



CHALMERS



Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

*Kandidatarbete inom Chalmers Rock Processing System
PPUX03-16-10*

Albin Gröndahl
Mahmoud Jeresi
Johan Karlsson
Victor Nilsson

Handledare:
Bitr. Prof. Magnus Evertsson
Lic. Johannes Quist
BSc. Marcus Johansson

Förord

Detta kandidatarbete, utfört av fyra maskinteknologer, har tillkommit på uppdrag av institutionen för Produkt- och produktionsutveckling vid Chalmers tekniska högskola. Där det främst är gruppen Chalmers Rock Processing Systems där samtliga handledare samt examinator är anställda som varit aktiv i projektet. Arbetets omfattning är 15 högskolepoäng vilket motsvarar halvfartsstudier under en termin. Arbetets speciella förkunskapskrav är inom mekanik, hållfasthetslära, konstruktion, reglerteknik och ellära.

Viktiga personer för projektet främst handledarna Bitr. Professor (Dr. och Docent) Magnus Evertsson, Technologie Licentiat Johannes Quist, BSc. Marcus Johansson samt examinatorn Dr. Erik Hulthén. Speciellt tack riktas även till Alf Westerlund från Bergsskolan som möjliggjort malningen i skolans labb samt till Nexans AB, Robert Runbjörk, som sponsrat med skärmad elkabel. Vi vill även tacka LKAB, framförallt Erik Niva, som sponsrat med material (magnetit) att utföra testerna på och Payman Tehrani för hjälpen med programmeringen i LabVIEW. Slutligen tackas även Dr. Gauti Asbjörnsson för hjälpen med effektmätningen.

Sammanfattning

Syftet med kandidatarbetet är att utvärdera om en energibesparing kan göras i en total sönderdelningsprocess för malm. Processen innefattar både konkross och tumlande kvarn, där kvarnen är den mest energikrävande delen. Hypotesen är att ett större utnyttjande av konkrossen skulle minska användning av tumlande kvarn. Detta skulle öka energiförbrukningen i krossen men minska förbrukningen i den tumlande kvarnen och därmed minska den totala energiförbrukningen.

Detta projekt har i huvudsak bestått av att först konstruera och tillverka delar till krosstesterna, följt av att krossa och sedan mala materialet. Slutligen har resultaten tolkats och analyserats. Under krossningen har effekten mätts upp med hjälp av mätutrustning. Detta har inte varit möjligt under malningen då befintlig mätutrustning inte var kompatibel med den använda kvarnen, lämpliga ekvationer har istället använts. Därmed blev utfallet av resultaten på den faktiska energibesparingen inte helt rättvisande. Däremot har materialets storleksfördelning bestämts efter både krossning och malning, vilket resulterat i att både krossnings och malningsfenomen har kunnat observeras.

Utfallet av resultaten utgör rekommendationer till en optimering av processen med ändringar i inställningar som skulle minska den totala energiförbrukningen. Slutligen utförs beräkningar på denna process där ett uppskattat värde på energibesparingen erhålls vilken är drygt 5 % men den kan vara så mycket som knappt 18 %.

Abstract

The purpose of this bachelor project is to evaluate if an energy saving can be made in an overall comminution process of ore. The process includes both a cone crusher and a tumbling mill where the mill is the most energy consuming part. The hypothesis is that an increased use of the cone crusher would reduce the use of the tumbling mill. This would increase the energy consumption of the cone crusher but reduce the consumption of the tumbling mill, and therefore reduce the overall energy consumption.

This project has mainly consisted of designing and manufacturing parts to the crushing tests, followed by crushing and grinding tests. The results have then been interpreted and analyzed. In the crushing tests, the power has been measured using measuring equipment. In the grinding tests this has not been possible since the existing measurement equipment wasn't compatible with the used mill, instead appropriate equations have been used to evaluate the power draw. This means that the result of the actual energy usage did not give a true and fair value. However, the size distribution of the material was determined after both the crushing and the grinding. This has resulted in that both crushing and grinding phenomenon has been observed.

The results lead to recommendations for the optimization of process settings adjustments that could reduce the total energy consumption. Finally, calculations are made on this process in which an estimated value of the energy savings are obtained which is about 5 % but can be as much as almost 18 %.

Innehållsförteckning

1	INLEDNING	1
1.1	BAKGRUND	1
1.2	SYFTE	1
1.3	HYPOTES	2
1.4	UPPGIFT	2
1.5	AVGRÄNSNINGAR	3
2	TEORETISK REFERENS RAM	4
2.1	KABLAGE OCH STÖRNINGAR	4
2.2	MÄTNING OCH STYRNING I LABVIEW	6
2.3	NYCKELTAL	10
2.4	KROSSNING	11
2.5	SIKTNING	15
2.6	MALNING	16
3	METOD	23
3.1	ÖVERSIKT	23
3.2	NEDDELNING	25
3.3	SIKTNING	26
3.4	KROSSNING	26
3.5	MALNING	27
3.6	TOLKNING AV RESULTAT	27
4	GENOMFÖRANDE	28
4.1	MATERIAL	28
4.2	UTRUSTNING	28
4.3	UTFÖRANDE	31
5	RESULTAT	36
5.1	KROSSNING	36
5.2	MALNING	37
5.3	PROCESSER AV KROSSNING OCH MALNING	37
6	DISKUSSION	48
6.1	KULSTORLEKENS PÅVERKAN	49
6.2	PÅVERKAN AV CSS OCH HASTIGHETSÄNDRING	50
6.3	FELKÄLLOR	56
7	SLUTSATS	60
8	REKOMMENDATIONER OCH VIDAREUTVECKLING	61
	REFERENSER	63
	APPENDIX A	64
	APPENDIX B	70
	APPENDIX C	75
	APPENDIX D	79
	APPENDIX E	84
	APPENDIX F	86
	APPENDIX G	100
	APPENDIX H	108

1 Inledning

Forskning vid institutionen för Produkt- och produktionsutveckling vid Chalmers tekniska högskola pågår i ämnet kring hur krossningsprocesser kan utvecklas för att krossa partiklar energieffektivt till mindre fraktioner. Detta projekt bygger vidare på ett föregående kandidatarbete där en befintlig konkross har restaurerats, modifierats och testats. Sedan dess har mantelgeometrin förändrats och nya tester ska genomföras.

1.1 Bakgrund

Inom gruvindustrin används olika typer av krossar och tumlande kvarnar för sönderdelning av malm med syfte att extrahera de värdefulla och högt efterfrågade metallerna som finns i jordskorpan. Merparten av de nu nyttjade mekaniska principerna för både krossning och malning är över ett hundra år gamla och utvecklades under en tid då malmerna innehöll höga koncentrationer av mineraler och metall och dessutom var lätta att krossa. Så ser det dock inte ut idag då de flesta ytliga och lättkrossade malmerna nästintill har tagit slut. Majoriteten av malmerna som bearbetas idag klassas som lågvärdiga och utvinns från ett större djup i jordskorpan än vad som gjorts tidigare. Detta innebär att de har högre hållfasthet, bland annat på grund av mindre vittring, vilket lett till ökade materialvolym och ökad energiåtgång. Metaller som följer detta mönster är exempelvis koppar, platina och guld (Evertsson M. C., 2016). Denna ineffektivitet har resulterat i en efterfrågan från branschen att kunna utvinna och extrahera metaller effektivare, vilket lett till ett stort behov av forskning inom krossnings- och malningsprocessen.

I projektet har en sönderdelningsprocess beaktats där existerande konkrossar sönderdelar vanligen malm till en typiskt största partikelstorlek på runt 12 mm. Den krossade malmen (0-12 mm) går sedan vidare till tumlande kvarnar fyllda med stålkulor (diameter 50-150 mm) som malmedia. Därefter minskas malmen till partikelstorlek 100-250 μm . Dessa kvarnar har en väldigt hög elektrisk energiförbrukning (15-20 MW) då de i vissa fall kan stå för ca 70 % av förädlingsprocessens energiförbrukning (Melero, o.a., 2014). Energiförbrukningen för gruvindustrins totala förädlingsprocess är i sig väldigt stor då den utgör 6 % av världens totala energiförbrukning och kan vara högre i andra länder där ett exempel är Sydafrika där den uppgår till 21 %. På så sätt klassas detta som en av världens mest koncentrerade energikonsumenter (McIvor, 2010). Det är redan välkänt att kvarnar är processtekniskt ineffektiva, med uppskattningsvis 20 % verkningsgrad, men eftersom det är en välfungerande teknologi som ännu inte utmanats av någon bättre lösning finns de kvar (Melero, o.a., 2014).

Tidigare experimentella tester har genomförts där konkrossar arbetar över sitt arbetsvarvtal vilket gett indikationer på att en högre reduktionsgrad kan erhållas på detta sätt (Hulthén, 2010). I de tidigare testerna har dock varvtalet endast ökat cirka 10 % och inga riktiga undersökningar eller vetenskapliga tester finns för utfallet av en markant varvtalsökning.

1.2 Syfte

Syftet med kandidatarbetet är i huvudsak att utvärdera om konkrossning med högre hastighet ger en total energibesparing på hela sönderdelningsprocessen. Detta i form av en vidgning av arbetsområdet för konkrossen och därmed reducering av användandet av tumlande kvarnar. Genom att teoretiskt analysera och i laboratorieskala utvärdera utfallet av ett ökat arbetsvarvtal hos en konkross redogörs för möjligheterna att sänka den totala energiförbrukningen. Arbetet kommer att utgöra underlag för framtida utvecklingsmöjligheter av detta processteg inom gruvindustrin.

1.3 Hypotes

Det vore önskvärt att från krossning producera ett material med största partikelstorlek under 2-3 mm. Detta skulle ge krossen en större del i processen vilket teoretiskt också ökar den tumlande kvarnens effektivitet och därmed hela processens effektivitet. En väl underbyggd hypotes är att detta skulle kunna vara möjligt att uppnå genom ökat varvtal i krossmaskinen. Energiåtgången vid krossningen kommer att öka men eftersom krossningen är mer energieffektiv jämfört med kulkvarnar så förväntas energiåtgången för totalprocessen att reduceras.

1.4 Uppgift

Uppgiften i detta kandidatarbete är att optimera processen att krossa och mala sten till fint pulver (material under 125 μm kornstorlek) så att metaller och mineraler kan utvinnas mer energieffektivt. Denna del av processen består av två huvudsakliga steg, en konkross och en tumlande kvarn. Uppgiften syftar till att utnyttja konkrossen hårdare i steg ett för att krossa finare och därmed kunna använda mindre malkroppar (stålkulor) i steg två, den tumlande kvarnen, vilket teoretiskt minskar energiåtgången. Att köra konkrossen hårdare innebär i detta projekt att CSS (closed side setting), eller minsta spalt, minskas samtidigt som varvtalet ökas. Det slutgiltiga målet är att minska den totala energiåtgången och uppgiften är därmed att hitta en konfiguration som passar för detta.

För att lyckas hitta rätt parametrar krävs noggrann övervakning av processen. Det innebär att massflödet in måste kunna vara kontrollerat och hållas jämnt. Effekten som går åt i processen måste också kunna mätas noggrant eller med andra ord tillräckligt ofta och med tillräckligt hög precision. Denna effekt måste också kunna kopplas till exakt vilket massflöde som passerade genom krossen när den uppmättes för att kunna analysera materialet.

I det efterföljande steget ska det krossade materialet malas. Malningen ska genomföras i en tumlande kvarn. Då ingen sådan kvarn finns tillgänglig måste en sådan lokaliseras. Därefter måste det undersökas hur effektmätningar kan göras på denna kvarn. Då detta projekt är av explorativ karaktär är det dessutom eftersträvänsvärt att analysera materialet efter varje steg för att kunna se beteendet av gjorda förändringar. Detta för att senare kunna optimera processen och avgöra i vilken riktning framtida studier ska tas.

Slutligen ska också en jämförelse med hur en process går till i industrin göras. Detta för att kunna avgöra om den nya processen är mer energieffektiv än befintliga processer i industrin.

1.5 Avgränsningar

Gruppen väljer att bortse från fullskaliga maskiner då konstruktion av en fullstor konkross är mycket tidskrävande. Endast konkrossning och malning med tumlande kvarnar betraktas. Skulle det visa sig att det mest rimliga är att gå vidare med en fullstor process kommer avgränsningarna revideras. Vidare betraktas endast olika varvtal och CSS (closed side setting) i konkrossen då den befintliga krossen inte har justerbart slag (måttet på den excentriska rörelsen hos manteln). Matningen varierar inte heller i krossningen på grund av den begränsade tidsramen för projektet.

Vad gäller malningen så finns begränsningar även där. Detta då tumlande kvarnar i laboratorieskala inte har många parametrar som är möjligt att variera. De parametrar som är möjliga att ändra i kvarnen är kulstorleken och maltiden. Kulstorleken begränsas i projektet till att endast använda två olika storlekar. Maltiden lämnas inga restriktioner på utan utvärderas efterhand som testerna i kvarnen görs. De ekonomiska begränsningarna är inte specificerade utan baseras på hur relevant finansieringen av produkten i fråga anses vara för framtida forskning. Tiden som finns att tillgå i detta projekt är från mitten av januari 2016 till och med slutet av maj 2016.

Material som används i testerna begränsas till endast ett material. Detta är en järnmalm från LKAB närmare bestämt magnetit från Leveäniemigruvan i Svappavaara. Detta görs för att begränsa antalet ingående variabler i testerna på grund av den begränsade tiden för projektet.

2 Teoretisk referensram

Detta avsnitt behandlar nödvändig teori för att förstå resterande avsnitt. Teoriavsnittet delas in i sex delar, Kablage och störningar, Mätning och styrning i LabVIEW, Nyckeltal, Krossning, Siktning samt Malning.

2.1 Kablage och störningar

Elsystemet i processen är kopplat till en 400 V spänningskälla från vägguttag. Från trefaskällan går strömmen sedan i ett flöde genom olika enheter så som frekvensomriktare, elskåp och slutligen motorn. Mer om elinstallationen återfinns i Appendix A.

Frekvensomriktare

Första delen av kraftkabeln går från uttaget till en frekvensomriktare som används för att styra hastigheten på konkrossen. Frekvensomriktaren är sin tur kopplad till ett elskåp. Frekvensomriktaren orsakar elektromagnetiska störningar som påverkar signalen i samtliga kablar och ger upphov till fluktuationer i uppmätningen av spänning och ström. Skärmd ledning används normalt för att förhindra att störningar av magnetisk, elektrisk och elektromagnetisk art stör ut mätsignalen i den skärmda ledaren (PROFIBUS, 2003). Skärmen ska kopplas till potentialen.

Elskåp och övrig koppling

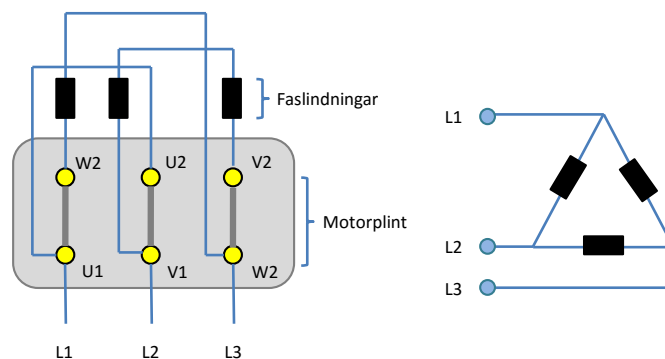
Den kopplade trefasen är ansluten till en 400 V källa. Färgkodningen sker normalt enligt den nya standarden, där ledning 1 (L1), ledning 2 (L2) och ledning 3 (L3) har färgerna brun, svart respektive grå. Neutralledaren (även kallad nolla) är blå och jorden är gul och grön. Neutralledaren kopplas inte i systemet då den inte används i den sista komponenten, motorn.

Motor

Det är viktigt att motorn jordas, så att även dess hölje kan utgöra en jord. På så sätt kan övriga närliggande komponenter som behöver jordas kopplas till motorns hölje. Ingen neutralledare kopplas till motorn. Utöver det så kopplas de tre faserna i rätt ordning enligt given standard, omvänd ordning på två av faserna får motorn att rotera i omvänd riktning. En motor kan kopplas på framförallt två olika sätt, så kallad Triangel/Delta-koppling (D-koppling) samt stjärnkoppling (Y-koppling). De två olika kopplingssätten innebär kopplingar för två olika spänningar (BEVI AB, 2015).

En triangelkoppling innebär en koppling enligt Figur 1 där varje brygga är vertikalt kopplad mellan exempelvis U1 och W2. Då motorn är kopplad i D fås den lägsta spänningen i motorn.

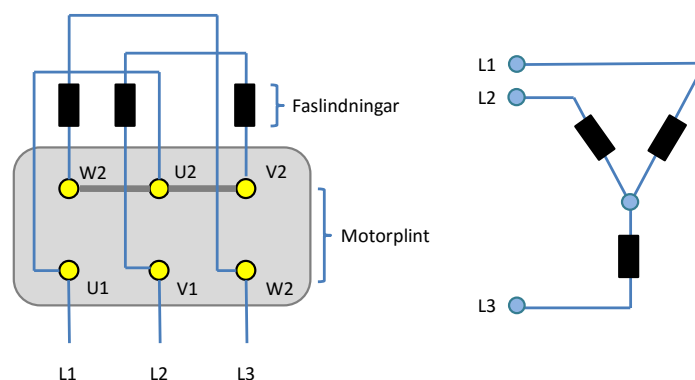
D-koppling



Figur 1. Triangelkoppling

I stjärnkoppling är bryggorna mellan de utgående faserna kopplade enligt Figur 2. Den högsta spänningen i motorn fås då motorn är stjärnkopplad. Stjärnkopplad spänning är en faktor roten ur tre större än triangelkopplad spänning, alltså $V_y = \sqrt{3} * V_D$ där V motsvarar respektive spänning (BEVI AB, 2015).

Y-koppling



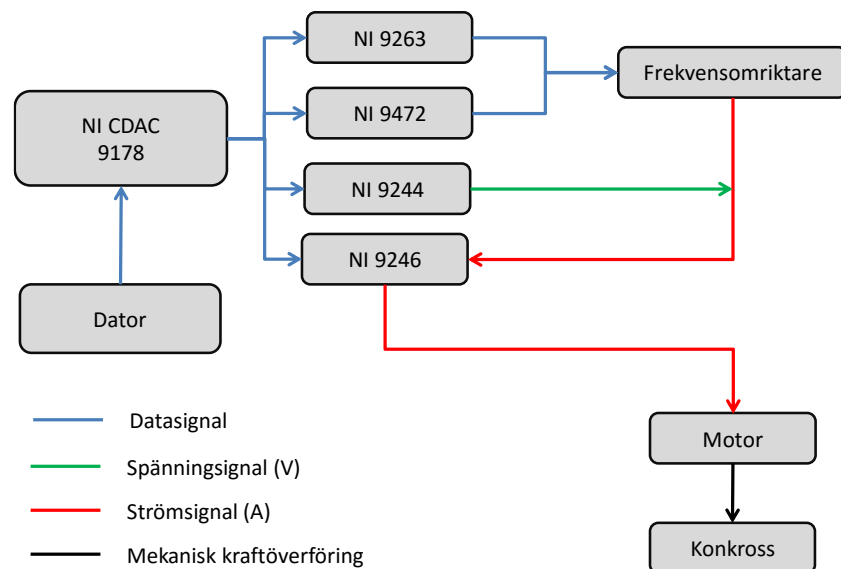
Figur 2. Stjärnkoppling

2.2 Mätning och styrning i LabVIEW

Ett mät- och styrsystem har utvecklats till krossen. Följande avsnitt beskriver tillämpad teori och information samt använda komponenter för styrning, mätning samt signalbehandling.

2.2.1 LabVIEW

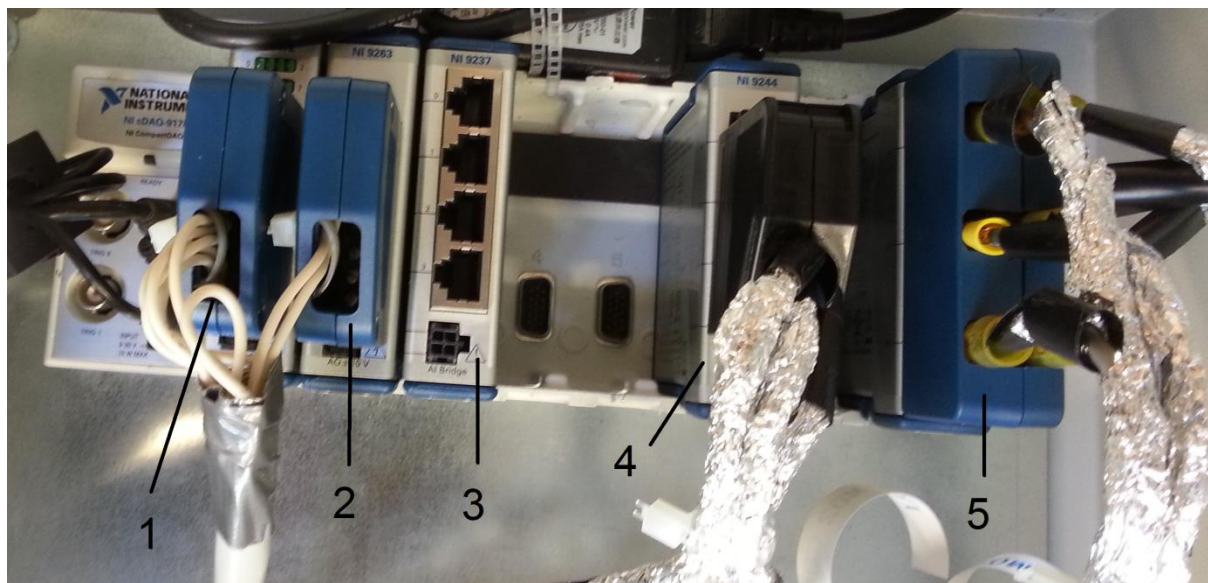
LabVIEW utgör ett grafiskt programmeringsspråk för styrning och automatisering av system. Det används även för generell programmering, mätning och visualisering och är ett program utvecklat av National Instruments. LabVIEW används också för att automatisera processer och mätinstrument i laboratoriemiljö. Genom att koppla olika analoga samt digitala moduler till en CDAQ (Compact Data Acquisition), som sedan kopplas till en dator via USB-port, kan olika mätinstrument läsas in och sedan genom signalbehandling styra dem och skapa processer av dem enligt processchemat i Figur 3 nedan. För mottagningen av signalerna från samtliga komponenter har en NI CDAQ 9178 använts, för att sedan styra och mäta signalerna via en dator.



Figur 3. Processchema över in- och utsignaler för styrsystemet. Med blocket effektmätare avses modulerna NI-9244 samt NI-9246 som tillsammans möjliggör effektmätningen, se vidare nästa avsnitt 2.2.2 Signalbehandling.

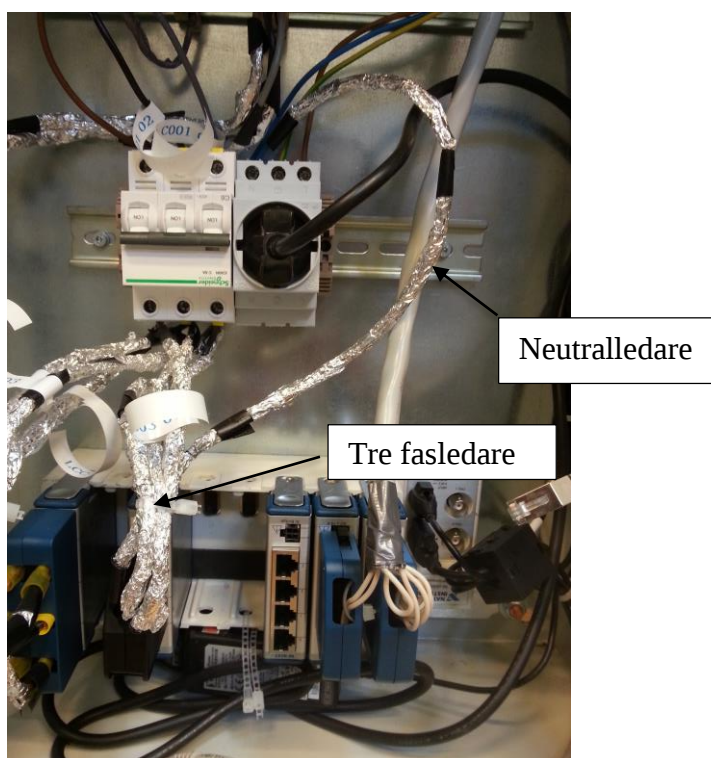
NI CDAQ 9178 har åtta uttag där fem stycken används i den befintliga uppkopplingen. Den första modulen är en NI 9472 som är en digital ut-modul, se Figur 4 nedan nr 1. Den andra modulen är en NI 9263, se Figur 4 nr 2, som är en analog ut-modul. Dessa två moduler används i syfte att styra frekvensomriktaren. Den digitala modulen används för styrning av frekvensomriktarens digitala terminaler för logiska på- och avkommandon. Detta möjliggör enkel programmering för att slå på och av strömmen till motorn samt välja dess rotationsriktning. Den analoga ut-modulen möjliggör sändningen av impulser och signaler från 0-10 V till frekvensomriktaren. Detta medför en styrning genom PWM (Pulse Width Modulation) som frekvensomriktaren använder för att kontrollera hur mycket ström som ska sändas till motorn.

