

ON-LINE ÖVERVAKNINGSTEKNIK FÖR FLUIDISERAD SANDBÄDD I BFB PANNOR

RAPPORT 2015:188



BRÄNSLEBASERAD EL-
OCH VÄRMEPRODUKTION



ON-LINE ÖVERVAKNINGSTEKNIK FÖR FLUIDISERAD SANDBÄDD I BFB PANNOR

**SHAHRIAR BADIEI
VATTENFALL AB**

ISBN 978-91-7673-188-8 | © 2016 ENERGIFORSK

Energiforsk AB | Telefon: 08-677 25 30 | E-post: kontakt@energiforsk.se | www.energiforsk.se

Förord

Denna rapport är slutrapportering av projekt A 37778 On-line övervakningsteknik för fluidiserade bädd i BFB pannor (Energimyndighetens projektnummer P 37778) som faller under teknikområde anläggnings- och förbränningsteknik inom SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion.

Projektet har följts av en referensgrupp bestående av Garnet Becker (Valmet), Peter Frischenfelt (E.ON) och Lauri Honkanen (Amec Foster Wheeler).

SEBRA, samverkansprogrammet för bränslebaserad el- och värmeproduktion, är efterföljaren till Värmeforsks Basprogram och startade som ett samarbetsprogram mellan Värmeforsk och Energimyndigheten 2013. All forskningsverksamhet som bedrevs inom Värmeforsk ingår sedan den 1 januari 2015 i Energiforsk. Därför ges denna rapport ut som en Energiforskrapport.

Programmets övergripande mål är att bidra till långsiktig utveckling av effektiva miljövänliga energisystemlösningar. Syftet är att medverka till framtagning av flexibla bränslebaserade anläggningar som kan anpassas till framtida behov och krav. Programmet är indelat i fyra teknikområden: anläggnings- och förbränningsteknik, processtyrning, material- och kemiteknik samt systemteknik.

Stockholm december 2015

Helena Sellerholm

Områdesansvarig

Bränslebaserad el- och värmeproduktion, Energiforsk AB

Författarens förord

Detta projekt har varit möjligt att genomföra tack vare mycket intresserade och hjälpsamma anläggningspersonalen i Jordbro kraftvärmeverk som har tagit sig tid att ta emot, bistå i genomförande och svara på frågor. Särskilt tack till

Johnny Friman, Anläggningschef, Jordbro kraftvärmeverk, Vattenfall AB

Curt Skoglund, Drift, Jordbro kraftvärmeverk, Vattenfall AB

Mattias Mattson, R&D ingenjör, Vattenfall AB

Tack till medlemmarna i referensgruppen:

Garnet Becker (Valmet)

Peter Frischenfelt (E.ON)

Solvie Herstad Svärd (WSP group)

Juha Tiensuu (Amec Foster Wheeler)

Lauri Honkanen (Amec Foster Wheeler)

för deras insatser i detta projekt.

Här vill jag också tacka Annika Stålenheim, Anna Hinderson och Johan Lagerlund för diskussioner och interngranskning av projektet och slutrapporten.

Sammanfattning

Fluidisering av bäddsand är en central del av förbränningsprocessen i pannor med en bubblande fluidiserad bädd (BFB). En fluidiserad bädd bygger på principen att sandpartiklar sätts i rörelse med hjälp av en luftström som blåses underifrån via luftdysor genom bädden. Detta leder till en kraftig omblandning av det inmatade bränslet. Bädden består därmed i huvudsak av sand, bränslepartiklar, och aska under förbränningen. Om temperaturen sjunker under 800°C ökar utsläppen av bl.a. oförbrända kolväten, om däremot bäddtemperaturen stiger kraftigt kan bädden sintra ihop. Det finns ett behov att veta både bäddhöjden och dess fluidiseringsstatus för att kunna få en jämn förbränning.

En radarbaserad nivåmätningsteknik har utvärderats i detta projekt för att kunna mäta fluidiseringshöjden och fluidiseringsstatusen i BFB-pannor. Syftet var att tidigt kunna upptäcka försämringstendenser i fluidiseringen genom att kontinuerligt mäta fluidiseringshöjden och hur höjden varierar över tiden i vissa specifika områden (zoner). Detta är en nyutveckling för mätning av fluidisering av sandbädden i BFB pannor.

Laboratorieförsök har utförts med två nivåmätare, SITRANS LR560 och Micropilot FMR57. Dessa är två kommersiella sensorer för nivåmätning baserade på mikrovågsradarteknik. Resultaten från laboratorieförsöken visade att ca 0,1 g/cm² sand räckte för att sensorerna skulle kunna visa en pålitlig signal för att kunna följa sandbäddytan. Laboratorieförsöken visade att SITRANS LR560 mät hastighet var ca 1 Hz vilket var långsammare än den för Micropilot FMR5, men dess form och storlek gjorde att SITRANS LR560 valdes för mätningar i fält.

Laboratorieförsöken följdes av fältförsök utförda i panna P7 i Jordbro kraftvärmeverk under perioden 25:e augusti - 25:e oktober 2015. Enda möjliga placeringen av sensorn var nära en av de två bränsleinmatningslinjerna varför bränsleinmatningen störde mätningarna på sandbädden.

Mätresultaten har analyserats och jämförts med processdata för tiden innan fastbränsleinmatningen kommit igång och för de kortare perioder som bränsleinmatningen inte störde mätningarna. Resultaten visade att under dessa perioder kunde rörelserna och höjdnivån av sandbädden mätas. Data från sensorn jämfördes med data från processen så som bäddhöjd (bäddtjocklek), bäddtemperatur och fluidiseringsluftflöden. Processdatan användes som referens och för att få en uppfattning om sandbädden och panndriften.

Den längre testperioden med SITRANS LR560 kunde genomföras utan större modifiering av sensorn men med framtagning av en mätbox. Anpassningsbehovet för att installera sensorn på en befintlig stuts var begränsad till modifiering av flänsen på stutsen.

Trots dessa hinder visades att sensorn SITRANS LR560 baserad på mikrovågsradarteknik hade god potential att kunna tillämpas för övervakning av statusen av fluidiseringen i bubblande bäddar.

Eftersom det saknas erfarenhet av den här nya mättekniken behövs fortsatt undersökning och utveckling av tekniken för att med större säkerhet och noggrannhet

fastställa relationen mellan de uppmätta värdena och de fysikaliska fenomenen som sker vid defluidisering av sandbädden i förbränningsprocessen.

Utförda försök var begränsade till ett litet område av bädden vilket begränsade användningen av tekniken. En välutvecklad teknik baserad på radartekniken bör utvecklas så att den kan täcka hela bädden t ex genom skanning. Möjligheten att mäta på hela sandbädden bör ingå i den fortsatta teknikutvecklingen.

Det finns också behov av utveckling av ett användarvänligt gränssnitt för att informationen skall kunna nyttjas av driftpersonalen.

När det gäller måluppfyllelse:

För att kunna uppfylla effektmålet behövs det försök med längre mätperioder med några fall av defluidisering som efter orsaks-/sambandsanalys kan ge information om olika skeenden. Genom att vid framtida försöken fastställa relationen mellan de uppmätta värdena och de fysikaliska fenomenen som sker vid defluidisering av sandbädden, kan ändringar av bäddens fluidiseringsstatus följas. Det kan möjliggöra prognoser av defluidisering som i sin tur ska kunna leda till minskade oplanerade stopp, exempelvis genom att i ett tidigt skede öka bäddomsättningen.

Projektmålet uppfylldes till stor del då dessa har utförts:

- Laboratorieförsök har utförts med två sensorer och resultaten har karaktäriserat/kvantifierat sensorernas funktionalitet för att kunna mäta på bäddsand.
- Kvantifiering av radarteknikens lämplighet för detektering av fluidiseringsstatusen hos en BFB har utförts genom att utföra tester med två rekommenderade sensorer i VRD:s laboratorium i Älvkarleby och i Jordbro BFB-panna med en av sensorerna efter beslut.
- Fältförsök har utförts i mer än fyra veckor med en av sensorerna med förbehållet att resultatmängden med mätningar av bädden under normal drift var få. Detta på grund av att sensorn var installerad på en position som inte var optimal och fastbränsleinmatingen störde mätningarna.

Manuell justering av fluidiseringsluftflödet till luftdysorna i bädden gjordes inte eftersom pannan var under uppstartfas och gick på lägre last större delen av fältförsöksperioden.

Summary

Fluidization of the sand in a fluidized bed is a central part of the combustion process in bubbling fluidized bed (BFB) boilers. There is a need for operators of BFB boilers to know both the bed height and its fluidization status. Agglomeration and sintering of sand in a fluidized bed lead to defluidization of the bed. This costs Swedish plants annually large amounts of money and is one of the top-priority problems.

Background

Research into alternative bed materials, additives and how new fuels work together with a bed material has been extensive, see references [1-7]. Research and development conducted prior to this work, in order to be able to detect defluidization of the sand bed in the BFB boilers, were focused on investigating sintering processes and mechanisms behind formation of the agglomerates from the sand. In this project the focus is instead on the ability to directly monitor the fluidization status of the sand bed online.

Differential pressure measurement is a common method for measuring the bed height in BFB boilers. The bed height (bed thickness) is defined as the height of the sand at each point in time measured from the tip of the air nozzles in the bottom of the bed. This corresponds to the amount of sand in the bed of the boiler and the measuring signal controls the sand supply to the bed during operation. It has been reported that the technology is perceived as problematic and unreliable. Several plant owners have instead introduced visual methods to assess the amount of sand in the bed [3]. Furthermore, the differential pressure technique measures an averaged value of the bed height across the entire bed and the amount of sand in the bed but not the fluidization status of the bed.

The accumulation of coarse bed material can be indicated by measuring the vertical bed temperature profile in three or more levels above the air nozzles using thermocouples that are placed in a protective tube. This technique is based on the best practices used by Valmet. According to the supplier, one can at an early stage take measures to prevent sintering, for example by increasing sand removal at the bed bottom and sand supplies. Operators' experience has shown that when the temperature values begin to diverge this is an indication that partial defluidization has occurred.

This project evaluated a technique based on microwave radar, which allows measuring of the fluidization height and its fluidization status in BFB boilers. This is a new development for the measurement of fluidization of the sand bed in BFB boilers.

The bed height is a well-accepted definition that describes the sand bed height that depends only on the amount of sand in the bed and not the fluidization state of the sand in the bed. Thus the term fluidization height is introduced in this report. The fluidization height is defined as the height that the sand reaches when fluidized during operation in a boiler as shown in the case C in the illustration in Figure 1. The fluidization height can have the same value as the bed height when the fluidization is stopped completely (the bed is collapsed).

The development in this project provided an opportunity to determine not only the fluidization height, which is the average height that sand particles in a bed can reach,

but also their movement velocity and amplitude from this height. In this case this was done in a defined area or zone of the sand bed.

In this report results of the performed laboratory experiments with two level meter sensor namely SITRANS LR560 and Micro Pilot FMR57 are presented. A short description of these sensors are given in section 3.3 and references [9] and [10] give detailed descriptions of the sensors. These level gauge sensors are based on microwave radar technology and were chosen after a previous feasibility study on the level meter sensors. The study was conducted by Vattenfall Research and Development, where the feasibility of different commercially available level meter sensors was investigated. Collection of data and a comparison analysis of level measurement were carried out for the following techniques :

- Radar
- Guided wave Radar
- Ultrasound
- Capacitance
- Differential pressure
- Hydrostatic pressure
- Radiometry

It was found that the radar technology is not sensitive to the high temperatures or temperature gradients in the boiler and the sensors are easy to handle. No special safety requirements need to be met for the installation or use of sensors with radar technology in the boiler when considering radio wave emissions. These sensors are well known and used in other applications such as the monitoring of levels of materials in fuel or oil tanks and in silos within the energy industry. Based on this assessment the radar technique was found to be the most suitable technique for measuring of the sand bed in a BFB boiler.

Laboratory method and results

The method used allowed quantification of the minimum surface density of a sand surface, whose height could be reliably measured by the sensors. This was done to ensure that the sensors could measure the fluidization height and its movements. The minimum surface density defines the fluidization height as the sand bed is most dense at the bottom and less dense with increasing height of the sand bed.

The method used quantified the increased signal intensity of the signal profile curve for increased surface density of sand on a surface at a known distance from the floor. The signal profile curve is a curve showing the measured intensity by the radar sensor in dB against the distance in meters from the sensor, see Figure 9.

By starting with no sand on the cardboard sheet in Figure 8, the reference signal profile curve was measured. Later the amount of sand on the cardboard surface was increased in steps and the signal intensity curve was measured at each step, Figures 13-18 and 32. This procedure was repeated three times to ensure good statistics. The measured signal intensity curves were analyzed and were compared with the reference curves. The higher the surface density of the sand was, the higher the integrated signal intensity was until saturation was reached, see Figure 19. This was done to find the lowest density at which the intensity was high enough to be distinguished from the "noise level" of the reference. In the experiments care was taken so that changes in the

signal intensity depended only on the known amount of added sand and the smallest surface density was determined.

The results of the experiments in the laboratory revealed that about 0.1 g/cm² of sand was enough for these sensors to show a reliable signal to follow the top surface of the sand bed.

Field measurements and results

The results of the field measurements that were conducted in the boiler P7 in Jordbro CHP plant are reported. These revealed that the sensor SITRANS LR560 under the period between August 25th and October 26th, whenever possible, measured sand-bed movements and its height level. Comparison of sensor data with other relevant data from the process such as bed height, bed temperature and fluidization air flow was also made.

Figure 10 shows images from the position where the sensor is installed on the boiler wall. The sensor is installed on a connection pipe with an inner diameter of 100 mm on the 3rd floor (+ 8.3 m height from the bottom of the boiler, see Figure 3). The pipe was positioned above the chute of the solid-fuel feed line 1 (of the two fuel-lines). The pipe angle to the sand bed surface was estimated to be about 60°, and its angle to the boiler wall to be about 45° (see Figure 11).

When the sensor SITRANS LR560 was installed on the boiler wall, the sensor displayed 6.43 m as the primary value when the boiler was completely empty of sand. This distance value corresponded to the distance from the sensor to the nearest air nozzle(s) in the measurement area. This value was used as the reference distance in equation (3) to enable conversion of the measured distances by the sensor to a height from the air nozzle(s).

Figure 22 shows the period of the process start of refilling the boiler with sand from a truck for the first time after the planned summer outage, and later the primary air was started. The upper diagram in Figure 22 shows the measured and logged analogue distance value (secondary value) as 6.28 m at the time before 09:15 h, that is before the refilling process starts. This was the maximum value that the secondary value could have due to the selected measurement scale and signal processing, which is described in section 3.4.

The upper diagram in Figure 22 shows that the distance measured by the sensor at the time after 09:15 h was reduced to a minimum value 5.7 m at 10:25 h. The reduced distance due to the sand filling from the truck ended at 10:25 h. The process data log of the boiler shows a fast increase of primary airflow from 0 that reached 6 Nm³/s at 10:30 h. At 10:30 h the distance first increased from 5.7 m to over 5.9 m and then stabilized at that level.

The lower graph in Figure 22 shows that the boiler was filled with sand up to about 40 cm in the measurement area and the height values from the sensor showed no rapid variations in bed height before 10:30 h. After 10:30 h when the fluidization air flow started, height value levels decreased and stabilized at about 27 cm. The reduced height may have been caused by the loss of sand that found its way into voids in the bed bottom in other parts of the bed and/or the bed was evened out. The rapid movement and the height variations detected by the sensor between ± 5 and ± 10 cm during the period 11:00 h to 14:00 h were not observed before the start of fluidization air flow.

Thereby the sensor could measure the slow height changes of the sand bed when it was not fluidized and rapid movements of the fluidized sand bed. Fluidization height was adopted as the measured height values of the fluidized sand bed. Then movement and height variations of the bed could be described as an amplitude from fluidization height, in this case between 5 and 10 cm during the period from 11:00 h to 14:00 h in Figure 22.

The plant process data log indicated the bed height to about 4.4 cm from 11:00 h to 14:00 h on the 26th. The low value can be explained by the amount of sand being too small to cover the entire bed area which resulted in the measured differential pressure showing lower values.

The sensor later on measured the height levels and could monitor the entire sand refilling process of the boiler by sand from the silo, Figures 23 and 24. It should be noted that these results, as the boiler was not still in normal operation, are the normal monitoring function for the sensor in similar processes in tank systems and silos.

The sensor was unfortunately installed on the only suitable hole of the boiler, which was positioned 1.2 m above the solid fuel injection chute on fuel-line 1. Thus, when the solid fuel injection to the boiler was started, the fuel passed in front of the sensor and covered the sensor's field of view and hindered measurement of the sand-bed. The sensor could provide data for the sand-bed movements only for the periods when the solid fuel injection was not in operation or on those occasions when the solid fuel injection was stopped on line 1.

Review of the data measured by the sensor after August 30 until the end of the trial period on October 25 showed that there were several short or long periods when the fuel feed to the fuel line 1 were stopped. During these time periods the sensor measured fluidization height and monitored the movements of the bed. Fuel from the fuel line 2 was not in the path of the sensor as the distance was too large (> 2 meters), Figure 11. Thus, the measurement with sensor was not disturbed directly by the fuel line 2.

Figures 29 to 31 are examples of the periods when the boiler was essentially in normal operation and the fluidization height could be measured by the sensor. The graphs in Figures 29 and 31 show fluidization height of about 110 cm. The bed height from process data showed about 40 cm. Thus, it could be estimated that the fluidization "lifted" the bed by 70 cm during the period.

Furthermore, these figures showed that the fluidization made the bed move up and down (fluidization height variation) with a maximum amplitude of about 30 cm. The experience of the operators of the boiler is that the bed surface in normal operation moves between 70 and 100 cm from the air nozzles level.

Concluding remarks

Here it is noteworthy that the fuel, sand and ash forming the bed material have about the same value for the dielectric constant and the bed consists of about 95% sand. This means most of the measured intensity came from the sand particles. It should be considered that it is less likely that the surface density of fuel and ash in the bed would reach the detection limit of about 0.1 g/cm^2 without the sand.

Also, the impact of dust particles on the measurements by the sensor could not be observed. If this was the case it would not be possible to make any distance

measurements, because dust particles are everywhere during normal boiler operation. This means that the introduction of solid fuel to the bed cannot interfere with measurements as long as fuel is not directly passed through the beam path of the sensor.

Finally, it should be noted that the measured fluidization height from the sensor is not equal to the absolute highest level that the sand in the bed reached but instead the highest point in the bed where the sand reached a density of $> 0.1 \text{ mg/cm}^3$. Based on the measurement results, it is estimated that the measured fluidization height is located near the top and is close to the height that the operating personnel usually observe. Exact "measurement depth" can only be obtained if the bed density gradient at the height of the fluidization is known.

The sensor measured movements of the sand in a defined part of the bed in the boiler. Data from the process and from the sensor were collected for the analysis of the fluidization. Data from the sensor were also compared with the process data on the short occasions where there were time slots with a stop in the fuel injection on line 1. This was done for verification of the radar measurement technique.

Manual adjustment of the fluidization air flows to the nozzles in the bed could not be made due to the fact that the boiler during start-up and the part load season gave too little space for such testing.

Apart from these obstacles the project objectives have been met and these new findings show that the technique has a good potential to be applied for monitoring of the fluidization status of the sand-bed although some more development remains.

Future works

Further investigations and developments are needed for the technology to be able to determine with greater accuracy the relationship between the measured values and the physical phenomena that occur in the combustion process at defluidization of the sand-bed. Current tests were limited to a small area of the bed, which limits the use of technology as it is now. A well-developed technology based on radar technology should be developed so that it can cover the entire bed, for example, by scanning. The ability to measure the entire sand bed should be included in the further development of the technology. There is also a need for the development of a user-friendly interface so that the information could be used by the operating personnel in the power plants.

Innehåll

1	Inledning	15
1.1	Bakgrund	15
1.2	Beskrivning av forskningsområdet	15
1.3	Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet	17
1.4	Mål och målgrupp	18
1.5	Kort om Fluidiseringsteori	19
2	Anläggning	21
3	Mätutrustning och signalhantering	23
3.1	Sensorer för nivåmätning	23
3.2	Val av sensorer	24
3.3	Sensorer	25
3.4	Signalhantering	27
4	Genomförande	30
4.1	Laboratorieförsökupställning	30
4.1.1	Kalibrering av primärvärden	31
4.1.2	Metodbeskrivning	31
4.1.3	Mätprocedur vid laboratorieförsöken	33
4.1.4	Analysmetod för signalprofilkurvor	33
4.2	Fältförsök	34
5	Resultatredovisning	38
5.1	Resultat från laboratorieförsöken	38
5.2	Resultat från fältförsöken	43
6	Resultatanalys	58
6.1	Resultatanalys av laboratorieförsöken	58
6.2	Resultatanalys av fältförsöken	59
7	Slutsatser	62
8	Rekommendationer	64
9	Förslag till fortsatt forskningsarbete	65
10	Litteraturreferenser	66

BILAGOR:

A Laboratoriemätning

B Resultat från fältförsök

1 Inledning

1.1 BAKGRUND

Fluidisering av bäddsand är en central del av förbränningsprocessen i pannor med en bubblande fluidiserad bädd (BFB) [1, 2]. En fluidiserad bädd bygger på principen att sandpartiklar sätts i rörelse med hjälp av luft eller luft och rökgasblandning som blåses underifrån via luftdysor genom bädden. Detta leder till en kraftig omrörning av det inmatade bränslet till bädden. Bädden består därmed i huvudsak av sand, bränslepartiklar, och aska under förbränningen. En fluidiserad bädd lämpar sig väl för förbränning av fasta bränslen tack vare den stora värmekapaciteten i bäddmaterialet. Information om bäddhöjden och bäddens fluidiseringsstatus kan vara ett hjälpmedel för att få en jämn förbränning och kontroll över bäddtemperaturen.

Bäddsintring i fluidbäddpannor är ett problem som kan leda till defluidisering som i sin tur leder till andra stora omkostnader i form av utebliven produktion och efterföljande insatsarbete [1]. Bäddsintringar och bäddagglomerering kostar årligen svenska anläggningar stora summor pengar och är ett av de högst prioriterade problemen. Forskning kring alternativa bäddmaterial, tillsatser och hur nya bränslen fungerar tillsammans med etablerade bäddmaterial har varit intensiv [1-7].

Bäddtemperaturen i en BFB panna bör regleras så att den hålls mellan 800 och 900°C. Om temperaturen sjunker under 800°C ökar utsläppen av bl.a. oförbrända kolväten, om däremot bäddtemperaturen stiger kraftigt kan bädden sintra. Även lokal sintring och bildandet av agglomerat i bädden kan påverka förbränningsluftens genomströmning. En ojämn fördelning av luften kan ge oönskad temperaturhöjning som i sin tur kan påskynda sintring av bädden [1]. Vidare kan den ojämna luftströmningen öka bildning och utsläpp av NO_x och CO vilket påverkar emissionskostnaderna [2] och risken att överstiga emissionskraven.

Förbrukningen av bäddmaterial i biobränsleeldade fluidbäddpannor är i många fall hög. Omsättningshastigheten kan i vissa fall vara så hög så att hela bädden omsätts på två dygn. Omsättning är att ta ut bädd för siktnings där finandelen förs tillbaka till pannan och grövre bitar tas bort. Den höga omsättningen motiveras med en minskad risk för både bäddagglomerering och defluidisering. Nackdelen är ökad kostnad för bäddmaterial samt en högre deponeringskostnad och att detta på längre sikt troligen blir miljömässigt oacceptabelt [2].

Forskning och utveckling som har utförts tidigare i syfte att kunna upptäcka defluidisering av sandbädden i BFB pannor har fokuserat på att undersöka sintringsförloppen och mekanismerna bakom agglomeratbildning. I detta projekt fokuseras det i stället på möjligheten att direkt övervaka sandbäddens fluidiseringsstatus on-line.

1.2 BESKRIVNING AV FORSKNINGSMÅLET

Förutom det som nämndes i avsnitt 1.1 finns det vissa andra etablerade tekniker som bör nämnas i detta sammanhang. Tryckdifferensmätning är en vanlig metod för att mäta bäddhöjden i BFB-pannor. Bäddhöjden (bäddtjocklek) är definierad som höjden av sandbädden räknat från luftdysornas topp vid varje tidpunkt. Detta motsvarar mängden sand i bädden i pannan och mätsignalen styr sandtillförseln till bädden under drift. Det har dock rapporterats att tekniken upplevs som problematisk och

otillförlitlig [3]. Vidare ger tryckdifferensmätning ett genomsnittligt värde för bäddhöjden över hela bädden. Flera anläggningsägare har istället infört visuella metoder för att bedöma mängden sand i bädden.

Ackumulering av grovt bäddmaterial kan indikeras genom mätning av vertikal bäddtemperaturprofil i tre eller flera nivåer ovan primärluftdysor med hjälp av termoelement som är placerade i skyddsrör. Denna teknik som är baserad på beprövade erfarenheter används av Valmet och enligt dem kan man på ett tidigt stadium vidta åtgärder för att förhindra sintring, exempelvis genom att öka bottenutmatning och sandtillförsel. I Jordbro P7 finns det 8 temperaturgivare i bädden för det ändamålet. Operatörers erfarenhet är att när temperaturvärdena börjar divergera är detta en indikation på att partiell defluidisering förekommer.

Inom Värmeforsk har det rapporterats om teknikutvecklingsprojekt som hade som mål att ge diagnoser om sintring med en kombination av visuell detektering, trycksensorsystem och ljudsignalanalys [8]. En kamerauppställning utvecklades som tog bilder av fallande sand i bäddsandhanteringssystemet i en fluidbäddspanna. Resultaten visade att bildanalys hade kapacitet att återge en snarlik partikelstorleksfördelning som den för skaksiktanalys. Resultaten visade även att bildanalys av bäddsand hade potential att följa en relativ förändring i partikelstorleksfördelningen. En diskrepans i absolut återgivning var dock att förvänta mellan bildanalys och skaksiktanalys.

