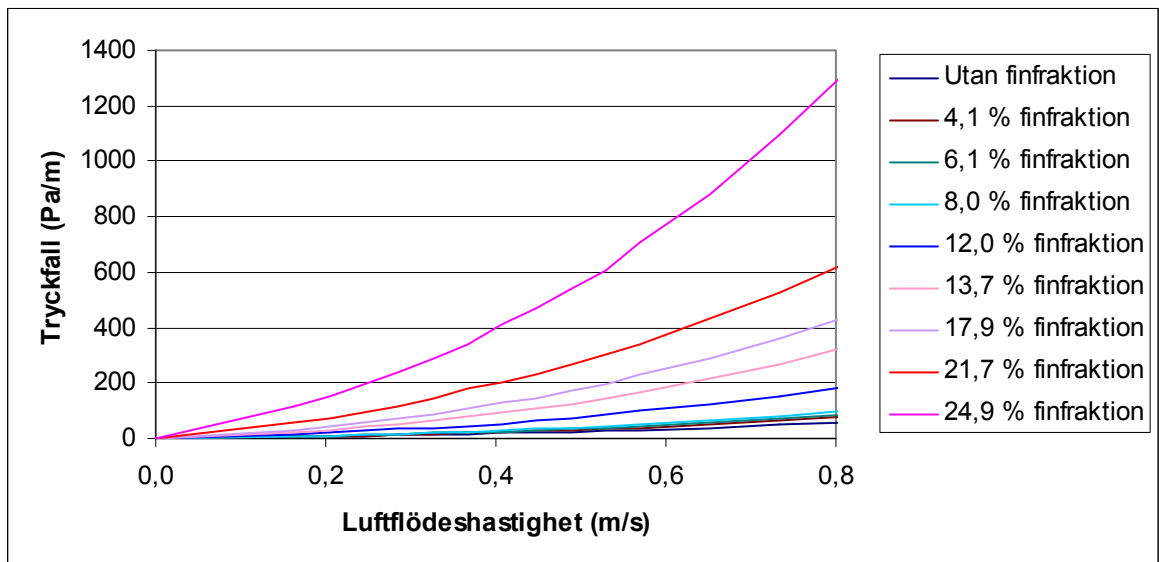
Vid provningen delades pelletsen först upp i hela pellets samt finfraktion och därefter adderades finfraktion efter hand till provningsröret. Trots att finfraktion adderades ökade volymen inte mer än marginellt, varför skrymdensiteten efter hand ökade med finfraktionens vikt.

Att fördela finfraktion i volymen är ett stort problem. Oavsett hur den blandas in kommer den sannolikt att koncentrera sig i någon del av röret. Vid dessa försök adderades finfördelningen ovanifrån och hela röret vändes därefter ett större antal gånger fram och tillbaka innan slangarna till tryckluftsmatningen respektive tryckgivarna monterades på kanalen.

En serie tryckfallsmätningar genomfördes med olika mängd finfraktion och för varje enskild försöksserie varierades luftflödet igenom pelletsen stegvis så att detta motsvarade en flödes hastighet upp till 0,8 m/s (hastighet i röret utan pellets). Resultaten från dessa försök redovisas i Figur 36 och Figur 37 och som framgår av dessa innebär inte halter understigande ca 2% någon större skillnad i permeabilitet men därefter börjar påverkan bli markant.



Figur 36 Tryckfallsmätningarna vid låga halter av finfraktion, under 2 %, visar ingen märkbar skillnad i permeabilitet.

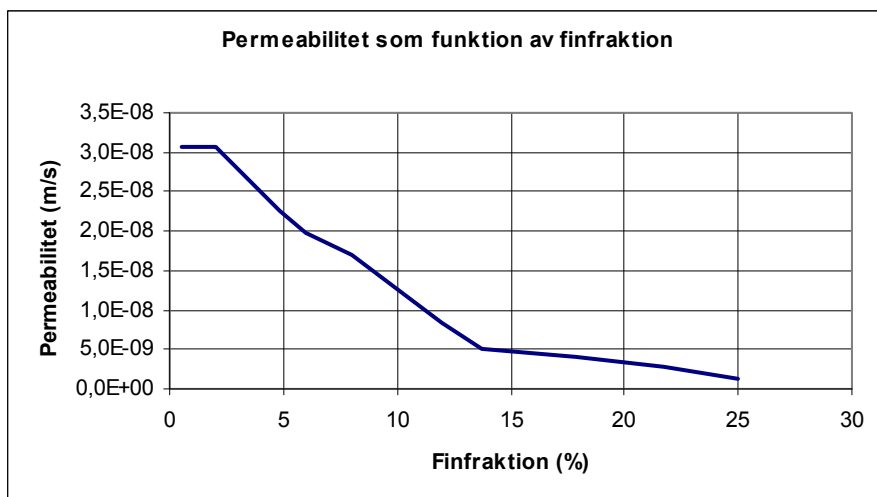


Figur 37 Tryckfallsmätningarna vid högre halter finfraktion, överstigande 5 %, uppvisar väsentligt större tryckfall och därmed lägre permeabilitet.

Permeabiliteten kan uttryckas på olika sätt. Vanligt är dock att räkna ut permeabiliteten k som funktion av viskositeten μ , flödet Q , Areal A samt tryckfallet Δp över längden L .

$$k = \frac{2\mu QL}{A\Delta p}$$

I Figur 38 presenteras den beräknade permeabiliteten som funktion av halten finfraktion där man kan se en tydlig minskning av permeabiliteten när halten finfraktion överstiger ca 2%.



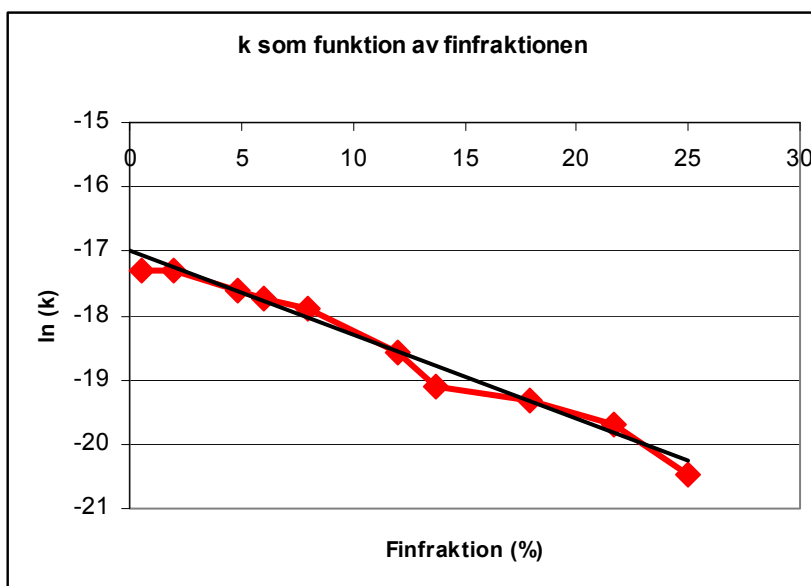
Figur 38 Permeabilitet uttryckt som funktion av finfraktion. Vid låga halter av finfraktion viker kurvan av och någon påverkan kan ej ses.

För att undersöka sambandet mellan andel finfraktion och permeabilitet har resultaten logaritmerats vilket resulterar i en i stort sett rät linje, se Figur 39. Detta innebär att sambandet mellan finfraktion och permeabilitet (k) kan beskrivas med en exponentiell funktion och den rätta linjen i figuren motsvarar $k = -0,13 \times -17$. Permeabiliteten kan således uttryckas genom sambandet;

$$k = e^{(f_r * (-0,13) - 17)}$$

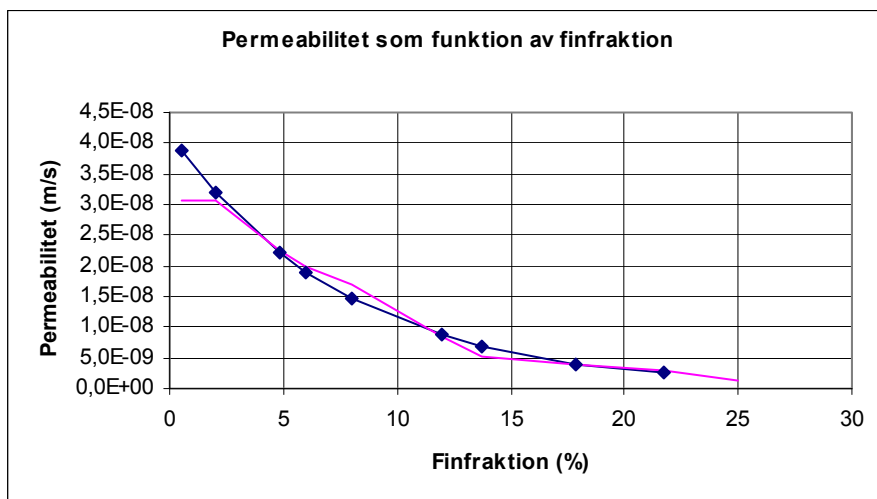
där f_r anger andelen finfraktion i % och permeabiliteten (k) erhålls i enheten m/s.

Viskositeten μ för det strömmande mediet, luft, är antagen till $20,76 \text{ m}^2/\text{s} * 10^{-6}$.



Figur 39 Permeabiliteten, betecknad som k , uttryckt som funktion av finfraktionen.

I Figur 40 visas en jämförelse mellan uppmätt respektive beräknad permeabilitet enligt sambandet ovan och som visar på en mycket bra korrelation vid en halt finfraktion överstigande ca 2%.

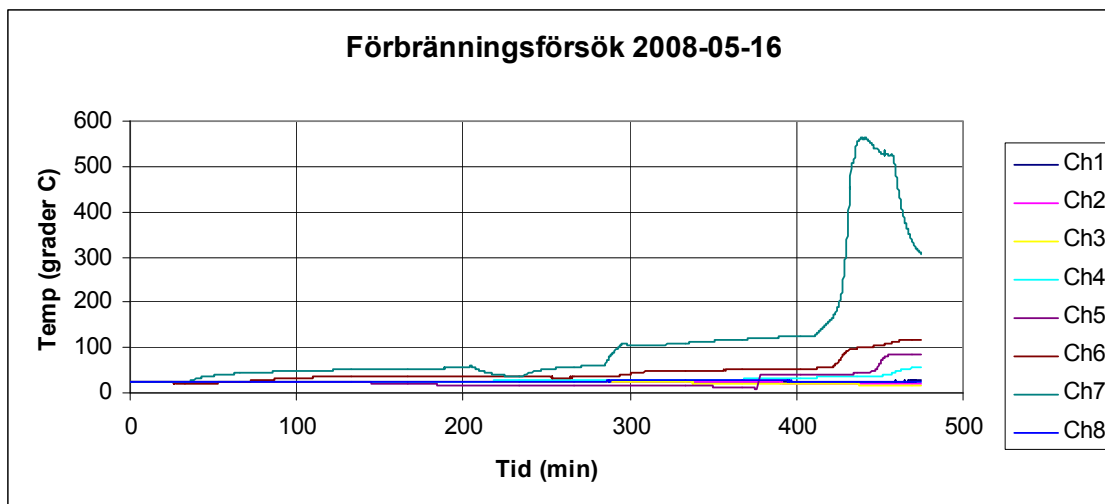


Figur 40 Uppmätt permeabilitet jämfört med beräknad enligt den föreslagna formeln visar på en god överensstämmelse när andelen finfraktion överstiger ca 2%.

5.1.2 Försök med förbränningsförhållanden i pelletsen

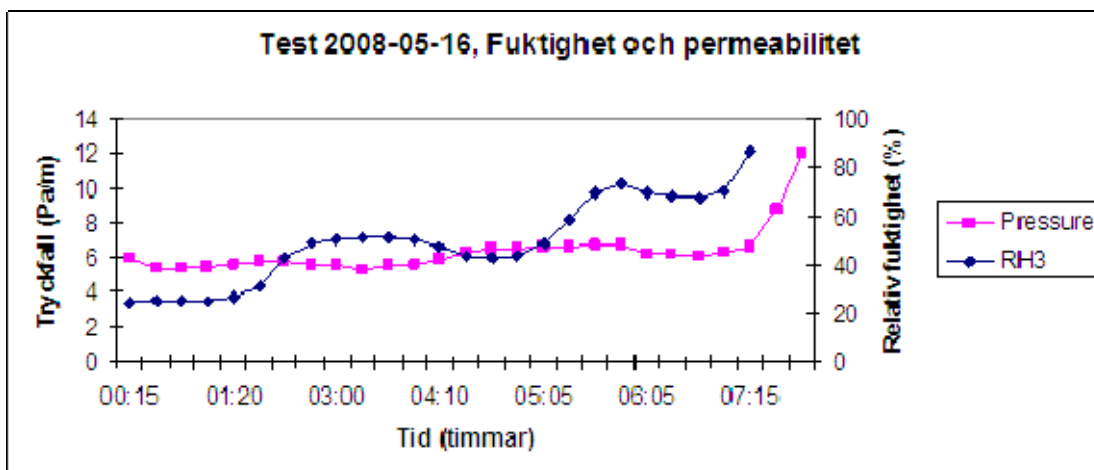
För att skapa en pyrolys i röret användes en elektriskt matad kanthaltråd inne i pelletsen på ca halva höjden av mätröret. Genom denna uppställning kunde temperaturen höjas efter hand i centrum och pyrolysen till en början styrs av tillförd effekt. För att förse pyrolysen med syre matades ett lågt, konstant luftflöde genom pelletsröret. Temperaturstegringen var ganska långsam i de delar som inte direkt värmdes av tändtråden. Värmareffekten var ca 200 W medan den tillförda luften, ca 2 l/s eller ca 0,16 m/s, optimalt kan ge ca 6 kW värme och i vårt fall med lägre temperaturer kanske högst 3 kW. När förbränningen väl tagit fart och temperaturen stigit till 400- 500 grader styrdes pyrolysen och förbränningen av syretillgången och i viss mån av värmeledning och konvektion.

I Figur 41 visas ett exempel på temperaturutvecklingen inne i pelletsen under ett förbränningsförsök. Kanal 1-8 var placerade 20, 30, 40, 50, 60, 80, 90 respektive 100 cm från toppen av röret. Värmetråden aktiverades direkt vid start av försöket och därefter kan noteras en långsam temperaturstegring ovanför denna. Efter ca 300 min 5 tim översteg Ch 7 (placerat närmast spiraltråden) 100 °C vilket sannolikt innebar en snabb uttorkning och efter drygt 400 min steg temperaturen kraftigt till max ca 550 vilket innebar en fullt utvecklad glödbrand i denna position. En temperaturstegring kan också noteras i tur och ordning vid termoelement Ch 6, 5, 4 då värmen spred sig uppåt. Under värmaren (därifrån luftflödet kommer) noterades ingen temperaturhöjning. Att värmen i detta fall endast spred sig uppåt berodde sannolikt på det påtvingade luftflödet genom röret.



Figur 41 Resultaten visar att en långsam temperaturspridningen erhöles uppåt i röret. Luftflödet i röret var 2 l/s i kanalen.

I Figur 42 redovisas uppmätt tryckfall respektive fukthalten i toppen av i mät-röret under förbränningsförsöket. Som framgår av detta är tryckfallet relativt opåverkat fram till den markanta temperaturstegringen vid värmetråden (Ch 7). Ungefär samtidigt kan man också notera att fukthalten stiger markant i mät-rörets övre del. Fukthalten ökar redan i ett relativt tidigt skede av försöket, vilket är resultatet av uppvärmning och uttorkning av pelleten runt värmetråden, men först när luftfuktigheten blir riktigt hög, upp mot 80-90 %, som vi ser att tryckfallet ökar brant.



Figur 42 Tryckfallet varierade inte mycket under försöket förrän just mot slutet av försöket när förbränningen närmar sig övre fuktmätaren placerad 10 cm från rörets övre kant. Fukten som frigjordes vid förbränningen kondenserade i ganska stor utsträckning i rörets övre del. När fukthalten nådde nära 100 % och vattnet började kondensera, kunde inte fuktmätaren mäta fukthalten längre.

Förklaringen till detta antas vara att uppvärmningen och erhållen glödbland skapade en fuktransport under större delen av försöket vilket medförde att träpelletsen ovanför denna

värmezonen successivt absorberade denna fukt. När en kraftig stegring av uppmätt fukthalt noterades i mättrörets topp, innebar detta att fukttransporten nått ända upp till pelletsytan och i detta läge konstaterades också omfattande kondensation i mättrörets topp. I detta skede har alltså pelletsen ovanför värmezonen absorberat relativt stora mängder fukt vilket sannolikt också fått pelletsen att så småningom svälla och falla sönder. Detta resulterade i sin tur i en successivt minskad porositet och därmed minskad permeabilitet.

Förbränningsförsöket med det påtvingade flödet visar också på begränsningen i att kyla ett uppvärmt material genom ventilering/gasinmatning. Eftersom massflödet, och därmed energiinnehållet ($m \cdot c_p$), hos det flödande mediet, luft respektive pyrolysisprodukter, är betydligt lägre än massan av pelletsen, kommer värmeflödet genom konvektion att bli väldigt långsam. Temperaturen hos den flödande gasen kommer i varje punkt endast marginellt att skilja sig från det fasta materialets temperatur. Värmeflödet blir då bara lite högre än vid ren ledning och det blir mycket svårt både att värma upp, men också att kyla ned, ett pelletslager med hjälp av gas av annan temperatur, vilket framgår av följande exempel.

Antag att pelletsen i en silo är 80 grader och skall kylas ned 10 grader till 70 grader. Om luft som passerar genom silon skall kunna bära bort den värmen krävs en luftmängd som är ca 10 % av pelletens massa. Med $1 \text{ m}^3/\text{s}$ i luftflöde i en 10000 m^3 silos krävs det $10000 \cdot 500 \text{ kg/m}^3 = 5\,000\,000 \text{ kg}$ luft, dvs det tar 4 miljoner sekunder motsvarande ca 45 dygn.

5.2 Karaktärisering av pellets från försökssilon

I samband med fyllning gjordes några provuttag inne i silon för att få en uppfattning om hur kvalitén/andel finfraktion varierade med positionen inne i silon. Av praktiska skäl gjordes dessa uttag när silon var nästan full respektive efter avslutad fyllning.

Ett första provuttag gjordes när toppen av pelletshögen hade en höjd av ca 8,5 m. Högen skyfflades då isär ner till strax under 8-m nivån och ett provuttag gjordes i silons centrum, i princip rakt under inblåsningsöppningen (position 8B). Efter avslutad fyllning planades pelletshögen ut helt och vilket resulterade i en slutlig fyllnadshöjd på ca 9,2 m. Pelletsprover togs därefter ut i position 9A respektive 9.2B (dvs rakt under inblåsningsöppningen).

Vid tömning av silon (se kapitel 3.3) togs ett antal pelletsprover ut, dels fyra prover från materialet på silotoppen innan tömningen inleddes, dels tolv prover från det uttrinnande materialet.

Nedan ges en sammanställning av samtliga uttagna prover där också uppmätt halt finfraktion respektive fukthalten hos provtagen pellets bestämts.

Tabell 8 Analys av pellets från provuttag gjorda i samband med fyllning respektive tömning av försökssilon

Beteckning	Kommentar	Finfraktion (< 4 mm) (%)	Fukt *) (%)
8,0B	Uttag vid fyllning	18,8	2,6
9,0A	Uttag vid fyllning	0,3	2,8 1)
9,2B	Uttag vid fyllning	7,4	2,6
9,2B	Före tömning, prov från ytan	99,2	38,6
9,0B	Före tömning, ca 0,2 m under ytan	4,5	3,1
9,0C	Före tömning, ca 0,2 m under ytan	3,0	5,2
9,0E	Före tömning, ca 0,2 m under ytan	1,7	5,5
1	Vid tömning, skopa 1- (ca 0,5 m ³)	4,2	1,6
2	Vid tömning, skopa 1- ¼ full (ca 1,5 m ³)	11,1	2,4
3	Vid tömning, skopa 1- ½ full (ca 3 m ³)	14,4	1,3 2)
4	Vid tömning, skopa 2- ½ full (ca 9 m ³)	11,5	1,6
5	Vid tömning, skopa 2-full (ca 12 m ³)	11,4	2,1
6	Vid tömning, skopa 3-full (ca 18 m ³)	9,7	2,1
7	Vid tömning, skopa 4- ¾ full (ca 23 m ³)	8,3	1,7 2)
8	Vid tömning, skopa 5- ½ full (ca 26 m ³)	7,0	1,7
9	Vid tömning, skopa 6- ½ full (ca 32 m ³)	5,4	2,3
10	Vid tömning, skopa 7- ½ full (ca 38 m ³)	4,7	2,2
11	Vid tömning, skopa 8- ½ full (ca 44 m ³)	3,6	1,1
12	Vid tömning, skopa 25- ½ full (ca 150 m ³)	2,0	2,0

*) Fukthalt uppmätt 08-09-02, medelvärde av två prover (lagrade i plastpåse från provtagningstillfället)

1) Hål i påsen under lagring

2) Stor spridning mellan de två proverna ($\geq 0,5\%$)

Resultatet av provet i position 8,0B i samband med fyllning visar på en mycket hög andel finfraktion medan andelen var något lägre i position 9,2B efter avslutad fyllning. Detta kan eventuellt bero på att materialet skyfflats isär och att provet inte var helt representativt. Provet i Position 9,0A visar dock att finfraktionen var betydligt lägre ut mot silons kant vilket också kan bekräftas av våra visuella observationer. Provuttaget på ytan i pos 9,2B efter försöket bekräftar att fukttransport och kondensation leder till att pelletsen tar upp mycket fukt och därmed sväller och faller isär så att det i princip bara återstår en finfraktion.

Provuttagen i samband med tömning är naturligtvis omöjliga att lokalisera till en specifik position inne i silon men bedömningen är att det utströmmande materialet inledningsvis kommer ifrån silons centrum rakt ovanför utloppet. Det första provuttaget härrör därmed från del pellets som tömdes från säckar ner i utmatningskonan för att täcka gasinloppet (se kapitel 3.3). Därefter innehåller de första 10-15 m³ av utströmmande pellets förhållandevis hög andel finfraktion för att därefter successivt sjunka ju mer som tömts ut och ju mer material som därmed kom ifrån silons ytterkanter.

