

Metoder för kartläggning av bränslepartiklars rörelse- och temperaturhistorik i rosterpannor och avfallsugnar – etapp 2

Lennart Gustavsson, Elisabet Blom, Jan Oskarsson, Mats Petersson

Metoder för kartläggning av bränslepartiklars rörelse- och temperaturhistorik i rosterpannor och avfallsugnar – etapp 2

Methods for tracking the motion and temperature histories of fuel particles in grate furnaces and waste incinerators – phase 2

Elisabet Blom, Lennart Gustavsson, Jan Oskarsson, Mats Petersson

F9-808

Förord

I föreliggande projekt har metodik och utrustning utvecklats för att följa rörelse och temperaturförlopp hos enskilda bränslepartiklar i en rosterpanna. Fullskaleförsök har genomförts i en 8 MW bibränslepanna ägd av Alvesta Energi AB.

Metodik och utrustning har utvecklats av Force Technology, Danmark. Fullskaleförsöken genomfördes av ÅF Processdesign AB och Force Technology gemensamt. Utvärdering och resultatsammanställning har gjorts av dels Force Technology, dels ÅF Processdesign AB. SP – Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut har varit projektansvarig.

Fullskaleförsöken hade inte kunnat genomföras utan stort tillmötesgående och medverkan av Alvesta Energi AB, till vilka vi riktar ett stort tack. Vi tackar också KMW Energi AB för tillgång till teknisk dokumentation av anläggningen.

En referensgrupp har följt projektet och lämnat råd och insiktsfulla synpunkter. Vi tackar gruppen för deras värdefulla medverkan i projektet:

Bo Andersson, Kvaerner Pulping AB
Marianne Gyllenhammar, S.E.P. AB
Jenny Larfeldt, TPS AB
Robert Schuster, ÅF Energikonsult AB
Hans Sollenberg, Vattenfall Värme Uppsala AB
Henrik Thunman, Chalmers Tekniska Högskola

Projektet har finansierats av Värmeforsk's forskningsprogram för Miljö- och Förbränningsteknik samt RVF Utveckling.

Borås november 2002

Lennart Gustavsson
SP – Sveriges Provnings- och Forskningsinstitut

Abstract

I projektet har metoder och utrustning för att följa enskilda bränslepartiklars rörelse och temperaturförlopp i en rosterpanna utvecklats och provats i fullskala. Metoderna bygger på märkning av bränslepartiklarna med radioaktiva isotoper. Metodernas principiella funktion har visats men för att åstadkomma praktisk tillämpbarhet krävs ytterligare utvecklingsinsatser.

Sammanfattning

Målsättningen med föreliggande projekt har varit att genom fullskaleförsök demonstrera och utvärdera användbarheten hos några föreslagna mätmetoder för studier av bränslepartiklars rörelse och temperaturhistorik i en rosterpanna. Metoderna utnyttjar radioaktiv isotopteknik och bygger på ”märkning” av enskilda bränslepartiklar.

Metoderna har följande syften:

- Att kontinuerligt följa en enskild bränslepartikels rörelsemönster från inmatning till slutförbränning
- Att bestämma när en bränslepartikel uppnår vissa bestämda temperaturer
- Att studera torkningsförloppet för en bränslepartikel
- Att bestämma densiteten i olika delar av bränslebädden

Metoden för kontinuerlig positionsbestämning bygger på att en matematisk modell av pannans geometri och material byggs upp. Detektorer placeras i ett antal positioner på pannans utsida, och modellen kalibreras genom att en strålkälla placeras i olika kända positioner inuti pannan. Vid användning av metoden tillförs sedan bränslepartiklar som märkts med den radioaktiva isotopen ^{24}Na . Ur detektorsignalerna kan strålkällans läge kontinuerligt bestämmas. Fullskaleförsöken visade att onoggrannheten i lägesbestämningen var större än förväntat. Vid kalibreringen var medelfelet i lägesbestämningen 0,62 m, och för 80 % av positionerna var felet mindre än 0,5 m. Vid försöken under drift gav den ursprungliga utvärderingsmodellen delvis orimliga resultat, bl.a. på så sätt att positioner utanför det möjliga området erhöles under vissa tider. Dock kunde vissa slutsatser om tidsförloppen dras, bl.a. om uppehållstiden på rostens olika delar. Flera orsaker bedöms ha bidragit till den dåliga noggrannheten. Antalet detektorer påverkar noggrannheten, och vid försöken under drift slutade en av tolv detektorer att fungera. Vidare antogs i modellen att bränslebäddens densitet kunde försummas, vilket visade sig vara felaktigt. På basis av gjorda erfarenheter ifrågasätts den använda modellen och utvärderingsmetoden, och en alternativ metod föreslås. Det bedöms att denna ger möjligheter till avsevärt rimligare och mer noggranna resultat.

Metoden för att bestämma när en bränslepartikel uppnår bestämda temperaturer bygger på att förse en bränslepartikel med en ampull som frigör den radioaktiva isotopen ^{85}Kr när en lödning smälter vid en given temperatur. Isotopen detekteras sedan i rökgasen med hjälp av en scintillationsdetektor. Vid försöken kunde endast ^{85}Kr detekteras vid ett förförsök då en glasampull med relativt hög aktivitet ^{85}Kr innesluten kastades in i pannan. Vid huvudförsöken som genomfördes med ampuller avsedda att brista vid 100 °C, 180 °C resp 250 °C kunde ingen ^{85}Kr detekteras i rökgasen. Möjliga förklaringar är stråkbildning i rökgasen, att ampullerna inte brister momentant utan gasen frigörs sakta genom en mindre läcka eller att aktiviteten var för låg. Vidare undersökningar och utveckling bör dock kunna bekräfta att metoden är användbar.

Metoden för bestämning av bränslebäddens densitet gav i bäddens övre delar i snittet vid 2/3 av rosterns längd densiteter på 50-250 kg/m³. Detta kan anses rimligt, men har

inte verifierats med annan, oberoende metod. Densiteten varierade också i tiden, och något längre ned i bädden uppmättes högre densiteter. I vad mån variationer i bäddhöjd i siktlinjen påverkade mätresultatet har inte kunnat fastställas. Den använda mätuppställningen var begränsad till densiteter på max 270 kg/m^3 , vilket gjorde att mätvärdena tidvis också översteg mätområdet.

Sammanfattningsvis kan sägas att ingen av de undersökta metoderna fungerade tillfredsställande under dessa första fullskaleförsök. Den principiella funktionen har dock visats, och genom ytterligare utvecklingsinsatser bör metodernas praktiska tillämpbarhet kunna bekräftas. De arbetsinsatser som krävs för användning av metoderna är dock relativt stora, särskilt för positionsbestämning.

Summary

The objective of this project has been to demonstrate and evaluate the feasibility of some proposed measuring methods for tracking the motion and temperature history of fuel particles in a grate furnace through full-scale trials. The methods use radioactive isotopes and are based on marking of single fuel particles.

The methods have the following objectives:

- To continuously track the motion of a single fuel particle from the fuel feed to the burn-out
- To determine when a fuel particle arrives at certain temperatures
- To study the drying process for a fuel particle
- To determine the density in different parts of the fuel bed

The method for continuous position determination is based on the construction of a mathematical model of the dimensions and materials of the furnace. Detectors are placed in a number of positions on the outside of the furnace, and the model is then calibrated with a radioactive source placed in a number of given positions inside the furnace. When using the method, fuel particles marked with the radioactive isotope ^{24}Na is fed to the fuel inlet. From the detector signals the position of the source can be continuously determined. The full-scale trials showed that the uncertainty in the position determination was greater than expected. At the calibration, the mean error of the position determination was 0,62 m, and the error was less than 0,5 m for 80 % of the calibration positions. At the trials during boiler operation the results from the original calculation model were partly not reasonable, i.e. in that positions outside the possible volume were achieved during certain periods. However, some conclusions about the time scales could be drawn, e.g. about the residence times on different parts of the grate. A number of factors are thought to contribute to the low accuracy. The number of detectors influences the accuracy, and during the boiler operation trials one detector ceased to function. Further it was assumed in the model that the density of the fuel bed could be neglected, which was shown to not be the case. Based on the experiences made in the project, the model and data evaluation method are being questioned, and an alternative method is proposed. This new model is deemed to result in more reasonable and accurate position estimates.

The method for determining when a fuel particle achieves certain temperatures is based on mounting an ampoule on a fuel particle, which liberates the radioactive isotope ^{85}Kr when a soldering melts at a given temperature. The isotope is then detected in the flue gas using a scintillation detector. During the trials, ^{85}Kr could only be detected at a preliminary test when a glass ampoule with a relatively high activity was thrown into the furnace. During the main trials, which were conducted using ampoules intended to burst at 100 °C, 180 °C and 250 °C, no ^{85}Kr could be detected in the flue gas. Possible explanations are stratification in the flue gas flow, that the ampoules did not burst momentarily but is instead liberated slowly through a minor leak or that the activity was too low.

Further investigations and development should however verify that the method is practicable.

The method for determining the density of the fuel bed gave in the upper part of the fuel bed in a section at $2/3$ of the length of the grate, densities of $50\text{-}250\text{ kg/m}^3$ were measured. This seems to be reasonable, but the values have not been confirmed with an alternative, parallel method. The density varied in time, and slightly more deep in the fuel bed, higher densities were recorded. It has not been concluded to what extent variations in bed depth in the line of sight influenced the results. The measuring arrangement used was also limited to densities of max 270 kg/m^3 , which meant that the measurement range periodically was exceeded.

In conclusion, none of the methods investigated worked satisfactory during these first full-scale trials. However, the principal workability has been shown, and with further development the practical feasibility of the methods may probably be verified. The work efforts necessary for using the methods are however quite large, especially for the position determination.

Innehållsförteckning

1	Bakgrund.....	1
2	Målsättning	3
3	Metodbeskrivningar	4
3.1	TEMPERATURMÄTNING	4
3.2	METOD FÖR STUDIER AV TORKNING OCH PYROLYS.....	6
3.3	DENSITETSBESTÄMNING	7
3.4	POSITIONSBESTÄMNING	9
4	Genomförande.....	14
4.1	ANLÄGGNINGSBESKRIVNING	14
4.2	FÖRSÖKSPLAN FÖR FÖRSÖK UNDER DRIFT	14
4.3	DRIFTFÖRHÅLLANDEN UNDER FÖRSÖKEN.....	15
4.4	SÄKERHETSÅTGÄRDER.....	16
5	Resultat	18
5.1	TEMPERATURMÄTNING	18
5.2	DENSITETSBESTÄMNING	22
5.3	POSITIONSBESTÄMNING	24
6	Diskussion.....	41
6.1	TEMPERATURMÄTNING	41
6.2	DENSITETSBESTÄMNING	41
6.3	POSITIONSBESTÄMNING	42
7	Slutsatser	43
7.1	TEMPERATURMÄTNING	43
7.2	DENSITETSBESTÄMNING	43
7.3	POSITIONSBESTÄMNING	43
8	Litteraturreferenser.....	46

1 Bakgrund

I dag utnyttjas ett allt bredare spektrum av fastbränslen vid värme- och kraftproduktion. Många av de nya sortimenten är inhomogena till sin struktur, form och styckstorlek. Detta kan leda till störningar i inmatningssystemet och därmed bränslets fördelning över rosterytan. Fördelningen av bränsle över rostern påverkas dessutom av rosterrörelse, pannlast samt de olika faserna i förbränningen, torkning, förgasning och slutförbränning av kolåterstoden. Ytterligare faktorer som inverkar är rosterutformning, primärlufts-fördelning, ugnsväggarnas värmestrålning samt eventuell slaggbildning på rostern.

Detta får till följd att bränslebäddens beteende (rörelse) från inmatningen till askutmatningen i stor utsträckning påverkar förbränningsresultatet, dess jämnhet samt emissionerna från dessa anläggningar.

Kunskap om bränslebäddens beteende, från inmatning till askutmatning, ger grundläggande kunskaper om resten av förbränningsförloppet.

Ett exempel på effekter av ojämnheter i bränslebädden är uppkomsten av genomblåsningar i bädden som kan förorsaka bl.a. medryckning av bränslepartiklar och lokalt höga bäddtemperaturer som i sin tur kan bidra till ökad NO_x-bildning och risk för slaggbildning. Ojämnheter i bränslebädden kan också ge okontrollerade emissioner (spikar och stråk) av CO och oförbrända kolväten.

Vid avfallseldning är bränslet extremt inhomogent, både till sammansättning, form, storlek och fukthalt. Detta medför att bränslets rörelse på rostern är komplicerad, och olika åsikter föreligger om hur bädden idealt skall bete sig.

Gemensamt för alla typer av fasta bränslen vid rostereldning är att bränslepartiklarna genomgår de tre faserna torkning, avgasning och koksutbränning på sin väg längs rostern. För att förstå förbränningsprocessen är det viktigt att veta var och under vilken tidsrymd dessa processer sker för olika typer av bränslepartiklar. Om man vet hur torkningsprocessen fördelas över rostern kan detta användas bl.a. för att optimera primärlufts-fördelningen. Även ur andra synpunkter är kunskap om torkningsprocessen användbar.

Kunskap om processerna i bädden ger dessutom möjlighet till modellering av bränslebädden. Detta är ett viktigt komplement till de CFD-modeller för strömning och gasfas-förbränning som idag används kommersiellt vid studier av pannor. Hur bädden betar sig är ett viktigt randvillkor för dessa modeller, och kunskapen är idag relativt liten.

I ett mera praktiskt perspektiv kan kunskap om hur enstaka ”typbränslepartiklar” betar sig på rostern användas för ”trouble shooting” i anläggningar. Optimering av bränslematning, rosterrörelse och luftfördelning över rostern kan underlättas med denna kunskap, liksom åtgärder mot CO-spikar och genombränningar. Om orsaken till de senare fenomenen kan härledas till vissa bränslekväliteteters beteende på rostern, vilket är troligt,

kan åtgärder mot detta vidtagas på olika sätt. Ett ytterligare användningsområde är optimering av förvärmning av primärluft.

En besläktad fråga är hur bränslets densitet förändras över rostern. När bränslet genomgår torkning och pyrolys, minskar dess densitet successivt i storleksordningen 10 ggr (beräknat på en ingående bränslefukthalt kring 60%). Om densitetsprofilen längs rostern samt bäddhöjden kunde bestämmas skulle detta ge värdefull ledning till hur t.ex. primärluft och rökgasrecirkulation bör fördelas.

Metoder för att följa bränslepartiklars rörelse på en roster, temperatur- och torkningsförlopp för dessa samt för att bestämma bränslets densitet har således ett stort intresse. I projektet "Metod för kartläggning av bränslepartiklars rörelse och temperaturhistorik i rosterpannor/avfallsugnar – etapp 1" beskrevs och värderades teroretiskt sådana tänkbara metoder som utnyttjar radioaktiv spårämnesteknik. I föreliggande rapport redovisas och utvärderas fullskaleförsök med de föreslagna metoderna.