Inledande förstudie – val av mätteknik

Det finns idag flera typer av sensorer för nivåmätning på marknaden som kan användas online och detektera nivåändringar med noggrannhet på någon centimeter från avstånd på tiotals meter. Nivåmätarna används i industriella processer och är utvecklade för att kunna fungera stabilt i extrema miljöer. Dessa industriella nivåmätare används för övervakning av exempelvis vätskor, partiklar och pulver i tankar, cisterner eller silos. Dock har få försök tidigare gjorts med att använda dessa nivåmätare i fluidbäddpannor.

Nedan sammanfattas en förstudie som tidigare genomförts av Vattenfall Research and Development, där lämpligheten av olika kommersiellt tillgängliga nivåmätare har undersökts. Insamling av data och en jämförelseanalys av följande tekniker för nivåmätning genomfördes:

- Radar
- Vågledarradar (Guided wave radar)
- Ultraljud
- Kapacitans
- Differentialtryck
- Hydrostatiskt tryck
- Radiometri

Vid installation i en panna utsätts sensormaterialen för temperaturer som kan överstiga 800 °C i eldstaden varför beröringsfria tekniker är att föredra. Av de ovan nämnda teknikerna innefattar detta radar, ultraljud, differentialtryck och radiometri.

Den radiometrisk tekniken är svårhanterlig då den innehåller radioaktivmaterial vilket gör att det finns många restriktioner och säkerhetskrav som medföljer vid installation i en panna. Det föreligger även en ökad kostnad för service och för

hantering efter avslutad livstid. På grund av dessa hinder har därför inte denna teknik valts.

Differentialtryckstekniken används redan, men är inte tillräckligt snabb för att kunna följa de snabba förloppen, med tidsupplösning i sekunder, i sandbädden.

Ultraljudstekniken är känslig för temperaturgradienter då ljudhastigheten ändras vid ändrad temperatur i gaser. Ändrad temperatur leder till att ljudpulsens hastighet ändras och detta leder till fel i avståndsmätningen med ultraljudsensorn.

Radartekniken är inte känslig för de höga temperaturerna/temperaturgradienterna i pannan och sensorerna är lätthanterliga. Inga speciella säkerhetskrav behöver uppfyllas för installation eller användning i pannan med avsikt på radiostrålning. Dessa sensorer är väl kända och användas i andra applikationer så som övervakning av nivåer av material såsom bränsle eller olja i cisterner, tankar och i silos inom energibranschen.

Utifrån detta gjordes bedömningen att radartekniken var den bäst lämpade tekniken för mätning av bäddhöjd i en BFB-panna.

Det finns flera kommersiellt tillgängliga sensorer som är baserade på radarteknik. För att kunna välja ut de sensorer som har bäst potential att lyckas för applikationen i en BFB-panna upprättades följande lista på applikationskriterier för sensorerna:

- Sensorn ska kunna mäta vid hög processtemperatur ($> 800\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Sensorn ska kunna arbeta i hög omgivningstemperatur ($> 60\text{ }^{\circ}\text{C}$).
- Sensorn ska ha potential att mäta höjden av sandbädden kontinuerligt on-line.
- Noggrannheten bör vara bättre än 10 cm för mätning av bäddnivån.
- Sensorn bör kunna mäta på ett avstånd större än 20 m och kunna mäta ett område på ytan (zon) av sandbädden som är mindre än 1 meter i diameter.
- Sensorn bör ha signaluppdateringshastighet bättre än 1 Hz.
- Installationen ska vara enkel och helst kunna använda de befintliga hålen i pannan.
- Signalen från sensorerna ska kunna integreras i nätverket för signalsystemen i pannan.

Två sensorer baserade på mikrovågsradar teknik - Micropilot FMR57 från Endress+Hauser och SITRANS LR560 från Siemens - kunde bäst uppfylla applikationskriterierna och valdes därför till att användas vid de fortsatta testerna inom detta projekt.

1.3 FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET

Idén med föreliggande projekt är att möjliggöra kontinuerlig mätning och kvantifiering av fluidiseringshöjden, det vill säga höjden av sandbäddens översta yta vid fluidiseringen. Därmed kan fluidiseringsstatusen bestämmas genom att rörelserna i den fluidiserade sandbädden kvantifieras och övervakas.

Huvuddelen av den forskning och utveckling som tidigare har utförts i syfte att kunna upptäcka defluidisering av sandbädden i BFB pannor har fokuserats på att undersöka sintringsförloppen och mekanismerna bakom agglomeratbildning [1-8]. Utvecklingen i detta projekt ger i stället möjlighet att direkt kunna bestämma sandbäddens fluidiseringsstatus on-line. Övervakningen av fluidiseringsstatusen kan i framtiden eventuellt vidareutvecklas för att möjliggöra diagnostisering av bäddsintring i BFB-pannor.

I detta projekt har den radarbaserade nivåmätningsteknikens lämplighet för detektering av fluidiseringsstatus hos en bubblande fluidiserad sandbädd utretts. Tester har genomförts med två rekommenderade sensorer i laboratoriemiljö i Älvkarleby. Därefter har en längre mätning genomförts med en av sensorerna i BFB pannan vid Jordbro kraftvärmeverk. Ändringar i fluidiseringen har följts för att verifiera mättekniken. Data från processen (driftdata) och från nivåmätningssensorn har samlats in för jämförelseanalys.

Användning av radarnivåmätare för övervakning av fluidiseringen on-line är en tillämpning som inte har testats tidigare. En förhoppning är att sandbäddens fluidiseringsstatus och hur fluidiseringshöjden varierar över tiden i vissa specifika områden (zoner) ska ge förbättrade möjligheter att tidigt upptäcka tendenser till defluidisering som kan ha orsakats av agglomerering och sintring av sanden i bädden.

1.4 MÅL OCH MÅLGRUPP

Effektmål

Ökad tillgänglighet och minskad risk för oplanerade driftstopp för anläggningar med BFB-pannor genom att möjliggöra tidiga åtgärder mot fenomen såsom agglomerering och sintring. Detta kan bidra till minskat behov av fossileldad reservkraft.

Projektmål

De övergripande projektmålen är att utveckla och tillämpa nivåmätningsteknik för on-line detektering av fluidiseringsstatusen hos bubblande fluidiserade bäddar.

Detta ska åstadkommas genom att:

- Hitta de praktiska begränsningarna för nivåmätare med radarteknik och identifiera parametrar för ytterligare modifiering samt parametrar som visar lämplig positionering i en panna.
- Kvantifiera radarteknikens lämplighet för detektering av fluidiseringsstatusen hos en bubblande fluidiserad bädd genom att utföra tester med två rekommenderade sensorer i VRD:s laboratorium i Älvkarleby och i Jordbro BFB-panna.
- Utföra och utvärdera mätning av en av dessa två sensorer under 4 veckors tid.

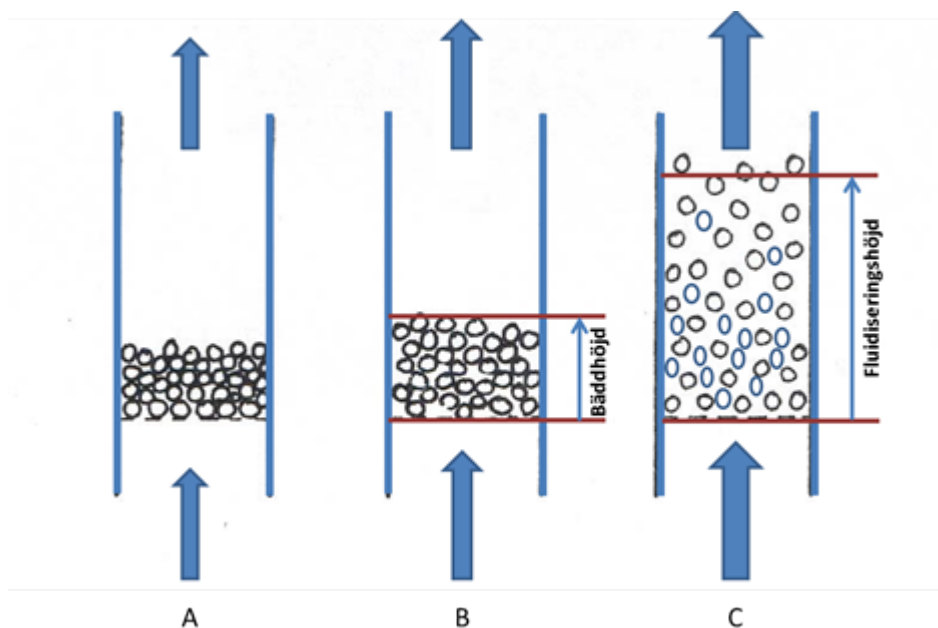
Resultatet kan bli generellt tillämpbart för alla BFB-pannor, både i värme- och kraftvärmeverk och inom massa- och pappersindustrin. En fungerande teknik för on-line övervakning av fluidiseringens status kan minska underhållskostnaderna avsevärt genom tidigare diagnos av defluidisering av bädden. Det kommer dock att behövas fortsatt utveckling för en fullt funktionell och bekymmersfri mätteknik.

Rapporten vänder sig till de som är intresserade av teknikutveckling för BFB-pannor, anläggningsägare samt radarsensortillverkare som är intresserade av nya tillämpningar av sensorprodukter.

1.5 KORT OM FLUIDISERINGSTEORI

Figur 1 illustrerar flödesprofiler som kan uppkomma då en gas (t ex luft) strömmar uppåt genom en bädd av fasta partiklar t ex sandpartiklar. När gashastigheten är tillräckligt låg och gasen kan strömma emellan, kommer sandkornen att ligga stilla i bädden (fallet A i figur 1). Ökad gashastighet leder till ökad tryckdifferens (tryckfall) över bädden på grund av ökad viskös friktion med sandkornen. Då tryckfallet över bädden slutligen motsvarar vikten av sandbädden börjar den fluidisera (fallet B i figur 1). Gashastigheten vid punkten för den begynnande fluidiseringen kallas minsta fluidiseringshastighet som kan teoretisk räknas fram med Ergun's ekvation [2]. Ekvationen visar hur partikelstorlek, form och densitet av sand har betydelse för vilken gashastighet som krävs för fluidisering av bädden. Ökas gashastigheten ytterligare kommer partiklarna i bädden att vara fritt suspenderade i gasströmmen och bädden sägs vara fluidiserad (fallet C i figur 1).

I praktiken, vid normal drift i fluidbäddpannor kan gashastigheten vara flera gånger större än den minsta fluidiseringshastigheten. Vid driften av fluidbäddpannor har man tillgång till luftflödet till sandbädden i Nm³/s. Med hjälp av bäddens tvärsnittsarea, temperatur och tryckdifferensen över bädden kan primärluftflödet räknas om till en gashastighet i m/s enligt ekvation (1) nedan.



Figur 1. Illustration av A fast bädd, B maximalt expanderad bädd, C fluidiserad bädd. Sandbäddens bäddhöjd och fluidiseringshöjd är indikerade i bilden (se texten för mer detaljer).

Figure 1. Illustration of a) fixed bed, b) maximal expansion of the bed, c) fluidized bed. The Bed height and fluidization height are indicated here (see the text for details).

$$\text{Fluidiseringshastigheten} \left[\frac{\text{m}}{\text{s}} \right] = \frac{\text{primärluftsflödet} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{s}} \right]}{\text{tvärsnittsarean} [\text{m}^2]} \times \left(\frac{273 + \text{bäddtemperatur} [\text{C}]}{273} \times \frac{101,3}{\text{tryckfallet} [\text{kPa}] + 101,3} \right) \quad (1)$$

I figur 1 är bäddhöjden och fluidiseringshöjden indikerade i illustrationen. Bäddhöjden är en väl vedertagen definition som beskriver sandbäddens höjd som beror av mängden sand i bädden och inte dess tillstånd när det gäller fluidisering. Därmed införs termen fluidiseringshöjden i denna rapport. Fluidiseringshöjden definieras som den höjd sanden når vid fluidiseringen under drift i en panna så som visas i fallet C i illustrationen i figur 1. Termen fluidiseringshöjden infördes för att kunna beskriva den fluidiserade sandbädden och dess status. Fluidiseringshöjden kan bli samma värde som bäddhöjden när fluidiseringen avstannat helt (bädden kollapsat).

Den radarbaserade nivåmätningstekniken som tillämpades i detta projekt mätte fluidiseringshöjden. Fluidiseringshöjden i detta arbete har beskrivits med en medelhöjd (tidsmedelvärde) och de snabba höjdvariationer i tid runt medelhöjden (amplituden).

2 Anläggning

Jordbro kraftvärmeverk producerar huvuddelen av värme för fjärrvärmenätet i Haninge, 20 km söder om Stockholm. Haninges fjärrvärmenät är sammankopplat med Bollmora som är en bio- och oljeeldad värmeanläggning i Tyresö.



Figur 2. Jordbro Kraftvärmeverk i Haninge.

Figure 2. Jordbro CHP plant in Haninge.

Anläggningen har två fastbränsleeldade pannor, P34 och P7. Pannan P34 togs i drift 1995 och är en pulverpanna som eldas med träflis, briketter och träpellets. Pannan P7 togs i drift 2010 och är en BFB-panna som eldas huvudsakligen med returträ. Inom anläggningen finns det även två biooljeeldade pannor. Tabell 1 visar fakta om P7.

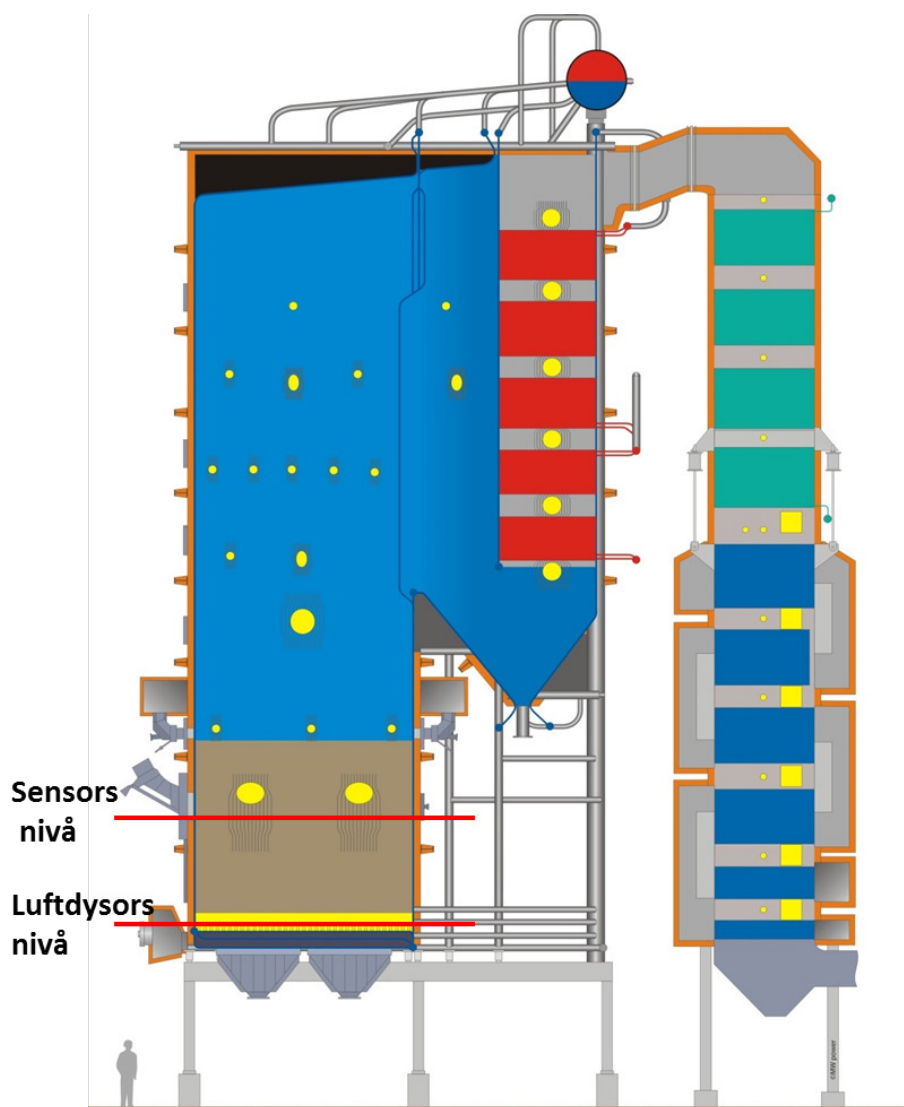
Tabell 1. Fakta om Pannan P7 i Jordbro kraftvärmeverk.

Table 1. Data on boiler P7 in Jordbro CHP plant.

Panna	Typ	Bränsle	Effekt totalt MW	Effekt värme MW	Effekt el MW
P7	BFB	returträ	63	43	20

Figur 3 visar en skiss av pannan P7 i kraftvärmeverket i Jordbro där den nedre röda linjen indikerar nivån för luftdysorna i pannbotten och den övre röda linjen indikerar nivån för positionen av nivåmätningssensorn för mätning av fluidiseringshöjden.

Det finns i pannan normalt 50-60 ton Baskarpsand B95 med medelkornstorklek 0,95 mm. Bäddtjockleken (bäddhöjden) är normalt ca 45 cm. Pannan har en bäddarea på 42 m². Vid normal drift är fluidiseringsgashastigheten 1.2 m/s vid medelbäddtemperaturen



Figur 3. En skiss av BFB pannan P7 i Jordbro. Nivåerna av Luftdysorna och nivåmätningssensorn är indikerade med röda linjerna i bilden.

Figure 3. A schematic image of the BFB boiler P7 in Jordbro. The levels of air nozzles and the level sensor are indicated by the red lines in the image.

840 °C och differenstrycket 5 kPa(g) efter luftdysorna i bädden. Primärluft- och rökgasrecirkulationsflöden utgör tillsammans fluidiseringsluftflödet vilket normalt är ca 12,5 Nm³/s.

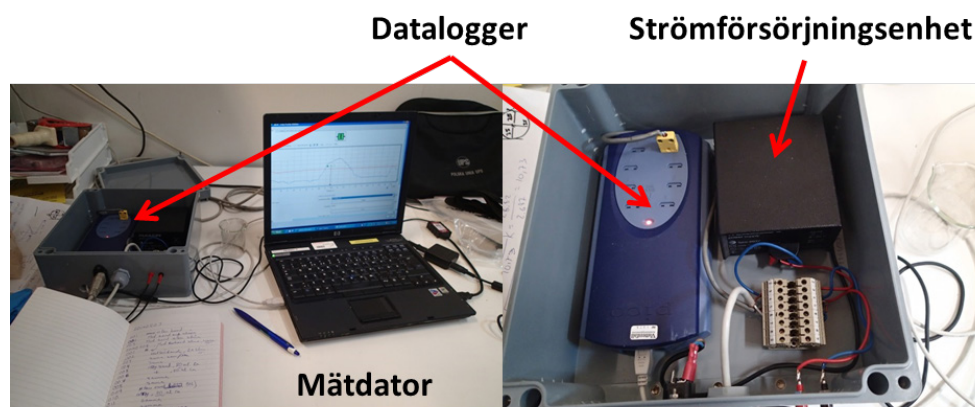
Bäddtemperaturen mäts med flera temperaturgivare. Vid 700-900°C i bädden är temperaturen tillräckligt hög för att bränslet ska brinna snabbt och att askan från bränslet och sanden inte ska sintra i bädden. Temperaturmätningen görs på tre nivåer i bädden och när dessa visar på låg temperaturspridning indikerar detta att fluidiseringen är god och att omblandningen fungerar bra. Under normal drift är fluidiseringshöjden mellan 70 och 100 cm enligt driftpersonalen.

3 Mätutrustning och signalhantering

Mätutrustningen som användes för mätningarna i projektet bestod av en nivåmätningssensor, en mätbox, en mät dator och ett 3G-modem. Bilden till höger i figur 4 visar mätboxen. Mätboxen innehöll en strömförsörjningsenhet för sensorn, en datalogger som mätte och loggade sekundärvärden och en anordning som möjliggjorde inkoppling av ett HART modem.

Med hjälp av mätboxen sändes sensorns digitala värden (primärvärden) via ett HART-modem till mät datorn och samtidigt sändes den analoga 4-20 mA signalen (sekundärvärden) från sensorn via en datalogger till mät datorn. Mätboxen gjorde att man kunde logga och spara sekundärvärden under fältförsöken samtidigt som primärvärden kunde sparas manuellt vid lämpliga tidpunkter. På det viset kunde primärvärden och sekundärvärden jämföras med varandra.

Mät datorn var kopplad till 3G-modemet, vilket möjliggjorde fjärravläsning och kontroll av mät datorn.



Figur 4. Bilder på mät datorn och mätboxen innehållande en datalogger och strömförsörjningsenhet.

Figure 4. Images of the measurement laptop and the measurement box that contains a data logger and the power supplier unit.

3.1 SENSORER FÖR NIVÅMÄTNING

Nivåmätning med radarsensor är baserad på "time-of-flight"-metoden av mikrovågpulser. Radarsensorns mikrovågpulser utsänds av en antenn som i det här fallet har parabolisk form. Starttiden för varje puls registreras. Efter tiden $t/2$ reflekteras mikrovågpulsen från objektet och en del av den reflekterade pulsen (ekot) tas emot av radarsystemet. Tiden t mäts då för pulsens färd med nära ljusets hastighet c till och från objektet. Avståndet D till objektet är då proportionellt mot flygtiden t av mikrovågpulserna som visas i ekvation (2).

$$D = c \cdot t/2 \quad (2)$$

Radarsensorn mäter avståndet från en referenspunkt, t ex processanslutningen, till det objekt varifrån mikrovågpulserna reflekteras. En mikroprocessor utvärderar signalen

och identifierar den ekonivå som orsakas av reflektionen av radarpulserna vid objektet. Ekons intensitet (i dB) är proportionell mot $1/D^2$ och dielektriska konstanten som är bland annat beroende av objektets material och form. Tabell 2 visar en lista övre dielektriska konstanten för i det här fallet relevanta ämnen. Tabellen visar att värden för dielektriska konstanten för sand, trä och kol är snarlika.

Tabell 2. Dielektrisk konstanten DK (ϵ_r) för vissa material.

Table 2. The dielectric constant DK (ϵ_r) of some material.

Material	DK (ϵ_r)
Luft	1
Torr sand	3–5
Torr kol	3,5
Torr trä	2-4

3.2 VAL AV SENSORER

Det finns många leverantörer på marknaden av radarbaserade sensorer. För detta projekt valdes två sensorer från två inom branschen välkända företag som kunde leverera sensorer med en funktionalitet så nära de framtagna applikationskriterierna som möjligt. SITRANS LR560 från Siemens och Micropilot FMR57 från Endress + Hauser valdes. I tabell 3 jämförs de framtagna applikationskriterierna med de två valda nivåsensorernas funktionalitet.

Tabell 3. Jämförelse av framtagna applikationskriterier och funktionaliteten hos de två valda nivåmätningssensorerna.

Table 3. Comparison of the provided application criteria and the functionality of the two candidate level measurement sensors.

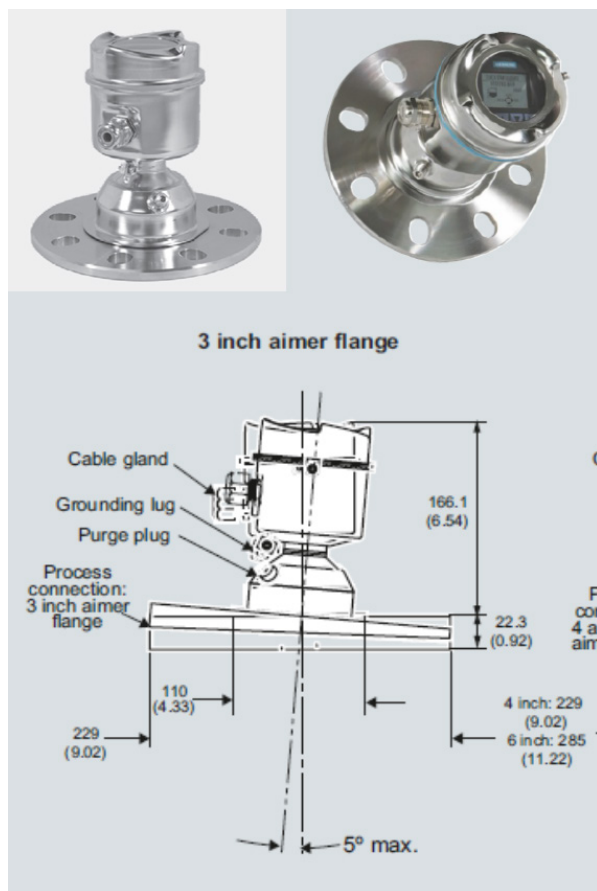
Applikations kriterier	SITRANS LR560	Micropilot FMR57
Fungerar i heta miljöer	+80 °C, (kan modifieras), 200 °C (process)	+80 °C, 200 °C eller 400 °C med grafittätning (process)
On-line, kontinuerlig	Ja	Ja
10 cm noggrannhet i nivåmätning	2,5 cm eller 0,25% av skalan	0,7 cm + 0,02%
> 20 m längsta mätning avstånd	< 40 m (or < 100 m)	< 70 m
< 1 m mätzon	När avståndet är < 15 m med parabolantenn	När avståndet är < 15 m med parabolantenn
> 1 Hz signal uppdaterings-hastighet	0,1 Hz	> 2,2 Hz
Enkelhet av installation/Anpassning till befintliga hål/stutsar	God / Troligen ja	God / Troligen nej
Signalen kan integreras med PLC:en	Ja (kommunikation, Analog 4-20 mA, Digital HART, Profi bus, Foundation Field bus)	Ja (kommunikation, Analog 4-20 mA, Digital HART, Profi bus, Foundation Field bus)

3.3 SENSORER

SITRANS LR560

Figur 5 visar bilder på sensorn SITRANS LR560 från Siemens. Denna sensor har följande egenskaper: (se referens [9] för mer detaljerade beskrivning)

- Sensorn har en inbyggd display som kan visa det aktuella mätvärdet för avstånd (primärvärdet), temperatur, och status.
- Sensorn ger 4-20 mA analog signal (sekundärvärdet) som kan kalibreras för olika distanser/nivåer från 0,8 m upp till 100 m.
- Inställningar såsom kalibrering och signalhantering hanteras via HART kommunikation och med mjukvaran Simatic PDM.
- Efter inställning av parametrar och kalibrering av sensorn via HART kommunikation kan signalprofilen, distans/nivå (både primärvärdet och analogvärdet) och enhetens temperatur visas och sparas i en dator.
- Sensorn kan installeras i processer med temperaturer upp till 200 °C.
- Minimum stutsdiameter ska vara 80 mm och då maximum stutslängd är 1 m. Detta för att minimera signalstörningar på grund av reflektioner från rörväggen när sensorn kopplas via ett stutsrör till processen.
- Den har "aimer flangs" som möjliggör upp till 5° rörelsefrihet runt strålgångens huvudaxel. .
- Det finns en spolluftpip som tar in tryckluft som används för kylning och renhållning av framsidan av antennen. Med hjälp av spolluft kan processtemperaturen vara högre än 200 °C.
- Radarns mikrovågor är 78 GHz och strålen (i form av en kon) har 4 graders spridningsvinkel (FWHM).