I samband med tömningen av silon gjordes även några provuttag och analyser av detta material av Agroenergi's personal (se Tabell 9). Dessa prover togs på tre ställen i den hög där lastmaskinen tippade utmatad pellets. Syftet var att få en erfarenhetsmässig bedömning av pelletsen efter genomförda försök för att bli avgöra i vilken mån den upprepade inmatningen av kvävgas respektive luft påverkat pelletsen på ett signifikant sätt.

Tabell 9 Resultat enligt Agroenergi's analysprotokoll efter tömning av pelletsen

Prov	Vikt före	Vikt efter	Råvikt	Torrsvikt	Max längd	Volymvikt	Snabbprov fukt
1	4738	12,0	300	278,9	24	627	6,03
2	4696	16,0	300	278,7	22	621	6,12
3	4780	13,0	300	278,5	23	635	6,19

Baserat på analysresultaten gjordes bedömningen att pelletsen kvalitetsmässigt fortfarande höll "försäljningskvalitet". Hanteringen av pelletsen, både vid fyllningen och tömningen, samt kondensbildningen på silotoppen medförde naturligtvis en ökad finfraktion men detta är något som ändå siktas bort innan leverans. Uppmätt max-längd hos de enskilda pelletsen var också några millimeter kortare än vad som är fallet med nyproducerad pellets men detta bedöms i sig inte vara kvalitetsnedsättande.

Slutsatsen är således att inverteringen av silon med kvävgas i sig inte har påverkat pelletsen på annat sätt än att kondensbildningen i silotoppen medförde en ökad finfraktion. På insidan av det simulerade läckaget noterades en "kakbildning" som orsakats av luftfuktigheten i inströmmande luft, se Figur 43.



Figur 43 Foton som visar kondensbildning i pelletsen på silotoppen efter försöken samt ”kakkbildning” på insidan av läckageöppningen vid silobotten.

6 Jämförelse av försök och simuleringar

I följande kapitel görs några jämförelser mellan erhållna experimentella data och genomförda simuleringar. I detta fall har endast beräkningsprogrammet COMSOL använts då det inte varit fråga om någon brand eller pyrolys i silon. Även om försöken var väl kontrollerade så är det uppenbart att förhållandena inte var helt likformiga inne i silon, bl a varierade temperaturen inne i bulken och man kan också konstatera att andelen finfraktion, och därmed permeabiliteten, varierade över tvärsnittet och sannolikt också i höjddled.

För att undersöka hur dessa faktorer påverkar gasdistributionen har simuleringar genomförts dels med likformiga (isotropa) förhållanden inne i hela silon (kapitel 6.1) på samma sätt som i de preliminära simuleringarna före försöken men dessutom har simuleringar genomförts med anisotropa förhållanden där både bulktemperaturen och permeabiliteten varierade (kapitel 6.2). I båda fallen har förutsättningarna anpassats så långt som möjligt till de specifika förhållanden som gällde i försökssilon.

Simuleringarna har endast omfattat gasinmatning i silons centrum (lågt respektive högt flöde) då sidoinmatningen påverkades markant av den ”kanal” som bildades längs den utbyggnad som fanns på försökssilons nedre del. Sidoinmatningen kräver också 3-dimensionella simuleringar vilket är mycket tidskrävande.

6.1 Simuleringar av försöken i Ulricehamn med isotropa förhållanden i silon

Den indata som använts för simuleringarna av isotropa förhållanden redovisas i Tabell 10. Värdena skiljer något ifrån de preliminära simuleringar som gjordes innan försöken (se kapitel 2.2) och är baserad på uppmätta/uppskattade genomsnittliga förhållanden i silon samt mer detaljerade data kring den använda pelletsen.

Tabell 10 Indata vid simuleringarna av gasfördelning i försökssilon

Egenskap	Värde
Permeabilitet	2,36e-8 m/s *)
Diffusivitet för kvävgas i bulkmaterial	6,0e-6 (m ² /s)
Porositet av bulkmaterial	0,47
Specifik värme för träpellets	1,30 kJ/kg °K
Densitet hos träpellets	1270 kg/m ³
Termisk konduktivitet för träpellets	0,48 W/m °K
Diameter av träpellets (för beräkning av tryckfallskoefficient)	8 mm
Gasflöde kvävgas	Försök 1=25 kg/h, Försök 2=124 kg/h
Temperatur inmatad kvävgas	20 °C
Temperatur inne i pelletsbulken	40 °C
Temperatur hos siloväggarna	20 °C

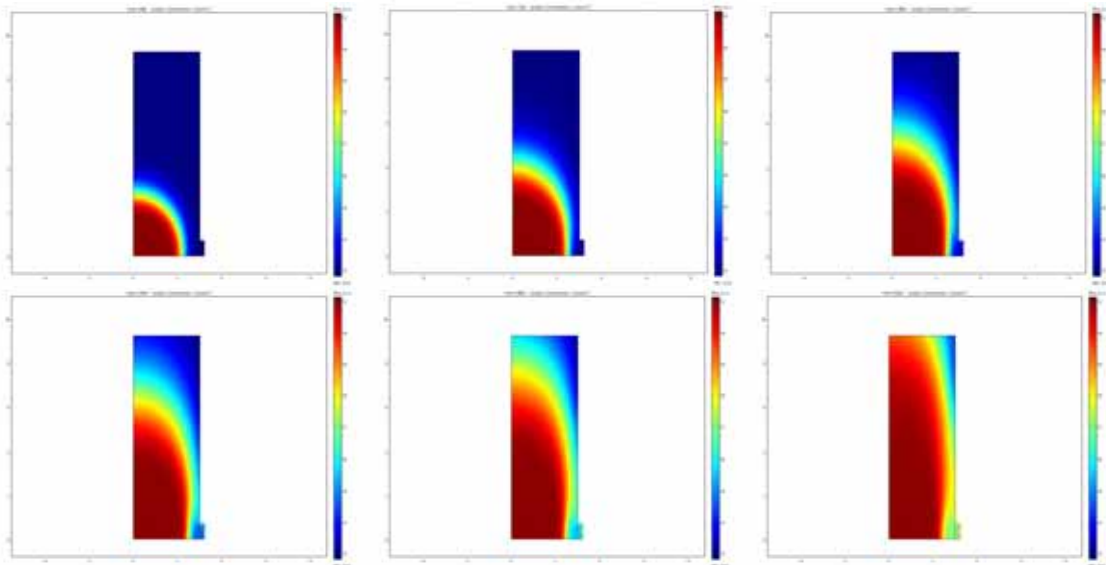
*) Baserat på en genomsnittlig finfraktion på 3,3% vilken i sin tur var baserad på ett antagande att fördelning av finfraktionen i silon var 15% i centrum och 2% i övriga delar.

6.1.1 Gasinlopp i centrum

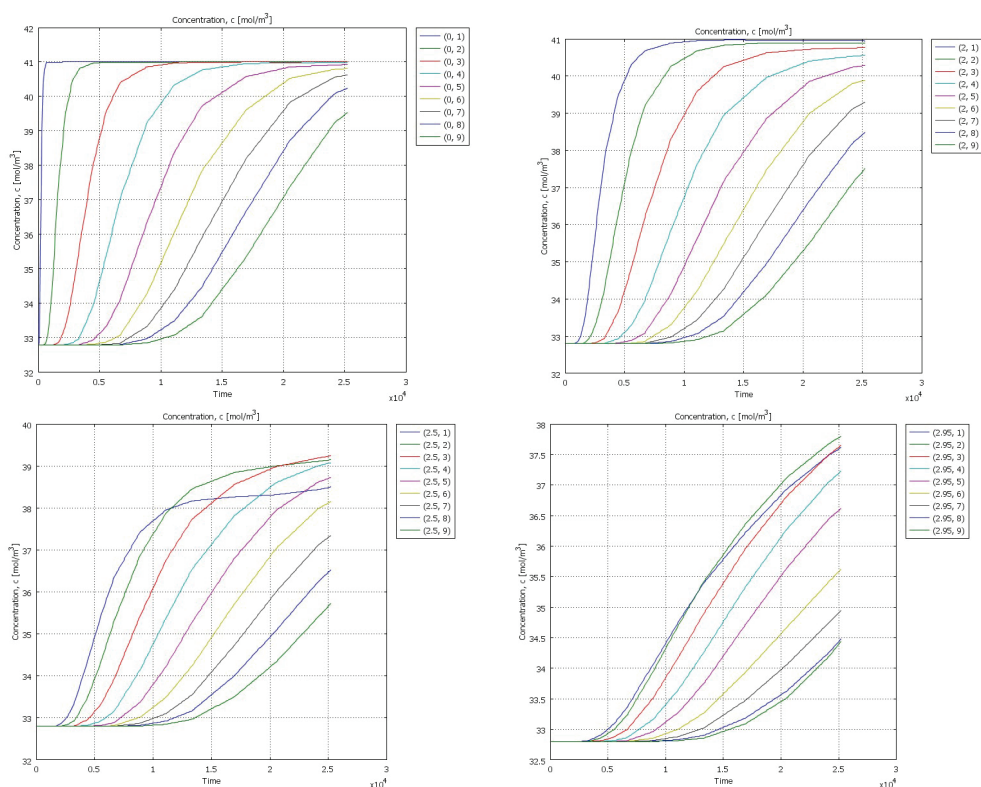
Nedan redovisas bilder av koncentrationsfördelningen respektive koncentrationsprofiler från simuleringar genomförda med gasinmatning i silons centrum och med ett lågt respektive högt inmatningsflöde vilket motsvarade förhållandena i försök 1 respektive försök 2.

I Figur 44 redovisas bilder av gasfördelningen från simuleringar med lågt inmatningsflöde vilket, liksom i de preliminära simuleringarna, indikerar en parabolisk utbredning runt inloppet. I dessa simuleringar erhöles dock en tydligare uppåtgående gasdistribution och problem för gasen att nå ut till väggarna. Orsaken till dessa skillnader gentemot förhandssimuleringarna är inte klar men kan bero på att indatan på bulk- och väggtemperaturen skiljer sig åt mellan de två simuleringarna. Dessa resultat är också mer samstämmiga med de resultat som erhöles med programmet SIMTEC i de preliminära simuleringarna.

Vid en jämförelse av mätresultaten från försöken (kapitel 4) respektive simuleringar måste man först beakta att gasinmatningen startade vid tiden 0:20 tim:min i experimenten medan den startar vid tiden 0:00 i simuleringarna.



Figur 44 Simuleringar av försök 1 med COMSOL, lågt flöde (25 kg/tim) och isotropa förhållanden i silon (1,2,3,4,5,7 tim). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

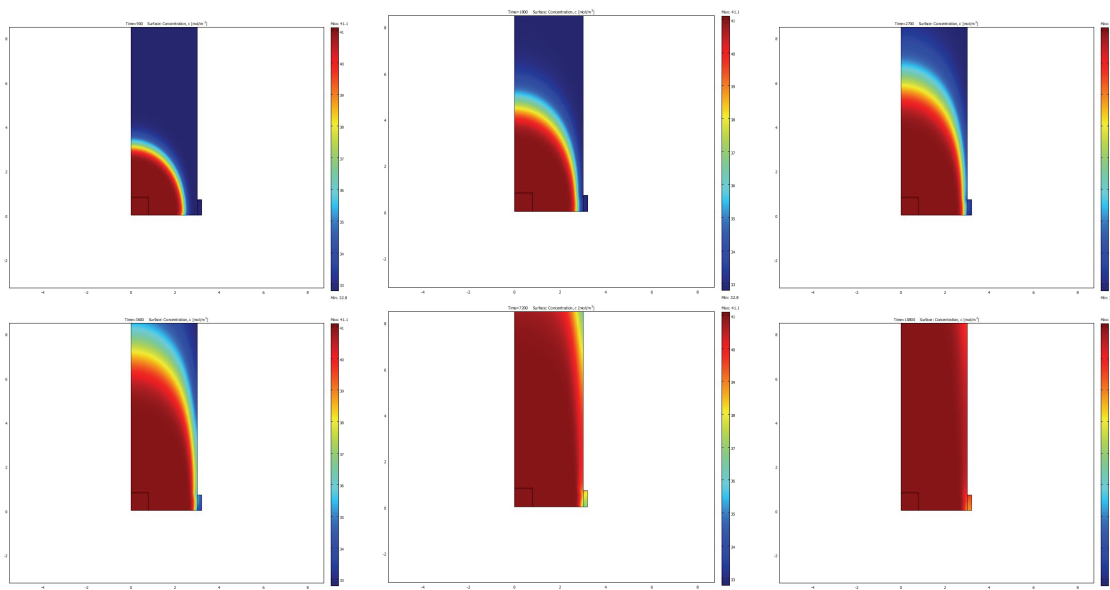


Figur 45 Koncentrationsprofiler från genomförda simuleringar med lågt flöde (25 kg/tim) på radien 0 m, 2,0 m, 2,5 m samt 2,95 m. (OBS Skalan på y-axeln olika)

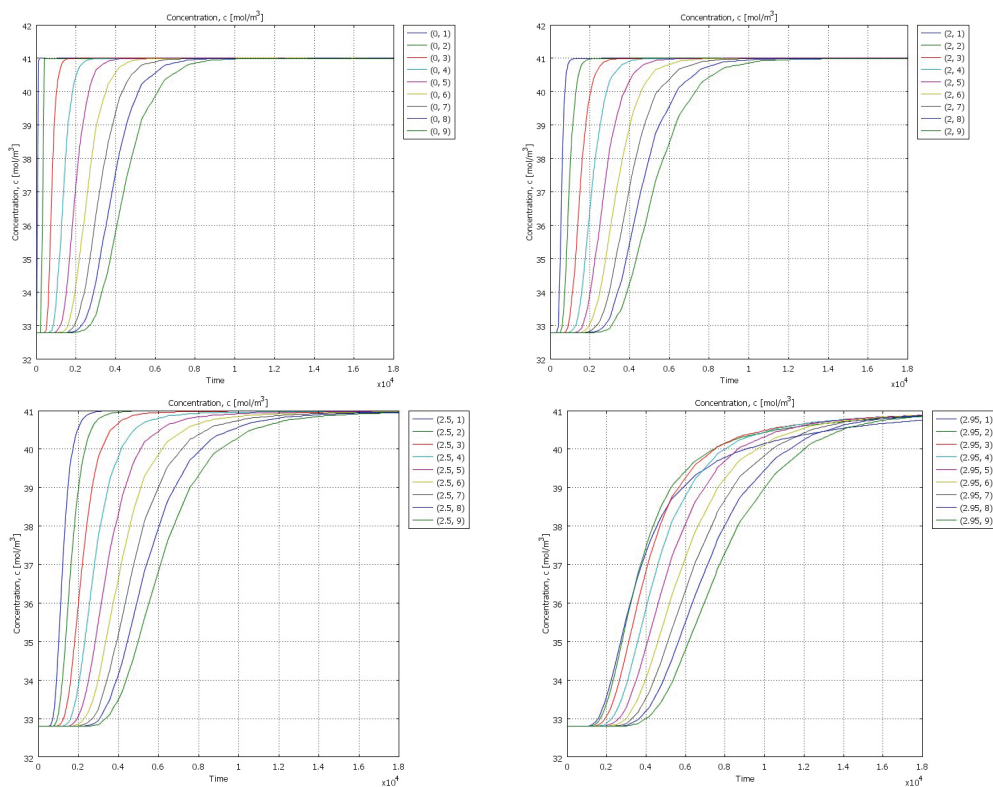
Simuleringarna av försök 1 överensstämmer med mätresultaten ur den synpunkten att gasfronten spred sig snabbast längs centrumlinjen rakt ovanför inloppet. Spridningshastigheten enligt simuleringarna är dock något för snabb upp till 3 m höjd medan den är alldeles för långsam på högre nivåer. Spridningen i sidled är dock betydligt överskattad i simuleringarna jämfört med mätresultaten där en effektiv inertering inte uppnåddes på radien 2 m (linje A respektive C).

Simuleringarna med det högre flödet som användes i försök 2 ger en markant skillnad mot mätresultaten (se Figur 46 och Figur 47 resp kapitel 4.4). Mätningarna visar att gasen sprids åt sidan och stiger snabbare längs linje A och C (R=2m) än i centrum (R=0 m). Spridningshastigheten i centrum är visserligen högre än i försök 1 men inte alls proportionellt mot det högre gasflödet. Trots den förbättrade spridningen i sidled har fortfarande gasen svårt att nå ut mot väggarna. Den förändrade spridningsbilden är sannolikt en konsekvens av de anisotropa förhållandena i silon med bl a en förhöjd finfraktion i silons centrum. Det högre gasflödet ger större tryckfall vilket pressar gasen ut i sidled där motståndet är mindre pga mindre finfraktion.

På basis av detta har flera olika simuleringar gjorts där både permeabilitet respektive bulktemperaturen varierats för att studera hur dessa faktorer påverkar gasdistributionen och dessa redovisas i kapitel 6.2.



Figur 46 Simuleringar av försök 2 med COMSOL, högt flöde (124 kg/tim) och isotropa förhållanden i silon (15, 30, 45 min, 1, 2, 3 tim). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).



Figur 47 Koncentrationsprofiler från genomförda simuleringar med högt flöde (124 kg/tim) på radien 0 m, 2,0 m, 2,5 m samt 2,95 m. (OBS Skalan på y-axeln olika)

6.1.2 Gasinlopp vid siloväggen

Någon specifik simulering av förhållandena som gällde vid försöken med gasinmatning vid siloväggen (försök 3 respektive försök 4) har ej genomförts. En orsak är att förhållandena vid försöken blev mer komplexa än planerat på grund av att gasen också kunde sprida sig längs en ”ringledning” som bildats mellan pelletsens och silomantelns utbyggnad längs nedre delen av siloväggen (se kapitel 4.5). Trots detta kan man göra en översiktlig jämförelse av de simuleringar som genomfördes med SIMTEC före försöken (se kapitel 2.2.3). Simuleringarna visade här att gasen företrädesvis sprids upp längs siloväggen rakt ovanför gasinloppet medan spridningen i radiell led in mot silons centrum och till motstående sida går mycket långsamt. Även om förhållandena i försöken inte var identiska visar försöken tydligt på samma tendenser. Spridningen upp längs väggen och längs linje A i försökssilon var mycket snabb medan det tog något längre tid för gasen att nå silons centrum jämfört med försök 2 där gasen matades in i silons centrum. En orsak till att skillnaden mellan centruminmatning och sidoinmatning inte blev så markant i silons centrum som simuleringarna indikerar, är sannolikt att gasen kunde sprida sig längs den bildade ”ringledningen” vilket gav en betydligt bättre fördelning än om gasen bara släppts in i en punkt på siloväggen.

6.2 Simuleringar av försöken i Ulricehamn med anisotropa förhållanden i silon

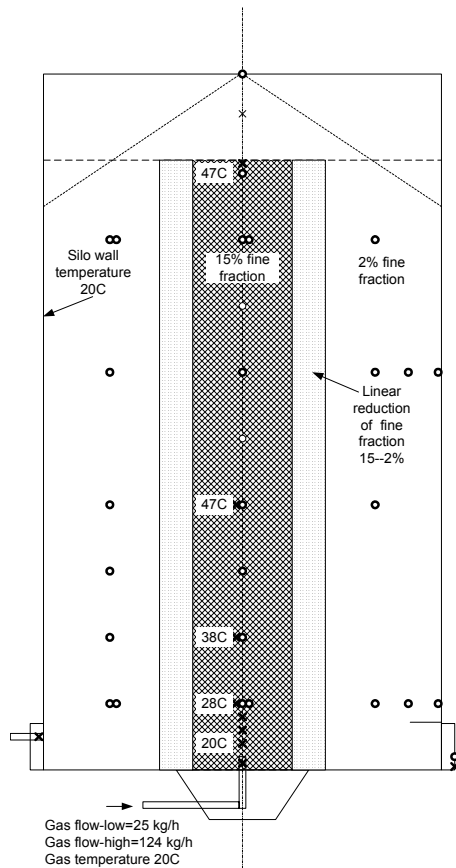
Nedan presenteras simuleringar där förutsättningarna istället varit anisotropa förhållanden i silon. Det innebär att förhållandena inne i silon anpassats ytterligare för att bättre motsvara de verkliga förhållandena som rådde vid försökstillfället. Detta innebär att temperaturen inte var konstant i hela bulken utan varierade dels i höjddled och dels i sidled närmast siloväggen. En annan faktor som inte var konstant i hela bulkvolymen var andelen finfraktion vilket ger en direkt påverkan på permeabiliteten i bulken.

6.2.1 Antagna förhållanden i silon

I Figur 48 visas en skiss över silon där det också presenteras de antaganden kring temperatur och finfraktion/permeabilitet summeras. Det skall poängteras att detta innehåller flera osäkerheter. När det gäller temperaturen har denna endast mätts på några punkter längs centrumlinjen. Detta innebär en stor osäkerhet kring hur temperaturen varierar i radiell led, och framförallt hur den påverkas av silons väggtemperatur. I detta fall har vi antagit en konstant temperatur över hela tvärsnittet fram till 0,3 m från väggen där temperaturen sedan avtar linjärt ner till 20 °C som antagits vara en konstant väggtemperatur.

När det gäller andelen finfraktion har denna antagits uppgå till 15% i silons centrum (radie 0,75 m) för att därefter sjunka linjärt till 2% (radien 0,75-1,25 m) för att därefter vara konstant på denna nivå ända ut till siloväggen. Detta innebär i sin tur att permeabiliteten varit olika inom dessa områden och varierat i förhållande till andelen finfraktion. Även detta är naturligtvis en stark förenkling som också innehåller betydande osäkerheter.