2 Målsättning

Målsättningen med föreliggande projekt har varit att genom fullskaleförsök demonstrera och utvärdera användbarheten hos föreslagna mätmetoder för studier av bränslepartiklars rörelse och temperaturhistorik i en rosterpanna. Metoderna utnyttjar radioaktiv isotopteknik och bygger på ”märkning” av enskilda bränslepartiklar.

Metoderna har följande syften:

- Att kontinuerligt följa en enskild bränslepartikels rörelsemönster från inmatning till slutförbränning
- Att bestämma när en bränslepartikel uppnår vissa bestämda temperaturer
- Att studera torkningsförloppet för en bränslepartikel
- Att bestämma densiteten i olika delar av bränslebädden

3 Metodbeskrivningar

Nedan ges dels kortfattade principiella beskrivningar av mätmetoderna, dels en beskrivning av de praktiska förberedelserna vid försöken. För en mera detaljerad beskrivning av metoderna hänvisas till Värmeforskrapport nr 690.

3.1 Temperaturmätning

3.1.1 Princip

Syftet med denna metod är att kunna bestämma när en radioaktivt märkt bränslepartikel uppnår olika definierade temperaturer på sin väg genom pannan. Genom att kombinera denna med metoden för positionsbestämning nedan (avsnitt 3.4) kan det bestämmas var på rosten bränslepartikeln uppnår dessa temperaturer

Temperaturen i bränslepartikeln mäts genom att på partikeln montera en eller flera ampuller som är så utförda att de brister vid en bestämd temperatur och då momentant frigör spårgasen ^{85}Kr till förbränningsrummet.

Spårgasen, som är en ädelgas, förs med rökgasen genom pannan och kan detekteras i rökgasen med hjälp av sin betaemission i en scintillationsdetektor. Detektorsignalen registreras kontinuerligt, t.ex som 10-sekundersvärden.

Såväl passagen genom pannan och rökgasreningen som passagen genom detektorn ger en tidsfördröjning av signalen. Under förutsättning att gasflödet genom provtagningsssystemet och detektorn hålls tillräckligt högt bör tidsfördröjningen kunna hållas under 10 sekunder, vilket är försumbart i förhållande till bränslets uppehållstid i ugnen.

3.1.2 Tillverkning av märkta bränslepartiklar samt detektion

Ett antal små mässingsrör förseglades i ena änden genom att de först klämdes ihop och därefter slaglödades. Den andra ändan av röret klämdes likaså ihop men löddes därefter med ett lod med betydligt lägre smältpunkt än slaglodet. Detta innebär att den ena lödningen med säkerhet smälter före den andra och släpper ut den inneslutna gasen vid en väldefinierad temperatur.

Lödmaterial med tre olika smältpunkter valdes för att följa bränslets uppvärmning genom ugnen. De valda temperaturerna var 100°C, 180°C, 250°C.

I lödningen med lägst smältpunkt borrades ett hål. Med hjälp av en injektionsspruta sprutades ^{85}Kr -gas in i ampullen. När ^{85}Kr -gasen med säkerhet sköljt ut all luft ur röret löddes hålet igen snabbt.

Lödningen inspekterades visuellt, men för att försäkra sig att röret var tätt mättes doshastigheten på ytan av ampullen omedelbart efter lödningen. Ampullerna förvarades

därefter i dragskåp över natten och dosmättes sedan igen. De ampuller där doshastigheten sjunkit under natten kasserades som otäta.

För att simulera en verklig bränslepartikels rörelse genom ugnen är densiteten för mäs-sing för hög. För att uppnå en bättre simulering monterades därför mässingsampullen i en träbit. Hålen i träbiten borrades så trånga så att ampullerna inte skulle ramla ur.

Nedan visas bilder på ^{85}Kr -ampuller före och efter insättning i träbiten



Figur 1: ^{85}Kr -ampull före och efter insättning i träbit

Figure 1 ^{85}Kr -ampoule before and after mounting in a wood particle

De preparerade träbitarna lades in genom en lucka i bränslestupet ovanför pushern.

Mätning av ^{85}Kr skedde genom att ett delflöde av rökgasen i skorstenen sögs genom en kylare och vidare förbi en detektor (scintillationsdetektor med en tunn Al-folie som fönster). Efter detektorpassagen leddes gasen ut.

Tidsfördröjningen mellan det att lödningen i ampullen brister och gasen släpps ut till det att den når detektorn uppmättes genom att en glasampull kastades direkt in i ugnens varmaste område och sedan tiden till detektion mättes. För glasampullen gjordes antagandet att den brast omedelbart, åtminstone i jämförelse med övriga tidsfördröjningar.



Figur 2. Förberedelser för inläggning av ^{85}Kr -partiklar i bränslestupet.
 Figure 2: Preparations for introduction of ^{85}Kr -particles in the fuel feed

Figur 3. Uppställning av ^{85}Kr -detektorn. Blyskydden är till för att reducera strålningen utifrån och därigenom förbättra signal/brusförhållandet.
 Figure 3. Installation of the ^{85}Kr -detector. The lead shields reduce the radiation from the surroundings and thereby improve the signal-to-noise ratio.

3.2 Metod för studier av torkning och pyrolys

Torkning kan undersökas genom att impregnera en bränslepartikel med tritiumhaltigt vatten på så sätt att detta är jämnt fördelat i det vatten som finns i partikeln. Under torkningen avges tritium till rökgasen i samma takt som vattnet; haltförloppet i rökgasen (vid konstant effekt) är således ett mått på partikelns torkningsförlopp.

Pyrolys kan undersökas indirekt genom att anbringa ett tritium-märkt, pyrolyserbart modellämne (t.ex. en sockerart) i eller på bränslepartikeln. Vid pyrolysen av denna avges tritiumhaltiga organiska föreningar, som i förbränningsrummet förbränns till tritiumhaltigt vatten.

Tritium kan analyseras antingen genom s.k. vätskescintillationsräkning som utförs på laboratorium eller med hjälp av en s.k. ”Savannah River”-detektor.

Den förra metoden innebär i den aktuella tillämpningen att ett antal vattenprover måste tas ut ur kondensat från rökgasströmmen med tillräckligt korta intervall för senare analys på laboratorium. Detta begränsar användbarheten starkt. Den senare metoden innebär däremot att kontinuerlig mätning kan ske på plats i en kondensatström, och har därför bedömts lämplig för den aktuella applikationen.

”Savannah River”-detektorer har inte kunnat återfinnas kommersiellt tillgängliga. I princip kan dock ett mättekniskt laboratorium med relevant kompetens bygga en sådan utifrån offentligt publicerade artiklar. Efter noggrann analys i inledningsskedet av projektet bedömdes att detta inte var praktiskt möjligt inom projektets ram, varför någon utvärdering av denna metod inte kan redovisas i föreliggande rapport.

3.3 Densitetsbestämning

3.3.1 Princip

Metoden bygger på att om en tillräckligt stark strålkälla monteras på ena sidan ugnen, och en spektral detektor på den andra, är det möjligt att bestämma bränslebäddens och väggarnas gemensamma strålningsabsorption. Om väggarnas tjocklek och densitet är jämnt fördelad över väggytan (eller variationen känd), skulle det således vara möjligt att sedan beräkna bränslebäddens genomsnittliga densitet över ett tvärsnitt.

Under förutsättning att arrangemanget går att lösa på ett ur strålnings säkerhetssynpunkt betryggande sätt, är det möjligt att parallellförflytta strålkälla och detektor längs ugnens sidor, och på så sätt bestämma såväl bäddhöjd som bränslebäddens densitet.

3.3.2 Tillverkning av strålkällor samt detektion

För att använda i de efterföljande positionsbestämningsförsöken förbereddes ett antal ampuller innehållande isotopen ^{24}Na . Både aktiviteten och energin i ampullerna var tillräcklig för att ”synas” rakt igenom ugnen. Energin i källorna är så hög att den naturliga bakgrunden kan anses mycket låg, vilket medför ett bra signal/brusförhållande. Dessutom är energin så hög att om mätning sker endast vid denna energi kan interferens med ^{60}Co -källorna som är monterade för att mäta bäddhöjd i ugnen undgå.

En detektor placerades på den ena sidan av ugnen och en strålningskälla strax ovanför på den andra sidan av ugnen. Genom att höja och sänka dessa källor synkront kunde mätning ske i två punkter; en där det inte fanns bränsle och en där det fanns bränsle. På detta sätt skulle således densiteten på bränslet kunna bestämmas.

3.3.3 Teori

Om r betecknar antalet mätvärden i detektorn, index ”0” är mätvärdet då det inte finns någon dämpning, index ”utan” betecknar mätning ovanför bränslelagret och index ”med” betecknar mätning i bränslet, fås nedanstående samband.

Dämpningen av γ -strålningen utan bränsle ges av:

$$r_{utn} = r_0 \cdot e^{-(\mu_{ugn} t_{ugn} + \mu_{luft} t_{luft})} \Rightarrow \mu_{ugn} \cdot t_{ugn} = \ln\left(\frac{r_0}{r_{utn}}\right) - \mu_{luft} t_{luft} \quad (1)$$

Här är μ dämpningskoefficienten och t är tjockleken av lagret som det mäts igenom, eller mer korrekt i detta fall; tjockleken av de två murarna inklusive slagglager.

Om $t_{bränsle}$ betecknar bränslebäddens bredd (uppmätt tvärs ugnen), eller den inre bredden av ugnen, fås att dämpningen med bränsle blir:

$$r_{med} = r_0 \cdot e^{-(\mu_{ugn} t_{ugn} + \mu_{bränsle} t_{bränsle})} \Rightarrow \mu_{bränsle} \cdot t_{bränsle} = \ln\left(\frac{r_0}{r_{med}}\right) - \mu_{ugn} t_{ugn} \quad (2)$$

Vi vet att:

$$\mu = \left(\frac{\mu}{\rho}\right) \cdot \rho \quad (3)$$

Om ekvation (1) sätts in i ovanstående fås:

$$\rho_{bränsle} = \frac{1}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{bränsle} \cdot t_{bränsle}} \cdot \left[\ln\left(\frac{r_{utn}}{r_{med}}\right) + \mu_{luft} t_{luft} \right] \quad (4)$$

Storleken av (μ/ρ) kan antas med vetskap om bränslets sammansättning. Om man till sist korregerar för bakgrundsstrålning och i sambandet låter index "b" stå för "bakgrund" fås:

$$\rho_{bränsle} = \frac{1}{\left(\frac{\mu}{\rho}\right)_{bränsle} \cdot t_{bränsle}} \cdot \left[\ln\left(\frac{r_{utn} - r_b}{r_{med} - r_b}\right) + \mu_{luft} t_{luft} \right] \quad (5)$$

Observera att $t_{luft} = t_{bränsle}$.

För att bestämma densiteten med hjälp av ekvation (5) krävs i princip kännedom om den kemiska sammansättningen hos det material som ligger i slutförbränningszonen. Denna är dock okänd och att ta reda på denna är omöjligt eller åtminstone förknippat med stora antaganden.

De antaganden som måste göras gäller massdämpningskoefficienten (μ/ρ) . Detektorerna mäter monokromatisk γ -strålning med den förhållandevis höga energin 2.7 MVe. Den höga energin betyder att storleken på μ/ρ varierar mycket litet mellan grundämnena.

Antaganden om materialsammansättningen i bränslebädden är alltså förhållandevis okänsliga för variationer i sammansättningen och man kan räkna med goda resultat så länge som antagandena är någorlunda rimliga.

3.4 Positionsbestämning

3.4.1 Princip

Syftet med denna metod är att genom en kontinuerlig positionsbestämning i tre dimensioner kunna följa rörelsen hos en radioaktivt märkt bränslepartikel på dess väg genom pannan.

Metoden bygger på att gammastrålning med tillräckligt hög kvantenergi kan tränga igenom även ganska massiva konstruktioner som t.ex. en inmurad panna. Signalen från en gammastrålningsdetektor monterad i en punkt utanför pannan kommer att bero på avståndet mellan den radioaktiva källan och detektorn, och dessutom i hög grad på mängden och beskaffenheten hos materialet mellan källan och detektorn.

Om man har ett tillräckligt stort antal sådana detektorer, och dessutom tillräcklig kunskap om pannans form och material, kan positionen av en punktkälla inne i pannan beräknas löpande.

Metoden innebär att ett antal strålningsdetektorer placeras i väldefinierade punkter utanför pannans ytterhölje. Då ett gammastrålande objekt, t.ex. en isotopmärkt bränslepartikel, befinner sig inuti pannan kommer varje detektor att i varje ögonblick registrera en unik intensitet som beror på strålningskällans styrka, dess position och detektorns responsfunktion. Denna senare sammanfattar dämpningen som funktion av material och avstånd, samt detektorns placering, känslighet och beskaffenhet i övrigt. Om dessa faktorer är kända för samtliga detektorer i aktuella placeringar kan det resulterande ekvivalentssystemet lösas med avseende på strålningskällans position.

Svårigheten ligger i att bestämma responsfunktionerna för detektorerna i sina aktuella positioner. Detta görs genom en kombination av uppställning av en matematisk matematisk modell av responsen hos de enskilda detektorerna och ingående material samt en kalibrering där en strålkälla placeras i ett antal kända positioner inuti pannan och detektorernas respons bestäms. Den matematiska modellen kan på grund av sin komplexitet inte lösas analytiskt, varför icke-linjär parameterestimering (Levenberg Marquard) används. Denna innebär en iterativ numerisk lösning där strålningskällan först antas befinna sig i en given position och denna därefter justeras med hjälp av beräknade responser till dess att överensstämmelse nås. Metoden konvergerar relativt snabbt.

I praktiken tillämpas metoden på följande sätt:

1. En förenklad modell av pannan utarbetas, som enbart täcker den del av pannan där strålningskällan och detektorer kan tänkas befinna sig. Densiteterna hos inmurningen och bränslebädden betraktas som parametrar för senare finjustering.

2. Som första del i de praktiska försöken genomförs en kalibrering, där den strålkälla som omedelbart därefter skall användas för positionsbestämning, på ett kontrollerat sätt anbringas i olika punkter i pannan.
3. Själva försöken genomförs; data registreras.
4. Modellen justeras så att modellsvaret är identiskt med detektorresponsen från alla punkter i kalibreringen. Detta justerar effektivt modellen för de okända densiteterna.
5. Den justerade modellen används för beräkning av strålkällans position i själva försöken.

3.4.2 Kalibrering (kalla försök)

För kalibrering av den matematiska modellen kördes först ett antal så kallade kalla försök. Detta innebar att pannan var avställd och eldstadsrummet tillgängligt. Dessa försök gjordes under perioden 28 maj till 1 juni 2001.

Med hjälp av en hållare placerades en ^{24}Na -källa på en rad kända punkter inne i ugnen på ett sådant sätt att hela den volym där bränslet normalt sätt befinner sig täcktes in. Utanpå ugnen placerades 12 detektorer i noggrant uppmätta positioner. Responsen hos dessa mättes upp för varje position på källan.