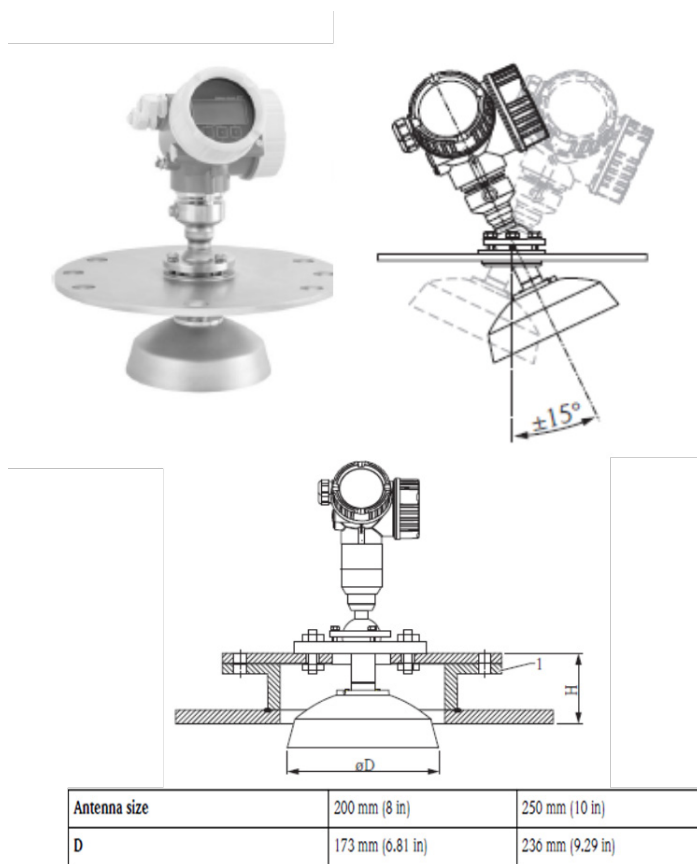
Figur 5. Nivåmätningssensorn SITRANS LR560 från Siemens.

Figure 5. Level measurement sensor SITRANS LR560 from Siemens.

Micropilot FMR57

Figur 6 visar bilder på sensorn från Endress + Hauser med följande egenskaper (se referens 10 för mer detaljerad beskrivning)

- Sensorn har en inbyggd display som kan visa det aktuella avståndsvärdet (primärvärdet), temperatur, och status.
- Sensorn ger 4-20 mA analog signal som kan kalibreras för olika distanser/nivåer upp till 70 m.
- Inställningar för kalibrering och signalhantering hanteras via HART kommunikation.
- Efter inställning av sensorn via HART kommunikation kan signalprofilen, distans/nivå erhållas via dator.
- Sensorn kan kopplas via flänsen till processer med temperatur upp till 200 °C (400 °C med grafittätning).
- Den kan kopplas med en "alignment device" till processen som möjliggör upp till 15° rörlighet.
- Det finns en spolluftnippel som kyler och håller insidan av antennen ren. Med hjälp av spolluft kan processtemperaturen vara högre än 200 °C
- Radarns mikrovågor (26 GHz) har en ca 4° spridningsvinkel (FWHM) med 240 mm i diameter parabolisk antenn.



Figur 6. Nivåmätare sensorn Micropilot FMR57 från Endress + Hauser.

Figure 6. Level measurement sensor Micropilot FMR57 from Endress + Hauser.

3.4 SIGNALHANTERING

För att kunna hantera sensorvärden från signalutgången behövs det mjukvara. Denna mjukvara möjliggör informationsinhämtning, ändring av inställningar, kalibrering och kontroll av sensorn. De båda sensorerna hade egna specialiserade mjukvaror. Följande mjukvaror användes

- Simatic PDM (stand alone, version V5.5) användes för SITRANS LR560 från Siemens.
- Fieldcare (version 2.09) användes för Micropilot FMR57 från Endress + Hauser.

Kalibrering av sensorerna kontrollerades vid genomgång av mjukvarornas basfunktioner och sedan vid laborieförsöken. Båda mjukvarorna kunde användas för begränsade ändringar i inställningarna för medelvärdesbildning och signaluppdateringshastighet.

En signalprofilkurva är en kurva som visar radarsensorns signalintensitet i dB mot avståndet i meter från sensorn. De signalprofilkurvor som erhöles med hjälp av sensorernas mjukvaror användes i laborieförsöken för kvantifiering av den lägsta yttäthet av sand som behövdes för att få tillräckligt bra signal.

Basfunktionerna i mjukvarorna saknade däremot automatiska sparfunktioner av mätfiler eller automatiska dataloggningsfunktioner vilket behövs vid långtidsmätningar i fält. Därför var det nödvändigt att inför fältmätningarna ta fram

den tidigare beskrivna mätboxen för loggning av de analoga värdena (sekundärvärdena). Vid fältmätningarna användes mätboxen för mätning och loggning av de analoga värdena. Parallellt med detta hämtades vid vissa tillfällen manuella digitala avståndsvärden (primärvärden) från sensorn för att kunna kontrollera mätkvaliteten av de analoga värdena

Relationen mellan digital- och analogvärden från sensorn SITRANS LR560 är viktig eftersom båda värdena användes i försöken. SITRANS LR560 ger ut ett primärt avståndsvärde (Primary Value, primärvärde) som är ett digitalvärde och kan avläsas på en display på sensorn eller läsas till en dator via ett HART-modem. Primärvärdet kan kalibreras med signalbehandlingsverktygen i mjukvaran.

Det analoga värdet från sensorn är sekundärvärdet som är mellan 4-20 mA. Sekundärvärdet är en översättning av primärvärdet och en mappning mot en avståndsskala vilken går att välja fritt i intervallet 1-100 m för vald sensor.

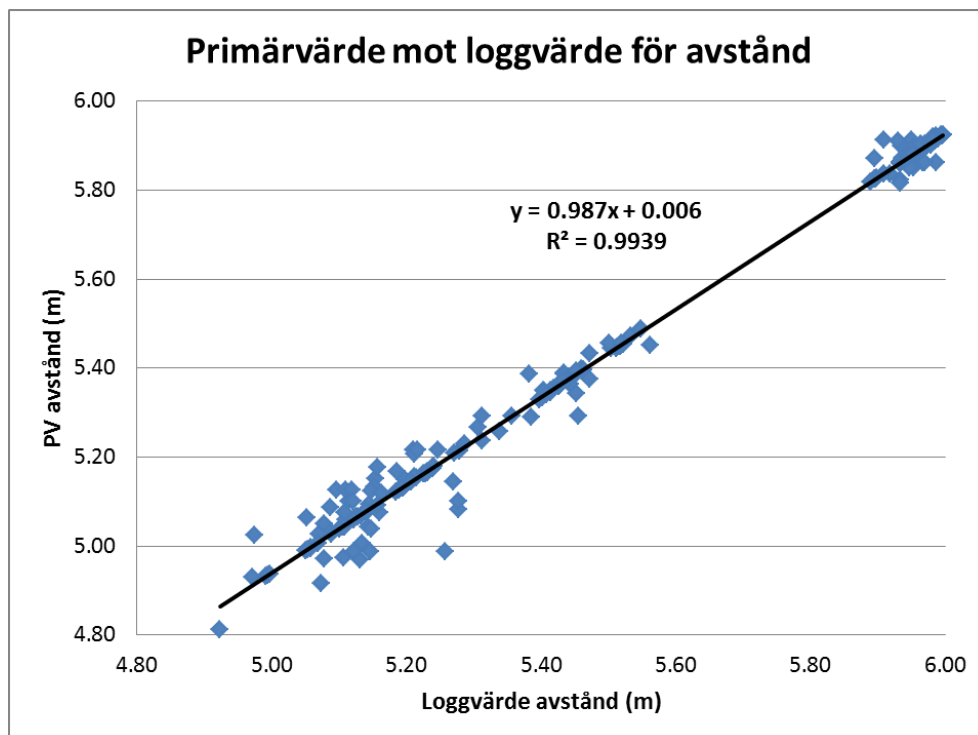
Tre viktiga slutstaser:

1. Primärvärdet, som är ett digitalvärde från en kalibrerad sensor, visar det rätta avståndet oberoende av vald avståndsskala och sekundärvärdet.
2. Sekundärvärdet återges korrekt så länge det uppmätta avståndet ligger inom den inlagda avståndsskalan och då sekundärvärdet mäts analogt inom området 4 - 20 mA.
3. Sekundärvärdet kan konverteras/omvandlas till avstånd genom en linjärekvation. Linjärekvationen tas fram genom att ställa primärvärdena/avstånden mot sekundärvärdena.

Figur 7 visar primärvärden uppmätta med sensorn mot de motsvarande loggade analogvärdena som avstånd från mätboxen. I figur 7 har en trendlinje angivits för datapunkterna i grafen plus linjens ekvation och R-värdet. Dessa värden visar att felet i avståndsmätningen för mätområdet ligger några cm när.

Differensanalysen av data i figur 7 visade att det fanns en genomsnittlig differens på -7 ± 3 cm mellan primärvärdet och det loggade analogvärdet. Därför togs det vid redovisning av resultaten i avsnitt 5.2, hänsyn till felet vid omvandlingen av det loggade analogvärdet för avstånd till värdet av höjden från sensorn. Det gjordes genom att lägga till 7 cm till avståndsvärdena. Felet i det loggade analogvärdet jämfört med primärvärdet blev då i genomsnitt ± 3 cm.

Det bör påpekas att resultaten i figur 7 bara visar korrektheten av sensorns kalibrering av sekundärvärdet mot primärvärdet. Korrektheten av primärvärden kontrollerades vid laboratorieförsöken i avsnitt 4.1.1. Sensorn FMR 57 användes ej för fältmätningar och för laboratorieförsöken användes enbart primärvärden.



Figur 7. Uppmätt primärvärde (PV) för avstånd mot loggat sekundärvärde för samma avstånd för SITRANS LR560 sensorn. En trendlinje (svart) plus trendlinjeekvationen och R-värdet har lagts in i grafen. Data mättes vid installationen i P7, Jordbro.

Figure 7. Measured primary value (PV) of distance against the logged analog value of the same distance by the SITRANS LR560 sensor and the measurement box. A trend line and the equation for the trend line are added to the graph. Data is measured at the installation in P7, Jordbro.

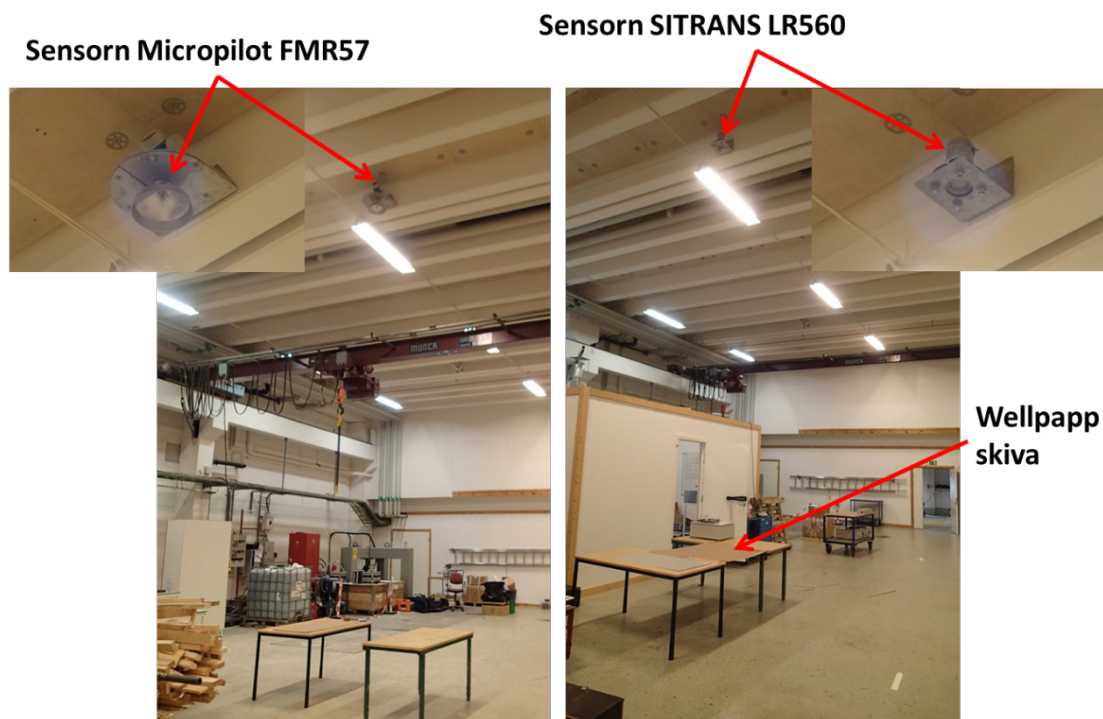
4 Genomförande

Först införskaffades sensorn SITRANS LR560. En serie laboratorieförsök planerades och genomfördes med denna sensor i mars 2014. Parallellt med detta arbete gjordes ett besök på Jordbro Kraftvärmeverk för att hitta lämpliga positioner för installation av sensorn i panna P7. Två positioner övervägdes på plan 5 och en möjlig position på plan 3. Besöket visade också att det inte fanns någon möjlighet att installera sensorn Micropilot FMR57 utan större ingrepp och ombyggnation av pannväggarna. Det berodde på att Micropilot FMR57 sensorn har en parabolantenn som är ca 240 mm i diameter vilket var för stort för de befintliga stutsarna i pannan.

Efter avslutade laboratorieförsök med SITRANS LR560 och utvärdering och presentation av resultaten beslutades det att gå vidare till fältförsöken med just denna sensor. Installationen av sensorn genomfördes vid pannans sommarrevision i augusti 2014 och fältförsöken utfördes under perioden 25 augusti till 25 oktober 2014. Parallellt med fältförsöken med SITRANS LR560, införskaffades Micropilot FMR57 och därefter utfördes laboratorieförsöken med FMR57sensorn.

4.1 LABORATORIEFÖRSÖKUPPSTÄLLNING

Vid laboratorieförsöken monterades nivåmätarsensorn i taket. Figur 8 visar bilder av uppställningarna av båda sensorerna.



Figur 8. Laboratorieförsökuppställningarna med nivåmätare sensorerna Micropilot FMR57 och SITRANS LR560.

Figure 8. Laboratory set ups with the level measurement sensors Micropilot FMR57 and SITRANS LR560.

4.1.1 Kalibrering av primärvärden

För kalibrering av primärvärden, kontrollmättes sensorernas avstånd till golvet vid laboratorieinstallationen med en standard laseravståndsmätare av typen Bosch DEL 50 Professional som hade en mät noggrannhet $\pm 1,5$ mm för avstånd upp till 50 m. Värdena för båda uppställningarna mättes och kontrollerades mot primärvärden från sensorerna. Tabell 4 visar de uppmätta värden för avståndet till golvet. Tabell 4 visar att primärvärden återgav de verkliga avstånden vid 6 meter mot golvet och mätfelet låg inom sensorernas mät noggrannhet.

Tabell 4. Uppmätta avstånden med nivåmätningssensorerna och standard avståndsmätare.

Table 4. Measured distances with the level measurement sensors compared with the standard laser range finder.

	Standard avståndsmätare	Testade sensorer för nivåmätning	
Typ	DEL 50 Professional	Micropilot FMR57	SITRAN LR560
Avstånd (m)	5,91	5,90	
	6,06		6,04

4.1.2 Metodbeskrivning

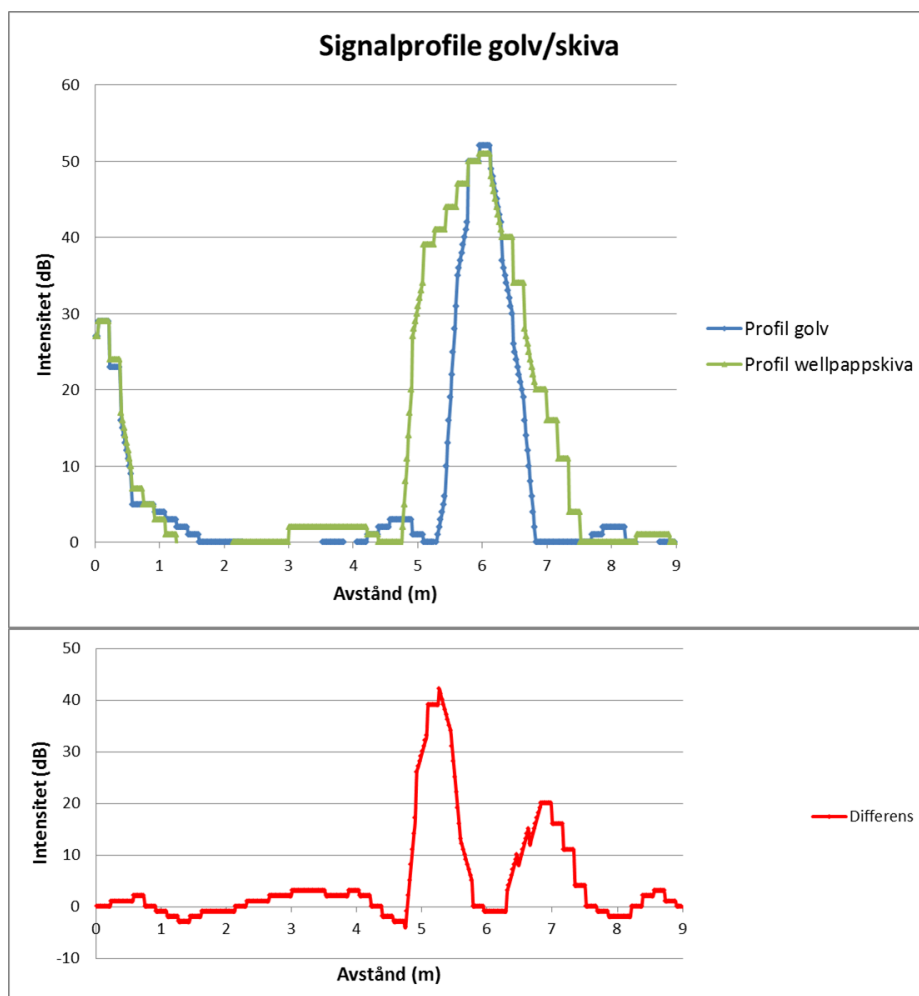
För att säkerställa att sensorerna kunde mäta fluidiseringshöjden och dess rörelser behövde man påvisa vid vilken minsta yttäthet av sand sensorn kunde mäta avstånden tillförlitligt. Den minsta yttätheten definierar fluidiseringshöjden eftersom sandbädden är som tätast i botten men mindre tät med ökad höjd i sandbäddprofilen.

Metoden gick ut på att kvantifiera ökning av signalintensiteten för ökade yttäthet av sand på en yta på ett känt avstånd från golvet. Genom att först börja med ingen sand på wellpappskivan i figur 8 kunde referenser mätas. Sedan ökades mängden sand allt eftersom och mättes signalintensiteten under tiden. Ju högre yttäthet desto högre signalintensitet registrerades och därefter mättnad nåddes. Vid en visst täthet är intensiteten tillräcklig hög för att kunna skiljas från "brusnivån" i referenserna. Vid försöken berodde ändringarna i signalintensiteten endast på den kända tillsatta mängden sand och därmed kunde den minsta yttätheten bestämmas. Metoden möjliggjorde jämförelse och kvantifiering av ändringarna i signalintensiteten.

Förutom att få en tillräckligt hög signal som säkerställde tillförlitligheten, skulle det uppmätta avståndsvärdet för sanden på wellpappskivorna vara rätt. Detta kontrollerades i försöksuppställningarna med signalprofilkurvor. Det övre diagrammet i figur 9 visar två signalprofilkurvor mätt med uppställningen med SITRAN LR560.

En signalprofilkurva är en kurva som visar nivåmätarens intensitet i dB som funktion av avstånd i m. Den blå kurvan i figur 9 visar resultat av mätningen som utfördes då sensorn enbart mätte golvet när ingen wellpappskiva var placerad i strålgången och den gröna kurvan i figuren visar den med wellpappskivorna (utan sand) på plats i strålgången.

Det övre diagrammet i figur 9 visar att den blå kurvan bildar en topp med maximum intensitet vid ca 6 m vilket motsvarade sensorns avstånd till golvet. Den gröna kurvan i figur 9 visar att signalintensiteten ökade redan vid ca 5 meters avstånd och den höga intensiteten som berodde på avståndet till wellpappskivorna nåddes vid ca 5,3 m.



Figur 9. Uppmätta signalprofilkurvor med SITRANS LR560 för golv utan wellpappskiva (blå) och med wellpappskiva (grön) (Övre diagram). Kurvan av differensen av signalprofilkurvorna i det övre diagrammet (Nedre diagram).

Figure 9. Signal profiles measured with SITRANS LR560 of the floor without cardboard sheet (blue) and with cardboard sheet (green) (upper panel). The graph of the difference of the signal profile values shown in the upper panel (the lower panel).

Det nedre diagrammet i figur 9 visar differenskurvan (röd) som är differensen av värden av den blå och den gröna kurvorna i figuren. Differenskurvan i figur 9 visar därmed den ökade intensiteten som orsakades av wellpappskivorna som en topp med maximum intensitet vid 5,29 m. Detta betyder att sensorn detekterade wellpappen som ett hinder vid 71 cm ovanför golvet. Det värdet kunde relateras till bordshöjden 73 cm och 2 cm fel i mätningen ligger inom mätnoggrannheten för sensorn.

Ytan för att hålla sanden var tvungen att vara transparent för mikrovågorna. Den högsta intensiteten i differenskurvan i det nedre diagrammet i figur 9 var 42 dB vilket kunde jämföras med 52 dB för signalen från golvet. Skillnaden i intensiteten berodde på att wellpappen var transparent för radarns mikrovågor med 90% vilket gav tillräckligt utrymme för detektering av sandens effekt på signalintensiteten.

4.1.3 Mätprocedur vid laboratorieförsöken

Två bord användes vid uppställningarna. Borden användes som stöd för att fästa två wellpappskivor bredvid varandra mellan borden så som visas i figur 8. Avståndet mellan borden valdes så att dessa inte interfererade med strålgången från sensorerna. Borden placerades så att wellpappen var centrerad i strålgången.

Därefter utfördes följande:

1. Signalintensiteten mättes med sensorn vid uppställningen med wellpappskivorna på plats för att få en referens.
2. En känd mängd sand spreds ut på wellpappskivorna i ett tunt jämnt lager och signalintensiteten mättes med sensorn.
3. Samma procedur upprepades genom att lägga till mer sand.

Retursand hade hämtats från P7 i Jordbro och användes för laboratorieförsöken. Sanden spreds ut på wellpappytan. Wellpappens funktion var att bilda en yta som är genomtränglig för strålen och "genomskinlig" för sensorerna. Därmed betraktades sanden på wellpappen av sensorn som svävande i samma höjd som bordsytan ovanför golvet.

Varje mätserie började med att 3 signalprofilkurvor av ren wellpapp mättes med den upphängda sensorn. Dessa profilkurvor användes för att ta fram en referenskurva (se avsnitt 5.1). Därefter vägdes en viss mängd sand och spreds så jämt som möjligt på wellpappytan. Proceduren upprepades tills hela wellpappytan täcktes av ett tunt lager av sand. När en mätserie var avslutad borstades sanden noggrant bort från wellpappytan inför nästa mätserie. För varje sensor gjordes totalt 3 mätserier.

Ökning av signalintensiteten på grund av adderad sand kunde följas med hjälp av framtagning av differenskurvor på samma sätt som användes för att få fram det nedre diagrammet i figur 9. Genom beräkning av arean under differenskurvan i ett relevant område för varje mängd sand erhöles ett värde som sedan kunde jämföras med varandra.

4.1.4 Analysmetod för signalprofilkurvor

Under laboratorieförsöken mättes flera signalprofilkurvor med wellpappskivorna på plats utan sand. Med hjälp av medelvärdesbildning skapades en referenskurva vid försöken för varje sensor. Statistisk felanalys användes för framtagning av standardavvikelsen för referenskurvan. Värdet på standardavvikelsen kunde sedan användas som ett spridningsmått på "brus" i referenskurvorna och som sedan användes som ett mått på den minsta ändringen av signalintensiteten som behövdes för att kunna anta ändringen som en verklig ändring.

Integralvärden beräknades från arean under kurvan. Varje signalprofilkurva som uppmättes med wellpappskivan och sand kunde jämföras med sin referenskurva. Då enbart de punkter i den framtagna differenskurvan som hade större värde än standardavvikelsen räknades in i integralberäkningen. För integralberäkningarna användes standardavvikelsen med 95%-konfidensintervallsnivån.

