

Homogenisering och segregering av mixade biobränslen

Rolf Njurell, Markus Jansson



Homogenisering och segregering av mixade biobränslen

Homogenization and segregation of mixed biofuels

Rolf Njurell, Markus Jansson

A12-214

Förord

Detta projekt har finansierats av Värmeforsk och Energimyndigheten samt genomförts inom forskningsgruppen för anläggnings- och förbränningsteknik.
En referensgrupp bestående av följande personer har följt projektet:

Rikard Norling	Swerea KIMAB
Gert Karlsson	Vattenfall AB
Per Ivansson	Grontmij AB

Vi vill rikta ett stort tack till:

ENA Energi AB i Enköping som ställt sin anläggning, personal och bränsle, inklusive transporter, till förfogande.

PulpEye AB som bistått vid analys och datasampling.

SCA Ortviken AB som bistått med sin Scanship analysator.

SCA Research som upplåtit sitt laboratorium för siktning mm.

Mölnadal Energi AB som ställt anläggning och personal till förfogande.

Vi vill även rikta ett tack till professorerna

Bengt Andersson Chalmers
Erik Dahlqvist Mälardalens Högskola

för deras stöd, tips och råd.

Göteborg 2014

Rolf Njurell, Markus Jansson

Abstract

Denna rapport redovisar de resultat som framkommit vid analys av manuell homogenisering av mixade fasta bibränslen. En datorsimulering av homogenisering i silo är även redovisad, därtill finns en beskrivning av segregeringsprinciper relaterade till bränslehantering. Med mixade bränslen menas här att de består av två eller flera sortiment med olika egenskaper.

Sammanfattning

Detta Värmeforsksprojekt avser att studera manuell homogenisering på en bränsleplan och i en mottagningsficka samt datorsimulera uppträdet hos innehållet i en silo. En litteraturstudie m.a.p. segregering har gjorts, som analyserats och kopplats till aktuella situationer för bränslehantering vid Värmeverk

Bränslets inköpskostnad svarar mot 50 % av ett värmeverks kostnad. Det är därför viktigt att hanteringen av bränslet sker på ett sådant sätt att extrakostnader undviks och att anläggningen i sin helhet har en hög verkningsgrad.

Värmeforsk har som nuvarande målsättning att ta fram kunskap som bidrar till att öka effektiviteten för befintliga och nya energianläggningar. Detta projekt utgör en sådan del i huvudområdet "Effektivt anläggningsutnyttjande".

Målgruppen är konsulter, anläggningsleverantörer samt driftsansvarig personal vid förbränningsanläggningar.

Projektet har genomförts som praktiska försök samt med CFD simulering av siloinnehållet. De fem vanligaste segregeringsorsakerna beskrivs samt kopplas till var de kan uppstå i anläggningar.

Några kvantitativa mått på homogenisering har inte angivits i rapporten. Det är inte praktiskt möjligt med den teknik som står till buds. Däremot har modeller skapats på det som kan analyseras och ytterlighetsgränser skapats för manuell homogenisering. CFD-simulering redovisas med bilder från fyllning och tömning av silo, samt med en diskussion om vad som händer.

Stackhomogenisering kan fungera mycket bra med de restriktioner som beskrivs i rapporten, inte minst proveldningen stöder detta. Homogenisering i mottagningsficka fungerar också med beskrivna restriktioner. Det går inte att ge ett entydigt svar om homogenisering i silo. Anläggningar som har sådana och avser att elda en besvärlig bränslemix med risk för agglomerering och askpåslag bör utföra homogenisering innan silon och provelda innan införandet av mixen.

Det finns anläggningar som i dag homogeniserar i stack och mottagningsfickor, men det har fram tills nu inte funnits någon redovisad publik utredning. Även om resultatet inte kan kvantifieras ger det ändå en antydning om vad som kan åstadkommas.

Kunskap om homogenisering finns i litteratur, forskningsrapporter mm. och är ofta relaterad till annan hantering än biobränslen vid värmeverk.

Det har gjorts försök att koppla kunskapen den verklighet som värmeverken lever i och detta kan ge stöd vid om- och nybyggnad.

Nyckelord: homogenisering, segregering, bränslehantering, förbränning samt anläggningsteknik.

Executive Summary

This project aims to study manual homogenization on a fuel yard and in a receiving pocket. It also includes a computer simulation on the fuel behaviour in a silo. In addition a literature survey has been performed regarding segregation, and analysed with respect to fuel handling at CHP plants.

Fuel cost correspond to half the turnover of a CHP plant, it is therefore important not to cause extra costs due to improper fuel handling and in addition that the plant has a high performance efficiency.

The Thermal Engineering Research Association has as a goal to increase the knowledge on how to raise the efficiency in CHP plants. This project is a part of the main area “Effective use of a power plant”

The target group are consultants, plant suppliers and operating personnel at CHP plants.

The project has been implemented through practical trials and CFD simulation of the content in a storage silo. The five most common causes of segregation and how they are affecting segregation have been described at a CHP plants fuel handling.

Any quantitative results on homogenization have not been given in this report. It is not possible with the analytic tools that are available. Instead models have been set up showing limitations what can be analysed at the trial. The CFD simulation presented as figures for filling and emptying the silo, followed by a discussion on what will happen.

Homogenization in a pile can work well with the restrictions given in the paper. That is supported by the combustion test that was performed. Homogenization in a receiving pocket will also work, with restrictions how to load the pocket, as given in the paper. It is not possible to give a specific answer if homogenization in a silo will occur. Plants with intentions to fire difficult fuels, with risk for agglomeration and heavy ash adhering on to super heater tube is recommended to make the homogenization outside the silo. Then perform a test run prior to implement the fuel mix.

There exist plants that perform homogenization in pile and receiving pocket. But no investigation has previously been published. Even if this project cannot quantify the result it will give some indication on what can be achieved.

Studies on homogenization are described in a number of papers and are mostly related to other circumstances than biofuel at CHP plants.

The project has been performed within four parts

- Homogenization in a pile
- Homogenization in a receiving pocket
- Homogenization in a silo
- Segregation

The two first parts has been achieved as practical trials. The silo part has been done by computer simulating and the last part is a literature review with respect to biofuel handling at CHP plants.

The fuel used in the trial was chipped stem wood 50 %, sawdust 25 % and recovered wood 25 %. The recovered wood was contained a high percentage of chlorine. The volumetric figures were converted to weight according to respective bulk density from reference sample. The result is shown in all diagrams as Ref.

Homogenization in a pile

The pile was built up according to two standard methods, the Chevron- and the Strata pile with one exception, the Strata pile was built on the side of the chevron pile. Figure 1, shows the cross section of the standard piles. The actual pile is shown in figure 3. The pile up is shown in figure 4 – 6 where the bottom layer is chipped stem wood, and the following layers are recovered wood, chipped stem wood, sawdust, chipped stem wood etc. This method was continued until the pile was completed and contained approx. 550 m³. Figure 9 shows the completed pile after starting the reclaim. Note the different layers and the problem to create layers of the same thickness.

There were six buckets taken from the pile, 10 m³ each, three from the Chevron and Strata respective. From each bucket three 20 l samples were taken.

Homogenization in a receiving pocket

At the trial plant there was a receiving pocket with 4x4 m in cross section and 24 m long, with a drag chain conveyor in the bottom. Figure 10 shows the principal of the pocket reclaimer. Two spike rollers (figure 11) were mounted at the outlet to prevent overloading of the conveyor.

The trial was planned to include four sets A,B,C and D but was later reduced to three, the C trail was taken out. In each set four layers of fuel was built up, figures 12 and 13.

From the belt conveyor, after the receiving pocket, two 20 l samples were taken from A, B and D trial.

Sample analysis

The fuel was analysed in a chip analyser with the possibility to measure all objects greater the 0,6 mm. The analyser can also detect the shape of an object. Figures 14 – 17 shows the analyser.

Chips from stem wood have a characteristic shape, figure 18, which was the base for the analysis. We called the chips with the edge shape “accepted chips”. The other coarse fuel was expected to not have this shape when produced by a crusher. Analysis the

reference samples showed the recovered fuel containing a small amount of pieces with the same edge shape as chips from stem wood.

To solve this problem we did set up two models # 1 and # 2. In the first one the amount of “accepted chips” was reduced by the amount of the accepted chips in the recovered fuel. In the other model there was no reduction. We did then calculate the amount of stem wood chips as a relation of the samples and the reference sample.

The result from the analysis is shown in diagram 1 – 4 for the pile trial and diagram 10 – 15 for the receiving pocket trial.

The analyser is not optimized for analysing small particles e.g. sawdust. For that reason one sample from each bucket was test screened in a mechanical screen. The result is presented in diagram 5 and 6.

Neither of the models #1 and #2 are showing the true value but somewhere in between we assumed the answer to be. The amount of fines given by the analyser was underestimated according to the mechanically test screening.

If taking the trial mean value of the two models and adjusting the fines content according to the mechanical test screening we will probably have the best result that can be achieved with the available analysis methods. The result is given in diagram 7 for the pile trial and diagram 16 for the receiving pocket trial.

The figures given in diagram 7 represents 60 m³ of fuel. This is to large volume to comply with our definition of a homogenised fuel, that all properties from each assortment shall be represented at the same time during combustion. For that reason we did a new calculation bases on each bucket, 10 m³. The figures are given in diagram 8 and 9.

The trial of homogenization in pile shows that the method is straightforward and a trained operator of a front end loader can easily built a homogenizing pile. The result is good and the trial combustion verifies that.

To get an acceptable homogenizing in a receiving pocket it is recommended to put the same assortment in layers in the pocket. Then you will have the same mixture on the conveyor after the pocket.

Test combustion

The recovered wood contained a high percentage chlorine. In a test combustion performed by the plant the content of HCl, in the flow gas, was measured to 150 ppm. After finishing the homogenization trial test combustion was performed on homogenised fuel. The fuel was fed by-pass the storage direct from the receiving bin to the surge bin in Boiler Island. Figure 27 shows the receiving pocket loaded with homogenized fuel. Figure 28 shows a screen dump of the combustion.

Homogenization in silo

Theoretically a slewing screw reclaimer, located in the bottom of a round silo, is feeding out a circle sector at a given time. If we divide the feeding rate for the same time with

the sector area we will as a result have the average thickness of the reclaimed fuel. If the slewing speed is high the thickness will be low and opposite with a slow slewing speed the thickness will be high. This is the base for some of the discussions in this chapter. The expression “first in – first out” aims the function of a silo, where the first fuel coming into the silo is the first one to be fed out. To achieve this, the thickness of the reclaimed sector should be two times the screw diameter. Modern screw reclaimers cannot achieve this, and will reclaim a very thick layer, resulting in a crater in the top of the silo. Figure 19 shows a typical topography of the silo content.

At the top of most silos a distributor is mounted with the purpose to spread out coarse material around the silo periphery. The slewing speed is approximately 2 rpm, and due to that relative high speed rotating symmetric silo content will be forming during filling of the crater.

The reference silo containing approx. 5000 m³ is 22 m in diameter and is the basis for the computer simulation. Figure 20 shows the silo with its content formed by the distributor. The silo is equipped with a 3-D level measurement device, with possibilities to capture pictures of the silo content. Such pictures are shown in figures 21 – 23. Figure 24 shows the screw reclaimer with its hood, to the left, containing the transmission and where the outlet is located. The screw shall be designed in a way that the capacity in any position shall be proportion to the square of the position's radius.

Computational fluid dynamics (CFD) is a part of the fluid mechanics where numeric methods are used to analyse the flow. In this thesis, the program Fluent from Ansys has been utilised.

This part of the project has been performed as a Master's Thesis within the Innovative and Sustainable Chemical Engineering programme titled "CFD Simulations of Silos Content, an investigation of flow patterns and segregation mechanisms". Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology. Author Markus Jansson, examiner Bengt Andersson.

Development of models for granular flow is an important area of research, since many flows in industry are in fact granular. Modelling of granular flow is complicated and it requires a deep understanding of the system to make sure that the most important phenomena are included. The behaviour of the particles varies with numerous parameters, where perhaps the most important property of granular flow is the volume fraction of particles. At low volume fractions particles behave very differently from when there are high volume fractions. At low volume fraction the interaction between particles is much like the one between gases. But when the Volume fraction is close to the packing limit it is almost static and bears a resemblance to that of a solid and when the volume fraction of the flow is moderate the particles behave much as a liquid. Granular flows are usually divided into dense and rapid regimes and are modelled with completely different approaches. Figure 25 shows a system containing all regimes in this thesis.

Simulations of multiphase flows can be done in different ways. In this Master's thesis it has been found most reasonable, due to the high loading and size of the equipment, to simulate the system using an Euler- Euler approach. The Euler-Euler approach means that all phases are modelled as fluids, with properties equivalent to those of the granular phase. Transport equations for each phase are solved and the sum of all volume fractions must be equal to one. A multiphase flow is modelled as a homogeneous mix of quasi-fluids within each cell, the cells average is used for calculations. The Euler-Euler model solves momentum and continuity equations for each phase; however it is also a necessity to specify how the phases interact.

Chapter 2.4.3 shows the equations that have been used in the simulations.

The mesh applied during adaption is shown in Figure 29. Notice how the mesh size has gradually decreased in areas closer to the air/wood interphase. In regions deeper into the pile the cell size is larger, since the need for small averaging volume is unnecessary due to the decreased gradients.

The result section 3.3.2 presents the simulation of a silo being filled, after that in section 3.3.3 the simulations of emptying the silo. In section 3.3.4 additional simulations of the system were computed to validate the models and investigate segregation effects. Finally, in section 3.3.5, result from the measurement of the actual silo is presented.

Simulations of filling the silo were analysed using the setup described in the method chapter, 2.4.3. During this part no wood was fed out of the silo. Figure 30 shows the filling procedure and you can clearly see the shape of the pile. The red colour represents granules at maximum packing and blue only air, other colours have an intermediate value. The residuals of the continuity equation were generally after each time step somewhere in-between 10^{-3} to 10^{-4} .

Figure 31 shows the values of frictional viscosity from the simulations, the red represents a maximum frictional viscosity of 105 Pa*s, typical values for a liquid have a viscosity of 10^{-3} and very viscous liquid may have values close to 1. This suggests that only the outer layers are moving.

Cell values of granular temperature is shown in figure 32, this plot shows that only the top few layers of the pile has a granular temperature. Only the top few layers are vibrating and the rest of the pile is still. The maximum value is at the top of the pile, where most of the particles land and cause vibrations.

After the silo is filled, the outlet is opened and the screw zone is set for feeding the wood out and no more wood is entering trough the inlet. The flow pattern is displayed in figure 33 and the change of the content is shown. The flow pattern shows the impact the screws initial capacity has. The material closer to the silo walls will be fed out to greater extent than the material in the centre.

Additional simulations to investigate effects of different factors were performed. Initially a study of the drag and turbulence is done for two different particles sizes. Then a simulation investigation how layers in the silos are deforming during reclaiming

of fuel was performed. In section 3.3.5 a validation of the models used against experiment was performed.

During the main simulations the interactions with the gas phase were neglected, to study the effect of these factors additional simulations were computed. It was decided to investigate the maximum particle velocity in vertical direction as well as the distance travelled in horizontally before impact. The Gidaspow and $k-\omega$ models were selected for drag and turbulent viscosity calculations. Particle diameters used were 2 cm and 3mm, this is to represent woodchips and sawdust. Table 1 show the result of that simulation.

As it would be a major benefit in predicting the mixing degree between two fuel layers a simulation with the different particles were computed. The particles are really the same but have a difference in temperature, temperature that is a property that is irrelevant for how the granules behave. The particles, with different temperatures, were fed into the silo one at the time to form layers. Three different temperatures were used and the layers formed can be seen in Figure 34. To reduce heat transfer between the layers the value for thermal conductivity and specific heating capacity was set to 10^{-9} [W/m*K] and 109[J/kg*K] respectively.

Figure 35 shows the vertical pressure in the silo during the filling process.

Figure 36 show the deformation of the different layers in the beginning of the reclaim. Deformation in the silo periphery occurs due to the relative high flow in this part of the screw. The deformation at the silo centre is a result of forces from the screw.

Figure 37 show the deformation of different layers at the end of the simulation. The level at the silo periphery is lowest some distance from the silo wall due to the high friction against the wall. The bottom layer just above the screw is moved into the silo centre due to forces from the screw. The resistance against the hood in the centre and the fuel at the other side of the silo are forcing the fuel to ascend.

Figure 38 show the particle movements in the silo. The outlet is to the left, through the hood, not shown in the picture. The movement in the screw is dominated, yellow colour followed by the layer above the screw. To the right the downstream at the silo periphery can be seen. The lowest velocity is in the middle of the picture and at the centre where the movements are going upstream.

The crater seen from the topologic pictures cannot be seen since the simulation is done in 2-D. The crater is formed by emptying the silo from the periphery.

To validate the models used in the main simulations a comparison with experiments by Jaeger and Nagel (1992) was done. In their experiment, a pile with granules with slopes at the internal angle of friction is produced. After that they tilt the pile to increase the angle beyond the maximum stable angle. With a high speed camera it was shown that only the outer ten particles were moving. To simulate this, the direction of gravity was changed instead of tilting the silo. The solid volume fraction and contour lines of the velocity are shown in figure 39. The steep change in velocity shows a clear resemblance to what the experiments showed. Each contour line represents 0.1 m/s.

To study the behaviour of a real silo, measurements were done on site. Figure 40 shows the curvature of the top fuel layer inside the silo. The real silo, differ from the simulated when it has both inflow and outflow simultaneously. The picture was taken when the silo was about 70% full. The screw is located at a position below where the crater has formed. An ocular inspection inside the silo clearly showed that the crater shape in these pictures is slightly wrong; the crater is actually located from the centre all the way to the wall in radial direction, otherwise the pattern is representative.

In real processes dealing with granular flows the granules are not perfect spheres and are not of the same size, this fact will lead to particle segregation. When mixing two fluids it usually result in a lower concentration gradient after it has been mixed than before. This is not always true when mixing two granular phases; the added energy may actually cause the particles to separate instead of homogenize. There are numerous mechanisms for segregation but there are five major contributors that are accounting for about 80 % of the segregation.

- Kinetic sieving
- Trajectory
- Angel of internal friction
- Fines fluidization
- Air currents

Kinetic sieving: The first phenomena generating this separation is when a mixture of particles with different sizes is agitated the smaller particles tend to move down the bulk, due to particles in motion will not have the same velocity and therefor gaps in between particles will be formed. Small particles needs a smaller gap to fit inside and will be pulled down by gravity to greater extent, this will cause segregation of particle sizes. This segregation is referred to kinetic sieving. Distinct element method (DEM) simulations by Jullien Meakin and Pavlovitch (1992) and experiments by Canoli and Manga (2005) have both confirmed this separation due to size. Canoli and Manga also show that not only size is important but also the material properties.

Trajectory: Particles may have different shape, size, density etc. The difference in these properties will result in different frictional forces between the particle types, both for the drag- and particle-particle friction forces. Since smaller particles have higher area to volume (and mass) ratio, smaller particles will be influenced to larger extent by frictional forces resulting in separation of sizes. The area to volume ratio also varies due to the shape of particle; that is a separation of shapes will arise due to this phenomenon. A DEM-simulation by Jullien and Meakin (1990) shows this separation of particle sizes when forming a pile, the simulations show how the large particles roll of and accumulates at the borders of the pile. In the same article Jullien and Meakin do a simulation inside a cylindrical vessel to investigate if size segregation does occur, the result clearly show that the concentration of large particles increase in radial direction. This separation is due to the different trajectories when falling and rolling during the filling procedure.

Figure 41 is showing typical segregation due to kinetic sieving. Figure 42 shows both kinetic sieving and trajectory segregation.

Angle of internal friction: The third effect is that different materials in the same pile may have different angle of internal friction. This effect causes the material with lower angle of internal friction to roll or slide off the pile. Figures 45 and 46 show examples of segregation, due to different internal friction.

Fines fluidization: The fourth effect is fines fluidization. This effect is important when a mixture has a high share of small particles. The small particles form a layer that can be penetrated by a larger particle flowing towards the pile. This causes the small particles to top of the container and to dust.

Air currents: Air current may cause the fine fractions to get airborne and follow the air flow and accumulate in some regions.

To understand where different fractions are landing in the silo a calculation in Ansys Fluent program was performed. The same method was used as for the earlier simulations. Particle sizes used in the calculation were $40 \times 40 \times 10 \text{ mm}$ and $35 \times 7 \times 5 \text{ mm}$ converted to sphere with the same volume and spheres of 1 and 3 mm diameter.

Formulas used in the calculation are shown in chapter 4.6.

Figure 47 shows segregation in a pile with central inlet, compare with figure 46. If we take figure 47 and place it with the top 3 – 5 m from the silo centre we will have the same situation as shown in figure 15. On top of figure 47 we place the vector picture shown in figure 38. The result is shown in figure 48. This will be the reclaim situation, fuel is fed out from the periphery and the sector containing this fuel will more or less be emptied. As the screw moves, a new sector will be emptied with the same result. It will be different if the silo has high or low silo volume but in principle it will be the same. The kinetic segregation in the area shown in figure 47 will occur both in radial and circular distance.

Key-word: homogenization, segregating, fuel handling, incineration and plant technology.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	BESKRIVNING AV FORSKNINGSSOMRÅDET	4
1.3	FORSKNINGSUPPGIFTEN OCH DESS ROLL INOM FORSKNINGSSOMRÅDET	4
1.4	MÅL OCH MÅLGRUPP	5
2	PROJEKTGENOMFÖRANDE	6
2.1	HOMOGENISERING I STACK	6
2.2	HOMOGENISERING I MOTTAGNINGSFICKA	11
2.3	ANALYS AV PROVER FRÅN DE PRAKTISKA ETAPPERNA	14
2.4	HOMOGENISERING I SILO	18
3	RESULTAT	28
3.1	RESULTAT STACKHOMOGENISERING	28
3.2	RESULTAT HOMOGENISERING I MOTTAGNINGSFICKA	37
3.3	RESULTAT HOMOGENISERING I SILO	41
3.4	DISKUSSION HOMOGENISERING	51
4	SEGREGATION	56
4.1	KINETISK SIKTNING	56
4.2	TRAJEKTORIAL SEGREGERING	59
4.3	INRE FRIKTIONSVINKEL	60
4.4	FLUIDISERING	62
4.5	VIND	63
4.6	TRAJEKTORIAL SEGREGERING, EN SIMULERING	63
5	SLUTSATSER	67
5.1	FORTSATT ARBETE	67
6	REKOMMENDATIONER OCH ANVÄNDNING	68
7	REFERENSER	69
8	BILAGA 1	1
8.1	MANUELL KALKYLERING	1
8.2	BETECKNINGAR	1

1 Inledning

Detta Värmeforskningsprojekt avser att studera två aspekter som påverkar bränslets kvalitet. Aspekterna homogenisering och segregering kan dramatiskt både förbättra och försämma en bränslemix.

1.1 Bakgrund

Anläggningarnas kostnad för bränsle uppgår till ca 50 % av den totala omsättningen. Det är därför naturligt att man, om det finns tekniska möjligheter, söker efter alternativa bränslen. Skogsbränsle (grot) är egentligen ett ganska homogent bränsle även om många aktörer, i olika sammanhang, hävdar motsatsen. Både värmevärde och innehållet av oorganiska ämnen varierar inom snäva gränser. Den största variabeln är fukthalt och beror helt av hur bränslet har hanterats. På större anläggningar är det mindre vanligt att man endast eldar grot, utan bark och sågspån är vanliga i bränslemixen. Från myndighetshåll önskas en ökad användning av salix och jordbruksgrödor. Returträ blir också vanligare och tillför nya överväganden. Beroende av tillgång och efterfrågan kan returträ med mycket varierande egenskaper dyka upp på marknaden. I dessa sammanhang blir en fungerande homogeniseringsteknik av största betydelse för en lyckad bränslemix och en kontrollerad förbränning.

1.1.1 Eldning av mixat bränsle

I de flesta större FB-pannor eldas en varierande mix av fasta biobränslen. Även torrflis kan förekomma med huvudsakligt syfte att kompensera för bränslen med hög fukthalt. Storleksfraktionen av olika bränslesortiment kan variera inom ett stort spann. t.ex. P 63 med $70 \% < 63 \text{ mm}$ till sågspån med i princip allt $< 3 \text{ mm}$.

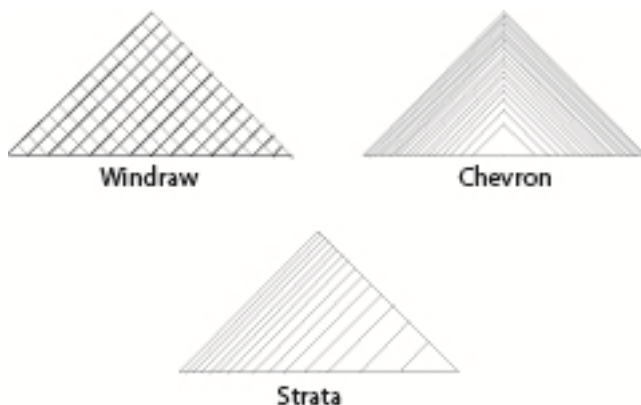
En stor andel finfraktion är negativt då det kan leda till en sänkning av bäddtemperaturen om det inte samtidigt finns grövre fraktioner med i bränslematningen. Problemet uppstår genom att förbränningen av finandelen förskjuts uppåt i eldstaden. En högre temperatur i övre eldstaden kan också leda till slagging, ökad andel oförbränt i flygaskan samt ökade emissioner av CO och NOx. Trots detta blandas sågspån ofta in i bränslemixen då det är ett relativt billigt bränsle.

Variationen av träbränslets värmevärde är vid konstant fukthalt försumbar. Det som påverkar förbränningen är variation av bränslets fukthalt och då i det korta perspektivet. Vid studier av bränslets fukthalt har det konstaterats att fukthalten kan variera upp till 20 % inom en lastbärare. Inom en tidperiod på exempelvis ett par månader kan bränslets fukthalt variera mellan 25 till 70 %.

1.1.2 Homogenisering

Vid kolförbränning och inom mineral- och cementindustrin är homogenisering mycket vanlig. Stenkol kan ha stora variationer i ask- och svavelhalt och inom mineralhantering kan koncentrationssvängningarna vara stora. Cementindustrin använder olika typer av kalk. Dessa industrier har tillsammans med leverantörer utvecklat ett antal tekniker för homogenisering. De bygger i de flesta fall på automatiserade funktioner där stackbyggare och utmatare arbetar med långa linjära stackar. Tekniken har på senare tid

utvecklats till runda stackar där stackbyggnad och utmatning kan ske samtidigt. Dessa typer av stackar används bl.a. i USA för flislagring vid pappers- och massaindustrin.