*Figur 4: Detektorarrangemang utanpå ugnen.
Figure 4: Detector arrangement outside the furnace.*

Målet med detta försök var att göra en kalibrering som kunde användas i samband med de varma försöken, dvs när ugnen är i drift.



Figur 5: Uppställning för positionering av strålkälla vid de kalla försöken

Figure 6. Arrangement for positioning the radiation source during the cold trials

I metoden ställs som ett första steg en matematisk modell av detektorresponserna upp:

$$R_i = A \cdot \frac{1}{(x - x_{\text{det}})^2 + (y - y_{\text{det}})^2 + (z - z_{\text{det}})^2} \cdot D_i(x, y, z) \quad (6)$$

Här är R_i responserna i detektor nr i , A är aktiviteten, (x, y, z) är källans position, $(x_{\text{det}}, y_{\text{det}}, z_{\text{det}})$ är detektorns position och $D_i(x, y, z)$ är en responsfunktion som gäller för detektor nr i .

Responsfunktionen antas kunna approximeras till en linjärkombination av ett polynomuttryck med följande form:

$$D(x, y, z) = k_0 + k_1x + k_2y + k_3z + k_4x^2 + k_5xy + k_6xz + k_7y^2 + k_8yz + k_9z^2 \quad (7)$$

Vid de första försöken användes ett tredjegradsuttryck, men ovanstående andragsuttryck visade sig ge bättre resultat.

Genom att flytta källan till en rad kända positioner i pannan bestämdes konstanterna k_i för alla detektorerna. På detta sätt gjordes således en slags kalibrering av systemet panna – detektorer.

3.4.3 Försök under drift (varma försök)

För att bestämma en rörlig strålkällas position under drift av pannan mättes responserna i detektorerna medan källan rör sig genom ugnen. Denna detektorrespons används till-

sammans med responsfunktionerna som bestäms under de kalla försöken i en icke linjär parameteruppskattning där parametrarna som uppskattas motsvarar positionen av källan.

Till de varma försöken tillverkades ett antal partiklar innehållande radioaktivt material som skulle simulera bränslepartiklar. Kraven på dessa simulerade bränslepartiklar var följande:

- partiklarna skulle ha realistisk storlek och densitet
- densiteten skulle minska successivt under vandringen genom ugnen på samma sätt som en normal bränslepartikel
- det radioaktiva materialet skulle vara skyddat mekaniskt och mot termisk överlast för att minimera riskerna för kontamination av ugnen.

Som strålkälla valdes isotopen ^{24}Na i form av ett pulver i en kvartsampull. Den simulerade bränslepartikeln framställdes genom att kvartsampullen sattes in i ett stålrör med något större diameter än ampullen och en isolertuss stoppades i hålet för att hålla kvar ampullen inne i röret. Detta förseglades därefter i ena änden. I samma ände fästes en Kanthaltråd. Den simulerade bränslepartikeln framställdes därefter genom att stålröret lindades med isolering (Kaowool) som surrades med ovannämnda Kanthaltråd. Isoleringen dränktes därefter in med sockerlösning och fick torka. Sockerlösningen pyrolyseras under transporten genom ugnen och partikeln tappar därvid massa utan att någon nämnvärd del av volymen försvinner. Resultatet är en partikel vars beteende påminner om de normala bränslepartiklarna.



Figur 6: Simulerad bränslepartikel. Kvartsampullen stoppas in i röret till höger; därefter stoppas en liten tuss isolering in i hålet och röret kläms ihop i änden.

Figure 6: Simulated fuel particle. The quartz ampoule is put into the tube to the right; then a small piece of insulation is put into the tube and the end is pressed together.

De simulerade bränslepartiklarna fördes in i pannan på samma ställe som ^{85}Kr -partiklarna (se figur 3).

4 Genomförande

4.1 Anläggningsbeskrivning

Tyngdpunkten på beskrivningen har lagts på de delar av anläggningen som påverkar bränslets rörelse över rosten och askutmatningen.

Ugnen är av fabrikat KMW, typ TRF 6, med en effekt på 8 MW vid en maximal bränslefukthalt på 60 %. Anläggningen är försedd med rök-gaskondensering och el-filter.

Inmatning av bränslet från stupet till rostern görs med tre parallella pushers, där de vid kanterna kan ställas in så att de matar något snabbare för att kompensera för den intensiva förbränningen där. Inmatningen styrs av en gammanivå-givare ca 1 m från bränsleinloppet.

Rosten är 2,9 m bred och 6 m lång, vilket ger en rosteryta på drygt 17 m². Primärluften är fördelad på 4 olika rosterzoner, med en kort fast planrostsektion mellan varje zon för att åstadkomma god täthet mellan zonerna. Totalt finns 6 rörliga rosterrader, där varje rosterelement har tre horisontella ca 20 cm långa ”trappsteg” med sned framkant så att den totala längden är 1 m varav ca 0,7 m i genomsnitt är exponerade mot bädden. Vartannat rosterelement i sidled är rörliga och slaglängden är 0,15 m. Nedanför det sista rörliga rosterelementet finns en ca 0,7 m lång fast planrost och därefter en något lägre belägen asklucka som öppnas efter ett inställbart antal rostercykler. Under askluckan ligger askan och svalnar fram tills nästa tömningscykel inleds.

Askans matas ut av slagsskraporna och vidare via ett torrt skrapssystem till askcontainern. Askskrapssystemet går dessutom var 30:e minut för att mata ut flygaska från el-filter och genomfall från rostern i de fyra primärluftszonerna.

4.2 Försöksplan för försök under drift

Nedanstående plan ställdes upp före försöken:

- | | |
|-------------------|---|
| Måndag 5/11 –01: | Uppsättning av fästen och detektorer samt test av mätsystemet. |
| Tisdag 6/11 –01: | Fortsatt test av systemet och mätning av bakgrundstrålning.
Försök med densitetsmätning på bränslebädden genom väggarna.

Första positionsbestämningsförsöket ²⁴ Na-isotop. |
| Onsdag 7/11 –01: | Ytterligare tre positionsbestämningsförsök. |
| Torsdag 8/11 –01: | Temperaturmätning med Kr 85-ampuller. |
| Fredag 9/11 –01: | Reservdag. |

På grund av dels att temperatur- och positionsförsöken kunde samköras och dels därför att endast 3 av 4 beställda ^{24}Na -isotoper kunde levereras från Studsvik kunde mätningarna avslutas på onsdagen.

Tidigt på tisdagen bestämdes att vänta till onsdagsmorgonen med att inleda positionsförsöken, för att undvika att riskera att behöva övervaka en eventuellt oåtkomlig isotop över natten. Det bestämdes också att det kunde vara lämpligt att köra temperaturförsöken samtidigt som positionsförsöken, eftersom man då förhoppningsvis skulle få en indikation om var i ugnen kapslarna sprack.

Inledande tester av mätsystemet för ^{85}Kr gjordes på tisdagen mellan 15:00 och 18:00. Därefter gjordes försök med densitetsmätning fram till kl. 21:00.

Under onsdagen kördes de kombinerade positions och temperaturmätningförsöken ungefär enligt följande (tiderna är inklusive förberedelser och omhändertagande av partikeln):

Partikel 1	10:00-14:00
Partikel 2	15:30-18:30
Partikel 3	19:00-22:30

Mellan partikel 1 och 2 gjordes dessutom några kompletterande tester av ^{85}Kr - mätsystemet.

Torsdagen användes för att plocka ner mätutrustningen.

4.3 Driftförhållanden under försöken

Eftersom ^{24}Na -isotoperna störde de radioaktiva bäddnivågivarna, som normalt ingår i styrningen av rosterrörelser och bränsleinmatning, måste de senare kopplas bort under försöken. I stället fick rosterrörelser och bränslematning styras manuellt eller med en frekvens proportionellt mot utstyrningen av pannan.

Bränslet som användes var en blandning av sågspån, bark och relativt grov sågverksflis.

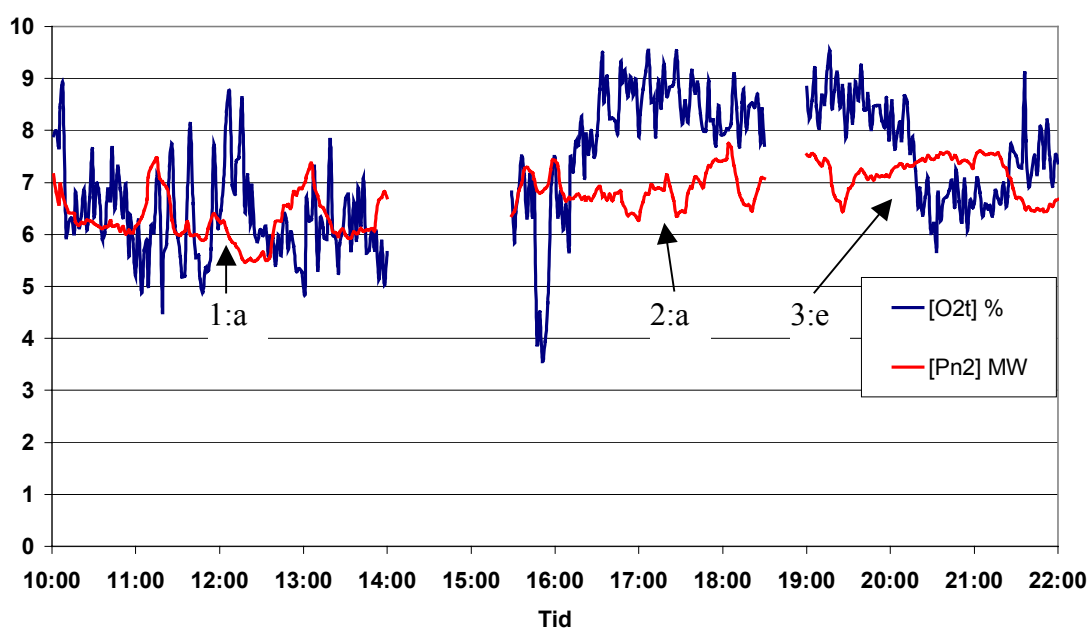
På onsdagsmorgonen konstaterades problem med genomblåsningar i bränslebädden, sannolikt beroende på att bränsleblandningen ändrats under natten. För att försöka avhjälpa detta kördes rostermatningen ofta manuellt under förmiddagen. Under eftermiddagen och kvällen gick anläggningen dock mycket stabilare. De driftstörningar som här redovisas innebar dock inga begränsningar i möjligheten att genomföra kontrollerade försök. Rostercyklerna gick då i genomsnitt med ett intervall på 3 min 13 s. Varje rostercykel tog ca 105 sekunder och alla sex raderna matade fram en gång varje cykel.

I tabell 1 och figur 6 nedan redovisas avgiven effekt och O_2 -halt i rökgasen för anläggningen under positionsbestämningsförsöken.

Tabell 1: Medelvärde för avgiven effekt under de tre positionsbestämningsförsöken

Table 1: Mean values for heat output during the three experiments with position determination

Partikel nr	Avgiven effekt, MW	
	medelvärde	standardavvikelse
1	6,3	0,45
2	6,9	0,32
3	7,2	0,37



Figur 7: Avgiven effekt och O_2 -halt i utgående rökgas under positionsbestämningsförsöken. Data är minutmedelvärden hämtade från anläggningens miljödator.

Figur 7: Heat output and O_2 concentration in the flue gases during the trials with position Determination. Data is minute mean values from the plant's monitoring computer.

4.4 Säkerhetsåtgärder

All hantering av ^{24}Na -isotoperna före och efter försöken gjordes i en del av pannhuset där ingen risk fanns att någon obehörig kom inom säkerhetsavståndet av misstag. Vid transport av partikeln mellan beredningsplatsen och ugnen ställdes "vakter" ut så att ingen obehörig av misstag kunde komma inom säkerhetsavståndet.

Före försöken byttes askcontainern ut för att inte en onödigt stor mängd aska skulle kontamineras om något gick snett. När partikeln sedan skulle matas ut ur ugnen, kördes askutmatning manuellt. Isotopens läge följdes då med en handhållen strålningsmätare.

Asktransportören stoppades sedan så snart den nått fram till den första löstagbara luckan, för att minimera risken för att isotopkapslingen klämdes sönder av skraporna.

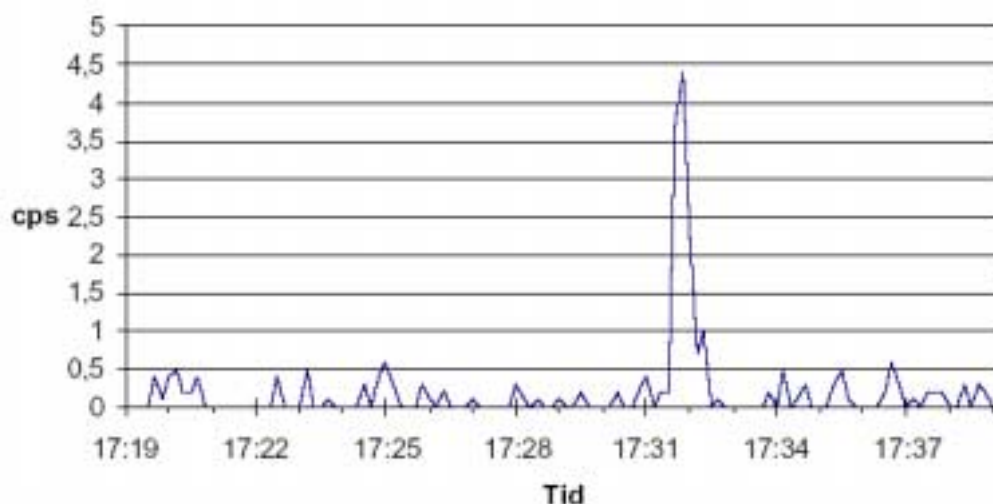
5 Resultat

5.1 Temperaturmätning

5.1.1 Inledande försök med glasampuller

Som ett inledande försök kastades en glasampull med en aktivitet på 46.4 MBq in i ugnen för att kontrollera försöksupställningen och samtidigt få en bild av transporttiden i ugn och rörsystem. Försöket resulterade i att sträckningen på slangar till rökgasen och rökgaskylarens placering ändrades. Orsaken var att resultaten visade att den första uppställningen medförde att för lite spårgas passerade detektorn.

Ännu ett försök gjordes därefter, denna gång med en ampull innehållande 103.9 MBq. Data från denna mätning visas i diagrammet nedan:



Figur 8: Data från försöken med glasampull nr 2. Signalen har korrigerats för bakgrunds-nivån. Aktiviteten i ampullen var 103.9 MBq.

Figure 8: Data from the trials with glass ampoule no 2. The signal has been corrected for background noise. The activity of the ampoule was 103,9 MBq.

Figuren visar data som är korrigerade för bakgrundsstrålningen. Bakgrunds-nivån ligger på 0.6 cps med en spridning på 0.28 cps.