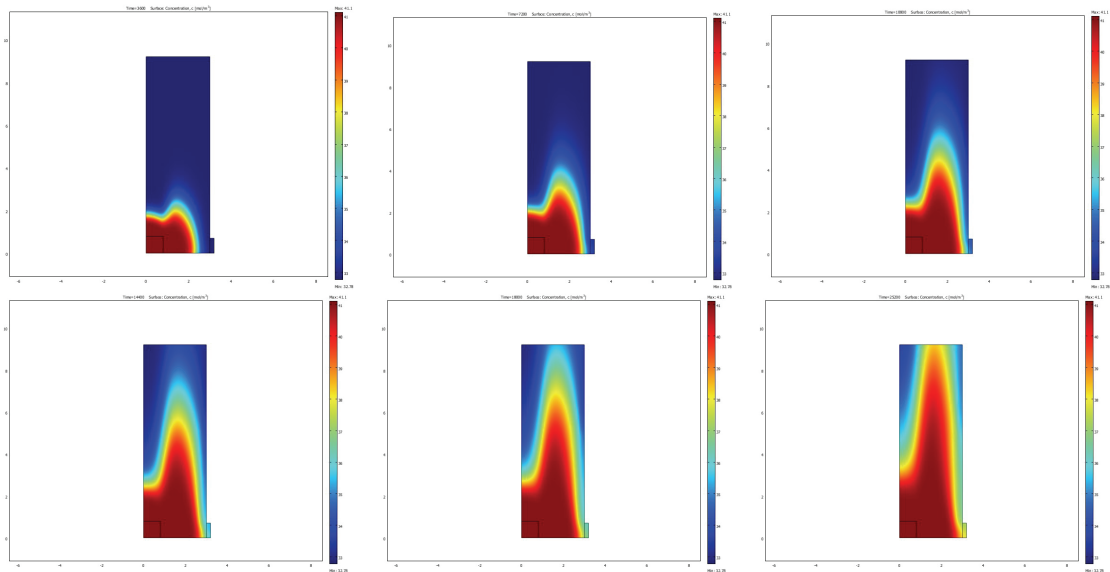
Både silons väggtemperatur respektive temperaturen på inmatad kvävgas har antagits vara konstant 20 °C, dvs som i de isotropa simuleringarna.



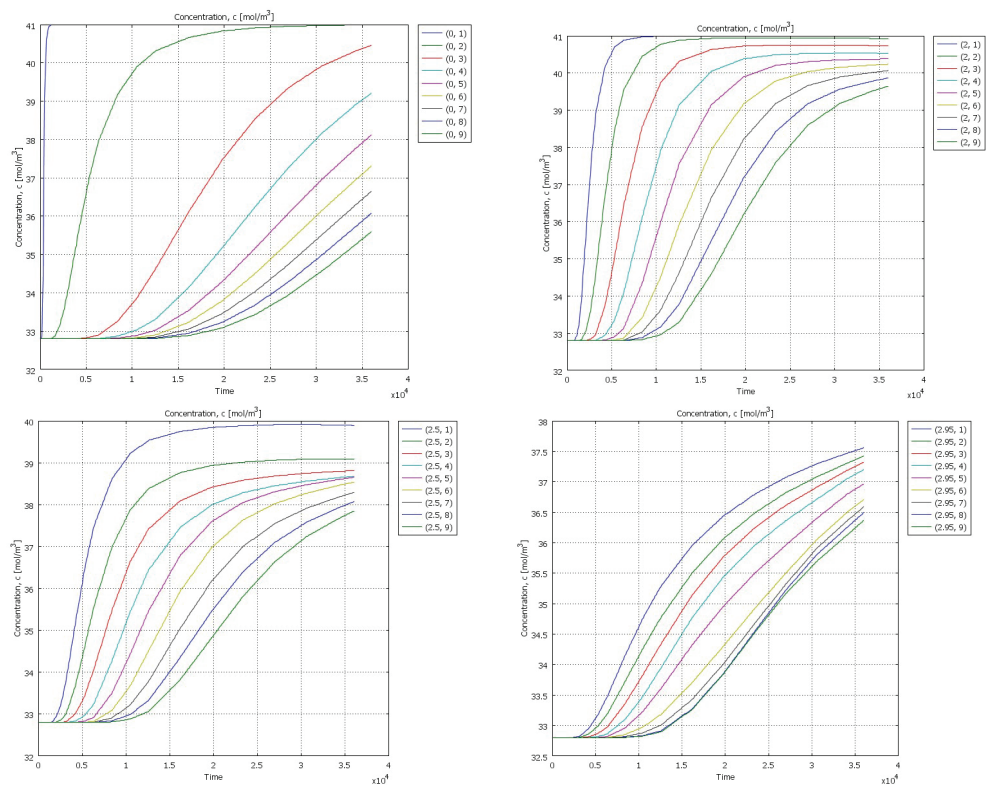
Figur 48 Antagna förhållanden inne i silon, baserade på genomförda mätningar och till viss del i kombination med bedömningar.

6.2.2 Resultat av simuleringarna och jämförelser med försöksdata

I Figur 49 visas resultaten av simuleringarna av försök 1, dvs inmatning i centrum och med lågt gasflöde (25 kg/tim). Som framgår av animeringarna medför de anisotropa förhållandena en markant påverkan på gasdistributionen. Jämfört med motsvarande försöksresultat (se kapitel 4.3), där spridningen var starkt koncentrerad till silons centrum och spridningen i sidled relativt begränsad, så tycks inverkan av den höga andelen finfraktion i silons centrum ge alldeles för stor påverkan.



Figur 49 Simuleringar av försök 1 med COMSOL, lågt flöde (25 kg/tim) och anisotropa förhållanden (varierande temperatur och permeabilitet) i silon (1,2,3,4,5,7 tim). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

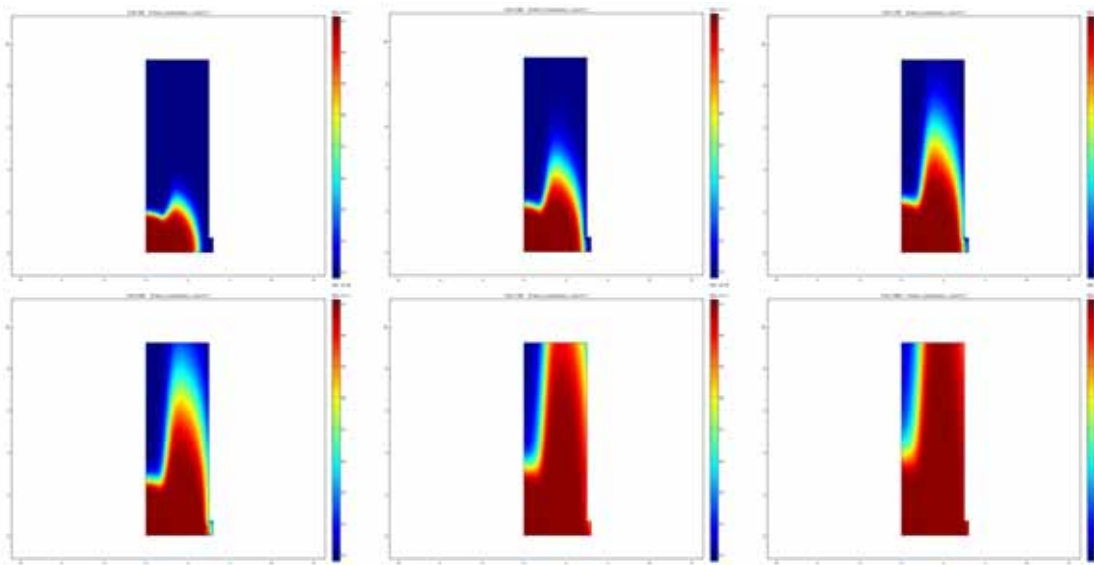


Figur 50 Koncentrationsprofiler från genomförda simuleringar med lågt flöde (25 kg/tim) på radien 0 m, 2,0 m, 2,5 m samt 2,95 m.

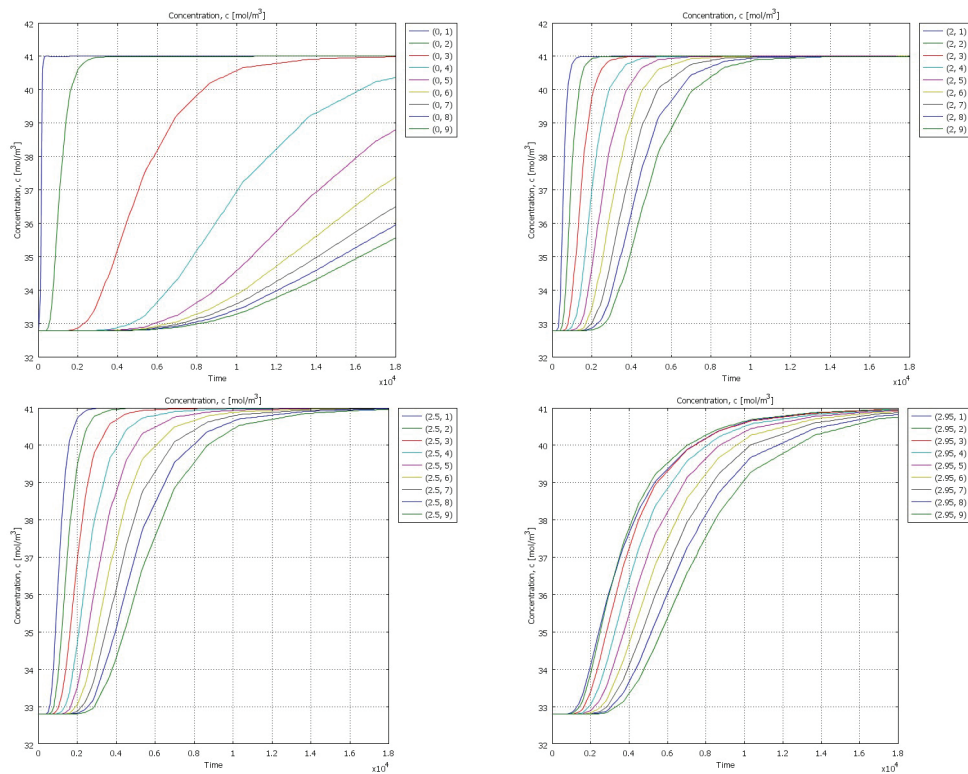
Görs istället en jämförelse mellan Försök 2, där inmatningsflödet var ca 124 kg/tim, och motsvarande simulering, är tendenserna till överensstämmelse betydligt bättre mellan försöket och simuleringen. Såsom tidigare redovisats spreds här gasen först i sidled för att sedan spridas uppåt längs linje A respektive C (motsvarande radie = 2,0 m). Den vertikala spridningen längs centrumlinjen är i simuleringarna dock underskattad vilket i sin tur medför att gasen istället pressas längre ut mot siloväggarna. Detta tyder igen på att andelen finfraktion i centrum var överskattad i indatan till simuleringen. I experimenten var syrgashalten reducerad till 5% i position 2B vid 1:00 tim:min och nivå 3B vid 1:20 tim efter start gasinmatning medan simuleringarna indikerar ca 2:10 tim respektive knappt 7:00 tim. I experimentet strömmade dessutom sannolikt en del gas in mot silons centrum igen längre upp i silon vilket skulle kunna förklara att syrgaskoncentrationen nådde 5%-nivån ungefär samtidigt på 6, 8 och 9 m höjd, ca 1:40-2:00 tim efter start av gasinmatning. Någon sådan tendens till ”återcirkulation” mot silons centrum påvisas ej i simuleringarna.

Den vertikala spridningen längs linje A respektive C (radie 2,0 m) var något olika i försöket och gick betydligt fortare längs linje A jämfört med linje C, framförallt på nivå 6 och 8. Simuleringarna stämmer här bäst med uppmätt spridning längs linje C.

En annan skillnad mellan experiment och simuleringar är att gasen fortfarande hade svårt att nå ända ut till siloväggen i försöken medan simuleringarna indikerar att gasen i detta försök pressades längre ut mot siloväggen.



Figur 51 Simuleringar av försök 2 med COMSOL, högt flöde och anisotropa förhållanden (varierande temperatur och permeabilitet) i silon (15, 30, 45 min, 1, 2, 3 tim). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).



Figur 52 Koncentrationsprofiler från genomförda simuleringar med högt flöde (124 kg/tim) på radien 0 m, 2,0 m, 2,5 m samt 2,95 m.

Sammantaget kan man alltså konstatera att denna simulering med antagna anisotropa förhållanden till viss del speglar de förhållanden som också noterades i silon under experimenten. Sannolikt är dock gjorda antaganden alldeles för grova och inte helt överensstämmande med de verkliga förhållandena. En sådan faktor kan vara att ”centrumpelaren” med den förhöjda andelen finfraktion inte är så stor som antagits och det är också möjligt att andelen finfraktion sjunker med höjden allt eftersom fallhöjden minskat under fyllningen. Gasfördelningen blev dessutom inte helt symmetrisk inne i silon vilket indikerar på variationer i radiell led. Några ytterligare försök till att anpassa förhållandena inne i silon för att ge en bättre överensstämmelse med försöken har dock inte gjorts då det ändå inte finns möjlighet att verifiera sådana antaganden. Både experimenten och simuleringarna visar dock att det kan finnas variationer inne i ett lagrat bulkmaterial som kan påverka gasdistributionen avsevärt.

7 Simuleringar av tillämpade fall

7.1 Gasfördelning i silo med pågående glödbrand

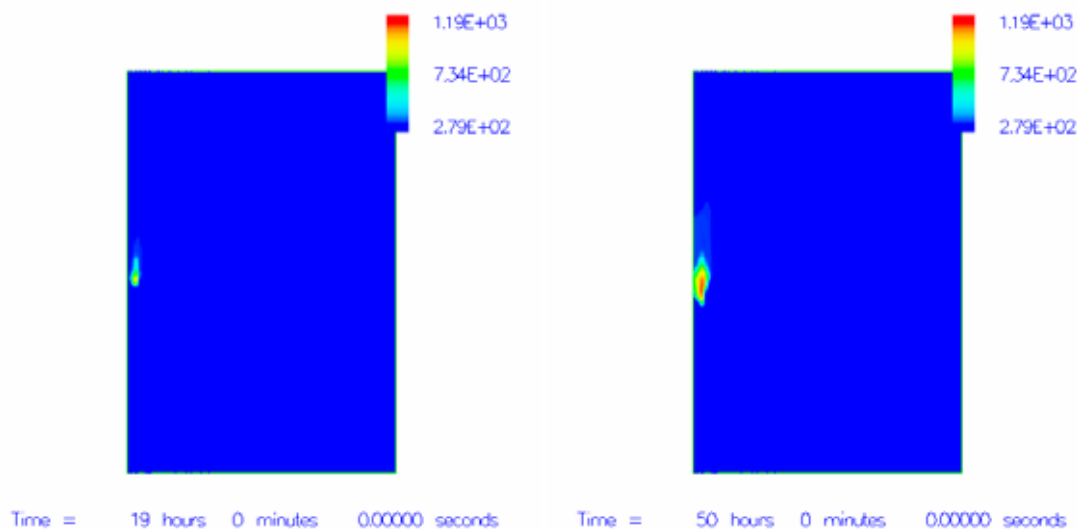
För att få en grov bild av hur gasfördelningen inne i en silo kan tänkas påverkas av en pågående glödbrand har två olika ”varma” simuleringar genomförts med programmet SIMTEC. I det ena scenariot användes samma silo som för de ”kalla” simuleringarna (silodiameter 40 m, lagringshöjd 30 m) (se kapitel 2.1), medan det andra scenariot representerar en tornsilo där höjden är betydligt större än silodiametern (silodiameter 8 m, lagringshöjd 40 m).

Simuleringarna innefattade en lång ”förbrinntid” vilket är normalt i verkliga silobränder då det oftast tar lång tid att detektera en självantändning och pågående glödbrand. Glödbranden initierades av en värmekälla i silons centrum på samma sätt som gjordes vid de siloförsök som genomfördes vid SP-Brandteknik 2006 [2]. I samband med dessa försök gjordes liknande simuleringar av brand- och släckförloppet i försökssilo med SIMTEC som då visade på en rimlig överensstämmelse med försöksresultaten.

Gasflödet var lika i de båda simuleringarna, 628 kg/tim, vilket i sig ger jämförbara resultat mellan de båda silogeometrierna men å andra sidan inte ger representativa inmatningshastigheter, vilka styrs av silons tvärsnittsarea. Förbrinntiden var i båda simuleringarna 83 timmar, varefter gasinmatningen inleddes genom ett inlopp i centrum av silons botten.

7.1.1 Stor silo

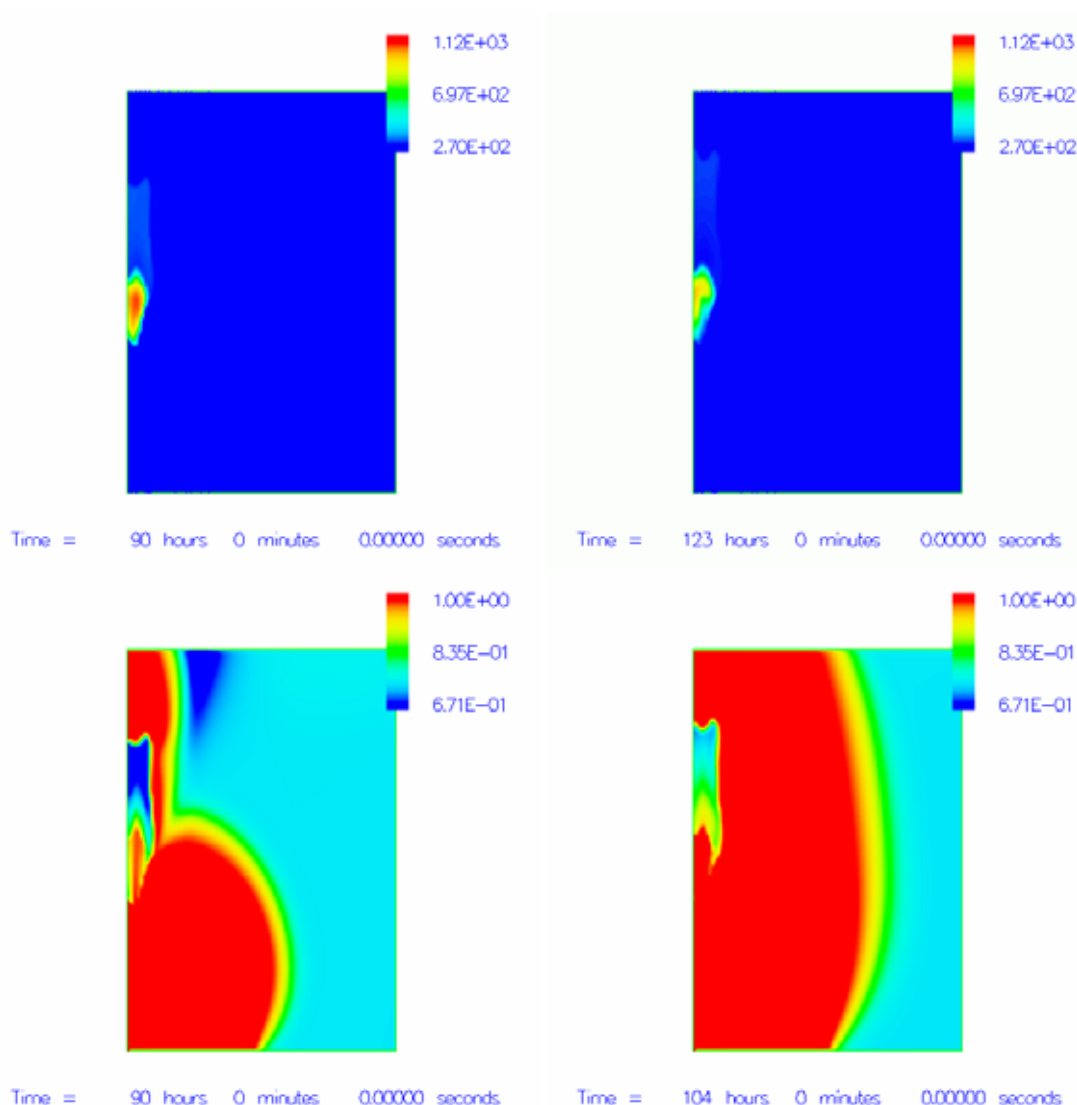
Temperaturutvecklingen av glödbranden under förbrinntiden visas i Figur 53. Simuleringarna indikerar att utvecklingen och spridningen av glödbranden är förhållandevis långsam och att glödbranden företrädesvis vandrar nedåt i silon vilket stämmer väl med tidigare försök och praktiska erfarenheter. Detta innebär också att förbrinntiden blir lång och i dessa simuleringar inleds kvävgasinmatningen vid tiden 83 timmar.



Figur 53 Bild av temperaturfördelningen inne i en stor silo under ”förbrinntiden” (19 respektive 50 tim).

I Figur 54 visas bilder av temperaturfördelningen samt kvävgasdistributionen vid olika tidpunkter under ”släckfasen” som inleddes vid tiden 83 timmar. Detta innebär att gasinmatningen pågått i 7 tim respektive 21 tim / 40 tim i redovisade bilder. Eftersom inmatningshastigheten endast uppgår till 1/10 av rekommenderat värde (motsvarande 0,5 kg/m² tim) innebär detta också att gasfyllningen blir mycket långsam (jämför resultaten från ”kalla” simuleringar i kapitel 2.1.1).