Figur 1. Homogeniseringsmetoder.
Figure 1. Methods of homogenization

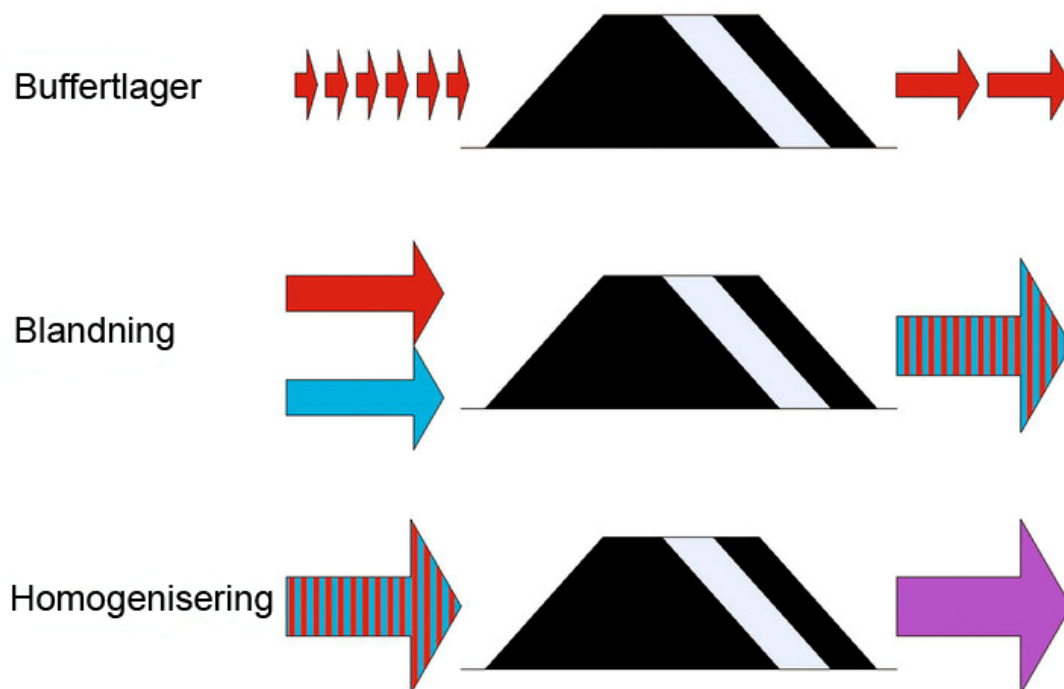
Figur 1 visar tvärsnittet hos de homogeniseringstekniker som används inom industrin beskriven ovan. Windraw ger lägst segregering av stort material men kan inte praktiskt användas vid traktorhantering. Både Chevron och Strata teknikerna kan användas för traktorstödd lagerhantering av biobränsle. Det är sparsamt med forskningsrapporter rörande metoderna vilket kan bero på konkurrensskäl eller att tekniken är mogen.

Vid homogenisering i silo antas en rotations-symetrisk form av Chevron metoden.

Inhomogent bränsle ger upphov till störningar i pannans drift. De vanligaste är:

- Sänkt bäddtemperatur pga. för lite grovt eller för fuktigt bränsle.
- Hög bäddtemperatur med sintringsrisk förorsakat av hög bäddtemperatur.
- Förbränning i fribord och cyklon förorsakat av hög finfraktionsandel.
- Temperaturgradienter i bädden orsakade av ojämn matning eller segregering.
- Korrosion till följd av rökgaskemin, ingen utspädningseffekt av mixade bränslen.
- Agglomerering beroende på höga alkalikoncentrationer.
- Sintring av bädd orsakat av torrt bränsle i kombination med alkali.

För att kunna påverka dessa störningar måste homogeniseringen vara så bra utförd att alla bränsleegenskaper samverkar i princip samtidigt.



Figur 2. Skillnad mellan buffertlager, blandning och homogenisering.

Figure 2. The difference in between buffert storage, mixing and homogenization.

Figur 2 visar tre typer av lager. Det översta är ett mycket vanligt lager vid svenska anläggningar. Ett antal inkommande leveranser buffras och utleveransen är batch-vis eller kontinuerlig. Avsikten är att skapa tillräcklig reserv av bränsle samt jämna ut svängningar i leveranser. Någon förbättring av stackens homogenitet sker inte.

I det mellersta lagret sker någon form av blandning mellan bränslen med olika egenskaper. Det utgående bränslet består av relativt stora enheter med varierande egenskaper, men når inte kvalitetsnivån för att kallas homogenisering. Även denna lagertyp förekommer vid förbränningsanläggningar.

Den nedre figuren illustrerar homogenisering där funktionen har en systematisk förändring av inkommande- till utgående flöde. Det utgående bränsle bör uppfylla kravet att alla bränsleegenskaper skall samverka samtidigt vid förbränningen. Det mätbara målet med homogenisering är att reducera distributionens standardavvikelse.

På grund av ökad brandrisk skall blandat eller homogeniserat bränsle inte långtidslagras.

Homogeniseringseffekten (E) uttrycks som $E = S_{in}/S_{ut}$, där S representerar standardavvikelsen för det inblandade sortimentet.

1.1.3 Segregering

Allt granulärt material som har en fraktionsspridning utsätts för segregering. Rörelser i materialet separerar större och mindre fraktioner som ansamlas i kluster eller utefter stackens topp, botten eller sidor. Ett aldrig så väl homogeniserat material segregerar vid oaktsam hantering. Bristande kunskap och stark konkurrens mellan leverantörer av

utrustning tillsammans med dåligt specificerade funktionsupphandlingar har lett till att det i dag finns anläggningar som byggts utan hänsyn till segregering problematik.

Det utvecklas idag teknik dels inom fukthaltsmätning, mätning av oorganiska ämnen i bränsle, men också inom reglersystem vilket innebär att pannor kommer kunna styras med betydligt större precision i framtiden. En förutsättning är dock att kunskapen om hur bränslet uppför sig i olika led utvecklas och att bränslehanteringssystemen förbättras och medverkar i rätt riktning. Studier av homogenisering/segregering bör därför kunna bidra till ökad kunskap kring bränslehanteringssystem och hur dessa bör utformas.

1.2 Beskrivning av forskningsområdet

Flertalet Värmeforskrapporter nämner att det finns en problematik kring homogenisering och/eller segregering men eftersökningar har enbart funnit en rapport nr 661, som diskuterar detta vidare. Rapporten belyser vikten av en homogen bränslemix men går inte djupare in på tekniska lösningar.

Gällande segregering påtalar rapporten att ”segregering undviks i möjligaste mån genom lämplig lagring av bränslen som annars lätt separerar”. Vad som anses vara ”lämplig lagring” diskuteras inte vidare vilket styrker behovet om ytterligare utredningar. En av rapportens slutsatser är att anläggningspersonalen inte har tillräckliga kunskaper om vilka tekniska lösningar som finns för att lösa segregeringsproblematiken. Därför skulle en sammanställning av svårigheter och lösningar vara till nytta för anläggningsansvariga.

Rapporten beskriver mycket kortfattat att bränsle kan blandas på planen innan inmatning men att denna metod ofta inte är optimal. En lösning som föreslås är att avtala med bränsleleverantören om vilka krav som ställs på bränsleleveransens homogenitet. Det föreslås också vidare studier kring vilka parametrar som påverkar bränsleblandningen och hur de kan förbättras.

En annan rapport nr 907 diskuterar bränslets snedfördelning vid inmatning till pannan. Variationerna i mätresultaten (siktanalys av bränsleflödet i stupen) är med stor sannolikhet orsakade av segregation. Rapportens slutsats är att stråkbildning och höga emissioner korrelerar med snedfördelningar i bädden. Framför allt är det CO-halterna som ökar vid snedfördelning. Dessutom ser det ut som om snedfördelning av bränsle ger upphov till ett mindre stabilt uppträdande hos pannan, reglermässigt.

1.3 Forskningsuppgiften och dess roll inom forskningsområdet

Värmeforsk har som målsättning för 2012-2015 att ta fram kunskap som bidrar till att öka effektiviteten för befintliga och nya energianläggningar. Detta projekt kan utgöra en sådan del i huvudområdet ”Effektivt anläggningsutnyttjande” då det syftar till att öka kunskaperna kring optimal hantering av mixade biobränslen.

1.4 Mål och målgrupp

Detta Värmeforskprojekt syftar till att tydliggöra homogenisering och segregering i bränslehanteringen och vilken påverkan dessa kan ha på en fluidbäddpannas drift. Kvalitetsskillnaden i bränslematning mellan några olika system skall också beskrivas.

Homogenisering i silo skall åskådliggöras och vilka krav som ställs på utrustningen för att homogeniseringen skall bli verklig ska utredas. Resultaten från en manuell homogenisering ska också fastställas.

Projektet ska också omfatta segregeringsteori applicerad på typiska hanteringssituationer.

Rapporten ska kunna användas som underlag för framtida om- och nybyggnader av bränslehantering för kraft- och värmeverk. Den skall även kunna användas för att förbättra dagens manuella metoder för homogenisering.

Målgruppen är konsulter, anläggningsleverantörer samt driftsansvarig personal vid förbränningsanläggningar.

2 Projektgenomförande

Projektet är uppdelat i ett antal fristående etapper:

- Homogenisering i stack.
- Homogenisering i mottagningsficka.
- Homogenisering i silo.
- Segregering

De två första etapperna har utförts som praktiska prov medan den tredje har utförts som en simulering med en befintlig silo som modell. Segregeringsavsnittet behandlas teoretiskt.

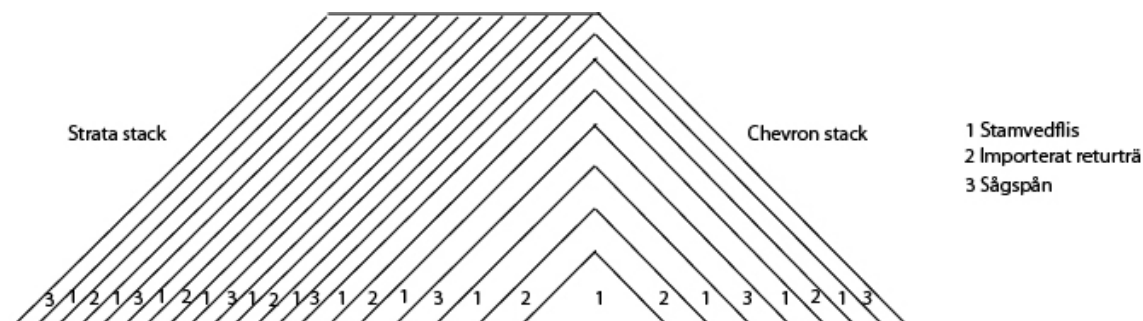
2.1 Homogenisering i stack

Att undersöka homogenisering med avseende på fukthalt är komplicerat, då det behövs någon form av märksystem som symboliserar de olika ingående fukthalterna. Dessa märksystem är vanligen vattenlösliga isotoper, men ur arbetsmiljösynpunkt är isotophantering i det närmaste omöjligt, vid öppen hantering av bränsle. Projektet har därför valt att använda ett markörbränsle med snarlika egenskaper som grot men med en avvikande färg. Det andra markörbränslet var sågspån.

Etappen utfördes vid ENA Energi AB i Enköping. Till förfogande utöver hanteringssystem och bränsleplanen fanns tre olika bränslesortiment:

- Flisad stamved.
- Sågspån.
- Importerat returträ.

En stack på ca 550 m³ byggdes med hjälp av en hjullastare med en skopvolym på 10 m³.



Figur 3. Tvärsnitt av försöksstack
Figure 3. Cross section of the pile in the trial.

Innan försöket bestämdes att det skulle byggas en stack baserad på de två metoderna Chevron och Strata. Att Chevron togs med var för att se om de något tjockare lager, som finns i Chevron, har någon praktisk inverkan. Strata-metoden ger fördelen att stacken kan byggas ut i två riktningar i markplan, vilket Chevron inte medger.

Figur 3 visar försöksstacken som innehöll ca 550 m³. Till höger i bild ligger Chevronstacken som en stödmur och Stratastacken sträcker sig till vänster med början där stacken har full höjd.



*Figur 4. Chevronstacken byggs upp med stamvedsflis som första lager och importerat returträ ovanpå.
Figure 4. The Chevron model is piled up with stem wood chip at the bottom layer and residue wood at top.*

Initialt lades två högar om vardera 10 m³ ut bredvid varandra. Därefter fylldes markörbränsle växelvis med stamvedsflis på i högens rasvinkel enligt det schema som redovisas i figur 3. Notera den stora färgskillnaden mellan stamvedsflis och importerat returträ, vilket initialt ansågs vara till fördel, med som sedan skapade problem i mätningarna.

Varje skopa rymde ca 10 m³ och hela volymen fördelades på underliggande högs sluttande sida. Det gav ett mycket tjockt skikt i bottendelen som sedan avsmalnade för varje nytt lager så att det yttersta lagret i Chevronstacken i medeltal blev 0,3 m. Även för Stratastacken blev skiktjockleken i medeltal 0,3 m.

När höjden blev för stor för hjullastaren lades bränslet framför stacken, figur 5 och sköts upp med en stackningsbom, figur 6. På detta sätt skapades homogeniseringsskikten i stacken. Stackningen utfördes helt på de praktiska villkor som gällde, ingen korrigering

för eventuella misstag, inga hjälpmedel för att styra bommen. Förarens fingertoppskänsla var helt avgörande för stackningsresultatet. Dock var kontrollen av sortimenten i de olika skikten 100 % -ig. Försöket skulle spegla vardagen på en bränsleplan så mycket som möjligt. I figur 5 och 6 syns ett lager med sågspån läggas upp.



Figur 5. Bränsle som skall stackas läggs framför stacken

Figure 5. Sawdust is position prior to be added to the pile as a thin layer.



Figur 6. Stackning med stackningsbom
Figure 6. Adding a thin layer of sawdust to the pile surface.



Figur 7. Chevronstacken klar.
Figure 7. Chevron pile completed.

Som framgår av figur 7 räcker inte bränslet i skopan för att täcka sidorna med homogeniseringslager. Det rekommenderas därför att bygga stackarna så breda som möjligt för att minimera fel från kanterna.



Figur 8. Den färdiga stacken bryts för provtagning

Figure 8. Braking up the pile for sampling.

Den färdiga stacken bryts och prover tas ut från varje skopa. Provvolymer var 20 l och togs i fallande ström från skopan. Tre skopor togs vardera ut från Chevron- respektive Strata sidan. Fem prover togs från varje skopa där de representerade olika positioner i skopans sid- och djupled. Proverna tömdes sedan i plastsäckar som förslöts och kodades.



Figur 9. Homogeniseringsskikten i stacken.

Figure 9. Layers of different fuel types in the pile.

Figur 9 visar stacken efter att brytning har påbörjats. I toppen på stacken syns de olika skikten. De mörka partierna är importerat returträ och de röda är sågspån däremellan syns stamvedsflis. Bilden illustrerar även svårigheten att få till jämntjocka skikt.

2.2 Homogenisering i mottagningsficka.

Det är relativt vanligt att lagra bränsle i stackar och sedan mata in bränslet med hjälp av en lastmaskin via en mottagningsficka. Inmatningen sker ofta efter olika mönster som anläggningarna har utvecklat. Tippas lastbilar direkt i fickan får man endast plats med två ekipage vid sidotippning till en normalstor ficka. Containerlossning fyller hela fickans tvärsnitt och något skikt kan inte utvecklas. Detsamma gäller lossning från walking-floor bilar. Den vanligaste geometrin, 4 x 4 m i tvärsnitt på fickan, är för liten för att kunna skapa skikt direkt från lastbilar. Lossning till fickor större än 4x4 m bör kunna ske från båda långsidorna.

ENA har en mottagningsficka med dimensionerna 4x4x24 m, utrustad med en kedjematare i botten och två motroterande rivarvalsar. Anläggningen togs i drift 1994 men dagens utrustning ser likadan ut.

Rivarvalsarna som syns på figur 11 har till uppgift att begränsa höjden på det utmatade skiktet samt om möjligt krossa källklumpar. De är placerade ovanför varandra, omedelbart innan utloppet och något förskjutna i horisontell led, med den övre valsen längre från utloppet. De flesta fickor har rivarvalsar som roterar mot matningsriktningen och matar på så sätt tillbaka en del av bränslet.

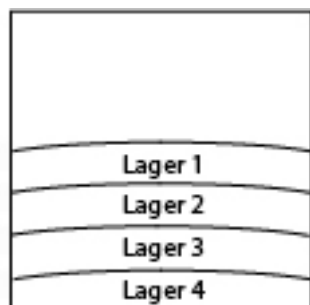


*Figur 10. Illustration av en mottagningsficka med kedjematare och en rivarvals, bild BMH Technology OY.
Figure 10. Illustration of a receiving pocket used at the trial.*



*Figur 11. Mottagningsfickans utlopp med två rivarvalsar.
Figure 11. Outlet from the receiving pocket with two spike roller.*

Försöken utfördes så att mottagningsfickan laddades efter ett givet mönster. Utmatning skedde till efterföljande bandtransportör. Transportören stoppades efter att mer än halva provmängden matats ut. Prover togs från bandet i en förutbestämd position. Hela transportörens tvärsnitt fylldes i ett 20 l prov. Proverna tömdes sedan i plastsäckar som förslöts och kodades.



Figur 12. Tvärsnitt av mottagningsfickan med de fyra lagren.

Figure 12. Cross section of the pocket with numbered layers corresponding to different trials

Fyra försök, A, B, C och D var inplanerade men endast tre genomfördes. Ett försök med stamvedsflis i botten och två försök med sågspån i botten. De två första försöken kördes med originalutförande dvs. rivarvalsarna roterade mot matningsriktningen medan det sista försöket kördes med valsarna roterande med matningsriktningen. Försök C kördes inte då fokus ganska snart hamnade på rivarvalsarnas rotationsriktning.



Figur 13. Mottagningsfickan under laddning med de olika lagren.

Figure 13. Charging the receiving pocket at trial.

2.2.1 Försök A

Försöket kördes med de inställningar som fanns på utrustningen, d.v.s. rivarvalsarna roterade mot utmatningsriktningen.

Lageridentifiering:

1. Sågspån
2. Stamvedsflis
3. Importerat returträ
4. Stamvedsflis

2.2.2 Försök B

Försöket kördes med de inställningar som fanns på utrustningen, d.v.s. rivarvalsarna roterade mot utmatningsriktningen.

Lageridentifiering

1. Stamvedsflis
2. Importerat returträ
3. Stamvedsflis
4. Sågspån

2.2.3 Försök D

Försöket kördes med rivarvalsarna roterande med utmatningsriktningen. Notera att lagren är lika placerade i försök B och D.

Lageridentifiering

1. Stamvedsflis
2. Importerat returträ
3. Stamvedsflis
4. Sågspån

2.3 Analys av prover från de praktiska etapperna

Inför projektet och i inledningen, diskuterades analysmetoder flitigt. Det fanns förslag både på att fotografera en vertikal vägg av bränsle och på att göra plockanalys, en teknik som används inom sopförbränning. I efterhand kan vi konstatera att ingen av dessa metoder hade haft någon möjlighet att ge analysdata. Detekterade objekt för hela försöket uppgick till ca 8 – 9 miljoner. Till detta skall läggas de objekt som inte kunde detekteras. Datoriserad bildanalys kom relativt snabbt fram som en tänkbar möjlighet. Det konstaterades dock att de modeller som finns för datoriserad bildanalys arbetar med helt andra frågor, ofta medicinska eller biologiska, där mycket forskningsarbete har lagts ner i modellskapandet.

I slutet på 80-talet arbetade dåvarande STFI, Svenska träforskningsinstitutet, med en teknik att on-line kvalitetsgranska kokflis med hjälp av datoriserad bildanalys. Den tråden ledde så småningom till PulpEye AB som utifrån STFI's nivå utvecklat mjukvaran till Scanchip, en produkt som utvecklats och marknadsförs av Andritz Iggesund Tools AB.

Scanchip består mekaniskt av en vibrerande matare där provet töms. Mataren matar flisen till en efterföljande vibrationstransportör, där hastigheten ökas för att frilägga partiklarna. Sista accelerationen sker med en bandtransportör. Ovanför bandtransportören finns en laserbalk och en kamera, båda kopplade till en kraftfull dator.

Scanchip kan mäta:

- Längd
- Bredd
- Tjocklek
- Flisbitens form
- Ljushet
- Elektronisk sållning



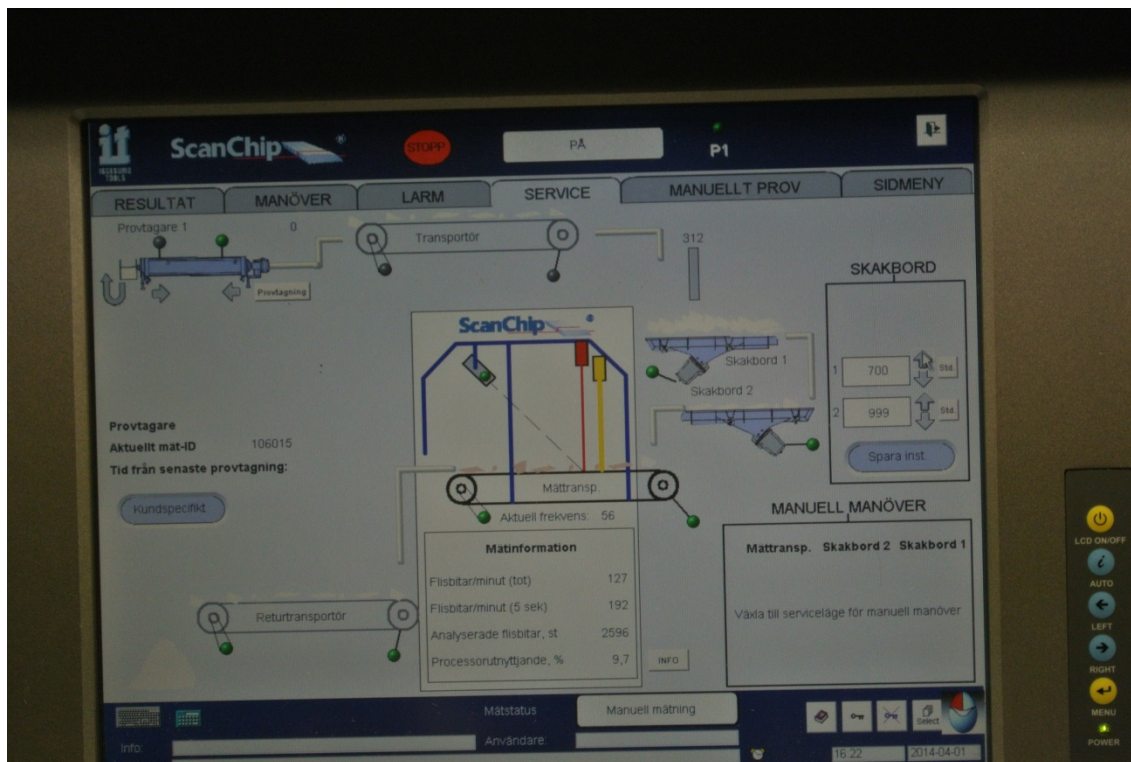
Figur 14. Scanchip flisanalysator.

Figure 14. Scanchip analyser.

Det som från början såg bra ut, att ha stora färgskillnader mellan stamvedsflis och importerat returträ, visade sig vara detta systems svaghet. Returträ-proverna var så mörka att en del provbitar inte reflekterade laserljuset. Det gick därför inte att identifiera allt returträ. Inte heller ljushetsanalys fungerade då en del av stamvedsflisen var i det närmaste lika mörk som den ljusaste returträbiten. Bildanalys görs i detta fall mot svartvita bilder. Det fanns ingen skarp gräns mellan dessa prover. Liknande problem uppstod vid analys av sågspån. Returträ innehöll betydande andel spån och det gick inte

att med ljushetsprov separera dessa från det röda sågspånet. Dessutom detekteras inte objekt $< 0,6$ mm, varför en del spån smet förbi men fanns med i de stickprover som togs ut för manuell siktning.

Scanchip kan detektera formen på flisbitar som har en detekterbar ljushet. Det blev därför möjligt att räkna alla flisbitar som hade rätt karaktäristisk form, se ett exempel i figur 18.

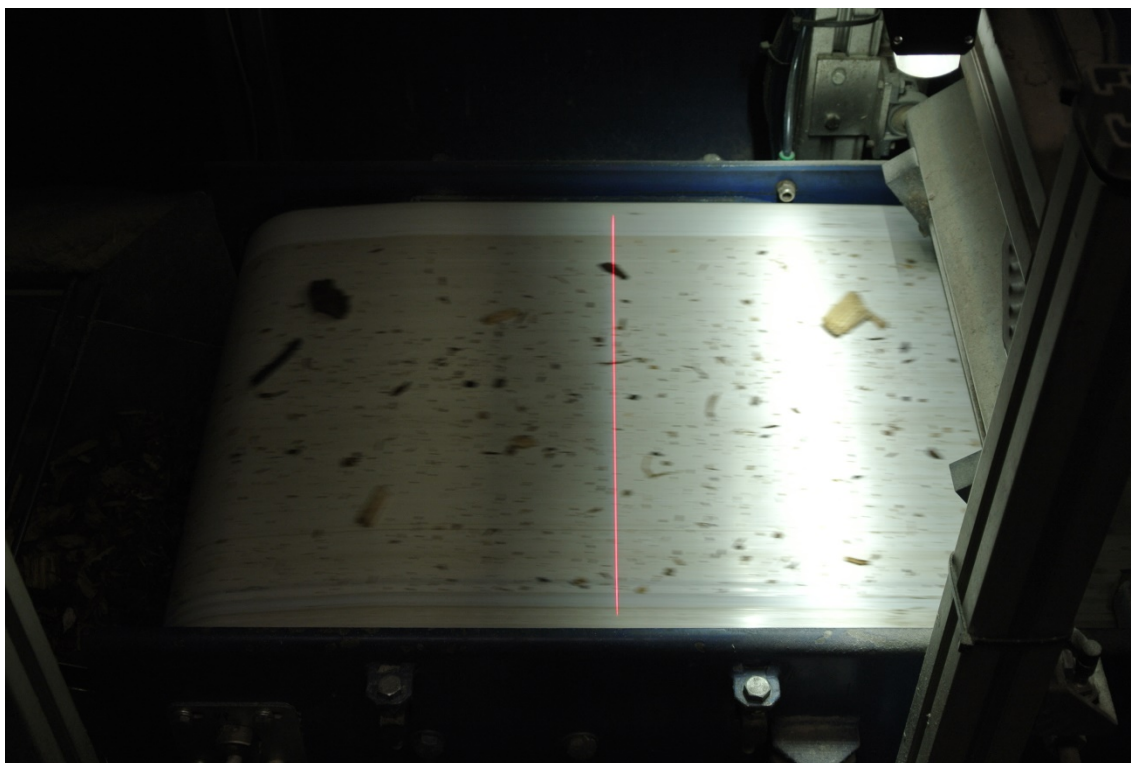


Figur 15. Bildskärmen visar analysatorns konfiguration samt datainformation i realtid.

Figure 15. Screen showing the analyser configuration and computed data in real time.



Figur 16. En provmängd under utmatning i Scanchip flisanalysator.
Figure 16. One sample loaded in the analyser.



Figur 17. Mätytan på Scanchip flisanalysator, röd linje är laserbalken.
Figure 17. Screen area at the analyser. Red line is a laser-beam.



Figur 18. Typisk stamvedsflis med karakteristisk sned fas från huggstålet.

Figure 18. Typically stem wood chip with the cutting edge.

SCA Ortviken i Sundsvall ställde sin on-line Scanchip utrustning till förfogande. Den arbetar normalt med en delström från renseriets flisproduktion. SCA Ortviken upplät även sitt laboratorium vid forskningsenheten för vägning av prover och stickprovssällning. PulpEye AB svarade för utrustningens handhavande och för datasammanställning.