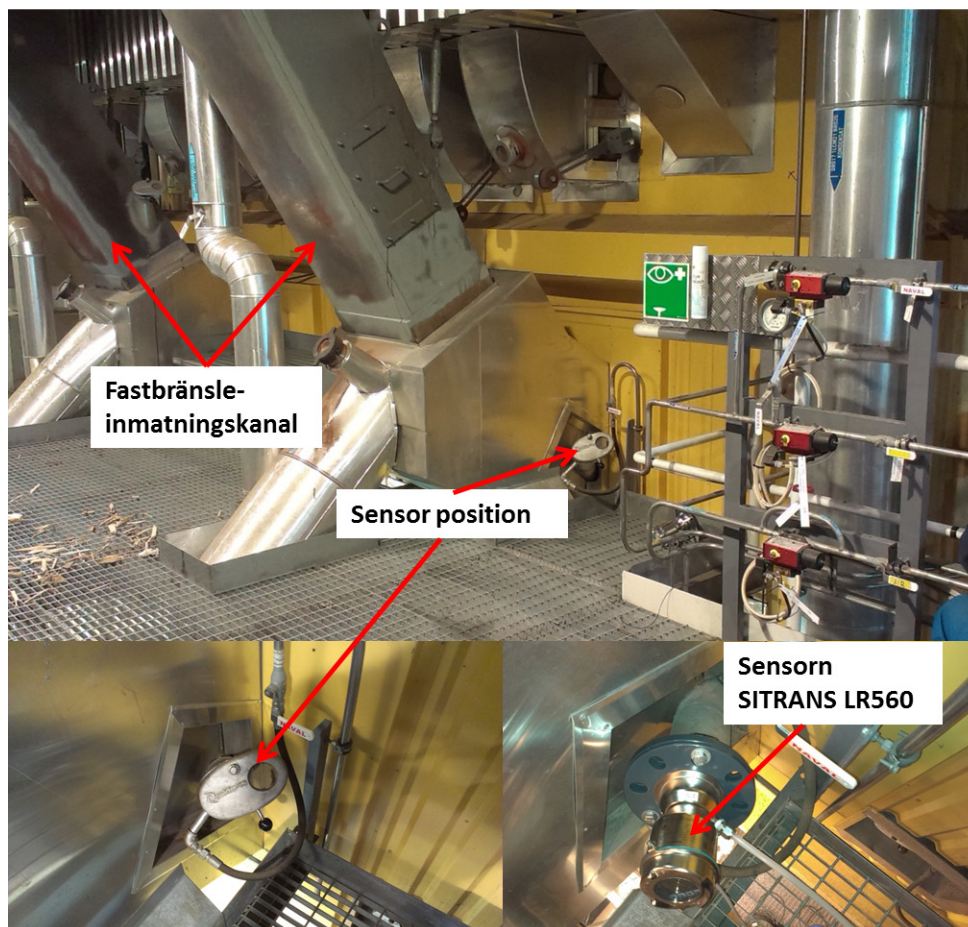
4.2 FÄLTFÖRSÖK

Enbart sensorn SITRANS LR560 ändvändes för fältförsöken och installerades i pannan P7 i Jordbro kraftvärmeverk. Hålen på plan 5 visade sig vara riktade mot panelväggen och pannbotten kunde inte ses genom dessa varför de inte kunde användas för fältförsöken.

Figur 10 visar bilder från positionen där sensorn installerades. Sensorn installerades på en stuts med en innerdiameter på 100 mm på plan 3 (+8,3 m höjd från bottenplan). Stutsen var positionerad snett ovanför fastbränslestupet av bränslelinje 1. Stutsens vinkel mot sandbäddytan uppskattades till ca 60° och dess vinkel mot pannväggen till ca 45° (se figur 11).

Avståndet från stutsens mynning på utsidan snett ner till bränslestupets bottenplatta uppmättes till 1,2 m. Genom stutsen syntes luftdysorna men också kanten av bränslestupets bottenplatta. Det betydde att inmatning av fastbränsle på bränslelinje 1 hamnade i nivåmätarestrålen och störde mätningarna under den största delen av försöksperioden. Avståndet till sandbädden kunde mätas med sensorn enbart vid de tillfällen när bränsleinmatningen på bränslelinje 1 var stoppad.

Figur 11 visar 2D illustrationer för sensorns installation i pannan när pannan är tömd på sand. Då installationen var klar och sensorn startades, visade sensordisplayen avståndsvärdet (primärvärdet) 6,43 m vilket var det närmsta avståndet längs radarsensorstrålgången till toppen av luftdysorna i pannbotten. Den analoga signalens (sekundärvärdet) avståndsskala var förinställd mellan 0 och 6,3 m från labbet.



Figur 10. Positionen av sensorn SITRANS LR560 i P7 i Jordbro kraftvärmeverk.

Figure 10. The position of the sensor SITRANS LR560 in P7 in Jordbro CHP plant.

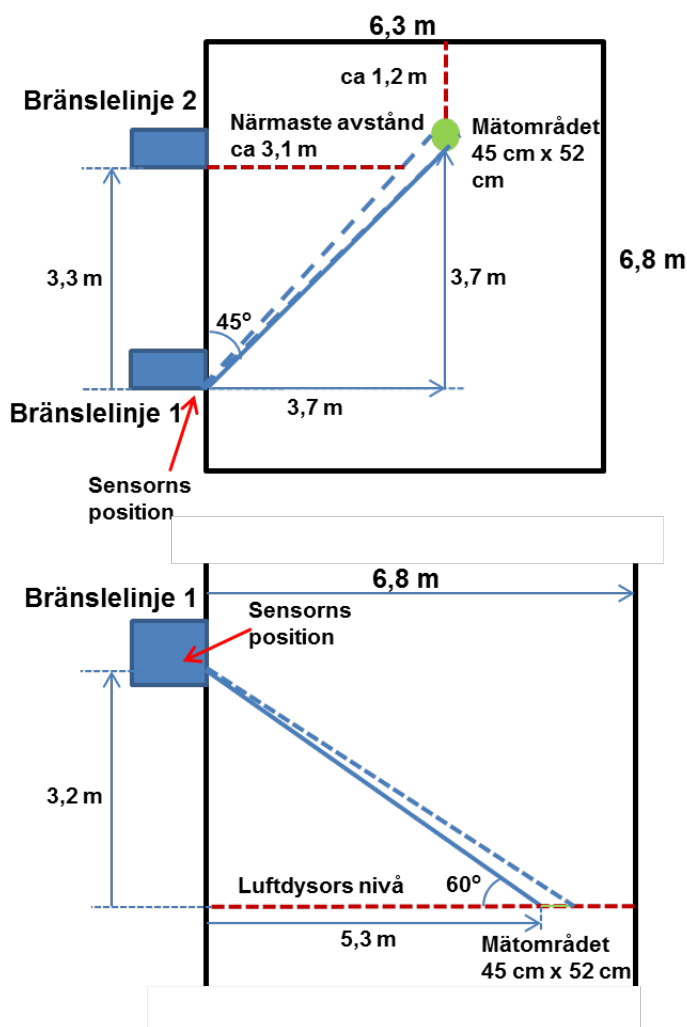
Den nedre skissen i figur 11 visar höjden 3,2 m rakt neråt med avseende på stutsens vinkel mot sandbädden. I skissen visas också strålgången från sensorn och ner till primärluftdysornas nivå i pannbotten. Radarsensorns stråle bildade en kon med spetsvinkeln 4° vid sensorantennen. Det medförde att mätområdet fick en oval form med storleken ca 45 cm x 52 cm för det avståndet. Om avståndet till mätområdet förkortades, exempelvis på grund av sandbädden eller fluidiseringen, minskade mätområdets area och dessutom flyttades den närmare sensorn längs radarstrålens linje i figur 11.

Avståndet från bränslestupet i bränslelinje 1 till bränslestupet i bränslelinje 2 var ca 3,3 m så som visas i den övre skissen i figur 11. Stutsen där sensorn var installerad sköt ut ca 30 cm från väggen och bildade vinkeln ca 45° mot pannväggen. Det betydde att sensors strålgång mot bädden passerade som närmast ca 3,1 m ifrån pannvägen framför bränslestup 2 så som visas i figuren. Det verkliga avståndet var dock ännu större på grund av höjdskillnaden. Om bränslet från bränslestup 2 föll ut 1 m ifrån pannvägen återstod 2,1 m till sensorns strålgång. Därmed hamnade bränslet från bränslelinje 2 inte direkt i sensorns strålgång.

Höjdvärden med luftdysornas nivå som referens beräknades med hjälp av de uppmätta avståndsvärden med sensorn. Denna omvandling gjordes med ekvation (3),

$$\text{Höjd (m)} = (6,43 - \text{Avstånd (m)} + 0,07) \times \cos 60^\circ \quad (3)$$

Avstånd (m) var de uppmätta och loggade avståndvärdena. 0,07 m var korrigeringsfaktorn mellan sekundärvärdet och primärvärdet (se avsnitt 3.4). 6,43 m var avståndet från sensorn till de närmaste luftdysorna i mätområdet. Cosinus 60° var sensorns vinkel mot bäddytan. Höjdvärden från sensorn kunde bli som minst 11 cm eftersom det högsta loggade avståndsvärdet var 6,28 m. Samma omvandlingsformel användes genomgående för framtagning av höjdvärden i avsnitt 5.2i rapporten .



Figur 11. 2D Illustrationer av installationen av sensorn SITRANS LR560 i pannan P7 i Jordbro kraftvärmeverk. De viktiga dimensioner och avstånden för det här fallet har angivits. Den övre skissen visar lägen uppifrån. Den nedre skissen visar lägen från sidoväggen. Radarsensors strålgång är indikerad med linjerna mellan sensorn och mätområdet för varje skiss. Storleken på mätområdet har angivits i centimeter.

Figure 11. 2D Illustrations of the installation of the sensor SITRANS LR560 in the unit P7 in Jordbro CHP plants. Important dimensions and distances for this case are specified. The sketch above shows the top view. The sketch below is the view from the side wall. The beam path of the radar sensors is indicated by the lines between the sensor and the measurement zone for each sketch. The size of the measurement zone is given in centimeters.

För jämförelseanalys av mätdata från sensorn och processdata från anläggningen under fältförsöken samt för att kunna följa de relevanta händelseförloppen för bäddens fluidisering i panna P7, inhämtades processdata från anläggningen, Tabell 5. Resultaten av jämförelseanalysen har redovisats i avsnitt 6.2.

Tabell 5. Lista av inhämtade processdata mätt i panna P7 i Jordbro Kraftvärmeverk.

Table 5. List of process data measured by the plant in unit P7, Jordbro CHP plant.

Processdata	Beskrivning	Enhet
Bäddtjocklek (Bäddhöjd)	Differentialtryckmätning omvandlad till bäddhöjd	cm
Bäddtemperatur 1-8	Bäddtemperatur i 8 zoner	°C
Slussmatare 1	Bränsleinmataningssluss för Bränslelinje 1	rpm, A
Slussmatare 2	Bränsleinmataningssluss för Bränslelinje 2	rpm, A
Primärluftflöde	Luftflöde som går till luftdysor	Nm ³ /s
Primärlufttryck	Lufttryck av primärluft	kPa
Recirkgasflöde	Rökgasrecirkulationflöde som går till luftdysor	Nm ³ /s

5 Resultatredovisning

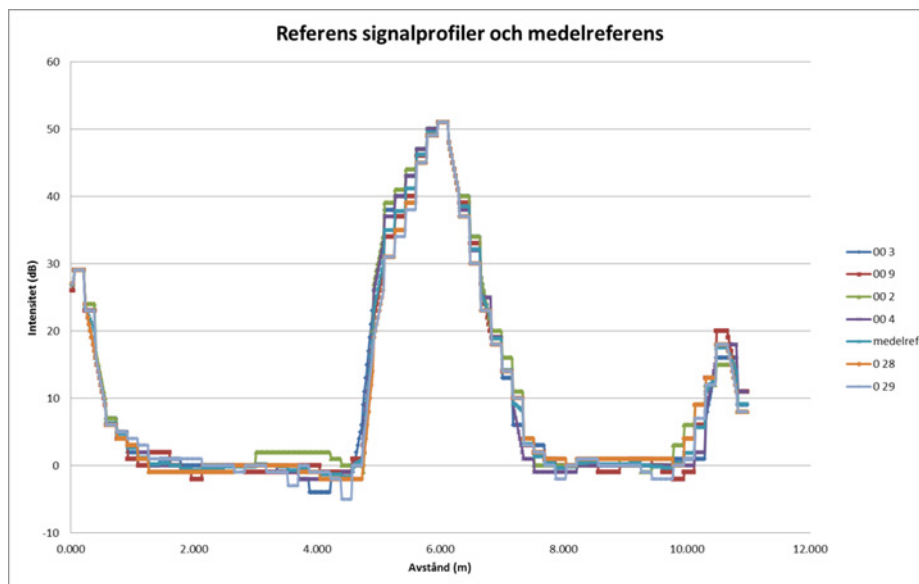
Laboratorieförsöken utfördes med båda sensorerna SITRANS LR560 och Micropilot FMR57 och för fältförsöken användes SITRANS LR560.

5.1 RESULTAT FRÅN LABORATORIEFÖRSÖKEN

Figur 12 visar sex signalprofilkurvor uppmätta med SITRANS LR560 vid en och samma uppställning med wellpappskivorna. Vid uppställningen hade sensorn avståndet 6,06 meter till golvet. En referenskurva beräknades genom medelvärdesbildning av dessa sex signalprofilkurvor och är indikerade som "medelref" i figur 12. Profilkurvorna i figur 12 är tagna med wellpapp utan sand vid olika tidpunkter under mätserien. Statistisk felanalys (se avsnitt 4.1.4) för referenskurvan i figur 12 visade:

- Korrelation: 0,99
- Differensmedelvärde: 0.0 dB
- Standardavvikelse: 2,6 dB för 95% konfidensintervall nivån.

Varje mätserie startades med att 40 g provsand (densitet ca 1,5 g/ml) vägdes och spreds jämnt på wellpappskivan och tre signalprofilkurvor uppmättes. Därefter spreds ytterligare 30 g sand ut på wellpappskivan, innan nya signalprofilkurvor uppmättes. Tre signalprofilkurvor uppmättes efter varje mängd tillsatt sand. Proceduren upprepades tills totalt 190 g sand spridits ut på wellpappskivan. Bilder på spridd sand på wellpappskivan vid en mätserie i försöket visas i bilaga A.



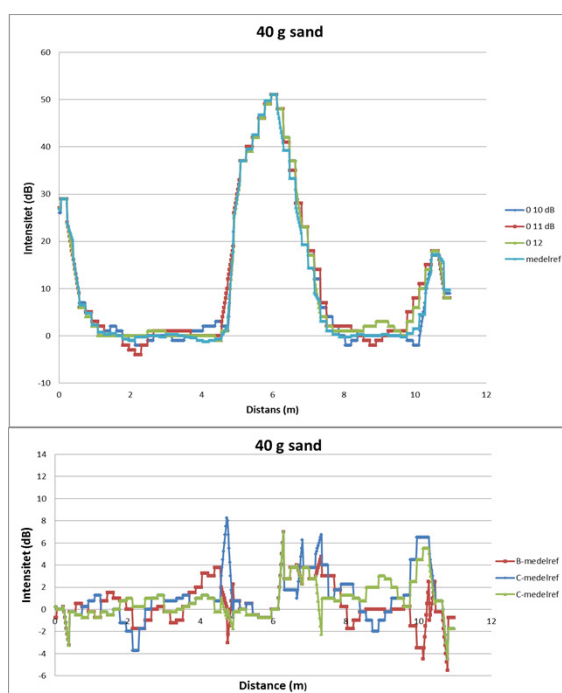
Figur 12. Signalprofiler plus medelreferens (medelref) för uppställningen vid laboratorieförsök med nivåmätare sensorn SITRANS LR560.

Figure 12. Signal profile and averaged reference (medelref) for the setup in the laboratory with the level measurement sensor SITRANS LR560.

Signalprofilkurvorna användes också för att kunna kvantifiera den mängd sand som behövdes för att få en tillräckligt stark signaländring för säkerställandet av den uppmätta nivån. Figur 13 till figur 18 visar resultaten av uppmätta signalprofilkurvor med SITRANS LR560 i laboratorieuppställningen. Det övre diagrammet i figurerna 13 till 18 visar tre efter varandra uppmätta signalprofilkurvor, med i varje figur indikerad mängd sand, samt den framtagna referenskurvan från figur 12. Det nedre diagrammet i respektive figur 13 till figur 18 visar differenskurvor som är den beräknade differensen mellan värden av varje uppmätt signalprofilkurva och referenskurvan i varje punkt.

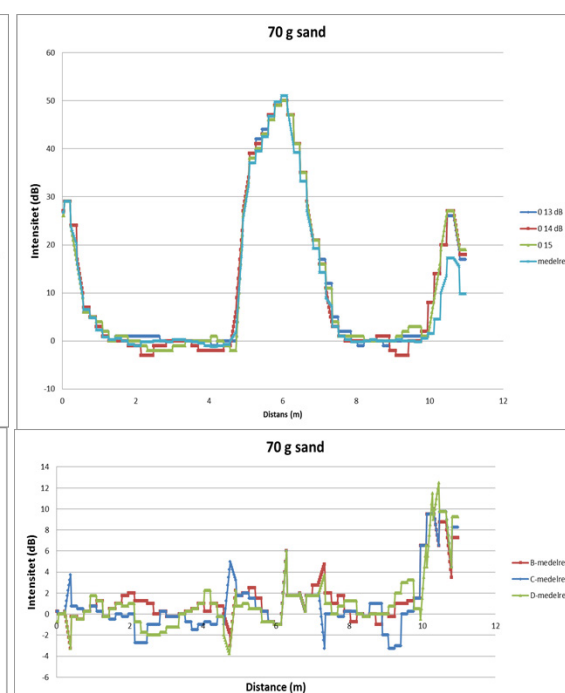
Den minsta yttäthet av sand som var mätbar med god signalkvalitet uppskattades med hjälp av differenskurvorna. För detta beräknades arean under kurvan för distanser från 4 m till och med 8 m för varje differenskurva i figurerna 13 till 18.

I figur 19 jämförs ökningen av de beräknade areorna för varje differenskurva i figurerna 13 till 18. Där visas också en trendlinje av medelvärdet av de beräknade areorna för varje vikt.



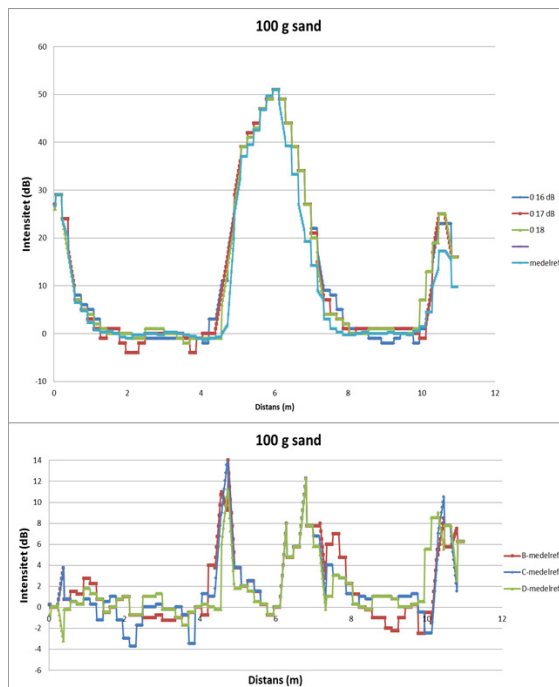
Figur 13. Uppmätta signalprofilkurvor med 100 g sand och referenskurvan (Övre diagram). Kurvor av differensen av signalprofilkurvan och referensen (Nedre diagram)

Figure 13. Measured signal profile graphs for 100 g sand and the reference graph (upper panel). The graphs of difference of each signal profile graph and the reference graph (lower panel).



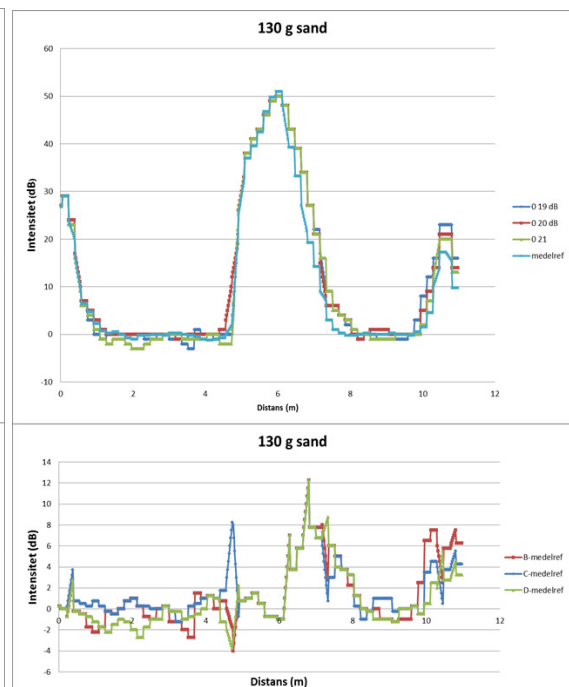
Figur 14. Uppmätta signalprofilkurvor med 130 g sand och referenskurvan (Övre diagram). Kurvor av differensen av signalprofilkurvan och referensen (Nedre diagram)

Figure 14. Measured signal profile graphs for 130 g sand and the reference graph (upper panel). The graphs of difference of each signal profile graph and the reference graph (lower panel).



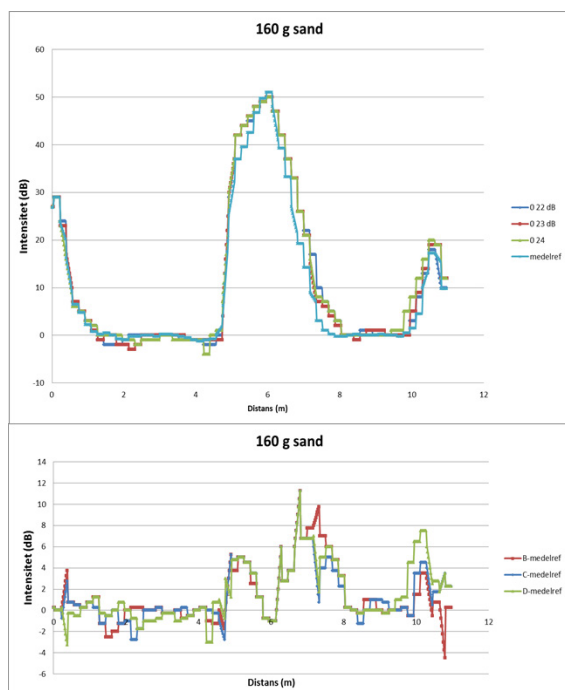
Figur 15. Uppmätta signalprofilkurvor med 160 g sand och referenskurvan (Övre diagram). Kurvor av differensen av signalprofilkurvan och referensen (Nedre diagram)

Figure 15. Measured signal profile graphs for 160 g sand and the reference graph (upper panel). The graphs of difference of each signal profile graph and the reference graph (lower panel).



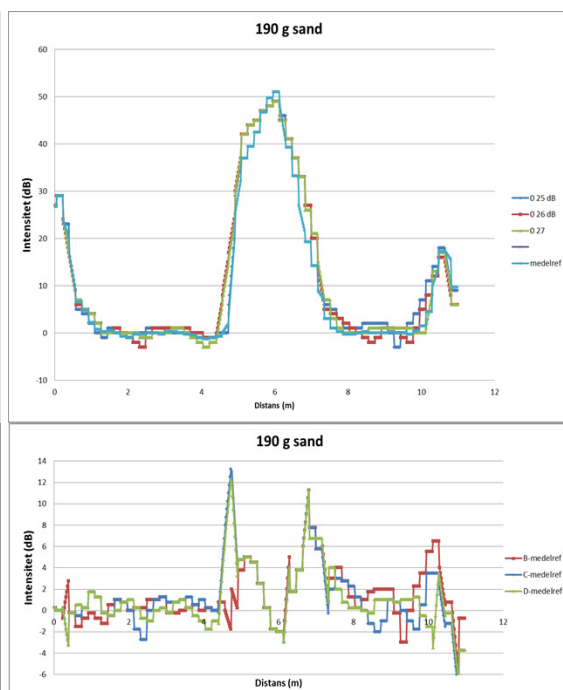
Figur 16. Uppmätta signalprofilkurvor med 190 g sand och referenskurvan (Övre diagram). Kurvor av differensen av signalprofilkurvan och referensen (Nedre diagram)

Figure 16. Measured signal profile graphs for 190 g sand and the reference graph (upper panel). The graphs of difference of each signal profile graph and the reference graph (lower panel).



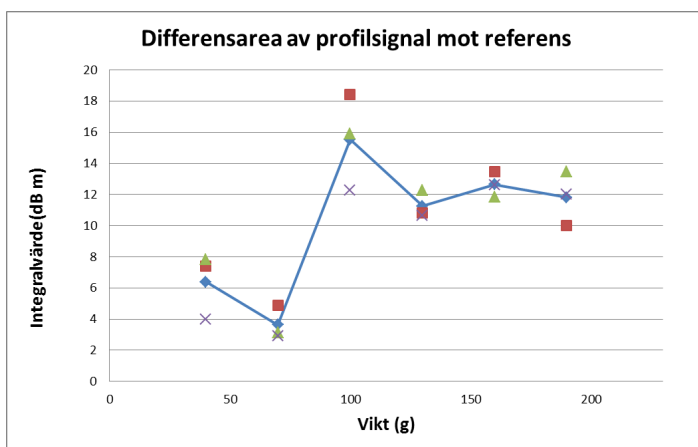
Figur 17. Uppmätta signalprofilkurvor med 160 g sand och referenskurvan (Övre diagram). Kurvor av differensen av signalprofilkurvan och referensen (Nedre diagram)

Figure 17. Measured signal profile graphs for 160 g sand and the reference graph (upper panel). The graphs of difference of each signal profile graph and the reference graph (lower panel).



Figur 18. Uppmätta signalprofilkurvor med 190 g sand och referenskurvan (Övre diagram). Kurvor av differensen av signalprofilkurvan och referensen (Nedre diagram)

Figure 18. Measured signal profile graphs for 190 g sand and the reference graph (upper panel). The graphs of difference of each signal profile graph and the reference graph (lower panel).



Figur 19. Integralvärde beräknat med hjälp av area under kurvan för differenskurvorna för 40 g till 190 g sandprov. Trendlinje för punkterna visas i blått.

Figure 19. Integral value calculated via area under the curve for the graph of difference for 40 g to 190 sand. The trend line of the points is shown as blue.