Ampullen kastades in klockan 17:26.45 och toppen i Figur 8 växer upp klockan 17:32.09. Tidsfördröjningen från gasen från det att den frigges till att den detekteras är således ca 5 minuter. Toppen utgörs av tre punkter och en beräkning av hur mycket toppen sticker upp över bakgrunden ger följande:

$$f = \frac{3.7 + 4.4 + 2.4}{0.28} = 37.5$$

Toppen var alltså ca 37 standardavvikelser över bakgrunden.

5.1.2 Försök med lödda ampuller

Aktiviteten av ^{85}Kr i de tre lödda ampulltyperna med olika smältpunkter fördelade sig enligt följande:

Tabell 2: Aktiviteten i de använda ^{85}Kr -ampullerna.

Table 2: The activity of the ^{85}Kr -ampoules used

Smältpunkt 100°C		Smältpunkt 180°C		Smältpunkt 250°C	
Nr.	A/MBq	Nr.	A/MBq	Nr.	A/MBq
1-2	18	2-1	14	4-1	10
1-3	12	2-2	17	4-8	17
1-4	13	2-3	17	4-9	19
1-5	14	2-4	20	4-10	21
1-6	19	2-5	17	4-13	15
1-7	22	2-6	15	4-20	18
1-8	18	2-7	5	4-21	19
1-9	19	2-8	19	4-22	15
1-10	17	2-9	5		
		2-10	18		
		2-11	17		
Medelvärde	16,9	Medelvärde	14,9	Medelvärde	16,8

Orsaken till att inte lika många ampuller av varje sort har uppmätts är svårigheter med att löda ihop ampullerna. Olika lödmaterial är olika svåra att hantera och således svårare att få gastätt. Lödningsen med smältpunkten 180°C var en vanlig lödning och förhållandevis lätt att bearbeta.

I ampullerna var aktiviteten i genomsnitt 16 MBq (se tabell 2), dvs ca 6.5 gånger mindre än glasampullen (103,9 MBq). Aktiviteten i förhållande till detektionsgränsen var då:

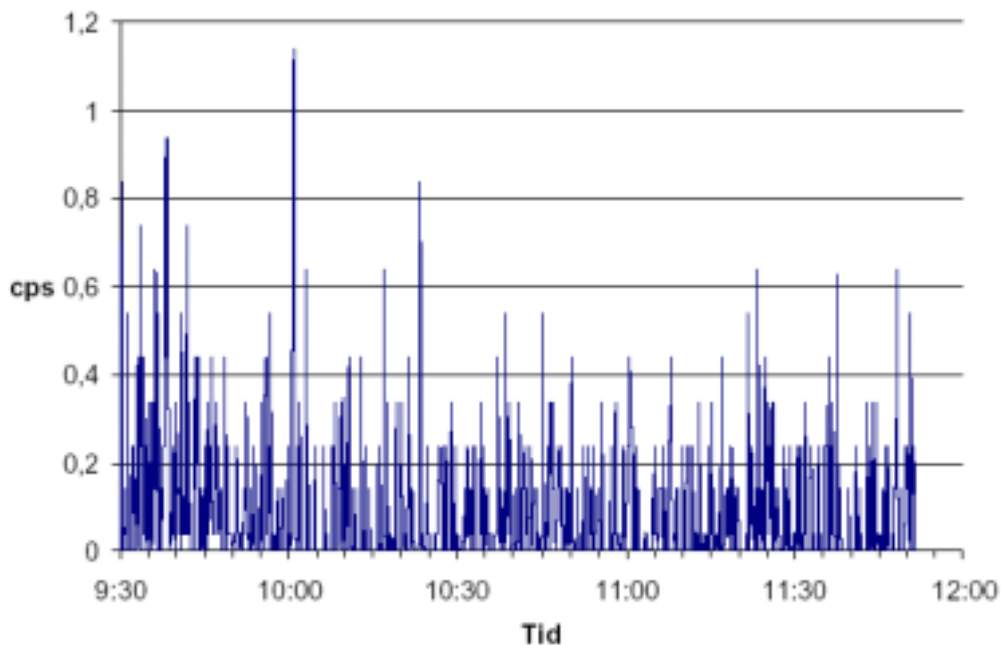
$$f = \frac{37.5}{6.5} = 5.8$$

Det kunde alltså förväntas att en genomsnittlig ampull skulle ge en topp som ligger ca 5½ standardavvikelser över bakgrundstrålningen.

De ordinarie försöken utfördes genom att ett antal ampuller med samma smältpunkt kastades in samtidigt. Meningen var att säkerställa att signalen som registrerades i detektorn representerade samma smältpunkt.

Den första mätserien genomfördes 2001-11-07 kl. 9:27-11:51. Fem st partiklar försedda med ampuller med smältpunkt 180 °C kastades in i bränslestupet klockan 10:00.

Mätningen visar följande förlopp:



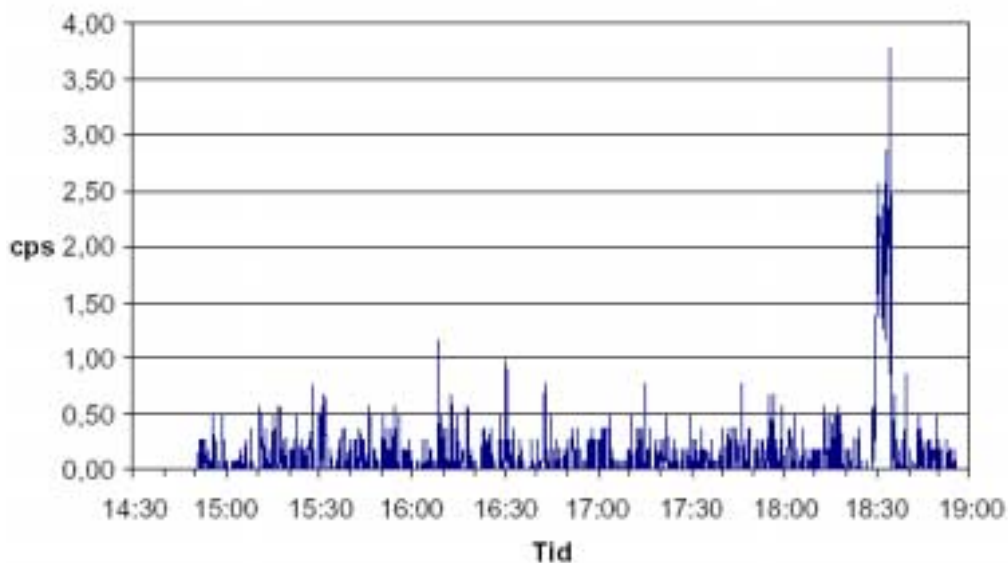
Figur 9: Data från första serien ^{85}Kr -mätningar. Signalen är korrigerad för bakgrundsstrålningen. Smältpunkt för lödningen i ampullerna: 180 °C. Partiklarna lades in kl 10.00.
Figure 9: Data from the first series of ^{85}Kr measurements. The signal is corrected for the background noise. Fusing-point of the soldering in the ampoules: 180 °C. The particles were thrown in at 10.00.

Partiklarna kastades in kl. 10:00. Inga signifikanta toppar kan urskiljas förutom möjligen kl. 9:38 och kl 10:02. Dessa toppar kan dock inte kan härröra från de inkastade ampullerna.

Nästa mätserie med ^{85}Kr -ampuller genomfördes kl. 14:48-18:55. Denna gång användes fem ampuller med smältpunkt 250°C. Partiklarna lades in kl. 15:32, och detektorsignalen visas i Figur 10:

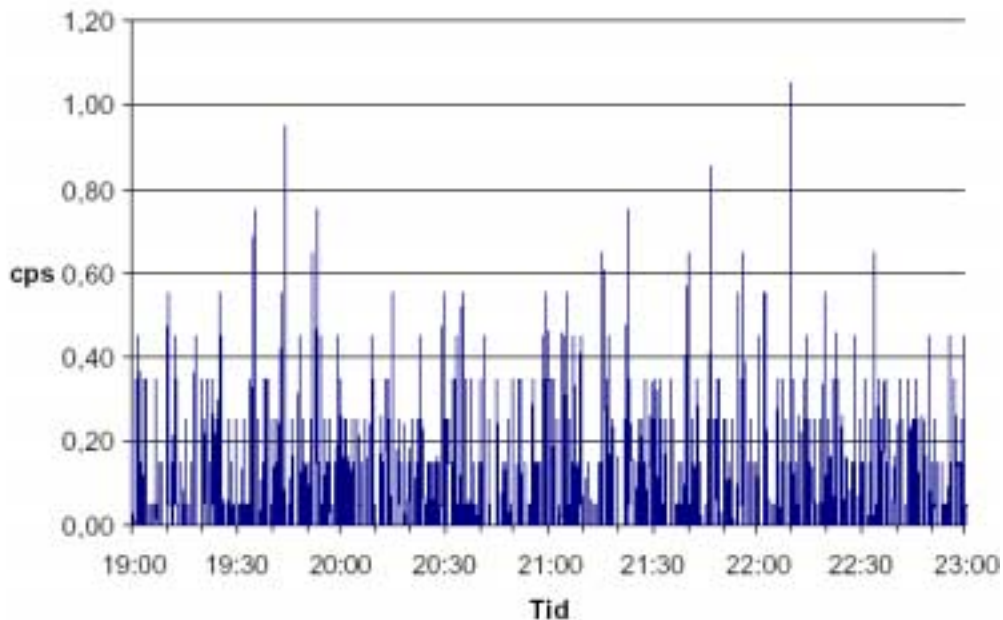
Den enda markanta topp som syns är omkring klockan 18:31. Denna härrör dock från rengöring av detektorerna från fukt och smuts och är ingen detektion av ^{85}Kr .

Den sista mätserien med ^{85}Kr genomfördes under tiden 18:56 till 23:00. Vid detta försök lades två grupper med ^{85}Kr -ampuller in. Den första gruppen bestod av 9 ampuller med en smältpunkt på 100°C som lades in kl. 18:56. Den andra gruppen bestod av 6 ampuller med smältpunkten 180°C som lades in ca kl. 20:30. Data från denna mätning redovisas i Figur 11.



Figur 10: Data från den andra ^{85}Kr -serien. Signalen är korrigerad för bakgrundsstrålningen. Smältpunkt för lödningen i ampullerna: $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. Partiklarna lades in kl 15:32.

Figure 10: Data from the second series of ^{85}Kr measurements. The signal is corrected for the background noise. Fusing-point of the soldering in the ampoules: $250\text{ }^{\circ}\text{C}$. The particles were thrown in at 15.32.



Figur 11: Data från den tredje ^{85}Kr -serien. Signalen är korrigerad för bakgrundsstrålningen. De två grupperna av ampuller lades in kl 18:56 (smältpunkt $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) resp. kl 20:30 (smältpunkt $180\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Figure 11: Data from the third series of ^{85}Kr measurements. The signal is corrected for the background noise. The two groups of ampoules were thrown in at 18.56 (fusing-point $100\text{ }^{\circ}\text{C}$) and at 20.30 (fusing-point $180\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Som synes i figur 11 finns det inga signaler som med säkerhet kan urskiljas från signalbruset.

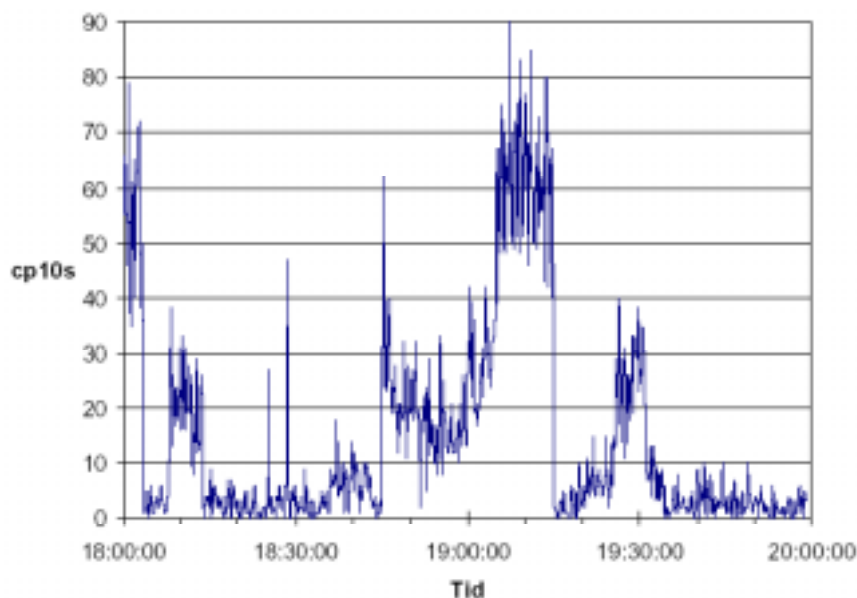
Som sammanfattning kan sägas att den enda ^{85}Kr -topp som kan identifieras som sann, under samtliga försök, är den i Figur 8 som uppkom av testampullen på 103.9 MBq. Inga ^{85}Kr -toppar från ampullerna med smältpunkter på 100 °C, 180 °C eller 250 °C kunde detekteras. Det kunde således inte visas att den föreslagna metoden fungerar med den utformning av simulerade bränslepartiklar och detektionssystem som försöken genomfördes med.

5.2 Densitetsbestämning

Försök för bestämning av bäddens densitet genomfördes i ett snitt vid ca 2/3 av rosterns längd, dvs mätsnittet låg närmare askutmatningen än bränslematningen. I detta snitt är det rimligt att anta att allt väte och allt syre har lämnat bädden och att huvuddelen av återstoden är kol. Dessutom antas att sand, jord och grus som kommit med in består av i huvudsak Si, Al och Fe.

Ett rimligt antagande är därför att 90 % av bränslet i det snitt mätningen sker består av kol och att resten är en kombination av Al, Fe, O och Si. Ur detta kan antas ett värde på $\mu/\rho = 0.0378 \text{ cm}^2/\text{g}$. Beräkningar med detta värde ger, om det inte finns avgörande fel i antagandena, maximalt ett par procent fel i det slutliga resultatet.

I Figur 12 visas detektorresponserna från försöket för bestämning av bäddens densitet.



Figur 12: Plot av rådata från försöket för bestämning av bränslebäddens densitet.
Figure 12: Plot of primary data from the trial for determination of the density of the fuel bed.