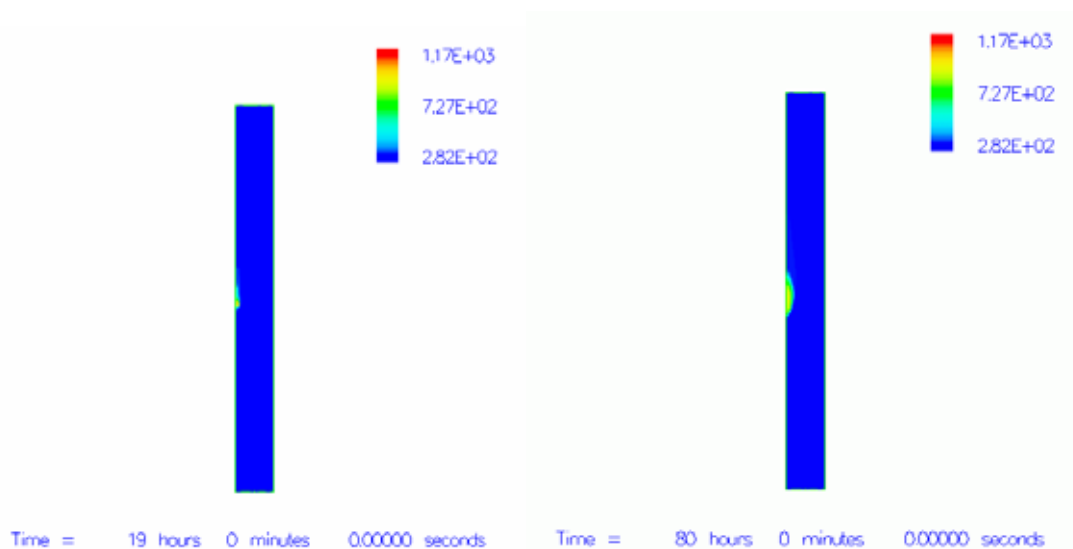
Som framgår av bilderna har kvävgasen efter 7 timmars påföring nått upp till glödhärden och på grund av termiska effekter fått en snabbare vertikal spridning och redan börjat strömma ut från pelletsytan i silons topp. Själva glödhärden är inte fullt inerterad vilket också framgår av bilderna av temperaturfördelningen som fortfarande visar på en så förhöjd temperatur att glödbrand fortfarande pågår. Efter 21 tim gasinmatning börjar hela glödbrandzonen bli mer eller mindre inerterad och efter 41 tim kan man konstatera att temperaturen också börjat sjunka markant.



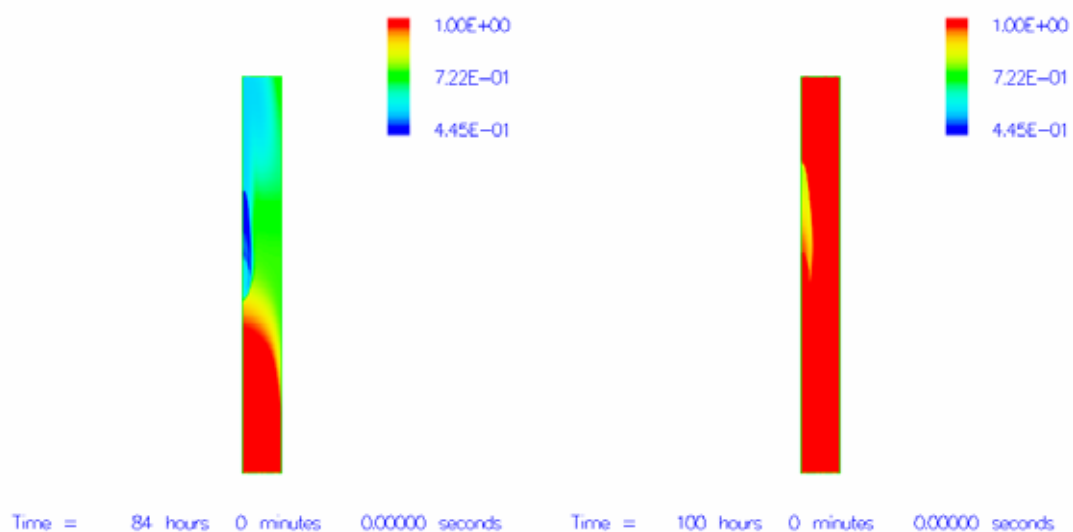
Figur 54 Bilder av temperaturfördelningen inne i silon under ”släckningsfasen” vid tiden 90 tim resp 123 tim (övre bilder) samt kvävgasfördelning inne i silon vid 90 tim resp 104 tim (nedre bilder). Gasinmatningen startade vid tiden 83 timmar vilket innebär 7 tim resp 21 tim/ 40 tim gasinmatning. (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

7.1.2 Tornsilo

I Figur 55 redovisas bilder av temperaturfördelningen inne i tornsilon under förbrinntiden. Jämfört med den stora silon indikerar simuleringarna att brandförloppet tycks bli betydligt långsammare och den påverkade zonen runt glödhärden är mindre i utbredning, både vertikalt och radiellt. När gasen förs på vid 83 tim är flödet i detta fall mycket högt i förhållande till tvärsnittsytan, 12,5 kg/m² tim, dvs 2,5 ggr rekommenderad inmatnings-hastighet, vilket gör att silon inerteras mycket snabbt. Efter 1 tim gasinmatning är silon i princip helt inerterad upp till glödhärden och där ovanför är silon mer eller mindre inerterad. Dock finns en begränsad zon rakt ovanför brandzonen som inte påverkats nämnvärt av kvävgasen. Efter 17 tim gasinmatning så är hela silon fylld med kvävgas förutom den lilla volym ovanför den ursprungliga brandzonen som fortfarande inte är 100% inerterad, se Figur 56.



Figur 55 Bilder av temperaturfördelningen inne i en tornsilo under ”förbrinntiden” (19 respektive 80 tim).



Figur 56 Bilder av kvävgasfördelningen inne i silon under ”släckningsfasen” vid tiden 84 tim resp 100 tim. Gasinmatningen startade vid tiden 83 timmar vilket innebär 1 tim resp 17 tim gasinmatning. (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

7.2 Gasfördelning från ett eller flera inlopp samt inverkan av flöde och silovägg

Med ledning av försöksresultat och gjorda simuleringar kan man konstatera att gas-spridningen kommer att begränsas i sidled runt ett enskilt gasinlopp. I mindre silor kan det räcka med ett inlopp men vid större silodiameter behövs således flera inlopp för att snabbt uppnå en jämn gasdistribution. Gasfördelningen påverkas också av siloväggen vilken bromsar upp spridningen i sidled närmast väggen. I följande kapitel redovisas några resultat som belyser dessa effekter. Det är dock viktigt att inse att simuleringarna inte ger en absolut sanning, dels beroende på osäkerheter och begränsningar i beräkningsprogrammet i sig och dels på grund av osäkerheter och variationer när det gäller de verkliga förutsättningarna inne i bulkmaterialet i en specifik silo.

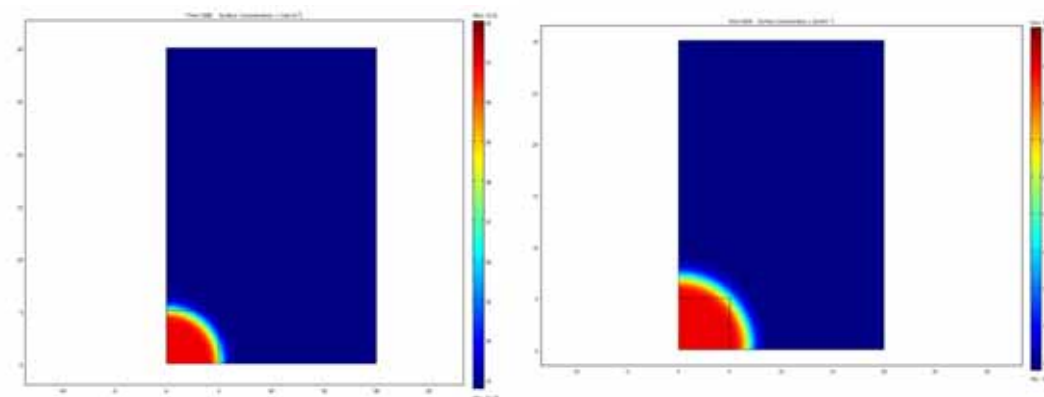
7.2.1 Fördelning av gasinmatningen på flera inlopp

Målsättningen med att fördela gasinmatningen på flera inlopp är att så snabbt som möjligt åstadkomma ett jämnt ”pluggflöde” över hela silons tvärsnitt. Detta är viktigt då man inte med säkerhet vet var en brandhärd är belägen inne i silon och att förhållandena med största sannolikhet är anisotropa, dvs de varierar både över silons tvärsnitt och med höjden. En fördelad gasinmatning kommer då att vara en förutsättning för att så långt som möjligt, under praktiska förhållanden, kunna säkerställa en inertering av hela silon.

Om gasinmatningen enbart koncentreras till en punkt, speciellt i silor med större diameter, kommer det att ta lång tid innan gasen spridits i sidled så att hela tvärsnittet är inerterat och i vissa lägen uppnår man sannolikt inte full inertering. På grund av detta, och eventuellt förstärkt av anisotropa förhållanden inne i silon, kan det resultera i att gas som matas in i botten passerar igenom silon och går till spillo i silotoppen utan att silon för den skull blir fullt inerterad (se t ex Figur 5 i kapitel 2.1.1).

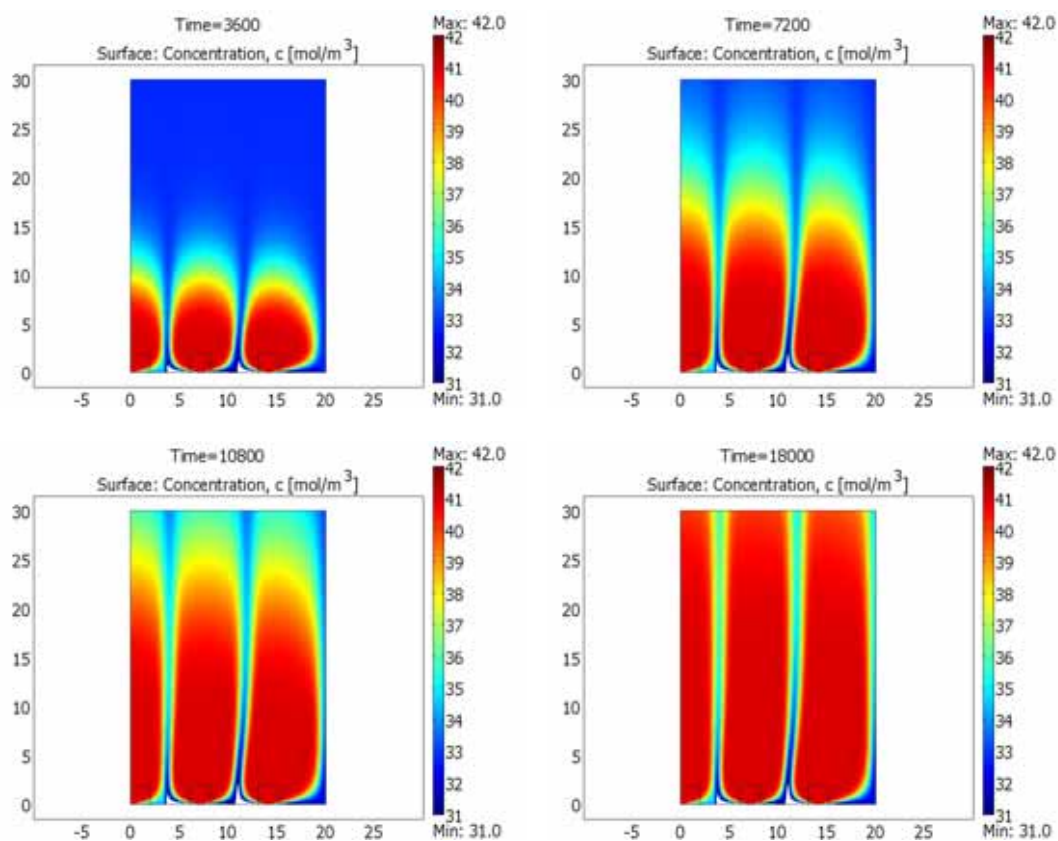
För att uppnå detta ”pluggflöde” behöver man således säkerställa att man redan i inledningsskedet av gasinmatningen når en gasspridning och därmed en effektiv inertering över silons tvärsnittsarea. Med den rekommenderade inmatningshastigheten av $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$ erhålls en genomsnittlig fyllnadshastighet på ca 8 m/tim (antaget 50% porositet i bulkmaterialet). En rimlig målsättning för de flesta silor bör vara att uppnå en fullgod radiell inertering över hela silons bottenarea inom ca 1 tim och för att åstadkomma detta behöver således ett antal inlopp och därmed att gasflödet per inlopp och avstånden mellan dessa anpassas beroende på silons storlek.

I Figur 57 redovisas två simuleringar som visar gasspridningen runt ett inlopp efter 1 tim och där gasflödet per inlopp är 251 kg/tim respektive 628 kg/tim (scenario 5 respektive 7, se kapitel 2.1.1). Genom att fastställa den radiella spridning av gasen som uppnåtts efter denna inmatningstid erhålls ett mått på hur stor area man kan anta att ett enskilt gasinlopp kan förväntas täcka. Om man utgår ifrån att en effektiv inertering motsvarar en syrgaskoncentration på ca 5% (ca $39 \text{ mol/m}^3 \text{ N}_2$), innebär detta att man vid gasflödet 251 kg/tim täcker en radie på $4,6 \text{ m}$ (ca 66 m^2) medan täckningsradien uppgår till ca $6,4 \text{ m}$ (ca 130 m^2) med det högre flödet (se även Figur 59 nedan). Om man utgår ifrån rekommenderad inmatningshastighet, $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$, så motsvarar dessa gasflöden en täckningsarea på ca 50 m^2 respektive ca 125 m^2 . Även om simuleringarna sannolikt överskattar den radiella spridningen något så finns det således en viss marginal jämfört med beräknad täckningsarea baserat på rekommenderad inmatningshastighet.



Figur 57 Gasfördelning runt ett enskilt inlopp efter 1 tim med ett gasflöde på 251 kg/tim resp 628 kg/tim. (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

I Figur 58 visas ett exempel på hur gasfördelningen kan se ut när gasen matas in från flera inlopp. Simuleringen, som genomförts med COMSOL, är mycket förenklad genom att vara 2-dimensionell och där halvsymmetri antagits. ”Silon” utgörs av ett obegränsat linjärt rum fyllt med pellets, med en bredd på 40 m och en lagringshöjd på 30 m, dvs en geometri med samma dimensioner som den stora silon som simulerats i kapitel 2.1 och som också visas i Figur 57. Även gasinloppen är linjära med ett inlopp längs mittlinjen och två inlopp på vardera sidan, 7 m respektive 14 m från mittlinjen.



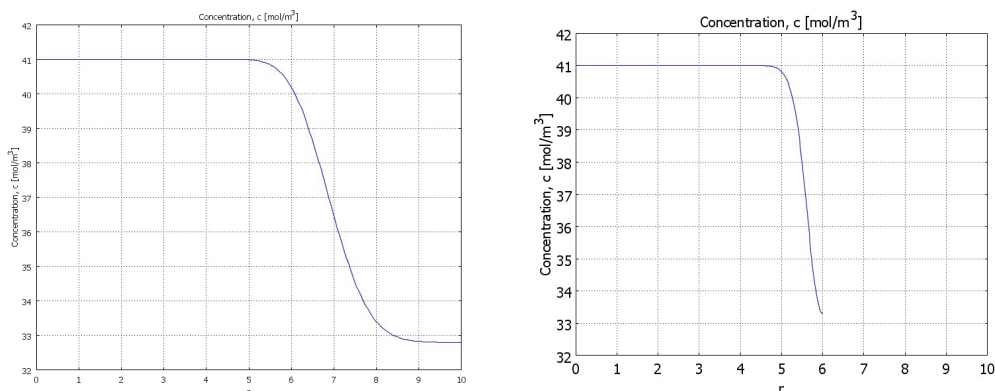
Figur 58 Simulering av gasfördelningen i ett bulkmaterial när gasen fördelas på flera inlopp. Simuleringen är 2-dimensionell genom att anta att både ”silon” och gasinloppen är linjära med en obegränsad utbredning. I simuleringen antas dessutom halvsymmetri. (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

Av bilderna framgår fördelen med flera inlopp genom att gasen sprids likformigt och når silotoppen samtidigt över hela tvärsnittet. Detta garanterar i sin tur ett så effektivt gasutnyttjande som möjligt. Simuleringarna indikerar dock att gasplymerna inte överlappar varandra, inte ens efter en lång påföringstid. Om detta är en verklig effekt eller en begränsning i programmet (t ex att diffusionen mellan plymerna underskattas) är dock inte klarlagt. Eftersom man kan anta mer eller mindre anisotropa förhållanden inne i silon kommer dessa sannolikt att leda till en bättre gasblandning än vad simuleringarna indikerar.

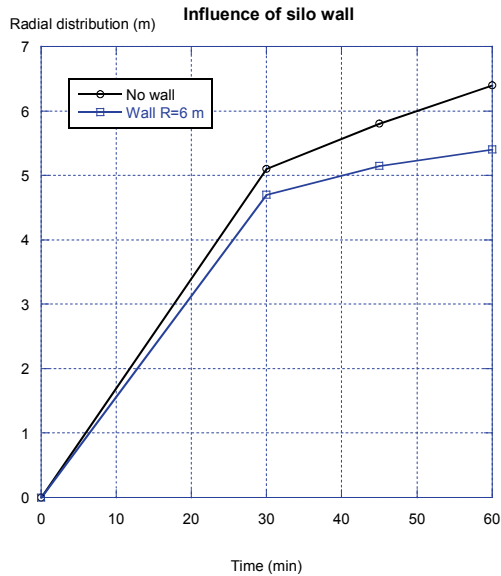
7.2.2 Inverkan av silovägg

Både simuleringarna och experimenten visar att inerteringen går mycket långsamt i närheten av siloväggen. Av försöksresultaten har det dock varit svårt att säkert avgöra om detta är en effekt av en generell begränsning i gasens spridning i sidled eller om det också är en effekt av väggen. En simulering har därför genomförts på samma sätt som redovisats i kapitel 2.1.1.2 (scenario 5, 628 kg/tim) men där siloväggen placerades på radien 6 m från inloppet (jämfört med radien 20 m i tidigare simulering).

I Figur 59 framgår koncentrationsfördelningen i radiell led, 1 m ovan silobotten, efter en timmas gasinmatning där siloväggen är belägen 20 m respektive 6 m från gasinloppet. Som framgår av diagrammen har siloväggen en tydlig inverkan och begränsar spridningen i sidled och i Figur 60 visas spridningen som funktion av inmatningstiden. Även här har en syrgaskoncentration på 5% (ca 39 mol/m³ N₂) använts som referensvärde. Under de första 30 minuterarna är spridningen i sidled relativt lika men därefter, när gasfronten är ca 1 m från siloväggen ger denna en allt kraftigare påverkan vilket gör det svårt att inertera området inom ca 0,5 m närmast siloväggen.



Figur 59 Radiell koncentrationsfördelning 1 m ovanför silons botten efter 1 tim gasinmatning (628 kg/tim) i en silo med siloväggen på radien 20 m (vänster) resp på radien 6 m (höger).

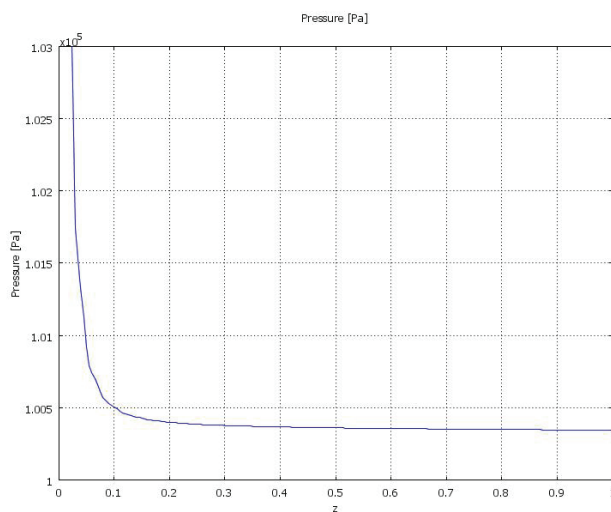


Figur 60 Gasfrontens utbredning (ca 5 % syrgasnivå) som funktion av tiden med resp utan inverkan av en silovägg.

7.2.3 Tryckfall vid inlopp

Både försöken och simuleringarna visar att gasflödet i ett enskilt inlopp har en påtaglig inverkan på gasspridningen i sidled. Ett ökat flöde leder till ett ökat tryckfall nära inloppet vilket i sin tur bidrar till en bättre gasspridning i sidled. När gasen sprids ut i materialet sjunker gashastigheten och därmed tryckfallet mycket snabbt vilket i sin tur leder till att drivkraften till en vidare spridning försvinner.

I Figur 61 visas ett exempel på beräknad tryckfördelning rakt ovanför ett gasinlopp där ett gasflöde på 628 kg/tim, med en gashastighet på 30 m/s, matas in pelletsbulken (motsvarande beräkningsscenario 6 i kapitel 2.1).



Figur 61 Exempel på beräknad tryckfördelning i gasinloppets omedelbara närhet (gasflöde 628 kg/tim, inloppsdiameter 77 mm, inloppshastighet 30 m/s). Maximalt beräknat tryck var 21000 Pa.