Den tredje modulen är en NI 9237, se Figur 4 nr 3, som är en analog in-modul. Denna modul är speciellt tillämpad för signaler från trådtöjningsgivare vilka mottas via RJ50-kabel. Denna tillämpning var aktuell för den tidigare projektgruppen, men har inte använts i föreliggande projekt.



Figur 4. National instruments olika moduler, med notation 1, 2, 3, 4 och 5 som motsvarar, NI 9472, NI 9263, NI 9237, NI 9244 samt NI 9246. Samtliga är kopplade i portar till NI CDAQ 9178.

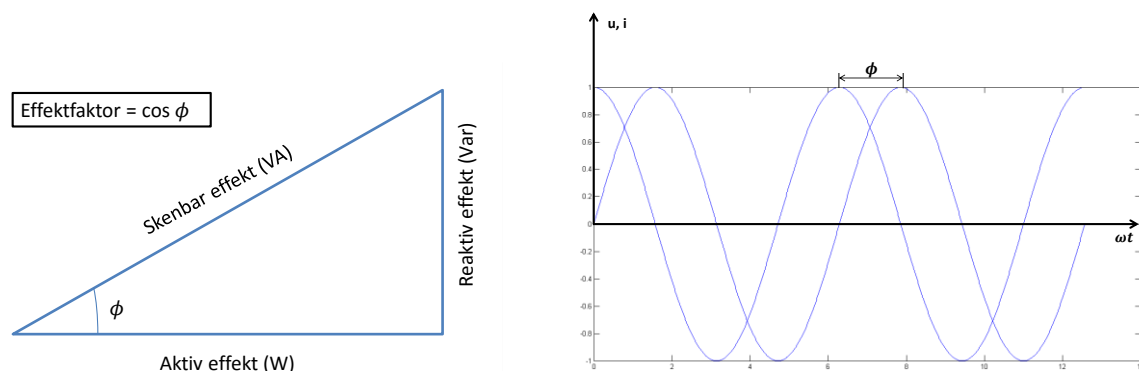
Den fjärde modulen är en NI 9244 modul. Till den är en neutralledare (även kallad nolla) samt de tre elfaserna kopplade. Modulen använder dessa för att kontinuerligt mäta spänningen, där mätningen utförs med neutralledaren som referens. Neutralledaren är kopplad från strömuttaget i elskåpet, de tre faserna kopplas från strömbrytaren, se Figur 6. Den sista modulen med numrering nummer fem, se Figur 5, mäter strömmen kontinuerligt. Till denna kopplas tre faser in och tre faser ut. Modulen kopplas på samma sätt som en vanlig amperemeter.



Figur 5. Delar av installationen i elskåpet.

Dessa två moduler utgör en grund i beräkningen av effekt där både ström och spänning används. Det använda blocket som utför beräkningen i LabVIEW resulterar i tre sorters effekter, aktiv effekt (active effect), reaktiv effekt (reactive effect) och skenbar effekt (apparent effect).

Enheterna för respektive effekt är enligt Figur 6 nedan. Som synes är det bara en $\cos(\phi)$ faktor mellan samtliga komponenter i triangeln. Den aktiva effekten kallas ibland för den sanna effekten och anges i Watt. Vinkeln ϕ är den så kallade fasförskjutningen och räknas vanligtvis som positiv när strömmen är fördröjd i förhållande till spänningen (Mätforum, 2016). Faktorn $\cos(\phi)$ kallas för effektfaktor (power factor). Effektfaktorn för den befintliga motorn som är kopplad till konkrossen är 0.87.



Figur 6. Förhållandetriangeln för skenbar-, reaktiv- och aktiv effekt samt definitionen av fasförskjutningen ϕ .

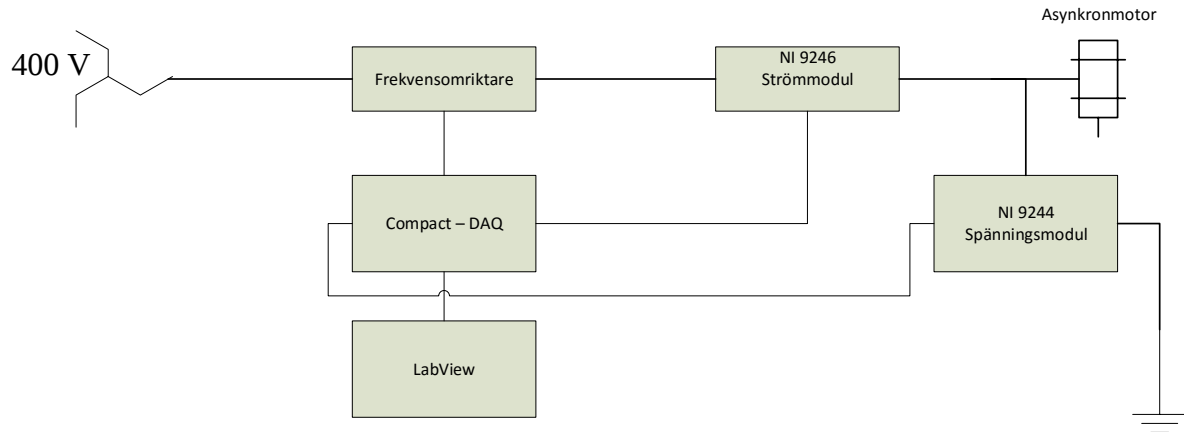
2.2.2 Signalbehandling

Signalbehandlingarna som utförs är på ström och spänning från motorn som är kopplad till krossen. Samtliga signalbehandlingar görs därmed i syfte att utföra effektmätningar. För att mäta spänning och ström noggrant på alla tre faser samt skicka signalen direkt till LabVIEW där effekten sedan kan beräknas används de i tidigare avsnitt nämnda två National instruments modulerna med beteckningarna NI 9244 samt NI 9246 som kan ses i Figur 7 nedan.



Figur 7. Spänningsmätningssmodulen NI 9244 (t.v.) och strömmätningssmodulen NI 9246 (t.h.) (National Instruments, 2016) (National Instruments, 2016).

Teoretiskt utför båda modulerna sina mätningar med en upplösning på 24 bitar (ca 8,4 miljoner steg) och har en mätthastighet på 50 kS/s (0,02 ms mellan mätningarna) vilket i praktiken innebär analog mätning. Detta medför att krossens energiförbrukning över varvet kan studeras för att analysera hur krossen matas med sten osv. Modulerna kopplas in på samma sätt som en ampere- respektive voltmeter enligt Figur 8.



Figur 8. Kretsschema över en del av den elektriska processen, där enbart spänningsmodulen NI 9244 samt strömmodulen NI 9246 betraktas i förhållande till resterande block.

2.2.3 Styrning av krossen

Styrningen av krossens varvtal sker med en frekvensomriktare som är kopplad till krossens motor. Styrningen av denna enhet och därmed regleringen av varvtalet görs i det grafiska gränssnittet i LabVIEW som kontrollerar de olika terminalerna hos frekvensomriktaren. Den använda frekvensomriktaren är av typen 400 V Commander SK från Emerson Industrial Automation med en maxeffekt på 4 kW, se Figur 9. Frekvensomriktaren har olika körlägen, då den både går att köra manuellt och automatiskt med signalöverföring, exempelvis genom LabVIEW.



Figur 9. Frekvensomriktaren, 4 kW, 400 V Commander SK från Emerson Industrial Automation.

Ändringen av frekvensen i frekvensomriktaren anger frekvensen på spänningen till motorn. På så sätt kan en reglering av varvtalet till en önskad frekvens genomföras. Till detta används ekvation 1 nedan, för att beräkna önskat varvtal utifrån vald frekvens och antalet poler, det vill säga antalet polpar (i detta fall finns ett polpar och därmed två poler, plus och minus) i motorn. Denna ekvation används dessutom i implementeringen i LabVIEW.

Viktigt att beakta är att denna formel endast gäller för det synkrona varvtalet, det varvtal med vilket motorns magnetfält roterar i varv per minut.

$$\text{Varvtalet (RPM)} : n_s = C \frac{f}{p} \quad \text{Ekvation 1}$$

C	En beräknad konstant baserat på maxvarvtalet på motorn.
F	Den genom frekvensomriktaren inmatade frekvensen till motorn (Hz).
P	Antalet poler.

Den använda motorn är en asynkronmotor. Därmed beror det uträknade varvtalet även på lasten som motorn utsätts för. Detta ger en liten felmarginal på 3-4 % i beräkningen av varvtalet. Då minskar varvtalet till följd av den eftersläpning som sker för asynkronmotorer. Eftersläpningen är okänd och svår att utvärdera, därmed räknas den inte med. Varvtalet kommer därmed inte att överensstämna med verkligheten exakt. I kommande delar av rapporten kommer de valda hastigheterna att benämnas med dess frekvens vilket medför att till exempel 10 Hz motsvarar ett varvtal på 291 RPM. De olika konverteringarna från frekvens till varvtal kan ses i Tabell 1 nedan. Motorn har en utväxling på 2:1 vilket gör att mantelns nutationsfrekvens är hälften av frekvensen i tabellen nedan.

Tabell 1. Konverteringstabell mellan frekvens (Hz) och varvtal (rpm) på krossen.

Hz	rpm
10	291
20	582
30	873
40	1164
50	1455
60	1746
70	2037

2.3 Nyckeltal

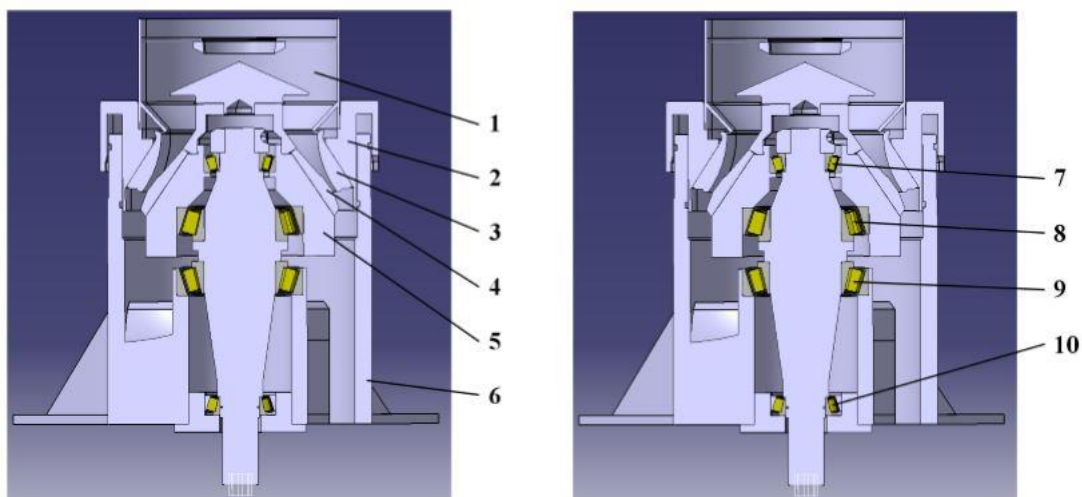
Nyckeltal har beräknats för data för energiförbrukning och partikeldistribution. Dessa nyckeltal är för specifik energi, J/kg samt kW h/t, per producerad massenhet av produkt under en viss partikelstorlek. Enklare förklarar innebär detta hur mycket energi som går åt vid produktionen av ett ton av en viss produkt med en viss partikelstorleksfördelning. Ett annat framtaget nyckeltal är det så kallade W_{63} talet, som står för energimängden som gått åt för att få en andel material med partikelstorlek under 63 μm . Nyckeltalet W_{63} tas fram för att kunna ge ett estimat på hur mycket energi det går åt att ta fram färdig produkt. Detta är intressant eftersom det utgör målet med sönderdelningsprocessen.

2.4 Krossning

En konkross använder formbetingad sönderdelning av partiklar vilket innebär att den fysiska utformningen och rörelsen i krossen gör att partiklarna krossas. Den inre manteln vaggar fram och tillbaka och krossar partiklarna i krosskammaren. Den begränsande faktorn vid sönderdelningen är krossens utformning rent geometriskt och inte mängden energi som tillförs genom motorn. Den kraft som behövs kommer levereras av motorn till följd av att ett konstant varvtal vill hållas. Det som avgör om en partikel komprimeras eller ej är huruvida den är större eller mindre än krossens lokala CSS, vilket är det minsta måttet som kan uppstå i krosskammaren på den punkt partikeln är. Partikeln sönderdelas om den upplever en större kompression än vad den klarar hållfasthetsmässigt.

2.4.1 Krossens utformning

Den krossande rörelsen i krossen kommer från geometrin på axeln som är monterad genom krossen. Axeln har en sektion som är en aning lutad eller excentrisk vilket ger innermanteln sin vaggande rörelse när axeln snurrar. Axeln drivs generellt sett av en asynkronmotor monterad på utsidan av krossen. I fallet med Morgårdshammar B90 är motorn fäst i stativet. Kraftöverföringen sker med hjälp av tre kilremmar förspända genom ett givet axelavstånd vilket justeras med en gängad stång. Krossen Morgårdshammar B90 kan ses i snitt i Figur 10 nedan med förklaring av numrerade komponenter i Tabell 2.

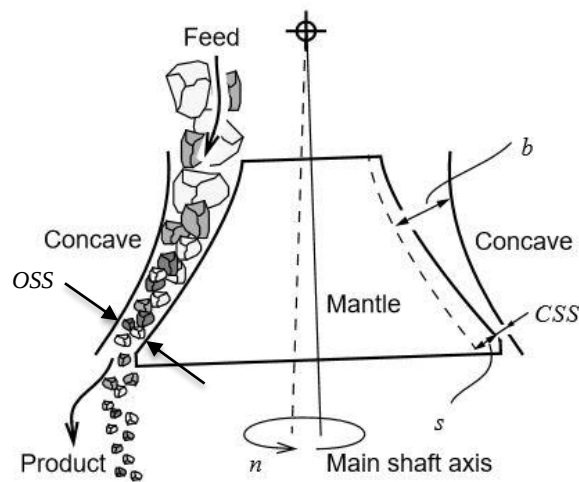


Figur 10. Snitt av Morgårdshammar B90 med lager numrerade t.h. och resterande viktiga komponenter t.v. (Johansson, o.a., 2015).

Tabell 2. Komponentbeskrivning.

1. Pålmatarficka	6. Stativ
2. Mantelskål	7. Lager (SKF 32210 J2/Q)
3. Ytermantel	8. Lager (SKF 32218 J2/Q)
4. Innermantel	9. Lager (SKF 32218 J2/Q)
5. Krosskona	10. Lager (SKF 32210 J2/Q)

Den drivna axeln är lagrad i krossen med två olika stora koniska lager. På axelns excentriska del är krosskonan lagrad med samma uppsättning lager som axeln. Krosskonan har innermanteln monterad på sig. Att krosskonan och därmed innermanteln är lagrad på axeln innebär att när axeln driver krossen och partiklar hamnar i krosskammaren kommer dessa partiklar låsa innermanteln mot ytermanteln. Ytermanteln sitter fast i mantelskålen och därmed i krossens stativ. Detta innebär att axeln kommer snurra samtidigt som innermanteln inte snurrar. Utformningen på axeln med den excentriska sektionen gör att krosskonan och innermanteln kommer förflyttas ut och in över varvet i en vaggande rörelse som gör att krosskammaren utvidgas och dras ihop vilket krossar partiklarna inuti. När kammaren är som minst uppnås CSS, eller Closed Side Setting, och när den är som störst OSS, eller Open Side Setting. Dessa mått mäts båda vid kammarens minsta mått vilket visas i Figur 11.



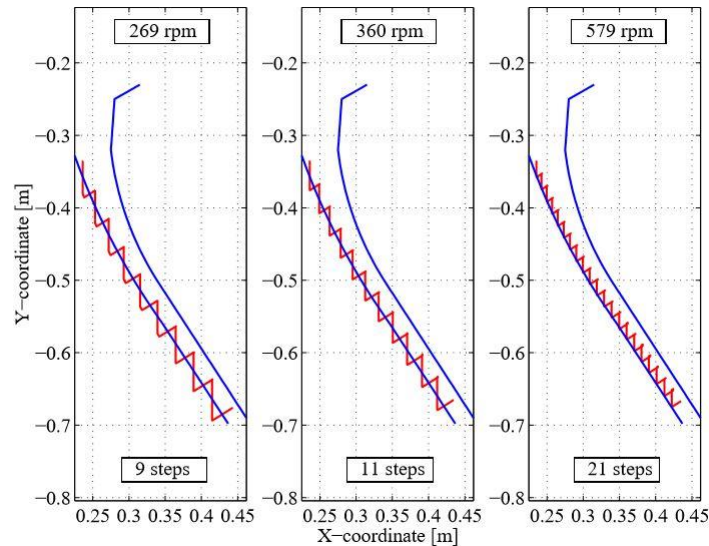
Figur 11. Principiell skiss av krosskona med CSS utsatt modifierad från (Evertsson C., 2000).

På modell B90 kan CSS ändras genom att ytermanteln förflyttas upp eller ner. Detta fungerar genom att mantelskålen, som ytermanteln är monterad i, är fastgängad i stativet. Hela mantelskålen fungerar därför som en mutter och förflyttas vertikalt genom att roteras.

Krossens slag är skillnaden mellan CSS och OSS, det definieras av geometrin på axelns excentricitet vilken inte går att justera på modell B90. Vinkeln på excentriciteten, vilken kallas excentervinkeln, ligger på $0,7^\circ$.

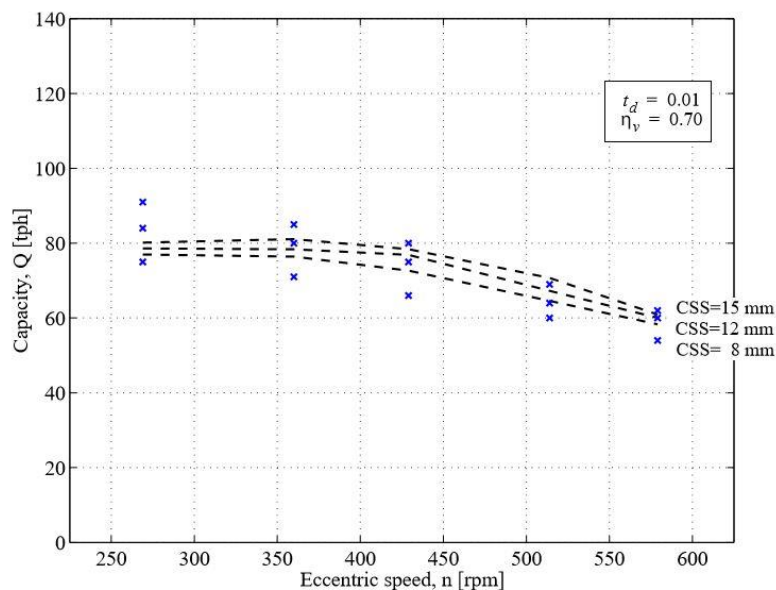
2.4.2 Krossens beteende

Evertsson (2000) presenterar en modell för sönderdelning av partiklar i krossar där antalet kompressioner på varje partikel ökar med varvtalet på krossen enligt Figur 12 nedan. Modellen bygger på rörelseekvationer och visar på hur en partikel förflyttar sig genom krosskammaren. Att partikeln komprimeras fler gånger med ökat varvtal ger en större reduktionsgrad.



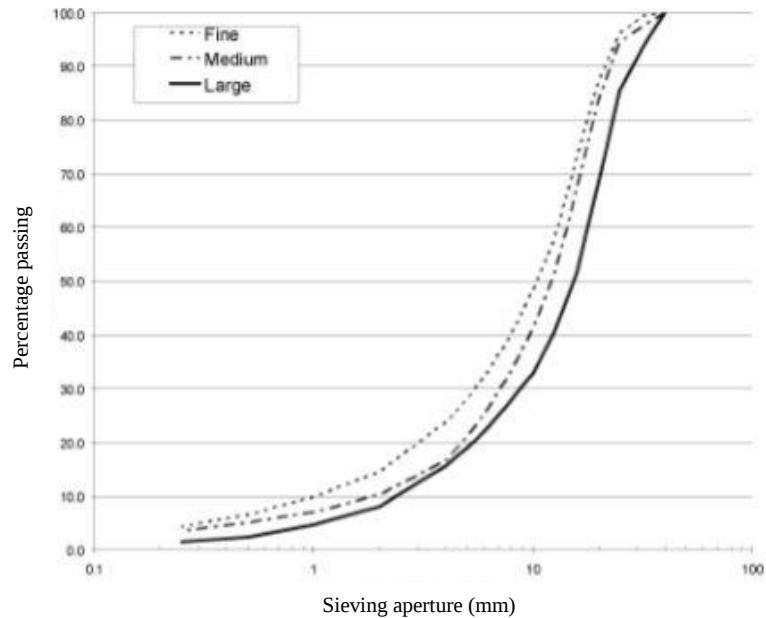
Figur 12. Antalet kompressioner av en partikel vid olika hastigheter på manteln (Evertsson C., 2000).

Om varvtalet ökas kommer kapaciteten att sjunka enligt Figur 13 vilket kan ses som att mängden energi som tillförs krossen kommer omfördelas från att klara ett högre massflöde till att reducera partiklarna fler gånger och därmed mer. Samma mängd energi kan tillföras krossen men mängden energi per partikel ökar.



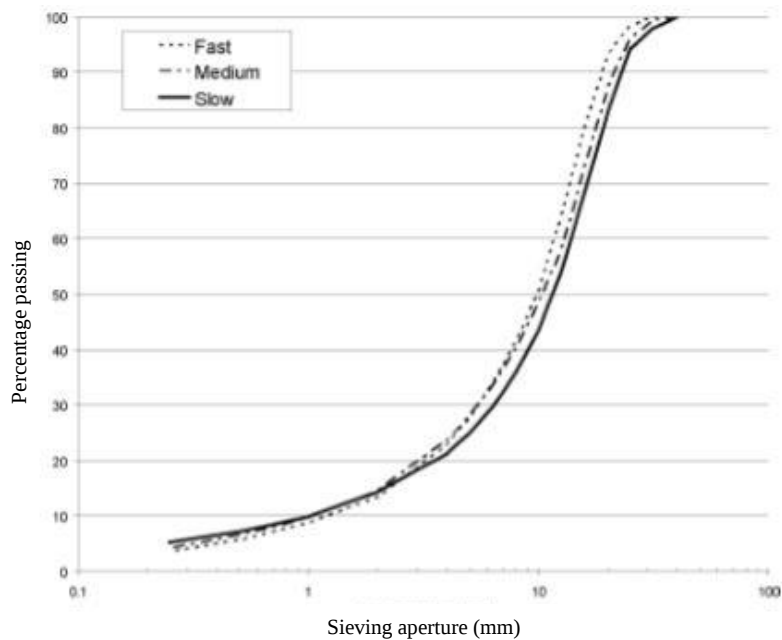
Figur 13. Kapaciteten hos konkrossen minskar med ökat varvtal (Evertsson C., 2000).

I sin avhandling visar Hulthén (2010) beteendet hos krossar vid ändring av CSS och hastighet. Ändringar av CSS förflyttar hela den kumulativa storleksfördelningen hos produkten åt ena eller andra hållet samtidigt som ändringar i hastigheten roterar kurvan enligt Figur 14. Om CSS minskas kommer även produkten ur krossen att ha minskats och tvärtom.



Figur 14. Sikt kurvornas förflyttning med ändrat CSS (Hulthén, 2010).

En högre hastighet minskar den största storleken hos produkten samtidigt som en mindre mängd fint material produceras enligt Figur 15. Hulthén (2010) ändrade hastigheten hos krossen till ca 20 % mindre och 10 % högre vilket skiljer sig mot syftet med detta projekt där krossens hastighet ämnas dubblas eller mer.



Figur 15. Sikt kurvan roteras till följd av hastighetsändring hos konkrossen (Hulthén, 2010).

2.4.3 Skadliga specialfall

Vid krossning med en konkross kan fyra fall uppstå som har en negativ inverkan och i olika utsträckning kan skada krossen och dess tillhörande utrustning på sikt.