Försöket innefattade följande mätningar:

Tidsintervall	Objekt
Kl. 18:15-18:21	Bakgrund
Kl. 18:43-19:05	Mätning <u>genom</u> bränslebädden
Kl. 19:05-19:14	Mätning <u>över</u> bränslebädden
Kl. 19:22-19:52	Mätning <u>längre ner</u> i bränslebädden

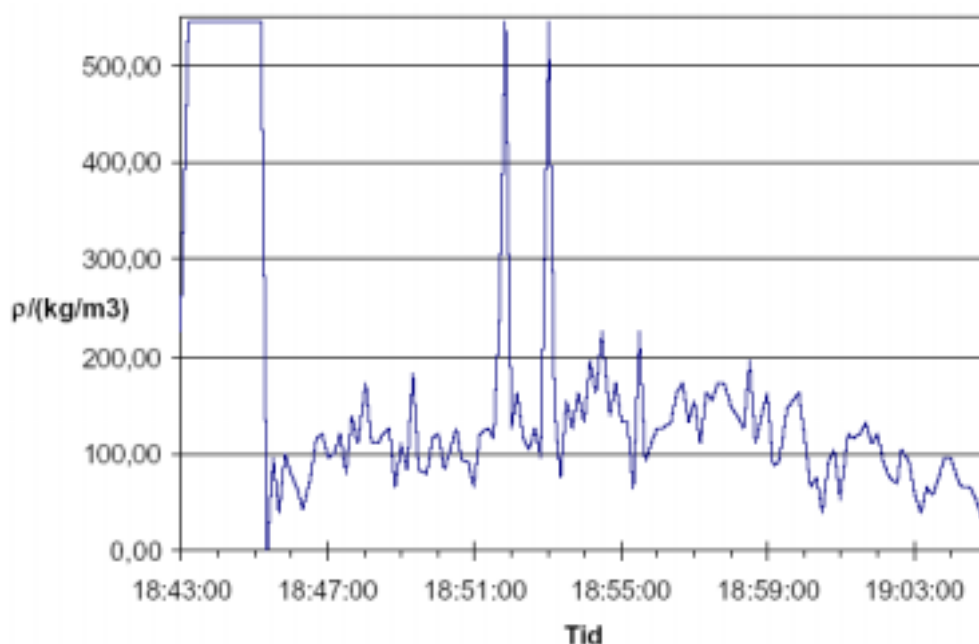
Ur dessa intervall kan bakgrunden och mätvärdena över bränslebädden bestämmas.

Tabell 3: Mätvärden för bakgrund och över bränslebädden vid bestämning av bränslebäddens densitet

Table 3 Measurement values for the background and above the fuel bed when determining the density of the fuel bed

	Bakgrund	Över bädd	Över bädd – Bakgrund
Cp10s	2.8	62.0	59.1

Med ovanstående data erhålls genom användning av (5) variationerna i de andra två intervallerna och följande diagram fås:



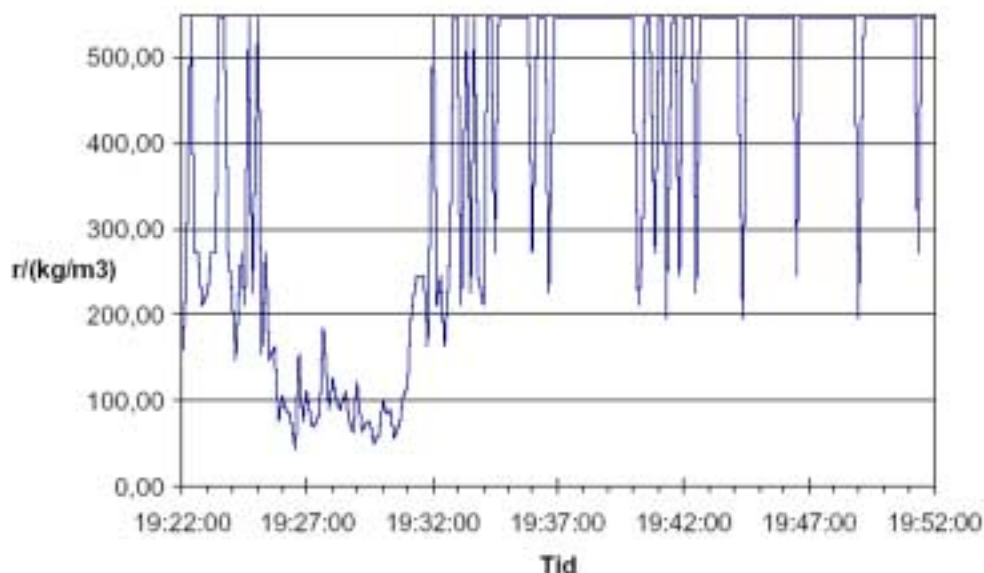
Figur 13: Beräknad densitet som funktion av tiden vid mätning genom övre delen av bränslebädden.

Figure 13: Calculated density as a function of time when measuring through the upper part of the fuel bed.

Under större delen av mättiden beräknas densiteten till mellan 100 och 200 kg/m³, vilket är troligen är rimliga värden på den senare delen av rostern. De två mycket höga densi-

teter som mättes 18:51 och 18:53 kan bero på sten eller större klumpar av slagg som lagt sig framför källan.

I figur 14 visas de beräknade densiteterna från försöket med mätning 10 cm ner i bädden.



Figur 14: Beräknad densitet som funktion av tiden vid mätning 10 cm längre ned i bränslebädden.

Figure 14: Calculated density as a function of time when measuring 10 cm downwards in the fuel bed.

Det framgår tydligt i 14 att källan sänkts 10 cm. Det material som skall strålas igenom är mycket tätare och i många fall orkar signalen inte över störningsnivån. den praktiska övre gränsen för mätningen av densitet är 270 kg/m^3 med den konfiguration av strålningskälla – detektor som användes vid mätningarna.

Det kan ändå konstateras markanta variationer i densiteten på samma sätt som i figur 13. I denna varierar densiteten från 50 kg/m^3 till 250 kg/m^3 .

Eftersom bäddhöjden inte samtidigt mättes med en oberoende metod, kan det inte helt uteslutas att en del av de uppmätta densitetsvariationerna i själva verket är en variation i bäddhöjden.

5.3 Positionsbestämning

Som grund för positionsbestämningen definierades ett koordinatsystem. Den positiva riktningen definierades som den riktning som bränslet rör sig i.

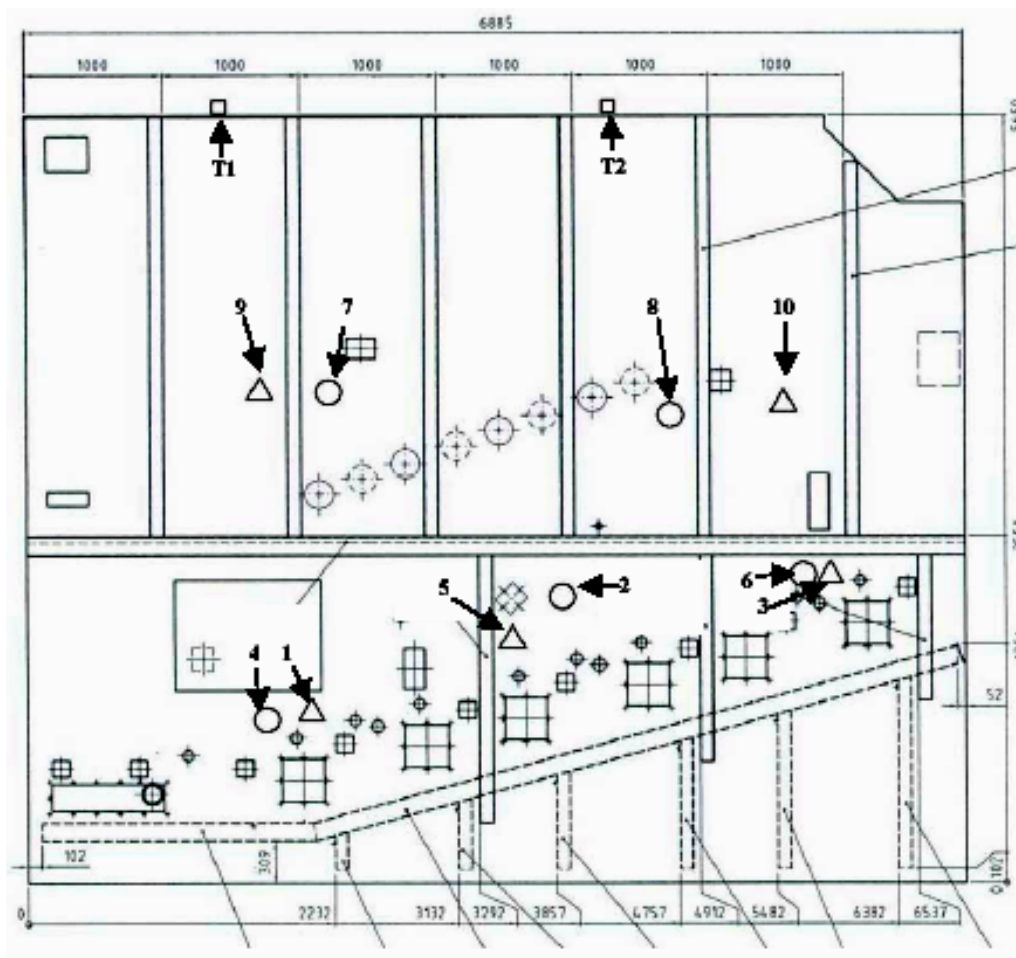
Pannan har fyra plan där personal kan röra sig:

- Plan 0, som är golvet vid entrén.
- Plan 1, i höjd med pannans rost. Dessutom finns inspektionsluckan i detta plan.
- Plan 2, där luckan i fallschaktet för bränsle finns.
- Plan 4, panntaget.

Origo (0,0,0) placerades på plan 1 på pannans framsida längst åt höger; närmare bestämt hörnet på kantplåten ca 10 cm utanför pannans yttervägg(dvs inte hörnet på insidan av ugnen). Origo visas i figur 15. För positionsbestämningen användes 12 detektorer placerade enligt figur 16 och 17:

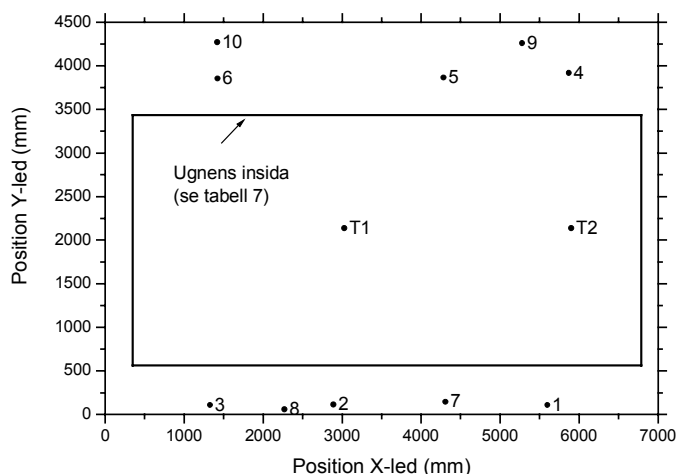


*Figur 15: Origo i koordinatsystemet för ugnen.
Figure 15: Origo i the coordinate system for the furnace*



Figur 16: Detektorplaceringar sett från ugnens vänstra sida. Detektorerna på vänstra sidan är betecknade med trianglar (Δ) medan de på högra sidan betecknas med cirklar (O). De två detektorerna på ugnstaket är markerade med fyrkanter (\square).

Figure 16: Positions of the detectors seen from the left side of the furnace: The detectors on the left hand side are indicated with triangles (Δ), while those on the right hand side are indicated with squares (\square).



Figur 17: Detektorernas läge i koordinatsystemet sett ovanifrån

Figure 17: The detector positions in the coordinate system seen from above

Detektorerna fick nedanstående positioner i det ovan beskrivna koordinatsystemet:

Tabell 4: Placering av detektorerna. Detektorerna på pannans tak (T1 och T2) var inte med i den ursprungliga matematiska modellen utan har tagits med som extra kontroll.

Table 4: Position of the detectors. The detectors on the top of the boiler (T1 and T2) were not included in the original model, but have been added as an extra check.

	x (mm)	y (mm)	z (mm)
Detektor 1	5600	110	1110
Detektor 2	2890	110	2175
Detektor 3	1330	110	2090
Detektor 4	5870	3920	1125
Detektor 5	4285	3865	1850
Detektor 6	1425	3850	2145
Detektor 7	4310	145	3745
Detektor 8	2275	60	3400
Detektor 9	5280	4260	3795
Detektor 10	1420	4270	3820
Detektor T1	3030	2135	5650
Detektor T2	5900	2135	5650

Osäkerheten i inmätningen av detektorernas placering var mindre än 50 mm.

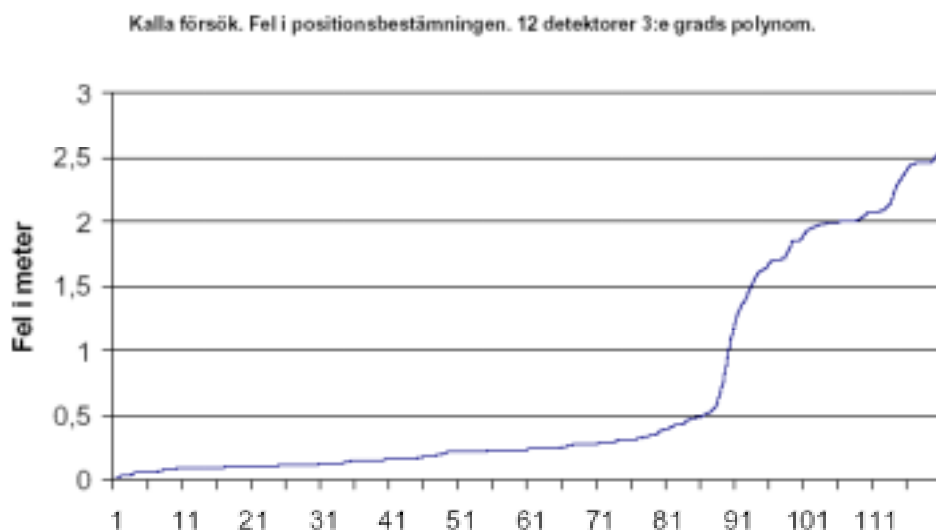
5.3.1 Kalibrering (kalla försök)

Den första testen av modellen var kalibreringen där ett antal kända positioner för strålkällan skulle verifieras. Kalibreringen skulle således ge ett mått på hur bra modellen var. Efter en rad försök med både andra- och tredjegradspolynom valdes ett andragradspolynom eftersom detta visade bäst resultat.