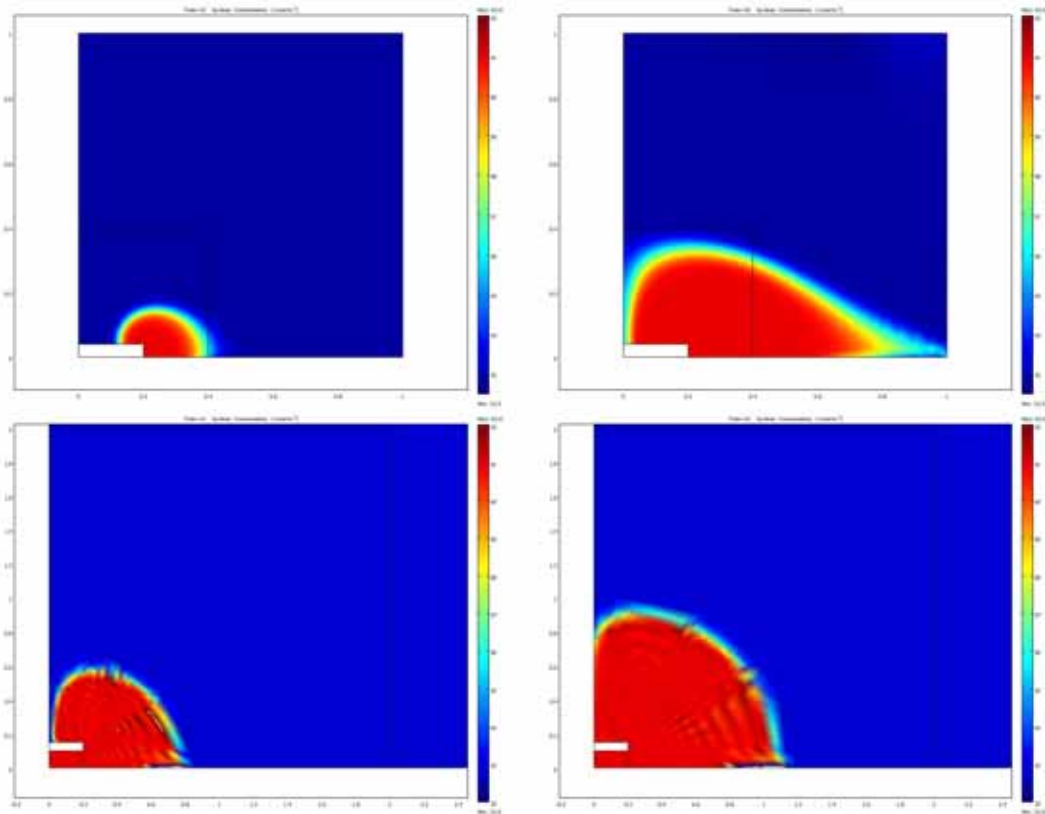
Som framgår av tryckkurvan faller trycket oerhört snabbt så snart gasen strömmat ut ur inloppet och gasen börjar sprida sig i pelletsen så att gashastigheten sjunker. Beräknat maximalt tryck var ca 21000 Pa (ca 0,2 bar) precis vid inloppet för att efter ca 0,1 m spridning ha reducerats till i storleksordningen 500 Pa och efter 1 m till ca 350 Pa, vilket utgör kvarvarande drivtryck för spridning resterande sträcka genom pelletbulken.

7.2.4 Inverkan av inloppets detaljutformning

I de simuleringar som redovisats tidigare i rapporten har vi antagit ett öppet inmatningshål för att på bästa sätt efterlikna den perforerade plåt som användes i försöken. I praktiken måste man dock skydda gasinloppen mot igensättning och en designlösning som bl a Lantmännen tillämpar i några av sina silor, innebär att en täckplatta placeras över inmatningsöppningen, ca 20 mm över golvet, som medför att gasen matas ut radiellt längs silobotten. Detta är en mycket enkel men funktionell lösning i de flesta applikationer.

Simuleringar har därför gjorts för att försöka avgöra hur gasfördelningen ser ut runt inloppet alldeles i startsekvensen av gasinmatningen och hur mycket plattan påverkar spridningen rakt uppåt respektive i radiell led. På grund av beräkningstekniska svårigheter har flera förenklingar fått göras och trots detta har det endast varit möjligt att simulera en mycket kort stund av inledningskedet. Detta gör att det finns en stor osäkerhet i resultaten men trots detta redovisas resultaten från två sådana simuleringar i Figur 62.

I den första simuleringen är gasflödet mycket lågt, ca 11 kg/tim och avståndet mellan platta och golv 40 mm. I den andra simuleringen är gasflödet ca 570 kg/tim och avståndet mellan platta och golv 100 mm. I båda fallen har täckplattans diameter antagits till 0,4 m. I båda fallen kan noteras att gasfördelningen mycket snabbt jämnas ut ovanför plattan och sannolikt inte kan förväntas påverka den radiella fördelningen på något markant sätt.



Figur 62 Resultat från två olika simuleringar som visar startsekvensen av en gasinmatning. I de övre bilderna är gasflödet 11 kg/tim och avståndet plattagolv 40 mm (tid 10 resp 30 sekunder) och i de nedre bilderna är gasflödet ca 570 kg/tim och avståndet 100 mm (tid 10 resp 20 sekunder). (Blå färg-luft=21% syre, röd färg-ren kvävgas=0% syre).

8 Diskussion

Genomförda simuleringar och utförda gasfyllnadsförsök har tillsammans skapat ett underlag vilket kan ligga till grund för utformning av framtida rekommendationer kring silobrandsläckning genom inertering med kvävgas.

Vid planeringen av projektet definierades fem huvudsakliga frågeställningar vilket projektet förväntades att kunna besvara och nedan följer en diskussion av erhållna resultat på basis av dessa frågeställningar.

Det bör här noteras att resultat och diskussioner är baserade på att bulkmaterialet utgörs av träpellets. Andra material kan ha betydande skillnader i egenskaper, t ex porositet, permeabilitet, etc vilket kan påverka de tolkningar och slutsatser som presenteras nedan.

8.1 Stämmer genomförda beräkningar av gasdistribution med verifierande försök?

Att endast studera gasdistributionen inne i en silo genom experimentell verksamhet skulle kräva ett stort antal försök då det är många faktorer som förväntas kunna påverka förloppet. Detta projekt har därför inriktats mot att studera förhållanden i fullskaliga silor med hjälp av datorbaserade beräkningsmodeller. För att få en bekräftelse på att modellerna ger en rimlig överensstämmelse med verkligheten och för att få praktisk erfarenhet under kontrollerade former har även ett antal gasfyllnadsförsök genomförts i en verklig silo.

Som framgår av genomförda försök kan man konstatera att gasdistributionen i en verklig silo påverkas av de specifika förhållandena inne i silon. En av de mest avgörande faktorerna är variationer i bulkmaterialets permeabilitet, t ex genom att finfraktion som skapas vid fyllningen ansamlas inom vissa delar i bulkmaterialet. Andra faktorer är naturligtvis gasinmatningens position men även silokonstruktionen kan i vissa lägen ha en markant påverkan. Detta visade sig tydligt i försöken (se kapitel 4) där det fanns centrumkärna rakt under påfyllningsöppningen där det fanns en ökad halt av finfraktion vilken också hade en påtaglig påverkan på gasdistributionen. I försök 1 där inmatningsflödet motsvarade $0,9 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$, dvs ca $1/5$ av rekommenderad inmatningshastighet [2] spred sig gasen sakta rakt upp från gasinmatningen i silons centrum medan spridning i sidled var mycket begränsad. I försök 2, då inmatningshastigheten var ca $4,4 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$, dvs i stort sett enligt rekommenderat värde, erhöles en markant spridning av gasen i sidled innan denna började stiga uppåt i silon. Gasspridningen på en radie av 2 m från gasinloppet var betydligt snabbare än spridningen rakt ovanför gasinloppet vilket antas vara en effekt av en lägre permeabilitet i centrumkärnan.

Denna effekt har också kunna visas i genomförda simuleringar genom att i några beräkningar anta anisotropa förhållanden inne i silon, både avseende permeabilitet och temperatur (se kapitel 6). Dessa simuleringar visar på samma tendenser till förändrad gasdistribution i förhållande till helt isotropa förhållanden. Simuleringsresultaten är inte helt överensstämmande med försöken men detta kan härledas till att gjorda antaganden om förhållandena inne i silon är mycket osäkra.

Som nämnts ovan var spridningen i sidled mycket begränsad, speciellt i försök 1 där ett relativt lågt gasflöde användes. Motsvarande simuleringar, både med isotropa och anisotropa förhållanden inne i silon, indikerar en större spridning i sidled än vad som

uppmättes i försöken. Detta kan tolkas som att simuleringarna möjligtvis generellt överskattar gasspridningen i sidled från ett inlopp.

Försöken visade också att inerteringen närmast siloväggen gick mycket långsamt vid gasinmatning i centrum. Denna ”väggeffekt” framgår också av genomförda simuleringar. En begränsning vid jämförelsen mellan försöksresultaten och generella simuleringar av gasfördelningen är att ”väggeffekten” sannolikt var betydande i försöken med centruminmatning och det högre gasflödet (Försök 2 och 5). Detta gör det svårt att bekräfta gasspridningen i sidled i en större silo vid ett inmatningsflöde som motsvarar rekommenderad inmatningshastighet.

Vid försöket med gasinmatning längs siloväggen (försök 3 och 4) spred sig gasen mycket snabbt uppåt rakt ovanför gasinloppet medan spridningen in till silons centrum var betydligt långsammare. Detta överensstämmer väl med genomförda simuleringar. Vid försöken fanns dock en utbyggnad på silon upp till ca 0,7 m höjd vilken inte hade fyllts helt med pellets utan medförde att det bildats en ”ringledning” längst upp i denna utbyggnad. Den inmatade gasen fick därför också möjlighet att sprida sig runt hela silomanteln i denna ringledning vilket gav en mycket snabb spridning av gasen. Detta specifika förhållande har dock ej simulerats.

Sammantaget kan man alltså konstatera att simuleringarna i stort tycks överensstämma med försöksresultaten men det är samtidigt uppenbart att anisotropa förhållanden inne i silon har stor påverkan. Att få en bra överensstämmelse mellan simuleringar och verklighet är därmed snarare en fråga om att ha bra vetskap om de anisotropa förhållandena inne i silon än begränsningar i simuleringarna. Denna osäkerhet är också gällande om silon är fylld med annat material där materialdata och bulkmateriallets permeabilitet är okända.

En påtaglig begränsning finns också när det gäller att simulera mer komplexa geometrier där 3-dimensionella simuleringar krävs. Detta kräver stor datorkraft och långa beräkningstider och här kan olika beräkningsprogram ha olika för- och nackdelar.

8.2 Hur påverkar silons täthet/otätheternas placering inerteringsprocessen?

I två av de genomförda försöken (4 och 5) försågs silon med en öppning i nederkanten av siloväggen för att representera ett läckage. Mätningarna av syrgaskoncentrationen, både i läckageöppningen och inne i silon indikerar att läckagets inverkan på inerteringsprocessen till stor del styrs av yttre väderförhållanden, speciellt vindhastighet och vindriktning. Vid försöken rådde varierande vindförhållanden där det läckte in luft in i silon under större delen av försöket medan det under kortare perioder istället läckte ut kvävgas. Omfattningen av in- eller utflöde beror sannolikt också på förhållandena inne i silon, bla bulkmaterialtest temperatur i förhållande till temperaturen utomhus. Även permeabilitetsvariationer inne i silon samt gasinloppets placering i förhållande till läckageöppningen kan naturligtvis ha en stor inverkan. På grund av de många okontrollerbara faktorerna har inga simuleringar av läckage genomförts.

8.3 Eventuella skaleffekter mellan genomförda försök och fullskaliga simuleringar?

De ”varma” simuleringar som genomförts av fullskaliga silor med en pågående pyrolysbrand tyder på ungefär samma brandförlopp som erhöles i tidigare genomförda brand- och släckförsök [2]. Pyrolyszonen sprider sig långsamt nedåt medan fukt och pyrolysgaser sakta sprids uppåt i bulkmaterialet.

Resultaten indikerar en viss tendens till att det bildas en större pyrolys/glödbrandzon i den större silon.

En glödbrand inne i silon kan påverka gasdistributionen till viss del genom bl a termiska drivkrafter vilket bl a kan öka gasspridningen i vertikal riktning. Även om glödbrand-zonen och zonen ovanför glödbranden påverkas av förkolning respektive fuktabsorption så att permeabiliteten minskar kommer syretillträdet till glödbranden att förhindras genom att det helt innesluts av inertgas. Detta medför att tillgängligt syre kommer att förbrukas varefter glödbranden kommer att kvävas.

De modeller som använts i simuleringarna har naturligtvis flera förenklingar och begränsningar i olika delmodeller som gör att man inte får med alla faktorer som kan påverka ett brand- och släckförlopp i en silo. Fortfarande utgör också datorkapaciteten en begränsning, speciellt om man vill genomföra 3-dimensionella simuleringar. Ett påtagligt problem är de stora dimensionsskillnader som råder, från gasinlopp på i storleksordningen 50-100 mm medan silons totala dimensioner kan röra sig om storleksordningen 10-50 m.

8.4 Hur skall gasinföringssystemet utformas för optimal gasfördelning?

För att få en jämn gasfördelning i en silo och därmed åstadkomma ett ”pluggflöde” behövs flera inlopp, speciellt för silor med större silodiameter. Den rekommenderade inmatningshastigheten [2] vid inertering av en silo är $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$ vilket också varit utgångspunkt för både simuleringarna och gasfyllnadsförsöken i detta projekt. Detta är också ett dimensioneringsvärde som visat sig fungera på ett tillfredsställande sätt i ett antal verkliga bränder [5], [6], [12].

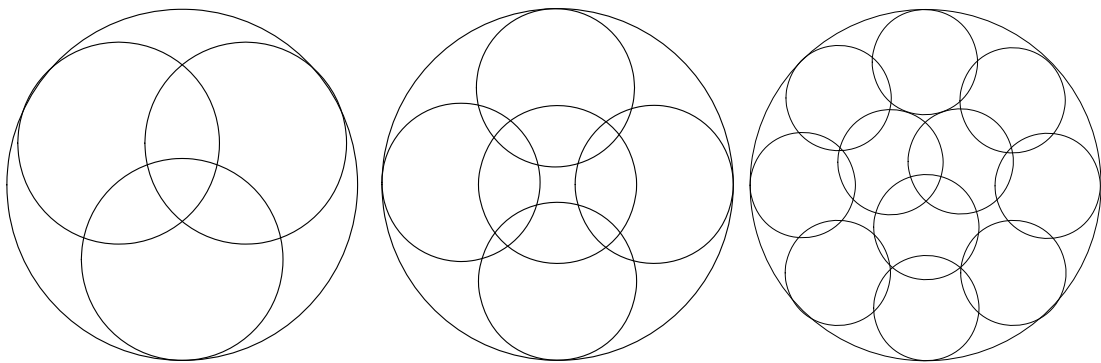
För att åstadkomma en jämn fördelning innebär det att man måste anpassa antalet inlopp så att gasen kan fördelas relativt jämnt. Ett enskilt gasinlopp ger en begränsad spridning i sidled vilken är beroende av det aktuella gasflödet. Ett större gasflöde i ett enskilt inlopp innebär en större tryckuppbyggnad precis vid inloppet vilket gör att gasen sprids bättre och fördelas över en större yta till dess att trycket jämnats ut.

Studerar man försöksresultaten visar dessa att den verkliga gasfördelningen runt ett enskilt inlopp sannolikt kommer att ligga på i storleksordningen $3-10 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$. I försök 1 användes ett lägre gasflöde än rekommenderat, ca 25 kg/tim , vilket motsvarar en genomsnittlig inmatningshastighet av $0,9 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$. Studeras gasspridningen i sidled i detta försök kan man konstatera att gasfördelningen i sidled var begränsad och att en ”effektiv” inertering (<5% syre) inte erhöles vid radien 2 m (mätlinje A respektive C). Eftersom det saknas mätpunkter mellan silons centrum och radien 2 m kan man inte avgöra exakt hur stor den effektiva spridningen var men om man antar att gasen spreder sig radiellt ca 1,5 m motsvarar detta en effektiv spridningsyta av ca 7 m^2 . Detta motsvarar i

sin tur en verklig, genomsnittlig inmatningshastighet över denna yta på $3,5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$. I försök 2, med ett gasflöde på 124 kg/tim , vilket motsvarar en genomsnittlig inmatningshastighet av $4,4 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$, erhöles en maximal effektiv spridning till radien 2 m (linje A och C) men däremot inte till radien 2,5 m (linje D). Om man antar att den effektiva radiella spridningen var 2,25 m motsvarar detta en spridningsyta på ca 16 m^2 och en genomsnittlig inmatningshastighet av knappt $8 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$ över denna yta. I detta försöket kan man dock misstänka att också siloväggen medverkade till att begränsa spridningen i sidled.

Sammantaget kan man alltså konstatera att gasfördelningen kring ett fritt inlopp kommer att begränsa sig till storleksordningen $3\text{-}5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$ vilket alltså stämmer mycket väl med rekommenderad inmatningshastighet. Om man därför anpassar antalet inlopp och gasflödet per inlopp så att detta motsvarar en genomsnittlig inmatningshastighet av $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$ så finns det också bra förutsättningar för att gasfördelningen över tvärsnittet blir relativt jämn. För att relativt snabbt uppnå ett jämt "pluggflöde" i en stor silo är sannolikt ett gasflöde på ca $200\text{-}800 \text{ kg/tim}$ per gasinlopp ett bra riktmärke vilket alltså motsvarar en täckningsarea av ca $40\text{-}160 \text{ m}^2$. För att medge att gasen hinner sprida sig radiellt och utveckla ett "pluggflöde" innan gasfronten bryter igenom ytan av det lagrade bulkmaterialen bör man sträva efter en mindre täckningsyta per inlopp (fler inlopp) i silor ju lägre lagringshöjden är. I Figur 63 visas ett exempel på hur gasen kan distribueras i en silo genom att anpassa antalet inlopp respektive gasflödet per inlopp så att den genomsnittliga inmatningshastigheten uppgår till $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$. I figuren markerar varje cirkel runt varje enskilt inlopp förväntad täckningsyta vilket innebär att det blir viss överlappning men också vissa "luckor". Även vid en distribuerad gaspåföring som detta, får man räkna med vissa variationer på grund av anisotropa förhållanden i silon samt att man även här får räkna med en viss "väggeffekt".

Om man vill förbättra gasfördelningen ytterligare, t ex om man bara har ett gasinlopp i en mindre silo, kan man i inledningsskedet av gasinmatningen öka gasflödet utöver den rekommenderade inmatningshastigheten om gasutrustningen tillåter ett förhöjt flöde. Detta kommer att leda till en ökad tryckuppbyggnad runt gasinloppet vilket i sin tur kommer att bidra till förbättrad radiell gasspridning. Detta medför naturligtvis en snabbare inertering av hela silon och så snart man konstaterar att kvävgasen nått silotoppen kan gasflödet reduceras.



Figur 63 Exempel på hur gasflödet kan delas upp på olika antal inlopp beroende på silons storlek. Gasflödet per inlopp beräknas så att det totalt sett motsvarar en genomsnittlig inmatningshastighet på $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$.

8.5 Hur skall gasinföringen utformas för bästa funktion?

Som framgått av resonemanget ovan erhålls en distribution av gasen inne i materialet på grund av det tryckfall som uppstår runt inloppet. De simuleringar som genomförts och resultaten från genomförda försök är relativt samstämmiga och tyder på att erforderligt matningstryck inte är speciellt högt.

En simulering med ett gasflöde på 628 kg/tim i ett enskilt inlopp visade på att beräknat maximalt tryck var ca 21000 Pa (ca 0,2 bar) precis vid inloppet för att efter ca 1 m spridning ha reducerats till i storleksordningen 350 Pa vilket utgör kvarvarande drivtryck för spridning resterande sträcka genom pelletbulken. Detta maximala tryck är av samma storleksordning som uppmätt inmatningstryck vid de genomförda försöken. Där uppmättes ett netto gstryck på ca 0,4 bar vid ett inmatningsflöde på ca 550 kg/tim (se kapitel 4.8). Även tryckfallet genom resterande pelletsbulk är rimligt. I beräkningsexemplet är fyllnadshöjden 30 m vilket i genomsnitt motsvarar ett tryckfall på knappt 12 Pa/m vilket stämmer väl med genomförda permeabilitetsmätningar (se kapitel 5.1).

Gasinloppets utformning kan vara mycket enkel och det krävs inga speciella ”munstycken”. Det viktigaste är att skydda inloppet mot igensättning vilket kan åstadkommas på olika sätt beroende på silons konstruktion. I en silo med plan botten matas gasen lämpligtvis in genom botten där inloppsöppningen täcks med en skyddsplåt eller motsvarande. I en mindre silo försedd med bottenkona kan gasen föras in genom en röranslutning direkt igenom konan. Röret förses med en böj så att öppningen är riktad nedåt vilket förhindrar igensättning. Genom att placera inloppet en bit ner på konan förbättras gasdistribution över silons tvärsnitt.

En viktig aspekt är också att gasinloppet är tätt när det inte används. Fukt kan annars bidra till att materialet närmast inloppet bildar en kaka som kan förhindra gasinmatning. Detta noterades tydligt vid tömning av försökssilo där pellets bildat en kaka på insidan av den simulerade läckageöppningen (se foto i Figur 43).

I akuta brandsituationer där inga förberedelser för gasinmatning utförts, görs lämpligtvis en eller flera håltagningar i silons nederdel där en rörformad, perforerad lans trycks in i materialet. Rekommendationerna ovan om en fördelad gasinmatning gäller även här men kan naturligtvis vara svårt att åstadkomma i silor med större diameter då det både kräver fler håltagningar och längre lansar. Det kan sannolikt även uppstå praktiska problem att trycka in lanser i materialet på grund av ett stort motstånd i materialet.

Inmatning av koldioxid via silotoppen innebär relativt stora gasförluster vid påföringen då en betydande del ventileras bort direkt. Eftersom ”drivtrycket” endast utgörs av densitetskillnaden mellan koldioxid och luft blir detta mycket lågt vilket inte leder till någon effektiv gasfördelning vilket också verifierades av mätresultaten. Även om det i vissa fall kan vara befogat att invertera silotoppen ur explosionssynpunkt, är det ur praktisk synpunkt betydligt enklare att använda kvävgas även i detta fall.

9 Slutsatser och rekommendationer

Projektet har genererat mycket kunskap och många praktiska erfarenheter, både genom utförda simuleringar och genomförda försök.