Det första fallet är chokning vilket innebär att matningen är högre än flödet genom krossen. Detta fyller upp intaget till krossen med sten och kan få krossen att stanna om krossens motor inte klarar av att leverera tillräckligt mycket energi (stalling). Chokning är ett sätt att i industrin få en jämn matning till krossen och därför är en korrekt dimensionerad motorstorlek viktigt. Detta för att undvika stalling vid chokning som innebär att krossen körs på sin maxnivå. Kilremmarna som driver krossen kan skadas om stalling inträffar ofta.

Head-spin är det som inträffar om innermanteln skulle börja snurra vilket sker till följd av att matningen är för låg. En för låg matning kan resultera i för få partiklar som kan låsa fast innermanteln mot ytermanteln rotationsmässigt. Förutom att svängningarna i krossen blir värre till följd av den större massan som roterar excentriskt, vilket kan vara skadligt i sig, kommer de partiklarna som passerar krosskammaren att skjivas mellan mantlarna vilket ger större slitage på mantlarna. Även en annan sönderdelning av partiklarna kommer ske när även skjuvning, utöver den vanliga kompressionen, sker vilket ger en nötning eller abrasion.

Svängningar hos krossen är naturligt eftersom innermanteln pendlar fram och tillbaka samt att axeln har en excentrisk del. Vid vissa hastigheter uppstår dock egensvängningar till följd av krossens geometri vilka kan vara skadliga för krossen. Svängningarna hos en kross kan förstöra den genom utmattning och svängningarna vid en egenfrekvens förstärker denna process.

Slutligen kan krossning leda till att frekvensomriktaren som styr krossen tvingas leverera mer ström än vad den klarar av vilket överbelastar den och kan skada den. Detta sker när krossen ska accelerera fortare än normalt vid hög belastning som exempelvis stora partiklar och lågt CSS. Inbyggda skydd hos frekvensomriktaren ser till att inget oförutsett händer som kan leda till en incident men då den är känslig bör handhavandet av den ske kontrollerat.

2.5 Siktning

I gruvindustrin är det inte av intresse att endast veta hur stor den minsta och den största partikeln är utan fördelningen i de olika storlekarna är det som är centralt. Om produkten skulle genomgå en krossprocess skulle den största och den minsta partikeln teoretiskt sett kunna vara av samma storlek som innan vilket innebär att produkten behöver siktas för att krossprocessens inverkan skulle kunna synas. Syftet med siktning är att på detta sätt kunna mäta hur mycket finare produkten har blivit efter en process. Siktning innebär att en mängd partiklar sorteras i storleksordning. Hur siktning genomförs förklaras i avsnitt 3.3 Siktning.

Vanliga nyckeltal som erhålls genom siktning är P80 och F80, vilket motsvarar hur stor 80 % av den ackumulerade mängden är. F:et står för feed (matning) vilket innebär materialet som går in i en process och P:et produkt vilket innebär materialet som går ut från en process.

2.6 Malning

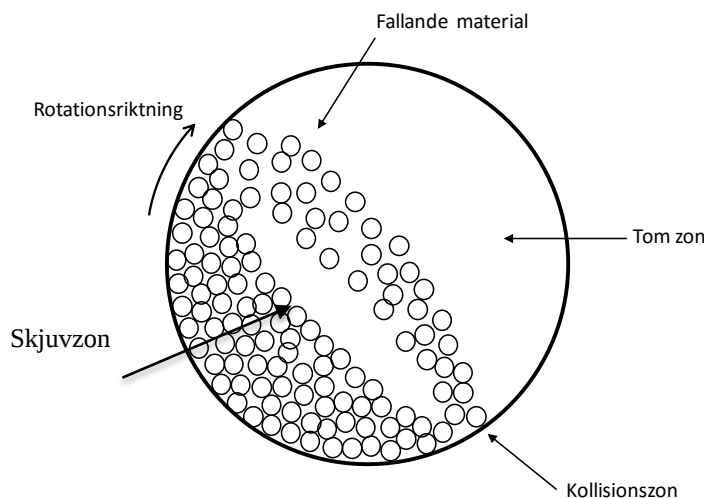
Malning är en energibetingad sönderdelning där rörelseenergi från kvarnen övergår till lägesenergi hos malmedian som slutligen sönderdelar materialet som ska malas när den faller ner och därmed avger sin lägesenergi.

2.6.1 Malprocesser

De malprocesser som i huvudsak finns idag är, autogen malning, semiautogen malning, stångkvarn och kulkvarn. Stångkvarn och kulkvarn har använts i projektet men i olika utsträckning där kulkvarn har varit den flitigast använda processen. En viktig skillnad mellan malprocessen i projektet och industrin är att så kallad batch grinding har använts i projektet, läs mer om detta i avsnitt 2.6.8 Batch grinding jämfört med malning i industrin.

2.6.2 Kulkvarn

Kulkvarn är den dominerande malprocessen för att skapa fint material i industrin och har därför använts i samma syfte i projektet. En kulkvarn är en roterande trumma med lyftare på insidan för att lyfta med materialet upp med rotationsrörelsen. Materialet som ska malas stoppas in tillsammans med malkroppar, i vanliga fall kulor av exempelvis stål. Trumman snurras sedan runt och när stålkulorna träffar materialet som ska malas så sönderdelas det till mindre partiklar och slutresultatet blir således ett finare material. Bilden nedan (Figur 16) visar hur materialet samt malmedian i en kulkvarn rör sig. Sönderdelning sker genom abrasiv nötning i skjuvzonen samt genom kollisioner i kollisionsszonen



Figur 16. Rörelse hos materialet och malmedia i en roterande kvarn modifierad från (Wills, 2006).

Eftersom det är en ren slump var kulorna landar finns i huvudsak fyra olika fall som kan inträffa när kulorna faller ner och ska träffa materialet för att mala det. Kulorna kan träffa varandra eller träffa kvarnen och således ej krossa något material. Detta är en stor energiförlust då all rörelseenergi har gått åt men inget material har sönderdelats. En annan energiförlust är att om malmedian har en viss lägesenergi innan den faller ner kan det hända att 100 % av denna lägesenergi ej behövs för att sönderdela materialet som ska malas och resterande energi blir då en värmeförlust. Det tredje fallet är att kulorna inte har tillräckligt med energi för att krossa materialet. Detta blir ett problem då det ej går att överföra mer energi till kulorna än vad den maximala lägesenergin som kan tillföras är. En konsekvens av detta är att små kulstorlekar inte klarar av att krossa stora partiklar. Det fjärde och minst troliga alternativet är att kulorna träffar materialet och har exakt rätt mängd energi för att sönderdela det. En kombination av dessa kan inträffa, exempelvis att kulorna både träffar material och andra kulor vilket fortfarande gör att material sönderdelas.

Kulkvarnar har ett optimeringsproblem värt att nämna. Användes en mindre kulstorlek fås större specifik yta som kan krossa material och således en effektivare krossning (Wills, 2006). Som tidigare nämnts är mindre kulor inte lika effektiva för att krossa större partiklar som stora kulor är. Detta leder till att om materialet in i kvarnen har stor största storlek måste större kulor användas vilket ger en mindre effektiv malning. Generellt sett är det bättre att ha för stora kulor än för små då för små kulor kommer leda till större energiförlust än för stora kulor och dessutom inte reducera storleken på det största in materialet (Bond, 1961). Av detta kan slutsatsen dras att den kulstorlek som ska användas är den som är precis så stor att den kan reducera storleken på de största ingående partiklarna.

2.6.3 Stångkvarn

En stångkvarn fungerar på i princip samma sätt som en kulkvarn med den viktiga skillnaden att kulorna är utbytta mot stänger som maler materialet samt att förhållandet mellan malmedians volym och materialvolym är större jämfört med kulkvarn. Stängerna ska endast vara lite kortare än kvarnen för att förhindra att de vrider sig under malningen. Samma problem som nämndes om kulkvarnen finns även för stångkvarnen och mindre diameter på stängerna ger även här mer specifik yta att mala med men är på samma sätt som för kulkvarnen inte lika effektivt när stora partiklar ska sönderdelas.

2.6.4 Våt och torrmalning

I både stångkvarnar och kulkvarnar sker malningen antingen vått eller torrt. I projektet har torrmalning använts då det malda materialet inte behöver torkas innan det siktas vid denna typ av malning. Vid torrmalning läggs malmedia och materialet som ska malas in i kvarnen som sedan maler materialet.

Den vanligaste typen av malning i industrin är våt malning. Detta på grund av de ekonomiska fördelar som finns. Ibland är å andra sidan torrmalning nödvändigt eftersom tillsättning av vatten ibland kan orsaka oönskade kemiska reaktioner (Wills, 2006). Några av fördelarna med våt malning är att det förbrukas mindre energi per ton produkt, damning som är ett problem vid torrmalning undviks samt att transporter med pumpar och rör möjliggörs (Wills, 2006).

2.6.5 Beräkning av förbrukad energi enligt Bond

Bond (1961) presenterar en ekvation för att räkna ut energiåtgången i en roterande kvarn baserat på in- och utgående materials storleksfördelning samt materialets Bond working index. Bond working index, hädanefter kallat BWI, är ett mått på hur svårkrossat materialet är och det är specifikt för varje material. I fallet med LKAB-malmen från Leveäniemigruvan i Svappavaara har Erik Niva¹ kontaktats för att få denna information. Bonds ekvation för att räkna ut energiåtgången ser ut enligt nedan.

$$W = \frac{10Wi}{\sqrt{P}} - \frac{10Wi}{\sqrt{F}} \quad \text{Ekvation 2}$$

W	Energiåtgången i kWh/short ton
F	Diametern i μm som 80 % av feeden från kvarnen passerar
P	Diametern i μm som 80 % av produkten från kvarnen passerar
Wi	Materialets BWI i kWh/short ton

Bonds ekvation ovan är framtagen för en specifik process som definierats av Bond själv. Processen avser kvarnstorlek, varvtal, malmedia samt volym på det ingående materialet. På grund av utrustningens begränsningar har denna process inte kunnat följas utan malningen har gjorts med andra parametrar. Mer om dessa felkällor står att läsa om i avsnitt 6.3.4 Felkällor vid användning av Bonds ekvation.

Ett alternativt sätt att beräkna den förbrukade energin är att räkna förbrukad energi per ton slutprodukt (Ballantyne, 2015). I projektet har slutproduktens storlek bestämts till mindre än 63 μm . För att beräkna den förbrukade energin per ton slutprodukt har följande ekvation använts.

$$W_{-63} = \frac{W}{x} \quad \text{Ekvation 3}$$

W_{-63}	Förbrukad energi per ton slutprodukt
W	Förbrukad energi totalt
x	Andel av produkten från försöket som är av slutproduktens storlek

Både de två beräkningssätten ovan har använts i projektet.

¹ Erik Niva, Research Engineer. LKAB

2.6.6 Beräkning av optimal stång och kuldiameter

Bond (1961) har tagit fram ekvationer för att räkna fram önskad diameter på stångstänger och järn- eller stålkulor som används som malmedia. Dessa ekvationer presenteras nedan och har i projektet använts för att i efterhand se vad som hade varit den optimala stång- respektive kuldiametern. Även i detta fall har utrustningens begränsningar gjort att den optimala storleken ej använts, mer om dessa felkällor i avsnitt 6.3.4 Felkällor vid användning av Bonds ekvation.

B	Kul- eller stångdiameter i tum
F	Diametern i μm som 80 % av feeden från kvarnen passerar
Wi	Materialets BWI vid feedstorleken
Cs	Procenten av kvarnens kritiska varvtal
Sg	Det malda materialets densitet
D	Kvarnens inre diameter i fot
K	En empirisk erfarenhetskonstant, 350 för våt malning och 335 för tormalning

Optimal stångdiameter ges då av följande ekvation.

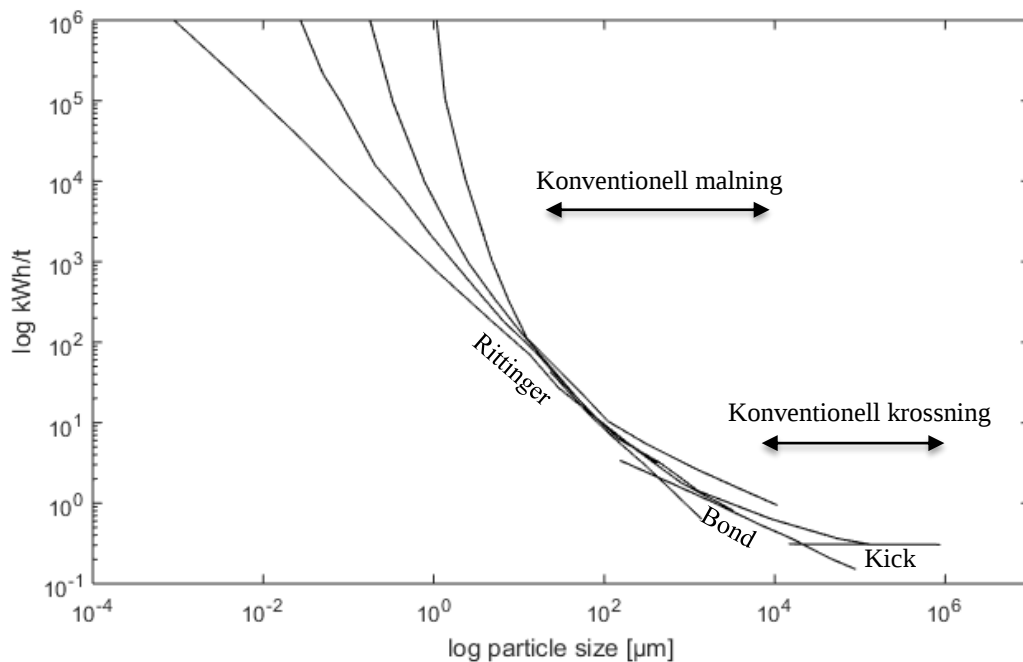
$$B = \frac{F^{\frac{3}{4}}}{160} \cdot \sqrt{\frac{WiSg}{100Cs\sqrt{D}}} \quad \text{Ekvation 4}$$

Optimal kuldiameter ges av följande ekvation.

$$B = \left(\frac{F}{K}\right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{SgWi}{100Cs\sqrt{D}}\right)^{\frac{1}{3}} \quad \text{Ekvation 5}$$

2.6.7 Alternativa teorier

Det finns i huvudsak tre olika teorier för att räkna på energiåtgången vid sönderdelning av material. Dessa teorier är Bond, Rittinger samt Kick. De tre teorierna stämmer olika bra vid olika partikelstorlekar. Hukki (1962) presenterar i sin artikel var de olika teorierna stämmer bäst och det visar sig att Bonds teori som används i detta projekt stämmer bra vid de partikelstorlekar som i huvudsak förekommer i den del av projektet som behandlar malning. I Figur 17 nedan kan detta ses grafiskt då Bonds ekvation har approximativt samma lutning som reduktionskaraktäristiken för uppmätta resultat vid partikelstorlek mellan 10 och 1 mm, så kallad grov malning (motsvarande stångkvarn). Den fungerar även bra för partikelstorlek från 1 mm ner till 100 μm , så kallad fin malning (motsvarande kulkvarn), som är nära den minsta storleken som uppmätts i detta projekt (63 μm).



Figur 17. De tre olika teoriernas överensstämmande med uppmätt energiåtgång vid olika typer av sönderdelning modifierad från (Hukki, 1962).

De tre teorierna ovan fungerar, som tidigare nämnts, bäst inom ett specifikt spann av partikelstorlekar. Morell (2004) presenterar en ny ekvation som gäller för ett större spann av partikelstorlekar.

$$W = M_i K (x_2^{f(x_2)} - x_1^{f(x_1)}) \quad \text{Ekvation 6}$$

W	Specifika energin i kWh/t
K	Konstant för att balansera ekvationen
M_i	Index relaterat till brotтеgenskaperna hos malmen
x_2	P80
x_1	F80
$f(x)$	Ekvation för att få varierande exponent

Den varierande exponenten gör att ekvationen gäller för ett större spann av partikelstorlekar. Ekvationen beror som synes på F80 respektive P80 och ser ut enligt följande (Morrell, Rock characterisation for high pressure grinding rolls circuit design. , 2006).

$$f(x) = - \left(0,295 + \frac{x}{1\,000\,000} \right) \quad \text{Ekvation 7}$$

Morells teori har visat sig stämma bra men i projektet har dock Bonds ekvation använts ändå. Detta för att Bonds teori stämmer bra i det området som projektet berör samt att den är enklare att använda då BWI är enklare att erhålla från i projektets fall LKAB.

2.6.8 Batch grinding jämfört med malning i industrin

I projektet har batch grinding varit den använda processen. Nedan belyses och jämförs batch grinding och den typ av malning som sker i industrin.

Batch grinding innebär att en bestämd mängd material läggs i kvarnen tillsammans med malmedian. Kvarnen körs sedan en viss tid och materialet tas sedan ut för att storleksbestämmas och således få information om hur effektiv malningen varit. En risk med denna typ av malning är att materialet övermals, det vill säga att det blir finare än vad slutprodukten ska vara. Händer detta har mer energi än nödvändigt använts för att sönderdela denna del av materialet vilket naturligtvis är att betrakta som en energiförlust.

En typ av malning som kan liknas vid batch grinding är malning som sker i en öppen krets. Materialet i kvarnen rör sig då tillräckligt långsamt för att säkerställa att materialet har nått tillräckligt liten storlek när det passerat kvarnen (Wills, 2006). Malning i öppen krets har samma typ av energiförlust på grund av övermalning som batch grinding har. Denna typ av malning är ovanlig i industrin.

Den malprocess som är vanligast i industrin är malning i sluten krets. Detta innebär att materialet recirkuleras tills det nått rätt storlek. Praktiskt sker detta genom att materialet körs igenom kvarnen på en mycket högre matningshastighet än vid öppen krets då det inte är ett mål att uppnå rätt partikelstorlek första malningen (Wills, 2006). Produkten från kvarnen klasseras sedan där det material som ej är tillräckligt fint skickas in i kvarnen ytterligare en gång. Den recirkulerade lasten kan vara så stor som 600 % (Wills, 2006). Denna process har inte samma problem med övermalning som den malning som sker i öppen krets vilket innebär att mer energi kan användas till att sönderdela de partiklar som är för stora (Wills, 2006).

Den största skillnaden mellan batch grinding och den malning som sker i industrin är sättet på vilket kvarnarna matas. I batch grinding läggs som nämnts materialet in i kvarnen och plockas sedan ut efter en bestämd tid medan i industrin så matas kvarnarna kontinuerligt från ena kortsidan och töms kontinuerligt i den andra kortsidan.

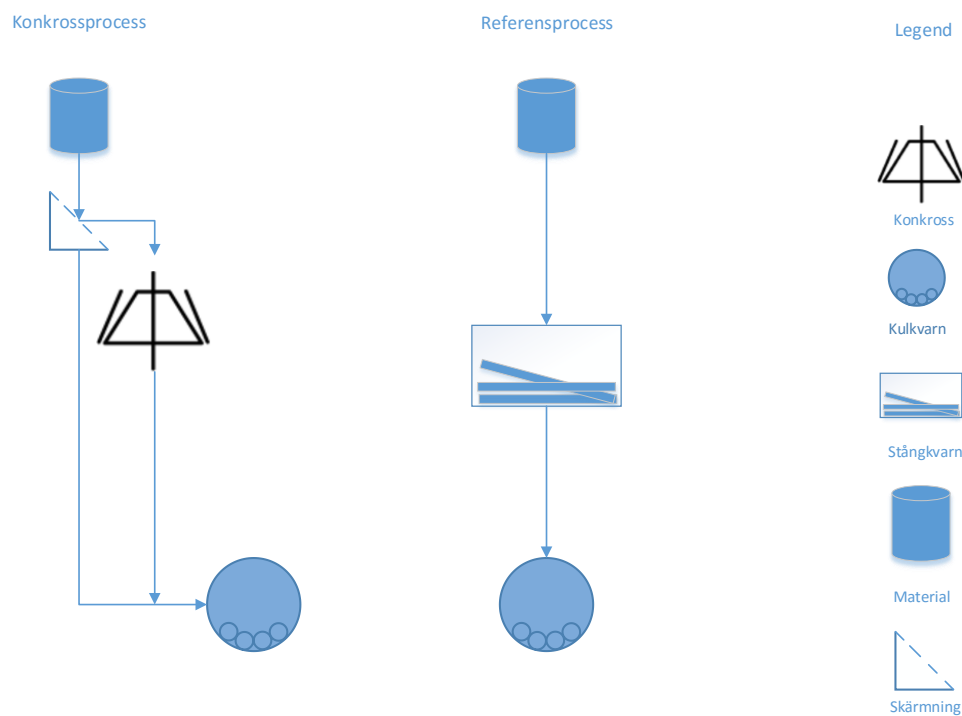
Den industriprocess som batch grinding mest liknar är malning i öppen krets då de har liknande energiförluster på grund av övermalning. Malning i öppen krets används dock sällan i industrin där sluten krets är det dominerande. För att få batch grinding att likna malning i sluten krets kan ett sätt vara att mala en kortare tid följt av att sikta bort det material som nått slutproduktens storlek. Sedan läggs det material som fortfarande är för grovt in i kvarnen igen och kvarnen fylls på med nytt material för att få tillbaka ursprungsmängden material.

3 Metod

De metoder som genomfördes i detta projekt var följande: skärmning, neddelning, siktning, konkrossning och malning. Skärmning innebär att ett siktdäck används för att materialet över en viss storlek ska separeras från det material som är mindre än den valda storleken. Övriga metoder behandlas mer genomgående för sig där malning innefattar både kulor och stänger som malmedia.

3.1 Översikt

För att kunna jämföra om en energibesparing kan göras måste en konkrossprocess jämföras med en referensprocess. Denna referensprocess behövde vara så lik en industriell process som möjligt. Av rekommendationer av Alf Westerlund² sattes en sådan process upp. Jämförelsen mellan de olika processerna gjordes dels för att kunna jämföra energiåtgången i båda processerna men även för att kunna jämföra storleksfördelningen på det producerade materialet. I Figur 18 nedan visas hur de tänkta processerna går till.

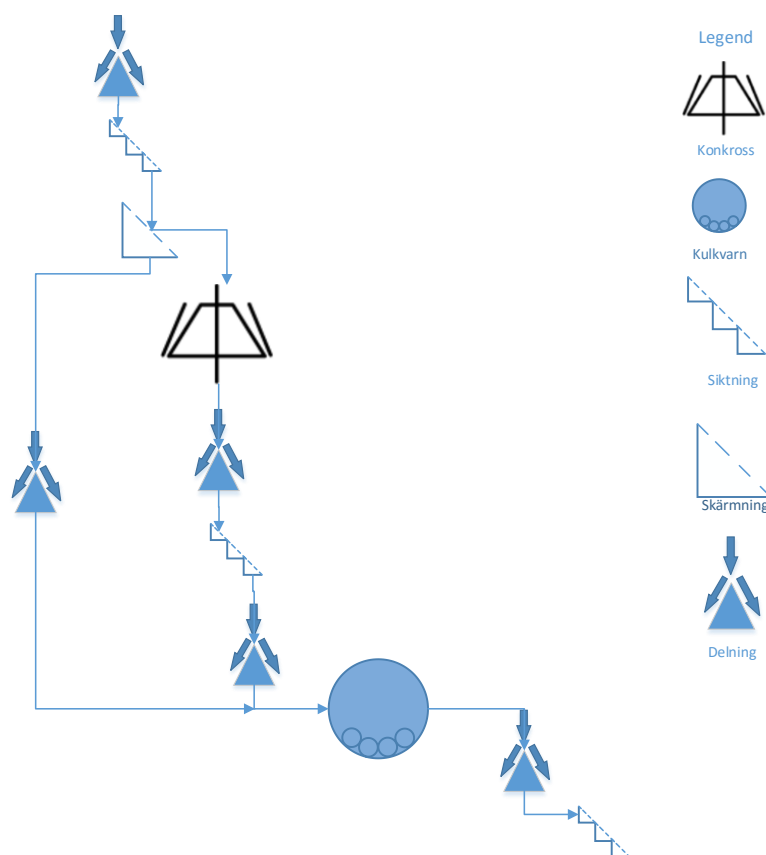


Figur 18. Processdiagram.

² Dialog med Alf Westerlund, Lärare inom Bergsteknik, på Bergsskolan i Filipstad

För konkrossprocessen kommer materialet först att skärmas. Vid denna skärmning separeras materialet så att alla partiklar mindre än 4 mm hamnar för sig. Dessa partiklar kommer härnäst kallas 0-4. Detta gjordes för att kvarnen som användes inte kunde mala partiklar större än 4 mm, vilket innebar att allt av det ursprungliga materialet mindre än 4 mm kunde malas direkt. Resterande material, större än 4 mm, gick sedan till en konkross där det krossades. Det krossade materialet blandades sedan med 0-4-materialet för att tillsammans malas i en kulkvarn. Vad gäller referensprocessen så maldes allt material först i en stångkvarn och därefter i en kulkvarn.