2.4 Homogenisering i silo

2.4.1 Inledning

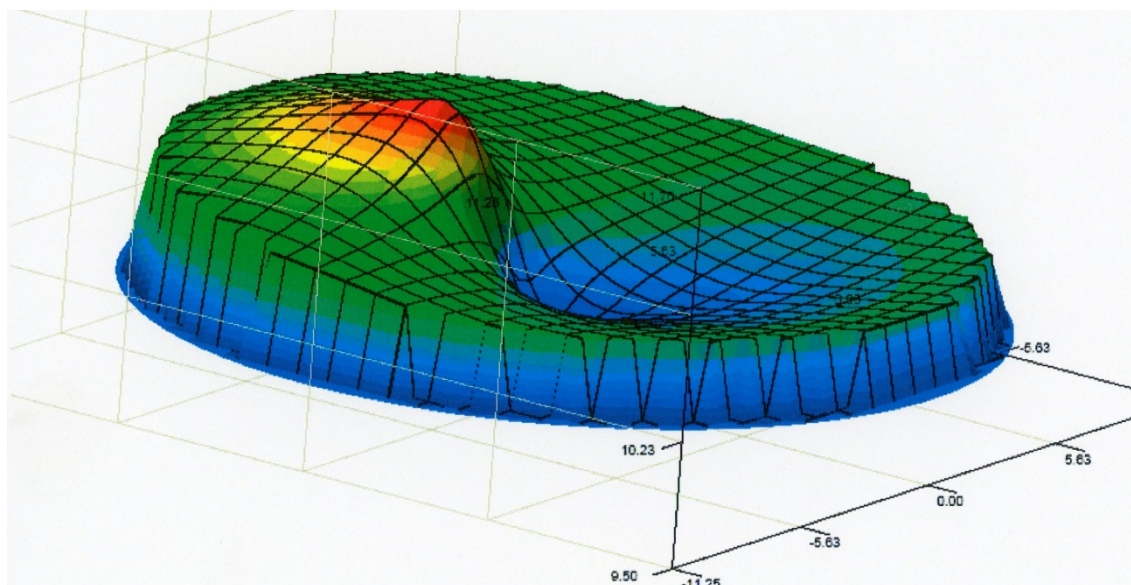
Det är en allmän uppfattning att silor ger ett bra homogeniseringsresultat. Det går dock inte att finna stöd för detta i några vetenskapliga artiklar.

Känt är dock hur skruvmataren, som finns i silobotten, skall vara utformad.

Teoretiskt matar en skruvmatare ut en cirkelsektor på en given tid. Dividerar vi skruvmatarens kapacitet för tiden med cirkelsektorns area får vi höjden på det skikt som matas ut. Är matarens åk hastighet hög blir tjockleken liten, är åk hastigheten låg kommer ett tjockt skikt att matas ut. Om vi till det lägger bränslemixens sortiment som skikt på en fullt utvecklad kona, kommer dessa att kollapsa och blandas vid utmatningen. Teoretiskt är skikten ca 0,3 m för batcher motsvarande en lastbil. Det är lätt att anta att ett tjockare utmatningslager skulle ge en bättre homogenisering än ett tunnare. Riktigt så enkelt är det inte. Med en mycket låg åk hastighet, som dagens skruvmatare har, tömmer skruvmataren väldigt tjocka lager och har när den förflyttat sig skapat en krater. Dessa ses tydligt på 3-D bilder från nivåskannrar, se figur 19. Vi har

nu flyttat homogeniseringens problematik till hur siloinnehållet byggs upp, då det finns en krater som vandrar runt silon efter var mataren är positionerad.

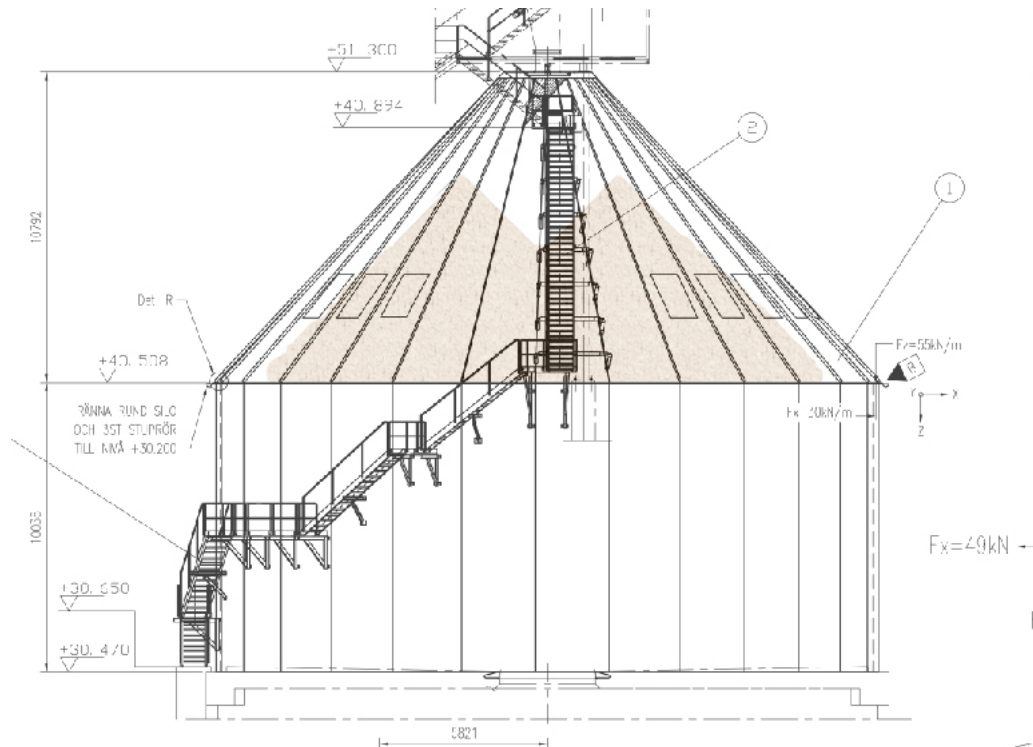
I toppen på de flesta silor finns en spridare som fördelar bränslet runt silon. Avsikten är att förhindra grovfraktionen att ansamlas i en punkt. Dessa spridare brukar ha en hastighet på ca 2 rpm. Genom spridarens relativt höga hastighet bildas ett rotations symetrisk siloinnehåll vars utseende formas vid kraterns fyllning.



Figur 19. 3-D bild av innehåll i en typisk silo för biobränsle.

Figure 19. 3-D illustration of a typically content in a biofuel silo.

2.4.2 Referenssilo

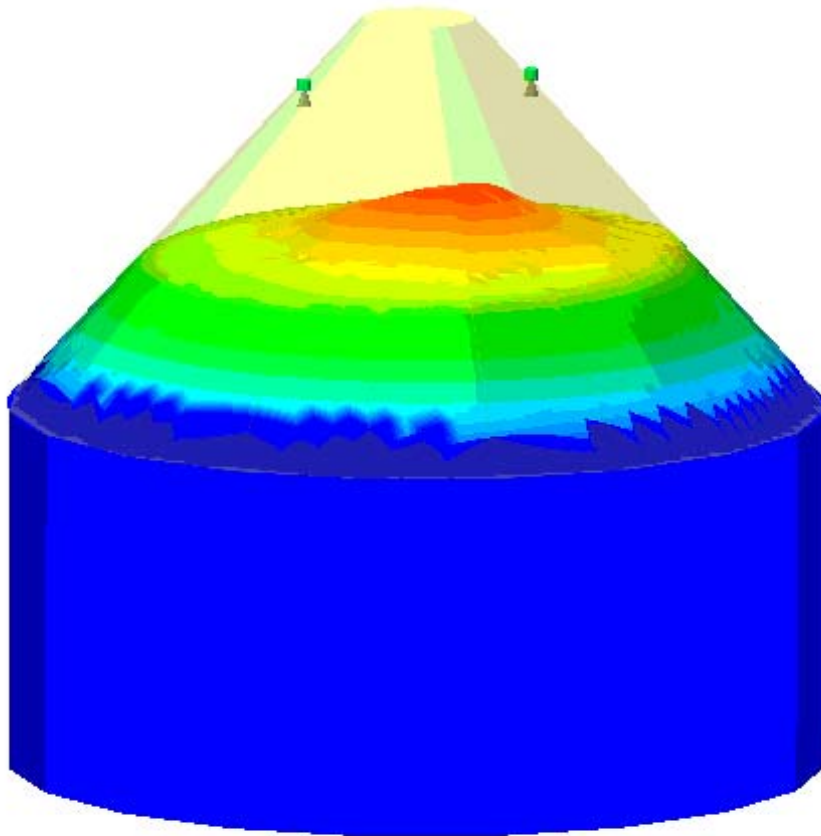


Figur 20. Referenssilons exteriör med volymens kontur inlagd.

Figure 20. The referencesilo with its content.

Figur 20 visar referenssilon som stått modell för simuleringarna. Infällt i bild syns toppen av siloinnehållet.

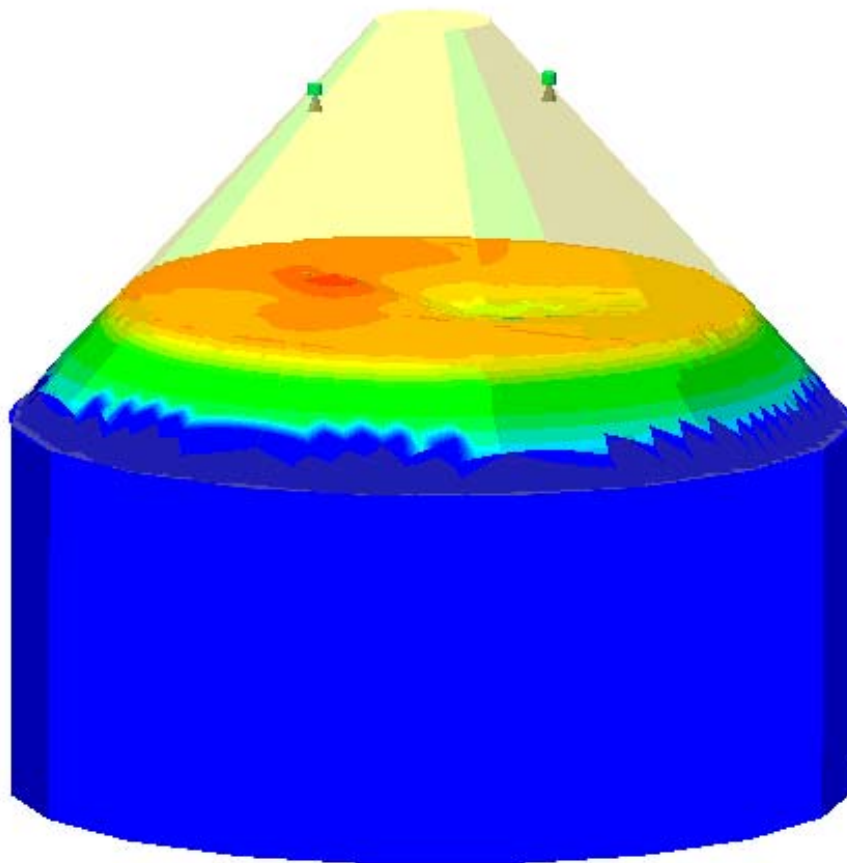
Referenssilon utgörs av en silo med en lagringsvolym på ca 5000 m^3 och en diameter på ca 22 m. Silon utgör helglager och är fylld på fredag kväll och tom på måndag morgon. Den har samma arbetsprinciper som de flesta andra silor i branschen. Silon är utrustad med 3-D nivåmätning. Detta gör det möjligt att få ut bilder på siloinnehållet.



Figur 21. Innehållet i referenssilon, nivå 96 %.

Figure 21. Silo content in reference silo at a level of 96 %.

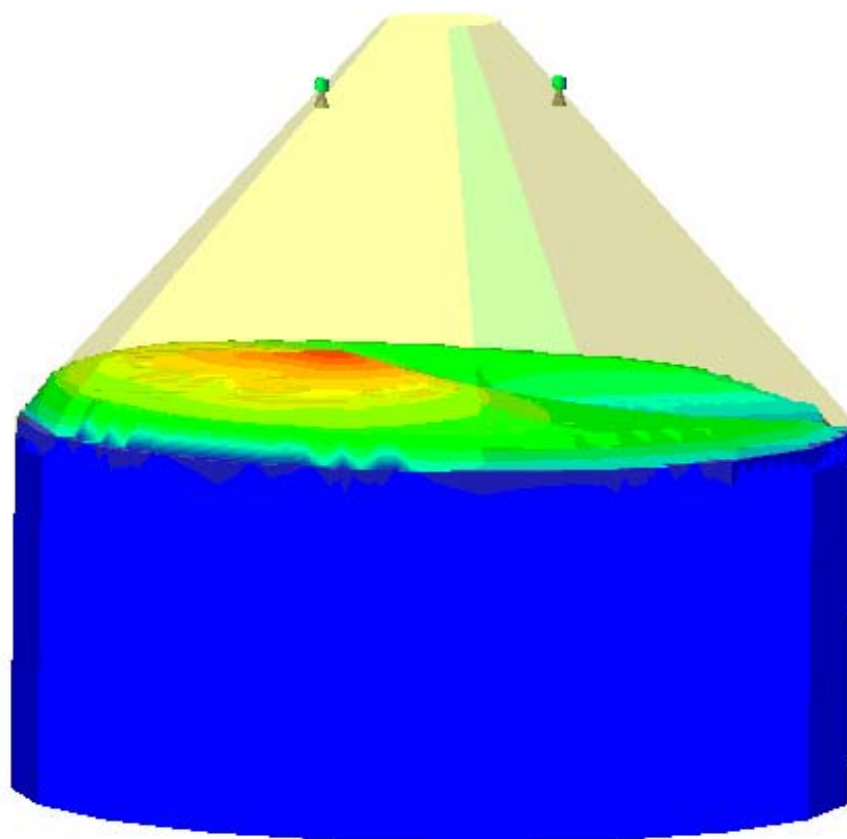
Figur 21 visar referenssilons innehåll då silon är fylld till 96 %. De två gröna fyrkanterna på silotaket är nivåskannrar. I det gröna partiet har innehålllets naturliga rasvinkel utvecklats.



Figur 22. Innehållet i referenssilon, nivå 86 %.

Figure 22. Silo content in reference silo at a level of 86 %.

Figur 22 visar referenssilons innehåll då silon är fylld till 86 %. Kratern över skruvmataren har redan börjat bildas och den koniska toppen försvinner allt mer.

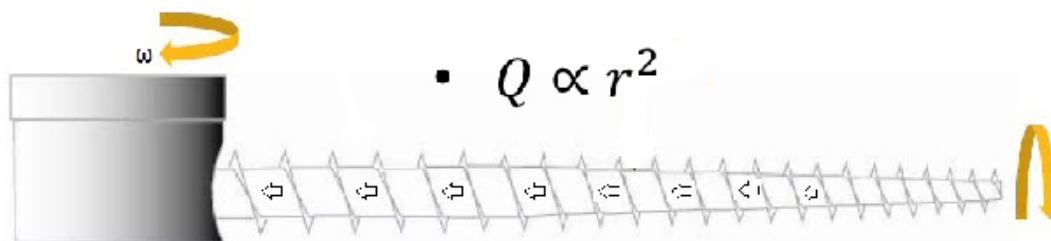


Figur 23. Innehållet i referenssilon, nivå 69 %.

Figure 23. Silo content in reference silo at a level of 69 %.

Figur 23 visar referenssilons innehåll då silon är fylld till 69 %. Kratern över skruvmataren är i denna bild helt utbildad, den genomsnittliga nivån ligger på ca 9 m och den koniska toppen är helt borta.

Ett antal liknade bilder för olika nivåer har utgjort referensmaterial för de genomförda simuleringarna.



Figur 24. Utmatningsskrub i silobotten, formeln anger att kapaciteten i varje punkt skall vara proportionell mot punktens radie i kvadrat.

Figure 24. Reclaiming screw at the bottom of the silo, the formula state that the capacity shall in each point be proportional to the radius of the point.

Figur 24 visar utmatningsskruven som finns i botten på referenssilon. Till vänster i bild syns centrumhuven, där skruven är lagrad och där utmatningen från silon sker. Huven vrider sig runt sin axel och sveper därmed skruven över silobotten, samtidigt som skruven roterar och matar ut bränsle genom huven. Utmatningsskruven skall vara utformad så att kapaciteten i en godtycklig position är proportionell mot kvadraten på positionens radie. Skruvens kapacitet är det volymsflöde som uppnås och är beroende främst av avståndet mellan gängor, gängornas höjd samt hur snabbt skruven roterar. Den mängd nytt material som tas in mellan två gängor, Δq , är skillnaden i kapacitet mellan föregående och den nya gängan.

$\Delta q = f(\Delta r^2, \Delta h^2)$. I realiteten styrs utmatningsskruvens kapacitet av en frekvensomriktare. Även åkshastigheten styrs av frekvensomriktare som är konfigurerade för konstant moment. Ökar mottrycket sjunker åkshastigheten och omvänt om motståndet blir lägre.

I toppen på silon finns en spridare som fördelar bränslet i silon och motverkar punktvis segregering.

Spridarens rotationshastighet är 2,3 rpm och rotationsriktningen är motsatt skruvens åkriktning.

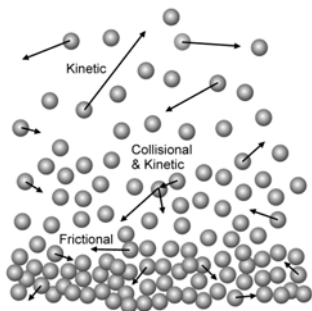
2.4.3 Simulering

Computational fluid dynamics (CFD) är en gren av fluidmekaniken där numeriska metoder används för att analysera strömning. I detta projekt har programvaran Fluent från Ansys använts.

Silosimulering har utförts som ett examensarbete med titeln, "CFD Simulations of Silos Content, An investigation of flow patterns and segregation mechanisms". Department of Chemical and Biological Engineering, Chalmers University of Technology. Författare Markus Jansson, examinerator Bengt Andersson. Nedan följer en förenklad beskrivning av simuleringsmodellernas uppbyggnad.

2.4.3.1 Kontinuum Modellering av flöde

Simulering av multifas flöde har pga. den höga belastningen och utrustningens storlek utförts som en Euler-Euler modell, vilket betyder att alla faser betraktas som en fluid med egenskaper som en granul. Modellen löser momentana och kontinuerliga ekvationer. Det är också nödvändigt att kunna specificera hur granulerna samverkar.



Figur 25. Karaktäristiskt uppträdande i modellens process.

Figure 25. System containing all different regimes

I det övre området i figur 25 modelleras flödet efter kinetisk teori för granulärt flöde (KTGF). Modellen har mycket gemensamt med kinetisk teori för gaser, med den skillnaden att det granulära flödet inte anses vara elastiskt. Den slumpmässiga hastighetsvariationen hos partiklarna ger upphov till en granulär temperatur (Θ_s). Transportekvationen för granulär temperatur nedan, härstammar från KTGF.

$$\frac{3}{2} \left[\frac{\partial(\rho_s \alpha_s \Theta_s)}{\partial t} + U_{j,s} \frac{\partial(\rho_s \alpha_s \Theta_s)}{\partial x_j} \right] = \kappa_s \frac{\partial^2 \Theta_s}{\partial x_i \partial x_j} - P_s \frac{\partial U_{j,s}}{\partial x_j} + \tau_{kj,s} \frac{\partial U_{k,s}}{\partial x_j} - \gamma_s$$

Granulär temperatur (Θ_s) är den slumpmässiga rörelsen av granuler, ε_s är en återställningskoefficient, ρ_s är partikelns densitet och g_0 är en radiell distributionsfunktion som beskriver hur nära maximum en cell kan packas. För system med jämnstora partiklar kan g_0 beräknas enligt nedan.

$$g_0 = \frac{1}{1 - (\alpha_s / \alpha_{s,max})^{1/3}}$$

Med packade partiklar som i botten av figur 25, samverkar inte partiklarna momentant som i KTGF. Solidliknande och kvasi-statiskt, är uppträdanden som ses när systemet närmar sig partikelns packningsgräns. Systemet är mer eller mindre orörligt och om systemet utsätts för externa krafter vill volymen expandera innan den accelererar. I mellanvolymen vill delar av partiklarna glida på varandra och momentan övergång mellan partiklar vill oftast förorsakas genom friktion. Partiklar är även beroende av omgivande partiklars uppträdande och detta beroende skapar ett kollektivt uppförande.

Tryck i fluider beräknas antingen enligt gaslagar eller $P = \rho gh$ för vätska. Tryckberäkning i dessa modeller är isotropisk. I en samling granuler formas håligheter. Krafter ovanför håligheterna håller dessa intakta. Krafterna vill därför inte bli lika i alla riktningar. Friktionskrafterna kan beräknas från nedanstående ekvation.

$$P_{s,friktion} = \frac{0.1 \alpha_s (\alpha_s - \alpha_{s,min})^2}{(\alpha_{s,max} - \alpha_s)^5}$$

Värdet för $\alpha_{s,max}$ är satt till 0.63, ett värde som slumpmässigt löst packade sfärer kan nå. Värdet för $\alpha_{s,min}$, volymens fraktionsgräns, är det värde programmet startar att beräkna friktionstrycket. Det är satt till 0,45 i denna simulering.

Trycket i regioner med låg eller mellanliggande volymsfraktion beräknas enligt KTGF. Tryck som skapas genom strömning och kollision beräknas enligt formeln nedan.

$$P_{s,kinetic} = \alpha_s \rho_s \Theta_s + 2 \rho_s (1 + \varepsilon_s) \alpha_s^2 g_0 \Theta_s$$

Det totala trycket P_s , är summan av friktionstrycket och det kinetiska trycket.

$$P_s = P_{s,friction} + P_{s,kinetic}$$

Kanske den viktigaste faktorn för att utröna en fluids flöde är viskositeten. Viskositeten beräknas för de olika delarna på liknande sätt som trycket. Först de individuella som sedan summeras upp till en total granulär viskositet.

$$\mu_s = \mu_{s,kinetic} + \mu_{s,collision} + \mu_{s,friction}$$

Den kinetiska och kollisionsdelen av viskositeten beräknas enligt nedan.

$$\mu_{s,kinetic} = \frac{10\rho_s d_s \sqrt{\pi\theta_s}}{96\alpha_s(1 + \varepsilon_s)g_0} \left[1 + \frac{4}{5}g_0\alpha_s(1 + \varepsilon_s) \right]^2 \alpha_s$$

$$\mu_{s,collision} = \frac{4}{5} \alpha_s^2 \rho_s d_s g_0 (1 + \varepsilon_s) \sqrt{\left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)}$$

Friktions viskositet beräknas enligt nedan.

$$\mu_{s,friction} = \frac{P_{s,friction} \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}}$$

Partiklarnas inre friktionsvinkel (ϕ), bestämmer stackens rasvinkel. Egenskapen är materialberoende och påverkas av friktion, form och kohesion bl.a. I_{2D} är den andra oföränderliga belastningsvektorn relaterad till Jacobian's belastningsmatris.

Med granulär bulkviskositet menas hur resistent den granulära fasen är för kompression och expansion. Beräknas enligt formeln nedan.

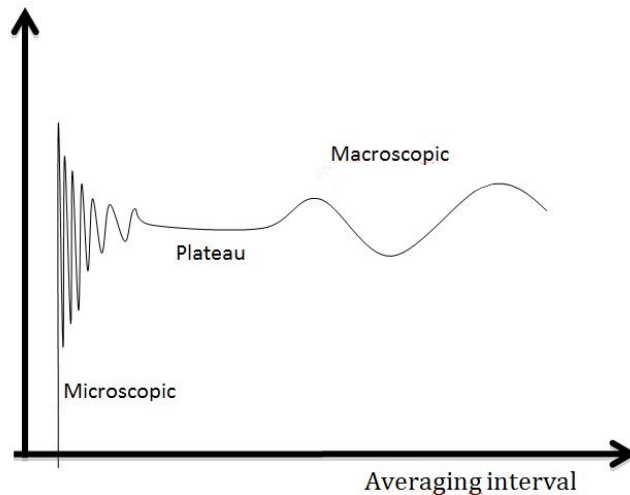
$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_0 (1 + \varepsilon_s) \sqrt{\left(\frac{\theta_s}{\pi}\right)}$$

Ett betydande kriterium för hur en fluid och granul samverkar är Stokes nummer. Om det är mycket större än 1 är partikeln opåverkad av den kontinuerliga fasen. För beräkning av Stokes nummer hänvisas till bilaga 1 där även betydelsen av ett flertal beteckningar är angivna.

$$St = t_d/t_s$$

Eulerian multifas modeller behöver en kontrollvolym större än partikelstorleken men tillräckligt liten för att behålla makroskopisk flödesstruktur. Figuren nedan illustrerar hur cellstorleken påverkar den genomsnittliga processen. Är cellen för liten kommer

egenskaperna fluktuera kraftigt. Är cellen för stor vill ekvationer för tryck, viskositet mm. inte fungera.



Figur 26. Cellstorleken (mesh) påverkan på simuleringsresultatet.

Figure 26. Showing the dependency of averaging mesh volume

2.4.3.2 Numeriska antaganden

Flisen modellerades som en sfärisk partikel med diameter 0,02 m. Vedens densitet sattes till 850 kg/m^3 , återställningskoefficienten till 0,001 och inre friktionsvinkel till 45° . På grund av högt Stoke tal försumrades luftmotståndet och det gällde även turbulens. Tidsstegen sattes till 0,001 sekund och iterationens begränsning till 30 i varje tidssteg.

Bränslet kommer till silon från toppen och skapar en hög på botten som sedan växer tills silon är full. Inmatning och utmatning sker oftast samtidigt men inmatning kan ibland vara stoppad. Utmatning av bränslet sker via silons centrum och bränslet trycks ut med utmatningsskruven. Skruven är modellerad som en volym med en hastighet mot utloppet. I 2-D modellen är hastigheten satt konstant genom hela skruvens volym medan den i en 3-D modellen ökar mot utloppet enligt formeln nedan.

$$V(r) = V_0 - \beta r^2$$

Formeln tillfredsställer r^2 beroendet som beskrivits tidigare. Hastighetsberäkningen är inkluderad i den användardefinierade funktionen som definierar skruvens position och ger granulen hastighet i varje cell och tidssteg.

3 Resultat

Scanchip är en relativt snabb analysmaskin. För kokflis kan 7-10 prover av vår storlek (20 l) analyseras per timme. I vårt fall tog varje prov 30 – 40 min, orsaken var den stora mängden mindre objekt. Då tillgänglig tid för maskinen var begränsad fick vi reducera antalet prover. Vi behöll 3/5-delar av proverna från stackhomogenisering och 6 prover från homogenisering i mottagningsfickan samt respektive referensprov.

Som nämnts ovan kan Scanchip mäta formen på en individuell flisbit och räkna antalet som uppfyller ett visst kriterium. I detta fall var det de fasade kanterna efter huggstålet som detekterades. Dessa finns inte på krossat material som importerat returträ. Vi kunde därmed skapa begreppet godkänd flis, de flispartiklar som hade en godkänd form.

Andelen godkänd flis i referensprovet (23,5 %) utgjorde basen och sattes att motsvara 100 % stamvedsflis. Godkänd flis detekterades även från importerat returträ (4,8 %), sannolikt mätfel men togs med i analysen då samma mätfel kan finnas i proverna, vi kallar denna modell för modell 1. I den andra modellen som använts, modell 2, har inte någon reduktion av godkända flisbitar gjorts utan där anses alla komma från stamvedsflis

Mängden sågspån detekterades för varje prov genom elektronisk siktning, scanchip kan elektroniskt sikta bränsle enligt ett antal olika standard genom att mäta varje objekts storlek och form. Sågspån innehåller inte bara fraktionen < 3 mm. Därför viktas detekteringen mot referensprovets resultat.

Därefter reducerades spånmängden med den procentandelen spån som kom från importerat returträ. Referensprovet för importerat returträ innehöll 7 % detekterat spån.

Den formel för homogenitet som redovisats i inledningskapitlet 1.1.2 kan inte användas för detta projekt då vi inte har någon standardavvikelse för inkommande flöde. Data för detta flöde presenteras i stället som relativa andel i stacken enligt nedan:

- Flisad stamved 50 vol. -%.
- Sågspån 25 vol. -%.
- Importerat returträ 25 vol. -%.

3.1 Resultat stackhomogenisering

Volymandelarna är i diagrammen konverterade till viktsandel m.h.t. den skrymdensitet som uppmättes för respektive referensprov. I varje diagram redovisas referensprovernas andel (Ref).