- Försöken har bekräftat att användning av kvävgas är ett förhållandevis enkelt sätt att inertera en silo. Den rekommendation kring lämplig inmatningshastighet, $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$, som grundas på tidigare genomförda brand- och släckförsök [2] har visat sig också ge förutsättningar för en bra gasfördelning inne i en silo. Släcktaktiken och dimensioneringen har också kunnat verifieras vid ett antal verkliga silobränder [5], [6], [12].
- Försöken har visat att det kan råda mycket varierande (anisotropa) förhållandena inne i en silo, bl a beroende på ansamling av finfraktion från påfyllning av silon och temperaturvariationer inne i bulkmaterialet, vilket i sin tur påverkar gasfördelningen. Även fuktvandring, framförallt till följd av en pågående pyrolys, kan tänkas påverka permeabiliteten och därmed gasfördelningen.
- Gasspridningen i sidled från ett enskilt gasinlopp är begränsad och i större silor är det sannolikt att full inertering inte kan uppnås med endast ett inlopp. Gasfördelningen begränsas också av siloväggen vilket gör att det kan vara svårt att nå en effektiv inertering inom 0,5-1 m från väggen. Dessa samlade observationer från försöken bekräftas också av genomförda simuleringar.
- Ett ökat gasflöde per inlopp innebär en förbättrad gasfördelning eftersom tryckfallet i bulkmaterialet och därmed tryckuppbyggnaden vid inloppet bidrar till gasspridning även i sidled. Ett rimligt gasflöde per inlopp är 200-800 kg/tim vilket kan förväntas täcka en yta på 40-160 m^2 , dvs motsvarande en genomsnittlig inmatningshastighet av $5 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$.
- Om silodiametern är stor kommer gasen att behöva matas in genom flera inlopp för att erhålla en bra gasfördelning ("pluggflöde") över hela tvärsnittsytan. Flera gasinlopp säkerställer också att gasfördelningen blir så jämn som möjligt trots anisotropa förhållanden inne i silon.
- Antal gasinlopp och gasflöde per inlopp balanseras inom ovan givna flödesintervall (200-800 kg/tim) på lämpligt sätt beroende på silons tvärsnittsarea (diameter). Vid låg lagringshöjd bör gasen fördelas på fler inlopp för att säkerställa en jämn fördelning över tvärsnittet innan gasen når bulkmaterialets yta i silotoppen.
- Om kapacitet finns hos gassystemet (förångare, matningsledningar samt gasinlopp) kan man inledningsvis öka inmatningshastigheten till det dubbla (ca $10 \text{ kg/m}^2 \text{ tim}$) för att ytterligare förbättra gasfördelningen i sidled. Detta kan vara speciellt lämpligt i en akut brandsituation där endast ett gasinlopp kunnat arrangeras.
- Efter att hela silon fyllts med inertgas kan sannolikt gasflödet reduceras ner till 1-2 $\text{kg/m}^2 \text{ tim}$ men detta kommer att medföra en sämre fördelning av gasen.

- Ett läckage eller en öppning som inte går att tätas kan innebära både inläckage av luft (syre) respektive förlust av kvävgas vilket kan leda till behov av ökad inmatningshastighet. Eftersom tryckförhållandena inne i silon skiljer mycket lite mot omgivningen kan väder och vindförhållanden ha stor påverkan på vilket effekt otätheter i silon ger upphov till.
- De genomförda gasfyllnadsförsöken har gett mycket värdefull kunskap och erfarenhet. Försöken visade att inertering genom gasinmatning vid silons botten fungerade mycket bra utan några praktiska problem eller behov av höga matningstryck. Insatstaktiken skapar förutsättningar för en kontrollerad och odramatisk släckinsats och efterföljande tömning.
- Försöket med påföring av koldioxid via silotoppen visade att detta är ett förhållandevis ineffektivt sätt att inertera en silo. En stor del av gasen (ca 20%) ventilerades bort direkt vid gaspåföringen och fördelningen av gasen inne i silon var till stor del slumpartad eftersom det inte går att åstadkomma ett ”drivtryck”.
- Användning av inertgas inne i silon medförde ingen nämnvärd kvalitetsförsämring av pelletsen. Detta innebär att inertering i förebyggande syfte, t ex vid en misstänkt men ej verifierad brand, kan genomföras utan att siloinnehållet skadas.
- I samband med fyllning av försökssilon kunde noteras en mycket markant oxidationsprocess i pelletsen vilket medförde en temperaturstegring i kombination med alstring av relativt höga halter av kolmonoxid inne i bulkmaterialet. Även om detta inte alltid behöver leda till risk för självantändning kan dessa höga kolmonoxidhalter utgöra en allvarlig personrisk.
- Man bör också beakta att hantering av kvävgas och koldioxid i slutna utrymmen är förknippat med risker för kvävning och personsador.
- De ”varma” simuleringar som genomförts visar inte på några principiella skillnader gentemot tidigare genomförda brand- och släckförsök. Simuleringen av pyrolysisprocessen är dock komplicerad och är delvis anpassad för att överensstämma med siloförsöken 2006.
- Kunskaperna från detta projekt tillsammans med tidigare forskningsprojekt och praktiska erfarenheter från släckning av verkliga silobränder, ger en bra grund för att utforma konkreta rekommendationer kring silobrandsläckning. Sådana samlade rekommendationer är under utarbetande och kommer att publiceras av MSB.

10 Referenser

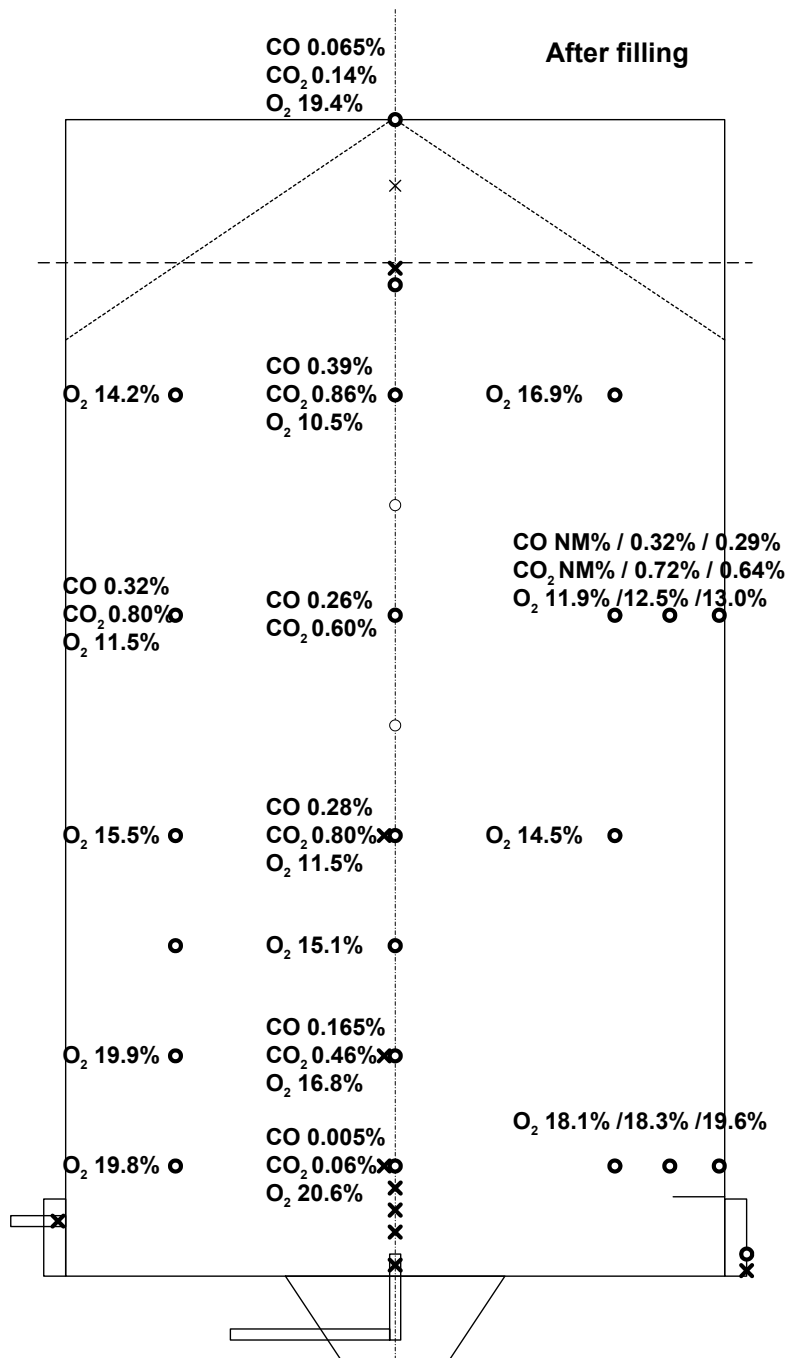
- [1] Persson, H., and Blomqvist, P., "Släckning av silobränder", SP Swedish National Testing and Research Institute, SP-Arbetsrapport 2004:16, Borås, 2004.
- [2] Persson, H., Blomqvist, P., and Yan, Z., "Brand och brandsläckning i siloanläggningar - en experimentell studie", SP Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut, SP Rapport 2006:47, Borås, 2006.
- [3] Persson, H., and Blomqvist, P., "Fire and fire extinguishment in silos", Interflam '07, 365-376, London, England, 2007.
- [4] Persson, H., and Blomqvist, P., "Analys av gasinnehåll i topputrymmet av siloceller med träpellets", SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, P702634 (not public), 2007.
- [5] Persson, H., Blom, J., and Modin, P., "Research experience decisive in extinguishing silo fires", *BrandPosten*, 37, 28-30, 2008.
- [6] Persson, H., and Blom, J., "Research helps the fighting of a silo fire again", *BrandPosten*, 38, 30-31, 2008.
- [7] Yan, Z. H., "SIMTEC-Simulation of Thermal Engineering Complex", User manual, 2008.
- [8] "COMSOL Multiphysics, ver 3.5", COMSOL AB, 2008.
- [9] Yan, Z. H., "Validation of CFD Model för Simulation of Spontaneous Ignition in Bio-mass Fuel Storage", 8th IAFSS Symposium, Beijing, 2005.
- [10] Freindorf, M., "Silo Fires-Simulation of Gas Injection in a Porous Bed", SP Technical Research Institute of Sweden, SP-Technical Note 2008:02, 2008.
- [11] Yan, Z., "CFD Simulation of Spontaneous Ignition and Its Extinguishment in Biomass Fuel Storage", Lund University, Department of Energy Sciences, ISRN LUTMDN/TMHP-09/3038-SE, 2009.
- [12] Nordlund, T., Samuelsson, A., "Sammanställning av händelseförloppet vid brand i cistern med stenkol på Stora Enso, Hylte 2009-02-13", Räddningstjänsten Halmstad, 2009.

Bilaga 1. Lista över mätkanaler

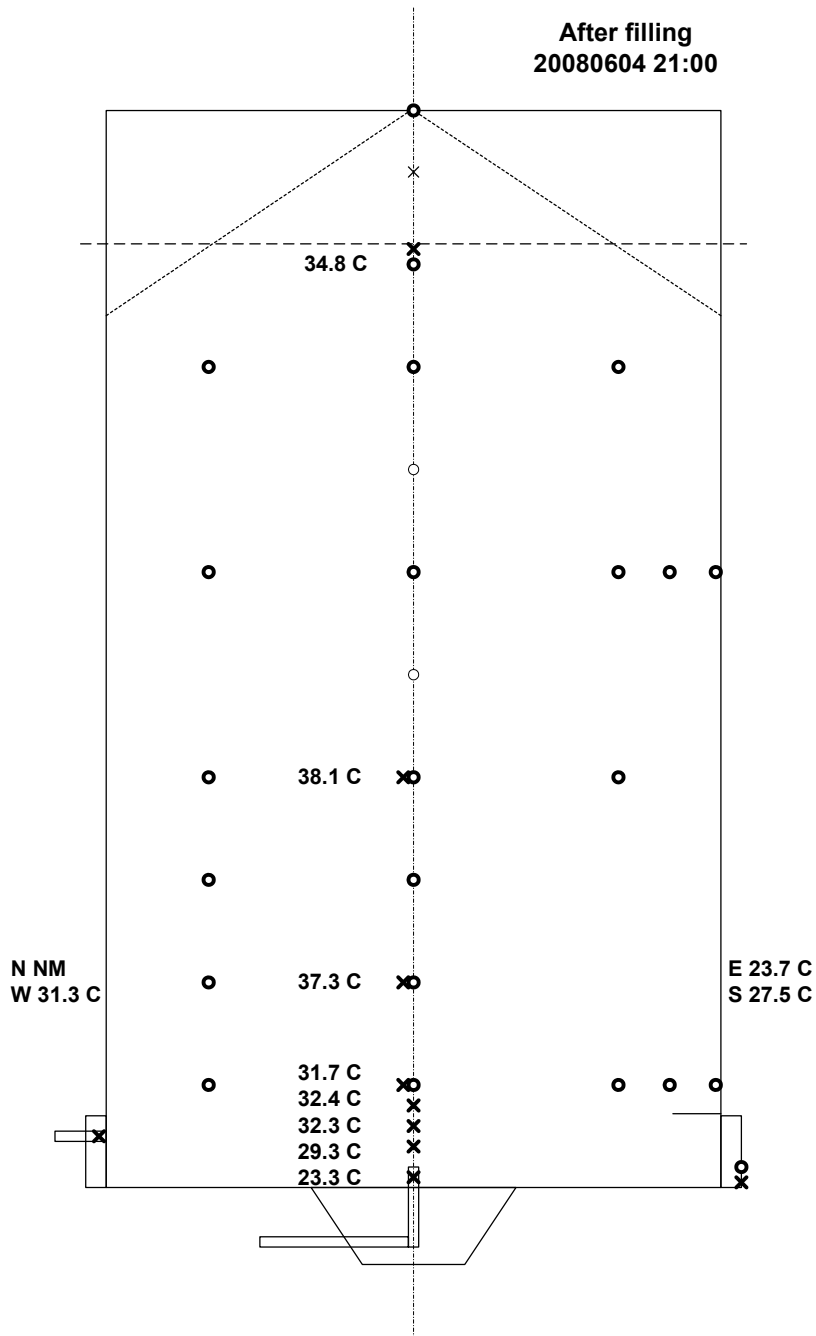
Tabell B1 Lista över mätkanaler och givare/instrument vid fyllnadsförsöken

IMP 3	Givare/instrument	Placering	Kommentarer
1	Termoelement	Gasinlopp centrum	
2	Termoelement	0.4B	
3	Termoelement	0.6B	
4	Termoelement	0.8B	
5	Termoelement	1B	
6	Termoelement	2B	
7	Termoelement	4B	
8	Termoelement	9B	
9	Termoelement	Gasinlopp sidan	
10	Termoelement	Silovägg 2m -söder	Mot linje C-D-E
11	Termoelement	Silovägg 2m -väster	
12	Termoelement	Silovägg 2m -norr	Mot linje A
13	Termoelement	Silovägg 2m -öster	
14	Termoelement	Gasutlopp 10.5 B	
15	Termoelement	Vid läckageöppning	
16	Termoelement	Ovan pellets 9.25C	Endast vid försök 5
17	Termoelement	Ovan pellets 9.25B	Endast vid försök 5
18	Spänning 0-2V	Gasväxling	0V=B-ingång, 2V=A-ingång
IMP 4			
21	O ₂ -ÅF	Varierande	”Syrgasmätare 1”
22	O ₂ -ÅF	Varierande	”Syrgasmätare 2”
23	O ₂ -SP (201625)	Varierande	”Syrgasmätare 3”
24	O ₂ -SP (700173)	Varierande	”Syrgasmätare 4”
25	O ₂ -LTH	Varierande	”Syrgasmätare 5”
26	O ₂ -LTH	Varierande	”Syrgasmätare 6”
27	CO 10% (701133)	Varierande	
28	CO ₂ 30% (701133)	Varierande	
29	CO 3% (700240)	Varierande	
30	CO ₂ 10% (700240)	Varierande	
31	Temperatur (RH-mätare)	Gasutlopp 10.5B	Testo ”Hygrotest” 0-100% RH, -20 - +180 °C
32	Relativ fuktighet	Gasutlopp 10.5B	
33	Tryck	BD-prob gasutlopp	Furness Controls Differential Pressure, FC0332, ±30 Pa
34	Tryck	BD-prob läckage	Som ovan, (ej använd)

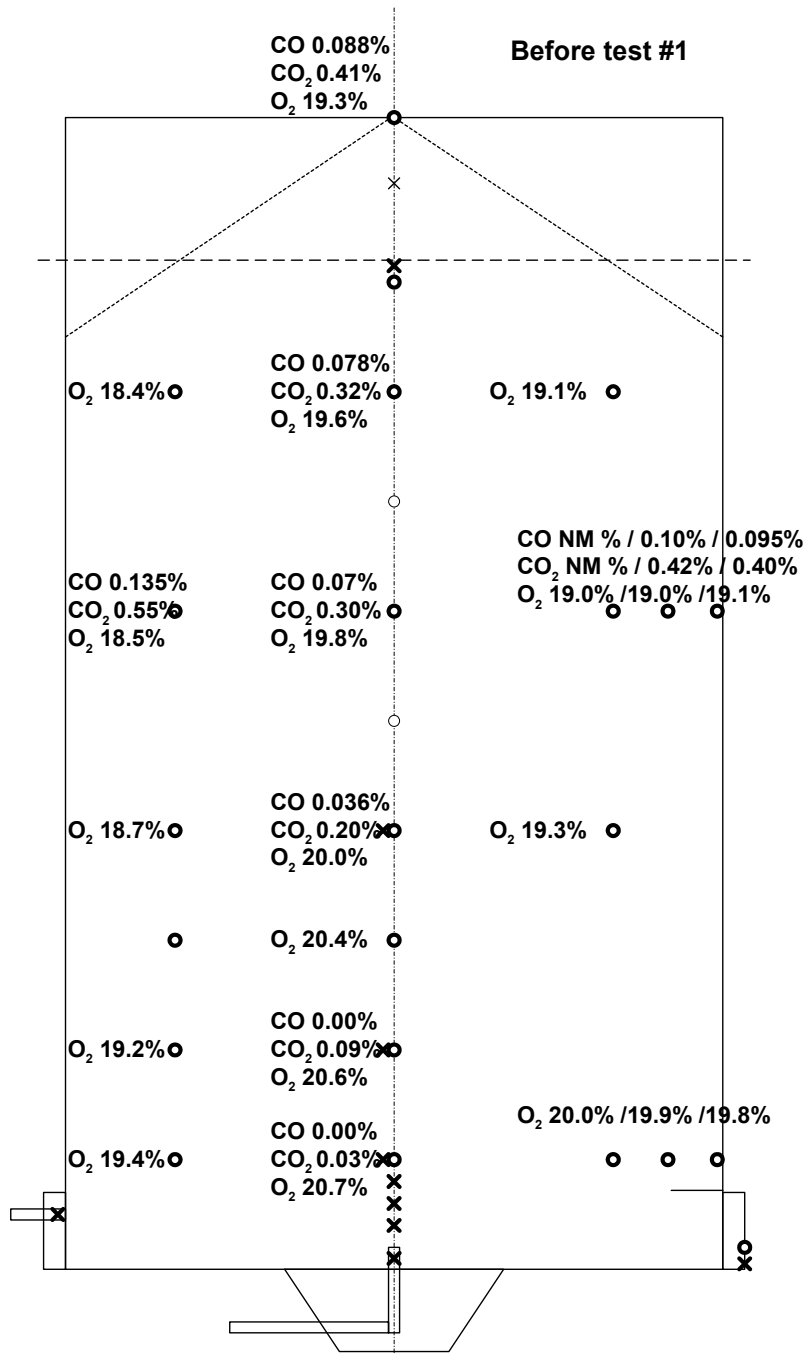
Bilaga 2. Resultat av bakgrundsmätningar



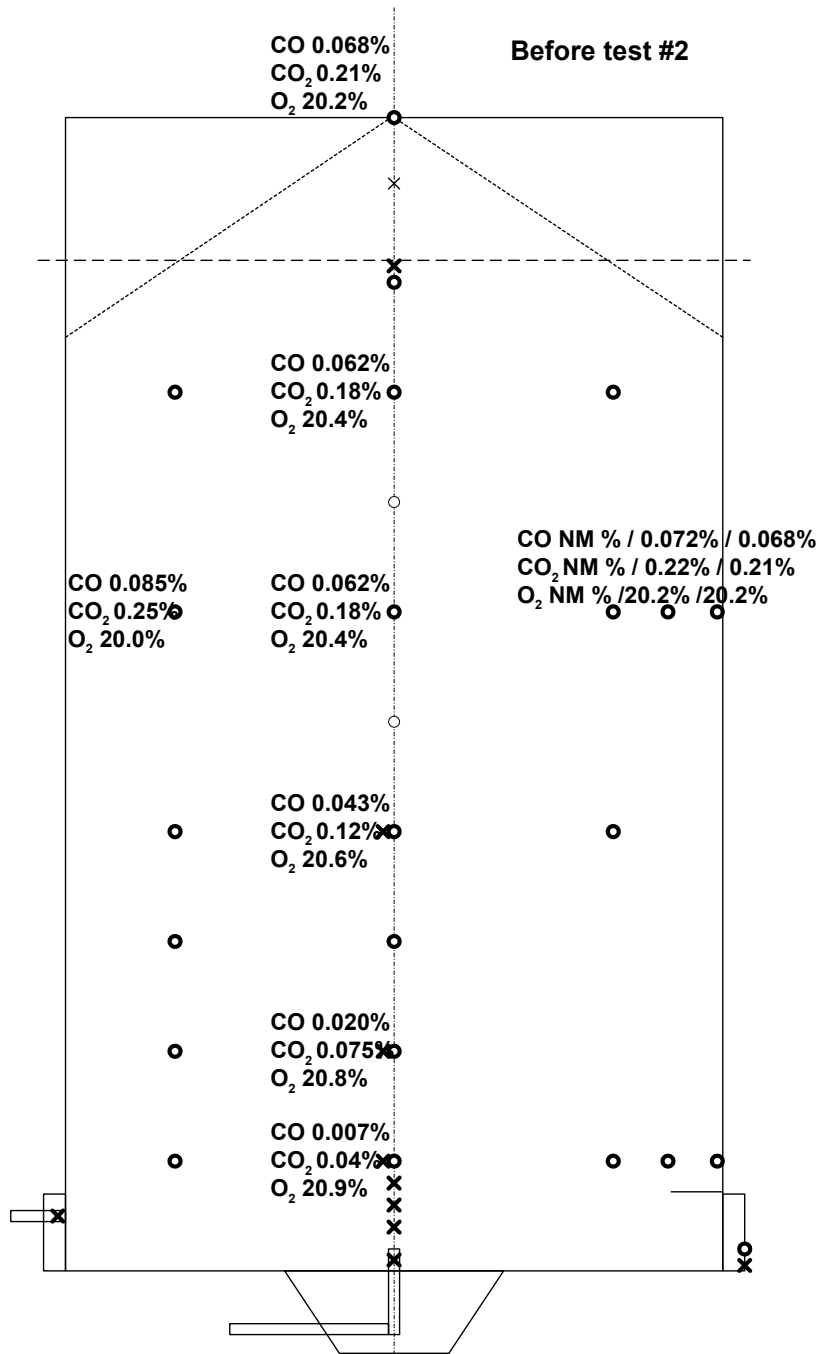
Figur B2:1 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon ca 3 timmar efter avslutad fyllning av pellets (2008-06-04).