Nedan visas resultaten från de kalla försöken i fyra diagram. Diagrammen visar felen, d.v.s. avståndet till den sanna positionen, sorterade efter storlek för de 120 punkter som uppmättes vid de kalla försöken. Beräkningen har gjorts i fyra olika fall:

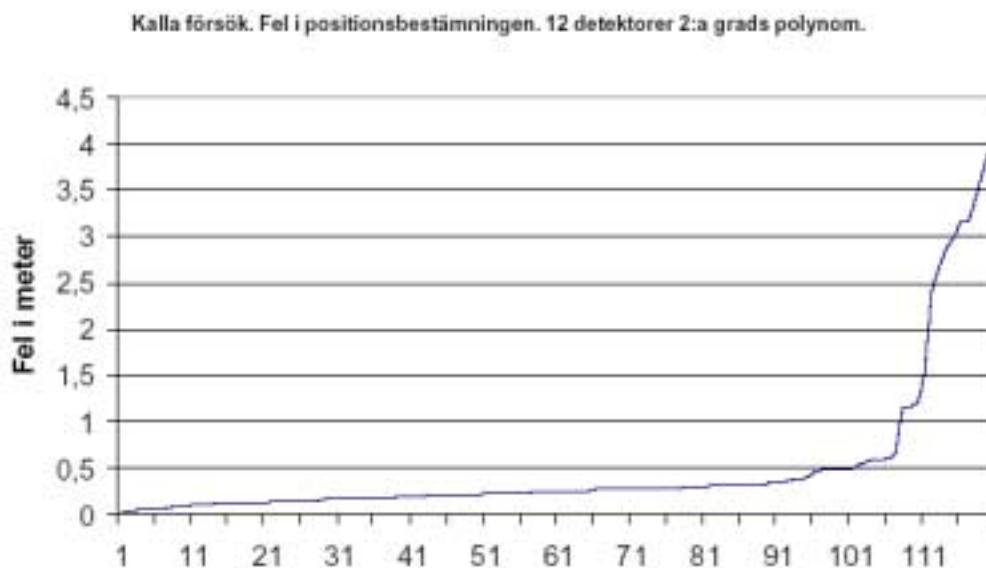
- Mätning med 12 detektorer och beräkning med andra- och tredje- gradsuttryck för detektorresponsen.
- Mätning med 11 detektorer och beräkning med andra och tredje- gradsuttryck för detektorresponsen.

Anledningen till att både fallen med 11 och 12 detektorer redovisas är att detektor nr 8 gick sönder under de varma försöken. Samtliga varma försök med positionsbestämning måste alltså genomföras med endast 11 detektorer. Positionsbestämningen vid de kalla försöken företogs alltså däremot med 12 detektorer



Figur 18: Fel i positionsbestämning med 12 detektorer och ett tredjegradsuttryck för detektorresponsen. Felen är sorterade i storleksordning. Drygt 2/3 av positionerna är bestämda med ett fel mindre än 0,5 m.

Figure 18: The inaccuracy in the position determination with 12 detectors and a third power polynomial for the detector response. The inaccuracies are sorted in size order. Slightly more than 2/3 of the positions are determined with an inaccuracy of less than 0,5 m.



Figur 19: Fel i positionsbestämning med 12 detektorer och ett andragradsuttryck för detektorresponser. Felen är sorterade i storleksordning. Omkring 80 % av positionerna är uppskattade med ett fel mindre än 0,5 m.

Figure 18: The inaccuracy in the position determination with 12 detectors and a second power polynomial for the detector response. The inaccuracies are sorted in size order. About 80 % of the positions are determined with an inaccuracy of less than 0,5 m.



Figur 20: Fel i positionsbestämning med 11 detektorer och ett tredjegradsuttryck för detektorresponser. Felen är sorterade i storleksordning. Mindre än 40 % av positionerna är uppskattade med ett fel mindre än 0,5 m. Ett antal punkter är uppskattade med ett fel som är större än 1,5 m.



Figur 21: Fel i positionsbestämning med 11 detektorer och ett andragradsuttryck för detektorresponser. Felen är sorterade i storleksordning. Mindre än 40 % av positionerna är uppskattade med ett fel mindre än 0,5 m, men mycket få är uppskattade med ett fel större än 1,5 m.

Figure 21: The inaccuracy in the position determination with 11 detectors and a second power polynomial for the detector response. The inaccuracies are sorted in size order. Less than 40 % of the positions are determined with an inaccuracy of less than 0,5 m, but very few are determined with an inaccuracy of more than 1,5 m.

Som tydligt framgår i ovanstående diagram (Figur 18 – Figur 21) betyder förlusten av en detektor (nr 8) en väsentlig del för noggrannheten i uppskattningen av positionerna.

Onoggrannhetens beroende av antalet detektorer och polynomets grad visas i Tabell 5 nedan:

Tabell 5: Antal positioner (av 120) som beräknades med fel mindre än 0,5 m och större än 1,5 m beroende på polynomets grad och antalet detektorer

Table 5: The number of positions (out of 120) which were determined with an error of less than 0.5 m and greater than 1.5 m depending on the order of the polynomial and the number of detectors

Felstorlek, m	andragradspolynom		tredjegradspolynom	
	<0,5	>1,5	<0,5	>1,5
11 detektorer	52	4	47	30
12 detektorer	101	9	85	28

Tabell 5 visar att det är fler punkter där felet är mindre än 0,5 m och färre punkter med fel större än 1,5 m när beräkningen görs med ett andragradspolynom än med ett tredjegradspolynom.

Vid användning av 11 detektorer och ett andragradspolynom fås ett medelfel vid kalibreringen på $\Delta_{\text{medel}} = 0.62$ m. Vid användning av 12 detektorer och ett andragradspolynom är medelfelet något mindre, eller $\Delta_{\text{medel}} = 0.50$ m. **Detta innebär att positionsbestämningarna både med 11 detektorer och 12 detektorer är förhållandevis grova.**

Närmare analyser visar att de positioner som har de största felen i uppskattningen uppkommer när antingen x-koordinaten (längden) eller y-koordinaten (bredden) närmar sig sitt maximum. Det betyder att den sämsta positionen för estimeringen är askutmatningen.. Detta är olyckligt då det troligen är där partikeln befinner sig längst tid.

5.3.2 Försök under drift (varma försök)

Försök gjordes med tre st simulerade bränslepartiklar. Av dessa passerade två st oskadade genom pannan. För dessa uppmättes följande data före och efter passagen genom pannan:

Tabell 6: Data för de två bränslepartiklarna före och efter passagen genom ugnen.

Table 6: Data for the two fuel particles before and after the passage through the boiler

Partikel	$d_{\text{före}}/\text{mm}$	$h_{\text{före}}/\text{mm}$	$m_{\text{före}}/\text{g}$	$\rho_{\text{före}}/\text{g}/\text{cm}^3$	$d_{\text{efter}}/\text{mm}$	$h_{\text{efter}}/\text{mm}$	$m_{\text{efter}}/\text{g}$	$\rho_{\text{efter}}/\text{g}/\text{cm}^3$	$\Delta\rho/\text{g}/\text{cm}^3$
1	39,6	59,8	26	0,37	36,1	52,1	23	0,42	-0,05
3	40,1	69,4	46	0,54	34	62,8	22	0,38	0,16

De simulerade bränslepartiklarna var utformade för att likna ett normalt bränslestycke så mycket som möjligt. Detta innebar bl.a. att densiteten skulle minska under vägen genom pannan.

En oanvänd simulerad bränslepartikel visas i figur 6, medan partiklarna efter passagen såg ut som i Figur 22.



Figur 22: Simulerade bränslepartiklar efter passage genom pannan. Lägg märke till slagget som bränt fast vid partiklarnas yta.

Figure 22: Simulated fuel particles after the passage through the boiler. Notice the slag which has been attached to the particle surfaces.

Enligt tabell 6 har densiteten hos partikel 1 ökat under passagen genom ugnen. Detta beror troligen på att slagg bränts fast på ytan.

I övrigt noterades att densiteterna hos partiklarna stämde bra överens med de värden som uppmättes vid densitetsbestämningen (se avsnitt 4.2). Det finns alltså ingen anledning att tro att partiklarna betett sig annorlunda än bränslet i övrigt.

Den sista partikeln, nr 3, blev svårt skadad i slutet av försöket. Partikeln vandrade hela vägen genom ugnen men skars av i askutmatningsmekanismen varvid hälften av aktiviteten kom ut i askan. Lyckligtvis spred sig aktiviteten inte i askan utan ca 1 kg kontaminerad aska kunde plockas ut omedelbart efter askutmatningen.

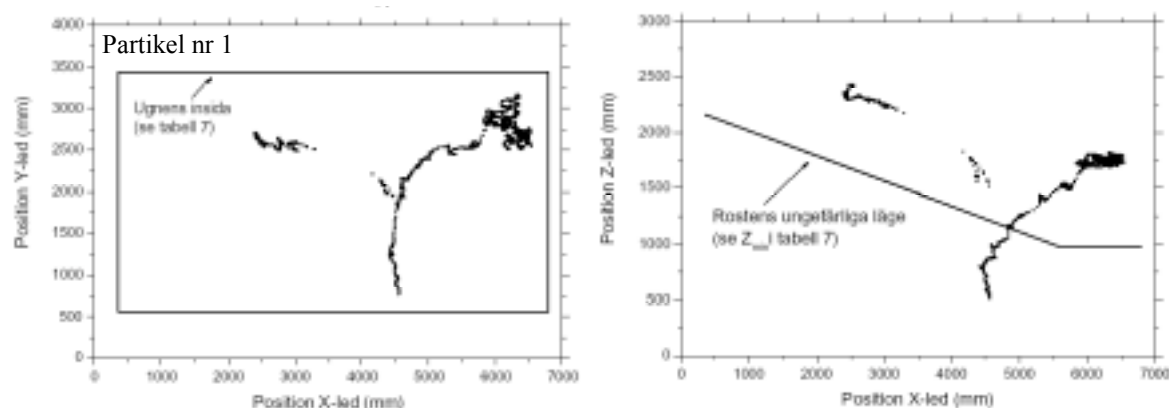
Den beräknade rörelsen hos de tre partiklarna visas i diagrammen nedan (figur 23 – figur 25). De visas som x-y-diagram (dvs sett uppifrån) resp. x-z-diagram (dvs sett från höger). Max- och mingränserna för x, y och z anges i tabell 7. Dessa siffror kan använ-

das som en första grov bestämning av värdena och en rimlighetsanalys. Gränserna är också markerade med heldragna linjer i diagrammen som representerar ugnens insida.

Tabell 7: Max- och minvärden för partiklarnas rörelser i ugnen. I början av ett förlopp kan partikeln befinna sig utanför gränserna i x- och z- led eftersom bränsleinmatningen, där bränslepartiklarna tillförs, ligger utanför ugnen.

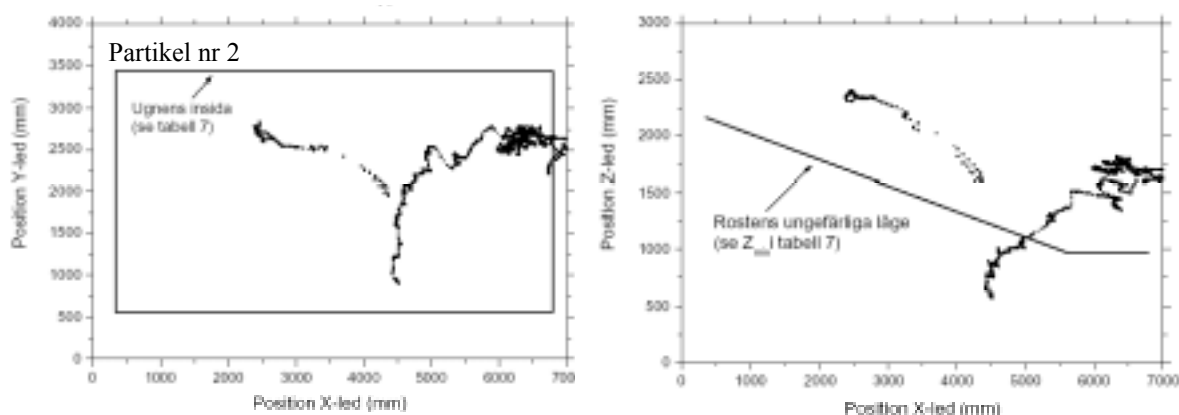
Table 7: Max. and min. values for the movement of particles in the boiler. In the beginning of an experiment the particle may be found outside the x and z limit values because the fuel feed system, where the particles are added, is not a part of the furnace

Parameter	Gränsvärde i mm	Giltighetsområde
X_{\min}	350	
X_{\max}	6790	
Y_{\min}	560	
Y_{\max}	3425	
Z_{\min}	$2167 - 0.227 * (X_{\min} - x)$	$5600 > x \geq 350$
Z_{\min}	975	$6790 > x > 5600$
Z_{\max}	$Z_{\min} + 500$	$x \geq X_{\min}$



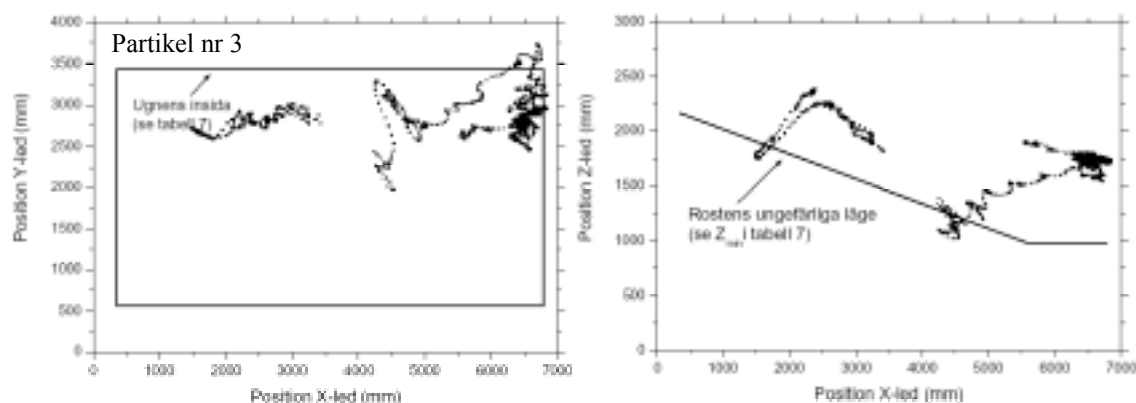
Figur 23: Resultat i x-y-led (dvs. sett uppifrån) respektive x-z-led (dvs. sett från höger) från den ursprungliga utvärderingsmodellen för partikel 1. Ugnens insida och rostens ungefärliga läge är markerad i diagrammen.

Figure 23: The results in the x-y plane (i.e. seen from above) and in the x-z plane (i.e. seen from the right) from the original calculation model for particle no 1. The inside of the furnace and the approximate position of the grate are indicated in the figures.



Figur 24: Resultat i x-y-led (dvs. sett uppifrån) respektive x-z-led (dvs. sett från höger) från den ursprungliga utvärderingsmodellen för partikel 2. Ugnens insida och rostens ungefärliga läge är markerad i diagrammen.

Figure 24: The results in the x-y plane (i.e. seen from above) and in the x-z plane (i.e. seen from the right) from the original calculation model for particle no 2. The inside of the furnace and the approximate position of the grate are indicated in the figures.



Figur 25: Resultat i x-y-led (dvs. sett uppifrån) respektive x-z-led (dvs. sett från höger) från den ursprungliga utvärderingsmodellen för partikel 3. Ugnens insida och rostens ungefärliga läge är markerad i diagrammen.

Figure 25: The results in the x-y plane (i.e. seen from above) and in the x-z plane (i.e. seen from the right) from the original calculation model for particle no 5. The inside of the furnace and the approximate position of the grate are indicated in the figures.