Sågspånet innehöll en stor mängd mycket fina partiklar. Detsamma gällde för importerat returträ. Ett stickprov togs för mekanisk sällning av finfraktion från varje skopa från stackhomogenisering. Resultatet reducerades sedan med relativa andelen spån i returträets referensprov.

Slutliga resultatet redovisas i diagram 5 och 6 tillsammans med värdet för elektronisk siktanalys.

Medelvärde för varje skopa samt medelvärde för respektive försök är också redovisade.

I diagrammen nedan redovisas resultatet från de olika försöken. Syntaxen för försöken är skopa nr och prov nummer.

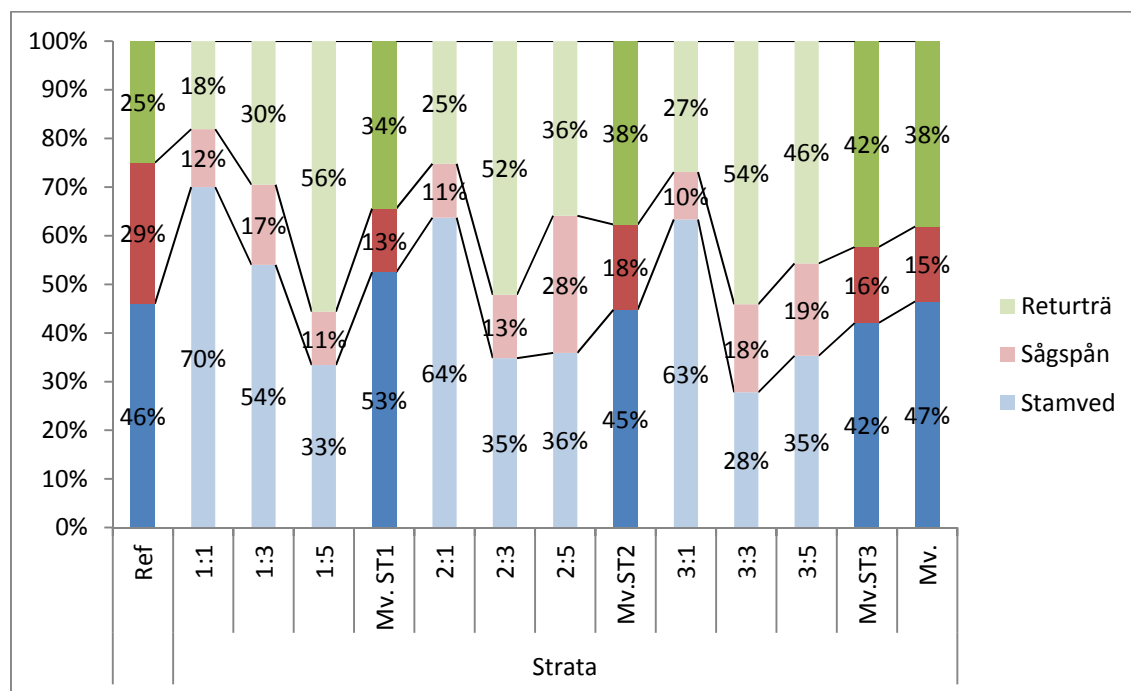


Diagram 1. Modell1, sortimentens andel i respektive prov för Strata stacken.

Diagram 1. Model 1, part of different species in the Strata pile

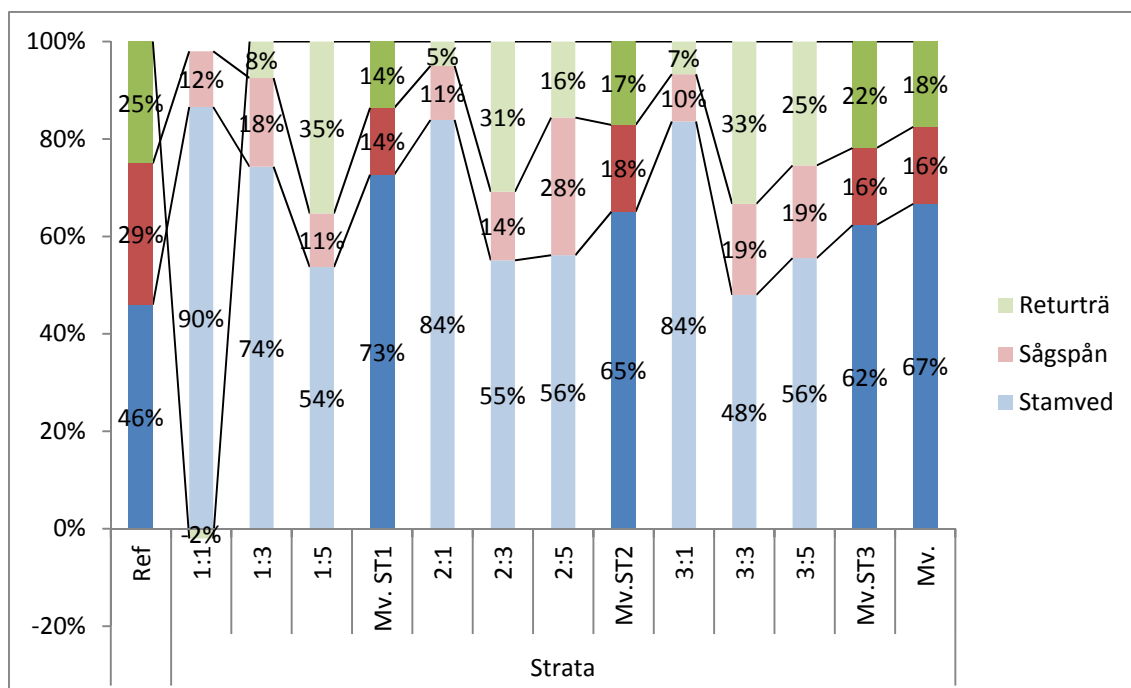


Diagram 2. Modell 2, sortimentens andel i respektive prov för Strata stacken.

Diagram 2. Model 2, part of different species in the Strata pile

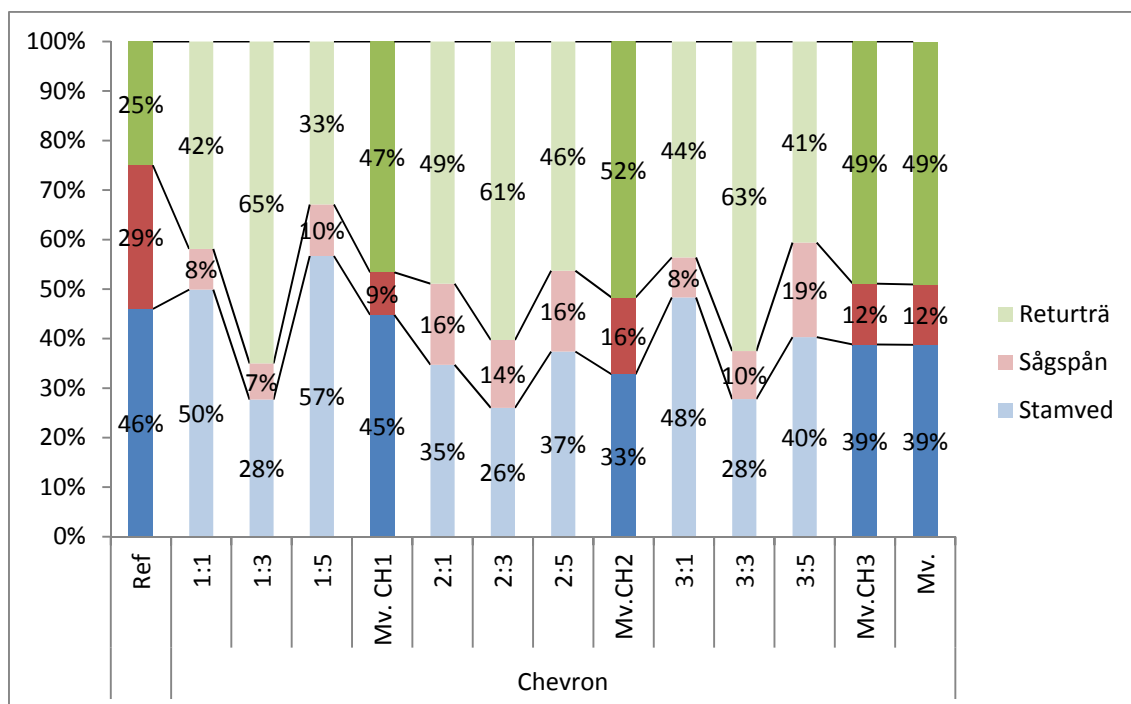


Diagram 3. Modell 1, sortimentens andel i respektive prov för Chevron stacken.

Diagram 3. Model 1, part of different species in the Chevron pile

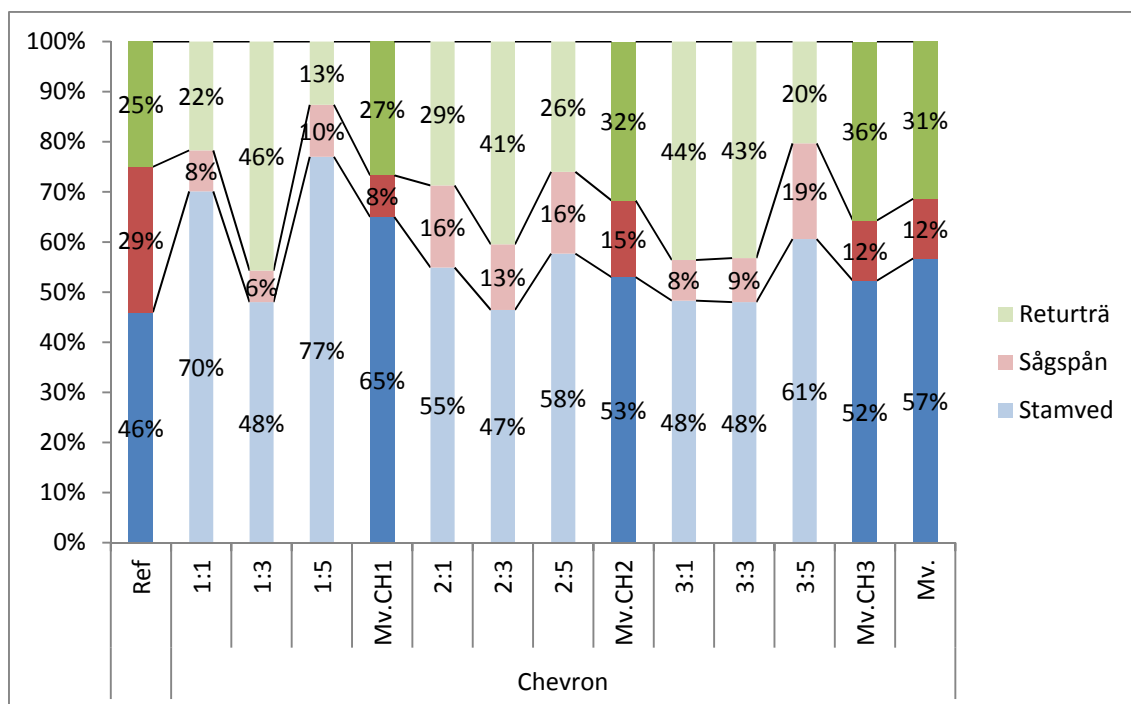


Diagram 4. Modell 2, sortimentens andel i respektive prov för Chevron stacken.

Diagram 4. Model 2, part of different species in the Chevron pile

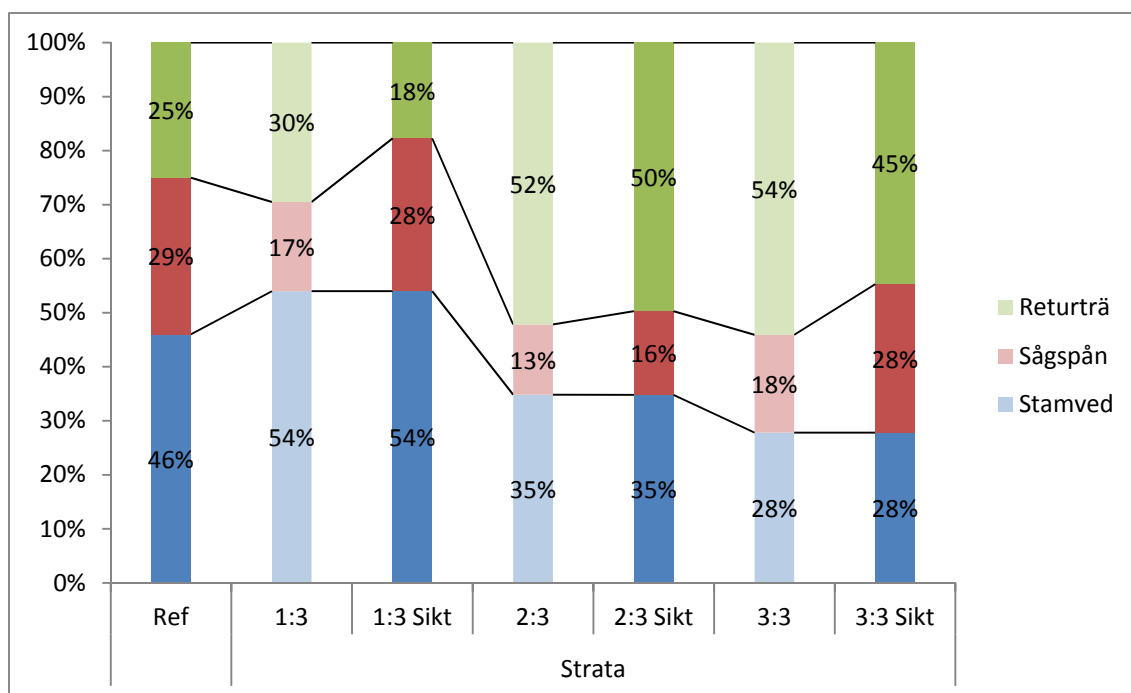


Diagram 5. Modell 1, stickprovskontroll map. spånmängd, Strata stacken.

Diagram 5. Model 1, acceptance sampling concerning amount of sawdust in the Strata pile.

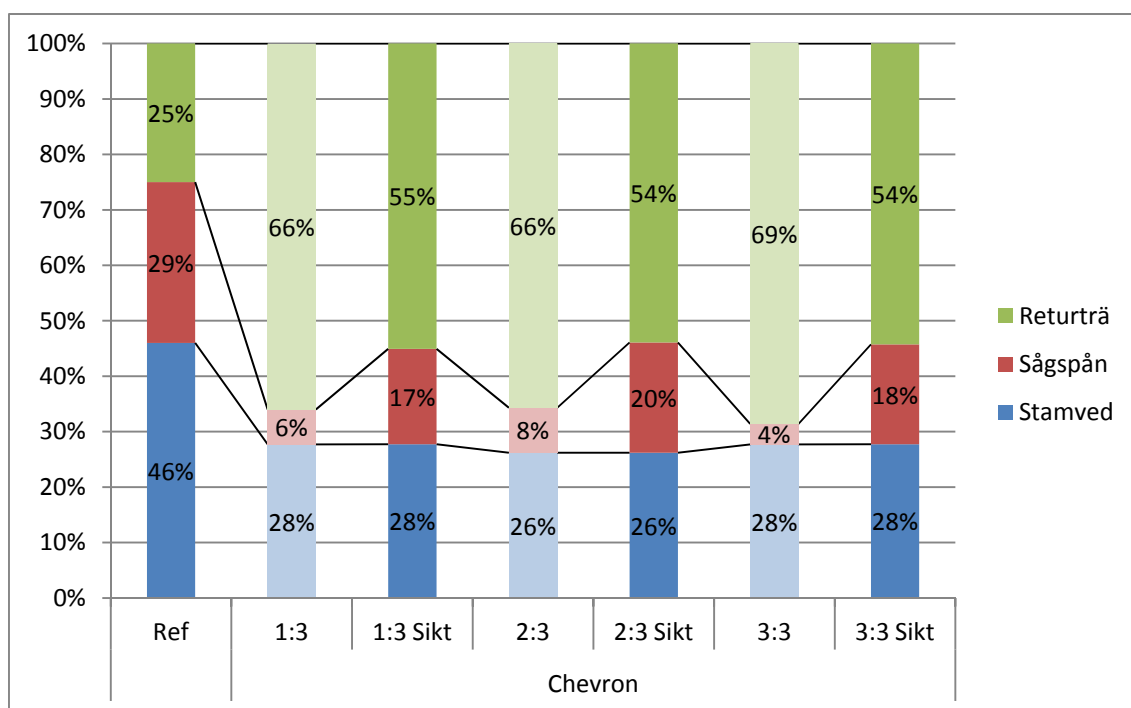


Diagram 6. Modell 2, stickprovskontroll map. spånmängd, Chevron stacken.

Diagram 6. Model 2, acceptance sampling concerning amount of sawdust in the Chevron pile.

Om vi anser att modell 1 och 2 utgör försökens yttre gränser så bör det verkliga resultatet ligga däremellan. Spån mängden är sannolikt kraftigt undervärderad i modellerna, vilket får till följd att, returträ som inte kan detekteras, blir övervärderad. Om vi tar försöksmedelvärdet för de två modellerna och räknar upp spån mängden enligt stickproverna har vi troligtvis kommit så nära verkligheten som förutsättningarna gett oss möjlighet till, vi kallar detta utökad analys.

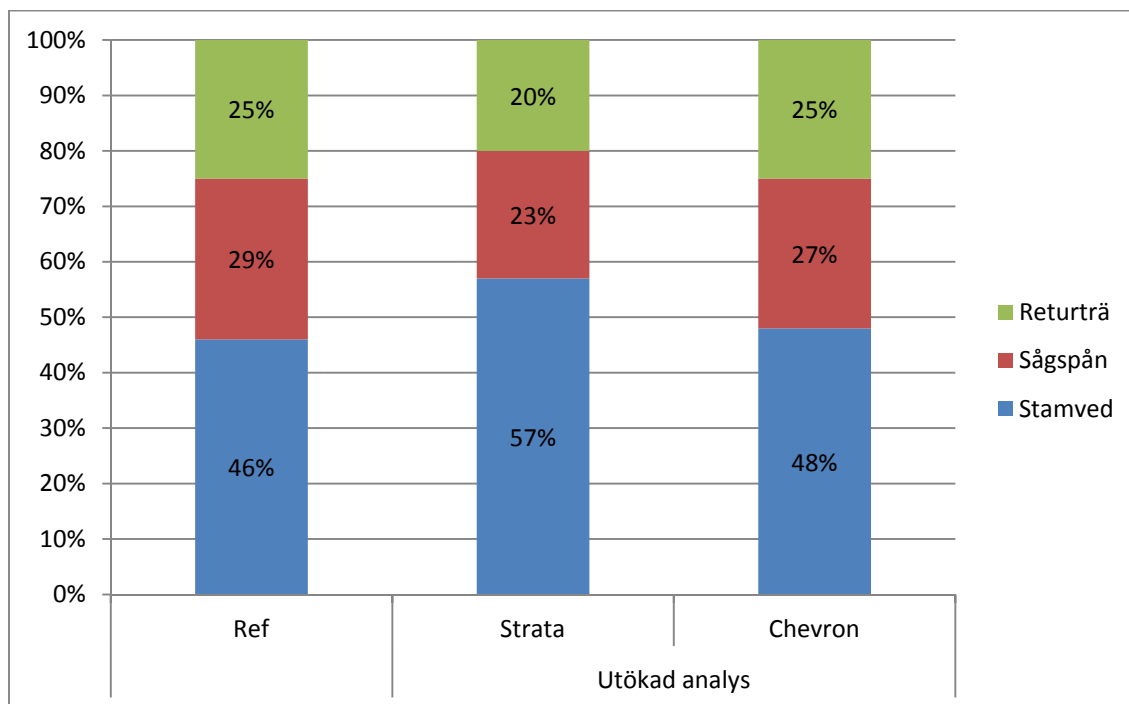


Diagram 7. Utökad analys av försöksmedelvärden.

Diagram 7. Extended analysis of trial mean value

Resultatet redovisas i diagram 7. Att Chevronstacken får ett bättre resultat beror nog mer på det låga provantalet än på att metoden skulle vara bättre. Dock speglar resultatet en population på 30 m³ för respektive stack vilket är i mesta laget. Vi gör därför om analysen för respektive skopmedelvärden där populationen är 10 m³, vilket motsvarar ca 4 – 5 minuters bränsleförbrukning i en 100 MW panna.

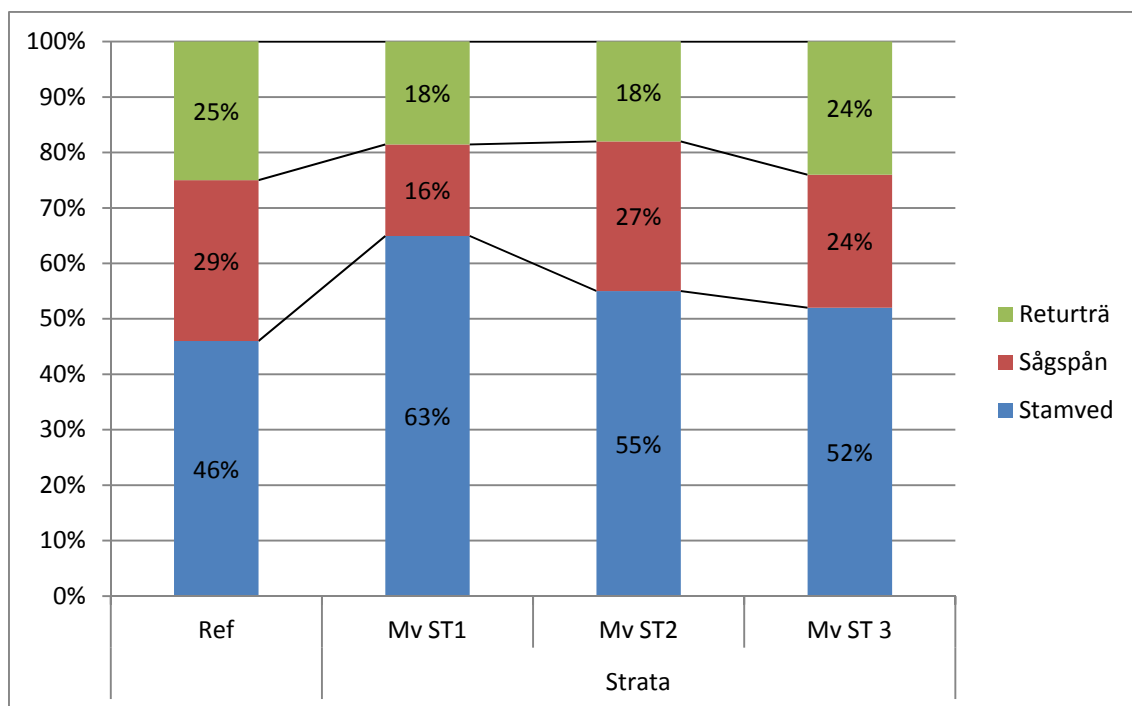


Diagram 8. Utökad analys av skopmedelvärden för Stratastacken.

Diagram 8. Extended analysis of trial mean value for one bucket volume from the Strata pile

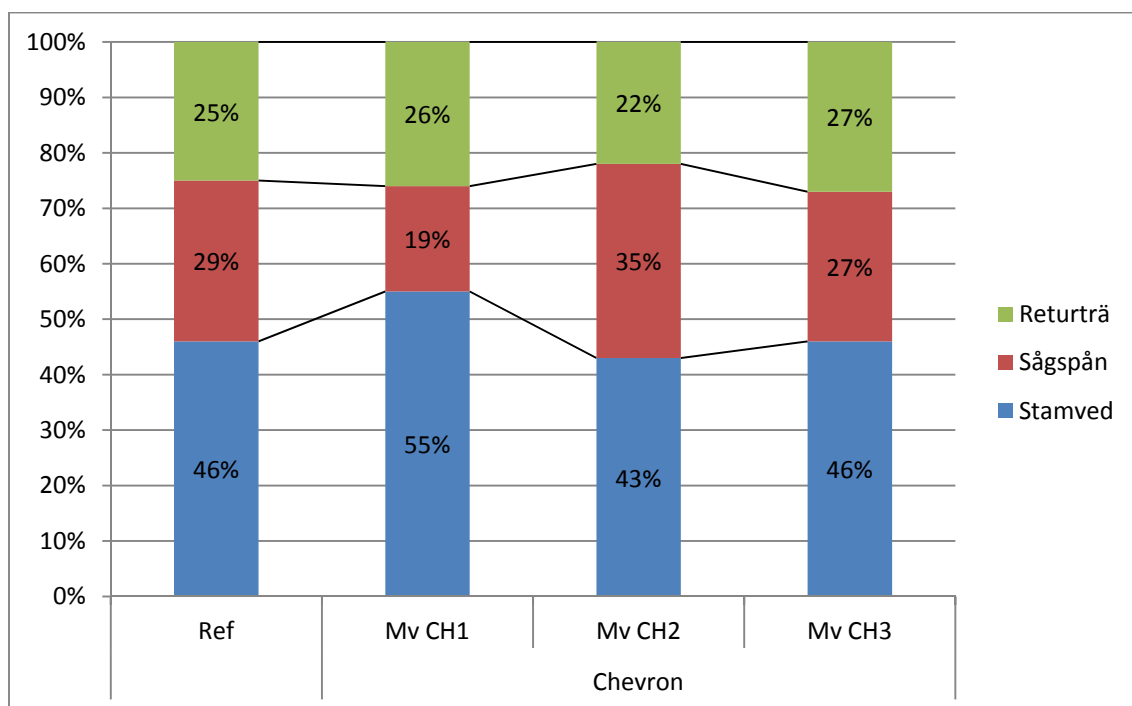


Diagram 9. Utökad analys av skopmedelvärden för Chevronstacken.

Diagram 9. Extended analysis of trial mean value for one bucket volume from the Chevron pile

Då huvuddelen i diagram 8 och 9 är i närheten av referensprovet bör man kunna anse metoderna som framgångsrika. Det går inte att säga att den ena eller andra stackningsmetoden är bättre eller sämre då för många slumpmässiga parametrar är inblandade, samtidigt som provmängden av praktiska skäl fick begränsas.

3.1.1 Proveldning

Det importerade returträet innehöll stora mängder klorider. Vid en proveldning som ENA utfört på detta bränsle fick man HCl-emissioner före rök-gaskondensorn i storleksordningen 150 ppm. Besvärligt som bränsle men bra som markörbränsle. Det bestämdes därför att bränsle från homogeniseringsstacken skulle proveldas.