För att studera hur storleksfördelningen förändrades genom processen siktades materialet efter varje sönderdelningsprocess. För att göra detta behövde materialet delas ned. I Figur 19 nedan visas ett flödesschema för hur detta gick till i konkrossprocessen, från ursprungligt material till finmalet pulver.



Figur 19. Metoddiagram.

Inför krossning delades materialet ner för att få rätt mängd. Därefter siktades materialet för att få fram materialets ursprungliga storleksprofil. Materialet skärmades, där allt 0-4-material sparades undan. Resterande material, större än 4 mm, gick till konkrossen. Efter krossningen delades materialet ner i mindre mängd för att kunna sikta och bestämma storleksfördelningen. Därefter delades materialet ner ytterligare en gång för att få rätt mängd som skulle blandas med 0-4 mm och malas. Efter det maldes materialet i en kulkvarn. Det malda materialet delades sedan till en mindre mängd för möjlighet att kunna sikta.

Slutligen jämfördes resultaten från krossning och malning med referenstestet för att undersöka om den totala energiåtgången minskat.

3.2 Neddelning

För att få fram rätt materiemängd till varje test och för att säkerställa att det material som användes till testerna har samma storleksfördelning har neddelning gjorts, en neddelare kan ses i Figur 20 nedan. Syftet med neddelning är att dela ner en ursprunglig materiemängd i mindre delar där de två nya mängderna är av samma storleksfördelning som den ursprungliga mängden. Processen vid neddelning är att ett kärl fylls på med material från den ursprungliga mängden. Innehållet i detta kärl hålls sedan på ett spjäll som är utformat så att hälften av materialet går till ett kärl och den andra hälften till det andra. Neddelning görs sedan igen på de nya mängderna på samma sätt tills önskad mängd uppnåts. Detta är en vedertagen metod och standard inom området.



Figur 20. Neddelare.

3.3 Siktning

Efter varje steg i de båda processerna har siktning genomförts. Siktning innebär att en mängd partiklar sorteras i storleksordning genom att de får passera genom ett antal siktdäck, vilket är en sorts sil, med en bestämd storlek på hålen för varje siktdäck. Detta innebär att partiklarna fastnar i det siktdäck som har för små hål för att släppa igenom den specifika partikeln och på så sätt fås en uppdelning efter storlek. I Figur 21 visas två av siktdäcken som använts. Partiklarna på varje däck samlas upp i ett kärl och vägs noggrant vilket resulterade i en siktkurva som beskriver hur produktens innehåll i procent med avseende på partikelstorlek ser ut.



Figur 21. Siktdäck.

3.4 Krossning

Krossningen gick till genom att kontinuerligt mata in material in i konkrossen. Det skedde med ett systematiskt arbetssätt där mätdata, så som spänning och ström, noggrant loggades. Olika hastigheter och olika CSS användes under testerna. Detta gjordes dels för att kunna analysera det krossade materialets storleksprofil, men också för att jämföra energiförbrukningen för olika inställningar på krossen.

Krossning i sig kan delas upp i tre steg, Matning av material in i krossen, Sönderdelning och sist Uppsamling av önskat material.

3.4.1 Matning

Matning omfattar den del av krossningen som har att göra med hur stor mängden material som flödar in i krossen är. Matningen begränsades till att vara konstant, men det krävdes också att den hölls jämn. Detta krävdes för att effekten i krossen skulle bli så jämn som möjligt. En ojämn matning hade medfört att effekten skulle fluktuera eftersom motorn i krossen strävar efter att alltid ha en jämn hastighet och mer material medför rörelsemotstånd. Fluktuerande effekt medför i sin tur högre standardavvikelse. En högre standardavvikelse medför att den medelvärderade effekten inte blir robust.

3.4.2 Sönderdelning

Sönderdelningen är den del i krossningen där materialets storlek reduceras. Här finns det många aspekter att ta i beaktning. Dels de inställningar på krossen som kan förändra resultatet av krossningen i form av olika storleksprofiler på materialet, men även hur maskinen beter sig och hur det säkerställs att energiförbrukningen är så konstant som möjligt.

De parametrar för krossen som undersöktes var CSS och rotationshastighet. CSS mättes experimentellt genom att föra ner ett blysänke i krossen vid låg hastighet. Blysänket hölls vid det ställe där avståndet mellan inner- och ytermantel var som minst. Blysänket komprimerades då till storleken på CSS. Blysänket drogs upp och måttet på CSS kunde bestämmas genom att mäta det deformerade blysänket med ett skjutmått. Konkrossens hastighet styrdes i LabVIEW via en frekvensomriktare.

För att få en jämn nivå på effekten krävdes att konkrossen först värmdes upp till arbetstemperatur. Detta gjordes först i 5 minuter utan material för att värma upp axelns lager och sedan 5 minuter med material för att värma upp lagren med vilka manteln är lagrad.

3.4.3 Samla upp önskat material

Uppsamlingen av material innefattar den del där det krossade materialet samlas samtidigt som effekten loggas på datorn. Uppsamlingen påbörjas då effekten nått stationär fas. Stationär fas innebär att effekten håller jämn nivå vid längre tid. Detta görs för att det antas att krossar i industrin körs i längre tid och därmed inte påverkas av den initiala transienta fasen som är den del av krossningen då effekten fluktuerar till följd av förändring av ingående parametrar. Den transienta fasen avtar dock och följs den stationära fasen.

För att avgöra när stationär fas hade uppnåtts plottades effekten kontinuerligt i LabVIEW. Uppsamlingen fortlöpte tills rätt materialmängd hade uppnåtts. Detta gjordes för att malningen krävde en viss bestämd massa. För att veta hur storleksfördelningen på det krossade materialet såg ut när effekten mätts var det viktigt att veta vilket material som krossats under denna tid. Detta gjordes för att koppla energiförbrukningen till storleksfördelningen.

3.5 Malning

Malning av material gjordes i en tumlande kvarn. Dels med kulor men också med stänger som malmedia. Stängerna användes till material som inte hade krossats i konkrossen. Detta gjordes för att ha en referens att jämföra hur det hade sett ut om materialet inte krossats fint. Därefter maldes alla tester i kvarnen med kulorna.

3.6 Tolkning av resultat

För att tolka resultaten finns det olika tillvägagångssätt. Till exempel kan den nya processen med användning av konkross jämföras med processen där stångkvarn användes. Detta kan visa på om den nya metoden var mer energieffektiv än en metod som tillämpas i industrin. Alternativt så kan krosstesten jämföras med varandra, då flera olika inställningar testades, och ett optimum hittas för minimal energianvändning. Jämförelser mellan olika testers storleksfördelning kan också göras för att se hur de olika inställningarna påverkar materialet under en specifik sönderdelningsprocess. Val av metod görs först efter testerna har genomförts och data är tillgänglig.

4 Genomförande

Genomförande behandlar tillvägagångssättet som använts för att generera resultat. Det innefattar Material, Utrustning samt Utförande.

4.1 Material

Järnmalm från LKAB, Leveäniemi-gruvan i Svappavaara har studerats. Materialet var lämpligt för testerna då det är ett material som används i industrin och en minskning av energiåtgången för att sönderdela det skulle därför kunna göra industrin mer energieffektiv. Den materialparameter som framförallt använts i projektet är BWI vilket är ett mått på hur svårkrossat materialet är. Malmen som använts har ett BWI som ligger mellan 10,2 och 12,7 kWh/t. Detta är lågt vilket betyder att materialet är relativt lätt att sönderdela.

4.2 Utrustning

En upprustning av utrustningen kring krossen gjordes i inledningen av projektet. Detta innefattade byggandet av en ny bandmatare samt uppsamlingsenhet. I samband med detta byttes elkablar ut och nya moduler installerades i elskåpet. Upprustningen gjordes i syfte att lösa de problem som tidigare fanns gällande ojämnh matning, uppsamling av oönskat material under den transienta fasen samt de elektromagnetiska störningar som orsakas av frekvensomriktare.

4.2.1 Bandmatare

För att säkerställa jämn matning införskaffades en bandmatare. Bandmatarens hastighet styrdes med hjälp av en frekvensomriktare. I de utförda testerna valdes endast en hastighet för att minska antalet ingående variabler. Bandmataren som kan ses i Figur 22 nedan beställdes från den mekaniska verkstaden Bågenfelt & Hellström enligt deras standardbandmatare med anpassningen att ett urtag gjordes i U-profilen där en våg för mätning av massflöde ska placeras i framtida projekt. Bandmatarens band var 200 mm brett och rullarna satt på avståndet 800 mm ifrån varandra. Bandet som används var Habasit HAB12-e och utväxlingen från motorn, som var på 90 W med en maxhastighet på ca 1400 rpm, var 1:100 genom en snäckväxel. Mer om bandmataren står att läsa i Appendix B.



Figur 22. Bandmatare.

4.2.2 Hopper

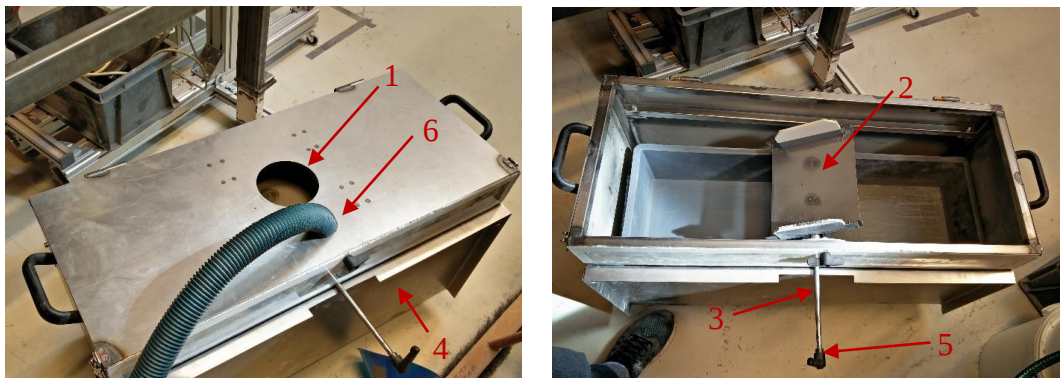
Ovanpå bandmataren var en hopper monterad vilket kan ses i Figur 23. Konstruktion och tillverkning av hopper samt ram utfördes i projektet. För en utförligare beskrivning av konstruktions- och tillverkningsarbetet se Appendix B. Hoppert fungerade som en lagringsenhet för materialet som skulle krossas och den hade en öppning genom vilket materialet transporterades ut med hjälp av bandmataren. Öppningen eller spaltens storlek gick att justera för att ändra matningen. Större öppning medförde högre matning.



Figur 23. Hoppert monterad ovanpå bandmataren. Tillsammans är de monterade på en ställning för att möjliggöra inkörning över krossen.

4.2.3 Uppsamlingsenhet

Som står att läsa i avsnitt 3.4.3 Samla upp önskat material, var det viktigt att veta energiförbrukningen för en specifik mängd krossat material. För att säkerställa att rätt material samlats upp behövdes en uppsamlingsenhet tillverkas. Med rätt material menas det material som krossats under pågående effektmätning vilket sker under stationär fas. Det krävdes att denna uppsamlingsenhet hade möjlighet att byta mellan två olika lådor under krossning. Resultatet kan ses i Figur 24.



Figur 24. Uppsamlingsenheten med lock på (t.v.) och utan lock (t.h.).

Uppsamlingsenheten bestod av en ingång (1) där det krossade materialet strömmade ner. Materialet föll ner på en flipper (2) som var fastsvetsad på axeln (3) som styrde vilken låda materialet landade i. Dessa lådor var uttagbara när luckan (4) på framsidan var öppen för att underlätta tömning av enheten. För att styra flippern roterades axeln med hjälp av ett handtag (5). Enheten hade även ett utsug (6) för att förhindra damning. Mer ingående beskrivning av konstruktion och tillverkning av uppsamlingsenheten återfinns i Appendix C.

4.2.4 Skärmade kablar

Då flera frekvensomriktare användes under konkrossningen fanns det risk för elektromagnetiska störningar. Dessa motverkades genom att samtliga trefaskablar byttes ut till skärmade kablar. Även kablarna till NI-modulerna skärmades för hand med aluminiumfolie.

4.2.5 Effektmätning

För att kunna avgöra om den totala energiförbrukningen minskar, uppmättes effekten under krossningen medan den beräknades under malningen.

Under krossningen användes de båda modulerna NI 9244 och NI 9246, där både strömmen och spänningen mättes med en frekvens på 1000 Hz. Datorn tog emot signalerna i LabVIEW, där de sedan användes för att beräkna den aktiva effekten, skenbara effekten, reaktiva effekten och effektfaktor. Denna uträkning kunde göras i en färdig funktion som fanns i LabVIEW. Effekten medelvärderades senare och dividerades med matningen för att få fram nyckeltalet kWh/t.

Energiåtgången under malningen beräknades med hjälp av Bonds ekvation, vilket relaterar sönderdelningen till energin. De ingående variablerna i Bonds ekvation var P80, F80 och BWI. Framtagningen av P80 och F80 gjordes genom siktning, där F80 var den storlek 80 % av materialet hade innan malning och P80 var den storlek 80 % av materialet hade efter malning. BWI erhöles från Erik Niva.³ Ett alternativt sätt att få fram energiförbrukningen i en tumlande kvarn är att mäta den. Detta kan antingen göras genom att mäta den elektriska effekten, så som det gjordes för krossen, eller med en momentgivare samtidigt som varvtalet mäts. Detta var dock inte möjligt i detta fall då kvarnförsöken utfördes på Bergskolan i Filipstad där nödvändig utrustning saknades.

4.3 Utförande

Nedan behandlas utförande av alla tester mer ingående. De fyra ämnen som redogörs för är Krossning, Malning samt Experiment.

4.3.1 Krossning

Krossningen utfördes med en Morgårdshammar B90 konkross. Krosstestet började genom att ställa in hopprens spalt till en höjd på 35 mm. Detta valdes experimentellt för att få en lagom matning. Hoppren laddades med material och därefter startades konkrossen i låg hastighet. Detta gjordes innan bandmataren startades för att säkerställa att material inte ramlar ner i en stillastående kross och orsakar stalling. Bandmatarens frekvensomriktare startades och kördes i en hastighet på 20 Hz vilket motsvarar 0,015 m/s på bandmataren. Hastigheten på bandmataren bestämdes experimentellt för att få ett lagom flöde. Spalthöjden och bandmatarens hastighet hölls fix genom samtliga tester. Detta medförde att matningen blev konstant genom alla tester. När materialet började krossas rampades konkrossens hastighet upp till den valda hastigheten för testet. Hastighetsökningen gjordes först när materialet började krossas för att undvika headspin, vilket sker då matningen är för låg.

För att påbörja uppsamlingen av önskat material roterades flippren så att det krossade materialet hamnade i önskad låda. Samtidigt aktiverades sparningen av effekten i LabVIEW. Uppsamlingen av material och effekt pågick tills önskad mängd material hade krossats. Detta estimerades till ungefär 10-12 sekunders krossning. För att avsluta uppsamlingen vändes flippren så att materialet hamnade i den andra lådan, samtidigt som effekten slutade sparas i LabVIEW. För att avsluta krossningen stängdes först bandmataren av samtidigt som krossen rampades ner till en lägre hastighet. När det säkerställts att inget material krossades längre stängdes konkrossen av. Detta gjordes för att inget material skulle kilas fast mellan mantlarna när krossen hade stannat.

³ Erik Niva, Research Engineer. LKAB

4.3.2 Malning

Malningen utfördes i en kvarn av laboratoriestorlek och med två olika kulstorlekar, 13 mm och 25 mm. Två tester gjordes även med först stångmalning och sedan kulmalning med respektive kulstorlek.

Kvarntestet utfördes genom att kvarnen, som kan ses i Figur 25 nedan, först laddades med kulor och sedan med material. På rekommendation av Alf Westerlund⁴ skulle mängden kulor i denna kvarn uppgå till 25 kg och mängden testmaterial till 1 kg. Materialet som skulle malas bestod till 32,5 % av krossat material och 67,5 % av 0-4-material, som skärmats bort tidigare. Därefter förseglades kvarnen och monterades på sin ställning. Därefter maldes materialet i 20 minuter efter rekommendationer från Alf Westerlund⁴. När malningen var klar stängdes motorn av. Ur kvarnen separerades materialet från kulorna med hjälp av ett grovt siktdäck. Slutligen siktades materialet för att mäta hur storleksfördelningen var på det malda materialet.

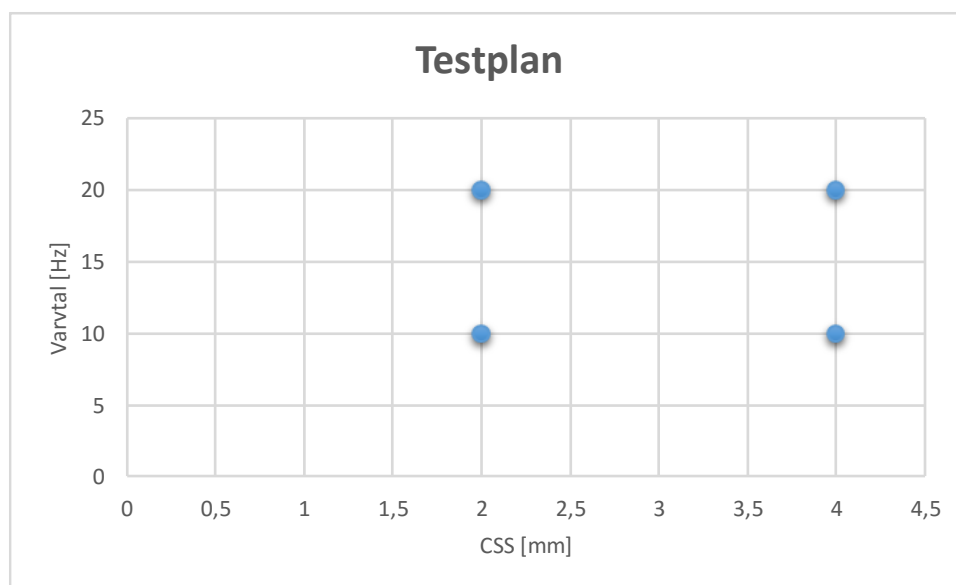


Figur 25. Kvarnen utan material och lock på sin ställning (t.v.) och laddad med en del av kulorna och en del av det malda materialet (t.h.).

⁴ Dialog med Alf Westerlund, Lärare inom Bergsteknik, på Bergsskolan i Filipstad

4.3.3 Experiment

För att kunna jämföra hur konkrossen beter sig med olika inställningar bestämdes en ursprunglig testplan. Antalet tester begränsades genom att reducera inställningarna till att testa ett högt och ett lågt CSS tillsammans med ett högt respektive lågt varvtal. Detta gjordes för att få så stort omfång som möjligt med så få tester som möjligt. Efter samtal med Johannes Quist⁵ valdes hastigheterna till 10 Hz och 20 Hz medan CSS valdes till 2 och 4 mm. Detta utgjorde en testplan enligt Figur 26 nedan.



Figur 26. Ursprunglig testplan

De hastigheter som avses här och i resterande delar av rapporten är mantelfrekvensen vilken utgör halva frekvensen i frekvensområdet. Konvertering mellan mantelfrekvens och varvtal på manteln kan ses i Tabell 3 nedan.

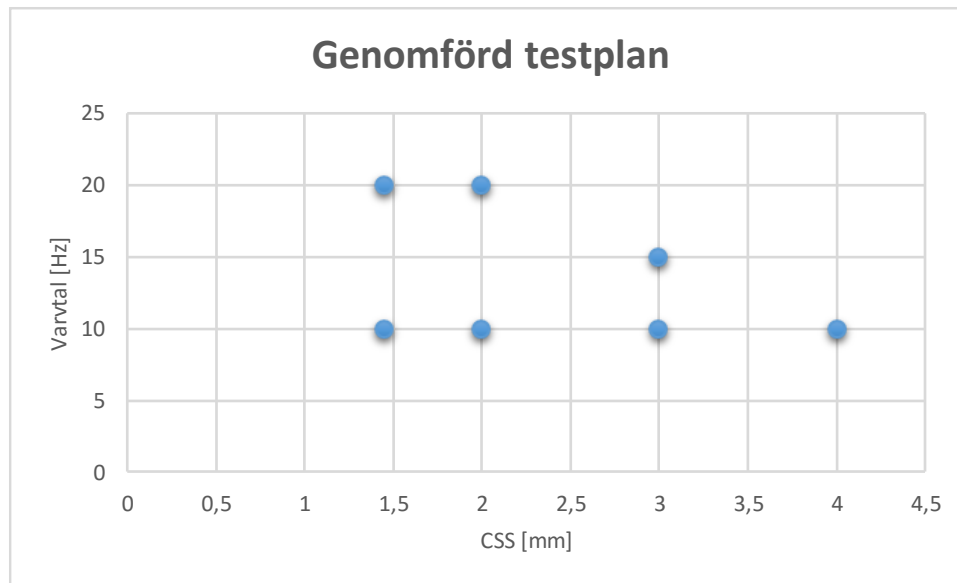
Tabell 3. Konverteringstabell mellan mantelfrekvens och varvtal på manteln.

Hz	rpm
5	291
10	582
15	873
20	1164
25	1455
30	1746
35	2037

Krossning med CSS 2 mm genomfördes med hastigheterna 10 Hz och 20 Hz. Krosstest med CSS 4 mm genomfördes med hastighet 10 Hz och 20 Hz, men vid hastigheten 20 Hz uppstod headspin. Headspin uppstod för att matningen var för låg. Detta medförde att CSS fick sänkas till 3 mm. Vid test med CSS 3 mm och 20 Hz uppstod fortfarande headspin. För att lösa detta testades en sänkning av hastigheten till 15 Hz. Krosstest med CSS 3 mm kunde därmed genomföras med hastighet 10 och 15 Hz.

⁵ Johannes Quist, Doktorand, avd. Produktutveckling, Produkt- och produktionsutveckling

Då det fanns tillgängligt material för ytterligare tester valdes att utvidga testplanen och försöka köra krossen ännu hårdare. Detta betydde att CSS sänktes till minsta möjliga, vilket visade sig vara 1,45 mm, och tester genomfördes vid hastigheter 10 och 20 Hz. Efter ovan nämnda förändringar uppdaterades testplanen enligt Figur 27 nedan.



Figur 27. Genomförd testplan.

Malning genomfördes två gånger för samtliga krosstester. En gång med 25 mm kulor och en gång med 13 mm kulor. Först maldes materialet i testerna med kulstorlek 25 mm i 20 minuter. Efter siktning av materialet upptäcktes att en stor del material hade malts till slutprodukt. Då noterades att det inte krävdes 20 minuter för att mala materialet. Detta medförde att tidserien på malningen också skulle undersökas för att studera hur malningsprocessen utvecklas med tiden. Dock kunde detta endast göras med återstående tester. Vid test med 13 mm kulstorlek och 10 Hz genomfördes därför malningen i 10 minuter. Materialet siktades sedan och fortsatte därefter malas till en sammanlagd tid på 20 minuter. Efterhand som dessa tester genomfördes noterades att tidsserien hade behövt utvidgas ytterligare. Detta på grund av att materialets partikelstorlek redan halverats eller mer efter 10 minuter. Därför bestämdes det att ytterligare ett maltest skulle genomföras. Detta med CSS 2 mm i 5 minuter med 13 mm kulstorlek.

Slutligen genomfördes referenstesterna. Dessa tester bestod av material som inte krossades i konkrossen utan istället maldes direkt med stänger i 20 minuter. Referenstesterna bestod av två tester, ett som skulle malas med 13 mm kulor och ett som skulle malas med 25 mm kulor. Efter första stångkvarnstestet, med materialet som skulle malas med 25 mm kulorna, hade genomförts så siktades materialet. Vid siktningen noterades att stor del av materialet hade blivit färdig produkt (0-63 µm) och hade behövts malas kortare tid. Detta medförde att kommande malning med 13 mm stora kulor, efter att materialet malts i stångkvarn i 20 minuter, endast maldes i 10 minuter. Efter att båda testerna hade malts med respektive kulstorlek siktades materialet igen och storleksfördelningen bestämdes. De tester som gjordes blev då enligt Tabell 4 nedan.

Tabell 4. Fullständig testplan.