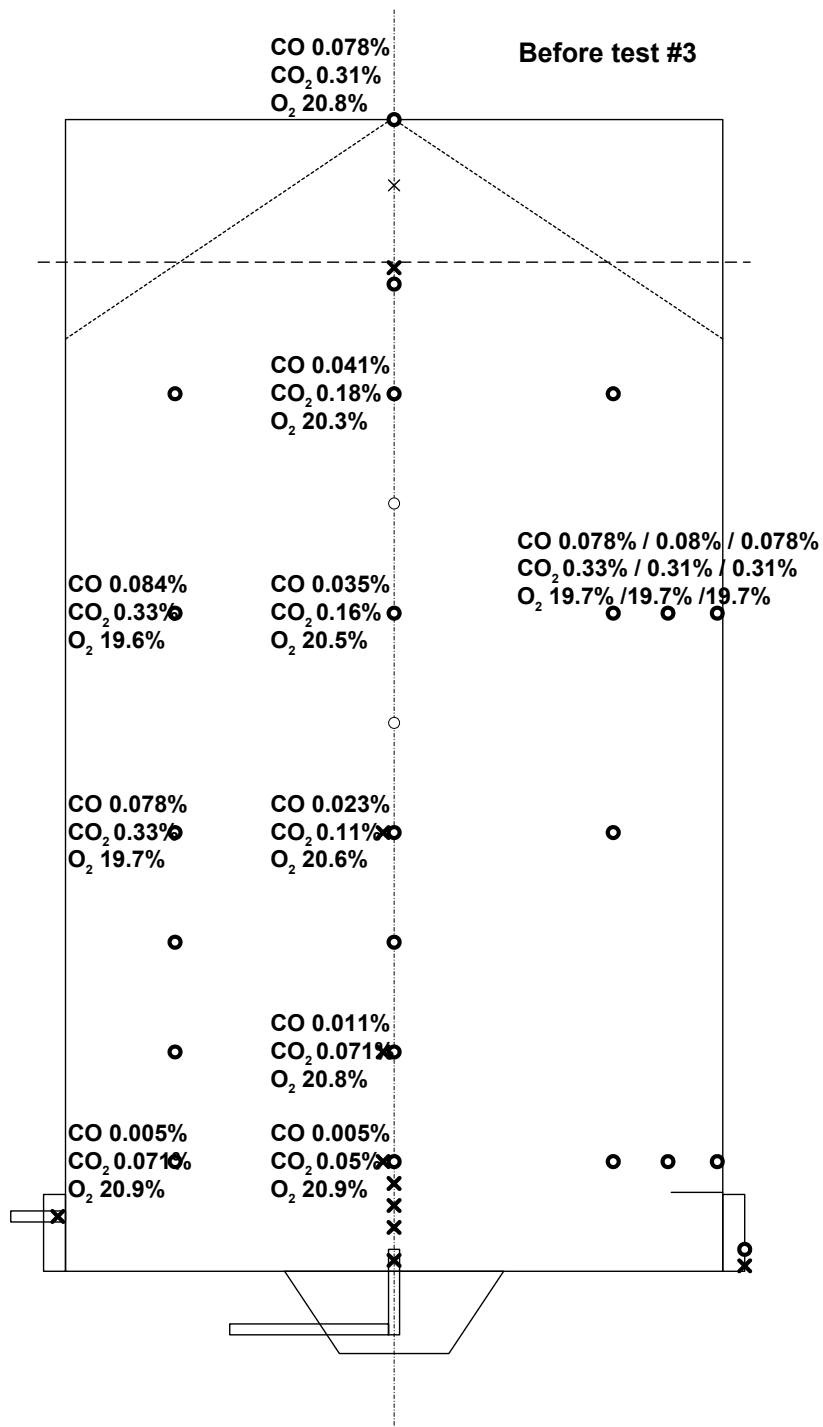
Figur B2:2 Uppmätta temperaturer inne i silon och på siloväggarna ca 3 timmar efter avslutad fyllning av pellets (2008-06-04).



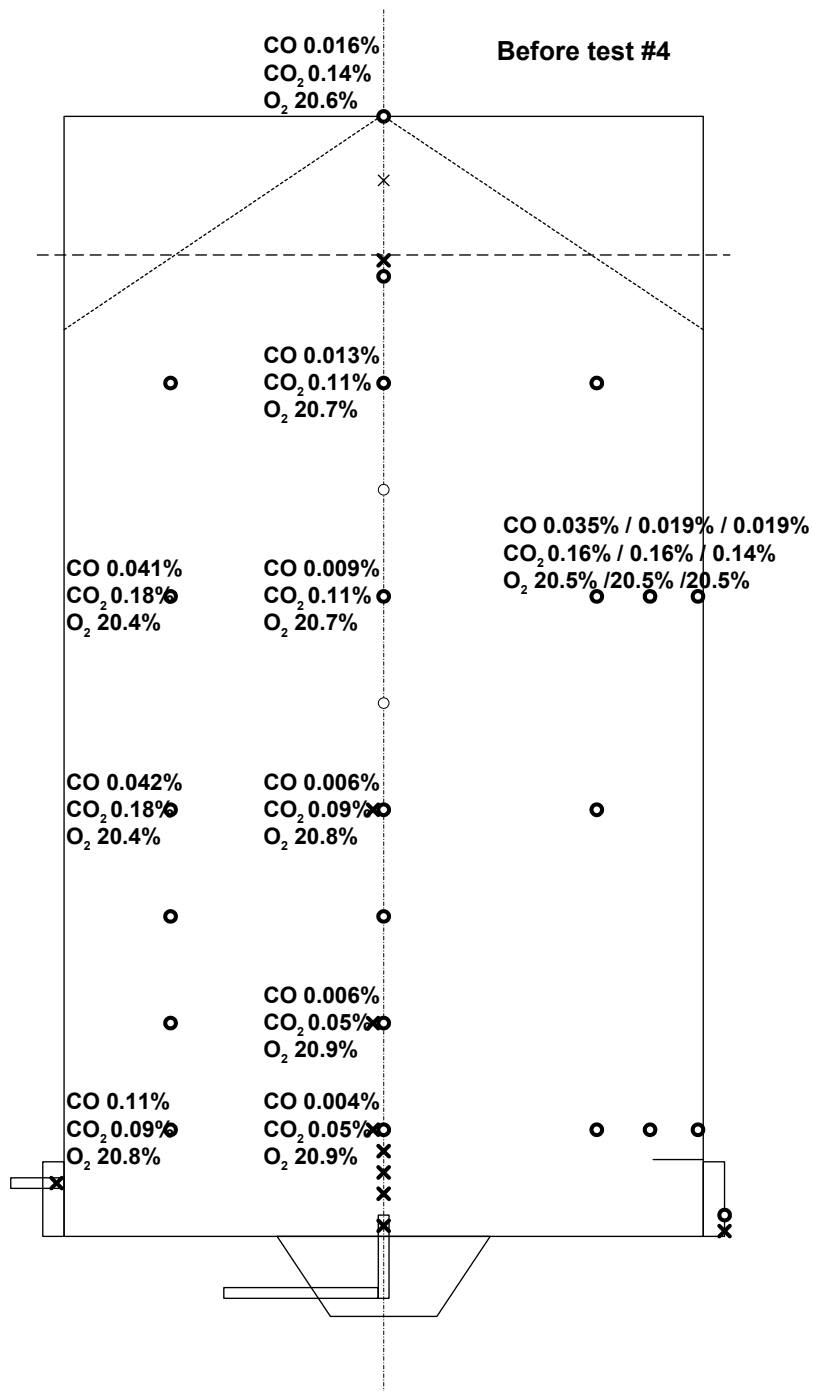
Figur B2:3 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon efter "luftning" och strax före gasfyllnadsförsök 1 (2008-06-09).



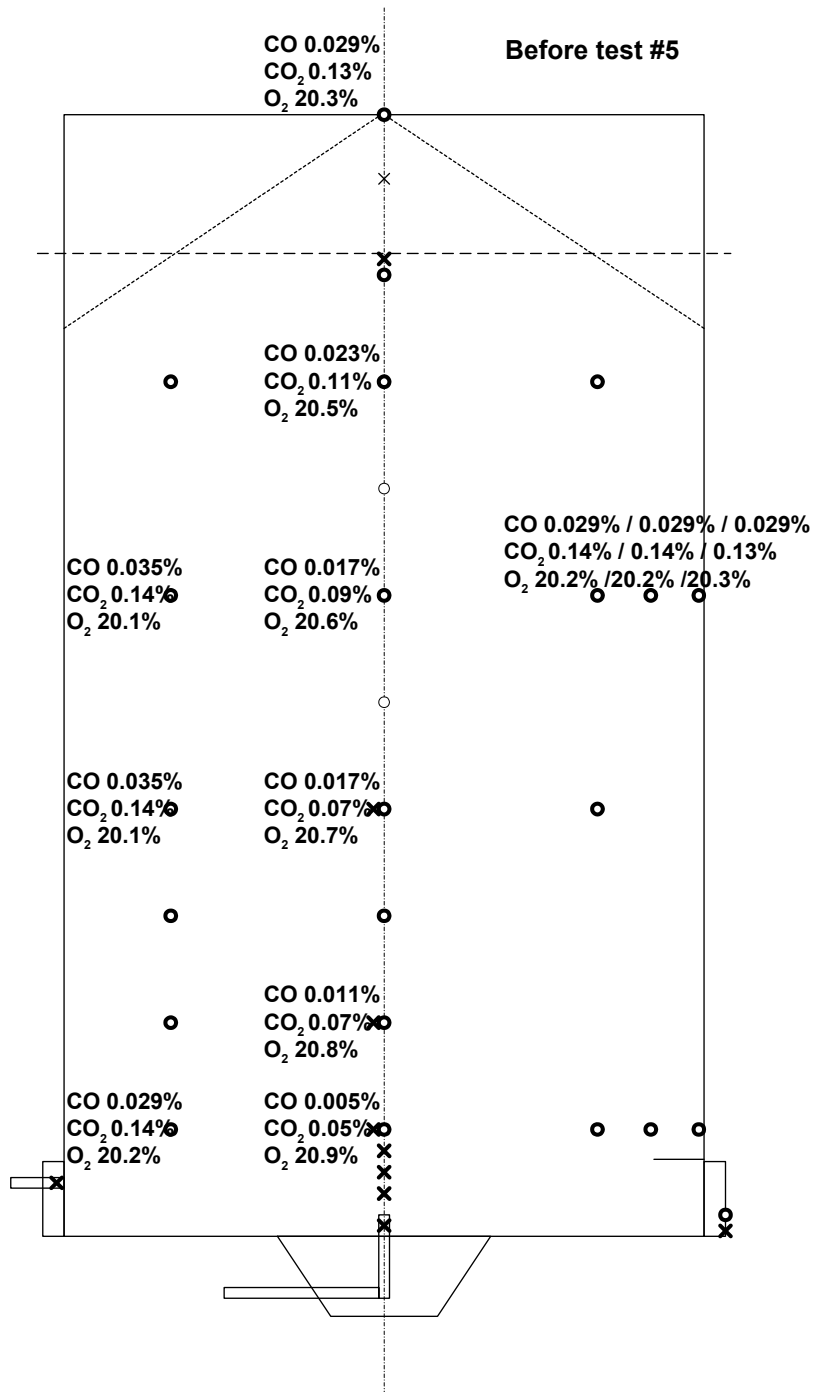
Figur B2:4 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon efter ”luftning” och strax före gasfyllnadsförsök 2 (2008-06-11).



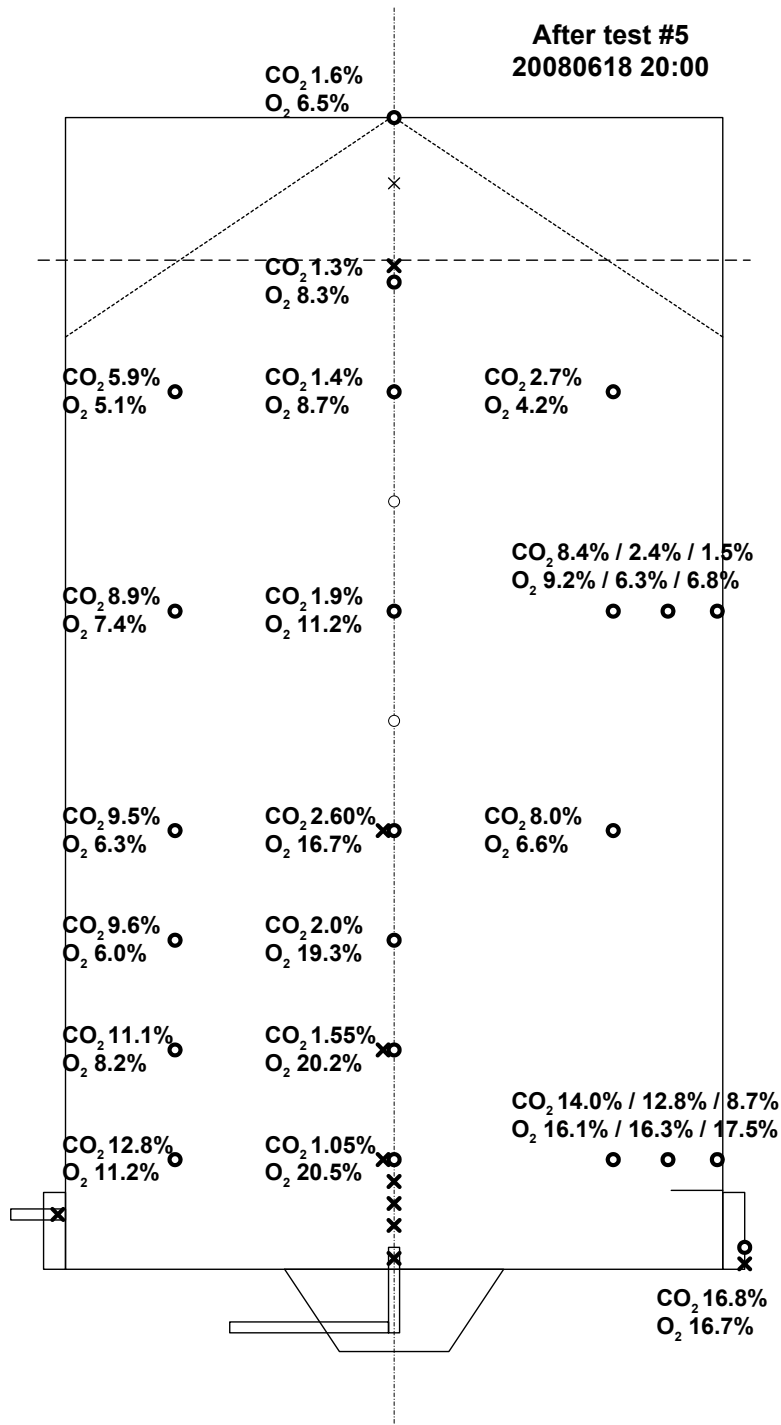
Figur B2:5 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon efter "luftning" och strax före gasfyllnadsförsök 3 (2008-06-13).



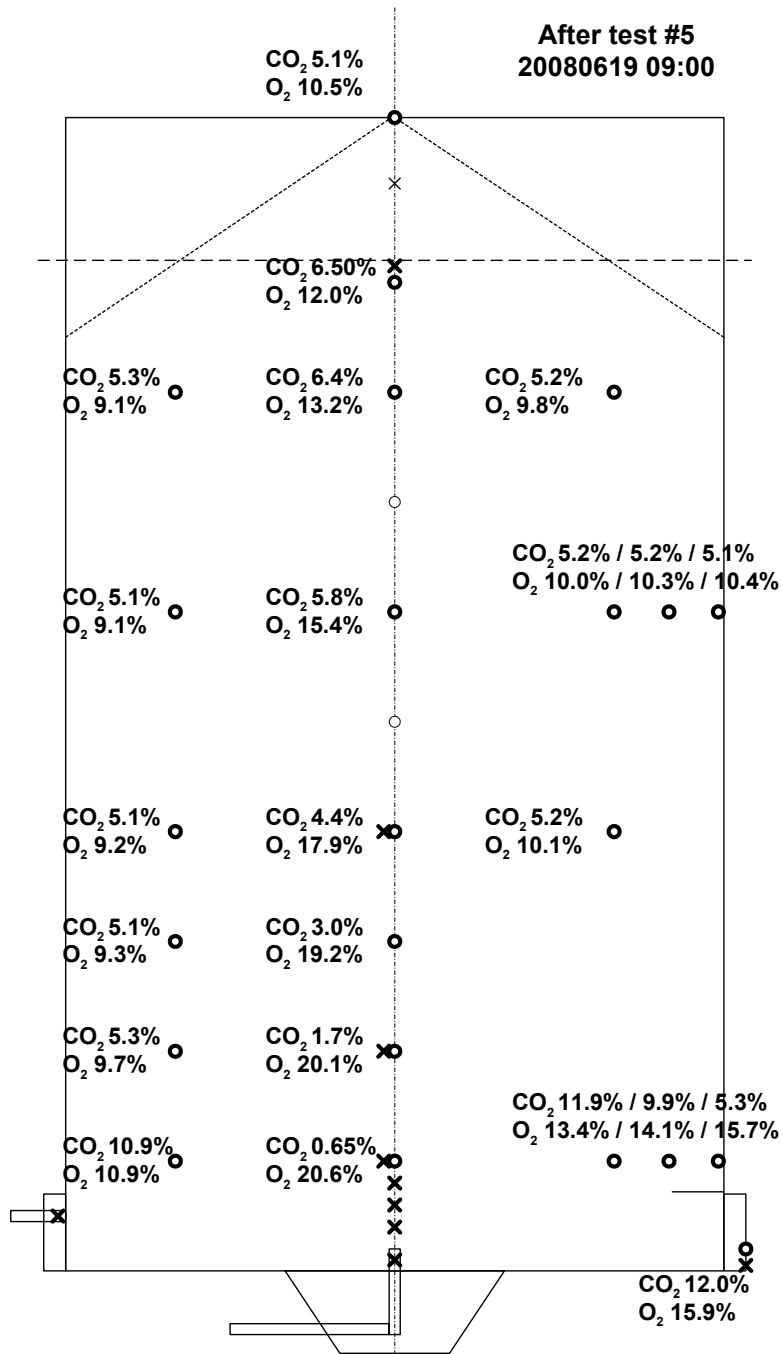
Figur B2:6 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon efter "luftning" och strax före gasfyllnadsförsök 4 (2008-06-16).



Figur B2:7 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon efter "luftning" och strax före gasfyllnadsförsök 5 (2008-06-18).



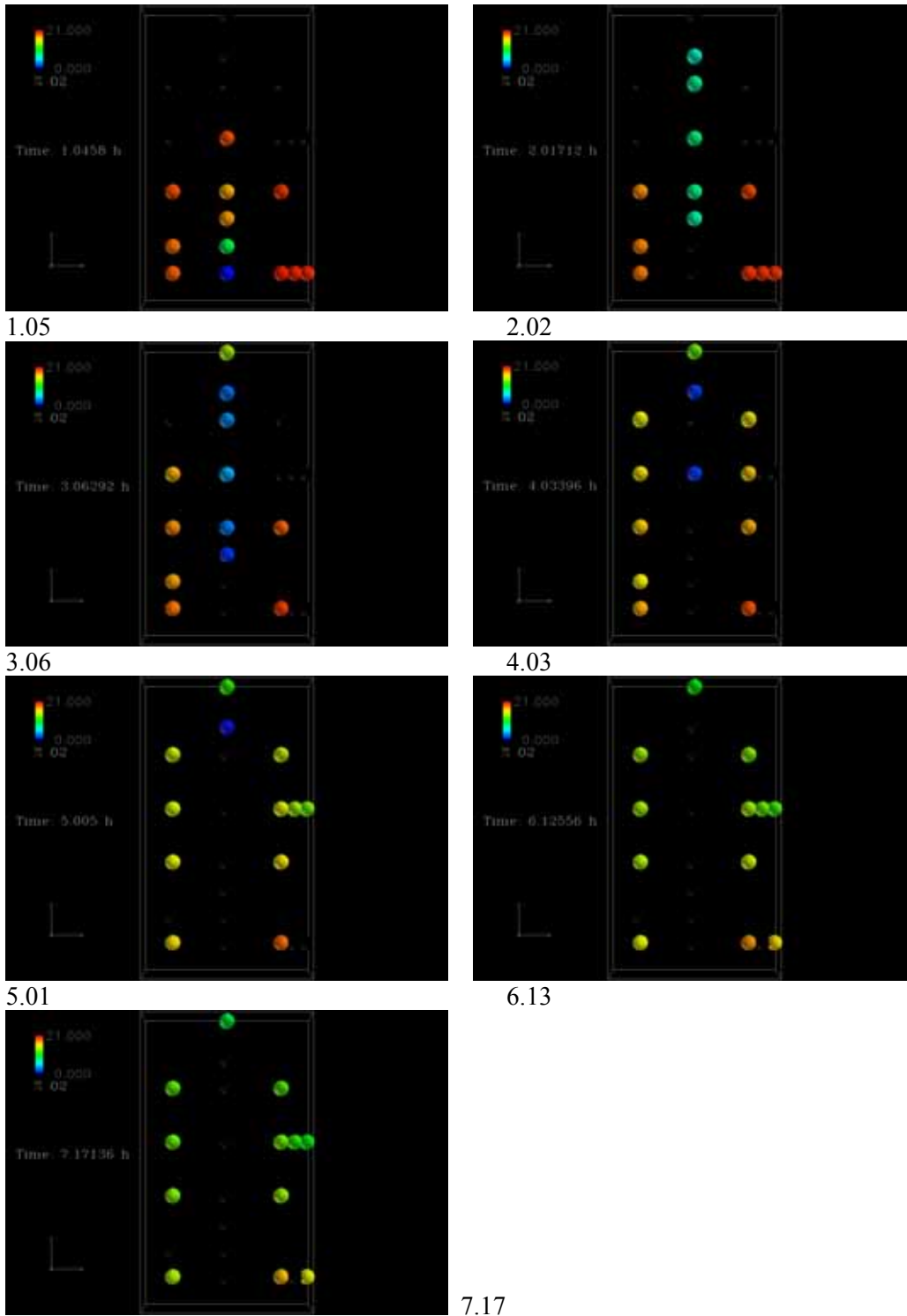
Figur B2:8 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon ca 2 timmar efter avslutat gasinmatning i gasfyllnadsförsök 5 (2008-06-18).