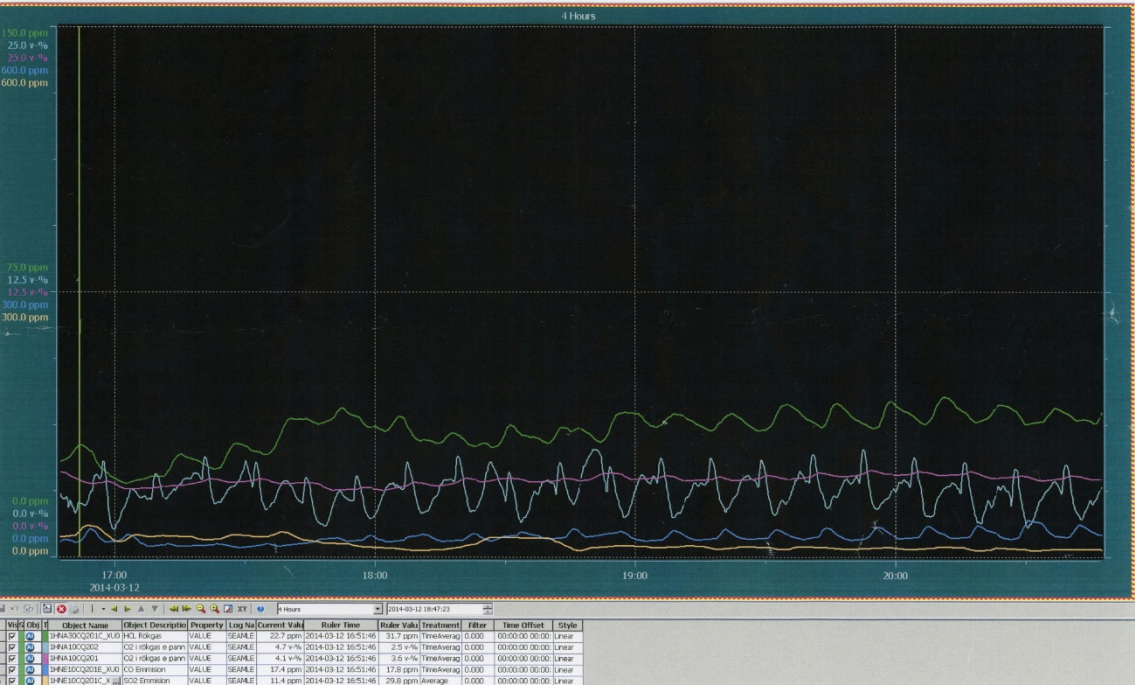


Figur 27. Mottagningsfickan laddad med homogeniserat bränsle.

Figure 27. Receiving pocket loaded prior to trial combustion.

Mottagningsfickan laddades och nivån i pannhusfickan sänktes. Transportsystemet kördes by-pass flisladan så att bränslet gick direkt till pannhusfickan.

Inmatningen startade något före 17:00. Efter ca en timme var bränslet på rostern ersatt. Proveldningen pågick till 22:00 med samma resultat som visas i figur 28. Av upplösningsskäl visas inte hela kurvan. Diagrammet i figur 28 visar HCl i rök-gaser, grön linje och O₂ i rök-gaser, ljusblå linje. Samtliga värden är före rök-gaskondensering. HCl har sitt medelvärde på ca 35 ppm. Variationen korrelerar med O₂-kurvan så att när O₂ är högt sjunker HCl, utspädningsprincipen.



Figur 28. Skärmdump från proveldning visande HCl och O₂ under proveldning.
Figure 28. Computer screen showing HCl (green) and O₂ (white) during trial combustion.

3.2 Resultat homogenisering i mottagningsficka

Utvärdering av resultaten från homogeniseringsförsöken i mottagningsficka är gjord på samma sätt som försöken i stack. Dvs två modeller skapas modell 1 och 2.

Syntaxen för provbenämning i försök i mottagningsficka är försök A, B, C samt prov 1 resp. 2. Resultaten redovisas i nedanstående diagram.

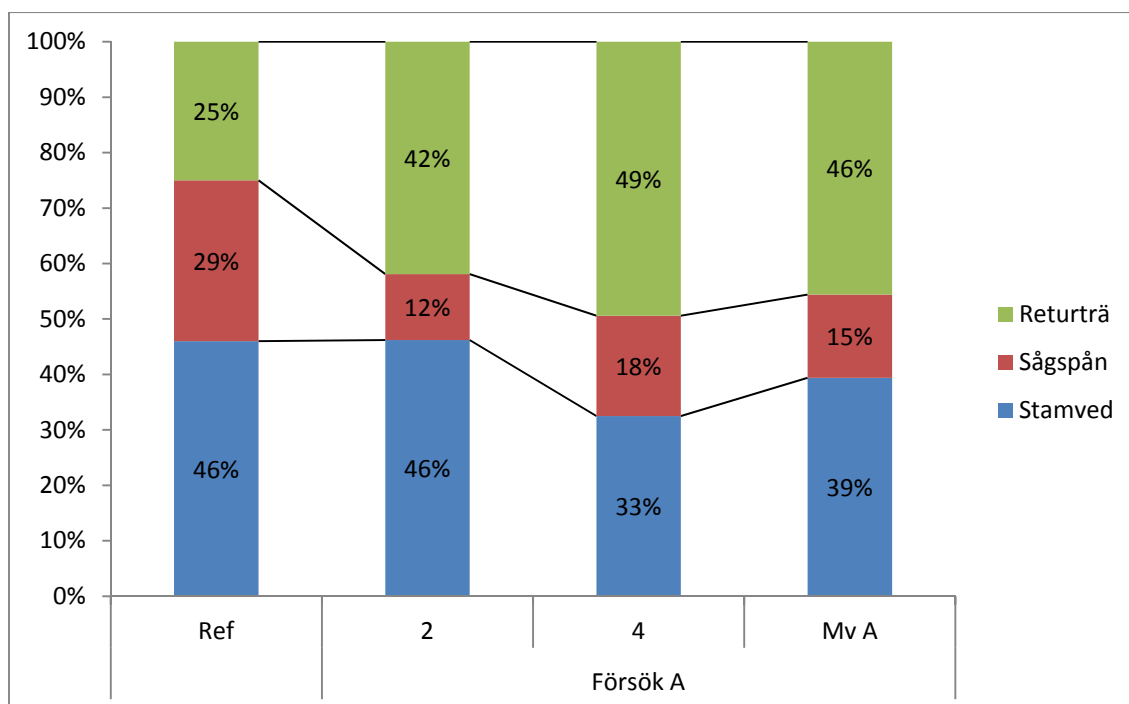


Diagram 10. Modell 1, försöksserie A, från botten i fickan: stamvedsflis, importerat returträ, stamvedsflis och sågspån, motroterande rivarvalsar.

Diagram 10. Model 1 trial series A, from the bottom in the pocket; stem wood, residue wood, stem wood, and sawdust.

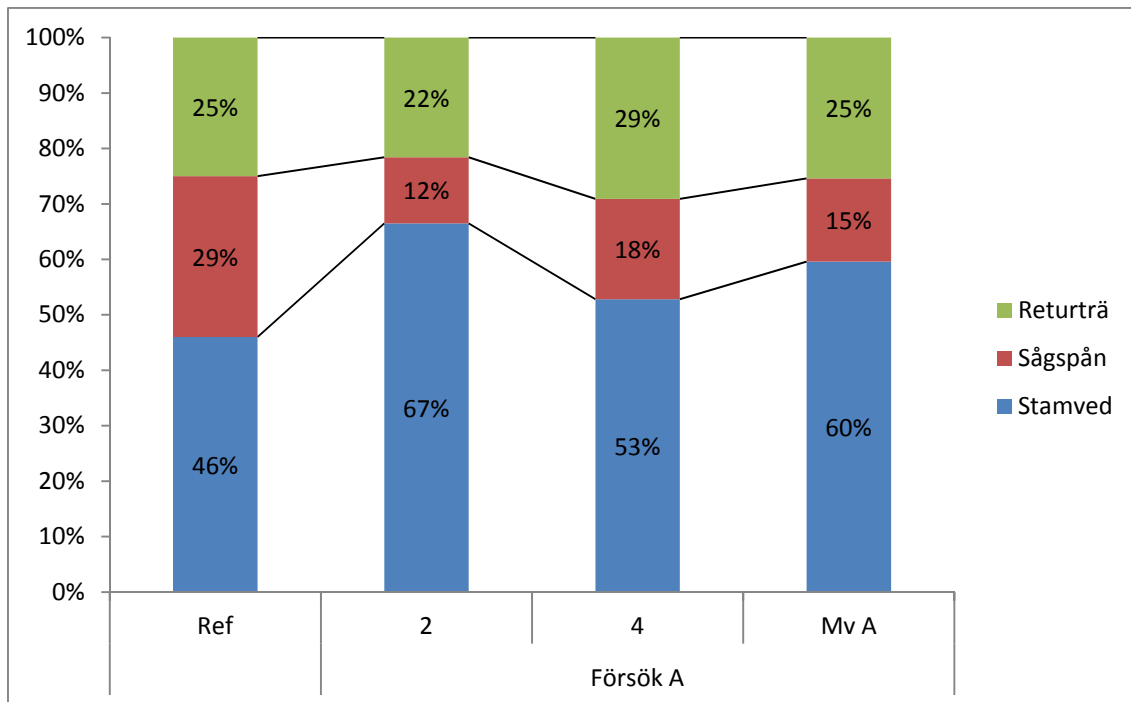


Diagram 11. Modell 2, försöksserie A, från botten i fickan: stamvedsflis, importerat returträ, stamvedsflis och sågspån, motroterande rivarvalsar.

Diagram 11. Model 2 trial series A, stem wood, residue wood, stem wood, and sawdust counter rotated.

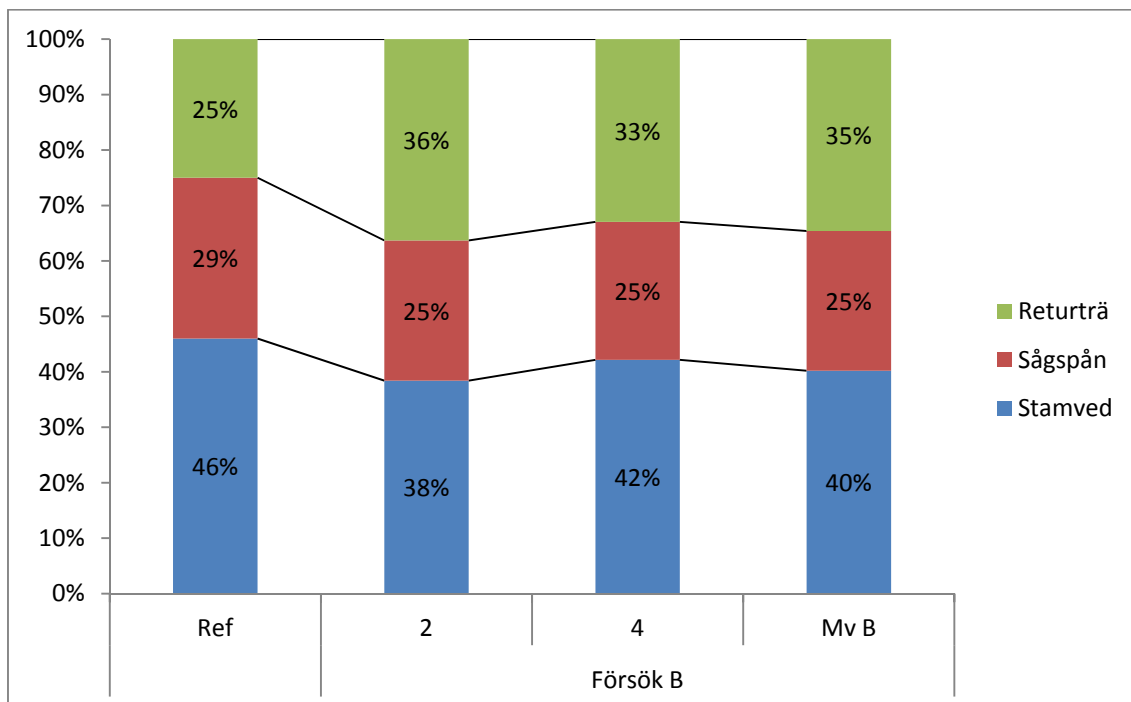


Diagram 12. Modell 1, försöksserie B, från botten i fickan: sågspån, stamvedsflis, importerat returträ och stamvedsflis, motroterande rivarvalsar.

Diagram 12. Model 1 trial series B, from the bottom of the pocket; sawdust, stem wood, residue wood, stem wood, and sawdust.

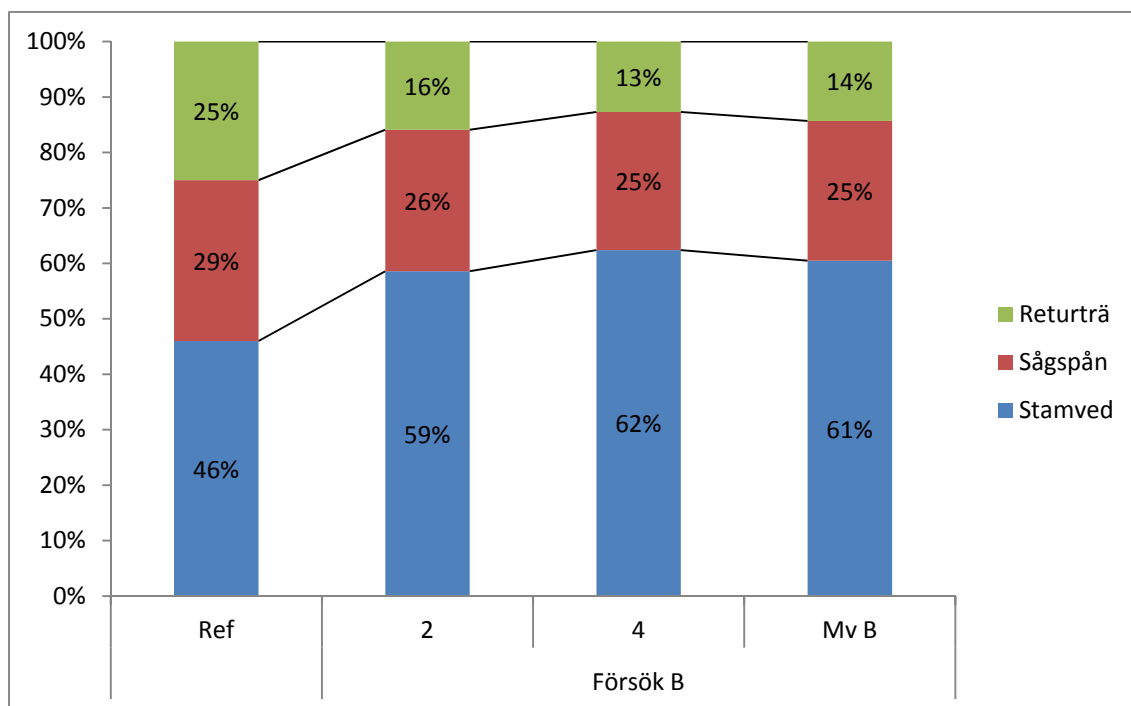


Diagram 13. Modell 2, försöksserie B, från botten i fickan: sågspån, stamvedsflis, importerat returträ och stamvedsflis motroterande rivarvalsar.

Diagram 13. Model 2, trial series B, from the bottom of the pocket; sawdust, stem wood, residue wood and stem wood.

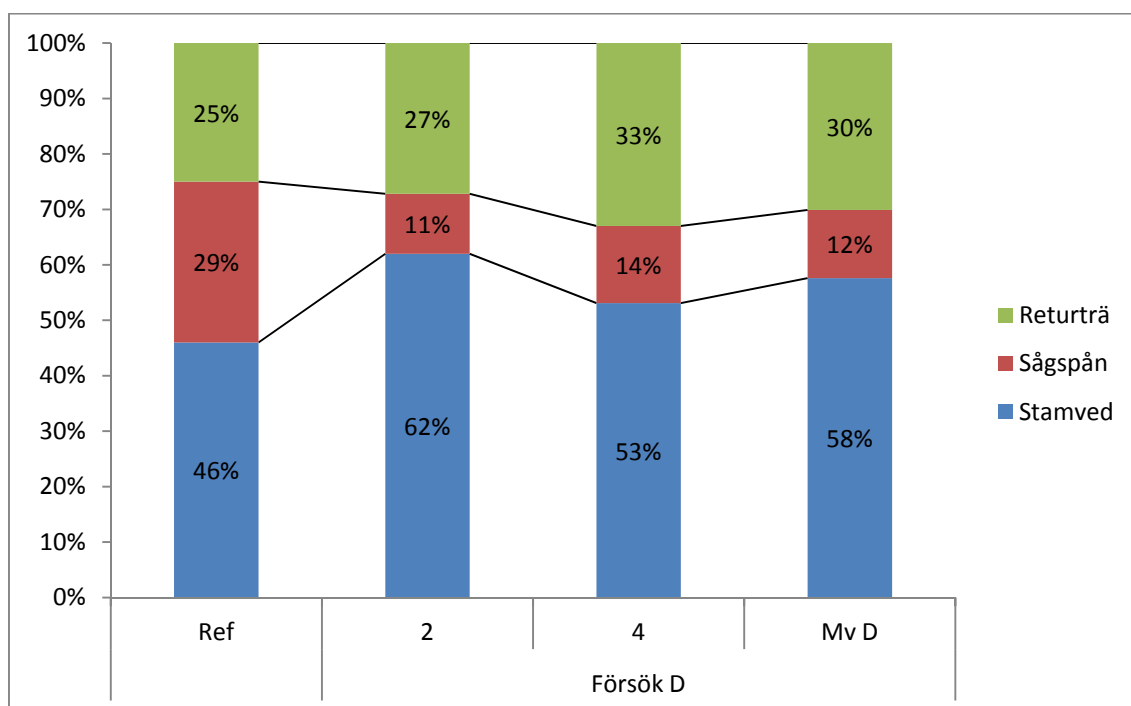


Diagram 14. Modell 1, försöksserie D, från botten i fickan: sågspån, stamvedsflis, importerat returträ och stamvedsflis, medroterande rivarvalsar.

Diagram 14. Model 1 trial series D, from the bottom of the pocket; sawdust, stem wood, residue wood, stem wood.

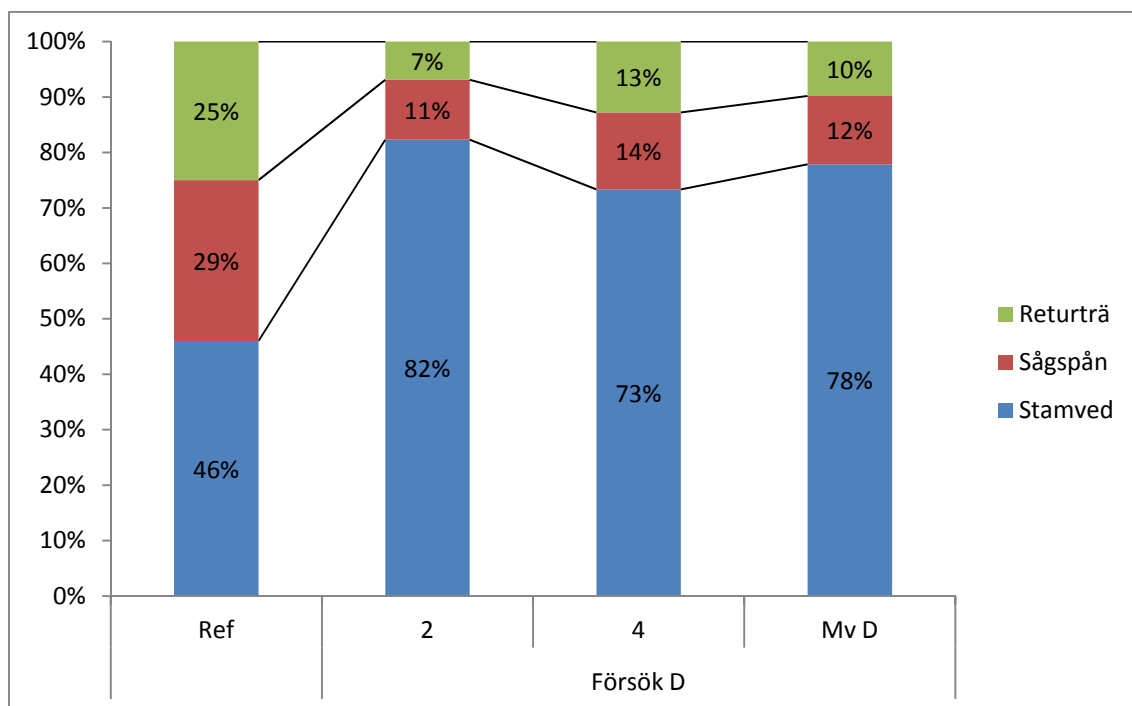


Diagram 15. Modell 2, försöksserie D, från botten i fickan: sågspån, stamvedsflis, importerat returträ och stamvedsflis, medroterande rivarvalsar.

Diagram 15. Model 2 trial series D, from the bottom of the pocket; sawdust, stem wood, residue wood, stem wood.

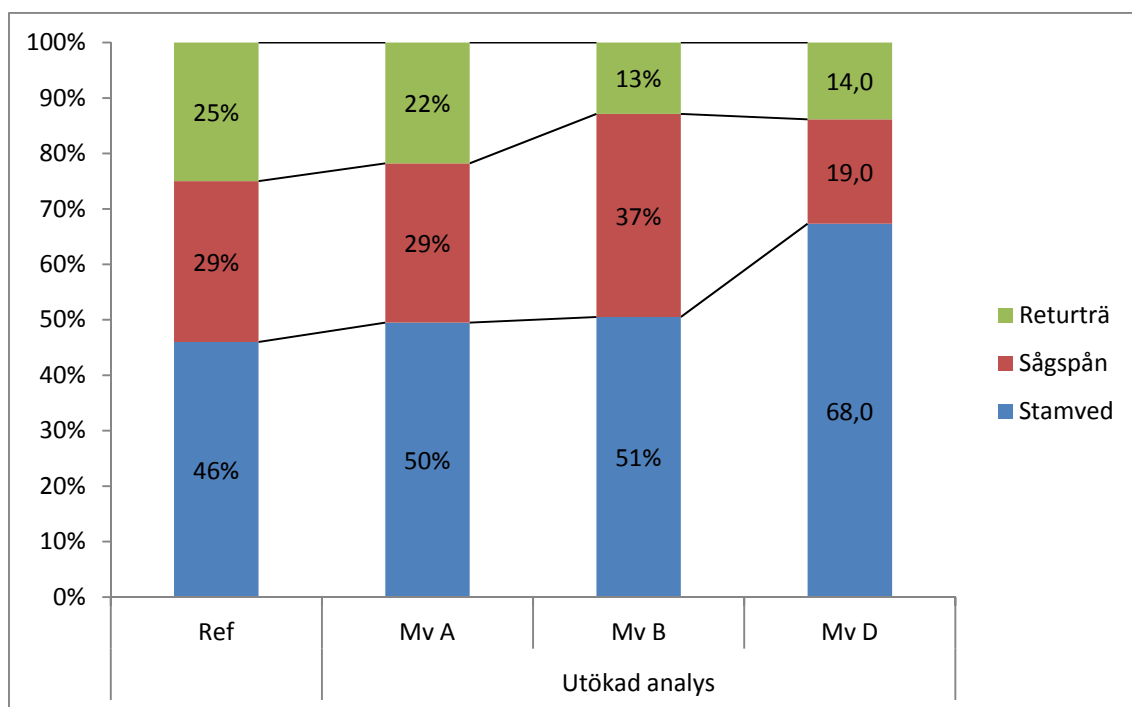


Diagram 16. Utökad analys samma upplägg som för stackhomogenisering.

Diagram 16. Extended analysis same configuration as for homogenisation in the pile.

Diagram 16 visar resultatet efter medelvärdeshantering av modell 1 och 2 samt efter justering av spånandel m.h.t. stickprovskontroll.

Det bör noteras att stamvedsflis var andra lagret ovanpå sågspån i både försök B och D. Att modellenpassningen påverkar resultatet framgår tydligt av diagram 10 och 11. Det framgår även tydligt att sortimentet i bottenskiktet har en stor påverkan.

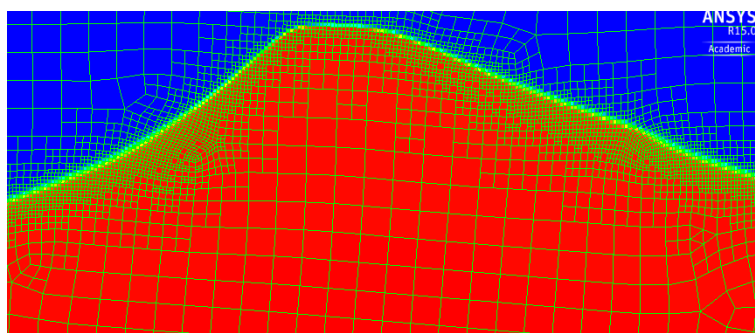
Av diagram 16 kan man utläsa att rivarvalsarnas rotationsriktning har en påtaglig inverkan. Det kan dock inte uteslutas att resultatet är ett slumpmässigt utfall då endast två prover per försök analyserats.

3.3 Resultat homogenisering i silo

Vid transient simulering användes två Eulerian-faser med luft som den primära fasen och trägranuler som sekundär fas. Modellerna har beskrivits tidigare.

3.3.1 Celler (Mesh)

Små celler i hela volymen resulterar i en mycket hög datorbelastning pga. det stora antalet ekvationer som behöver lösas. För att minska datorbelastningen användes större celler initialt. Cellstorleken anpassades sedan i varje tidssteg i ytor med hög gradient av volymfraktion. Den icke-förfinade 2-D cellen är en romb med 0,3 m storlek, ca 2 000 celler. Cellerna förfinas genom att den delas i fyra nya celler. Denna procedur upprepas maximalt tre gånger för att undvika för små celler. Figur 29 visar hur cellstorlekarna har anpassats till områden med hög respektive låg gradient volymfraktion.



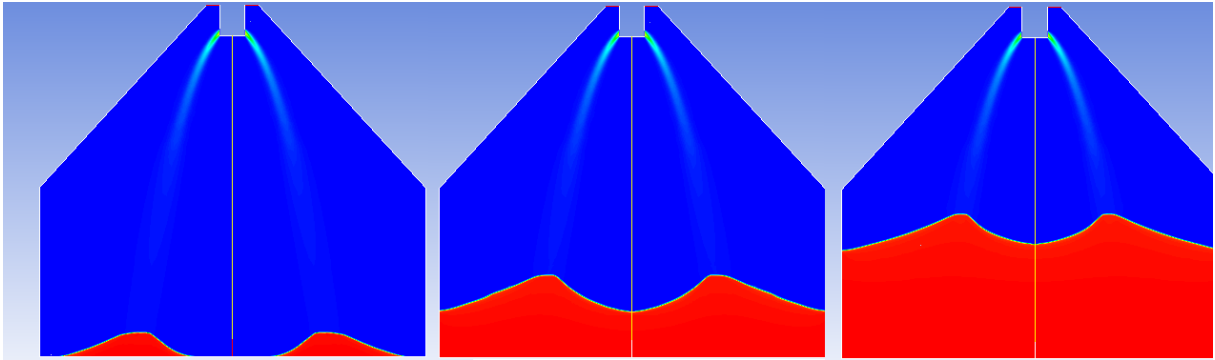
Figur 29. Anpassade cellstorlekar.

Figure 29. The adaptive mesh

3.3.2 Silofyllning

Simulering av silofyllnad utfördes enligt de modeller som beskrivits i kapitel 2.4.3.1 samt med numeriska antaganden enligt kapitel 2.4.3.2.

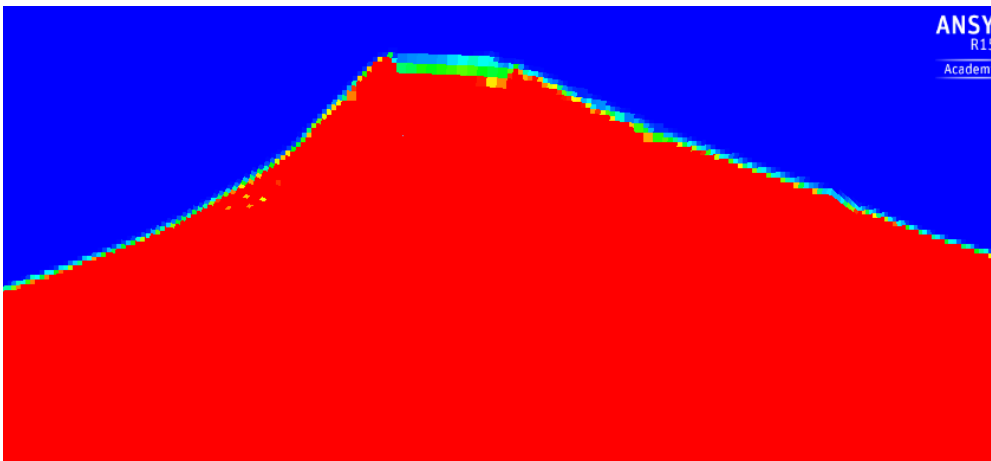
Vid simulering av silofyllnad matas inget bränsle ut från silon. Figur 30 visar fyllnadsproceduren och man kan där se hur volymen formar sig. Den roterande spridaren formar en rotations symetrisk form där topparna närmar sig silocentrum allteftersom silon fylls.