Krossinställning samt kulstorlek			Maltid			Processnummer
CSS	Excentervarvtal	Kulstorlek	5 min	10 min	20 min	
1.45 mm	10 Hz	13 mm		x	x	1.1
		25 mm			x	1.2
	20 Hz	13 mm			x	2.1
		25 mm			x	2.2
2 mm	10 Hz	13 mm	x	x	x	3.1
		25 mm			x	3.2
	20 Hz	13 mm			x	4.1
		25 mm			x	4.2
3 mm	10 Hz	13 mm		x	x	5.1
		25 mm			x	5.2
	15 Hz	13 mm			x	6.1
		25 mm			x	6.2
4 mm	10 Hz	13 mm		x	x	7.1
		25 mm			x	7.2
Stångkvarn		13 mm		x		8.1
		25 mm			x	8.2

5 Resultat

I detta avsnitt presenteras resultatet för projektet. Först presenteras data på energiförbrukning för både krossning och malning. Energiförbrukningen är uppmätt för krossning och framräknad för malning. Efter detta presenteras alla siktkurvor i uppsättningar av hela processer tillsammans för att visa på skillnader mellan de olika inställningarna.

5.1 Krossning

Energiförbrukning

Resultatet av krossningsexperimenten är effekten som loggades vid varje test. Dessa sparades i Excel för utvärdering i efterhand. Samtliga sparade effektkurvor finns i Appendix D. Av effektmätningen beräknades ett medelvärde, tillhörande standardavvikelse och nyckeltalet kWh/t vilka presenteras nedan i Tabell 5.

Tabell 5. Effektdata från krosstesterna.

CSS	Varvtal	Medeleffekt (Skenbar)	Standardavvikelse	Specifik energi
<i>mm</i>	<i>Hz</i>	<i>W</i>	<i>W</i>	<i>kWh/t</i>
1.45	10	558.596	30.740	1.968
1.45	20	1161.241	49.749	2.870
2	10	548.467	20.247	1.241
2	20	1013.087	13.540	2.302
3	10	426.325	5.823	1.036
3	15	779.275	19.295	2.000
4	10	465.446	8.548	1.130

Som kan ses på resultatet innebär begreppet att utnyttja krossen hårdare, det vill säga lägre CSS och högre hastighet, att energiförbrukningen ökade. Standardavvikelsen är liten jämfört med den totala energiförbrukningen vilket tyder på en jämn effektmätning. Det kan även noteras att standardavvikelsen varierar mellan experimenten vilket innebär att stationär nivå inte helt uppnåts på effekten. Detta kan ha att göra med att krossen inte var tillräckligt uppvärmd utan att lagren fortfarande ökade i temperatur. En ökande lagertemperatur skulle innebära att förlusterna minskar vilket skulle ge en minskad energiförbrukning.

5.2 Malning

Energiförbrukning

De data som räknats fram för att kunna analysera resultatet av malningen hade alla att göra med BWI. För att estimerar energiåtgången har ekvation 2 använts. Denna ekvation relaterar F80, P80 och materialets BWI till den energi som har förbrukats under malprocessen.

Energiåtgången mäts i kWh/t vilket är standard inom industrin. Som kan ses i Tabell 6 nedan skiljer sig resultatet på den beräknade energiförbrukningen åt mellan de olika testerna. Detta är rimligt då maltiden är den dubbla. Motorn gick på maxeffekt under hela maltiden och den förbrukade energin borde därför vara ungefär den dubbla när maltiden fördubblas. En diskussion kring den beräknade effekten står att läsa i avsnitt 6.3.4 Felkällor vid användning av Bonds ekvation.

Slutsatsen blir att resultaten från beräkningarna är svåra att jämföra med varandra utan att först kombinera beräkningsresultaten med sikt kurvorna. Samtliga beräknade energiförbrukningar ligger i Appendix E.

Tabell 6. Energiförbrukning för två maltester.

Process 1.1, maltid 10 min		Process 1.1, maltid 20 min	
F80 [μm]	1915.1	F80 [μm]	1915.1
P80 [μm]	1078.6	P80 [μm]	101.4
W [kWh/USton]	0.96	W [kWh/USton]	9.710
W [kWh/t]	0.875	W [kWh/t]	8.809

5.3 Processer av krossning och malning

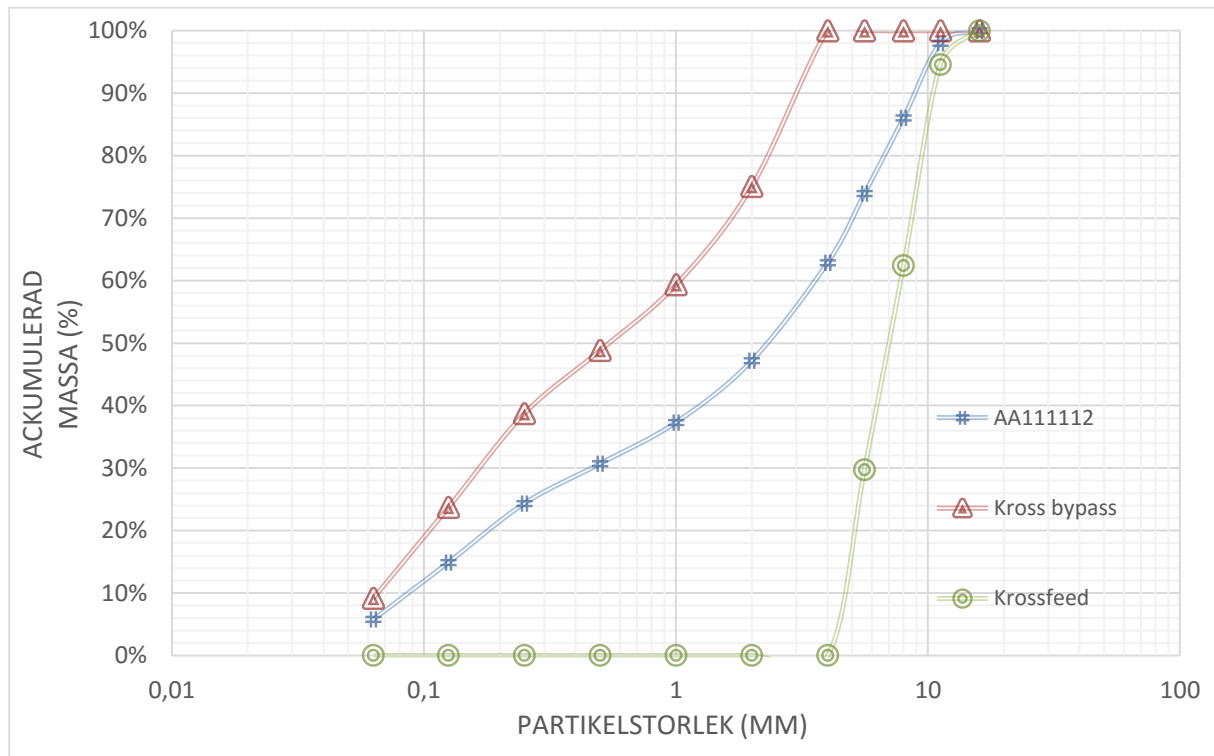
Siktkurvor

En sammanställning av alla kompletta tester har gjorts i form av så kallade processer där varje uppsättning specifika testparametrar skapar en process enligt avsnitt 4.3.3 Experiment. En process i detta fall syftar därmed på en specifik inställning hos krossen, ett visst CSS med ett visst varvtal, tillsammans med malning med en specifik kulstorlek.

Eftersom krossen körts med sju olika kombinationer av varvtal och CSS och allt detta material har körts i den tumlande kvarnen med två olika kulstorlekar ger detta 14 olika processer. Två processer i form av stång- och kulkvarn har också tagits fram som referens. Denna indelning gör att varje kombination av tester, som har som syfte att reducera råmaterialet till fin slutprodukt, kan jämföras gentemot varandra.

Alla olika processer beskrivs inte nedan utan de observationer som är av störst intresse för projektets syfte behandlas. Utöver figurer som visar siktkurvorna för processerna i sin helhet kommer även kurvor från specifika tester jämföras mot varandra för att lyfta fram skillnader. Samtliga siktkurvor ligger i Appendix F.

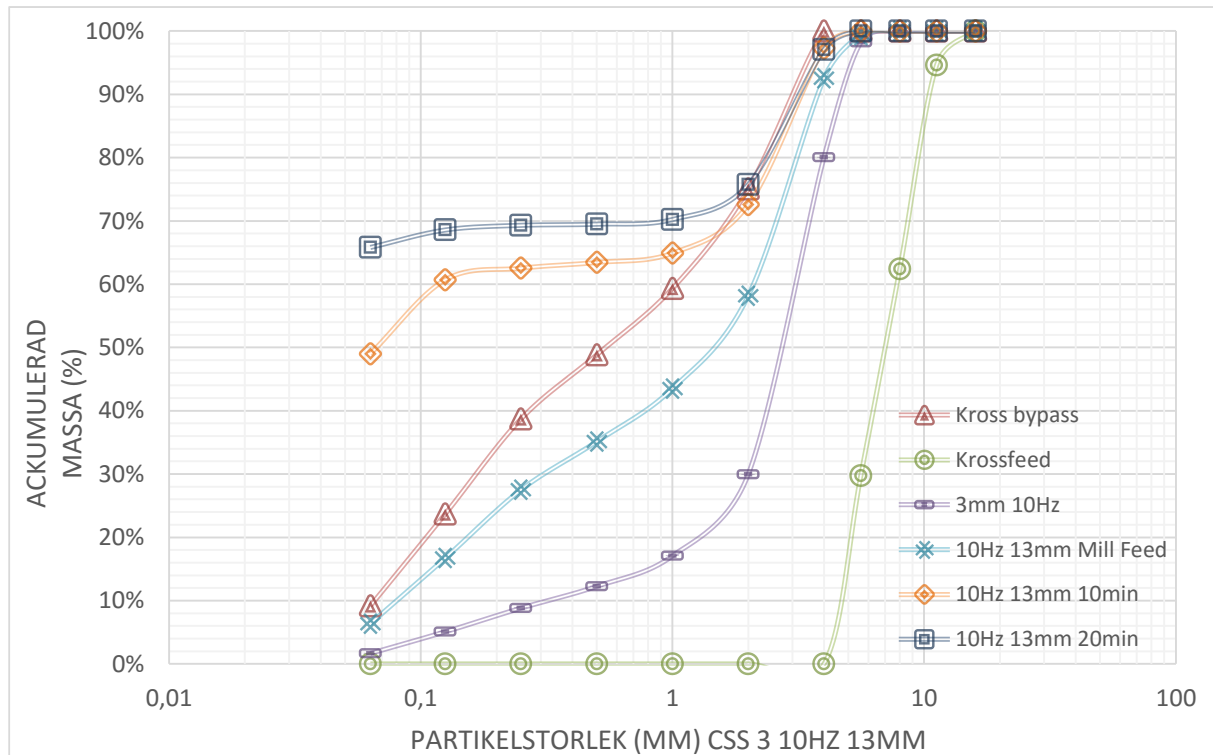
Nedan presenteras 5 olika fall. Det som skiljer de olika processerna åt är antalet produkter, och därmed antalet siktkurvor, från kvarnen då det endast vid ett par tillfällen har gjorts tester på annat än 20 minuter. Det femte fallet är dock unikt då det innehåller stång- och kulkvarnsprocesserna. I Figur 28 visas magnetiten som fåtts av LKAB (siktkurva AA111112) samt hur den delades upp i två delar där den ena passerar krossen (krossfeed) innan malning samtidigt som den andra hamnar direkt i kvarnen (kross bypass). Dessa kurvor gäller för alla processer.



Figur 28. Materialet från tunnan och de olika partikelstorleksfördelningarna till följd av skärmning vid 4 mm.

Fall 1

I Figur 29 nedan visas en process där krossen körts med CSS 3 mm, ett varvtal på 10 Hz och där kvarnen malt med kulstorleken 13 mm.

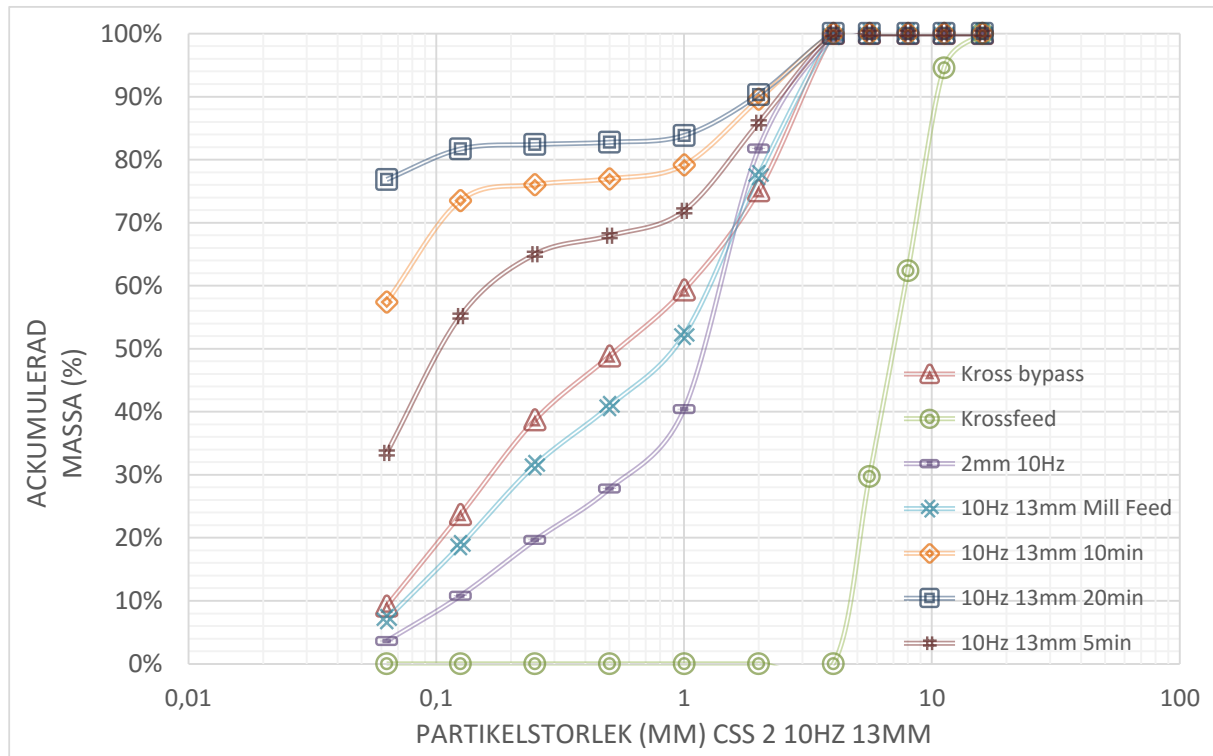


Figur 29. Process 5.1, CSS 3 mm, 10 Hz, 13 mm kulstorlek.

De siktcurvor som visas i Figur 29 är sex stycken. Den första är den för ingående material till krossen (krossfeed), den andra är produkt från krossen (3 mm 10 Hz i detta fall vilket är inställningen hos krossen) och den tredje är den andel av ursprungsmaterialet som går direkt till malning (kross bypass). Ingående material till kvarnen har skapats av 3 mm 10 Hz och kross bypass vilken visas som den fjärde siktcurvan (10 Hz 13 mm Mill feed). Slutligen finns siktcurvorna för två produkter från kvarnen (10 Hz 13 mm 10 min och 10 Hz 13 mm 20 min). Dessa siktcurvor kommer även att finnas i de andra processerna i de olika fallen. Enda skillnaden mellan processerna är att antalet produkter från kvarnen skiljer sig åt då en del tester gjordes i två eller tre steg med avseende på maltid samtidigt som en del tester endast maldes i 20 minuter direkt. I Figur 29 finns två produkter från kvarnen, en för 10 minuter och en för 20 minuter, vilket är samma prov som tagits ur kvarnen efter 10 minuter, siktats, malts på nytt i 10 minuter och sedan siktats igen.

Fall 2

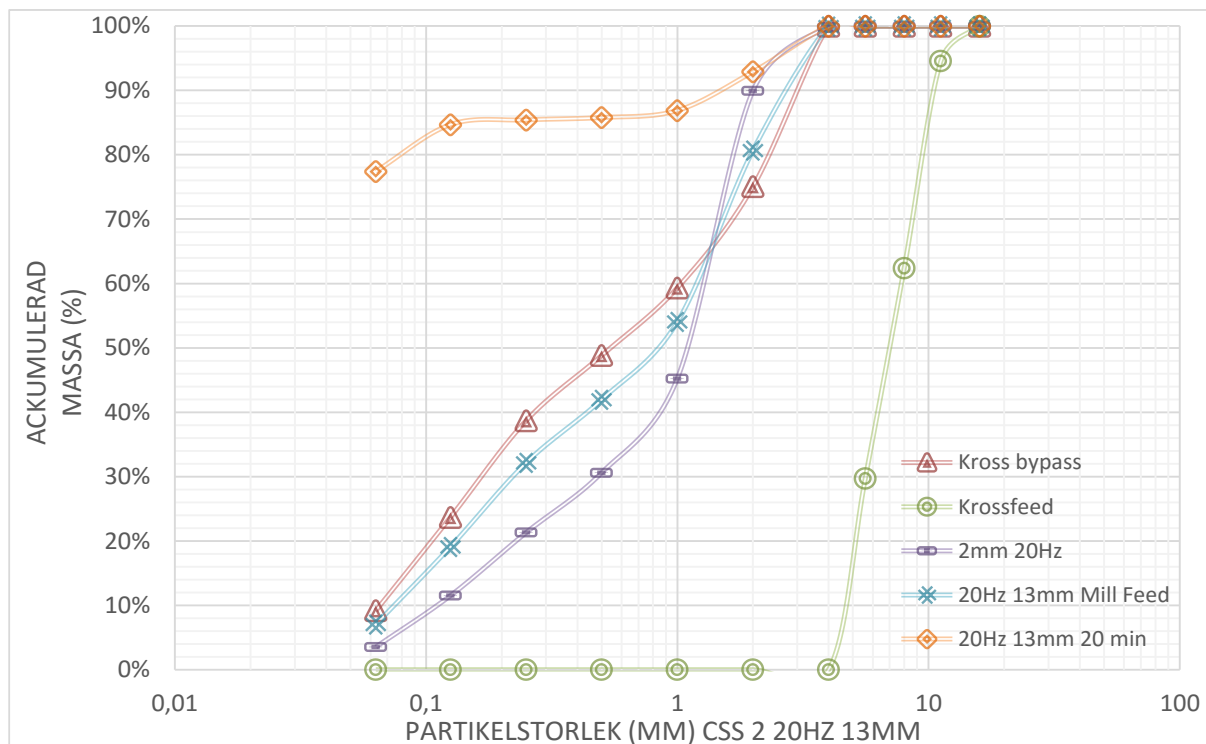
Uppsättningen tester där krossen kördes på CSS 2 mm presenteras nedan. De fyra processerna är en kombination av de ingående parametrarna 10 och 20 Hz i excentervarvtal på konkrossen samt kulstorlekarna 13 och 25 mm i kvarnen. Ett antal fenomen kan observeras som är mer eller mindre generella för samtliga tester.



Figur 30. Process 3.1, CSS 2 mm, 10 Hz, 13 mm kulstorlek,

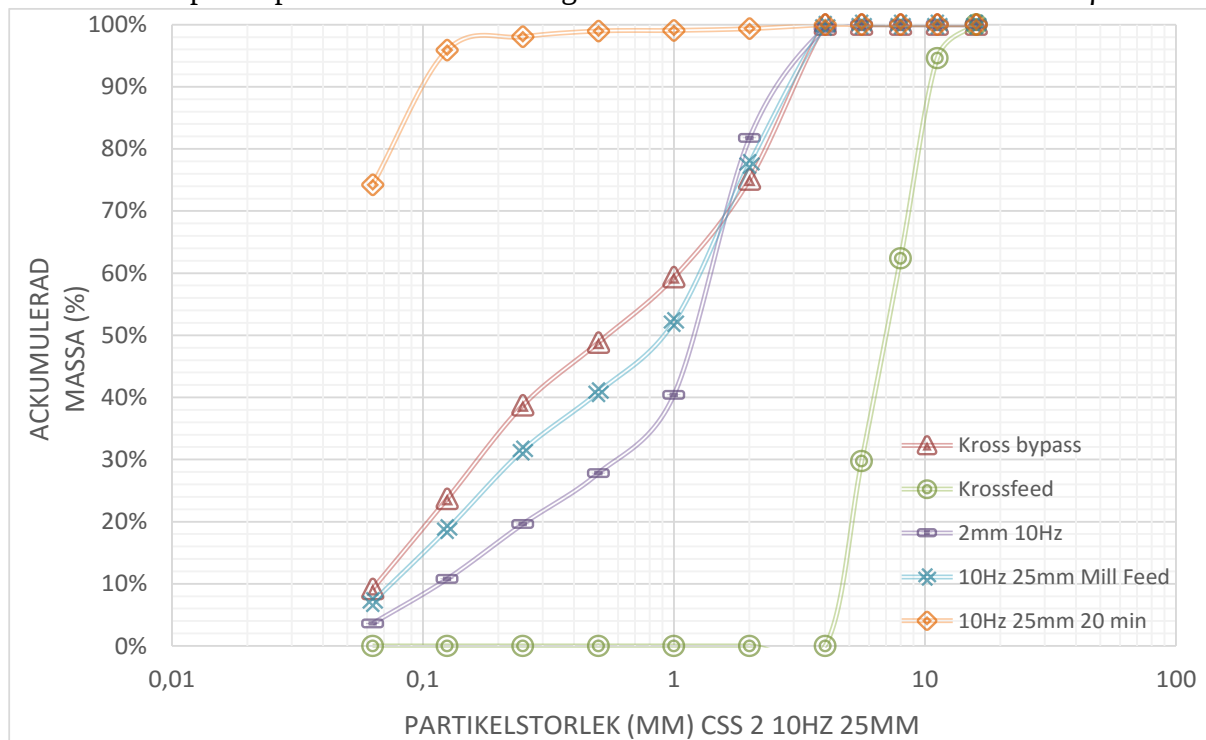
Den första observationen som kan göras är att vid jämförelse av Figur 30 med CSS 3 mm (Figur 29) från fall 1 kan teorin om att siktkurvan flyttas i sidledes vid ändring av CSS bekräftas. I Figur 30 har kurvan tydligt förflyttats åt vänster vilket indikerar en partikelstorleksfördelning med genomgående mindre partiklar. Att minska CSS innebär således att den största partikelstorleken, även kallat top size, minskar.

I Figur 31 kan siktkurvorna från processen som krossades med CSS 2 mm och excentervarvtal på 20 Hz och maldes med 13 mm kulstorlek ses. I jämförelse med Figur 30 skapas mindre material mellan 2 och 4 mm efter krossningen i Figur 31. Siktkurvan har därmed roterats moturs, dock ej kring en pivotpunkt.



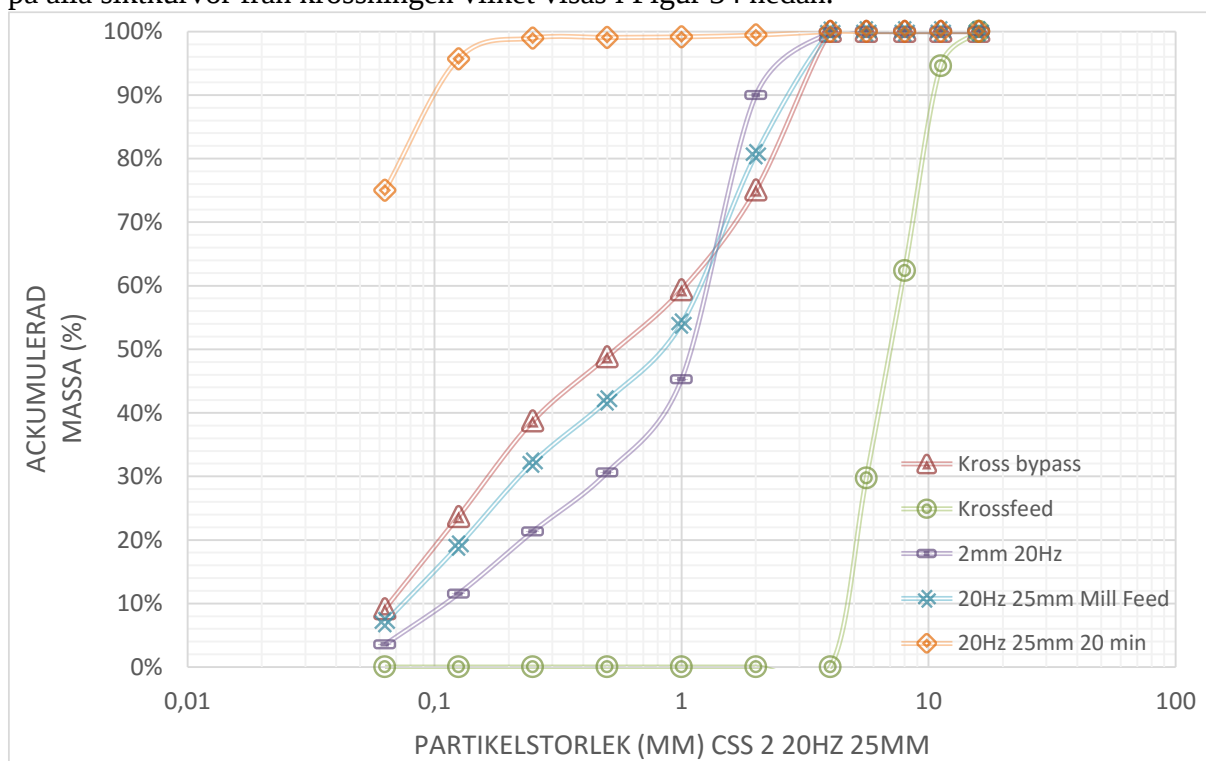
Figur 31. Process 4.1, CSS 2 mm, 20 Hz, 13 mm kulstorlek.