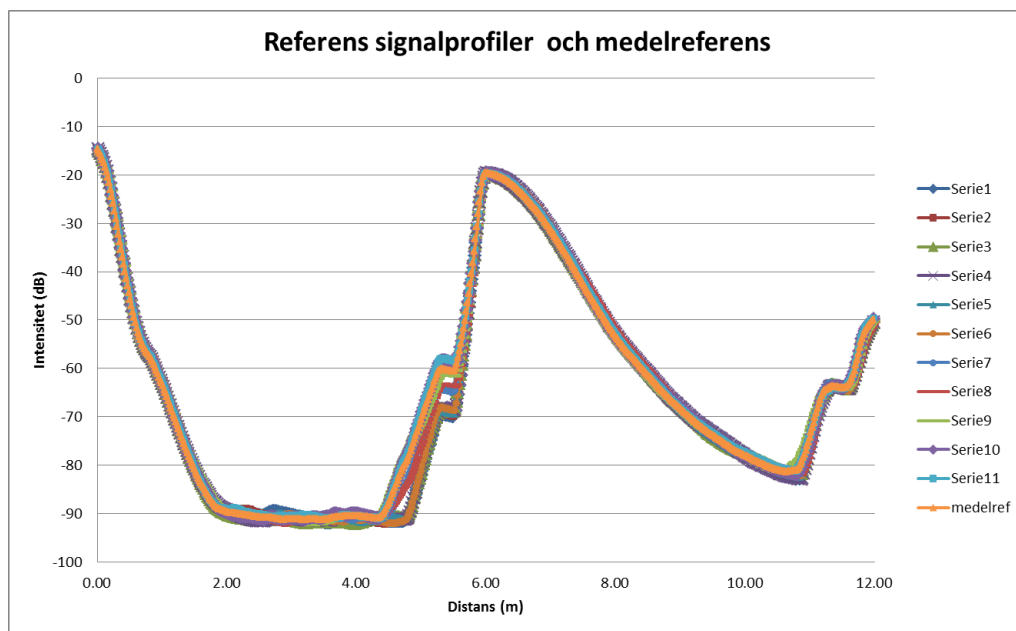
Figur 20 visar signalprofilkurvor uppmätt med sensorn Micropilot FMR 57 vid labbuppställningen som visades i figur 8. Avståndet mellan sensorn och golvet för denna uppställning var 5,91 m.

En referenskurva beräknades genom medelvärdesbildning av de elva signalprofilkurvorna och den är indikerad som "medelref" i figur 20.

Statistisk felanalys för referenskurvan i figur 20 visade:

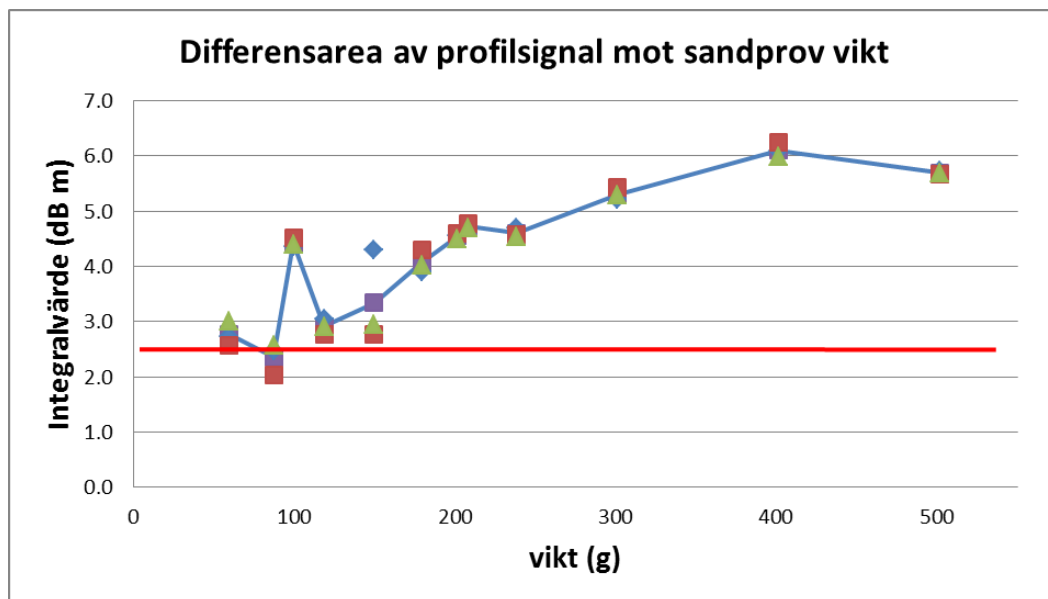
- Korrelation: 0,99
- Differens medelvärde: 0,0 dB
- Standardavvikelsen 4,3 dB.

Samma procedur användes för sensorn Micropilot FMR57 för att ta fram differenskurvor. Därefter beräknades arean under kurvan för distanser från 5 m till 8 m för varje differenskurva och resultaten visas i figur 21. Figur 21 visar också en blå linje som indikerar medelvärden av de beräknade areorna för varje sandprov.



Figur 20. Uppmätta signalprofilkurvor i uppställningen vid laborieförsök samt beräknad medelreferenskurva med nivåmätare sensorn Micropilot FMR57.

Figure 20. Measured signal profile for the laboratory setup plus the calculated averaged reference curve with the level measurement sensor Micropilot FMR57.



Figur 21. Beräknad area under kurvan för differenskurvorna för 60 g till 500 g sandprov. Trendlinje för punkterna visas i blå. Röd linje visar referensnivån.

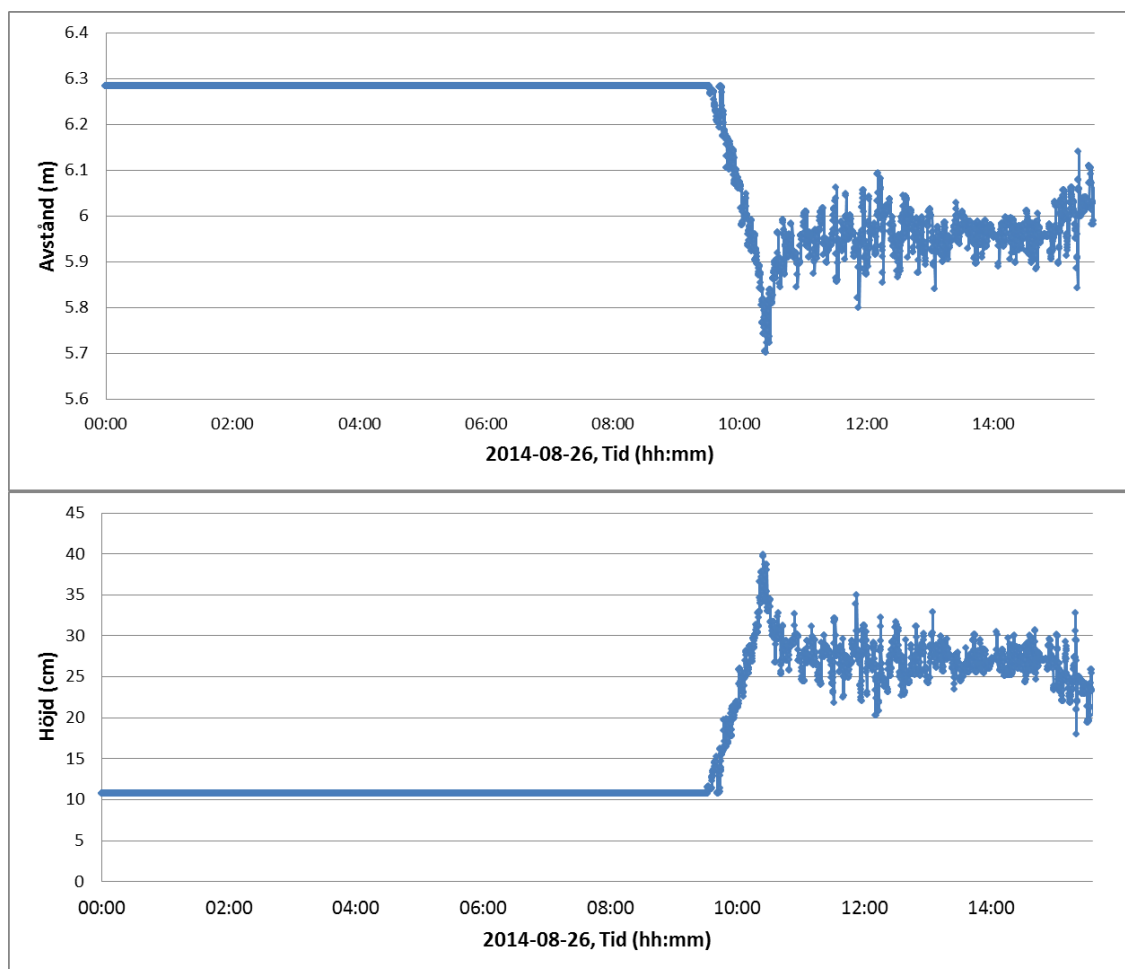
Figure 21. Calculated area under the curve for the graph of differences for 60 g to 500 sand. The trend line of the points is shown as blue. Röd linje visar referensnivån.

5.2 RESULTAT FRÅN FÄLTFÖRSÖKEN

När sensorn SITRANS LR560 hade installerats i pannan i Jordbro, visade sensordisplayen 6,43 m som primärvärde då pannan var helt tom på sand. Detta avståndvärde som motsvarade avståndet från sensorn till närmaste luftdysa(or) i mätområdet användes som referensavstånd.

Diagrammen i figur 22 visar perioden då pannan fylldes upp med sand för första gången efter revisionen och då primärluften drogs igång. Det övre diagrammet i figur 22 visar att det loggade analoga avståndsvärdet (sekundärvärdet) var 6,28 m vid tiden innan kl 09:15. Detta var det högsta värdet det kunde anta och differensen till 6,43 m berodde på vald mätskala och signalhantering, vilket är beskrivet i avsnitt 3.4.

Det övre diagrammet i figur 22 visar att avståndet den 26:e augusti vid tiden efter kl 09:15 minskade till minimumvärdet 5,7 m vid kl 10:25. Det minskade avståndet berodde på sandpåfyllning från lastbil som avslutades vid kl 10:25. Vid kl 10:30 visar processdata pådrag av primärluftflödet till 6 Nm³/s. Vid kl 10:30 ökade först avståndet från 5,7 m till ca 5,9 m och därefter stabiliserades detta vid denna nivå.



Figur 22. Uppmätt avstånd ner till pannbotten med SITRANS LR560 sensorn (övre diagrammet). Avståndsvärden omvandlade till höjd (nedre diagrammet)

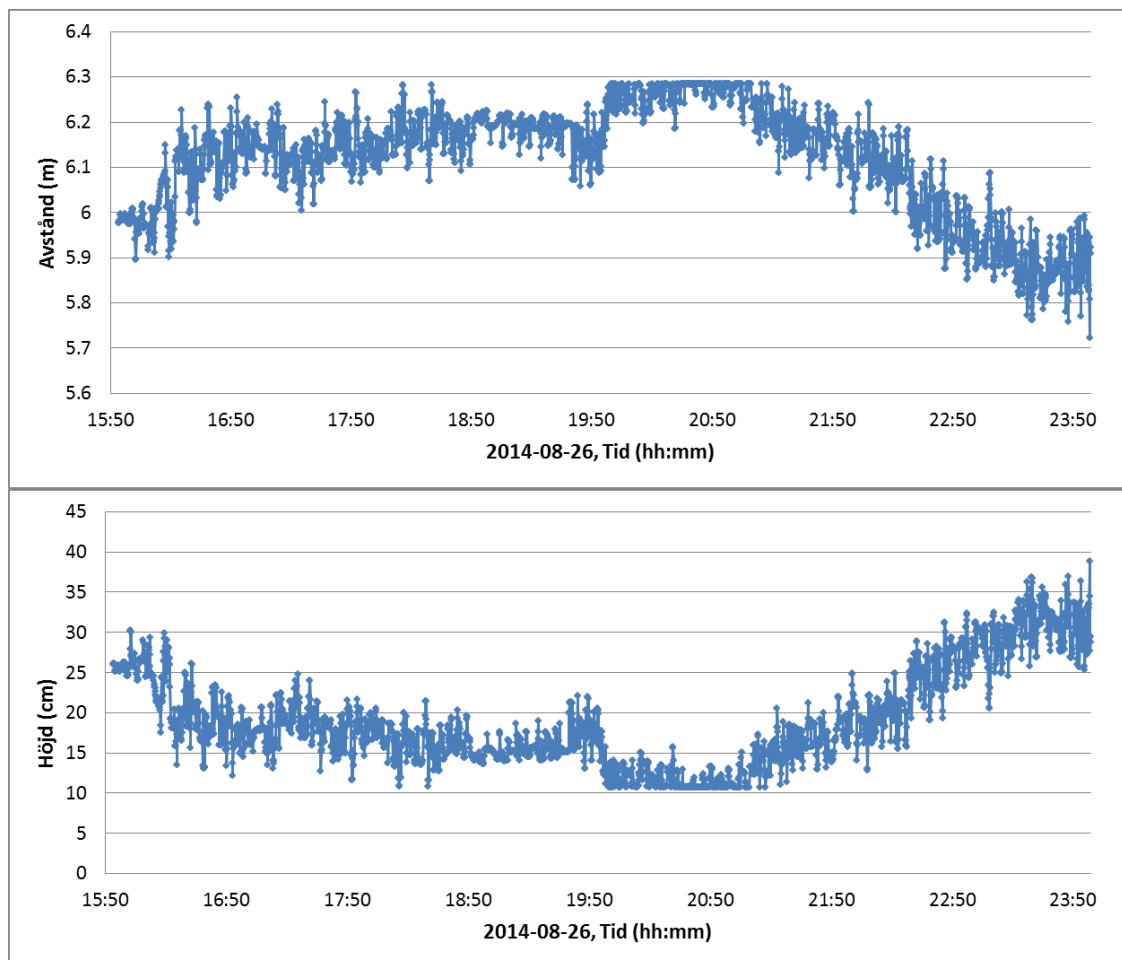
Figure 22. Measured distance to the bottom of the boiler with the SITRANS LR560 sensor (the upper panel). Converted distance values to the height (the lower panel).

Det nedre diagrammet i figur 22 visar höjdvärden i centimeter som var resultatet av omvandling av avståndsvärden från det övre diagrammet i figuren. Denna omvandling gjordes med ekvation (3) i avsnitt 4.2. Omvandlingen enligt ekvation (3) gjorde att värden i det nedre diagrammet i figur 22 visade höjden från luftdysorna i pannbotten.

Anläggningens processdata angav att bäddhöjden var ca 4,4 cm från kl 11:00 till kl 14:00 den 26:e. Det nedre diagrammet i figur 22 visar att det fylldes på med ca 40 cm sand i mätområdet och att efter kl 10:30, då fluidiseringen startades, minskades det till ca 27 cm. De snabba rörelsevariationerna i sandbädden är mellan ± 5 och ± 10 cm under perioden kl 11:00 till kl 14:00.

Figur 23 visar mätningar med sensorn under den 26:e augusti för resterande del av dygnet. Bäddsandens nivå skiftade mycket och avståndsvärdena höll en uppåtgående trend fram till kl 20:00, vilket motsvarade en sänkning av höjden. Mellan kl 20:00 och 21:00 minskade höjden till sitt lägsta värde. Efter kl 21:00 i figur 23 vände trenden och en ökning av höjden observerades. Detta berodde på påfyllning av sand från sandsilon. Bortsett från perioden mellan 19:00 och 19:42 visade anläggningens processdata

minusvärden på bäddhöjden för hela perioden. Fluidiseringsluftflödet varierade mellan ca 6 och 20 Nm³/s under samma tidsperiod.

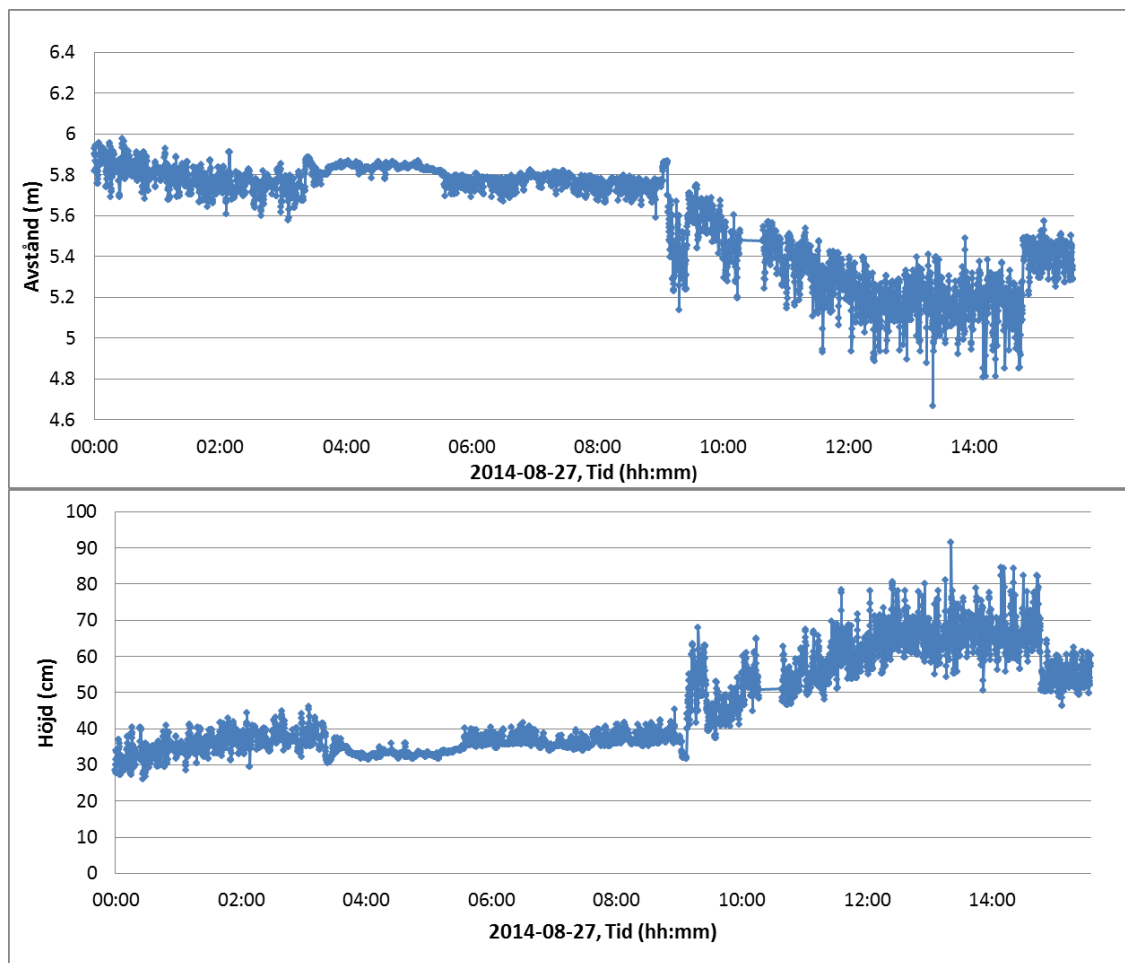


Figur 23. Uppmätt avstånd ner till pannbotten med SITRANS LR560 sensorn (övre diagrammet). Omvandlade avståndsvärden till höjd (nedre diagrammet)

Figure 23. Measured distance to the bottom of the boiler with the SITRANS LR560 sensor (the upper panel). Converted distance values to the height (the lower panel).

Vid tidpunkten kl 03:21 den 27:e visade processdata att fluidiseringsluftflödet sänktes från 12 Nm³/s till 2 Nm³/s och att det flödet behölls under tidsperioden mellan kl 03:21 och kl 09:00. Samtidigt föll bäddhöjden från 12 cm till minustal i processdatan mellan kl 03:31 till 09:00.

Figur 24, som är data från 27:e augusti, visar att höjdvärdet ökade till ca 35 cm strax innan kl 03:20 vilket till stor del berodde på påfyllning av sand från sandsilon. Mellan kl 03:31 och kl 05:30 syns i figur 24 att de snabba rörelserna av höjdvärdena nästan avstannade och höjdvärdena då visade ca 32 cm. Därefter fram till kl 09:00 kom rörelserna igång igen men med amplituder mindre än 5 cm och höjdvärden visade då ca 37 cm.



Figur 24. Uppmätt avstånd ner till pannbotten med SITRANS LR560 sensorn (övre diagrammet). Omvandlade avståndsvärden till höjd (nedre diagrammet)

Figure 24. Measured distance to the bottom of the boiler with the SITRANS LR560 sensor (the upper panel). Converted distance values to the height (the lower panel).

Den 27:e augusti strax efter kl 09:05 ökades fluidiseringsluftflödet upp för att lite senare stabiliseras vid ca 17 Nm³/s till kl 14:00. Samtidigt ökade värdet på bäddhöjden från några få centimeter till 24 cm vid kl 14:00 enligt processdatan. Detta berodde på fortsatt tillförseln av sand till bädden.

Figur 24 visar att de snabba rörelserna ökade vid 09:05 och framåt. Vid kl 14:00 visade höjdvärdet i figuren ca 70 cm och dess rörelseamplitud ca ± 15 cm.

Den 27:e augusti kl 14:47 visade primärlufttrycket från processdatan ett tapp med ca 2 kPa medan fluidiseringsluftflödet visade en minskning från 17 Nm³/s ner till 12 Nm³/s några minuter efter 14:47. Samtidigt visade processdata att bäddtjockleken ökade med ca 5 cm.

Den 27:e augusti visade signalen från sensorn en sänkt nivå av höjdvärden med ca 10 cm vid tiden efter 14:47. Det är värt att notera att den 27:e augusti ökade bäddtemperaturen från ca 27 °C till ca 100 °C under dagen. Torkningsprocessen av sanden hade då kommit igång med hjälp av oljebrännaren.

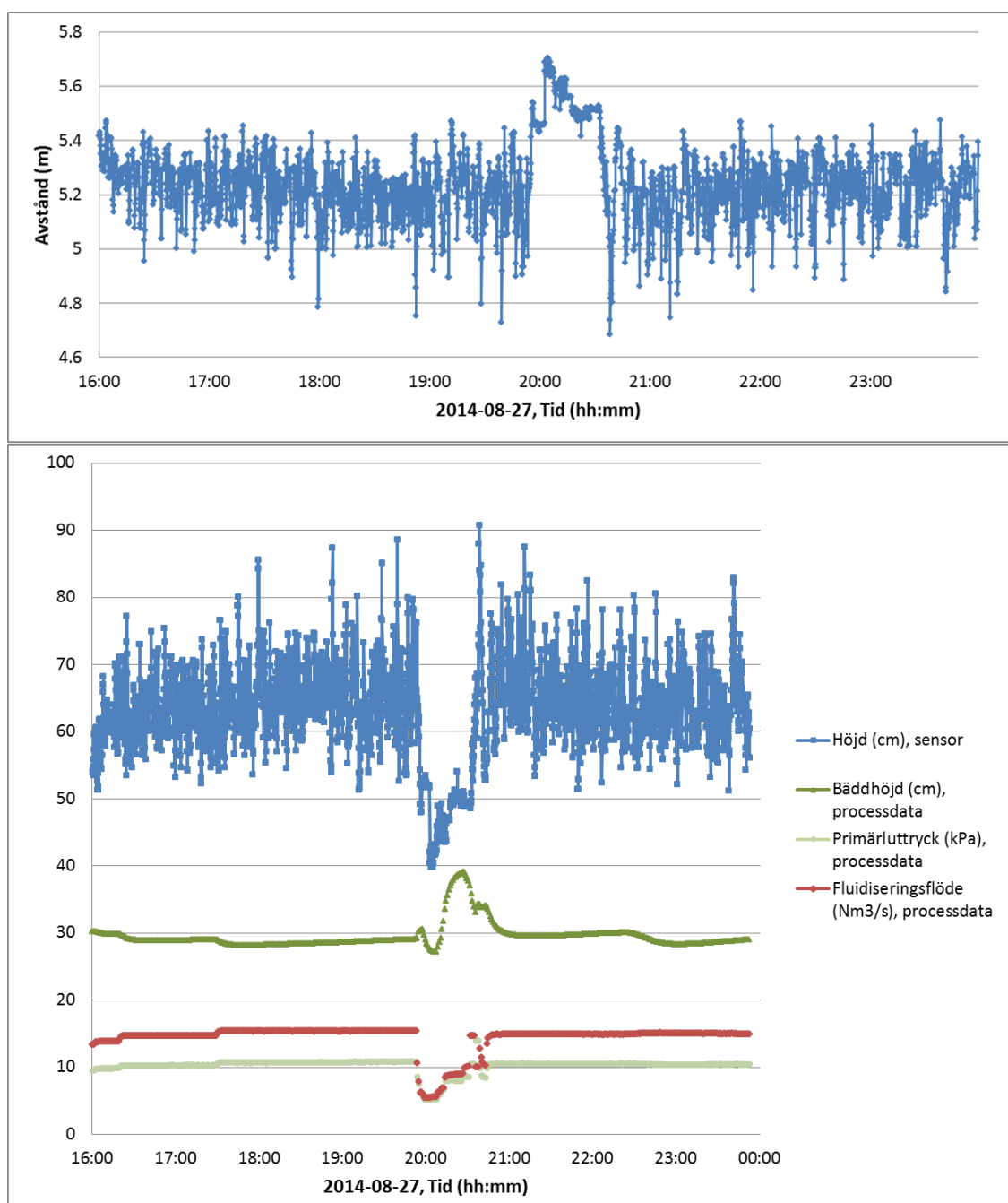
Figur 25 visar resterande del av dygnet, 16:00 till 24:00, för 27:e augusti. I det övre diagrammet i Figur 25 visas uppmätt avstånd till sandbädden och i det nedre diagrammet visas omvandlade avståndsvärden till höjdvärden från sensorn samt processdatavärden för bäddhöjd, fluidiseringsluftflöde och primärlufttryck från driften för samma period.

Vid kl 20:00 i figur 25 nådde sensorns höjdvärde sitt minimum på 40 cm. Samtidigt visade fluidiseringsluftflödet en nedgång från 15 Nm³/s till 5 Nm³/s och primärlufttrycket visade en halvering till ca 5 kPa. Värdet på bäddhöjden från processdata i det nedre diagrammet i figur 25 visar att bäddhöjden var ca 30 cm vid tiden strax före 20:00 och efter 21:00.