Figur 30. Ögonblicksbilder från tre olika tidssteg vid silofyllning.

Figure 30. Snapshot from three different time steps during silo filling.

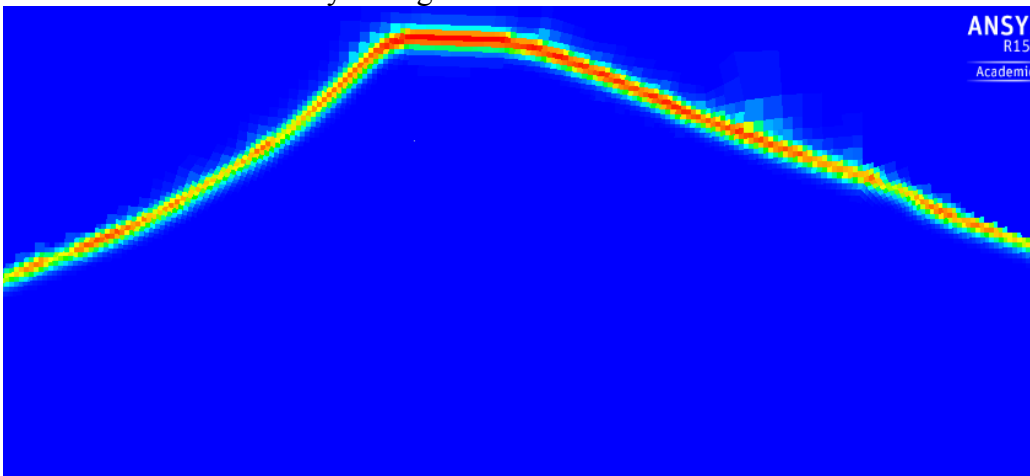
Notera att bränslets naturliga rasvinkel inte utvecklas, jämför figurerna 21, 22 och 23.



Figur 31. Friktionsviskositet.

Figure 31. Cell values for frictional viscosity

Figur 32 visar värdet för friktionsviskositeten. Det röda representerar ett värde på 10^5 P*s. Typiskt värde för en vätska är 10^{-3} och högvätskosa vätskor närmar sig 1. Detta tolkas som att endast det yttre lagret är i rörelse.



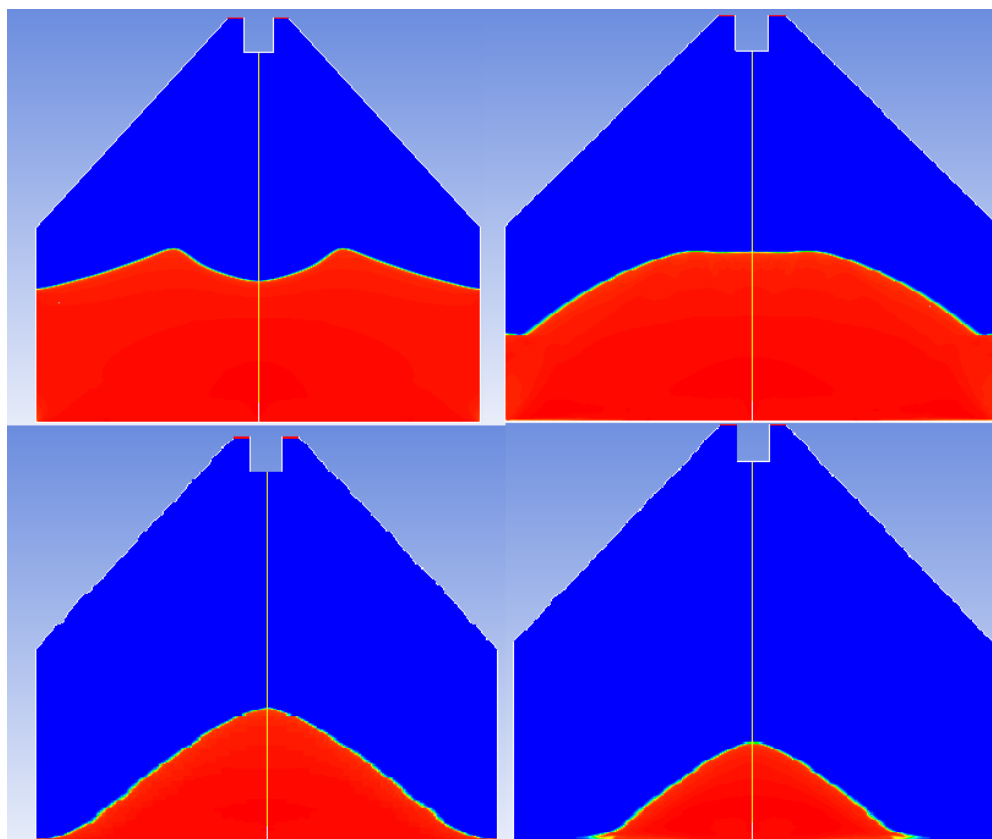
Figur 32. Granulär temperatur.

Figure 32 Granular temperature

Figur 32 visar den granulära temperaturen. Endast de yttre lagren har en granulär temperatur och är de enda som vibrerar medan resten av siloinnehållet är stilla. Högst värde fås vid toppen där granulerna landar.

3.3.3 Silotömning

Efter att silon fyllts startas simulering av utmatning. Vid denna simulering görs ingen inmatning.



Figur 33. Ögonblicksbilder från fyra olika tidssteg vid silotömning.
Figure 33. Snapshot from four time step at emptying the silo.

Figur 33 visar tömningen av silon. Flödesmönstret visar vilken effekt skruvens konstruktion har. Som syns i figur 24 kan inte skruvens gängvolym starta från 0. Detta leder till att utmatningen vid siloväggen avviker från det önskade värdet. Denna simulering är gjord i 2-D varför den krater som bildas pga. låg åk hastighet inte syns.

3.3.4 Ytterligare simulering

Ytterligare simulering för att undersöka olika faktorer inverkan genomfördes. Först en studie av luftmotstånd och turbulens för två olika partikelstorlekar. Sedan en simulering som visar de olika lagrens deformation vid utmatning. Slutligen utfördes en validering mot ett känt experiment.

3.3.4.1 Effekt av storlek, luftmotstånd och turbulens

I huvudsimuleringen för silofyllnad hade interaktionen med gasfasen försumrats. För att studera dessa effekter genomfördes ytterligare simuleringar där den maximala vertikala partikelhastigheten, samtidigt med det horisontella avståndet partikeln förflyttas innan nedslag. Gidaspow och k- ω modellen användes för luftmotstånd och turbulent viskositetsberäkning. Partiklarna som användes var 2 cm och 3 mm. Värden togs ut efter 1,6 sekunder simuleringstid. Denna tid valdes för att representera tiden när den första partikeln närmade sig silobotten. Ett annat skäl är att första partikeln har högre dragmotstånd innan övriga partiklar har accelererat luften.

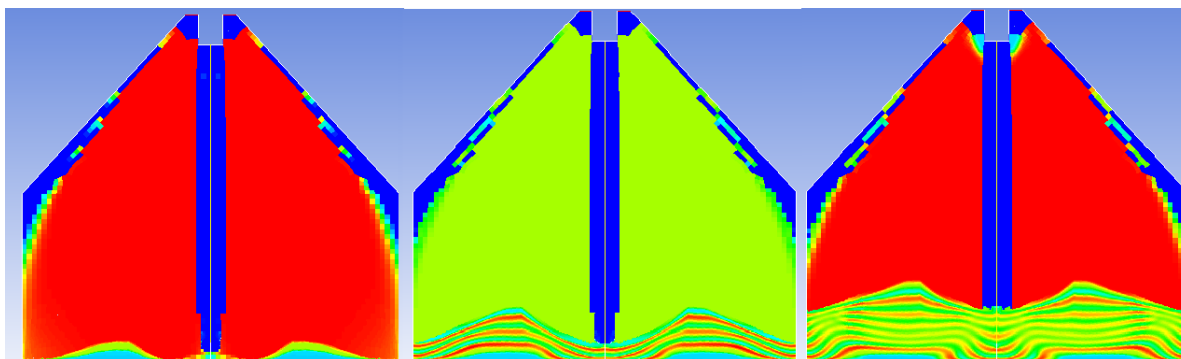
	$V_{y,max}$	Nedslag från silocentrum[m]
2cm	18.9	5.2
2cm med drag	15.6	4.8
2cm med drag och turbulens	15.48	4.8
3mm	18.9	5.2
3mm med drag	15.30	4.20
3mm med drag och turbulens	15.37	4.24

Tabell 1. Effekt av drag och turbulens vid två olika partiklar

Table 1. The effect of drag and turbulence for two types of particles

3.3.4.2 Skiktbildning

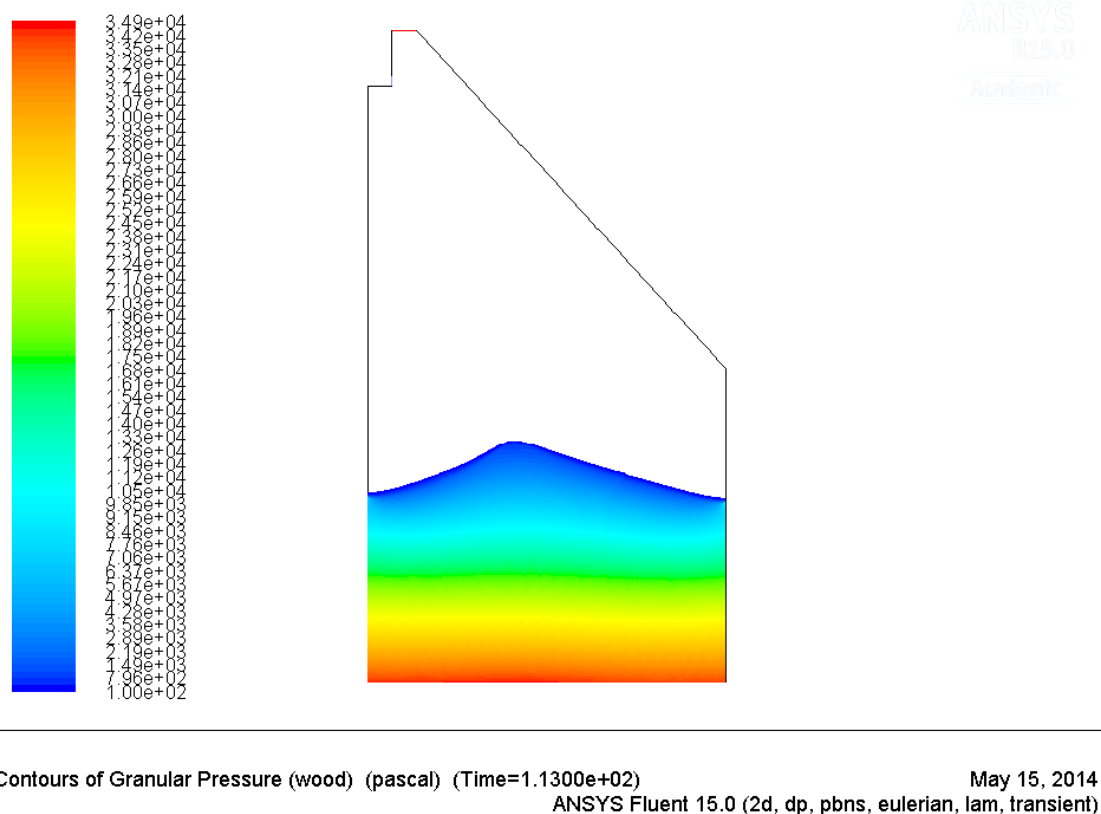
Då det skulle vara en stor fördel i att kunna förutse blandningsgraden mellan två bränslelager, som inte kan simuleras med tillgänglig kapacitet, utfördes en simulering med två sortiment som identifierades med olika temperatur, en egenskap som inte påverkar partiklarnas beteende. Partiklarna matades in i silon med ett sortiment i taget så att ett lager bildades. För att reducera värmeövergången mellan lagren sattes den termala konduktiviteten och specifika värmekapaciteten till 10^{-9} [W/m*K] respektive 10^9 [J/kg*K].



Figur 34. Skapandet av lager vid inmatning till silon.

Figure 34. Snapshot of performing layers during filling of the silo, three time steps.

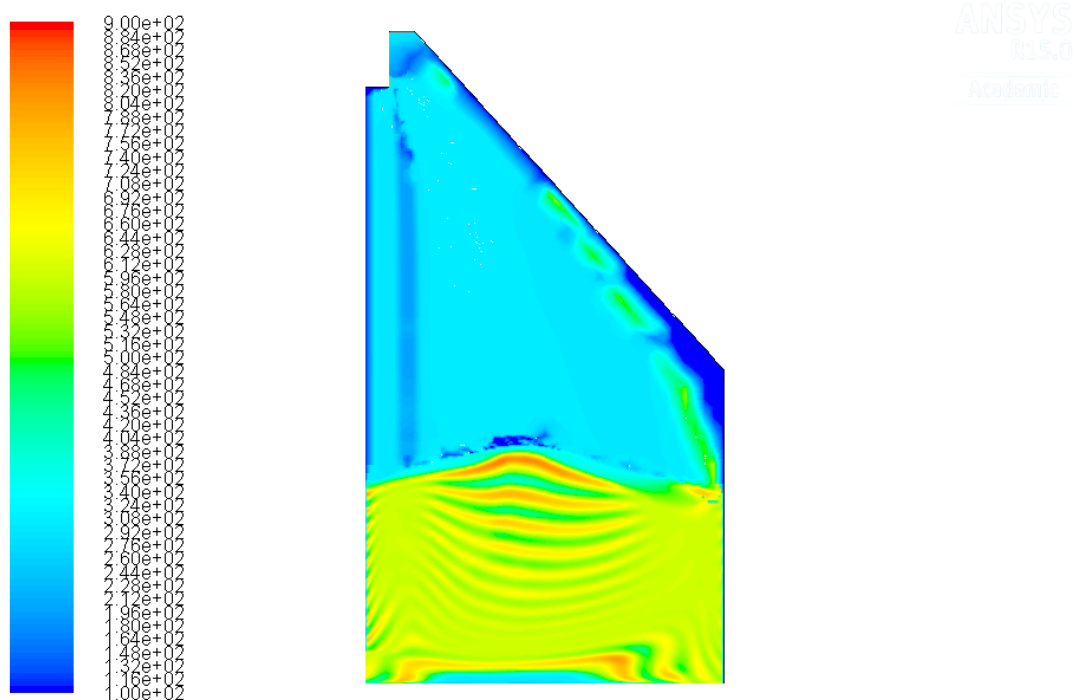
Resultat från fyllningen av silon vid olika tider visas i figur 30. Inflödet har markerats med olika temperaturer. Temperaturvariationen skapar visuella lager i silon. När silon fylls ytterligare kommer lagren succesivt ändra vinkel till att bli något brantare. Då silon är i det närmaste helt fylld utvecklas den naturliga rasvinkeln, jämför med figurena 20 och 21. Redan vid en moderat fyllning av silon där silotrycket inte har utvecklats fullt uppstår så stora krafter att skikten börjar kollapsa.



Figur 35. Vertikalt tryck i silon.

Figure 35. Vertical silo pressure.

Figur 35 visar det vertikala trycket som byggs upp i silon under fyllning och som delvis deformerar lagren i silons nedre del.



Contours of Static Temperature (wood) (k) (Time=1.1580e+02)

May 09, 2014

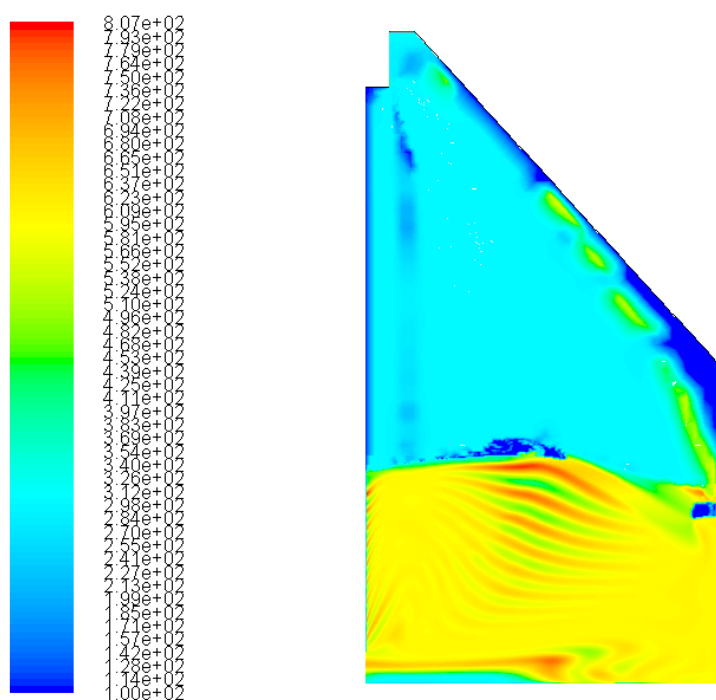
ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, eulerian, lam, transient)

Figur 36. Deformation av lager vid utmatning.

Figure 36 Layer deformation at reclaiming.

Figur 36 visar hur de olika lagren som initialt deformerades vid fyllning, deformerar ytterligare vid utmatning. Deformationen i siloperiferin uppstår genom det relativt sett stora flödet i den delen av skruven. Deformationen in mot centrum åstadkoms av krafter från skruven, medan de centrala delarna i bilden är resultat av silotryck.

Deformationen är plastisk och förklaras med deformation i bulken, genom att partiklar rör sig mot varandra under högt tryck. Det är således inte de enskilda partiklarna som i huvudsak deformerar, där det förekommer bidrar det väldigt lite till den totala deformationen.



Contours of Static Temperature (wood) (k) (Time=1.2040e+02)

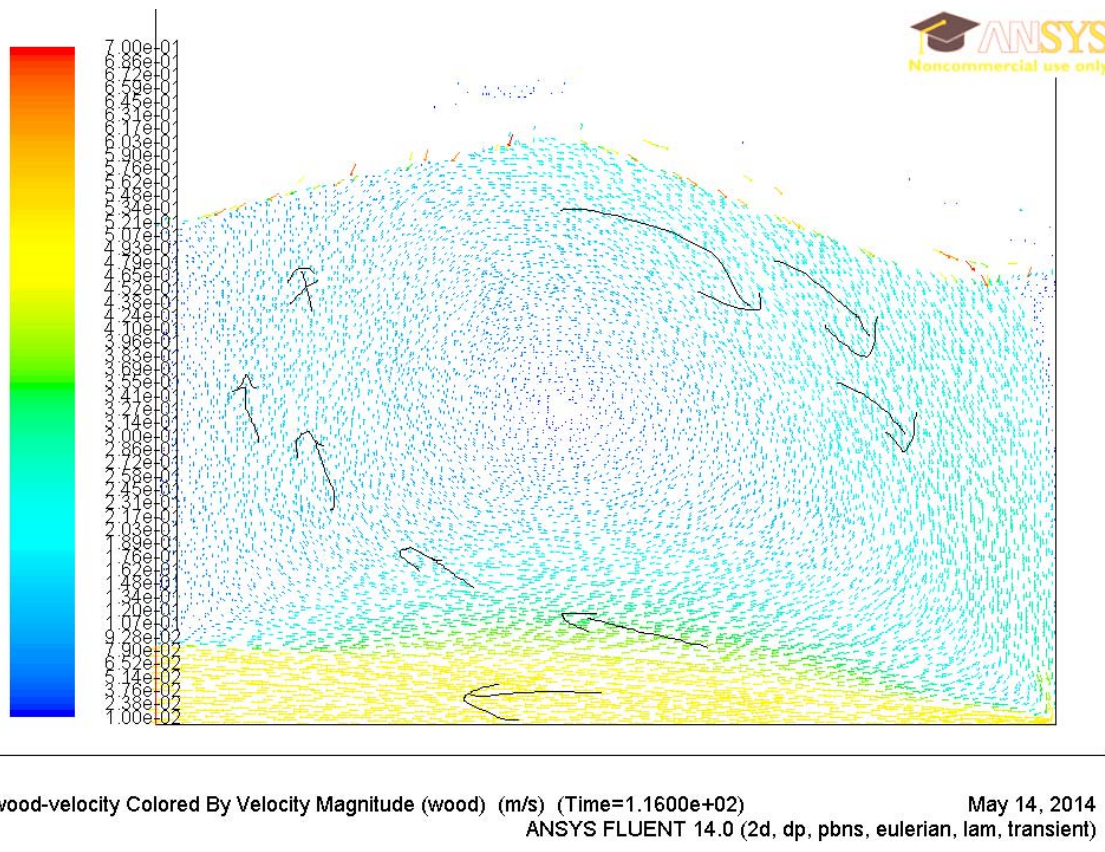
May 09, 2014

ANSYS Fluent 15.0 (2d, dp, pbns, eulerian, lam, transient)

Figur 37. Deformation av lager vid utmatning.

Figure 37 Layer deformations at reclaiming.

Figur 37 visar lagerdeformeringen i slutet av simuleringen. Nivån i siloperiferin sjunker mest en bit in från väggen pga. siloväggens högre friktion. Bottenlagren förflyttas in mot silocentrum pga. krafter från skruven. Utmatningen sker genom den centralt belägna huven. Motståndet mot huvens sidor och mot motstående stillastående bränsle tvingar flödet uppåt och åt sidorna.



Figur 38. Vektordiagram över siloinnehållets rörelse vid utmatning.

Figure 38. Vector diagram showing the fuel movements at reclaiming

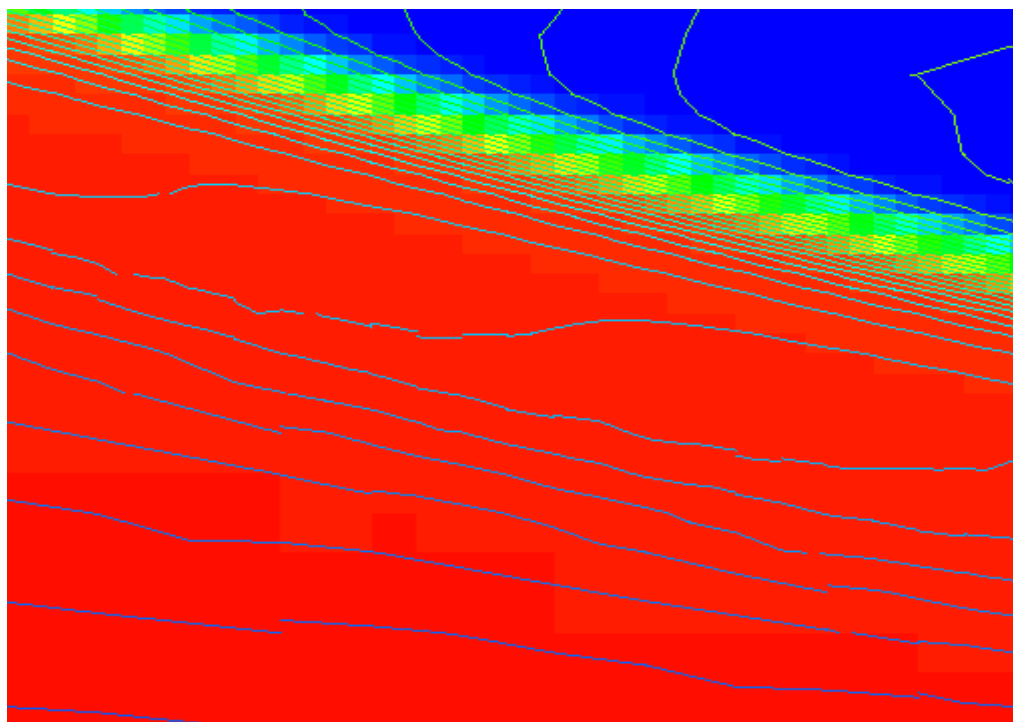
Figur 38 visar partiklarnas rörelse i silon, utmatningen är till vänster i bild genom den centralt placerade huven över utmatningsskruven se figur 24. Rörelsen i skruven är dominerande, gul färg, följt av partiet omedelbart ovanför, sedan kommer området i siloperiferin. Lägst hastighet är det i mitten av bilden och en bit upp vid silocentrum. Simuleringen är gjord i 2-D, man får räkna med att krafterna skapar rörelsevektorer i skiktet omedelbart framför skruven i åkriktning. Rörelserna är generellt mindre där och avtar ganska snart helt.

Till detta kommer kratern som uppstår pga. låg åkhastighet hos skruvmataren. Kratern löser upp silotrycken lokalt. Vi har inte kunnat simulera rörelserna vid lägre silotryck men man kan anta att den inre friktionen minskar och därmed minskar den horisontella rörelsen ovanför skruven. Detta leder till att mer bränsle matas ner utefter skruvens sträckning. På grund av skruvens låga åkhastighet töms sektionen, visad i figur 38. Tömningen sker från siloperiferin och fram mot centrum. Det är så kratern skapas.

De vertikala uppåtgående vektorer har även iakttagits i mottagningsfickor med skruvmatare, när vektorn inte kan förflytta sig horisontellt lyfter den uppåt. Med högre nivå i silon kan man anta att den vertikala vektorn i silocentrum dör ut fortare.

3.3.5 Verifiering av modell

För att validera använda modeller i huvudsimuleringen gjordes en jämförelse med experiment utförda av Jaeger och Nagel (1992). I deras experiment byggdes en stack av granulärt material upp så att rasvinklar skapades. Efter detta lutades stacken över den stabila rasvinkeln. Med en höghastighetskamera kunde man visa att endast den yttre delen av stacken rörde sig. För att simulera detta ändrades gravitationens riktning i simuleringsmodellen i stället för att luta silon. En del av silovolymen och hastighetsgradienter visas i figur 38. Varje linje representerar 0,1 m/s.



Figur 39. Hastighetsgradienter nära stackens yta efter att gravitationsvinkeln ändrats.