Processen med CSS 2 mm, 10 Hz excentervarvtal samt 25 mm kulstorlek i kvarnen kan ses nedan i Figur 32. Skillnaden mot Figur 30 och Figur 31 är att den större kulstorleken använts vilket kan ses på slutprodukten från malningen som har mer material mindre än 125 μm .

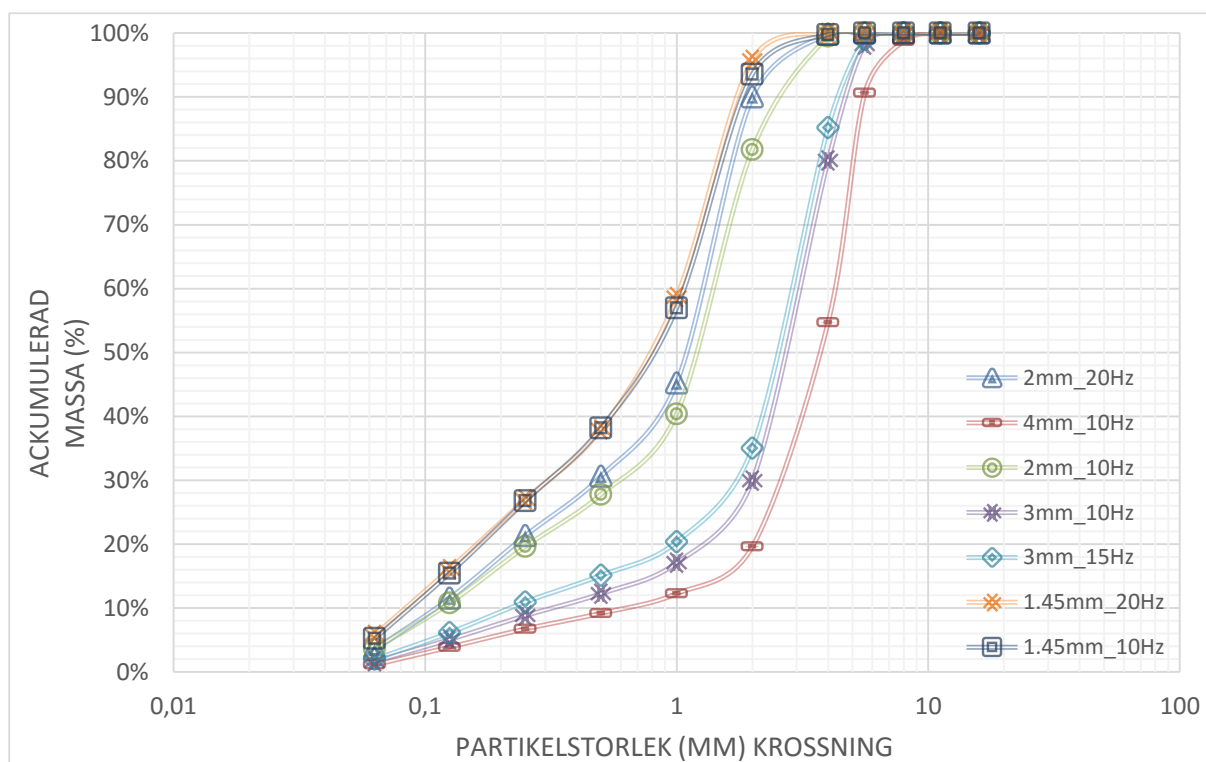


Figur 32. Process 3.2, CSS 2 mm, 10 Hz, 25 mm kulstorlek.

Samma minskning av material mellan 2 och 4 mm som kan observeras i Figur 32 kan ses i process CSS 2 mm, 20 Hz i excentervarvtal med 25 mm kulstorlek i malningen. Processen visas i Figur 33 nedan och skillnaden sker till följd av det ökade krossvarvtalet. Samma fenomen uppstår i båda fallen till följd av att krossinställningen är densamma. Detta fenomen går att se på alla siktkurvor från krossningen vilket visas i Figur 34 nedan.



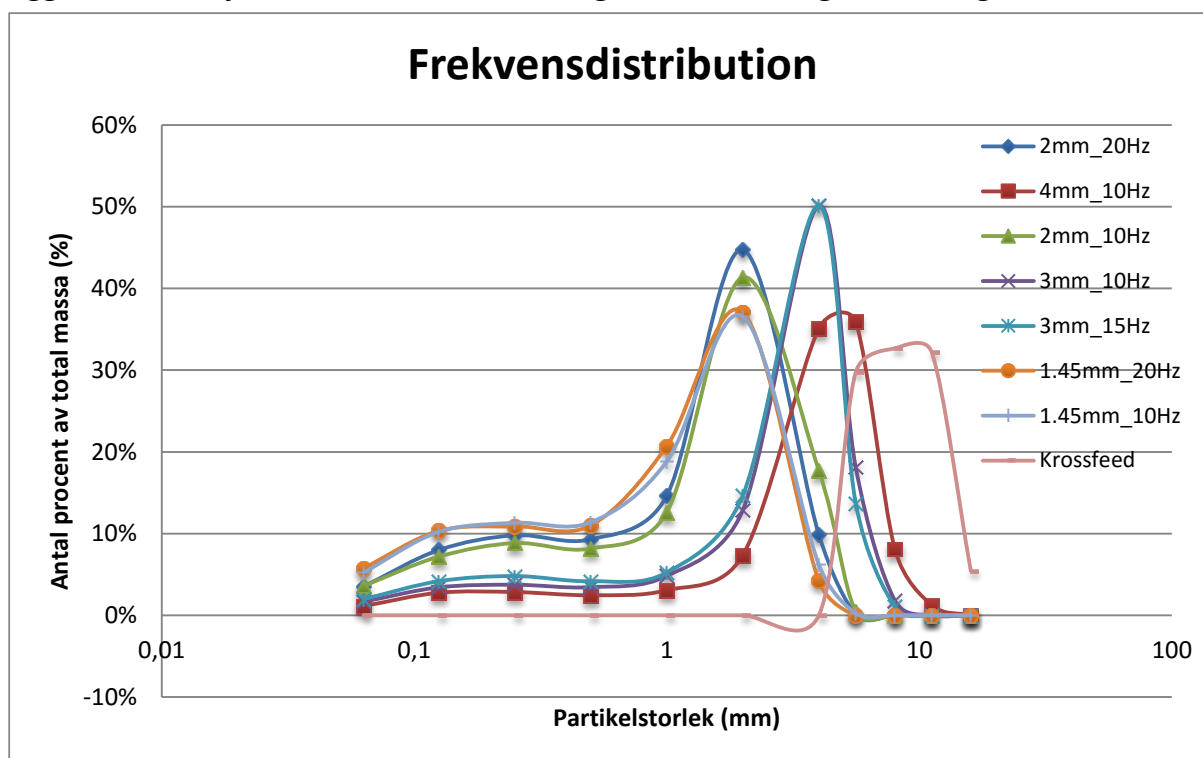
Figur 33. Process 4.2, CSS 2 mm, 20 Hz, 25 mm kulstorlek.



Figur 34. Siktcurvor från samtliga krosstester.

Teorin om att siktkurvan roteras kring en pivotpunkt för olika hastigheter stämmer inte enligt testerna som gjorts. Teorin bygger dock på observationer vid små ökningar och den ökning som skett i dessa tester har varit en fördubbling. Skillnaden på siktkurvorna vid hastighetsfördubblingen syns främst vid de grövre partikelstorlekarna i Figur 34 vilket indikerar att en vridning av kurvan finns, även om den inte sker kring en pivotpunkt. Detta innebär att en mindre mängd top size produceras. Orsaken till detta är att en mindre mängd partiklar hinner falla igenom krossen på OSS på grund av den ökade hastigheten och därmed ökade mängden kompressioner per partikel. Färre partiklar vid den största storleken kommer därmed förekomma när hastigheten ökas samtidigt som andelen små partiklar ändras förhållandevis lite.

De två observationerna gällande CSS och excentervarvtalen illustreras även av diagram över frekvensdistribution efter krosstesterna i Figur 35 nedan. Toppen som indikerar var top size ligger kommer flyttas om CSS ändras samtidigt som den blir lägre om hastigheten ökas.



Figur 35. Frekvensdistribution för samtliga krosstesters produkter.

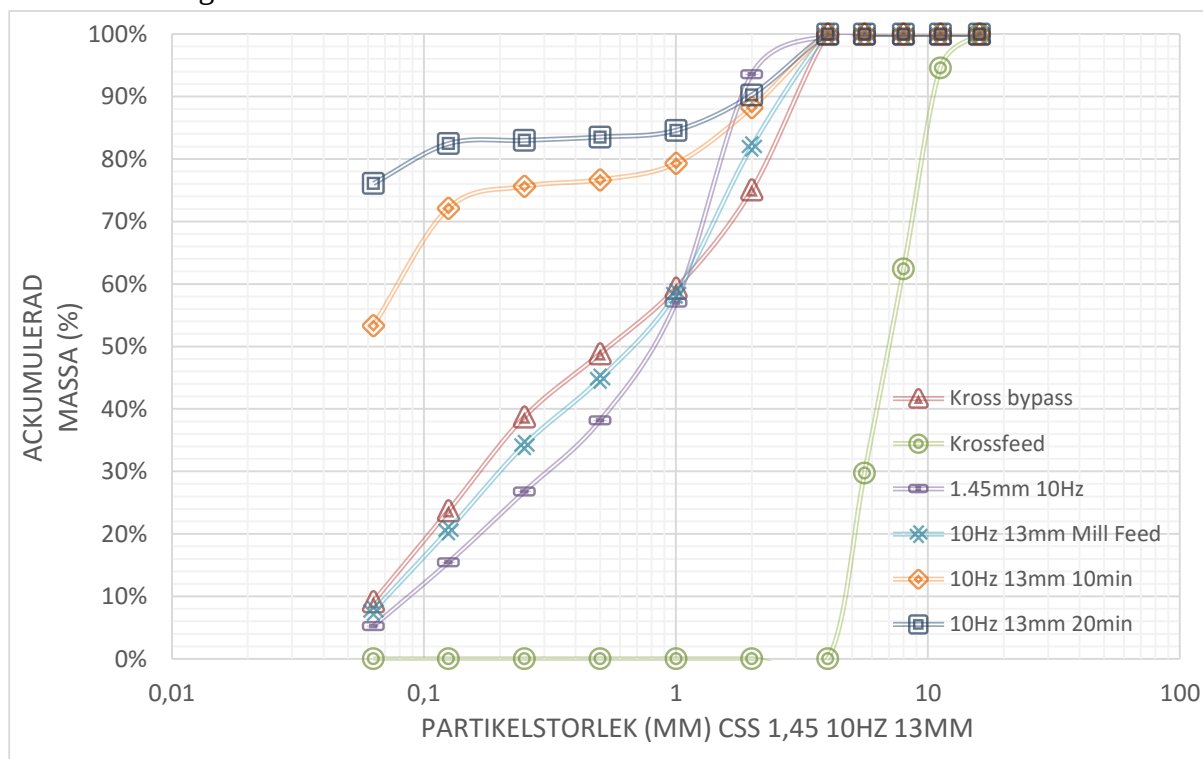
Vidare kan kulstorlekens inverkan observeras. De små kulorna lämnar ett område av top size utan att sönderdela dessa partiklar vilket beror på att mängden energi i kulorna inte räcker för att krossa dessa större partiklar. De partiklar som inte sönderdelas utan passerar genom kvarnen opåverkade kallas för scats. De stora kulorna tar hand om denna partikelstorlek och sönderdelar dem. De små kulorna har dock en större effektivitet vad gäller de finaste partiklarna.

En signifikant skillnad på hur stor del av partiklarna som sönderdelas till att bli mindre än 63 μm jämfört med mindre än 125 μm vid de olika kulstorlekarna kan observeras i skillnaden mellan Figur 30 och Figur 32.

Trots en märkbar skillnad i partikelstorleksfördelningen efter krossning med olika hastighet kan ingen skillnad ses efter malning med 25 mm kulor i 20 minuter utan formen på kurvorna är densamma. Detta tyder på att den extra energin som går åt i krossningen vid det högre varvtalet går till spillo. 20 minuter med 25 mm kulor innebär därmed i detta fall att gränsen för hur fin produkt som kan produceras redan uppnåtts.

Fall 3

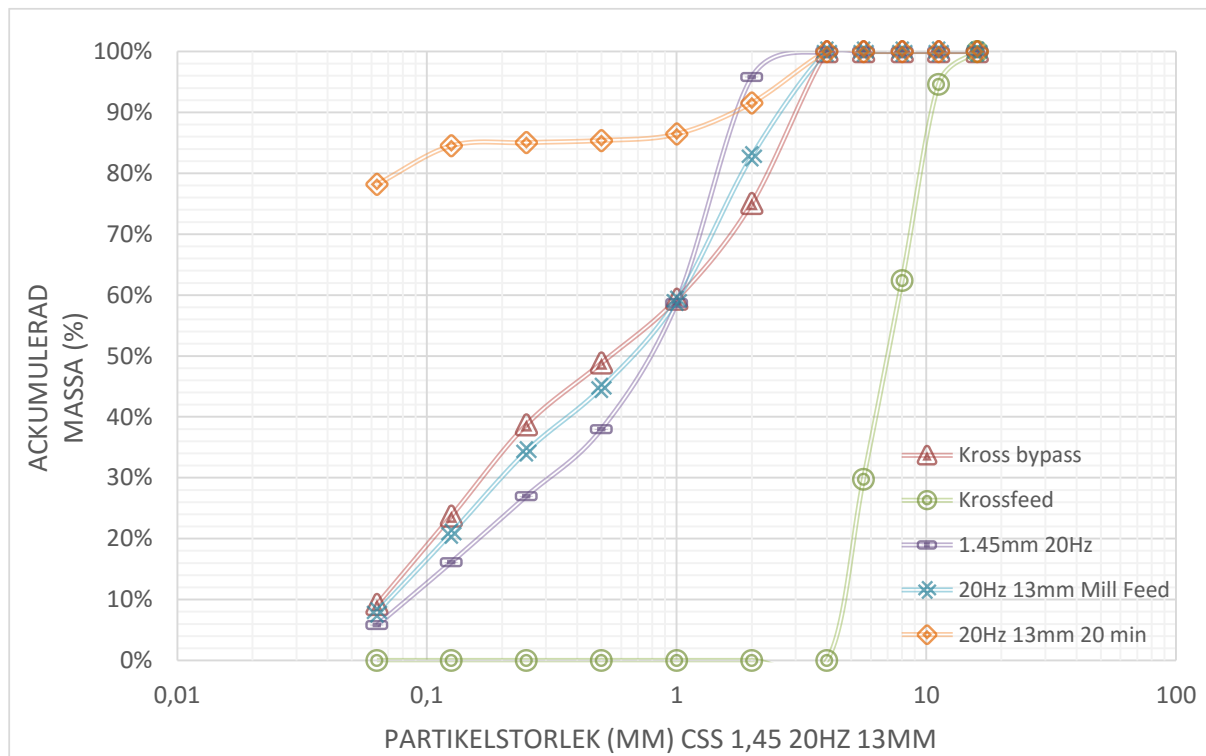
Vid CSS 1,45 mm kan en skillnad till följd av krossens olika hastigheter ses. Mängden grovt material, mellan 2 och 4 mm, minskar när hastigheten ökas på grund av tidigare nämnd vridning. Denna minskning av grova partiklar är mindre vid CSS 1,45 mm i Figur 36 än vid CSS 2 mm i Figur 31.



Figur 36. Process 1.1, CSS 1,45 mm, 10 Hz, 13 mm kulstorlek.

Vid CSS 3 mm (se Figur 29 i Fall 1) är minskningen av grova partiklar också mindre än vid CSS 2 mm vilket tyder på att ett optimum hos krossen som använts vid testerna ligger omkring CSS 2 mm.

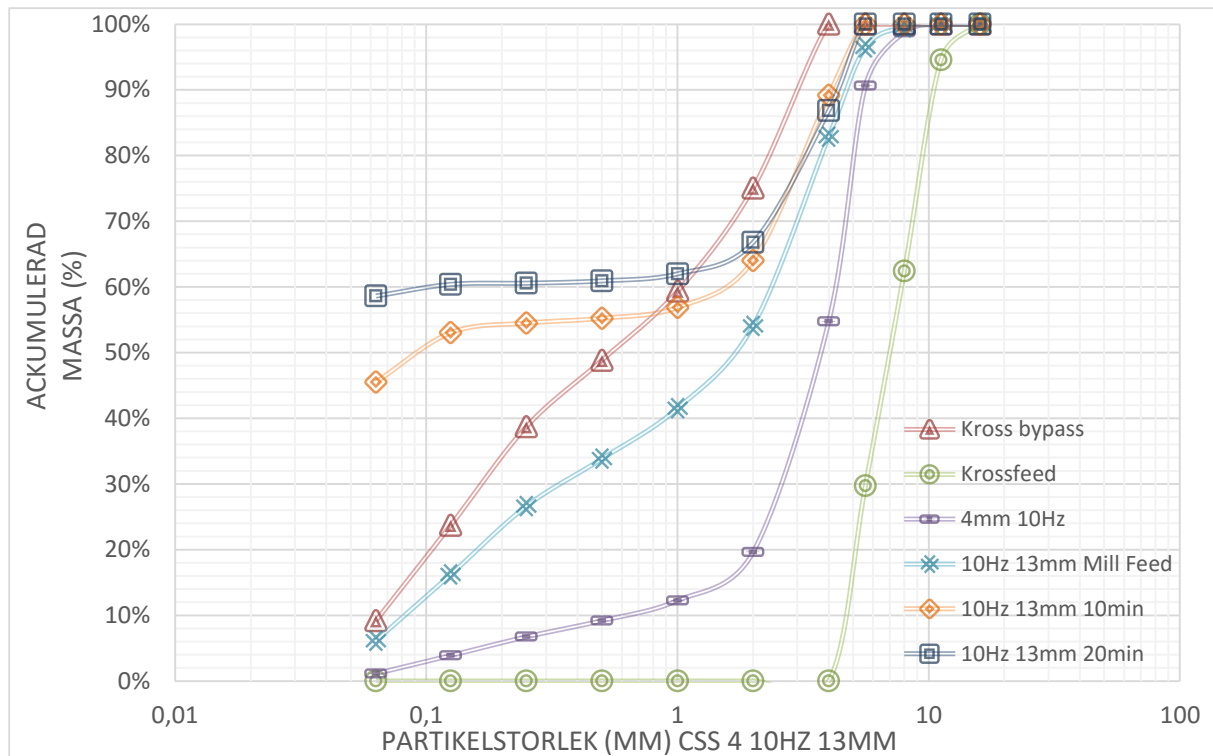
Vid CSS 1,45 mm, i Figur 36 ovan och Figur 37 nedan, syns den största förflyttningen horisontellt av siktkurvan från krossningen på grund av ändringen i CSS vilket innebär att för alla gjorda tester uppnås då den minsta top sizen.



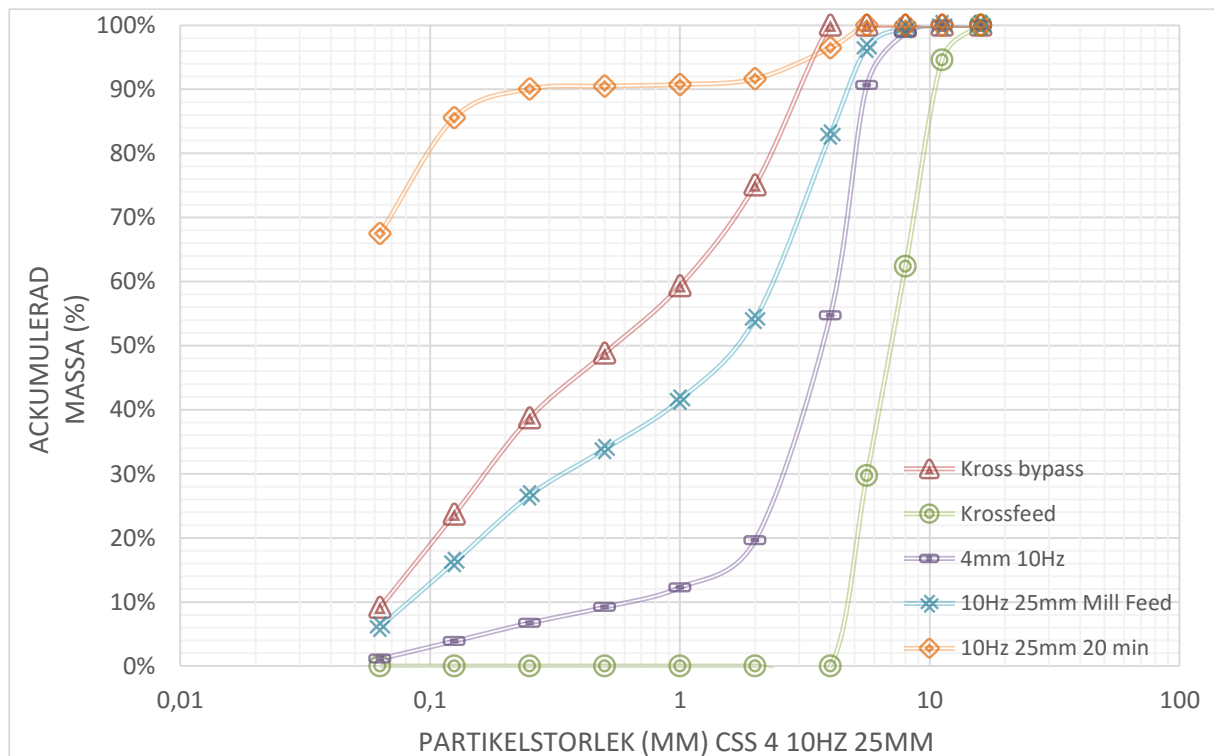
Figur 37. Process 2.1, CSS 1,45 mm, 20 Hz, 13 mm kulstorlek.

Fall 4

Produkterna från malning av material som krossats vid CSS 4 mm visar i Figur 38 och Figur 39 hur de båda kulstorlekarna fungerar vid olika partikelstorlekar. De små kulorna i Figur 38 visar det tidigare observerade problemet med att sönderdela partiklar större än 1,5 mm men vid malning efter denna krossning börjar även de stora kulornas begränsning framträda i Figur 39. Mellan 2 och 4 mm finns scats samtidigt som det inte finns några märkbara mängder partiklar som är mindre än dem. Detta innebär att de stora kulorna har problem att sönderdela partiklar som är grövre än ca 3 mm vilket bekräftar teorin angående olika kulstorlekar effektivitet vid olika partikelstorlekar.