I det nedre diagrammet i figur 25 kan det observeras att höjdvärdens nivå från sensorn ökade till 65 cm efter kl 21:00. Därmed har sandbädden uppskattningsvis höjts i genomsnitt med 25 cm vid fluidiseringen jämfört med det minsta höjdvärdet i figuren. Då fluidiseringen åter gick igång (efter kl 21), syns det i det nedre diagrammet i figur 25 att sandbäddens snabba rörelser visar en höjdskillnad mellan den lägsta nivån och den högsta nivån på ca 20 cm.

Vid ändringarna i fluidiseringsluftflödet och primärlufttrycket under perioden mellan kl 19:50 och 21:00, syns i det nedre diagrammet i figur 25 en liten nedgång i värdet för bäddhöjden, med ett minimum vid kl 20:00 som sammanföll med nedgång i de andra värdena i diagrammet.

Strax efter kl 20:00 i det nedre diagrammet i figur 25 ökade bäddhöjden med ca 8 cm och nådde sitt maximum 38 cm för att sedan gå tillbaka till 30 cm vid kl 21:00. Vid samma tidsperiod efter att sensors höjdvärde hade nått sitt minimum ökade höjdvärdet med ca 27 cm från sin lägsta punkt. Sedan höjdvärdet gick tillbaka till samma nivå som strax innan tidsperioden vid kl 21:00 och därefter var det stabilt på samma nivå. Bäddtemperaturen under perioden var över 100 °C.



Figur 25. Uppmätt avstånd ner till pannbotten med SITRANS LR560 sensorn (övre diagrammet). Omvandlade avståndsvärden till höjd samt processdata för bäddtjocklek (grön), fluidiseringsluftflöde (röd) och primärlufttryck (ljus grön) under driften för samma period (nedre diagrammet).

Figure 25. Measured distance to the bottom of the boiler with the SITRANS LR560 sensor (the upper panel). Converted distance values to the height (blue) plus process data for sand bed height (green), fluidization air mass flow (red) and primary air pressure (light green) (the lower panel).

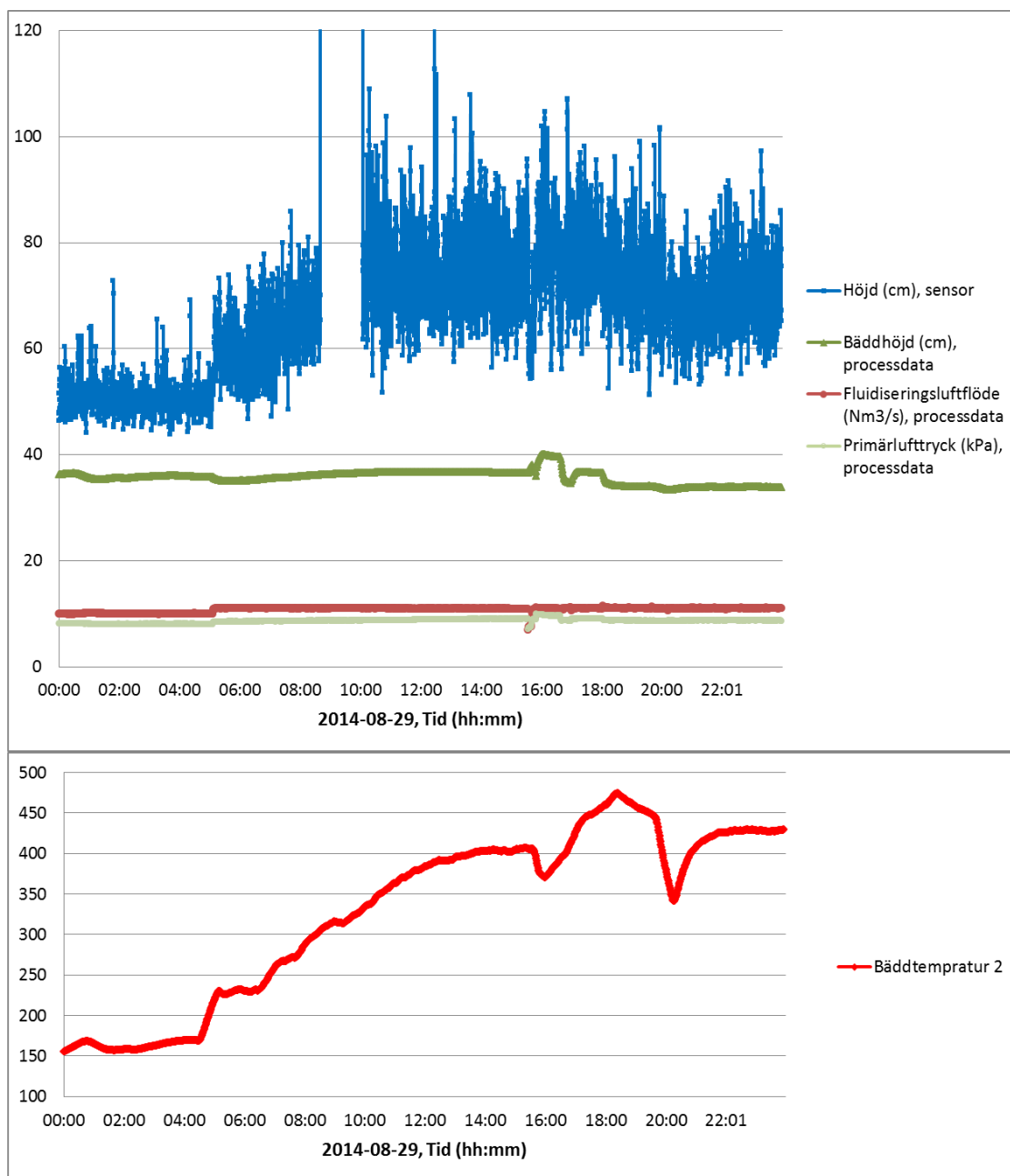
Figurer 26 till 31 är återgivna i bilaga B med sekundäraxel för mer detaljerade visualisering av datavärden.

Det övre diagrammet i figur 26 visar omvandlade avståndsvärden från sensorn till höjdvärden samt processdata för bäddhöjd, fluidiseringsluftflöde och primärlufttryck för den 29:e augusti. Det finns en avbrottsperiod mellan 08:40 och 10:05 i sensorns höjdsvärden som berodde på elavbrott i mätutrustningen.

För den 29:e augusti syns det att fluidiseringsprocessen var stabil, med undantag för vissa förändringar i processdata mellan 15:30 och 18:00. Under dagen den 29:e augusti fortskred uppvärmning av pannan med oljebrännaren. Bäddtemperaturen ökade stadigt från ca 130 °C till ca 450 °C såsom visas i nedre diagrammet i figur 26.

Höjdvärden från sensorn i det övre diagrammet i figur 26 visar att amplituden för de snabba rörelserna, eller differensen mellan de högsta och lägsta värdena ökade med ökad temperatur. Även nivån på värdena för höjden ökade när temperaturen ökade under dagen.

Värdet på bäddhöjden i det övre diagrammet i figur 26 var däremot nästan konstant eller visade till och med en liten nedåtgående trend vid slutet av perioden, om man bortser från ändringarna mellan 15:30 och 18:00. Erfarenhet från driften är att sandbädden blir "fluffigare" vid högre temperaturer.



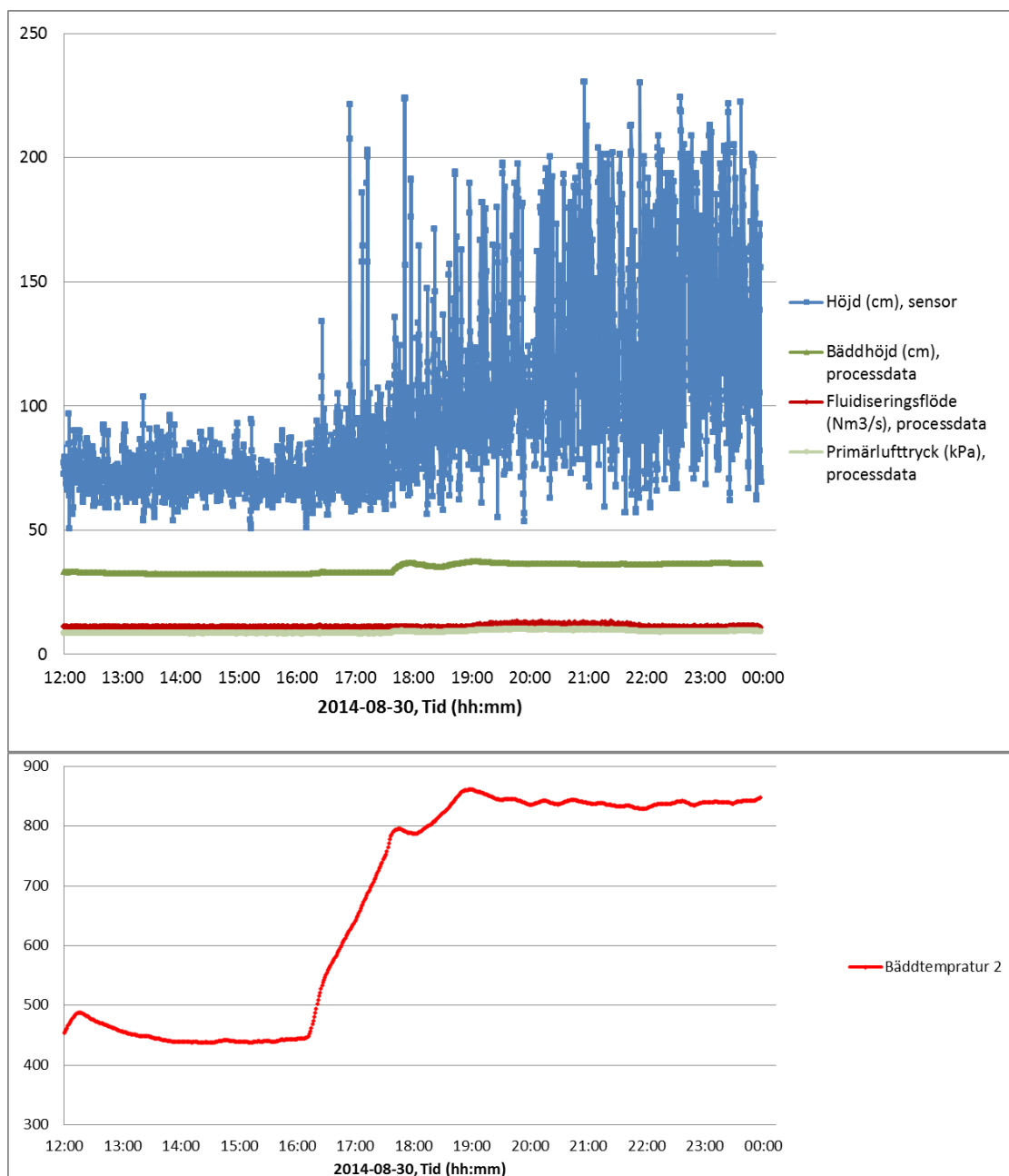
Figur 26. Omvandlade avståndsvärden till höjd samt processdata för bäddhöjd (grön), fluidiseringsluftflöde (röd) och primärlufttryck (ljus grön) under driften för samma period (övre diagrammet). Sandbädd temperatur från processdata (nedre diagrammet). Se figur 33 för detaljerade visualisering av data.

Figure 26. Converted distance values to the height (blue) plus process data for the sand bed height (green), fluidization air mass flow (red) and primary air pressure (light green) (the upper panel). Sand bed temperature from the process data (the lower panel). See figure 33 for detailed visualization of data.

Figur 27 visar data från den 30:e augusti. Det övre diagrammet visar omvandlade avståndsvärden från sensorn till höjd samt processdata för bäddhöjd, fluidiseringsluftflödet och primärlufttrycket. Vid 16:20 den 30:e augusti påbörjades testkörningar av skruvar för fastbränsleinmatningen och vid 17:00 kom fastbränsleinmatningen igång och ökade därefter stadigt. Detta kan observeras som "spikar" i grafen för höjden (blåa kurvan) i övre diagrammet av figur 27. Dessa "spikar" blev tätare allt eftersom tiden gick. Spikarna berodde på att bränslet från bränslelinje 1 var i vägen för sensorstrålen och sensorn mätte därför i stället avståndet till de inmatade bränslepartiklarna som var mycket närmare sensorn än bädden.

För perioden 12:00 till 16:00 i figur 27 uppgav processdatan värdet av bäddhöjden till ca 32 cm. Under samma tidsintervall låg höjdvärden från sensorn på ca 70 cm och amplituden för de snabba rörelserna var ca 20 cm.

Under dagen den 30:e augusti har uppvärmningen av pannan med oljebrännaren avstannat och bäddtemperaturen, så som nedre diagrammet i figur 27 visar, ökat stadigt p g a inmatning av fastbränsle med start 17:00. Bäddtemperaturen under dagen ökade från ca 450 °C till ca 840 °C och därmed började normal drift av pannan.

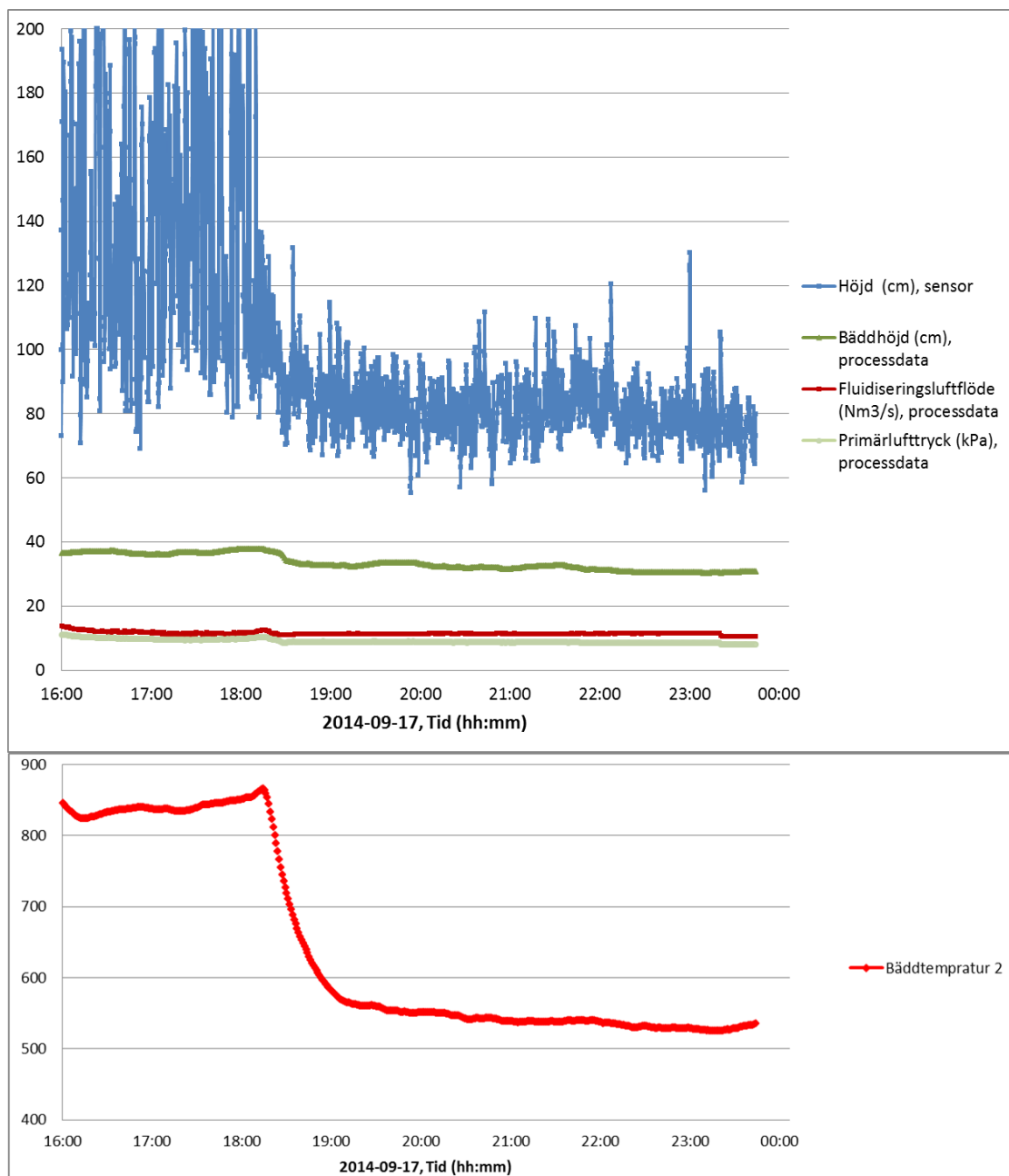


Figur 27. Omvandlade avståndsvärden till höjd plus processdata för bäddhöjd (grön), fluidiseringsluftflöde (röd) och primärlufttryck (ljus grön) under driften för samma period (övre diagrammet). Sandbäddtemperatur från processdata (nedre diagrammet). Se figur 34 för detaljerade visualisering av data.

Figure 27. Converted distance values to the height (blue) plus process data for the sand bed height (green), fluidization air mass flow (red) and primary air pressure (light green) (the upper panel). Sand bed temperature from the process data (the lower panel). See figure 27 for detailed visualization of data.

Figur 28 visar värden från 17:e september. Det övre diagrammet i figuren visar omvandlade avståndsvärden från sensorn till höjdvärden samt processdata för bäddhöjd, fluidiseringsluftflöde och primärlufttryck. Den 17:e september strax efter kl 18:05 avstängdes fastbränsleinmatningen till eldstaden. Höjdsvärdet minskade då snabbt till en lägre nivå. Sensorn mätte från denna tidpunkt på bädden och inte på

bränsleflödet från bränslelinje 1. Höjdvärden från sensorn visar en långsamt något nedåtgående trend efter kl 18:30 och för resten av dygnet.



Figur 28. Omvandlade avståndsvärden till höjd plus processdata för bäddhöjd (grön), fluidiseringsluftflöde (röd) och primärlufttryck (ljus grön) under driften för samma period (övre diagrammet). Sandbäddtemperatur från processdata(nedre diagrammet). Se figur 35 för detaljerade visualisering av data.

Figure 28. Converted distance values to the height (blue) plus process data for the sand bed height (green), fluidization air mass flow (red) and primary air pressure (light green) (the upper panel). Sand bed temperature from the process data (the lower panel). See figure 35 for detailed visualization of data.

Processdata visar en minskning av bäddhöjden från 37 cm till 32 cm strax efter 18:30 och därefter en långsam nedgående trend som i stort sätt liknar trenden för sensorns höjdvärden för tidsperioden efter kl 18:30 i figur 28. Bäddtemperaturen i figuren visar ändringar i temperaturen på grund av den avstannade bränsleinmatningen.

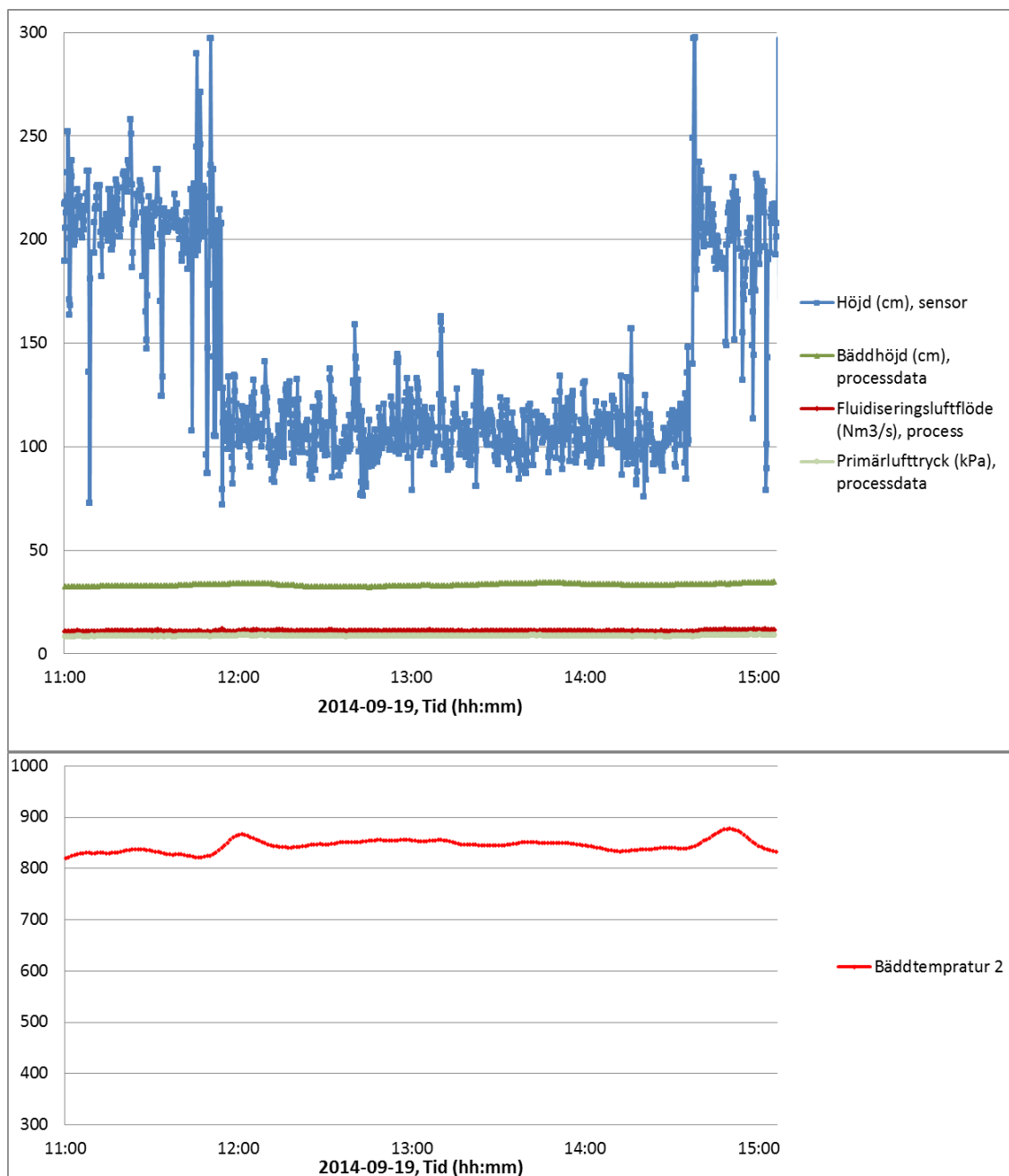
Figur 29 visar värden från 19:e september. Det övre diagrammet i figuren visar höjdvärden som är omvandlade avståndsvärden från sensorn samt processdata för bäddhöjd, fluidiseringsluftflöde och primärlufttryck.

Under perioden mellan kl 12:00 och kl 14:50 hade bränsleinmatningen på bränslelinje 1 där sensorn sitter varit avstängd och därmed har sensorn kunnat följa sandbäddens rörelse under drift. Detta har verifierats med processdata för bränsleinmatningen. Tiden innan kl 12:00 och efter kl 14:50 var bränslet från bränslelinje 1 i vägen för mätstrålen.

Stopp i bränsleinmatningen syns i figur 29 då höjdvärden fallit till en mycket lägre nivå vid kl 12 jämfört med tiden innan. Det omvända skedde vid kl 14:50 då bränsleinmatningen åter kom igång och höjdvärdena gick tillbaka till samma nivå.

Medelvärdet för höjdvärden mellan kl 12:00 och kl 14:50 i figur 29 är 105 cm och de snabba rörelsen visade variationen ± 25 cm, om man bortsåg från de enstaka punkter som visade de högsta topparna. Om dessa värden jämförs med bäddhöjden som var ca 33 cm så indikerade detta att fluidiseringen lyft bädden 72 cm och att bäddytan rörde sig upp och ner med ca ± 25 cm.

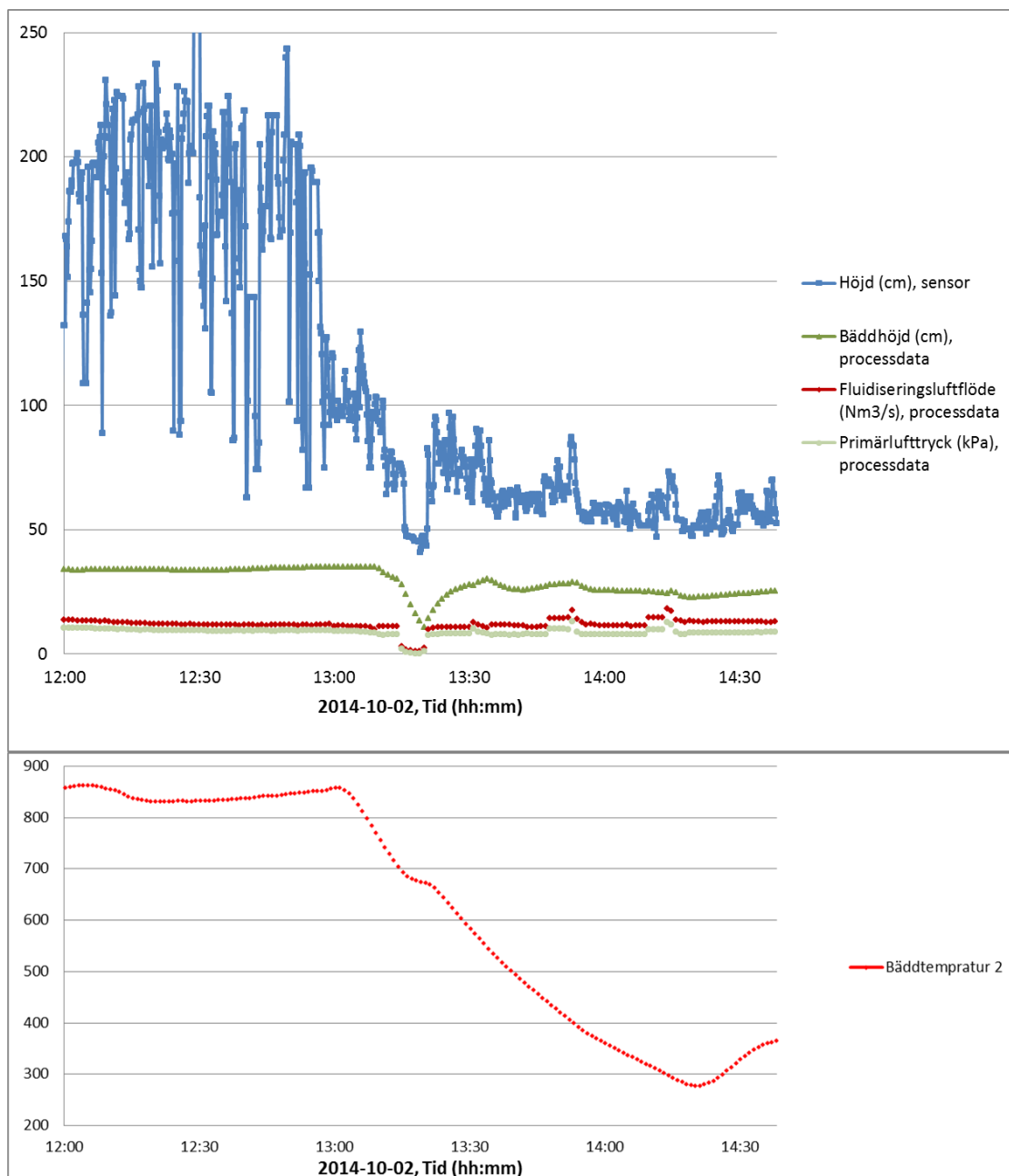
Då bränsleinmatningen återupptogs vid kl 14:50 den 19:e september hoppade höjdvärdena i figur 29 tillbaka till höga nivåer då bränsleflödet åter skymde sikten för sensorn. Värdet på bäddhöjden var stabilt och visade ca 35 cm under hela perioden vilket syns i figur 29.