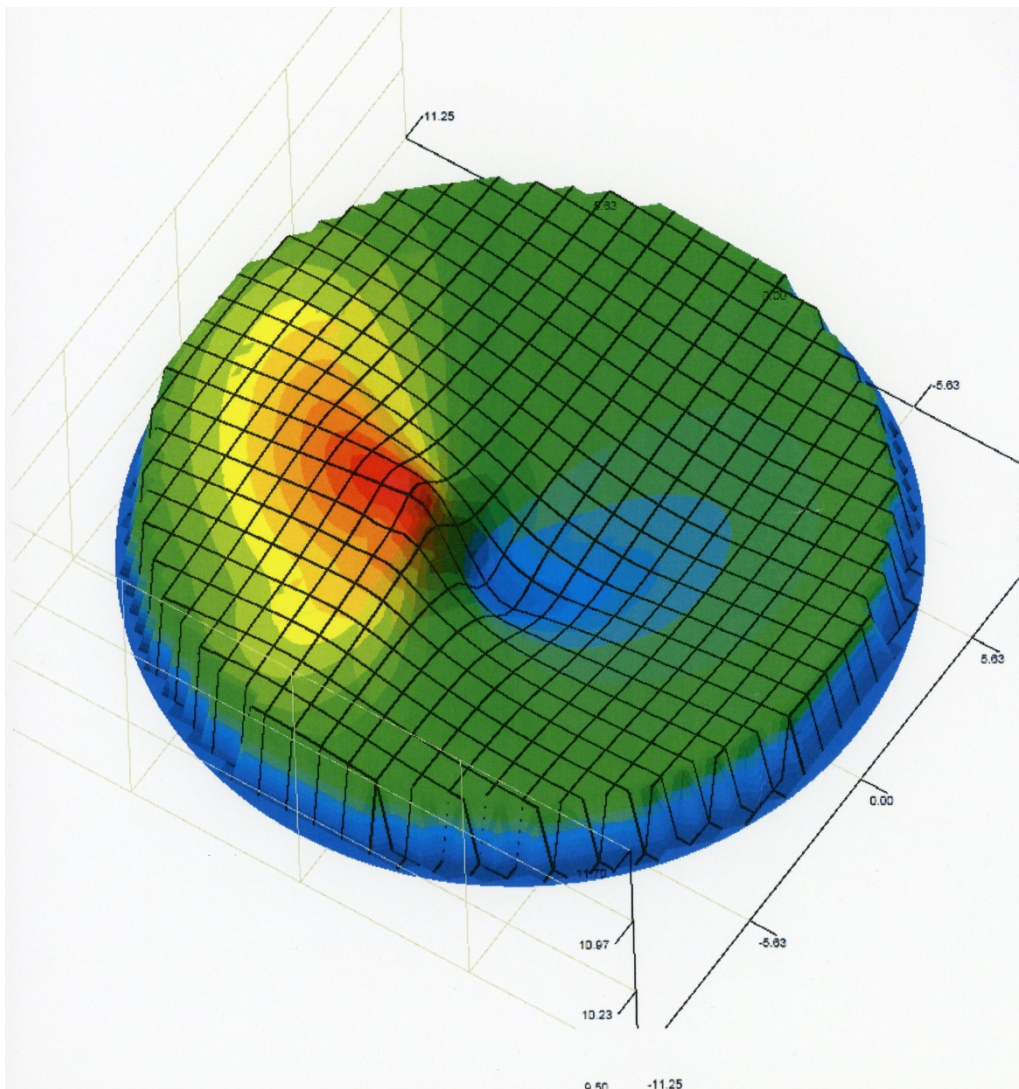
Figure 39. Velocity contours near the surface of the pile after the direction of gravity changed.

3.3.6 Nivåmätning i referenssilon

Som nämnts tidigare är referenssilon utrustad med två skannrar som skapar en tredimensionell bild av silons innehåll. Bilder från dessa skannrar har visats tidigare i rapporten. Figurer 19, 21-23. De bilder som skapas med detta system visar, till skillnad från datorsimuleringen, samtidig fyllnad och tömning. Några av bilderna visar en skevhet i geometrin i X-axel vilket konstaterats vid okulär besiktning. Det mest intressanta, som inte kunde återskapas vid simulering, är dock den krater som hela tiden finns ovanför utmatningsskruven och som orsakas av skruvens långsamma åkhastighet. Denna krater rör sig kontinuerligt runt hela siloarean och skapar komplicerade homogeniserings- och segregerings situationer. Kratern utvecklas ganska tidigt vid tömning, redan vid 80 % nivå är den utvecklad och påverkar homogeniseringen.

Figur 39 visar siloinnehållet sett från ovan. Blå områden ligger djupt ner i silon medan det röda partiet representerar högsta nivå. Spridaren roterar med 2,3 rpm, det betyder att det bränslet som kommer in under den huvudsakliga tiden rasar ner i kratern och under en kort tid byggs toppen på. Vi har fått en situation med sist in först ut då vi vill

ha först in först ut. I detta läge var åkrörelsen 8° per timme vilket kan jämföras med en skruvutmatare som beskrivs senare och som har en rörelse på 180° per timme. Åkhastigheten för referenssilon uppmättes vid en låg kapacitet. Det är dock inte klarlagt att den är helt kapacitetsberoende utan påverkas i huvudsak av silokrafter.



Figur 40. 3-D vy över siloinnehållet i referenssilon.

Figure 40. 3-D view of top of silo content.

3-D bilderna redovisar inte helt rätt, vid okulärbesiktning konstaterades att den överrepresentation av utmatning som finns vid siloperiferin inte återges i bilderna.

3.4 Diskussion homogenisering

Att homogenisering av blandbränslen är en nödvändighet om man vill minimera kostnaden för bränsleinköp och inte vill stressa pannan står väl klart för de flesta. Men hur gör man? I denna rapport har tre homogeniseringstekniker analyserats.

- Stackhomogenisering
- Homogenisering i mottagningsficka
- Homogenisering i silo

3.4.1 Stackhomogenisering

Försöken i Enköping visar att metoden, är praktiskt ganska enkel. En i övrigt van traktorförare lär sig mycket snabbt att bygga stacken. Det gäller dock att ha klara och tydliga instruktioner om ändamålet med stackningen och hur den skall utföras. I försöket lade vi, i medeltal, upp 0,3 m tjocka lager av de olika sortimenten. Tekniken var en skopa som trycktes upp på stackens flank. Det kan vara frestande, ur kostnadsperspektiv, att samtidiga trycka upp flera skopor. I det fallet får man förlita sig på att bränslet blandas när det rasar ner efter skopans ingrepp, inte att man tar med sig flera lager i skopan. Proveldningen visar att stackningen tillsammans med utmatning från mottagningsfickan har en hög homogeniseringsnivå. Reduktionen av HCl svarar helt mot inblandningen och förbränningen genomfördes utan HCl spikar.

Analys av de prover som togs var mycket besvärlig, svårдетекterat bränsle och en stor mängd objekt som skulle analyseras. Så vitt vi i projektet kan bedöma finns det ingen annan utvecklad metod som kan göra analysen bättre. Av tillgänglighetsskäl fick provmängden reduceras mot planerat och endast 3/5-delar av uttagna prover analyserades. Det är möjligt att noggrannheten hade kunnat förbättras om de resterande proverna hade analyserats men att komma till ett resultat med någon högre signifikansnivå är inte troligt då det var många parametrar som varierade och alla kunde inte analyseras.

Att våga prata homogenisering och inte blandning beror på att de volymer som analyserades motsvarar inmatningen till en 100 MW panna under samma tid som utbränningen sker. Vårt påstående att alla sortimentens egenskaper skall samverka samtidigt är i så fall uppfyllt.

Vi blandade två traditionella metoder att homogenisera, Chevron och Strata varav den senare endast byggdes som fullt utvecklad stack. Det finns ingenting i analysen som särskiljer metoderna även om Stratan bör vara bättre pga. tunnare sortimentsskikt.

Vilken metod man väljer är betingat dels av geografien, vad har man för yta att jobba på och hur man tänker att arbeta, exempelvis stacka direkt från lastbil eller köra från lagringsstackar.

Chevron stacken kan endast byggas i en lång stack. Den lämpar sig utmärkt om man vill lossa lastbilen utefter dess långsida och sedan stacka. Den metoden ställer krav på logistiken. Att köra bränsle med traktor från lagerstackar blir relativt kostsamt då

stacken kan bli lång. Stacken kan också byggas från ena kortsidan och brytas från den andra när längden finns där.

Stratastacken kan bygga bredare och ger i genomsnitt kortare transportväg. Även här kan stackning direkt från lastbil utföras om man har stackbredden i närheten av 40 – 45 m. Med Stratastack bör man arbeta med +/- stackar dvs. en stack byggs upp samtidigt som den andra stacken bryts.

3.4.2 Homogenisering i mottagningsficka

Ett flertal anläggningar arbetar med tekniken. Utifrån ett inmatningsmönster lastas olika sortiment i en ficka som oftast är försänkt i marken.

De vanligaste matarna för sådana fickor är:

- Stokermatare
- Kedjematare
- Fasta skruvmatare
- Vandrande skruvmatare
- Waking Floor

Den vanligaste mataren är stoker-matare. Dessa består av två eller flera specialutformade stegar som växelvis matar bränslet till utmatningspunkten. Även dessa är utrustade med rivarvalsar. Stokermatare har inte studerats i detta projekt. De har dock lägre matningsverkningsgrad 65 – 75 % mot kedjematarens nära 100 %. Detta innebär att bränslelagren kollapsar vertikalt i hela sin sträckning och inte bara vid utmatningen. Detta bör leda till bättre homogenisering än vad som åstadkommit i försöket med kedjematare.

Kedjematare är också en frekvent teknik, inte så vanlig i Sverige men mer i Finland. Den består av två eller flera parallella transportörkedjor med mellanliggande medbringare. Krafterna från medbringarna är stora och hela tvärsnittet matas framåt. Homogeniseringen sker vid utmatningen där de olika skikten blandas.

Fasta skruvmatare används i kortare mottagningsfickor. Två eller fyra parallella skruvmatare är placerade i botten på en ficka och matar mot ena kortsidan. Rivarvalsar saknas. Det rörelsemönster som visas i figur 37 syns tydligt i dessa fickor. Då innehållet i princip töms bakifrån och friktionskrafterna är relativt små kan man räkna med att eventuella skikt blandas i skruven. Fylls nytt sortiment samtidigt med utmatning kommer den frilagda skruven att prioritera detta bränsle. Tekniken bör vara att fylla fickan helt och sedan mata ut och därefter repetera förfarandet.

Vandrande skruvmatare är mindre vanlig. På grund av sin låga vandringshastighet är den utmärkt för skikthomogenisering då den matar ut och blandar hela fickans tvärsnitt, momentant i varje position, även om bakkanten prioriteras. Önskar man en ficka enbart för homogenisering och kan inskränka sig till att bara mata fickan från ett håll är den vandrande skruven idealisk. Vi bortser här helt från kostnadslägen och mottagningskapacitet.

På senare tid har det tillkommit en matare som placeras i en ficka. Den är adopterad från lastbilar och kallas "Walking Floor". Grupper av släta balkar täcker botten och rör sig växelvis fram och tillbaka. Rörelsemönstret är i princip detsamma som för en stokermatare med en skillnad att flera grupper av balkar samverkar i den positiva rörelsen än i den negativa. Resultatet ger en bättre matningsverkningsgrad än stokermataren. Fickan behöver rivarvalsar. Vid studier av lastbilar har det iakttagits att lastbärarens innehåll töms som en limpa utan kollaps av skikt i höjddled.

Ett bränslelager med en höjd på 4 m höjd kan inte matas ner till en transportör på 1-1,5 m bredd, därför sätts rivarvalsar in vid utmatningen. Rivarvalsarna har även andra uppgifter bl.a. att krossa källklumpar. Om man istället sänker utmatningsöppningens höjd kommer stora krafter att byggas in vid utmatningen som dels ökar matarens energiförbrukning och som skapar valv vid utmatningsöppningen. Även byggnadskonstruktionen utsätts för extrema krafter.

Den vanligaste konstruktionen är att låta rivarvalsarna rotera mot matningsriktningen och på så sätt reducera utmatningen. I Enköpingsförsöket användes både motroterande och medroterande valsar.

Om man laddar en ficka enligt skiktprincipen kommer bottenlagret att passera under den nedre rivarvalsens och de resterande lagren kommer att påverkas av valsarna. Vid motrotation av valsarna minskas andra skiktets påverkan. Vid medrotation förstärks andra skiktets påverkan på homogenisering.

Rivarvalsarna fungerar även som en rörlig vägg. Krafterna från medbringarna (kedjematare/stokermatare) överskrider de inre friktionskrafterna i materialet vid utmatningen och endast den nedre delen följer med mataren. Materialet dras isär och vi får en slänt ner mot den nedre valsens. Omedelbart bakom medbringarna finns p.g.a. materialets friktion mot golvet ett hålrum. Detta hålrum fylls från slänten där de inre friktionskrafterna är lägst. Hålrummen finns bakom varje medbringare men krafterna i den fulla fickan är för stora för att bränslet skall komma ner (valvning).

Med bara en rivarvals i en kedjeficka kommer däremot hela tvärsnittet att matas fram och toppen på bränslehögen passerar över valsens med överbelastning av efterföljande transportör som resultat.

3.4.3 Homogenisering i silo

Datakraften satte gränsen för vad som kunde göras. Att arbeta med andra geometrier än sfärer, involvera flera partikelstorlekar, göra 3-D simuleringar eller analysera samtidig fyllning och utmatning, var inte möjligt med tillgänglig datakraft och inom den tidsrymd som stod till förfogande, detta konstaterades mycket snart efter projektstart.

Den första simuleringen visar vad som händer vid fyllning av silon. Hur den rotationssymmetriska volymen byggs upp och hur höjdpunkten förflyttas in mot centrum vid ökad nivå. En intressant aspekt var att den 45o-iga rasvinkeln, som är vanlig för granuler, inte utvecklades förrän silon var nästan full. Den kinetiska energin är för stor i nedslagsplatsen för att de naturliga rasvinklarna skall kunna utvecklas. Den granulära temperaturen visade också att en stor del av flödet rörde sig ut mot siloperiferin. Det

framgick även att skikten i silon under fyllning delvis deformerades under silotrycket och av inre friktionen mellan partiklarna.

Simulering av silotömning visade att det redan deformerade skikten deformerades ytterligare av materialströmning och krafter från mataren och silotryck. Överrepresentationen i siloperifer visade sig vara större än vad som tidigare hade ansetts. Även effekten av gängflank sågs påverka strömningen. Befintliga algoritmer och geometrier är inte helt säkra, för hur man skall se på flödet i silon. Ett flöde som kom bakifrån skruven fyllde på skruvgeometrin och förhindrade material att komma in ovanifrån.

De bilder som visas från utmatning, figur 38, har inte med den karaktaristiska kratern, då 3-D simulering inte kunde utföras. Vi får därför föra ett teoretiskt resonemang.

Om strukturen ovanför skruvmataren inte kapsejsar bildas en rygg som förhindrar material att komma ner till skruven. Krafterna i de skikt som visas i simuleringen är mycket stora. Silotrycket i sig ger höga krafter därtill kommer effekten från mataren. Skruven transporterar således materialet bakifrån. Om skikten däremot mer eller mindre har kapsejsat, vilket kan ske vid lägre silotryck, kan en homogenisering uppstå utifrån vad som finns i bulken.

Tillkommande material matas ner i kratern inte endast i proportion till ytan utan sidoflankerna påverkar. Grovt inkommande material hamnar i botten på kratern och matas ut tidigt. Fint inkommande material byggs kluster på materialflankerna som rasar ner när de blivit för stora. Detta fenomen utvecklas ytterligare i kapitlet segregering.

I mitten på 70-talet byggdes en silo, då världens största automattömmande flissilo. Diametern är 20 m, höjden 40 m som rymmer 10 000 m³, i botten på silon finns en skruvmatare i princip av samma typ som används i bränslesilor i dag, men med möjlighet till högre åkmoment på skruven. Silon ingår i ett processteg vid en sulfitmassafabrik och kravet var att flisen skulle ha en uppehållstid i silon på tre dygn. Efter att anläggningen tagits i drift genomfördes en kontroll av uppehållstiden. Metoden var vattenlösliga isotoper som sprayades på inkommande flisström och detekterades vid utmatningen. I huvudsak uppfylldes kraven. En liten delström hittade ut tidigare och det var helt enligt förutsättningarna. Den yttre delen av en skruv får alltid en överrepresentation i kapacitet då konstruktionen av skruven inte kan starta från noll i gänghöjd.

Följande är ett citat från rapporten (Isotopnytt nr 67) från försöket; ”Avsikten med försöket var att studera flistransporten genom silon och att kontrollera att inga kortslutningsvägar fanns, dvs. att inte en del av flisen transporterades mycket snabbare genom silon, samt att erhålla en kvantitativ uppskattning av graden av utblandning. Den inkommande flisen märktes med en vattenlöslig isotop, Sammanlagt märktes 600 m³ flis. Den märkta flisen påvisades vid utloppet med en detektor. Förekomsten av märkt flis korrelerades mot utmatningsskruvens läge så att eventuella variationer i transporttid skulle kunna lokaliseras till rätt sektor i silon. Matningen pågick i 7 dygn, då hade 8000 m³ matats ut och 99 % av den märkta flisen återfunnits. Vid försökstarten innehöll silon ca 4000 m³, silon tömdes aldrig utan volymen hölls relativt konstant. Sammantaget visade försöket att flistransporten genom silon sker förhållandevis samlat med föga omblandning.”

Vad som är unikt med denna silomatare, till skillnad från dagens, är dess höga åkfastighet. Skruven rör sig 120o på en batch om 200 m³. Skruven matade ut ett skikt på < 2 m. I dagens silor kan skikten gå från 6 – 8 m och ibland ända upp till silotoppen. Figurerna 14 och 39 visar hur det kan se ut i dagens silor. Det blå området i mitten ligger rakt över skruvmataren. Höjdskillnaden i bilderna är i storleksordning 10 m. Det resterande skiktet över mataren är bara några meter tjockt. Det händer att skiktet bryts igenom. Speciellt om det finns en hög andel av svårhanterbart bränsle som bark med i bränslemixen.

Den gamla silon visade ingen tendens att skapa krater vid utmatningen trots att volymen endast var 40 %. Från figur 22 kan vi se att dagens silor skapar krater redan vid 86 % fyllnad. Dagens silor med den mycket låga åkfastighet som matarskruven har, matar ut bränsle i en cirkelsektor åt gången och skapar en stor krater i den sektorn. Sektorn fylls sedan via spridaren och en komplicerad segregering skapas. Genom att analysera figur 47 kan man komma fram till att när en sektor töms matas först grovt material ut, därefter mellanfraktioner följt av finfraktioner. Sedan upprepas utmatning av mellanfraktion och eventuell ytterligare grovfraktioner. Eftersom siloinnehållet är rotationssymmetriskt upprepas detta förfarande hela tiden med viss variation, beroende på nivå i silon.

Vid samma tidpunkt byggdes Sveriges första automatstack inom samma koncern. En linjär stack med två vandrande utmatningsskruvar. Avsikten var här att homogenisera olika fliskvalitéer för att minska svängningar i kokningen. Samma typ av isotopundersökning utfördes men resultatet var dessvärre negativt. Orsaken var utmatningsskruvens låga vandringshastighet. Automatstacken arbetar efter samma principer som de sk. A-ladorna som finns på ett antal verk.

4 Segregation

I verkliga processer, med flöde av granulära partiklar är dessa inte perfekta sfärer och de är inte heller av samma storlek. Detta faktum leder ofta till segregation.

Blandar man två fluider leder det normalt till utjämnande koncentrationer. Det är inte alltid så då två granuler blandas. Den tillförda energin kan orsaka att partiklarna segregerar. Segregation uppstår oftast på grund av skillnader i partikelstorlek, partikeldensitet, form och kan även orsakas av partikelytans ojämnhet. Det är dock viktigt för tolkning av segregationsprocessen att känna till segregeringsmekanismernas principer, det är fem kända, som enligt den samlade litteraturen svarar för 80 % av segregeringen.

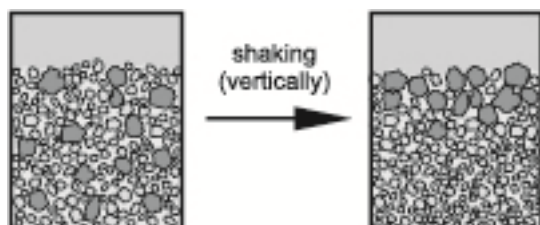
- Kinetisk siktning
- Trajektorisk segregation
- Intern friktionsvinkel
- Fluidisering av finfraktion
- Vind

4.1 Kinetisk siktning

Det första fenomenet som genererar separation är när partiklar med olika storlek utsätts för rörelse. De mindre partiklarna vill röra sig genom bulken. När partiklarna är i rörelse har inte alla samma hastighet, därför bildas gap mellan partiklarna. Små partiklar behöver ett mindre gap för att med gravitationens hjälp passera. Detta leder till att en stor del av de små partiklarna så småningom hamnar på botten.

Diskreta element metoden (DEM) simulerad av Jullien Meakin och Pavlovitch (1992) och testad av Canoli och Manga (2005) har båda bekräftat denna typ av segregation. Canoli och Manga visade även att partiklarnas andra egenskaper påverkar segregering.

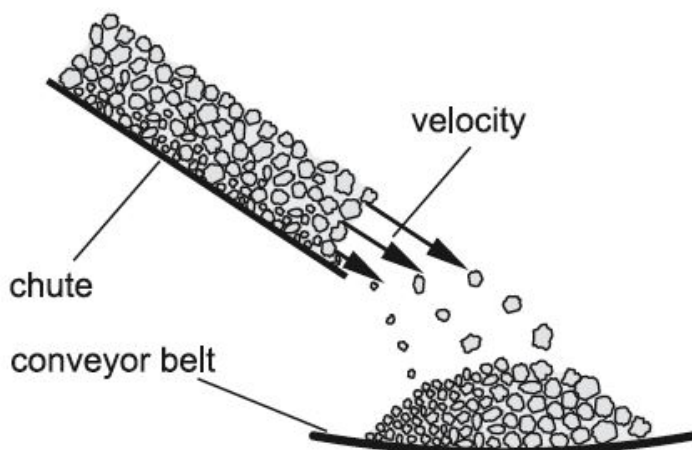
Vi finner denna typ av segregering i hela hanteringskedjan från inkommande bränsletransportör till sista transportören innan pannan. Den egenskap som har störst påverkan för att förhindra denna typ av segregation är bränslets ytfukt. Ytfukten binder med vattnets ytspänning mindre partiklar till större och minskar därigenom segregeringen. Trots det får man räkna med segregering. Lastbilar har många gånger spånet liggande i den nedre tredjedelen av lastbäraren. Provtagning från toppen för fraktionsanalys ger fel resultat.



Figur 41 Segregering i behållare som vibrerats typisk lastbil. (Dietmar Schulze).

Figure 41. Segregation due to percolation in containers shaken vertically

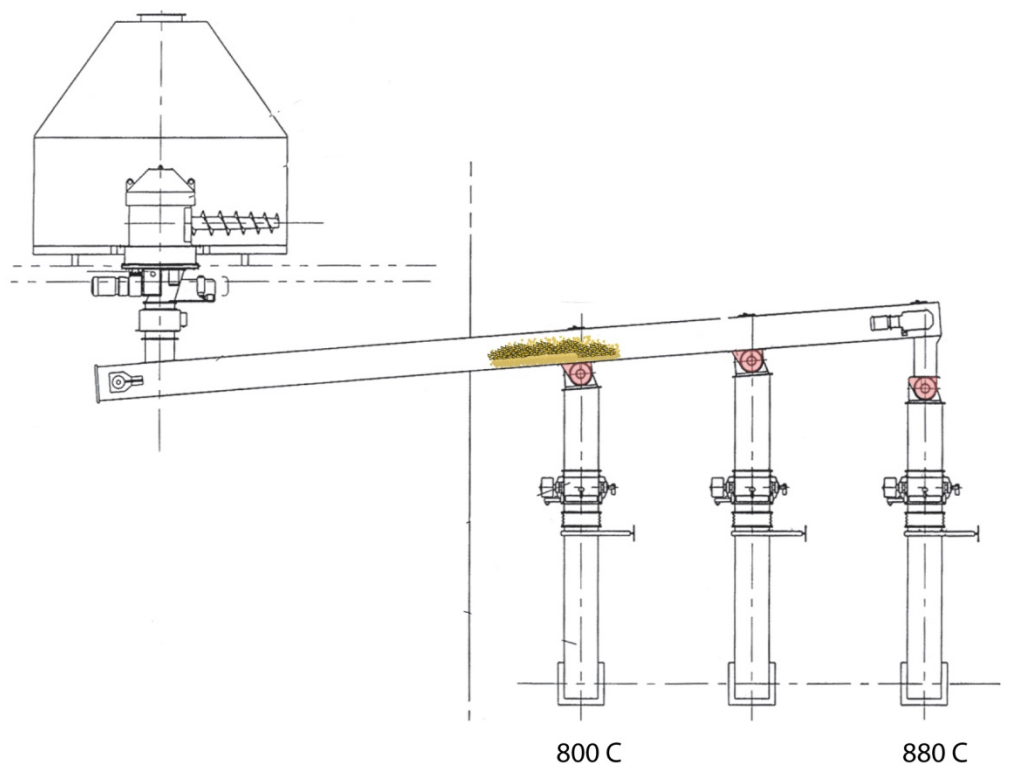
Bandtransportörer har normalt ett sag (nedhäng av gummibandet mellan bärrullställ) på 20 mm. Vid varje passage av rullställ (1 - 1,2 m) lyfts bandet för att sedan sjunka ner igen vilket skapar vibrationer och segregering. Vibrationer från defekta rullar eller från drivtrumma, vändtrumma samt band- och trumrensare förstärker effekten. Efter pålastning behövs det enligt författarens studier inte mer än 5 – 10 m förrän segregationen är ett faktum. Spånet ligger på botten av bandet.



Figur 42 Segregering vid omlastning (Dietmar Schulze).

Figure 42. Segregation on a belt charged from the side.

Figur 42 illustrerar segregering vid omlastning orsakat av en kombination av kinetisk segregering i den tidigare transportören och trajetoral segregering vid omlastning. Samma fenomen uppstår vid omlastning mellan t.ex. två bandtransportörer.



Figur 43 Segregering vid inmatning till panna vid användning av "rövarskruv".

Figure 43. Segregation at boiler feeding when using a "robbing screw" typically bed temperature as consequence of segregation is shown.

I anläggningar där man arbetar med s.k. "rövarskruv", d.v.s. två eller flera skruvar som tar bränsle från en skraptransportör och matar in i pannan, kan man se en klar temperaturgradient i bädden hos en fluidbäddpanna. Skillnad i bäddtemperatur mellan olika inmatningspunkter. Första inmatningspunkten har en lägre bäddtemperatur, andra har en något högre och den tredje har högst bäddtemperatur. Figur 43 visar en 10 %-ig skillnad mellan första och sista inmatningspunkten. Orsaken är kinetisk segregering i transportören. Finfraktionen hamnar ganska snabbt i botten av transportören och huvuddelen av finfraktionen har matats in i första position och åker med rökgaserna upp och förbränns i fribordet eller cyklonen. Andra position har mindre andel finfraktion och kan behålla bäddtemperaturen. Tredje positionen har bara grovt bränsle och där är bäddtemperaturen högst. Reglersystemet känner inte av dessa variationer utan vi får oönskade CO- och NOx emissioner i de olika regionerna.

En gammal teknik som kommit till heders för panninmatning är en matare med två skruvmatare som placeras under en liten utjämningsficka. Skruvarna matar bränslet åt varsitt håll från fickan ner till inmatningspunkterna. Kinetisk segregering kan ske i fickan men uppehållstiden är kort varför det inte har stor påverkan på förbränningen.



Figur 44. Pannficka som betjänar två inmatningspunkter.

Figure 44. Surge bin serving two boiler inlets at the same time.

4.2 Trajektorial segregering

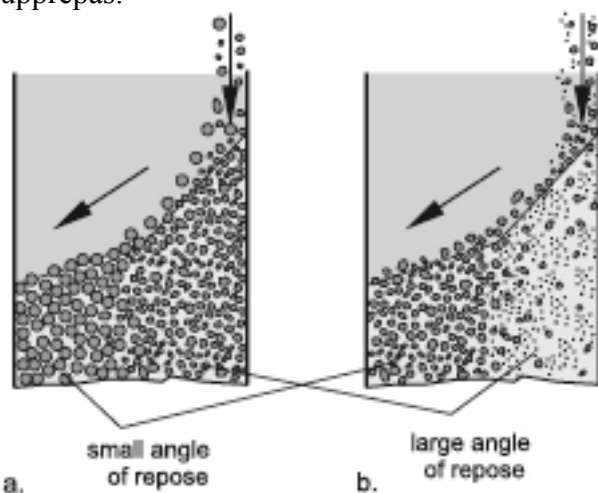
När granuler lastas om från en transportör till ett lager eller till en annan transportör uppstår en segregation av finfraktionen. Partiklar har olika egenskaper; form, storlek, vikt osv. Skillnaden i egenskaper ger en skillnad i friktionskrafter för partikeln, både med avseende på luftmotstånd och partikel-partikel friktion. Då små partiklar har större yta/volym (massa) kommer mindre partiklar att i större utsträckning påverkas av friktionskrafter i förhållande till tröghets- och gravitationskrafter, vilket resulterar i storlekssegregering. Yta till volymförhållandet varierar även med partikelns form. Den simulering som utfördes av Julienn och Meakin (1990) visar denna segregering vid stackbyggnad. Simuleringen visade att större partiklar rullar av stacken och ackumuleras vid stacken fot. I samma rapport beskriver författarna en simulering inuti en silo. Resultatet visar klart en koncentration av större partiklar i silons periferi.