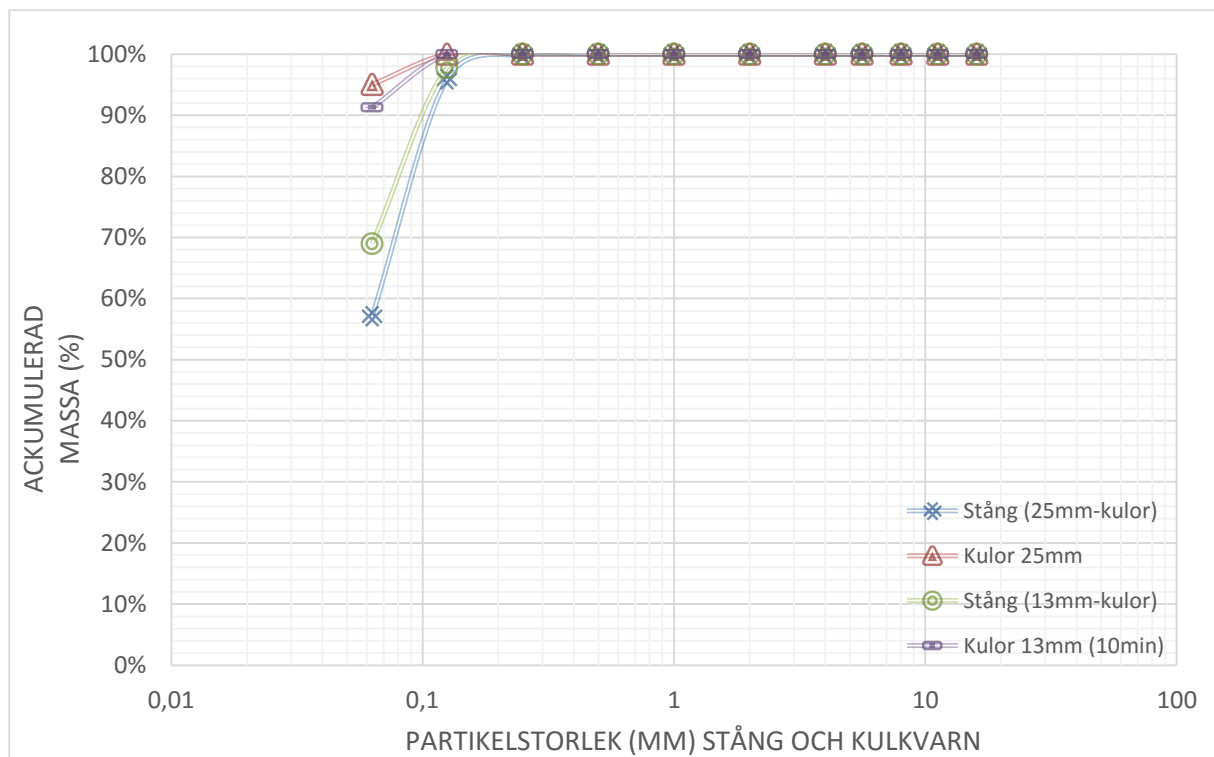
Figur 38. Process 7.1, CSS 4 mm, 10 Hz, 13 mm kulstorlek.



Figur 39. Process 7.2, CSS 4 mm, 10 Hz, 25 mm kulstorlek.

Fall 5

I Figur 40 visas de två uppsättningarna av stång- och kulkvarnar. Först har kvarnen malt materialet med stänger som malmedia följt av kulor med storlek 13 eller 25 mm. I Figur 40 kan observeras att stångkvarnen producerar en hög andel fint material. Eftersom malningen pågick i 20 minuter innebar det en hög energiåtgång jämfört med konkrossens energiförbrukning vilket förklarar den höga storleksreduktionen hos materialet.



Figur 40. Process 8.1 och 8.2, stång- och kulkvarn.

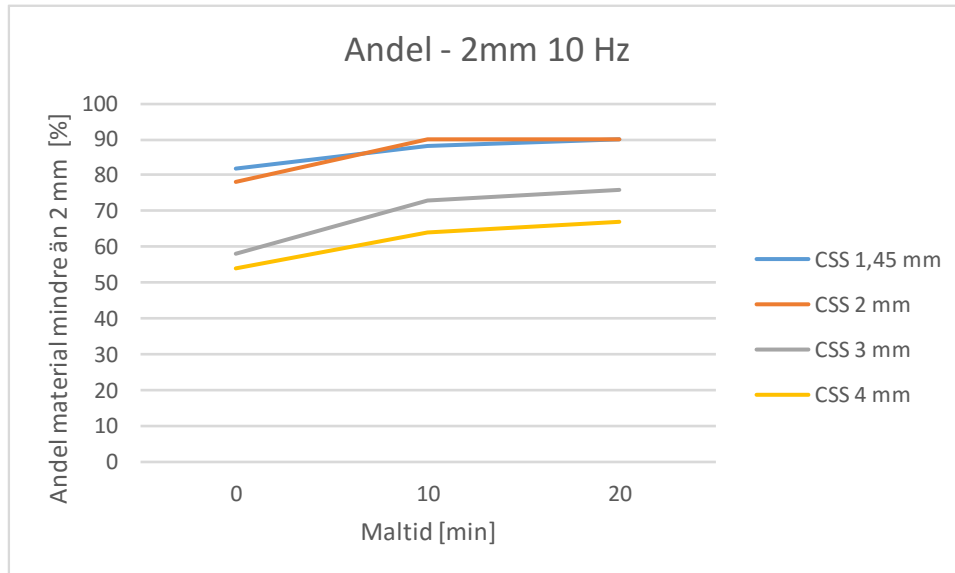
6 Diskussion

Det specifika resultatet från testerna indikerar att det effektivaste sättet att producera färdig produkt, vilket anses vara material mindre än $63\text{ }\mu\text{m}$, är att använda ett lågt excentervarvtal tillsammans med stora kulor i den tumlande kvarnen vilket motsvarar den konventionella metoden. Om hastigheten dubblas i krossen dubblas även energiförbrukningen men ett bättre resultat uppnås inte efter malning med de stora kulorna och energiförbrukningen i kvarnen är ungefär lika stor för de olika testerna då samma maltid använts. Användning av olika CSS påverkar resultatet men ger inte den förändring som skulle bekräfta hypotesen. Hypotesen stämmer därmed inte för de tester som gjorts under projektets gång.

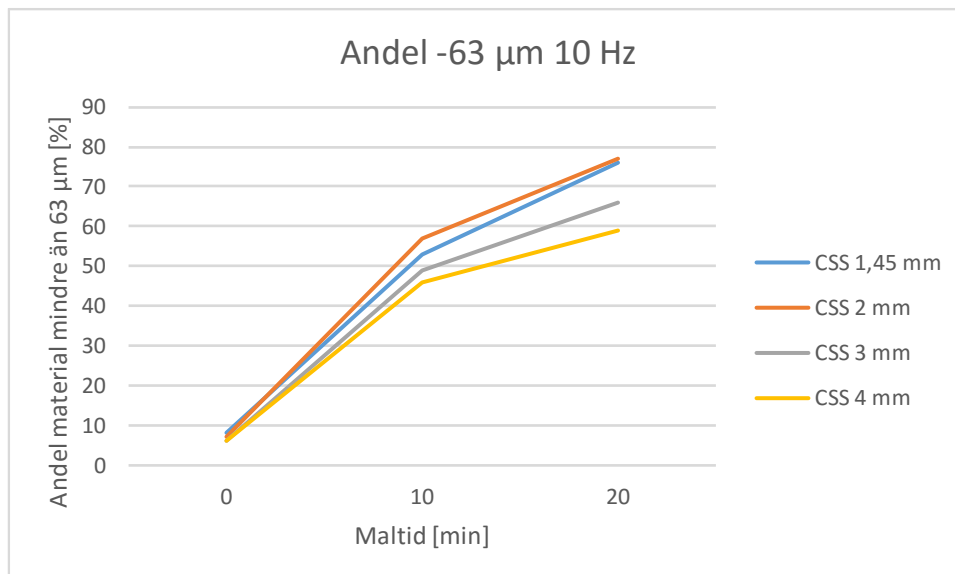
Trots att de tester som gjorts inte gett ett positivt resultat finns det möjligheter att uppnå detta. En del parametrar behöver ändras och dessa ändringar presenteras nedan. De positiva aspekter som presenterats i resultatet sammanbinds tillsammans med nya observationer till en ny utformning av tester som har större chans att bekräfta projektets hypotes.

6.1 Kulstorlekens påverkan

I Figur 41 samt Figur 42 nedan ses andelen av produkten från kvarnförsöken som är 0-2 mm respektive 0-63 μm som en funktion av maltiden för samtliga prövade CSS. Samtliga kvarntester är med 13 mm kulor samt ett excentervarvtal på krossen på 10 Hz.



Figur 41. Andel material mindre än 2 mm efter malning med 13 mm stora kulor.

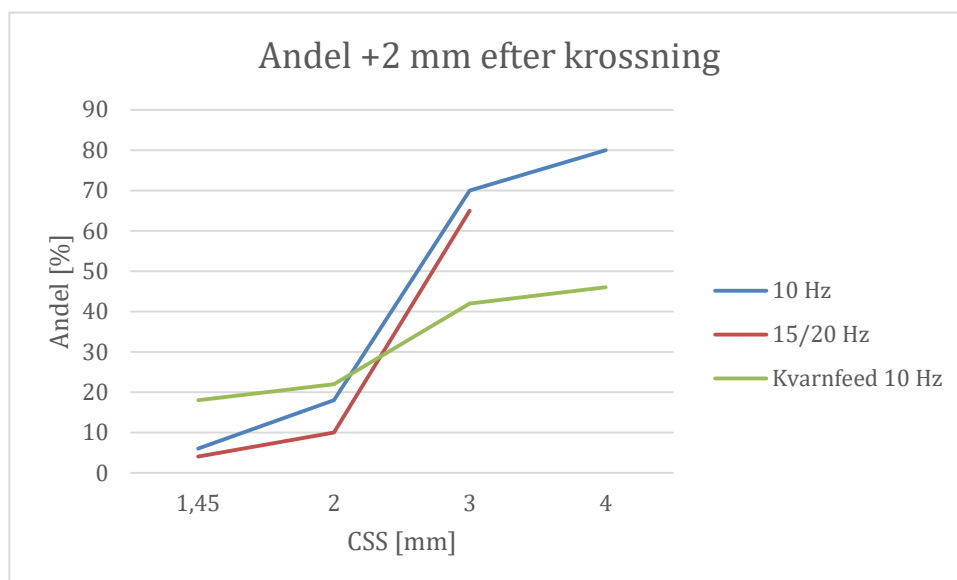


Figur 42. Andel material mindre än 63 μm efter malning med 13 mm stora kulor.

Andelen 0-2 mm ökar marginellt genom hela malprocessen oavsett CSS på krossen men andelen 0-63 μm ökar snabbare. Ökningarna har dock samma avtagande form. Detta tyder på att kulorna med diameter 13 mm är som effektivast för partikelstorlekar mindre än 1,5-2 mm och därmed ej reducerar större partikelstorlekar i någon större utsträckning vilket överensstämmer med tidigare studier (de Carvalho & Tavares, 2013).

6.2 Påverkan av CSS och hastighetsändring

I Figur 43 ses andelen av den krossade produkten som är +2 mm samt feeden till kvarnförsöken som en funktion av CSS. Endast kvarnförsöken med ett excentervarvtal på krossen på 10 Hz är redovisat. Det är också tydligt att CSS 1,45 eller 2 mm är det bästa för att få ut så mycket material mindre än 2 mm som möjligt genom hastighetsökningen. Noteras kan även att det produceras mer material som är mindre än 2 mm om excentervarvtalet hos krossen dubblas eller, som i fallet med CSS 3 mm, ökas med 50 %.



Figur 43. Andel material som är större än 2 mm efter krossning beroende på krossens varvtal.

I Tabell 7 nedan, som visar förbrukad energi för att producera ett ton material som är mindre än 2 mm, syns en knapp dubbling av energiförbrukningen när excentervarvtalet dubblas. Andelen 0-2 mm ändras då med exempelvis 8 procentenheter vid CSS 2 mm vilket är en förbättring som är missvisande då den faktiska mängden material minskar med 45 %. Denna förbättring behandlas nedan under den nya testutformningen.

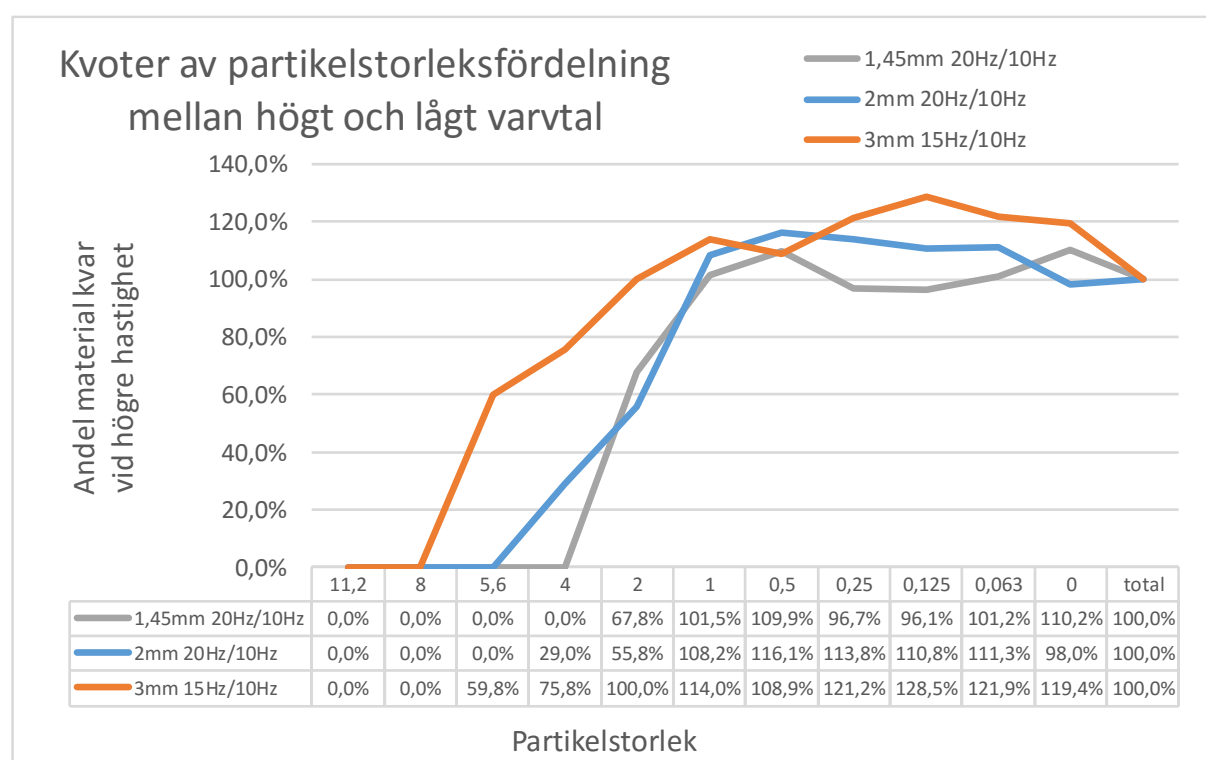
Tabell 7. Mängden energi som använts per massenhet för att producera material mindre än 2 mm vid de olika krosstesterna samt andelen material mindre än 2 mm.

CSS [mm]	Excentervarvtal [Hz]	W _{-2mm} [kWh/t]	Andel material mindre än 2 mm [%]
1.45	10	388.8	94
1.45	20	894.7	96
2	10	430.7	82
2	20	760.0	90
3	10	646.9	30
3	15	1482.2	35
4	10	1258.0	20

Kombineras nu kunskapen från Figur 41, Figur 42, Figur 43 och Tabell 7 kan en ny hypotes formuleras. Som tidigare nämnts är kulorna med diameter 13 mm effektivast för partikelstorlekar mindre än 2 mm. Om kvarnfeeden då kan vara av sådan storleksfördelning att allt material är mindre än 2 mm kommer 85 % av den att malas direkt till slutprodukt och således inte behöva recirkuleras genom kvarnen. Följande hypotes beskriver ett tillvägagångssätt för att uppnå syftet hos projektet genom att minska mängden material större än 2 mm till malning.

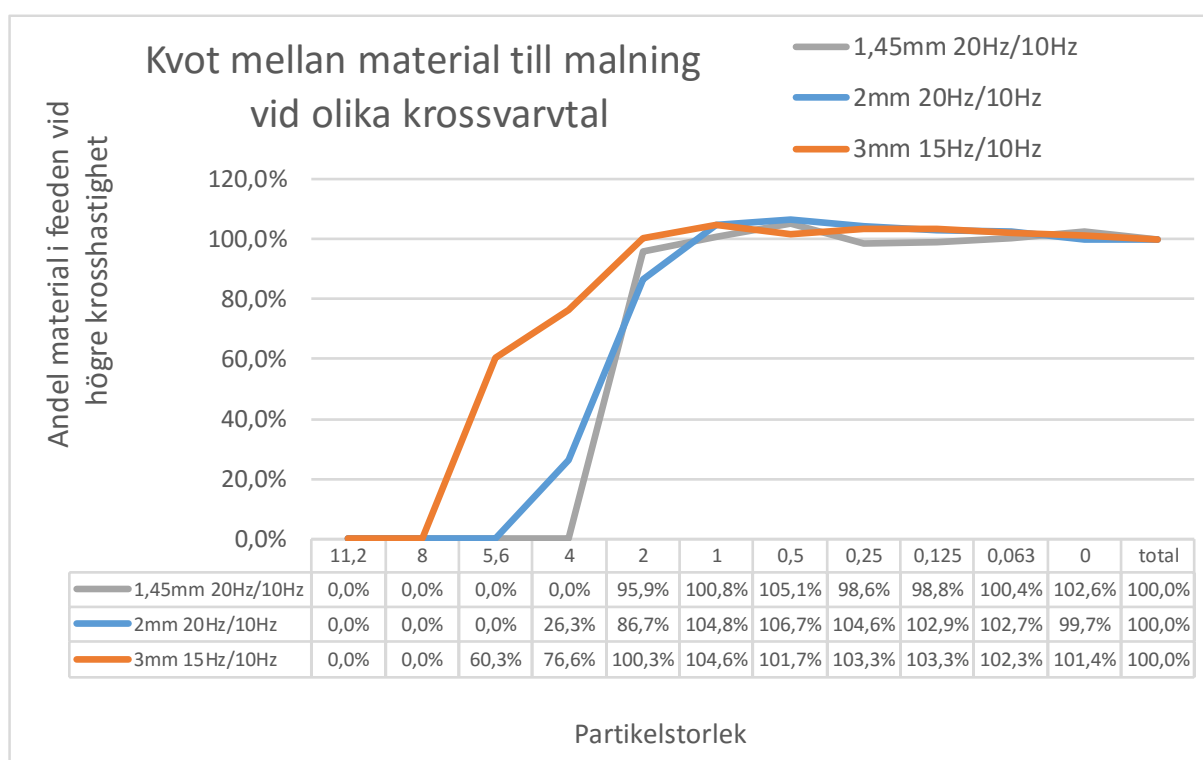
Eftersom en förminskning i mängd grovt material förekommer vid kraftigt ökat excentervarvtal kan detta utnyttjas för att få en mer energieffektiv kross- och malprocess. I de tester som gjorts för att få nuvarande resultat skärmades ingångsmaterialet vid 4 mm. Detta innebär att en andel material mindre än 4 mm och därmed en andel partiklar i storleksordningen 2 till 4 mm kommer skickas direkt till malning. I krossen produceras vid de lägre måtten på CSS en mindre andel material i denna storleksordning än vad som passerar förbi. Den nuvarande processen lägger dock ihop dessa delar vilket ger att mängden partiklar som är större än 2 mm blir signifikant.

För att kunna effektivisera hela processen har det klargjorts av resultaten att ett lägre CSS behöver användas i krossen för att möjliggöra att en mindre kulstorlek kan användas i kvarnen. De mindre kulorna är effektivare på att producera material mindre än 63 µm jämfört med de större kulorna. Dock är de mindre kulorna, som tidigare nämnts, inte så effektiva vid större partikelstorlekar ovanför en viss gräns och i detta fall ligger denna gräns runt 1,5 mm. Detta fenomen kan observeras i alla presenterade siktkurvor då 13 mm kulor använts i kvarnen i form av att material finns kvar ovanför ca 1,5 mm storlek. För att en mindre andel material grövre än denna storlek ska skickas till kvarnen kan krossen köras på ett högre varvtal. Jämförs partikelstorlekarna mellan den låga och den höga hastigheten kan denna skillnad observeras genom att dela partikelstorleksfördelningarna med varandra. Kvoten som fås för varje partikelstorlek redovisas i Figur 44. Linjerna visar därmed i procent hur mycket material som återfinns vid varje partikelstorlek efter hastighetsökningen. På framförallt CSS 2 mm finns en skillnad där endast 55 % av materialet mellan 2 och 4 mm kvarstår efter hastighetsökningen.



Figur 44. Andel material kvar vid olika partikelstorlekar efter användning av högre hastighet vid krossning.

Denna förbättring av att köra krossen på ett högre varvtal sätts delvis ur spel då allt material mindre än 4 mm går förbi krossen. Den andel material mellan 2 och 4 mm som går direkt till malning kommer delvis vara kvar efter malningen i form av scats till följd av de små kulornas ineffektivitet på denna partikelstorlek. Skulle då skärmningen vid 4 mm ske vid 2 mm istället skulle produkten ur kvarnen se bättre ut. Fenomenet går att se efter malning med 25 mm kulor på material som krossats vid CSS 2 och 4 mm i krossen (Figur 32 och Figur 40) där top size reduceras till följd av ett mindre CSS. Det leder till att nästan all produkt blir mindre än 250 μm , vid användning av CSS 2 mm, istället för att det finns top size kring 4-5 mm, som är fallet vid CSS 4 mm. Skillnaden mellan dessa fall är olika CSS och därmed olika top size in i kvarnen. I Figur 45 nedan syns skillnaden mellan materialet som går till kvarnen efter de olika hastigheterna i krossen. Figuren är en kvot av två partikelstorleksfördelningar precis som Figur 44. Skillnaden i den faktiska feeden är inte lika stor som den efter krossningen i Figur 44 vilket innebär att förbättringen från krossningen får en liten inverkan på det totala resultatet.

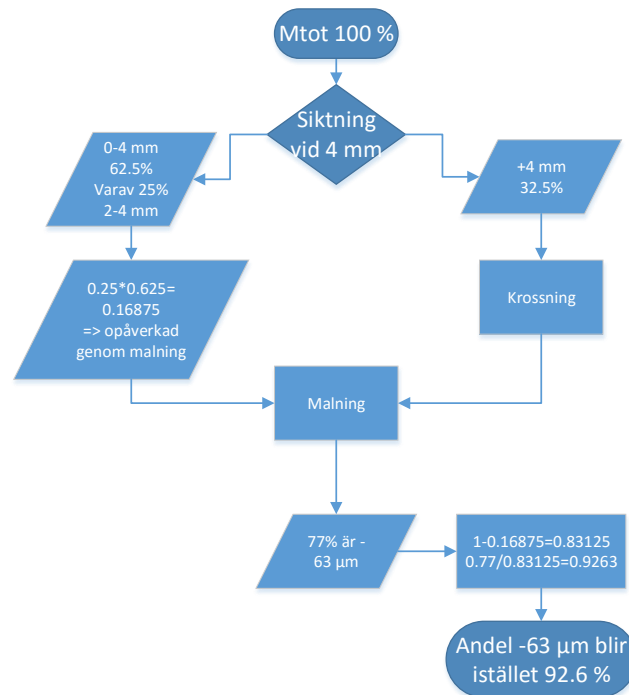


Figur 45. Andel material av olika partikelstorlekar i feeden till malning vid olika hastigheter i krossen.

Samma typ av minskning av top size går att skapa genom att skärma vid 2 mm. Vid krossning med CSS 2 mm skulle teoretiskt all produkt kunna hamna under 125 μm med en stor del under 63 μm efter malning med små kulor eftersom en liten reduktion av de stora partiklar som ändå skulle hamna i kvarnen sker med dessa mindre kulor.

Denna förbättring kräver en fördubbling av hastigheten hos krossen vilket också är en fördubbling av energin per massenhet vilket visades i Tabell 7. Skillnaden i andelen 0-2 mm är 8 procentenheter enligt siktkurvorna men, som Figur 45 visar, kommer andelen material mellan 2 och 4 mm därmed minska med 45 %. Förbättringen innebär därmed att en halvering av maltiden är möjlig vilket också är en halvering av energin förbrukad i kvarnen. Denna halvering görs möjlig när mängden top size, eller material mellan 2 och 4 mm, minskar med så mycket som 45 %. Eftersom den totala energiåtgången i kvarnen är många gånger högre än den i krossen innebär detta utbyte att den totala energiåtgången går att minska.