Med denna framställning ser man att utvärderingsmodellen till stora delar gett orimliga resultat. De punkter som befinner sig före ca 3500 mm på x-axeln och över rosten, ser i och för sig rimliga ut men ingen av partiklarna befinner sig någonsin på den första metern av rosten, som de måste ha passerat. I detta säger en rimlighetsbedömning att den korrekta positionen, när de kommer in i ugnen, borde vara inom nedanstående intervall:

x: 350-850 mm

y: 1500-2500 mm
z: 2000-2700 mm

Mellan 3500 och 4500 mm i x-led händer det väldigt mycket enligt utvärderingsmodellen. Partiklarna hoppar mycket snabbt framåt i x-led, samt åker ned en bra bit under rosten. Dessutom rör de sig i de två första fallen kraftigt ut åt höger till en position mindre än 0,5 m från den högra ugnsväggen.

I slutfasen av experimenten är x-koordinaten rimlig (6000-6500 mm) sånär som för partikel 3 som tar en tur ut genom väggen men sedan återvänder till en rimlig position i x-led. Däremot är z-positionen uppåt 0,5 m högre än askluckans läge.

Sammanfattningsvis visar Fig 23-25 att det är omöjligt att med den använda utvärderingsmetoden dra några säkra slutsatser om hur partiklarna rört sig i ugnen. De stora uppenbara felen i x- och z-led gör att slutsatser i fråga om rörelsen i y-led också är svåra att dra.

Underleverantören som ansvarar för mättekniken och den primära utvärderingen av mätdata förklarar resultaten med att den använda modellen förutsätter att inverkan av densiteten hos bränslet på detektorernas responser kan försummas. Bränslet hade dock en betydligt högre densitet än den som antagits, och dessutom varierade densiteten mer än vad som förutsatts. Försök att kompensera mätningarna för densiteten vid utvärderingen visade att detta inte var meningsfullt.

Det förlopp man ser mellan 3500 och 4500 mm i x-led, dvs rörelsen framåt (x), nedåt (z) och åt höger (y), är således ett uttryck för att partiklarna begravs av bränsle och att modellen därför ger resultat som inte är meningsfulla.

Det fortsatta förloppet är dock mer intressant och kan tolkas som att partiklarna friläggs för att till slut ligga ovanpå resten av bränslet eller bara lätt täckt av bränsle/aska. Detta ses genom att x-koordinaten är svagt stigande medan i y- och z-riktningarna är förändringen mer markant

Av Figur 23-25 framgår att partikelns position i z-riktningen blir stort sett konstant när den lägger sig ovanpå bränslet eller bränslet bränns av. I x- och y- riktningen rör sig partikeln.

En analys av rådatafilerna ger underlag för mera detaljerade tolkningar av förloppen. Genom att titta på diagramutskriften från de enskilda detektorerna och tillämpa sunt förnuft kan en del slutsatser dras. Detta innebär bl.a. att detektorerna bör registrera den högsta intensiteten då strålningens väg genom murningen är som kortast, dvs mitt framför respektive detektor.

Man kan tydligt se när försöken startat, eftersom en kraftig strålningstopp registreras av detektorerna som var placerade på ugnens högresa när isotopen bars förbi denna sida på vägen mot bränslestupet. Med hjälp av detektor T1, som var placerad på taket, kan

man utläsa när partiklarna kommer fram ur pushern vid frontväggen. Detektor 1-6, som var placerade strax över rosten, har som man kan förvänta sig sina maximala strålningsintensiteter i den ordning som de är placerade i x-led. Speciellt intressanta är signalerna från detektor 1 och 4, som är placerade ungefär där planrosten börjar. Dessa ökar ganska jämnt under en knapp halvtimme, för att sedan börja variera runt sitt maximala värde fram till försökets slut. En rimlig tolkning av detta är att när intensitetskurvan planar ut befinner sig partikeln i x-positionen 5500-6000 mm, d.v.s den har kommit fram till planrosten. I tabell 8 nedan listas några av de tidsförlopp som tolkats fram ur rådatafilerna.

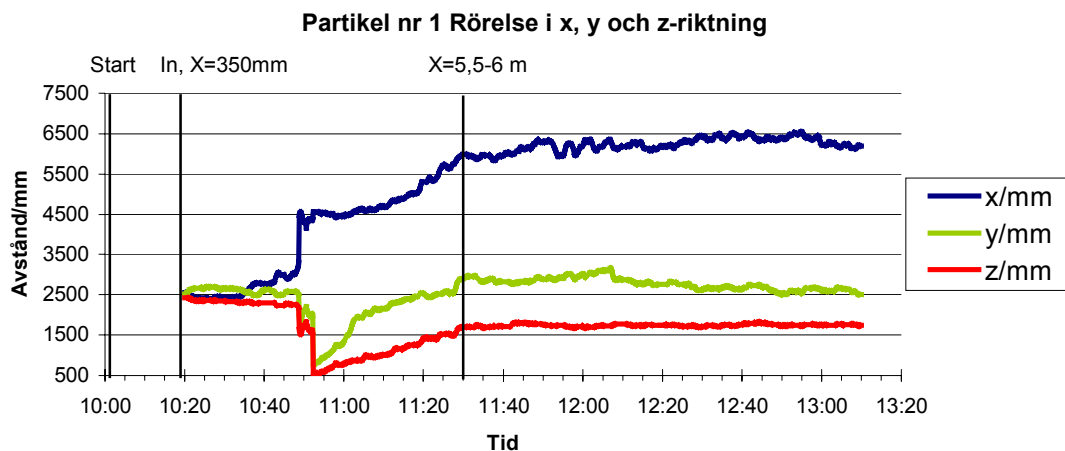
Tabell 8: Tidsförlopp för försöken med positionsbestämning uttolkade från rådatafiler.

Table 8: Timetable for the experiments with position determination evaluated from the raw data files

Partikel Nr	1	2	3
Start	10:01	15:32	18:49
Tid in i ugn , $x = 0,35$ m	10:19	15:49	19:08
Tid $x = 5,5-6$ m	11:30	16:59	20:19
Försök slut	13:11	18:12	21:51
Tid till in i ugn	00:18	00:17	00:19
Tid $x = 0,35$ m till $X = 5,5-6$ m	1:11	1:10	1:11
Tid $x = 5,5 - 6$ m till slut	1:41	1:13	1:32
Total försökstid	3:10	2:40	3:02
Tid i ugn	2:52	2:23	2:43

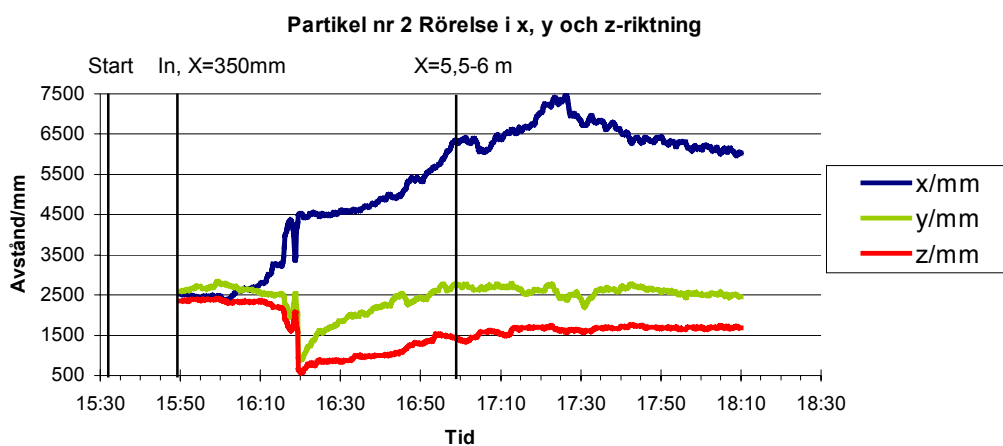
De ser att de flesta uppehållstiderna är relativt lika för de olika partiklarna.

För att möjliggöra jämförelse med den använda utvärderingsmodellens resultat visas i Figur 26-28 dessa resultat som tidsförlopp i de tre riktningarna (x,y,z), med vertikala linjer inlagda vid tidpunkterna för start av experimentet, när partikeln kommer in i ugnen och för tidpunkten då partikeln anses vara framme vid planrosten ($x = 5,5-6$ m).



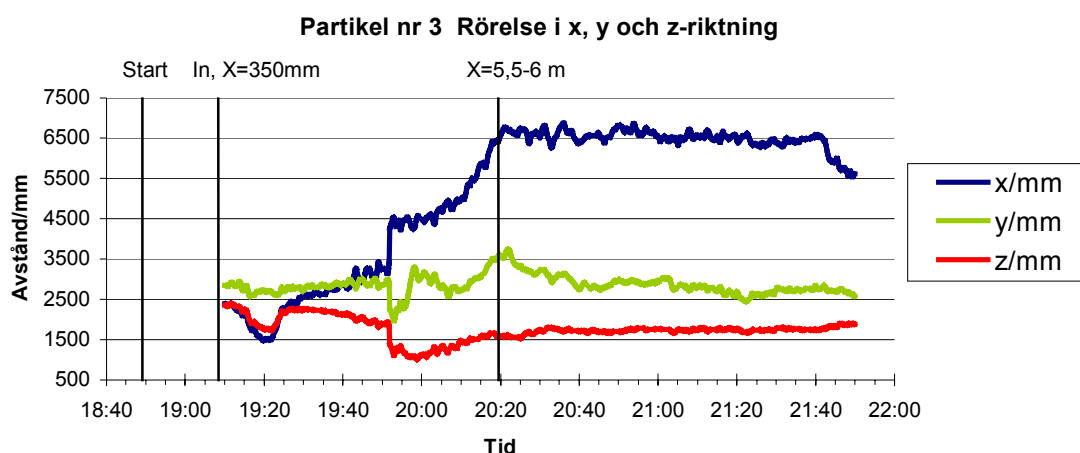
Figur 26: Den beräknade rörelsen i x, y, och z-riktningen för partikel 1. De tre vertikala linjerna markerar tidpunkten för experimentets start, när partikeln kommer in i ugnen och när den är framme vid planrosten.

Figure 26: The calculated motion in the x, y and z directions for particle no 1. The three vertical lines indicate the start of the experiment, the time when the particle enters the furnace and when the particle has reached the horizontal grate.



Figur 27: Den beräknade rörelsen i x, y, och z-riktningen för partikel 2. De tre vertikala linjerna markerar tidpunkten för experimentets start, när partikeln kommer in i ugnen och när den är framme vid planrosten.

Figure 27: The calculated motion in the x, y and z directions for particle no 2. The three vertical lines indicate the start of the experiment, the time when the particle enters the furnace and when the particle has reached the horizontal grate.



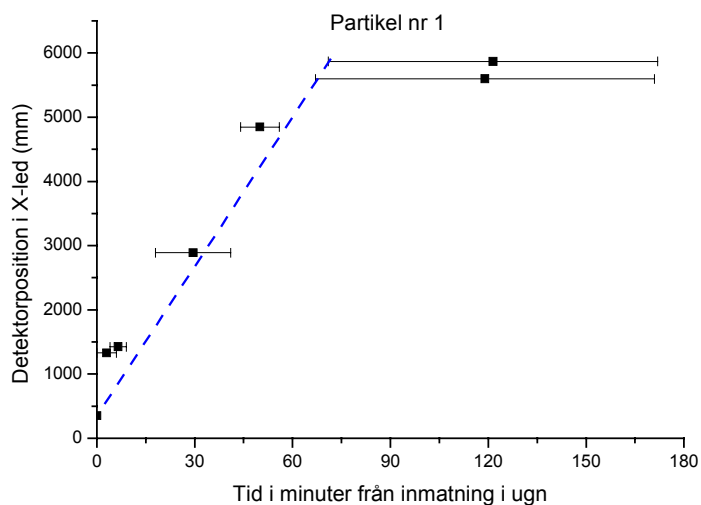
Figur 28: Den beräknade rörelsen i x, y, och z-riktningen för partikel 3. De tre vertikala linjerna markerar tidpunkten för experimentets start, när partikeln kommer in i ugnen och när den är framme vid planrosten.

Figure 28: The calculated motion in the x, y and z directions for particle no 3. The three vertical lines indicate the start of the experiment, the time when the particle enters the furnace and when the particle has reached the horizontal grate.

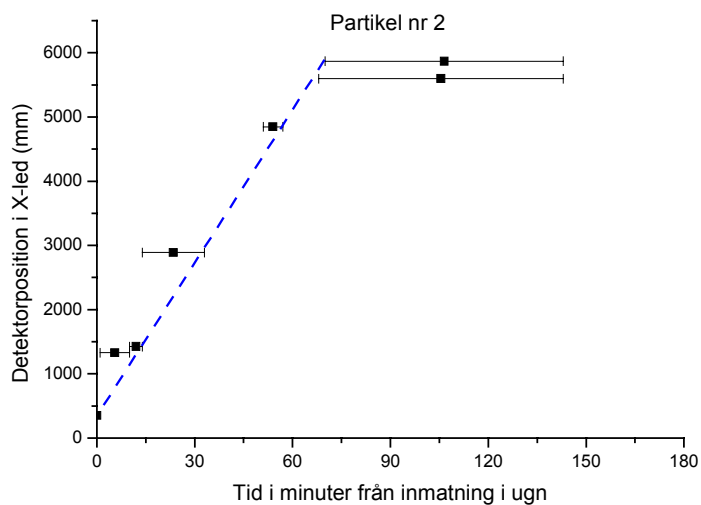
Följande slutsatser kan dras ur Fig 26-28:

- Det kan bekräftas att bränslet (eller återstoden av det) befinner sig förhållandevis lång tid på planrostern före askutmatningen.
- Transport tiden över den rörliga rosten verkar ha varit ungefär densamma för alla tre partiklarna.

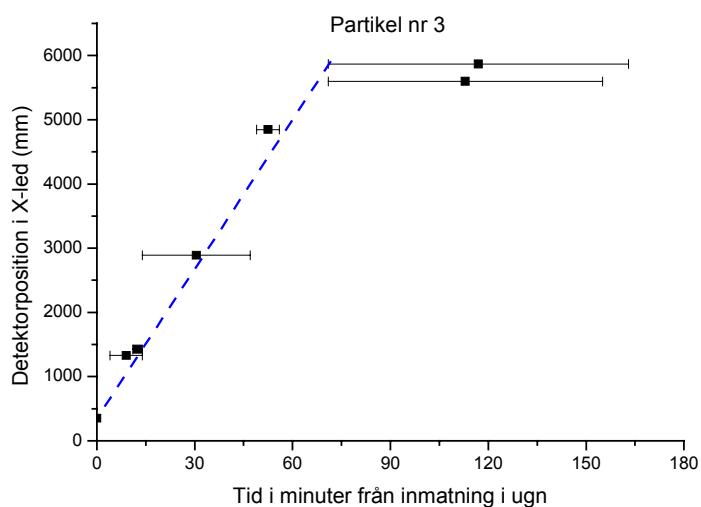
Ett annat sätt att analysera rådata är att ta fram de tidsintervall då partikeln är som närmast resp. detektor (dvs. då strålningsintensiteten är som högst). I Figur 29-31 åskådliggörs detta i x-led som staplar för resp. detektor att jämföra med en beräknad konstant hastighet mellan inmatning och området 5,5 – 6 m.