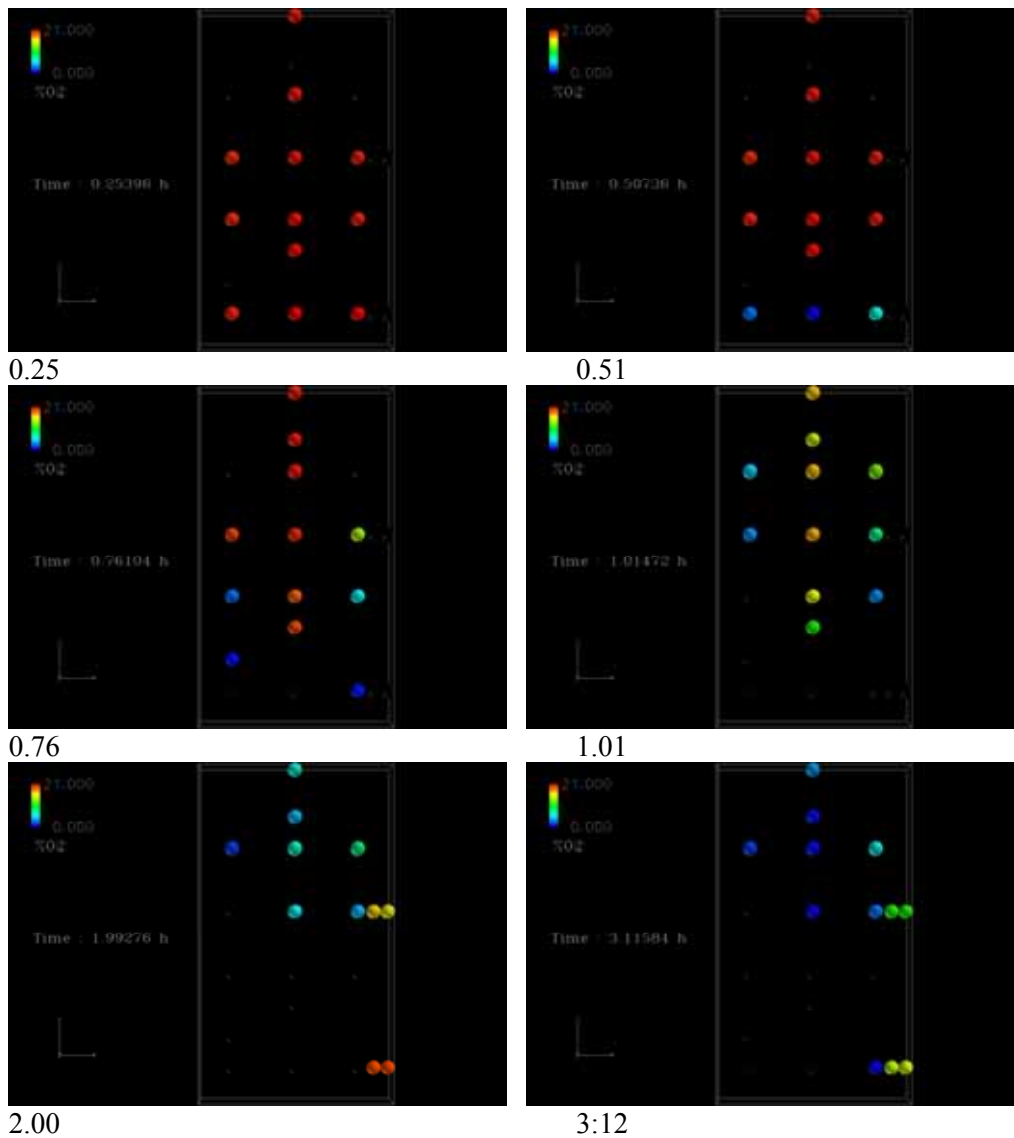
Figur B2:9 Uppmätta gaskoncentrationer inne i silon ca 15 timmar efter avslutat gasinmatning i gasfyllnadsförsök 5 (2008-06-19).

Bilaga 3. Bilder av uppmätt koncentrationsfördelning

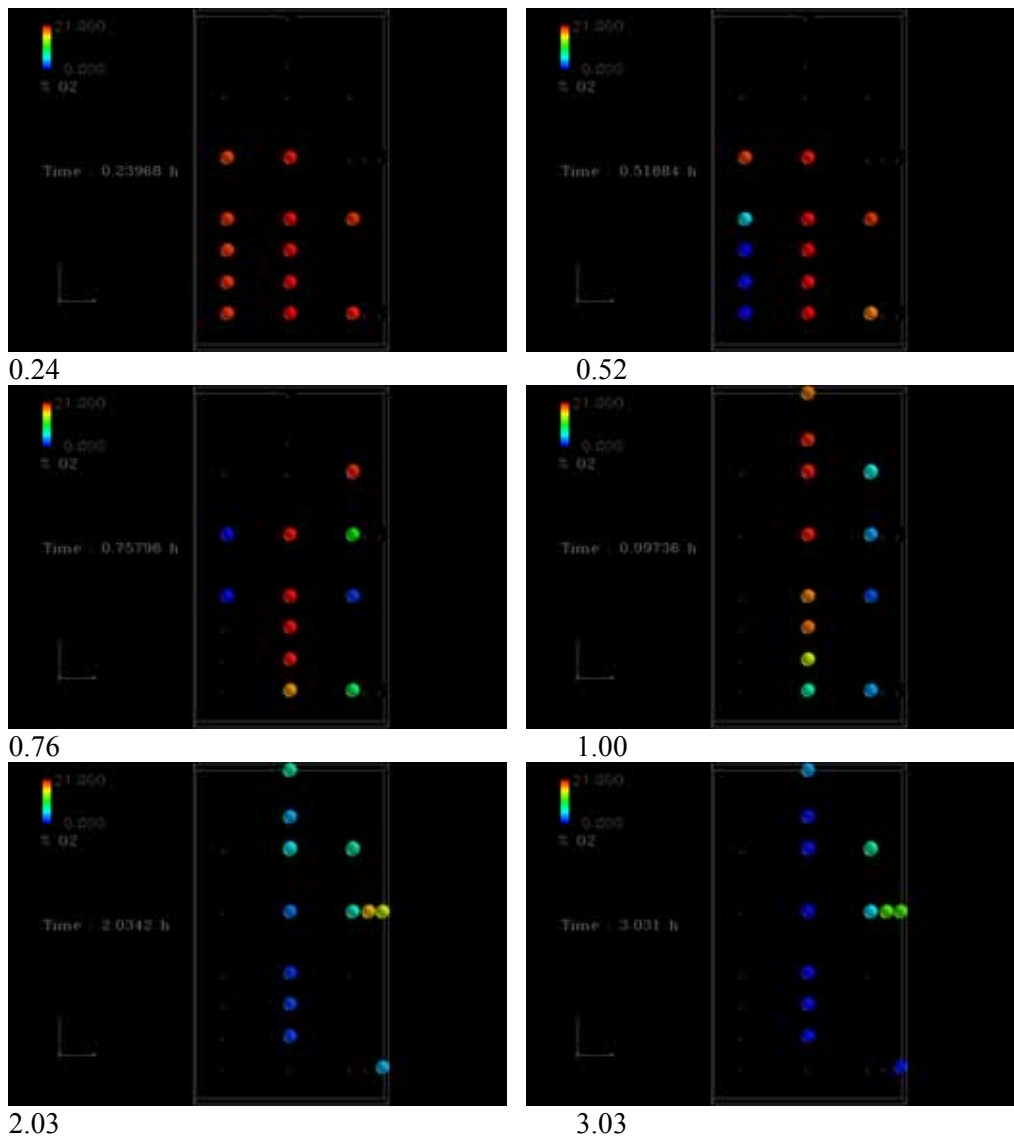
Nedan redovisas en översikt av uppmätta syrgaskoncentrationer i försökssilon vid olika tidpunkter och i olika positioner. Tiderna nedan är angivna i timmar och är baserade på försöksstart, dvs gasinmatning inleds vid tiden 0,33 tim (20 min). **OBS, i dessa bilder avser röd färg luft (ca 21% syre) medan blå färg motsvarar 0% syrgas.**



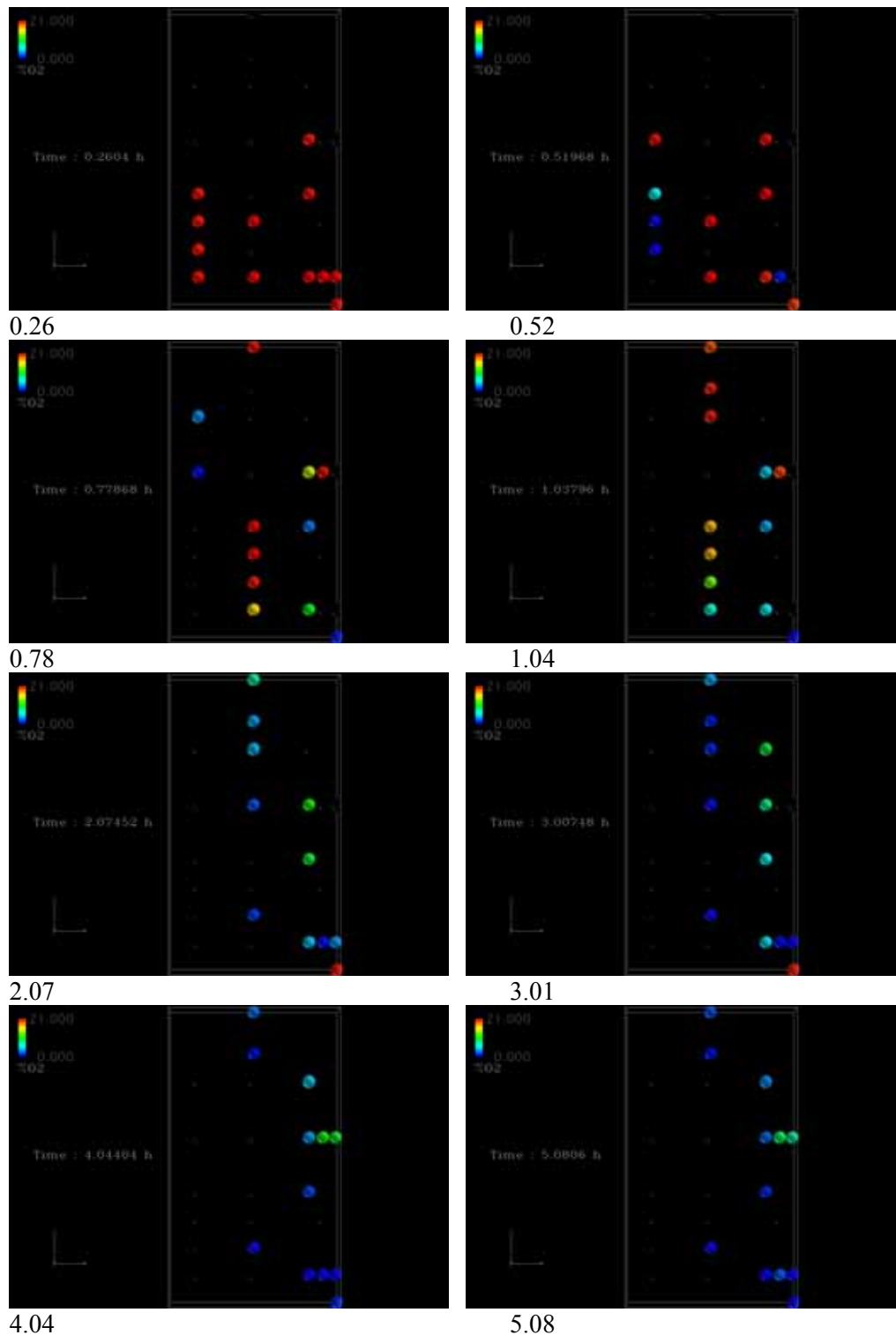
Figur B3:1 Bilder som visar uppmätt syrgaskoncentration inne i silon vid olika tidpunkter under gasfyllnadsförsök 1. (Röd färg-luft=21% syre, blå färg-ren kvävgas=0% syre)



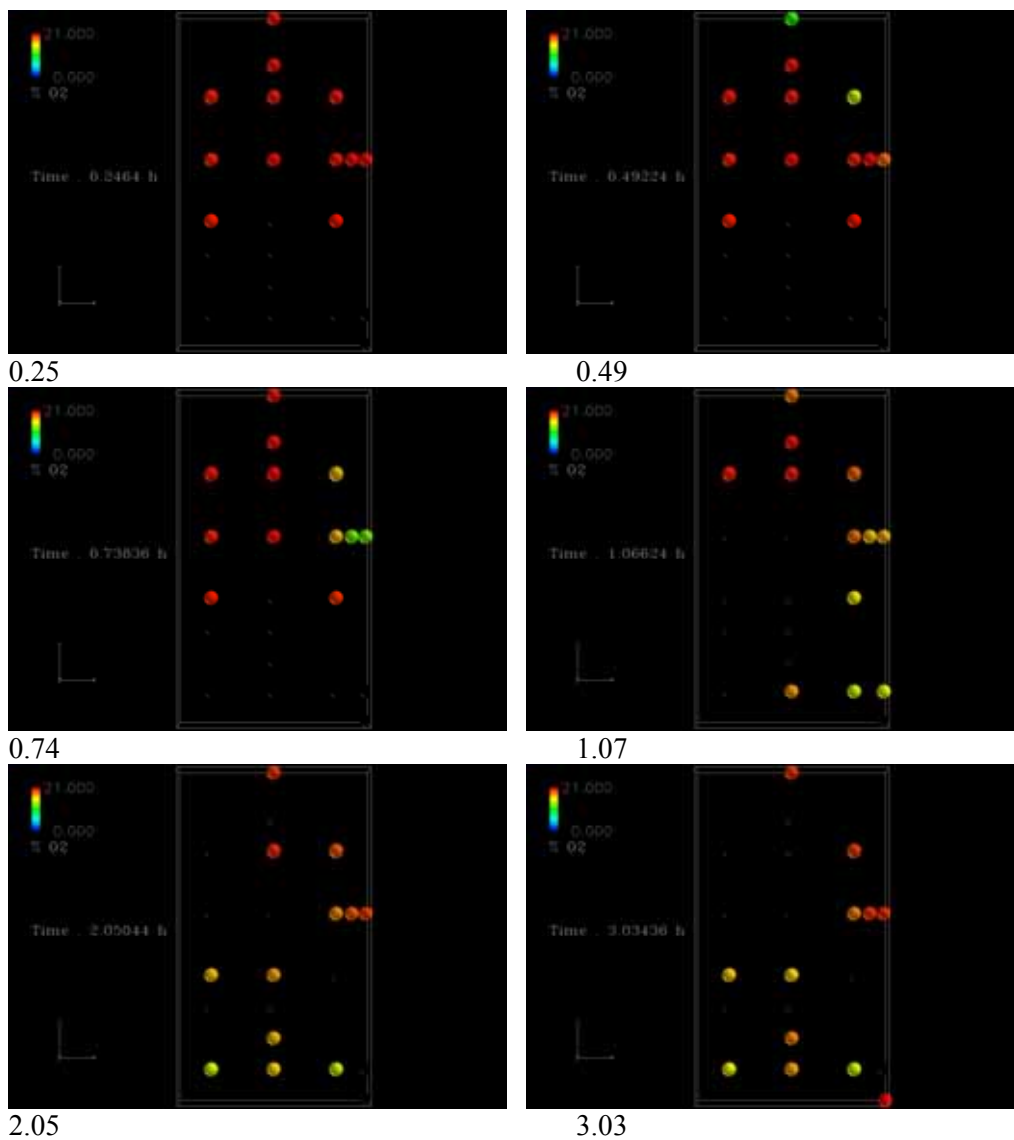
Figur B3:2 Bilder som visar uppmätt syrgaskoncentration inne i silon vid olika tidpunkter under gasfyllnadsförsök 2. (Röd färg-luft=21% syre, blå färg-ren kvävgas=0% syre)



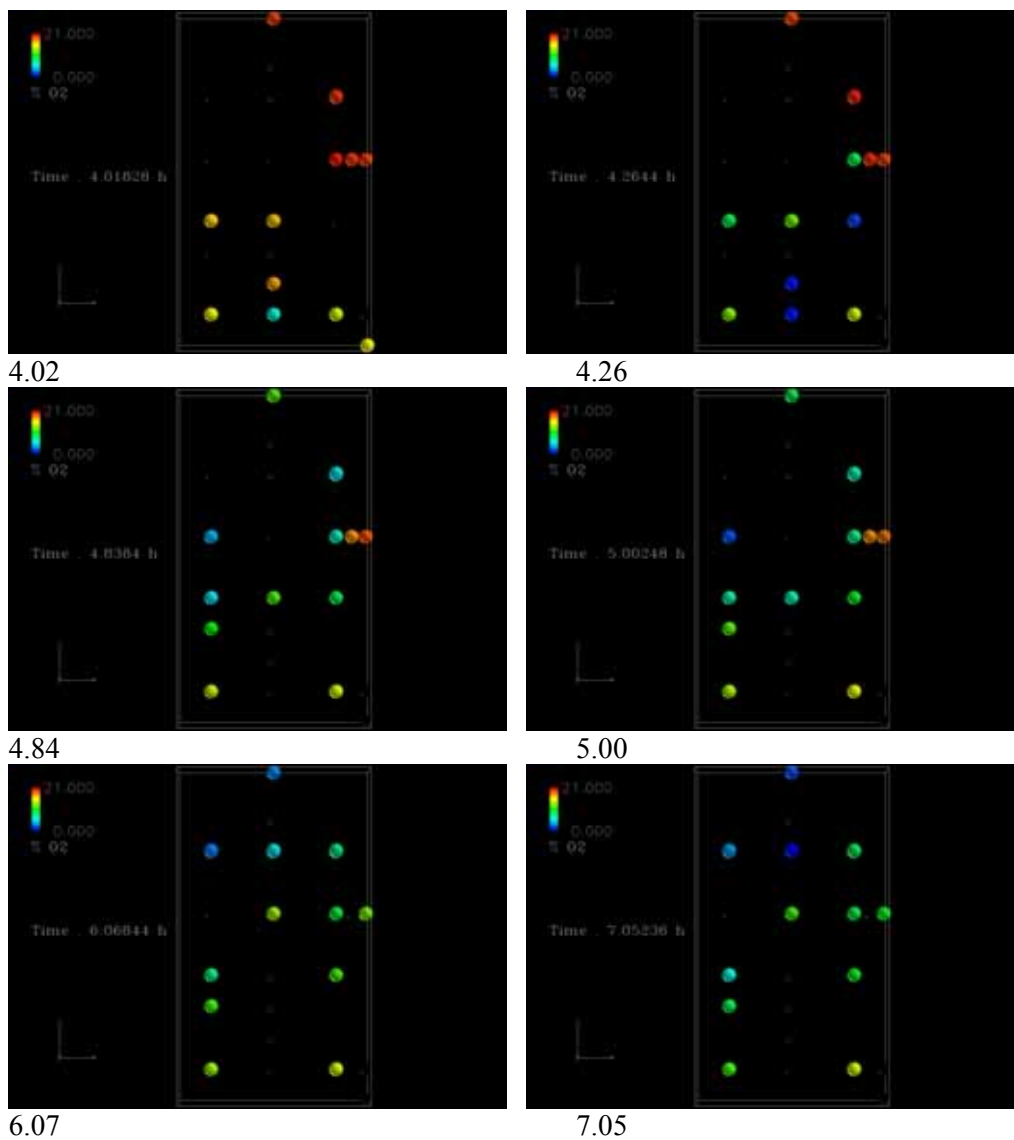
Figur B3:3 Bilder som visar uppmätt syrgaskoncentration inne i silon vid olika tidpunkter under gasfyllnadsförsök 3. (Röd färg-luft=21% syre, blå färg-ren kvävgas=0% syre)



Figur B3:4 Bilder som visar uppmätt syrgaskoncentration inne i silon vid olika tidpunkter under gasfyllnadsförsök 4. (Röd färg-luft=21% syre, blå färg-ren kvävgas=0% syre)



Figur B3:5 Bilder som visar uppmätt syrgaskoncentration inne i silon vid olika tidpunkter under den inledande fasen av gasfyllnadsförsök 5 där koldioxid matades in i silotoppen. Inmatningen inleddes vid tiden 0:20 tim och avslutades vid tiden 0:34 tim. (Röd färg-luft=21% syre, blå färg-ren kvävgas=0% syre)



Figur B3:6 Bilder som visar uppmätt syrgaskoncentration inne i silon vid olika tidpunkter under den avslutande fasen av gasfyllnadsförsök 5 där kvävgas matades in i centrum av silons botten. Inmatningen av kvävgas inleddes vid tiden 3:00 tim. (Röd färg-luft=21% syre, blå färg-ren kvävgas=0% syre)

SP Sveriges Tekniska 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 ca 870 medarbetare som bygger våra tjänster på kompetens, effektivitet, opartiskhet och internationell acceptans.



SP är organiserat i åtta tekniska enheter och fem dotterbolag.



SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut

Box 857, 501 15 BORÅS

Telefon: 010-516 50 00, Telefax: 033-13 55 02

E-post: info@sp.se, Internet: www.sp.se

www.sp.se

Brandteknik

SP Rapport 2009:10

ISBN 978-91-85829-87-3

ISSN 0284-5172