Figur 29. Omvandlade avståndsvärden till höjd plus processdata för bäddhöjd (grön), fluidiseringsluftflöde (röd) och primärlufttryck (ljus grön) under driften för samma period (övre diagrammet). Sandbäddtemperatur från processdata (nedre diagrammet). Se Figur 36 för detaljerade visualisering av data.

Figure 29. Converted distance values to the height (blue) plus process data for the sand bed height (green), fluidization air mass flow (red) and primary air pressure (light green) (the upper panel). Sand bed temperature from the process data (the lower panel). See figure 36 for detailed visualization of data.

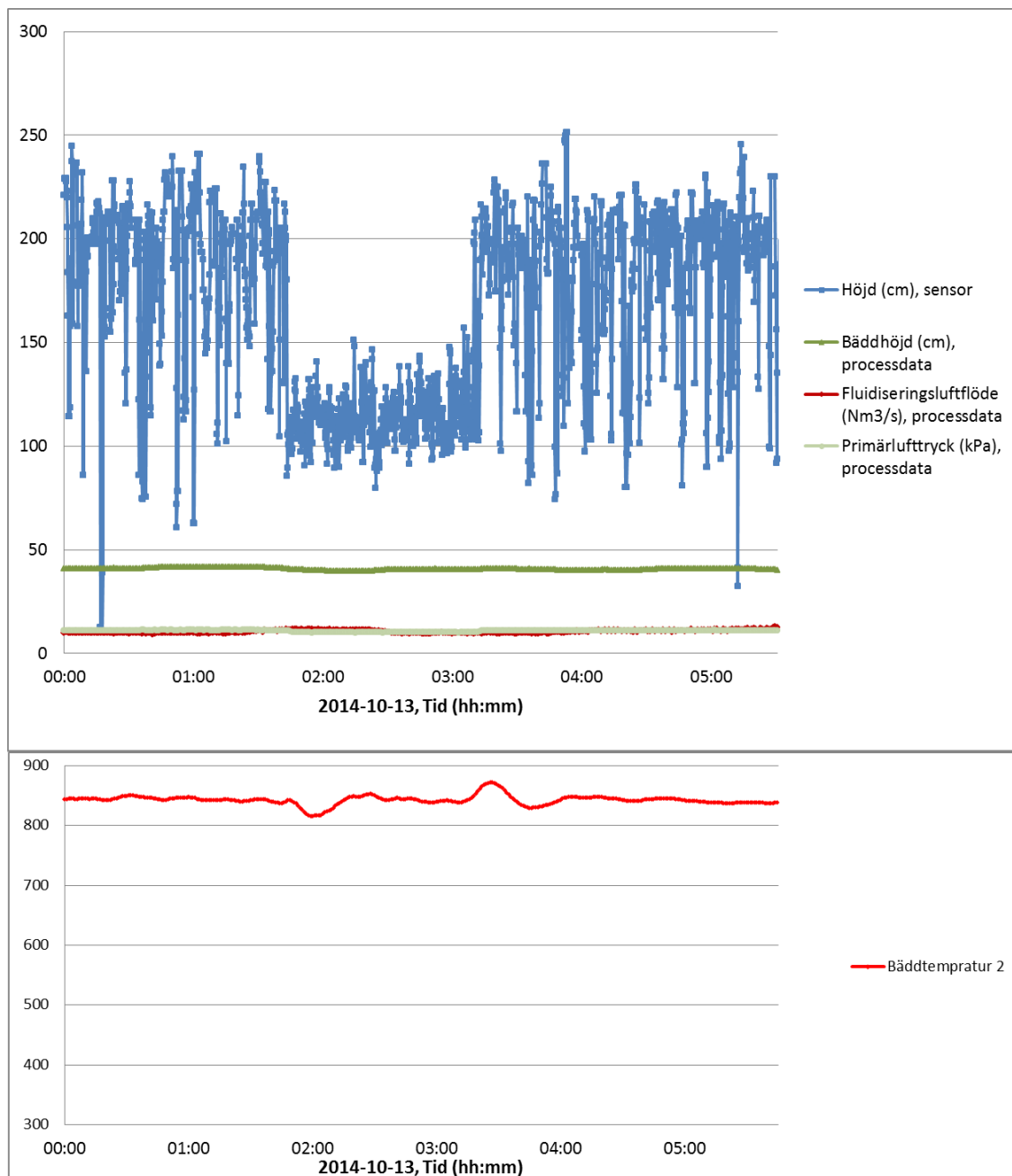
Även figur 30 visar ett fall med driftstopp. Den mest intressanta punkten i figuren var då fluidiseringen tappade fart vid kl 13:19 för en kort stund och då höjdvärdet åter visade 40 cm. Vid denna tidpunkt var primärlufttryck 0,1 kPa och fluidiseringsluftflöde 1,3 Nm³/s vilka var avsevärt lägre än de normala värden för dessa.



Figur 30. Omvandlade avståndsvärden till höjd plus processdata för bäddhöjd (grön), fluidiseringsluftflöde (röd) och primärlufttryck (ljus grön) under driften för samma period (övre diagrammet). Sandbäddtemperatur från processdata (nedre diagrammet). Se figur 37 för detaljerade visualisering av data.

Figure 30. Converted distance values to the height (blue) plus process data for the sand bed height (green), fluidization air mass flow (red) and primary air pressure (light green) (the upper panel). Sand bed temperature from the process data (the lower panel). See figure 37 for detailed visualization of data.

Höjdvärden i figur 31 visar ca 110 cm vid ett stopp av bränsleinmatningen för bränslelinje 1 vid tiden mellan kl 01:45 och kl 03:10. Värden av bäddhöjden från processdata var stabila och låg på ca 40 cm under hela perioden som visas i figur 31.



Figur 31. Omvandlade avståndsvärden till höjd plus processdata för bäddhöjd (grön), fluidiseringsluftflöde (röd) och primärlufttryck (ljus grön) under driften för samma period (övre diagrammet). Sandbäddtemperatur från processdata (nedre diagrammet). Se figur 38 för detaljerade visualisering av data.

Figure 31. Converted distance values to the height (blue) plus process data for the sand bed height (green), fluidization air mass flow (red) and primary air pressure (light green) (the upper panel). Sand bed temperature from the process data (the lower panel). See figure 38 for detailed visualization of data.

6 Resultatanalys

6.1 RESULTATANALYS AV LABORATORIEFÖRSÖKEN

Laboratorieförsöken gick ut på att ta fram den minsta yttäthet av sand som behövdes för att få ett godtagbart avståndsvärde, samt att kontrollera kalibreringen av sensorernas primärvärden mot en referensmätning.

Vid laboratorieförsöken med SITRANS LR560 mättes flera signalprofilkurvor. Genom medelvärdesbildning av dessa kurvor vid labbuppställningen med wellpappskivorna på plats och utan sand, skapades en referenskurva. Statistisk felanalys visade att standardavvikelsen för referenskurvan var 2,6 dB med 95% konfidensintervall. Värdet 2,6 dB är ett spridningsmått som kan användas som ett mått på den minsta ändringen av signalintensiteten som behövs för att kunna anta ändringen som en verklig ändring. Detta betyder i praktiken att då en signalprofilkurva jämfördes med referenskurvan räknades de punkter, framtagna i differenskurvan, som var större än 2,6 dB in i integralberäkningen. Alla andra punkter var "brus".

Figur 19 visade resultaten av ändringarna i signalprofilkurvorna som en följd av tillsatt sand upp till 190 g. En viss mängd sand spreds ut på en wellpappskiva i ett tunt jämnt lager och därefter uppmättes signalprofilkurvor med SITRANS LR560 sensorn. Proceduren upprepades med mer och mer sand och ändringarna i signalintensiteten i signalprofilkurvorna berodde på den tillsatta mängden sand då allt annat var konstant. Därmed kunde denna ändring kvantifieras med hjälp av arean under differenskurvorna. Figur 19 visade att 100 g eller mer sand gav upphov till en ökning av signalintensiteten och ändringen gav upphov till en tydlig detektion av sand. Strålningssytan för SITRANS LR560 sensorn vid labbuppställningen var 1380 cm² vilket gav värdet 0,07 g/cm² som minsta yttäthet av sanden. Detta kan jämföras med att bäddens yttäthet i genomsnitt är i storleksordning av 50–100 g/cm² och i frirummet (eldstadens utlopp) går den ner till 0,005 mg/cm².

Vid laboratorietesterna med SITRANS LR560 sensorn noterades att den snabbaste uppdateringshastigheten var 0,1 Hz vilket var lägre än det som var specificerat i kraven men tillräckligt för att kunna demonstrera teknikens potential för den här tillämpningen.

Samma procedur användes för att ta fram den minsta yttäthet av sand som behövdes för Micropilot FMR57 sensorn. Figur 18 visar uppmätta signalprofilkurvor i uppställningen vid laboratorieförsök samt beräknade medelreferenskurva för nivåmätningssensorn Micropilot FMR57. Statistisk felanalys visade att standardavvikelsen för referenskurvan var 4,5 dB med 95% konfidensintervall. Standardavvikelsen var nästan dubbelt så stor som den för SITRANS LR560, vilket betydde att större ändring i signalintensitet krävdes för bestämning av yttätheten.

Figur 21 visade resultaten av ändringarna i signalprofilkurvorna vid tillsatt sand upp till 500 g. Figur 21 saknade det tydliga hoppet i signalintensiteten som kunde observeras i grafen i Figur 19 för sensorn SITRANS LR560. Men vid 300 g eller mer börjar signalen stabilisera sig och bli tillräckligt stark. Den stora mängden sand i fallet för Micropilot FMR57 sensorn berodde på att den hade en detektionsyta på 2920 cm². Detta medförde att den minsta yttäthet av sand för Micropilot FMR57 sensorn blev 0,1 g/cm² och det betydde vidare att i detta avseende var Micropilot FMR57 sensorn ca 30% mindre känslig för sanden än SITRANS LR560 sensorn.

Hastigheten för signaluppdateringen för Micropilot FMR57 sensorn var ca 1 Hz, vilket var i linje med de specificerade kraven och vilket var betydligt bättre än den för SITRANS LR560.

Noggrannheten i nivåmätningarna med primärvärden var 2 cm för båda sensorerna vilket var fördelaktigt. Däremot gjorde de fysiska dimensionerna att SITRANS LR560 sensorn med den inbyggda antennen på 80 mm i diameter var mer lämplig att användas vid fältförsöken då utrymmet var begränsade av de tillgängliga hålen i pannan.

6.2 RESULTATANALYS AV FÄLTFÖRSÖKEN

Fältförsöken utfördes med SITRANS LR560 sensorn och resultaten i figurerna 22 till 31 visar att sensorn var funktionell och stördes inte av temperaturändringar upp till 850 °C i bädden. I den mån det var möjligt mätte sensorn sandbäddens rörelser.

Det nedre diagrammet i figur 22 visade att det fylldes på med sand upp till ca 40 cm i mätområdet och höjdvärden från sensorn visade inga snabba variationer i bäddhöjden. Efter kl 10:30 då pådrag av fluidiseringsluftflödet startats, minskade höjdvärdenas nivåer och stabiliserades vid ca 27 cm. Höjdminskningen kan ha berott på att sanden sökte sig till håligheter i andra delar av bädden utanför mätområdet och att bädden därmed jämnades ut. De snabba rörelsevariationerna mellan ± 5 och ± 10 cm under perioden kl 11:00 till kl 14:00, som inte fanns innan fluidiseringsluftpådraget, detekterades av sensorn.

Därmed mätte sensorn både de långsamma höjdändringarna av sandbädden då den inte var fluidiserad och de snabba rörelserna av sandbädden vid fluidiseringen. Fluidiseringshöjden kunde antas som höjdvärdena vid fluidisering av bädden. Bäddens rörelsevariation kan beskrivas som en amplitud från fluidiseringshöjden, i det här fallet mellan 5 och 10 cm under perioden kl 11:00 till kl 14:00 i figur 22.

Bäddhöjden från anläggningens processdata angav ca 4,4 cm från kl 11:00 till kl 14:00 den 26:e. Det låga värdet kan förklaras med att sand mängden var för lite för att kunna täcka hela bäddarean vilket medförde att det uppmätta differentialtrycket visade för låga värden.

Sensorn mätte höjdnivåerna och övervakade hela sandpåfyllningsprocessen från sandsilon, figurer 23 och 24. Det bör noteras att det är sensorns normala funktion att övervaka liknande processer i tanksystem och silon.

Figur 25 visar bland annat att sensorn mätte fluidiseringshöjden och följde rörelserna av sandbädden. Med hjälp höjdvärden från sensorn finns möjlighet att kvantifiera fluidiseringsstatusen av sandbädden med värden av fluidiseringshöjden och amplituden. När fluidiseringen tappade fart vid kl 20:00 visade höjdvärdet från sensorn ca 10 cm högre värde jämfört med bäddhöjdvärden från processdatan. Differensen kunde bero på en lokal ansamling av sand just i mätområdet vid detta tillfälle men också att bädden fortfarande var något fluidiserad eftersom fluidiseringsflödet fortfarande var igång. Det är intressant att notera i figur 25 att då fluidiseringsflödet minskade med 2/3 vid kl 20:00, minskade även höjdvärdet med ca 25 cm och ytterligare 1/3 minskning av fluidiseringsflödet skulle kunna motsvara 10 cm-differensen mellan bäddhöjden och höjdvärdet vid kl 20:00 i figuren.

Det bör påpekas att värdet av bäddhöjden från processen kan vara ett relativt långsamt genomsnittsvärde för hela bädden medan höjdvärdet från sensorn är ett momentant värde för fluidiseringshöjden i mätområdet.

Under dagen den 29:e augusti, så som visas i det nedre diagrammet av figur 26, ökade bäddtemperaturen från ca 150 °C till ca 450 °C. Erfarenhet från driften är att sandbädden blir "fluffigare" vid högre temperaturer vilket kunde observeras i figuren då höjdvärden och amplituden av höjdvärdena för de snabba rörelserna ökade och följde temperaturökningen. Även analys av ekvation 1 visar att högre temperatur motsvarar högre fluidiseringshastighet som kan ge högre fluidiseringshöjd.

Värdet av bäddhöjden från processen i figur 26 visade dock inte detta. Här bör det påpekas att utbredningshastigheten av mikrovågor som är av typen elektromagnetisk våg inte påverkas av temperaturen. Det medför att avståndsmätningen med sensorn inte kunde störas av temperaturförändringarna.

Figur 27 visade tydligt hur introduktion av fastbränsle på bränslelinje 1 störde mätningarna med sensorn. Vid 17-tiden började höjdvärdena i figuren vara uppmot 2,2 m vilket nästan var i höjd med bränslestupet. Dessa höga värden blev snabbt tätare på grund av den ökade inmatningen av bränsle på bränslelinje 1 som skymde sandbädden för sensorn. Värdet på bäddtemperaturen i det nedre diagrammet i figur 27, nådde snabbt uppmot 800 °C vilket indikerade fastbränsleeldning.

Figur 28 visade ett planerat pannstopp den 17:e september. Höjdmätningar med sensorn kunde åter igen visa värden på fluidiseringshöjden då fastbränsleinmatningen hade stängts av. Det övre diagrammet i figuren visade strax efter kl 18:30 en fluidiseringshöjd på ca 80 cm. Detta betyder att sandbädden hade lyfts med ca 43 cm då den jämförs med värdet av bäddhöjden som visade 37 cm vid samma tidpunkter. Höjdvärden från sensorn och värdet på bäddhöjden från processdata visade samtidigt en långsamt något nedåtgående trend för resten av dagen.

Genomgång av uppmätt data med sensorn efter den 30:e augusti till och med slutet av försöksperioden 25 oktober visade att det varit flera korta eller långa tidsperioder då bränsleinmatningen på bränslelinje 1 avstannat. Under dessa tidsperioder mätte sensorn fluidiseringshöjden och övervakade rörelserna av bädden. Bränslen från bränslelinje 2 kom inte i strålgången för sensorn eftersom avståndet var för stort (> 2 m), figur 11. Därmed kunde inte mätningen med sensorn störas direkt av bränslelinje 2.

Bränsle, sand och aska som utgör bäddmaterialen har ungefär samma värde för dielektriska konstanten och bädden består till ca 95% av sand. Detta betyder att huvuddelen av den uppmätta intensiteten kom från sandpartiklarna. Att yttätheten av bränsle och aska i bädden skulle nå upp till detektionsgränsen ca 0,1 g/cm² utan att sanden gjorde det är mindre sannolikt. Inte heller dammpartiklars påverkan på mätningarna med sensorn observerades med tanke på att i pannan vid normaldrift finns dammpartiklar överallt vilket inte skulle tillåta någon avståndsmätning alls. Det betyder att introduktionen av fastbränsle till bädden inte kan störa mätningarna så länge bränslet inte direkt passerade strålgången av sensorn.

Figurerna 29–31 valdes som ytterligare exempel då de visade tydligt att då bränsleinmatningen från bränslelinje 1 avstannade kunde sensorn visa fluidiseringshöjden och dess rörelser. I figurerna 29 och 31 visades en fluidiseringshöjd på ca 110 cm och bäddhöjden från processdatan visade ca 40 cm. Därmed kunde det uppskattas att fluidiseringen "lyfte" bädden med ca 70 cm under perioden, figur 29 och

31. Vidare visade dessa figurer att fluidiseringen gjorde att bädden rörde sig upp och ner med en maximal amplitud av ca 30 cm. Erfarenheten från driften är att bäddytan vid normal drift rör sig mellan 70 och 100 cm räknat från luftdysors nivå.

Slutligen bör det påpekas att den uppmätta fluidiseringshöjden med sensorn inte är lika med den absolut högsta nivån som sanden i bädden nådde utan i stället den högsta höjden i bädden där sanden uppnådde en täthet på $> 0,1 \text{ mg/cm}^2$. Utifrån mätresultaten uppskattas det att den uppmätta fluidiseringshöjden ligger nära toppen och den höjd som driftpersonalen vanligen observerar. Exakt "mät djup" kan enbart fås om bäddens densitetgradient längst höjden under fluidiseringen är känd.

7 Slutsatser

SITRANS LR560 sensorns mät hastighet var 0,1 Hz vilket var långsammare än den önskade mät hastigheten. Den minsta yttäthet av sand som gick att mäta med sensorn var 0,07 g/cm³. Sensorn har utan större modifiering kunnat vara i drift under panndrift i flera veckor i pannan P7 i Jordbro kraftvärmeverk.

För fältförsöken behövdes ingen modifiering av själva sensorn. Det behövdes lite extra utrustning och därmed en kostnad för att få ett funktionellt mätsystem. Integrering av mätsignalen i anläggningens datasystem för processen var inget hinder då utdata från sensorn är industristandard.

Den andra sensorn som utvärderades i laboratorieförsöken, Micropilot FMR57, hade större dimensioner och den yta den mätte var även större. De större fysiska dimensionerna av sensorn kunde vara ett hinder för dess användning i en panna. Den minsta sandyttäthet som det gick att mäta med Micropilot FMR57 sensorn var 0,1 g/cm³ vilket var 30% högre än för den andra sensorn. Detta betydde att den var 30% mindre känslig för sanden. Sensorns mät hastighet var 2,2 Hz vilket var snabbare än den andra sensorn och till och med snabbare än det man hade önskat.

De uppmätta avståndsvärdena kunde omvandlas till höjdvärden och kunde i vissa fall matchas med ändringarna i processen. Höjdvärdena kunde användas för framtagning av fluidiseringshöjden och utöver detta mätte sensorn sandbäddens snabba rörelser vilka kunde kvantifieras.

Presenterade data och resultat samt analys visade att sensorn, SITRANS LR560, för nivåmätning baserad på mikrovågsradarteknik har en god potential för att kunna användas för övervakning av statusen av fluidiseringen i en BFB panna.

Statusen av fluidisering av sandbädden kan eventuellt i framtiden vara användbar för att kunna diagnostisera bildning av agglomerat och sintring av bäddsand.

Mål och Målpuppfyllelse

Effektmål

Mål: Ökad tillgänglighet och minskad risk för oplanerade driftstopp för anläggningar med BFB-pannor genom att möjliggöra tidiga åtgärder mot fenomen såsom agglomerering och sintring. Detta kan bidra till minskat behov av fossileldad reservkraft.

För att kunna uppfylla effektmålet behövs det bland annat, försök med längre mätperioder med några fall av defluidisering som efter orsaks-/sambandsanalys kan ge information om olika skeenden. Genom att vid framtida försöken fastställa relationen mellan de uppmätta värdena och de fysikaliska fenomenen som sker vid defluidisering av sandbädden, kan ändringar av bäddens fluidiseringsstatus följas. Detta kan möjliggöra prognoser av defluidiseringen som i sin tur ska kunna leda till minskade oplanerade driftstopp, exempelvis genom att i ett tidigt skede öka bäddomsättningen.

Projektmål

De övergripande projektmålen är att utveckla och tillämpa nivåmätningsteknik för on-line detektering av fluidiseringsstatusen hos bubblande fluidiserade bäddar.

Detta åstadkoms genom att:

Mål: Hitta de praktiska begränsningarna för nivåmätare med radar teknik och identifiera parametrar för ytterligare modifiering samt parametrar som visar lämplig positionering i en panna.

Har uppnåtts genom att:

- Laboratorieförsök har utförts med två sensorer med radar teknik och resultaten har karakteriserat/kvantifierat sensorernas funktionalitet för att kunna mäta på bäddsand.
- De praktiska begränsningarna för användning av nivåmätare med radar teknik har varit få med undantag för fältförsöket som visade att fastbränsle i strålgången störde mätningar av sandbädden
- Erfarenheten från försöken visade att modifieringsbehovet var begränsat. Exempelvis signalhanteringen i det här fallet och anpassning av en stuts vid fältförsöket.

Mål: Kvantifiera radar teknikens lämplighet för detektering av fluidiseringsstatusen hos en bubblande fluidiserad bädd genom att utföra tester med två rekommenderade sensorer i VRD:s laboratorium i Älvkarleby och i Jordbro BFB-panna.

Har uppnåtts genom att:

- Kvantifiering av radar teknikens lämplighet för detektering av fluidiseringsstatusen hos en BFB har utförts genom tester med två rekommenderade sensorer i VRD:s laboratorium i Älvkarleby och i Jordbro kraftvärmeverkets BFB-panna med en av sensorerna (efter beslut).
- Resultatanalysen från fältförsöken har visat att radar teknikens lämplighet för detektering av fluidiseringsstatusen är god.

Mål: Utföra och utvärdera mätning av en av dessa två sensorer under 4 veckors tid.

Har delvis uppnåtts genom att:

- Fältförsök har utförts i mer än fyra veckor med en av sensorerna med förbehållet att resultatmängden med mätningar av bädden under normal drift var få. Detta på grund av att sensorn var installerad på en position som inte var optimal och fastbränsleinmatingen störde mätningarna.
- Målet har delvis uppnåtts då mängden användbar mätdata från sensorn med fri sikte mot sandbädden jämfört med hela mätperioden var lite. Men dessa korta mätningar har ändå visat att sensorn kan mäta fluidiseringshöjden under drift.

Manuell justering av fluidiseringsluftflödet till luftdysorna i bädden gjordes inte eftersom pannan var under uppstartfas och gick på lägre last större delen av fältförsökperioden.

8 Rekommendationer

Rekommendationen är att denna teknikutveckling bör fortsätta då mätningar med SITRANS LR560 sensorn har visat god potential för att mäta sandbäddens rörelse on-line, vilket är direkt kopplat till fluidiseringen och kvantifiering av denna.

Följande frågor bör utredas innan fullskalig användning av metoden rekommenderas:

Mätvärdena med nivåmätningssensorn är en direkt mätning av en storhet som är mycket intressant för förbränningsprocessen vilket pekar på att tekniken här kan komplettera de befintliga teknikerna. För att göra detta krävs mer erfarenhet från det här nya sättet att mäta. Vidare behövs det en noggrannare beskrivning av kopplingen mellan de uppmätta värdena och de fysikaliska fenomenen av fluidiseringen som är relevanta för förbränningsprocessen i BFB processen.

Det finns behov av att kunna mäta på hela sandbädden. Eftersom SITRANS LR560 sensorn mäter på en liten och begränsad yta av sandbädden behövs utveckling av utrustning som möjliggör skanning av bädden. Denna utveckling ökar avsevärt nyttan av den testade tekniken.

En del av den framtida utvecklingen bör inriktas på ändringar i sandbäddens rörelsefrekvens som kan ge indikation på att sandbäddens tillstånd har ändrats på grund av t ex agglomerering. T.ex. kan ändring i bäddens rörelsefrekvens ge en indikation på att sandbädden har ändrat tillstånd, något som kan bero på agglomerering. Vidare behövs visualisering av dessa ändringar för att på ett enkelt sätt kunna användas för processuppföljning vid driften.