Vi finner denna typ av segregering i alla omlastningar, både mellan transportörer och till lager. I dag är de flesta silor utrustade med spridare som fördelar grovfraktionen i princip likformigt runt siloperiferin. Fraktionen finns där men den är lika runt hela silon och skapar inga problem vid förbränning, vilket den skulle ha gjort om grovfraktionen legat i en position. Separation vid omlastning är besvärligast mellan transportörer och då främst bandtransportörer. De flesta, för att inte säga alla, omlastningar mellan transportörer beror på en vinkelförändring i transportriktningen. Detta innebär att bränslet segregerar tvärs transportörens bredd. Finfraktionen på ena sidan av nästa transportör och grovfraktionen på den andra. Det finns anläggningar som på detta sätt har matat finfraktion till en silo och grovfraktion till den andra. Det är uppenbart att dessa anläggningar har dålig förbränningsverkningsgrad och har svårt att kontrollera sina emissioner. För att komma tillrätta med detta problem behöver man bygga stup som

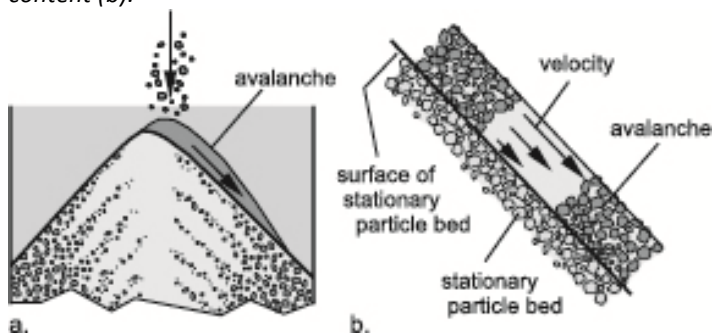
vrider in bränsleflödet till efterkommande transportör, det finns inte många leverantörer som levererar sådana, men med lite krav och handpåläggning går det att lösa.

4.3 Inre friktionsvinkel

Den tredje delen, som troligtvis har störst effekt på segregering i lager, skapas genom att olika material i samma lager har olika interna friktionsvinklar. Finfraktion har brantare rasvinkel än grovfraktionen beroende på inblandade adhesionskrafter. Avrundade partiklar har lägre rasvinkel än kantiga och spretande partiklar, jämför huggen- med krossad flis där det i sistnämnda fallet är svårt att identifiera någon rasvinkel. Detta innebär att partiklar med högre friktionsvinkel bygger kluster centralt i lagret och de med lägre inre friktionsvinkel rullar eller glider till lägre nivåer ovanpå dessa kluster och skapar egna kluster i periferin. Figur 45 illustrerar sådana klusterbildningar där partiklar med olika fraktionsstorlekar eller partiklar med olika egenskaper separeras. Figur 46 illustrerar fenomenet som skapar den visuella julgranen. Material med hög inre friktion, finfraktion/krossat bränsle, byggs upp på den stabila flanken och rasar sedan ner på densamma och bildar ett lager. Därefter byggs ett nytt lager upp och förloppet upprepas.



Figur 45. Segregering förorsakad av olika rasvinklar (a) olika form, (b) finfraktion. (Dietmar Schulze).
Figure 45. Segregation due to different angles of repose resulting from particle shape (a) and fines content (b).

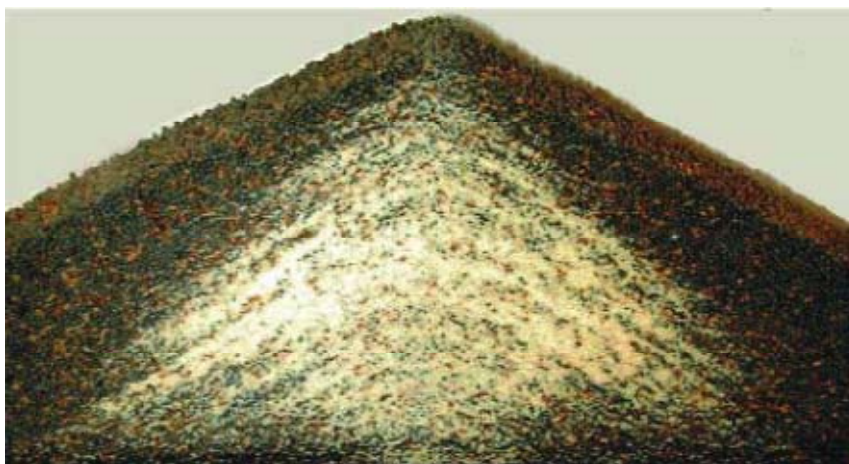


Figur 46. Segregering i en stack med bryggbildning, siktning och ras (a) formning innan ras (b) hastighetsgradient och siktning i ett ras. (Dietmar Schulze).

Figure 46. Segregation on a pile due to percolation, sifting and avalanche.

Detta är ett fenomen som syns tydligast i hantering av pellets som inte siktats före lagring. I silor med central inmatning kan denna form av segregering uppträda i silons

mitt med de olika fraktionerna som grenar på en gran. Med en spridare i silotaket flyttas granens topp längre ut i silon. Jämför figur 20. Vi har tidigare diskuterat den krater som bildas vid utmatning från silo. Vid inmatning kommer finfraktionen att stanna vid nedslagsplatsen, 3 – 5 m från centrum. Grov- och mellanfraktionen rullar ner till kraterns lägsta nivå. Grovfraktionen hamnar även mot siloperiferin. När vinklarna ändras, silon fylls, stannar även mellanfraktionen i området och grovfraktionen söker sig mer mot periferin. Det skapas på detta sätt en rotations-symetrisk struktur som är underlaget för homogenisering i silo där mataren har låg åkhastighet. Granen byggs upp radiellt och även cirkulärt. Rasen minskar i omfattning då nivån blir högre och vinklarna minskar. När silon fylls kommer dessa lager att komprimeras och deformeras till att bli mer eller mindre horisontella. Jämför kapitel 3.2.4.1. Att spekulera i homogenitet från utmatning ur detta område är svårt för att inte säga omöjligt. Det är även svårt att i dagsläget simulera då vi måste ha minst tre olika partikelstorlekar samtidigt som det krävs stor datorkapacitet och nya modeller.



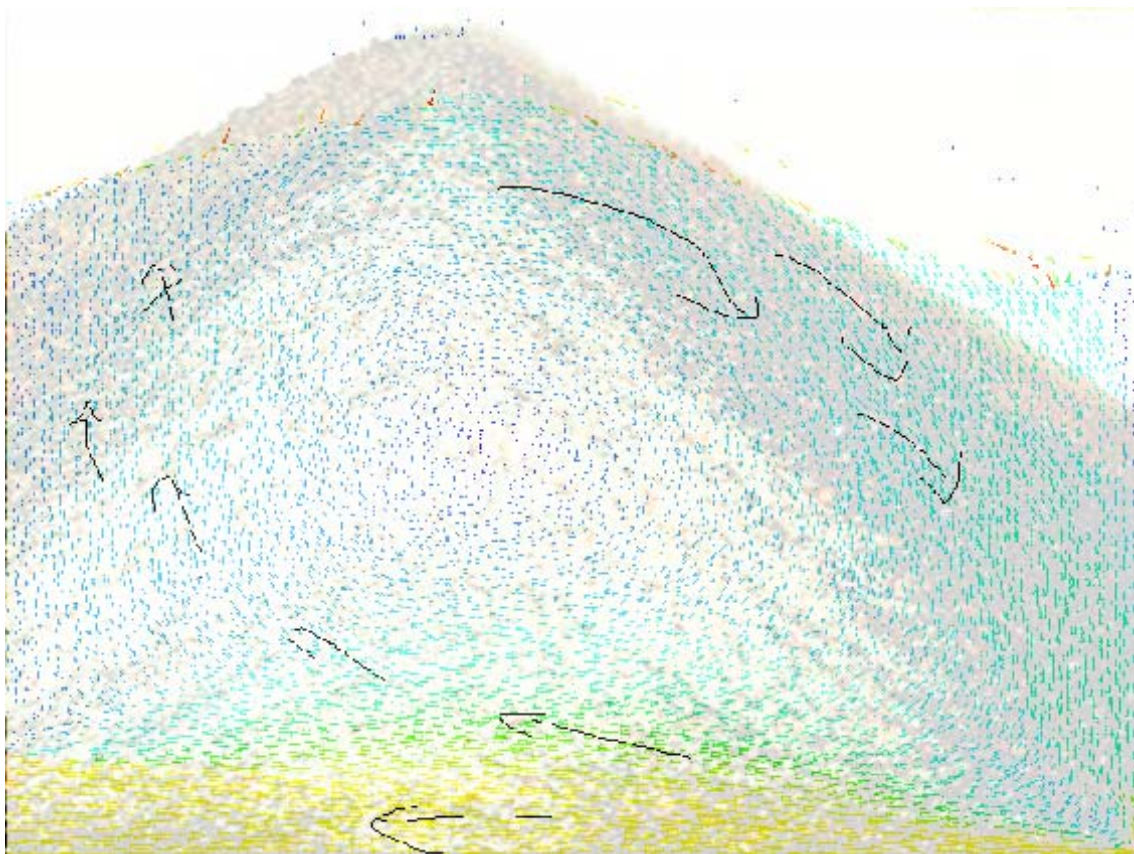
Figur 47. Segregering i en stack.

Figure 47. Segregation in a pile.

Figur 47 visar segregering i en stack med central påmatning. De ljusare partierna är finfraktion som ansamlas i de centrala delarna och de mörka är grov- och mellanfraktion.

Sammantaget kan man förklara utmatningen på så vis att så länge silon är till stor del fylld matas i första hand grovfraktion ut från siloperiferin. När ytans rasvinkel blir för flack kommer mer av mellan- och finfraktionen att ingå i mixen. När silon slutligen töms finns ingen grovfraktion kvar. Detta resonemang är gjort under förutsättning att det finns en betydande andel finfraktion.

Om vi betraktar figur 47 som ett radiellt tvärsnitt genom silo, jämför figur 15. Bränslets landningspunkt är 3 till 5 m in i silon och vi positionerar toppen på figur 47 i det läget. Ovanpå det lägger vi figur 38, simuleringsresultatet som visar hur innehållet i silon rör sig, så kan man kanske enklare förstå vad som händer.



Figur 48. Siloinnehållets simulerade vektorer överlagrade på ett segregerat siloinnehåll.

Figure 48. Vectors of movements in the silo content during reclaiming. The background illustrates the segregated content.

Figur 48 är en kombination av figur 47 och 38. Ett stort flöde sker från siloperiferin där grov- och även mellanfraktion finns. Finfraktionen finns i huvudsak i det mellersta området varifrån egentligen ingen utmatning sker. Orsaken är det horisontella flöde som genereras i övergången mellan skruv och bränsle. Inmot centrum sker ingen utmatning, orsaken är skruvens geometri. Utläggningen är som bekant proportionell mot siloradien i kvadrat vilket gör volymökningen i slutet av skruven mycket liten. Detta resulterar i att inget bränsle kommer ner i skruven de sista meterna. Man kan se det på anläggningar, att det är denna del av skruven som är mest sliten. Skruven måste tvinga sig igenom bränslet utan att hela volymen framför skruven matas ut.

I den krater som bildas ovanför mataren får man räkna med segregering på grund av olika rasvinklar, se figur 45 samt på grund av ras, se figur 46 samtidigt kommer grovfraktionen att ansamlas i botten av kratern då den segregerar på kraterns båda flanker. Dessa segregeringar sker kontinuerligt när kratern förflyttar sig runt silon.

4.4 Fluidisering

Den fjärde delen handlar om fluidisering i finfraktionen. Ovanlig i normal bränslehantering men förekommer vid pelletsantering. Lager av finfraktion kan penetreras av grövre fraktioner som förflyttar sig i lagret och där finfraktionen förflyttar sig högre upp samtidigt som det skapas damm.

4.5 Vind

En partikels hastighet relativt omgivande luft är påverkad av partikelns luftmotstånd. Förhållandet mellan luftmotståndet och gravitationskraften ökar kraftigt med minskad partikelstorlek på grund av att förhållandet mellan yta och volym ökar.

Även sedimenteringshastigheten hos partikeln ökar betydligt vid minskande partikelstorlek. Denna effekt har betydelse för partiklar i storleken 50 – 100 μm men är markant i området under 10 μm . Suspensionen av små partiklar kan inte förflytta sig med en märkbar hastighet relativt luft men kan enkelt förflyttas av en luftström eller vind.

Vindseparation förekommer på många ställen i en anläggning. Vid omlastning mellan transportörer skapar luft rörelser förflyttning av finfraktion till områden med lägre lufthastigheter. Vid hantering av bränsle med fast utrustning som släpper bränsle från hög höjd kan spridningen av finfraktion ske tusentals meter. Även vid traktorhantering sprids finfraktioner vid t.ex. omlastning till en mottagningsficka där luften i fickan trycks bort av materialet och där de finaste fraktionerna inte sedimenterar på kort tid utan följer med vinden. I silor kan de finaste fraktionerna följa den luftström som finns i silon, se figur 48, och skapa kluster som i ogynnsamma situationer ger upphov till självantändning. Den låga sedimenteringshastigheten för trädamm och mikroorganismer är även ett arbetsmiljöproblem vid lossning av bränsle, speciellt i slutna utrymmen. Vindseparation är en viktig parameter att ta hänsyn vid anläggningsprojektering.

4.6 Trajektorial segregering, en simulering

För att veta vart olika fraktioner landar i en silo och för att få en uppskattning av segregationen, som uppstår då material strömmar in i silon, genomfördes beräkningar med Ansys Fluent. Eftersom antalet partiklar i en silo är extremt många så är det orimligt att beräkna varje partikel för sig. Det som istället gjordes var att översätta partiklarnas egenskaper till en fluid, metoden kallas euler-euler eller två-fluid modell. Metoden och geometrin som använts är den samma som i tidigare avsnitt om silohomogenisering men fler partikelstorlekar och mätpunkter har införts. Partikelstorlekarna som användes i beräkningarna var rätblock av måtten 40*40*10mm och 35*7*5mm samt sfärer med diameter 1 och 3mm. Då metoden som används kräver sfäriska partiklar så användes sfärer med lika stort area till massförhållande i beräkningarna för rätblocken. För att beräkna hur partiklarna påverkas av luftmotstånden användes följande ekvationer:

Då $\alpha_l > 0,8$

$$K_{sl} = \frac{3 C_D \alpha_s \alpha_l \rho_l |v_s - v_l| \alpha_s}{4 d_s} - 2,65$$

Där C_D , dragkoefficienten, är

$$C_D = \frac{24 *}{\alpha_l Re_s} [1 + 0,15(\alpha_l Re_s)^{0,687}]$$

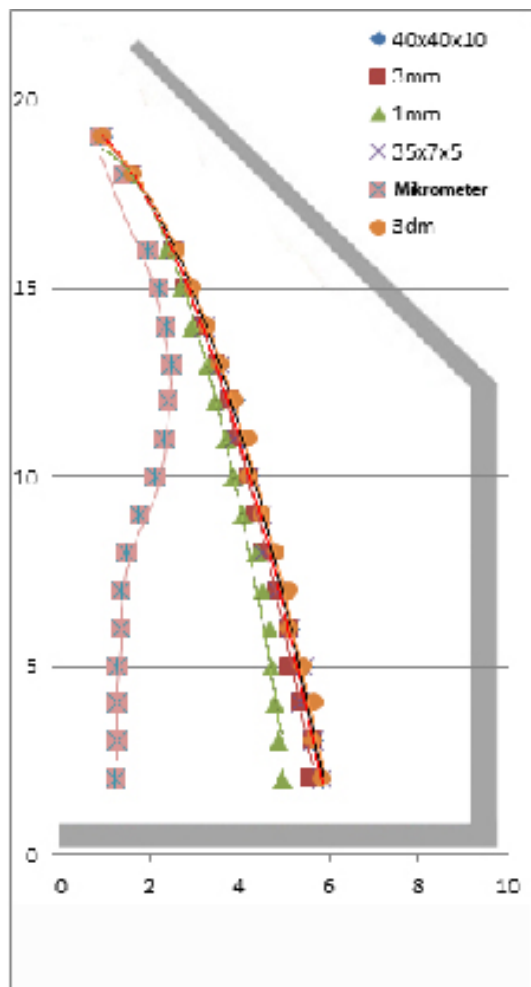
När $\alpha_l \leq 0,8$

$$K_{sl} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_l) \mu_l}{\alpha_l d_s^2} + 1,75 * \frac{\alpha_s \rho_l |\vec{v}_s - \vec{v}_l| \alpha_s}{d_s}$$

Där l och s betecknar fluid- och fastfas respektive. I ekvationerna ovan betecknas volymsfraktionen α , hastigheten v , densiteten ρ , diametern d och viskositeten med μ . Interaktionskoefficienten, K_{sl} , används i transportekvationer för båda faserna.

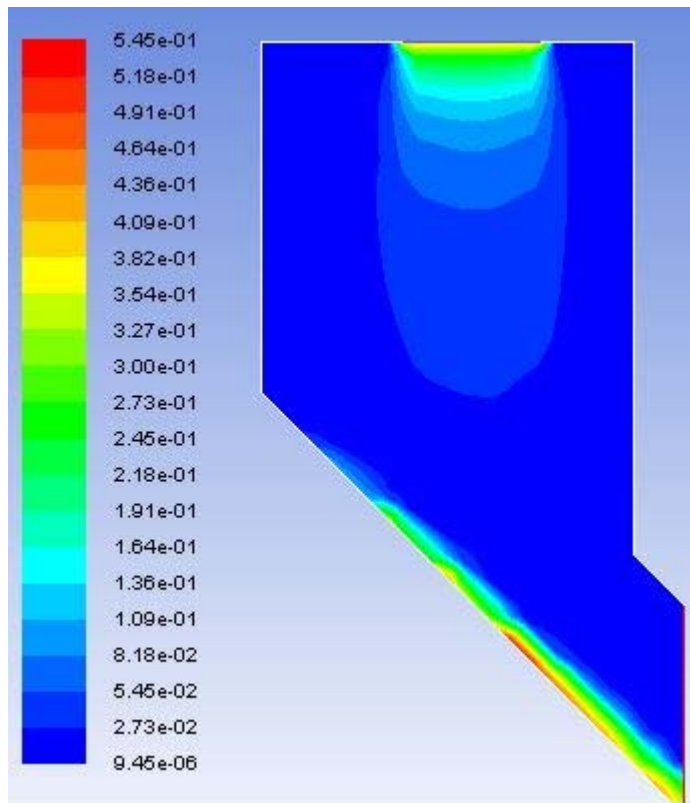
4.6.1 Resultat

Figur 49 visar kastparablerna för olika partikelstorlekar när de kommer in i silon. Förutom de partikelstorlekar som beskrevs i avsnitt ovan så genomfördes även beräkningar med 1 μ m och 3dm stora sfärer, för att visa hur en partikel med extremt låg och hög påverkan av luften beter sig. Resultaten har tolkats genom att läsa av på 17 höjder vart träflisen befinner sig och välja ut centrum på molnet av partiklar.



Figur 49. Kastparabel vid inmatning till silo
 Figure 49. Particle trajectory at silo filling.

För att få en uppskattning av inloppshastigheten genomfördes en 2d-simulering av spridaren. Från simuleringarna erhöles hastighetsvektor $v[3,495 -3,798]$ samt granulära temperaturen ($=0,08$) som fördes över till simuleringarna där kastparablerna beräknades.



Figur 50. Volymfraktion av träflis i spridaren samt de granulära temperaturerna.
Figure 50. Granular temperature and fraction of wood chips in the distributor.

4.6.2 Diskussion

Eftersom partiklarna är många så kommer alla partiklar att kollektivt accelerera luften, vilket kommer leda till lägre luftmotstånd. Mindre motstånd ger en mindre segregering än om man beräknat en partikel åt gången som har gjorts i denna simulering. Partiklarnas motstånd har beräknats som att de vore sfäriska med en radie som ger samma area till volymförhållande som de angivna rätblocken. Detta är en klar förenkling då luftmotståndet för rätblocken är klart orienteringsberoende, d.v.s. beroende vilken sida som exponeras för motståndet.

5 Slutsatser

Homogenisering och segregering är två mycket komplexa fenomen. Kanske har vi med denna rapport skapat lite kunskap. Stackhomogenisering är dock en framkomlig väg för de som arbetar med en komplex bränslemix. Homogenisering i mottagningsficka kräver eftertanke, vilken matare har jag och hur skall fickan matas. Sortimenten skall inte variera i bränsleflödet. Skikthomogenisering bör vara den förhärskande tekniken. Homogenisering i silo med den konstruktion som finns i dag är svåranalyserad. Silon från 70-talet visar att en högre åkfastighet kan minska segregationen. Dagens silor rekommenderas inte som ensam metod med svåra sortiment i bränslemixen.

5.1 Fortsatt arbete

Datorsimulering av denna typ är helt avhängigt av vilka modeller som utvecklas. Värmeforskprojekt har en kostnadsbas och en tidslängd som inte medger utveckling av tunga simuleringsmodeller och det är inte heller troligt att någon annan organisation utöver programutvecklarna skulle utveckla modeller som behövs för att förfina de simuleringar som gjorts i detta projekt.

Då det i dag inte finns analyssystem som fullt ut kan analysera bränslefraktioner utöver finfraktionsandel kommer man inte längre med homogeniseringsanalyser.

En av de intressanta analyserna som finns kvar är en praktisk undersökning av homogenisering i silo. En strukturerad utmatning från mottagningsficka, provtagning, lagring i silo med utmatning samt slutlig provtagning, med bränsle i olika nivåer, kan ge ytterligare kunskap, dock är det endast siktanalyser som kan utföras med tillräcklig precision. Anläggningar för projekt finns.

6 Rekommendationer och användning

Gamla anläggningar är näst intill omöjliga att bygga om för att minska segregeringsproblematiken. Men för nya anläggningar finns det förutsättningar att skapa ett hanteringssystem som har bäring på de processer som beskrivs i denna rapport.

Stackhomogenisering bör utföras med så tunna skikt som möjligt. Vid homogenisering i mottagningsfickan bör skikthomogenisering användas, med grundbränslet i botten och inblandningsbränslen växelvis med grundbränsle ovanpå.

Vill man arbeta med en komplex bränslemix bör man överväga någon av teknikerna ovan. Arbetar man med enklare bränslemix, grot, spån och bark kan silohomogenisering fungera om logistiken fungerar, det är dock önskvärt att öka skruvarnas åkshastighet för att minimera kratrarna.

Segregering är svårt att undvika. Vad man bör göra är att ordna så att segregering inte skapar två bränslelinjer med olika egenskaper. Måste man arbeta med vinkelomlastning skall inte bränslet splittras till pannhusfickorna utan köras satsvis. Alternativt kan nya styrande stup sättas in i transportlinjen.

Vindseparation utomhus kan undvikas genom att med olika metoder valla in området och inomhus finns det system för dammbekämpning.

7 Referenser

- Abrahamsson, P.J (2012) Continuum modeling of particle flows in high shear granulation. Chalmers University of technology .Licentiate thesis 2012:3 ISSN 1652-943X
- Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, I., Mortensen, M., Sudiyo, R., van Wachen, B. (2009) Computational Fluid Dynamics for engineers.
- Cagnoli, B., Manga, M. (2005) Vertical segregation in granular mass flows: a shear cell study.
American Geophysical Union. 32. Berkeley, USA
- Diamondback Technology. (2005) Process manufacturing: Practical steps to reduce particle segregation. *Chemical processing* [2014-03-10]
- Gidaspow, D., Bezburuah, R., Ding, J. (1992) Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. 75–82.
- Gyenis, J. (2001) Segregation-free particle mixing *.Handbook of Conveying and Handling of Particle Solids*. Elsevier. Veszprem, Hungary
- Jaeger, H.M., Nagel, S.R. (1992) Physics of the Granular State. *Science*, New series vol. 255, pp 1523-1531. Chicago, USA
- Johnson, P. C., Jackson, R. (1987) Frictional-Collisional Constitutive Relations for Granular Materials, with Application to Plane Shearing. *J. Fluid Mech.* 176. 67–93.
- Jullien, R., Meakin, P. (1990) A mechanism for particle segregation in three dimensions.
Letters to Nature. 344. 425-427
- Jullien, R., Meakin, P., Pavlovitch, A. (1992) Three-dimensional Model for Particle-Size Segregation BY shaking . *The American Physical Society.* 4. 640-643 Paris, France
- Lun, C. K. K., Savage, S. B., Jeffrey, D. J., Chepurniy N. (1984) Kinetic Theories for Granular Flow: Inelastic Particles in Couette Flow and Slightly Inelastic Particles in a General Flow Field. *J. Fluid Mech.* 140. 223–256.
- Ocone, R., Sundaresan, S., Jackson, R. (1993) Gas-particle flow in a duct of arbitrary inclination with particle-particle interaction. *AIChE J.* 39. 1261–1271.
- Schaeffer, D. G. (1987) Instability in the Evolution Equations Describing Incompressible Granular Flow. *J. Diff. Eq.* 66. 19–50.
- Welty, J., Wicks, C., Wilson, R., Rorrer, G. (2008) *Fundamental of momentum, heat and mass transfer*. 5th. Wiley .USA

Andersson, B., Andersson, R., Håkansson, I., Mortensen, M., Sudiyo, R., van Wachen, B.

(2009) Computational Fluid Dynamics for engineers

Gidaspow, D., Bezburuah, R., Ding, J. (1992) Hydrodynamics of Circulating Fluidized Beds, Kinetic Theory Approach. In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization. 75–82.

Jansson, M (2014). CFD simulations of silos content - *An investigation of flow patterns and segregation mechanisms*. CPL ID: 197053

Dietmar Schulze, Powders and Bulk Solids Behavior, Characterization, Storage and Flow.

ISBN 978-3-540-73767-4 Springer Berlin Heidelberg New York.

Isotopnytt nr 67 Isotoptekniska laboratoriet, AB Isotopteknik.

8 Bilaga 1

8.1 Manuell kalkylering

Beräkning av Stoke nummer för två olika partikelstorlekar.

$$t_{d1} = \frac{800 * 0.02^2}{18 * 10^{-5}} = 1777s$$

$$t_{d2} = \frac{800 * 0.003^2}{18 * 10^{-5}} = 40s$$

$$t_s \sim 2s$$

$$St \gg 1$$

8.2 Beteckningar

<i>CHP</i>	<i>Combined Heat and Power</i>
<i>DEM</i>	<i>Discrete Element Method</i>
<i>UDF</i>	<i>Used Defined Function</i>
α	<i>Volume fraction</i>
ε	<i>Restitution coefficient</i>
ϕ	<i>Angle of internal friction</i>
λ	<i>Granular bulk viscosity</i>
μ	<i>Granular Viscosity</i>
Θ	<i>Granular temperature</i>
ω	<i>Angular velocity or Specific dissipation</i>
d	<i>Diameter of the particle</i>
g_0	<i>Radial distribution function</i>
I_{2D}	<i>Second invariant of the stress tensor</i>
P	<i>Granular pressure</i>
r	<i>Radius of silo</i>
St	<i>Stoke number</i>