Figur 29: Tidsintervall (staplar) då partikel 1 befinner sig närmast resp. detektor jämfört med beräknad position vid konstant matningshastighet mellan inmatning och området 5,5 – 6 m.
 Figure 29: Time intervals (staples) when particle no 1 is closest to each detector compared to calculated positions assuming constant grate speed from the fuel feed to the interval 5,5 – 6 m.



Figur 30: Tidsintervall (staplar) då partikel 2 befinner sig närmast resp. detektor jämfört med beräknad position vid konstant matningshastighet mellan inmatning och området 5,5 – 6 m.
 Figure 30: Time intervals (staples) when particle no 2 is closest to each detector compared to calculated positions assuming constant grate speed from the fuel feed to the interval 5,5 – 6 m.



Figur 30: Tidsintervall (staplar) då partikel 2 befinner sig närmast resp. detektor jämfört med beräknad position vid konstant matningshastighet mellan inmatning och området 5,5 – 6 m.
Figure 30: Time intervals (staples) when particle no 2 is closest to each detector compared to calculated positions assuming constant grate speed from the fuel feed to the interval 5,5 – 6 m.

Genom ovanstående analys av rådata är det vår bestämda uppfattning att det genom att använda en annan utvärderingsmetodik är fullt möjligt att få fram betydligt noggrannare information om hur partiklarna rör sig i x- och y-led. Däremot är det mer tveksamt vad som går att göra i z-led, eftersom en av de högt placerade detektorerna föll ifrån helt (det 8), och den andra detektorn på samma sida och ungefär samma höjd (det 7), uppvisar kraftiga variationer vid på bakgrundsstrålningen.

6 Diskussion

6.1 Temperaturmätning

Totalt 25 st ampuller med lödningar som smälter vid tre olika temperaturer tillfördes under försöken. För ingen av dessa kunde någon ^{85}Kr detekteras i rökgasen. Den enda ampull som gav en signifikant ^{85}Kr -puls var den glasampull med en ca sex ggr så hög aktivitet som slängdes direkt in i pannan vid ett förförsök.

En av de möjliga förklaringarna till detta är att metoden bygger på antagandet att den rökgas som strömmar genom rökgaskanalen är homogen över hela tvärsnittet. I en panna av den här typen är stråkbildningar vanliga vilket gör det fullt möjligt att gas från en eller flera ampuller kan undgå provtagningen beroende på var de har hamnat i ugnen. Om så är fallet detekteras ingen ^{85}Kr även om denna som avsett momentant frigges i tillräcklig mängd.

En annan, kanske mer osannolik, förklaring är att ^{85}Kr -gasen inte frigörs från ampullerna i en koncentrerad puls vilket mätmetoden förutsätter. Metodens utgångspunkt är att allteftersom temperaturen i ampullen höjs ökar trycket. När smältpunkten för lödningen uppnås antas ett förhållandevis stort hål i lödroppen öppnas, och all gas antas strömma ut momentant i förhållande till tidsupplösningen i mätningen i övrigt. Om detta inte uppfylls, utan gasen sakta sipprar ut kan ingen tydlig topp registreras av detektorn, får man istället en signal utspridd över ett antal mätningar som inte kan tolkas som en topp.

Försöken har således inte definitivt kunnat visa om metoden är praktiskt användbar eller inte. Försöket med glasampullen visar dock att den i princip fungerar. Med visst utvecklingsarbete i fråga om nödvändiga ^{85}Kr -mängder, krav på omblandning av rökgaserna samt hur gasen frigges då ampullerna uppnår lödningens smälttemperatur kan metoden mycket väl fungera bra.

6.2 Densitetsbestämning

Försöken med densitetsbestämning gav beräknade värden som låg mellan 50 och 250 kg/m^3 , vilket bedöms vara rimliga värden för bäddmaterialet på den aktuella delen av rosten. Någon alternativ, oberoende bestämning av densiteten med annan metod har dock inte gjorts.

Försöken visar relativt stora variationer i densiteten över tiden och mellan de två försöken på olika bäddjup. Möjliga förklaringar till dessa är ojämn bäddyta, genomblåsningar i bädden samt föroreningar i form av sten och slagg. Det är också möjligen tänkbart att ”klumpar” av fuktigare bränsle kan finnas relativt långt ned på rosten vilket naturligtvis ger en högre densitet.

Det skall noteras att metoden ger ett medelvärde av densiteten längs siktlinjen utgående från skillnaden vid mätningen genom bädden och mätning över bädden. Om bäddytan är ojämn så att bränsle saknas i vissa delar av siktlinjen eller främmande föremål ligger i

denna erhålls därmed felaktiga värden. Sådan förhållanden är normal i en rosterpanna, vilket i viss mån begränsar användbarheten.

Den använda uppställningen av strålkälla – detektor möjliggjorde mätning av densiteter på max. 270 kg/m^3 . Genom att modifiera utrustningen bör det vara möjligt att även kunna mäta högre densiteter vilket är av intresse, särskilt på tidigare delar av rosten.

6.3 Positionsbestämning

Resultatet av positionsbestämningen beror av en rad faktorer. En viktig sådan är hur väl den matematiska modellen av pannan beskriver dämpningen av strålningen på dess väg till de olika detektorerna. Modellen byggdes upp på grundval av ritningar och materialdata (främst densitet) för den aktuella pannan. I denna modell måste naturligtvis en del förenklingar göras.

Kalibreringen (de kalla försöken) visar att onoggrannheten i beräkningarna var större än förväntat. Ambitionen var att åstadkomma en onoggrannhet på 5 cm eller mindre. Kalibreringen visade att med 11 st detektorer erhöles ett medelfel på 62 cm. I detta fall kunde endast 40 % av positionerna bestämmas med ett fel mindre än 0,5 m. Med 12 st detektorer var medelfelet 50 cm. I detta fall kunde dock ca 80 % av positionerna bestämmas med ett fel mindre än 0,5 m. Å andra sidan var felet större än 1,5 m i fler positioner än med 11 detektorer. Noggrannheten var alltså i båda fallen avsevärt sämre än vad som förväntats, och metoden kunde endast ge en grov uppskattning av läget för strålkällan.

Vid de varma försöken gav den ursprungliga utvärderingsmodellen delvis orimliga resultat. Under den period som bränslepartiklarna med all sannolikhet befann sig i bränslestupet erhöles positioner som motsvarar en rörelse ganska långt inne på rosten, för att då partiklarna borde ha kommit in på rosten delvis indikera positioner under denna. Modellen gav därför resultat som åtminstone delvis inte är meningsfulla.

En granskning av primärdata från de olika detektorerna separat ger möjlighet till mer rimliga tolkningar av partikelns rörelse, framför allt längs rosten. Relativt samstämmiga uppehållstider i olika zoner av pannan kan då utläsas för de tre partiklarna. Troligen beror de mindre tillfredsställande resultaten i positionsbestämningen därför inte på den experimentella tekniken utan på den matematiska beräkningsmodellen. Efter det att resultaten av positionsförsöken utvärderats och rapporterats från underleverantören har därför ett förslag till alternativ metod för modellering och utvärdering tagits fram.

Denna modell, som mycket kortfattat presenteras i avsnitt 7.3 är mera fysikaliskt förankrad än den ursprungliga och bedöms därför ha större möjligheter att ge noggrannare resultat. Det är därför av klart intresse att utveckla och tillämpa den föreslagna alternativa modellen på de rådata som finns från försöken. Detta kräver dock en ytterligare arbetsinsats utöver det som funnits möjlighet att genomföra inom ramen för detta projekt.

7 Slutsatser

7.1 Temperaturmätning

Försöken med ^{85}Kr -ampuller kan i det stora hela sägas vara misslyckade. Det var inte möjligt att identifiera några pulser från ampuller som brister pga stigande temperatur. Detta beror troligen delvis på att rökgasen inte är homogent blandad vilket är en förutsättning för att försöken skall lyckas. En annan orsak till misslyckandet är troligen att för små mängder av ^{85}Kr användes vid försöken. Den enda ampull där en ^{85}Kr -puls med säkerhet kunde detekteras var för den försöksampull som innehöll 8 gånger mer ^{85}Kr än de senare använda.

Om denna metod skall användas i framtida försök måste ett antal förutsättningar uppfyllas. För det första måste man ha bättre kontroll på hur gasen kan tänkas röra sig från frigivningspunkten till detektorn. För det andra skall gasen tas ut i en punkt där man vet att man har en homogen gasblandning, eller att man tar ut gasen i flera punkter fördelade över tvärsnittet på ett sådant sätt att frigiven ^{85}Kr -gas uppfångas och förs till detektorn. Det är också möjligt att man skall göra en undersökning av hur ^{85}Kr -gasen frigges ur ampullerna.

En slutsats är dock att denna metod, med relativt små förändringar, kan fås att fungera genom att använda en större mängd spårämne och påtvinga blandning av rökgaserna.

7.2 Densitetsbestämning

Med den använda utrustningskonfigurationen kunde endast densiteter på maximalt 270 kg/m^3 bestämmas. De densiteter som mättes upp på nedre delen av rosten var mellan $50\text{--}250 \text{ kg/m}^3$. Detta bedöms som rimliga värden, men har inte kunnat bekräftas genom annan oberoende metod.

Relativt kraftiga tidsvariationer i densiteten indikerades under försöken. Det kan dock inte uteslutas att variationer i bäddhöjd delvis kan ha påverkat resultatet.

Vid eventuellt nya försök är det önskvärt med en större källstyrka..

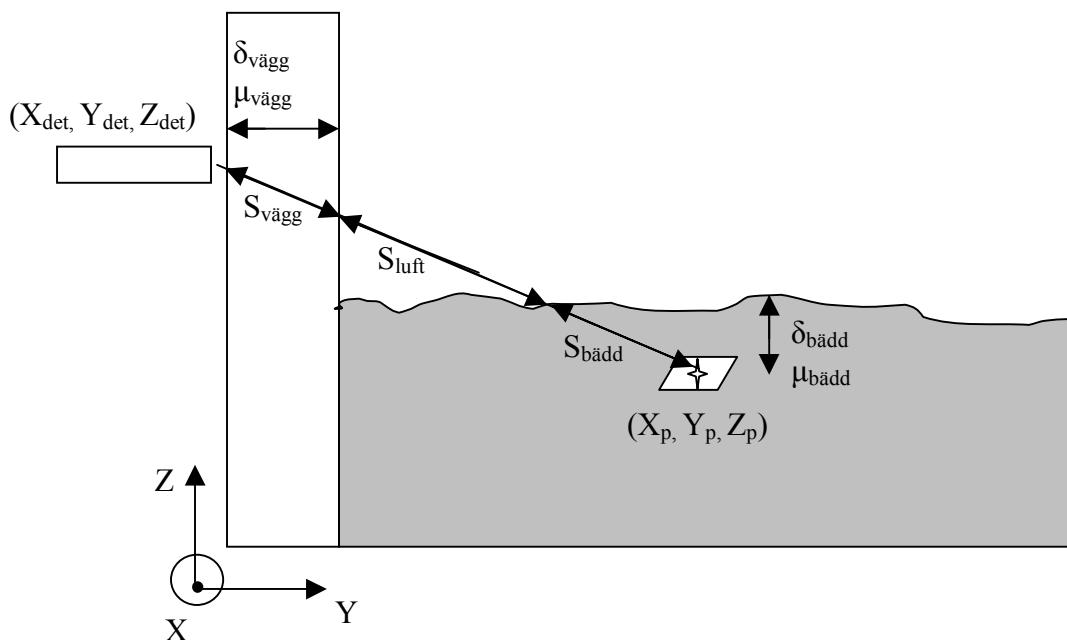
7.3 Positionsbestämning

Försöken med positionsbestämning lyckades med en grov estimering av en partikels position vid de kalla försöken men det gick inte att uppnå den önskvärda noggrannheten i bestämningen.

Vid de varma försöken erhöles resultat som delvis var uppenbart orimliga i fråga om lägesbestämningen. Flera tekniska orsaker har kunnat identifieras; t.ex. att förlusten av en detektor spelar en viss roll och att modellen försummar inverkan av bäddens densitet.

Då rådata från enskilda detektorer analyseras kan rimlig information om bränslepartiklarnas rörelse, framför allt längs rosten, erhållas. Detta indikerar att en alternativ utvärderingsmetod av rådata kan ge betydligt bättre noggrannhet i positionsberäkningarna.

På basis av gjorda erfarenheter ifrågasätts därför den använda utvärderingsmetoden. Ett förslag på alternativ metod har formulerats som bör prövas på de rådata som finns från försöken. Metoden kan i korthet beskrivas på följande sätt:



Figur 32: Alternativ utvärderingsmodell för försöken med positionsbestämning
 Figure 32: Alternative calculation model for the position tracking experiments

Figur 32 illustrerar den radioaktiva strålningens väg från den isotopmärkta partikeln till detektorn.

Ur figuren kan man härleda följande ekvation för responsfunktionen. Man kan konstatera att denna ekvation inte kan approximeras väl med ett 2:a eller 3:e grads uttryck så som föreslagits, i alla fall inte över några större domäner.

$$D_i(x, y, z) = f_i(x, y, z) \cdot \frac{1}{4\pi} \cdot e^{-(\mu_b \cdot S_b + \mu_v \cdot S_v + \mu_l \cdot S_l)} \quad (8)$$

Det föreslagna alternativa utvärderingsmodellen går ut på att använda ekvation (8) och anpassa f_i för varje detektor och att därefter utvärdera positionsdata på nytt. Eftersom

responsfunktionen (3) är härledd ur den aktuella geometrin gäller att korrektionsfaktorn $f_i(x,y,z)$ borde få ett värde nära ett för samtliga detektorer.

8 Litteraturreferenser

- [1] Gustavsson, L., Blom, E., Hald Pedersen, N. H., Moritz, A., Mårdsjö, O., Oskarsson, J. och Petersson, M.: ”Metod för kartläggning av bränslepartiklars rörelse och temperaturhistorik i rosterpannor/avfallsugnar – etapp 1”, Värmeforsk Rapport nr 690, April 2000

Värmeforsk är ett organ för industrisamverkan inom värmeknisk forskning och utveckling. Forskningsprogrammet är tillämpningsinriktat och fokuseras på energi- och processindustriernas behov och problem.

Bakom Värmeforsk står följande huvudmän:

- Elforsk
- Svenska Fjärrvärmeföreningen
- Skogsindustrin
- Övrig industri

VÄRMEFORSK SAMARBETAR MED
STATENS ENERGIMYNDIGHET

VÄRMEFORSK SERVICE AB
101 53 Stockholm
Tel 08-677 25 80
Fax 08-677 25 35
www.varmeforsk.se

Beställning av trycksaker
Fax 08-677 25 35