9 Förslag till fortsatt forskningsarbete

Fortsättningen av detta forskningsarbete bör fokusera på följande:

- Att undersöka möjligheten att utöka mätningens uppdateringshastighet av sensorn SITRANS LR560.
- Tester och/eller fördjupad dataanalys med syfte på noggrannare beskrivning av relationen mellan uppmätta värden och de fysikaliska beskrivningarna av fluidiseringsfenomenet.
- Långtidsmätningar i fält med en modifierad SITRANS LR560-sensor med syfte att bygga upp erfarenhet av kvantifiering av bäddfluidisering och hur fluidisering ändras vid bildandet av agglommerat.
- Undersökning/utveckling av skanningstekniker för sensorn så att den kan täcka en större yta av sandbädden.
- Utveckling av visualiseringsverktyg för att utöka användbarheten vid driften i anläggningen. Fokus bör ligga på bäddhöjd och bäddstatus.

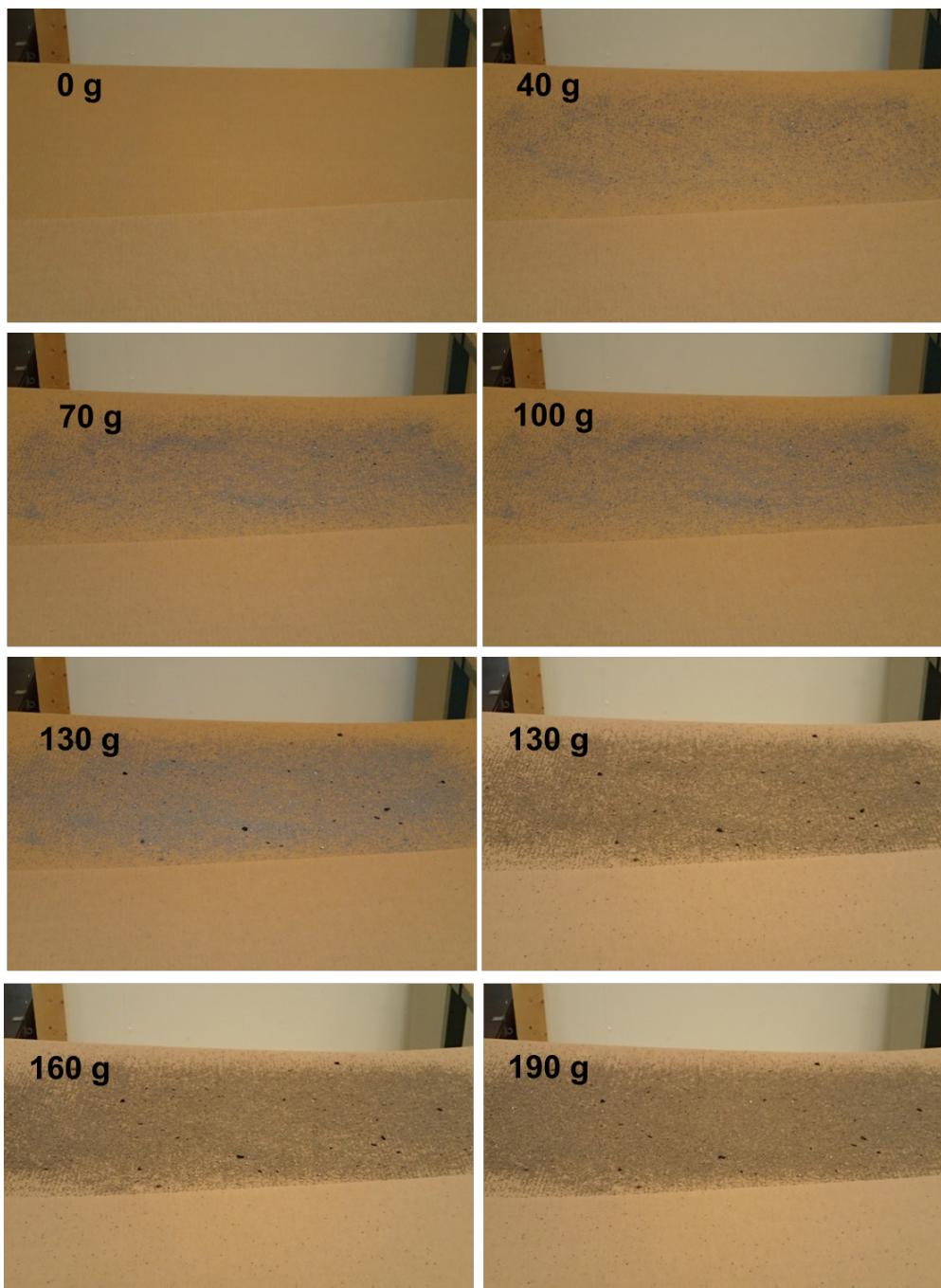
10 Litteraturreferenser

- [1] Zintl F, Ljungdahl B; TPS BRANCHFORSKNING FÖR ENERGIVERK 98/99
Sintring i FB och CFB – utveckling av prediktiv metod samt test av additiv och
sameldning, Värmeforskrappport 712, Stockholm, 2000
- [2] Eriksson M, Wikman K, Berg M, Öhman M; Effekten av fluidiseringshastighet och
kornstorlek på agglomereringsrisk vid biobränsleeldning i FB-pannor,
Värmeforskrappport 890, Stockholm, 2004.
- [3] Brodén H, Berntsson M, Herstad Svärd S, Kjörk A; Erfarenhetssammanställning från
konverterade fluidiseradbädd-pannor inom skogsindustrin, Värmeforskrappport
1181, Stockholm, 2011.
- [4] Ljungdahl B, Zintl F; TPS BRANCHFORSKNING FÖR ENERGIVERK 99/00 RTflis
och rötslam. Problemidentifiering relaterad till bäddsintring och emissioner
vid eldning i FB, Värmeforskrappport 753, Stockholm, 2001.
- [5] De Geyter S, Eriksson M, Öhman M, Nordin A, Boström D, Berg M; Skillnader i
bäddagglomereringstendens mellan alternativa bäddmaterial och olika mineraler
i natursand, Värmeforskrappport 920, Stockholm, 2005
- [6] Davidsson K, Eskilsson D, Gyllenhammar M, Herstad Svärd S, Kassman H,
Steenari B-M, Åmand L-E; Ramprogram – Åtgärder vid samtidig minimering av
alkalirelaterade driftproblem, Värmeforskrappport 997, Stockholm, 2006
- [7] Gyllenhammar M, Herstad Svärd S, Davidsson K, Åmand L-E, Steenari B-M,
Folkesson N, Pettersson J, Svensson J-E, Boss A, Johansson L, Kassman H;
Ramprogram – Åtgärder vid samtidig minimering av alkalirelaterade
driftproblem, Etapp 2, Värmeforskrappport 1037, Stockholm, 2007
- [8] Petersen M, Badié S, Moëll M, Luengo C; Utveckling av mätmetoder för
bäddövervakning av fluidbäddar i kraftvärmeverk, Värmeforskrappport 1209,
Stockholm, 2012.
- [9] <http://www.solidsinstruments.nl/wp-content/uploads/Siemens-LR560-cat2.pdf>
- [10] Se "Technical information" under <http://www.endress.com/en/Tailor-made-field-instrumentation/level-measurement/Radar-Micropilot-FMR57>

Bilagor

A Laboratoriemätning

Här visas en bildserie som visar sanden och mängden i gram på wellpappytan vid laboratieförsöket redovisade i avsnitt 5.1.

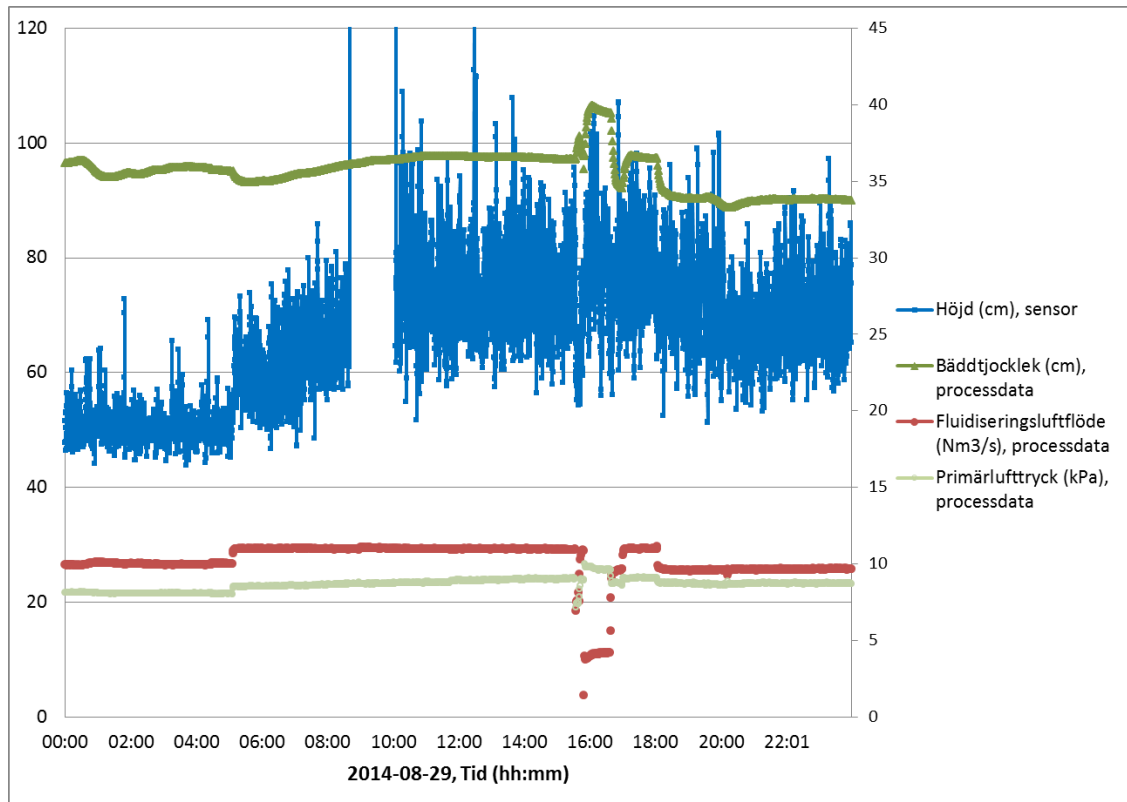


Figur 32. Bildserie som visar mängden sand som ligger på wellpappytan vid varje tagning. Bilder 0 g – 100 g är tagna med blix. Bilderna med 130 g sand är tagen med blix för bilden till vänster och utan blix för bilden till höger. Bilder med 160 g och 190 g är tagna utan blix.

Figure 32. Picture series that show the amount of sand that is on the cardboard surface. The images from 0 g – 100 g are taken with flash light. The images with 130 g sand are taken with flash light for the image to the left and without flash light for the image to the right.

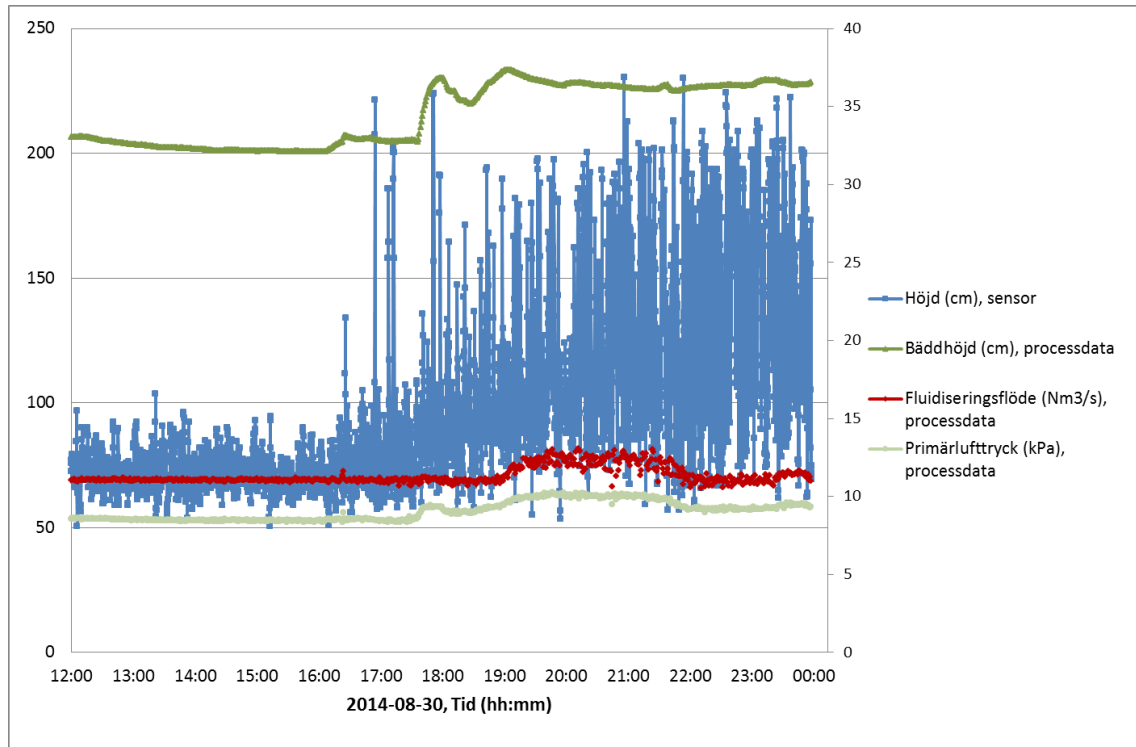
B Resultat från fältförsök

Här återges valda resultat från figurerna i kapitel 5.2 för bättre visualisering av data.



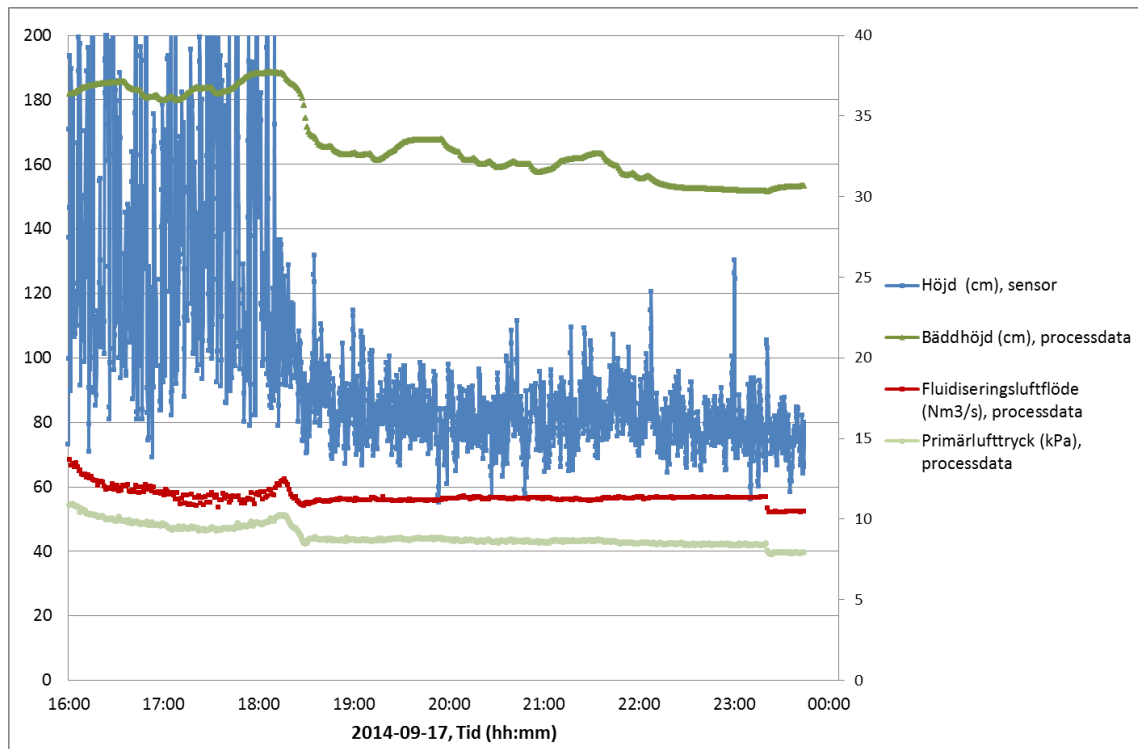
Figur 33. Data från figur 26.

Figure 33. Data from figure 26.



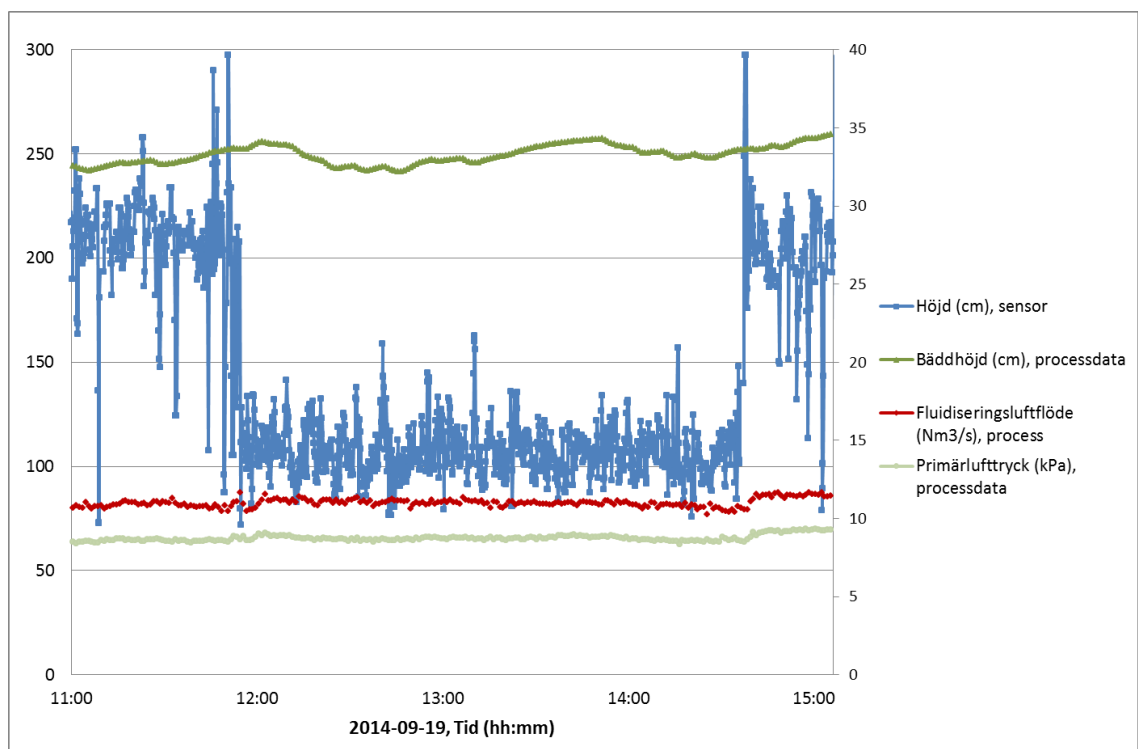
Figur 34. Data från figur 27.

Figure 34. Data from figure 27.



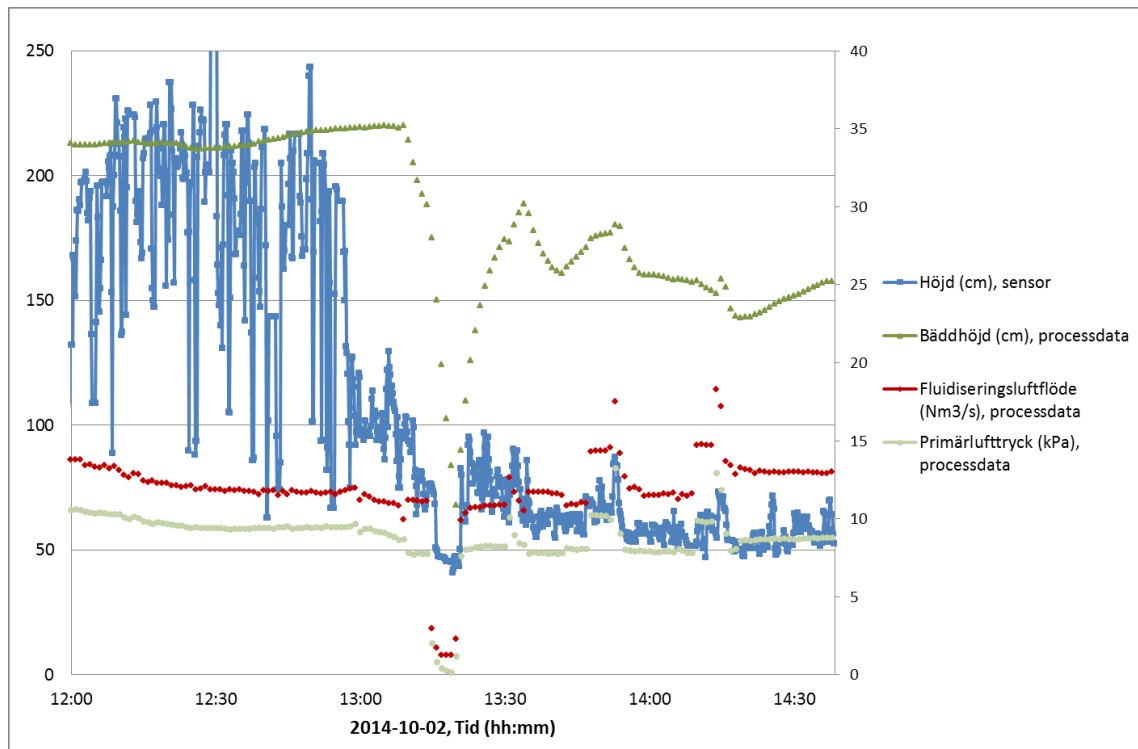
Figur 35. Data från Figur 28.

Figure 35. Data from Figure 28.



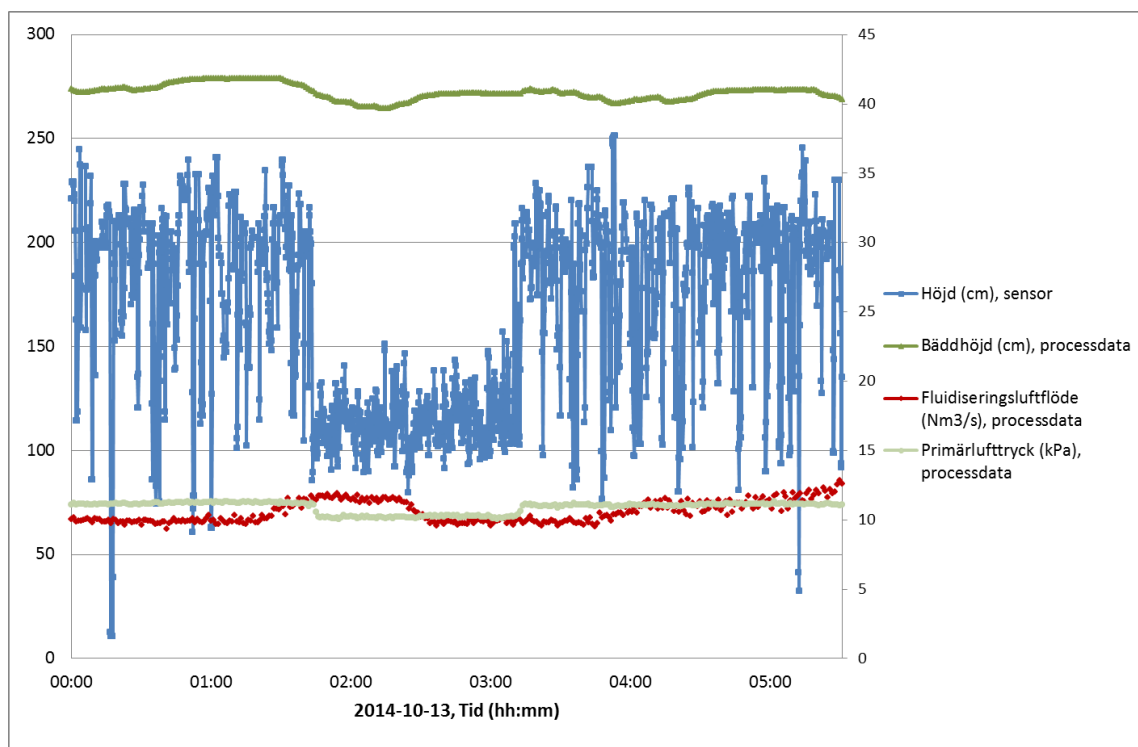
Figur 36. Data från figur 29.

Figure 36. Data from figure 29.



Figur 37. Data från figur 30.

Figure 37. Data from figure 30.



Figur 38. Data från figur 31.

Figure 38. Data from figure 31.

ON-LINE ÖVERVAKNINGSTEKNIK FÖR FLUIDISERAD SANDBÄDD I BFB PANNOR

Fluidisering av bäddsand är en central del av förbränningsprocessen i pannor med bubblande fluidiserad bädd, så kallad BFB. Nivåmätningsteknik baserad på mikrovågsradar har visat sig fungera för on-line mätning av sandbäddens rörelser och höjdnivå vid fluidisering under drift. Tekniken gör det möjligt att kvantifiera sandbäddens rörelsehastighet vilket skulle kunna användas för att kvantifiera fluidiseringen av en sandbädd.

Resultat av fältförsök som genomfördes i BFB pannan P7 i Jordbro kraftvärmeverk visar att under de tidsperioder som sandbädden kunde mätas, uppmättes rörelserna av den fluidiserade sandbädden och dess höjd under drift. Jämförelse mellan data från sensorn för nivåmätning och relevant data från processen har utförts. Slutsatsen är att tekniken har god potential för on-line övervakning av fluidiseringsstatus av sandbädden.

Ett nytt steg i energiforskningen

Energiforsk är en forsknings- och kunskapsorganisation som samlar stora delar av svensk forskning och utveckling om energi. Målet är att öka effektivitet och nyttiggörande av resultat inför framtida utmaningar inom energiområdet. Vi verkar inom ett antal forskningsområden, och tar fram kunskap om resurseffektiv energi i ett helhetsperspektiv – från källan, via omvandling och överföring till användning av energin. www.energiforsk.se



Energiforsk