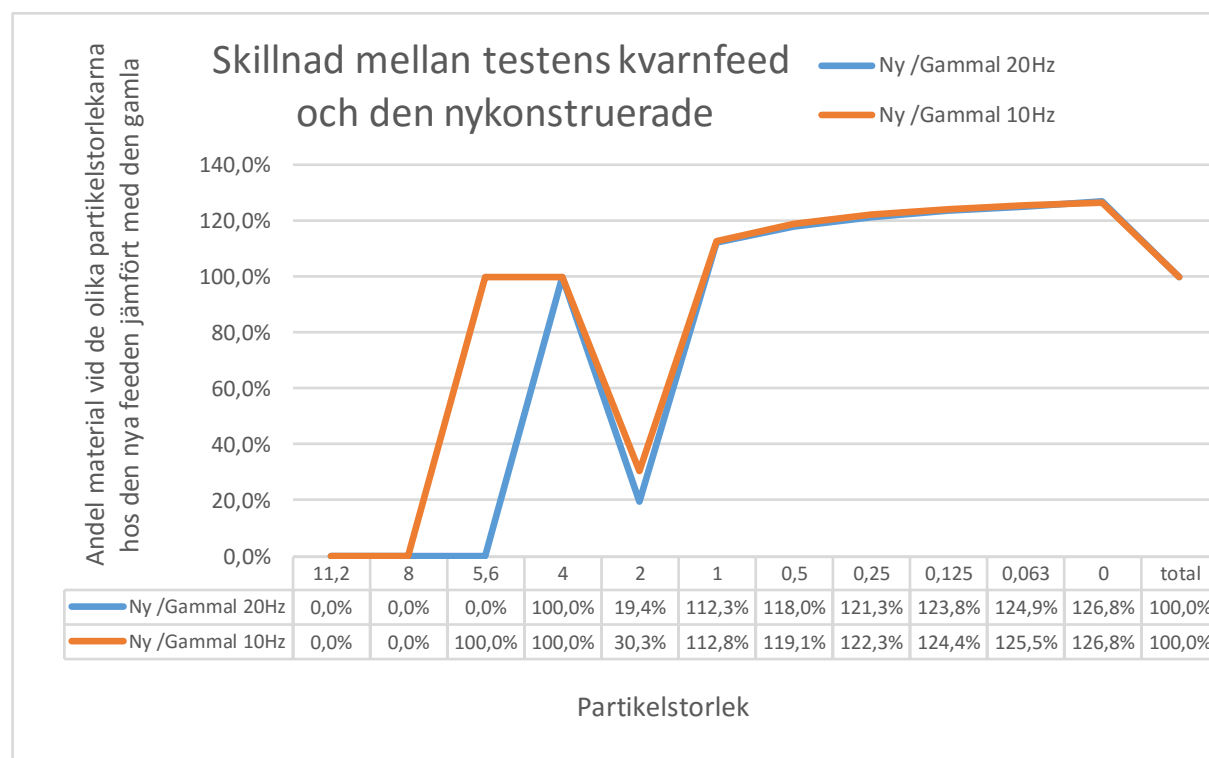
En uträkning på hur stor del av produkten som hade varit slutprodukt, eller mindre än 63 µm, om produkten i form av scats, vilket är det material som inte påverkas i kvarnen, reduceras genom att skärma vid rätt partikelstorlek kan göras genom att beräkna en massbalans vilket kan ses i Figur 46. Produkten från krossen antas vara av samma partikelstorleksfördelning även om allt material mellan 2 och 4 mm skulle krossas istället.



Figur 46. Massbalans över hur mycket slutprodukt som kunnat produceras om all scats kunnat elimineras. Resultatet blir samma för båda hastigheterna.

Detta sätt att räkna är dock missvisande eftersom antagandet görs att mängden material mellan 2 och 4 mm passerar opåverkat genom kvarnen. Så är inte fallet utan denna fraktion reduceras också. Att resultatet blir samma för de båda hastigheterna är också missvisande då den faktiska mängden av denna fraktion som kommer in i kvarnen är 45 % mindre vid den högre hastigheten. Andelen produkt mindre än 125 µm är också 3 % procentenheter högre för malning efter den högre krosshastigheten. Ett annat sätt att uppskatta och resonera kring mängden slutprodukt efter att skärmning vid rätt partikelstorlek gjorts är att anta att reduktionen av material mellan 2 och 4 mm skulle vara samma oavsett mängd.

Skulle det material som passerar krossningen genom att den skärmas vid 4 mm istället skärmas vid 2 mm kommer en mindre del material mellan 2 och 4 mm finnas i feeden in i kvarnen. Detta visas enligt Figur 47 genom en kvot mellan den partikelstorleksfördelning som faktiskt använts och den som skulle tagits fram med hjälp av att skärma materialet vid 2 mm. Endast 20 % av den mängd som fanns vid testerna skulle då hamna i kvarnen om krossning sker vid CSS 2 mm och 20 Hz och produkten från krossning antas vara samma trots att minsta partiklar på 2 mm skulle komma in i krossen. Med samma förhållanden för krossning vid den lägre hastigheten skulle 30 % av mängden 2 till 4 mm skickas till kvarnen vilket är en mindre förbättring än vid den höga hastigheten.



Figur 47. Andel material hos den nya feeden jämfört med den gamla för den låga och den höga krosshastigheten.

Vid malning med 13 mm stora kulor i 20 minuter, innebär den ändrade skärmningen att istället för 7 % scats efter malning, som vid det utförda testet, kommer det finnas ca 1,4 % kvar om samma reduktion antas ske i kvarnen. Det skulle innebära att mängden slutprodukt producerad av processen ökas från 77 % till 82,6 % då siktkurvan från malningen förflyttas 5,6 procentenheter upp. Hänsyn har då inte tagits till att en del av materialet mellan 2 och 4 mm från kvarnfeeden hamnar mellan 1 och 2 mm efter malning. I verkligheten skulle reduceringen av material mellan 2 och 4 mm in i kvarnen även ge en minskning av produkten mellan 1 och 2 mm. Det skulle ge ett bättre resultat än 82,6 % av produkten som slutprodukt.

Skulle den genomförda skärmningen å andra sidan behållas måste 25 mm stora kulor användas. Mängden slutprodukt hamnar då på 75 %. Det innebär att hastighetsdubblingen i konkrossen kan resultera i en ökning av färdig produkt med mellan 7,6 (5,6 procentenheter förbättring och 2 procentenheters skillnad mellan 75 och 77 %) och 17,5 procentenheter, där den större siffran ges av massbalansen tidigare.

Verkningsgraden hos tumlande kvarnar ligger runt 20 % (Evertsson M. C., 2016). Bonds ekvation räknar fram mängden energi som använts effektivt för att sönderdela partiklarna och vid en jämförelse med hur mycket energi som, enligt uppskattning, faktiskt förbrukats i den tumlande kvarnen som användes (beroende på motorstorleken), har en verkningsgrad på runt 5 % visats. För att räkna ut en procentuell förbättring av processens verkningsgrad efter hastighetsökningen i krossen kommer dock verkningsgraden 20 % användas då detta ger en konservativ. Ett antagande om samma energiförbrukning i kvarnen vid lika lång maltid görs och därför används energiförbrukningen från malning med de stora kulorna då denna är större och därför också bidrar till ett mer konservativt resultat vid effektförändringar hos krossen.

Energiförbrukning för att producera ett ton slutprodukt, vilket betraktas som material mindre än 63 μm , beräknas nedan för processen med krossning vid CSS 2 mm och varvtal 10 Hz samt malning i 20 minuter med 25 mm stora kulor. Denna process utgör referens för att beräkna effektivisering med hjälp av ett högre varvtal i krossen. Energin förbrukad i krossen är 1,241 kWh/t, i malningen 52,293 kWh/t och andelen slutprodukt är 74 %. Endast 32,5 % av materialet krossas. Det ger:

$$W_{-63 \mu\text{m}} = \frac{0.325 * 1.241 + 52.293}{0.74} = 71.211 \text{ kWh/t}$$

Samma beräkning utförs nedan för processen CSS 2 mm och varvtal 20 Hz i krossen tillsammans med malning i 20 minuter med 13 mm kulstorlek. Energin förbrukad i krossen vid denna inställning är 2,302 kWh/t, effekten vid malning antas samma som ovan och mängden slutprodukt hamnar på mellan 79,6 och 91,5 % efter en förbättring av processen som reducerar scats efter malning. Mängden material som passerar krossen blir nu istället 52,8 %. Det ger två uträkningar vilka tillsammans bildar ett intervall:

$$W_{-63 \mu\text{m}} = \frac{0.528 * 2.302 + 52.293}{0.796} = 67.222 \text{ kWh/t}$$

$$W_{-63 \mu\text{m}} = \frac{0.528 * 2.302 + 52.293}{0.915} = 58.479 \text{ kWh/t}$$

Detta ger ett intervall på en minskning i energiförbrukningen mellan 5,6 och 17,9 %.

Metoden för att förbättra den totala processen blir sammanfattningsvis därför att minska CSS för att möjliggöra mindre kulstorlekar eller med andra ord minska den faktiska top sizen. Sedan körs krossen på ett dubblerat eller ännu högre varvtal vilket minskar mängden partiklar som är i storleksordningen av top size vilket gör att de små kulorna blir effektivare. Dessa två steg tillsammans ger en bättre produkt per använd energi till följd av en hastighetsökning i krossen.

6.3 Felkällor

Nedan redogörs felkällorna som kan ha påverkat resultatet i projektet. Avsnittet är indelat i fyra underrubriker, Felkällor under siktning och delning, Felkällor hos kross och kvarn, Felkällor av mätvärden samt Felkällor vid användning av Bonds teori.

6.3.1 Felkällor under siktning och delning

De använda siktdäcken har varit använda sedan tidigare, vilket medför en risk i att de kan ha varit slitna. Dessutom har de inte kalibrerats sedan inköp. Det kan ha lett till fel i partikelstorleksfördelningarna vid siktning. Detta då icke kalibrerade och slitna siktdäck påverkar hur de olika partiklarna faller igenom. Då siktningen ibland bestod av manuellt arbete utfört av flera olika personer, måste hänsyn tas till den mänskliga faktorn i form av handhavandefel och olika sätt att skaka siktdäcken vid skärmning. Siktningen har även utförts med två olika siktdäck på två olika ställen, Chalmers Rock Processing Systems laboratorium och laboratoriet på Bergskolan i Filipstad. Skillnaden i utrustningar och slitage på utrustning kan också klassas som en felkälla, särskilt vad gäller de fina däckerna då dessa är mer känsliga för slitage vid användning.

I samband med detta kan felkällor till följd av ojämn fördelning under delningen nämnas. Denna felkälla är dock minimal då framtagna siktkurvor har visat på en jämn fördelning. Det har även förekommit att en liten mängd material har missat delaren vid nedhållning. Denna mängd är dock liten och försumbar. Dessa två felkällor går att minimera genom införskaffning av en delare där den övre kammaren sitter fast med delarenheten. En delare av denna typ fanns på Bergsskolan i Filipstad.

Sammanfattningsvis resulterar detta i iakttagelsen att testerna inte har delats och siktats på ett felfritt sätt, dock är denna felkälla liten i jämförelse med andra felkällor.

6.3.2 Felkällor hos kross och kvarn

Enligt uppgifter från BSc Marcus Johansson⁶ förspändes lagren som krossen är utrustad med under kandidatarbetet som utfördes förra året hos en professionell verkstad. Lagren är enligt hans uppgifter för hårt förspända för de hastigheter som de har körts med. Det påverkar krossens tomgångseffekt vid ökat varvtal vilket i sin tur påverkar vilken energi krossen drar under genomförda tester.

Under krossningen har det funnits en liten glipa mellan uppsamlingsenhet och kross där material har kunnat sippra ut och således inte samlas upp. Denna mängd har dock varit försumbar och det material som slipper ut är dessutom så fint att det påverkar resultatet med negativa värden då målet är att få så fint material som möjligt. Det slutgiltiga resultatet blir därmed lite sämre än verkligheten, således blir resultatet robustare och mer konservativt. Samma typ av felkälla har rått inne i uppsamlingsenheten då en liten mängd material kunnat missa kärlet som det ska samlas upp i. Av nyss nämnda anledning kan dock denna felkälla anses vara marginell och inte ha någon större inverkan på resultatet.

⁶ Marcus Johansson, handledare för projektet.

När det kommer till malningsprocessen kan den viktigaste felkällan vara att material fastnar i kulorna och att mängden material som har malts därmed inte blir lika med den mängd som lades in i kvarnen. Då blandas även olika partikelstorlekar, till följd av att partiklar från tidigare tester blandas med nästa test. Detta handlar om små mängder då malkulorna alltid separerades ur kvarnen efter varje test. En annan faktor som kan ha påverkat testerna som utfördes med kuldiameter 13 mm är att kulorna från början var oanvända och ytbehandlade. Under tiden och efter flera försök kan kulorna ha slitits och påverkat malningen olika mycket. Då relativt få tester utfördes upptäcktes inga slitningar på kulorna, men detta är omöjligt att bedöma med bara ögonmått.

6.3.3 Felkällor av mätvärden

Vissa kablar har inte varit optimalt skärmade, särskilt de inom elskåpet. Detta då de bara är lindade i aluminiumfolie utan att folien är jordad. Inte heller den kopplade usb-kabeln till NI modulerna är skärmad då det antagits att detta inte har stor inverkan på mätvärdena. Denna faktors inverkan är inte mätbar på ett enkelt sätt, men är värd att beakta.

En annan relevant felkälla är att det faktiska varvtalet inte har mätts. Istället har det synkrona varvtalet räknats fram men utan eftersläpning. Detta medför att varvtalen för de olika frekvenserna 10-20 Hz inte är helt exakta utan de har några procentenheters felmarginal. På så sätt inkluderas inte heller existerande effektförluster mellan frekvensomriktare och krossmotor.

Utöver detta förekommer även andra handhavandefel som uppkommer vid drift, då det inte går att börja mäta effekten exakt samtidigt i LabVIEW som låda växlas i uppsamlingsenheten. Detta resulterar i en liten avsaknad av mätdata som dock i de flesta fallen inte är relevant. Denna typ av fel går inte att undvika så länge processen sker manuellt och lösningen ligger i en automatisering av arbetet. En avvägning av prioriteringar får dock göras där det avgörs om det är lönsamt att automatisera detta arbete i syfte att eliminera denna felkälla som ändå är liten. Detta i samband med den personliga bedömningen som får göras för när en mätning ska börja, det vill säga vart gränsen för stationär fas går. Det är svårt att veta när stationär fas uppnåtts genom att bara se på en graf, vilket gör att mätningen ibland påbörjats innan stationär fas verkligen uppnåtts. En ytterligare felkälla var att även om LabVIEW mätte data med en hastighet på 1000 Hz, sparades inte datan i denna hastighet. Datat sparades i en hastighet på ungefär 1,57 Hz utifrån vad som kunde avläsas i Excel. Detta medförde dock inga problem då den hastighet i vilket LabVIEW sparade ner ändå var tillräcklig och den medelvärderade effekten hade ett rimligt värde.

6.3.4 Felkällor vid användning av Bonds ekvation

Eftersom det inte fanns möjlighet att mäta energin som förbrukades vid kvarnförsöken har den istället räknats fram med hjälp av Bonds teori (Bond, 1961). Detta ger givetvis upphov till flera felkällor då denna teori är framtagen speciellt för en viss typ av kvarn samt en viss typ av försök.

Som står att läsa om i avsnitt 2.6.7 Alternativa teorier stämmer Bonds teori väl i det området av partikelstorlekar som projektet rör sig inom. Den stämmer dock inte perfekt och att bara använda ekvationen för att räkna ut förbrukad energi blir därför en felkälla i sig jämfört med att mäta effekten. Här bör även påpekas att Bonds ekvation endast tar hänsyn till materialets egenskaper, F80 samt P80. Den tar därmed inte hänsyn till hur lång tid kvarnen snurrat eller med vilket varvtal. Detta gör att två olika test med samma F80 och P80 samt alla andra förutsättningar lika som körts olika länge i kvarnen får samma förbrukade energi. Detta skulle teoretiskt kunna hända om materialet blir så fint att den valda kulstorleken inte längre kan mala det finare. Detta har inte förekommit under projektet men är ändå ett bra exempel för att visa på begränsningarna som finns med att använda Bonds ekvation för att estimerar förbrukad energi.

När beräkningen av förbrukad energi gjordes bekräftades felkällorna ovan. Det visade sig att vissa kvarnförsök enligt beräkningarna drog tio gånger mer energi än andra. Detta är såklart orimligt och grundar sig i att Bond ej tar maltiden i beaktning i sin ekvation. Detta är en stor felkälla som inte går att bortse från. Det specifika problemet i projektet var att kulorna på 13 mm ej reducerade top-size i alla försök vilket gjorde att P80 var relativt oförändrat i dessa fall. Den med Bonds ekvation estimerade effekten blir då väldigt liten och orimlig.

Bonds teori är som tidigare nämnts framtagen för en specifik kvarntyp samt en specifik typ av kvarnförsök. I detta försök är det tydligt definierat vilka förutsättningar som gäller, en jämförande tabell mellan Bonds försök och de försök som gjorts i projektet kan ses i Tabell 8.

Tabell 8. Jämförelse mellan Bonds malning och malningen i projektet.

	Bond	Ø13 mm	Ø25 mm
Kvarnstorlek	304.8 mm × 304.8 mm	333 mm × 207 mm	
Total specifik yta för kulorna	543 225 mm ²	1 592 741 mm ²	900 289 mm ²
Total vikt på kulorna	20 125 g	27 000 g	23 544 g
Volym på laddat material som ska malas	700 cm ³	185 cm ³	185 cm ³
Rotationshastighet på kvarn	70 rpm	Ca 51.3 rpm	

De felkällor listade i tabellen ovan gör att effekten som estimeras med Bonds teori med stor sannolikhet får en viss felmarginal. Eftersom kvarntesterna i projektet kördes med två olika inställningar blev felmarginalerna väldigt olika. När kvarntesterna gjordes med kulor med en diameter på 25 mm var denna konfiguration på malmedia som nämnts ovan mer lik Bonds uppsättning då kulstorleken varierade. Detta gjorde att top-size alltid reducerades vilket gör att Bonds ekvation fungerar relativt bra. Jämförs malmedian med diameter på 13 mm som ej varierade i storlek fungerade, som kan läsas ovan, Bonds ekvation mindre bra.

Som nämndes i 2.6.6 Beräkning av optimal stång och kuldiameter så har, på grund av den befintliga utrustningens begränsningar, optimal stång och kuldiameter inte använts. Detta är inte en direkt felkälla då projektets syfte var att jämföra två olika storlekar på malmedian. Den optimala stång- respektive kuldiametern är därför inte nödvändig att använda. Det hade dock kunnat vara av intresse att se hur stor inverkan det hade haft på resultatet och det kan därmed ses som en felkälla att den optimala diametern ej använts.

Sammanfattningsvis kan användandet av Bonds teori påstås ha lett till ett flertal felkällor. Det är dock så att resultaten från effektberäkningen har granskats kritiskt och jämförts med siktkurvorna för att se om den beräknade effekten anses vara rimlig eller ej. Eftersom huvuddelen av resultatet baseras på siktkurvorna och endast tar visst stöd av den beräknade effekten anses felkällorna som Bonds teori gett upphov till inte påverka projektets utfall i en alltför stor negativ utsträckning.

7 Slutsats

Resultatet visar ett tydligt samband mellan produkten efter malning och vilken malmedia som använts. Kulstorleken påverkar kvarnens effektivitet att sönderdela partiklar. Större kulor medför större förmåga att sönderdela stora partiklar men mindre effektivitet att producera fin produkt. Syftet med projektet var att undersöka huruvida en hastighetsökning hos konkrossen i en sönderdelningsprocess kan minska energiförbrukningen när fin produkt ska produceras. En analys av resultaten har visat att en hastighetsökning tillsammans med en minskning av CSS möjliggör användandet av mindre kulor i kvarnen. Mindre kulor i kvarnen innebär en snabbare reduktion till rätt produkt och att den produkten är tillräckligt fin för att klassas som slutprodukt i detta fall. Testernas resultat visade inte på någon förbättring, men efter behandling av data räknades ett intervall för energibesparingen fram. Minskningen av energiförbrukningen, för att få slutprodukt, blev mellan 5,6 och 17,9 % efter en ökning av varvtalet i krossen och en mindre kulstorlek i kvarnen.

Resultatet är intressant eftersom studierna som genomförts främst undersökt en dubblering av varvtalet hos konkrossen vilket aldrig studerats tidigare. Minskningen av top size med 45 % som gavs av dessa försök gör en skillnad hos kvarnen då kulstorleken endast kan minskas om top size reduceras. Minskningen av CSS är viktig för att ta ner den generella storleken hos partiklarna men en kraftig hastighetsökning medför att energi inte läggs på de mindre partiklarna utan på de större där den behövs. Detta innebär att energitillskottet läggs på den del av materialet där den gör störst skillnad.

Den slutsats som dras från projektet är att en utveckling av en energieffektiv kross- och malningsprocess genom att dubblera hastigheten är möjlig och kan spara så mycket som 17,9 % i hela sönderdelningsprocessen.

8 Rekommendationer och vidareutveckling

Mycket går att utveckla och många felkällor går att minimera och även eliminera i vissa fall, se avsnitt 6.3 Felkällor för att läsa mer om felkällor. Först bör tester för att validera den nya hypotesen utföras. Det viktiga är sen att praktiskt undersöka om en uppskalning av testerna och resultaten är möjlig. Resultatet är nu redogjort för hur det fungerar på laboratorieskala, men huruvida liknande samband och slutsatser kan dras för större skalor inom industrin är fortfarande okänt. Detta då exempelvis geometrin på den använda konkrossen skiljer sig från de använda konkrossarna ute i gruvindustrin. Den använda konkrossen, Morgårdshammar B90, krossar från och med en största partikelstorlek som motsvarar partikelstorleken som går in i tumlande kvarnar ute i gruvindustrin. Det blir därmed ett resultat av att lägga till ett ytterligare processteg istället för att vidga arbetsområdet för konkrossen. För att få en bättre anpassning till dagens industri och möjligheter till optimering är det därmed rekommenderat att utföra liknande tester på större konkrossar som arbetar i ett område som representerar industriprocessen i industrin.

Utöver detta finns ett flertal potentiella delmoment för vidareutveckling. Detta exempelvis i regleringen av konkrossen och beräkningen av effekten i LabVIEW. Den befintliga vågen, som använts av föregående kandidatgrupp, som finns under ena uppsamlingskärlet (ena lådan) är inte inkopplad till datorn eller med i programmet, istället har tiden mätts. Vågen kan ses i uppsamlingsenheten i Figur 47. Läggs vågen in i programmet underlättas körningen av programmet och gör reglerprocessen mer lätthanterlig.



Figur 47. Vågen i uppsamlingsenheten.

För bättre kontroll av mätningen kan ytterligare förbättringar till krossutrustningen införas. Utöver installationen av en våg i uppsamlingsenheten innefattar det installationen av en våg under en del av bandet i bandmataren och en automatisk rotation av flippren. Utöver ovan nämnda implikationer, skulle installationen av en våg i uppsamlingsenheten underlättat vid bestämelse av när en mätning ska börja och sluta. Då materialet som ska krossas har en bestämd vikt från början och det finns en bestämd vikt på materialet som ska malas, hade en bättre uppskattning av när mätningen ska ske kunnat fås. Det problematiska med att avgöra när samlingen skulle börja var att se när den transienta fasen på effekten avtog. Bättre kontroll på hur mycket material som fanns kvar och bättre tidsmarginal för att invänta steady state hade

varit möjligt med en våg. Felkällorna vid avläsning av mätvärden som berör varvtalet elimineras genom inköp och installation av varvtalsgivare som mäter det faktiska varvtalet, helst en med hög upplösning som klarar att läsa av ett mer noggrant värde på varvtalet.

En automatisk styrning av flippen hade möjliggjort styrning i dator och den mänskliga inverkan hade eliminerats. Denna funktion hade medfört att mätningen av effekten kunnat påbörjas samtidigt som det krossade materialet sparades undan.

En ytterligare utökning i LabVIEW hade varit att kunna styra bandmatarens hastighet. Denna vidareutveckling hade varit relevant om matningens inverkan på effekten hade velat studeras. Med dessa funktioner hade det också varit möjligt att styra hela krossningstestet med datorn avskärmad från krossningsrummet. För att lösa problemet med materialet som sipprar ut ur trattarna och för en mer gedigen och professionell konstruktion, kan de nuvarande trattarna monterade på krossen ersättas med två 3D-printade trattar. Dessa med bättre passform och rätt mått.

Den delen av projektet som innefattat kvarntesterna har även den ett par förbättringsområden. Först och främst skulle det vara önskvärt att kunna mäta effekten som kvarnen förbrukar på ett tillförlitligt sätt för att inte vara beroende av att enbart räkna ut den förbrukade energin. Utöver den rotationshastighetsmätning som gjordes skulle det då behövas installeras en momentgivare på kvarnens axel. Det skulle även vara en förbättring om den förbrukade energin kunde uppmätas i elskåpet på liknande sätt som skedde under krossningsförsöken.

Ett annat förbättringsområde vad gäller kvarnförsöken hade varit att använda sig av teoretiskt bästa möjliga diameter på såväl stänger som kulor. Detta för att se hur brfela processen verkligen är med optimala förutsättningar.

Sist men inte minst hade det varit bra att mala samtliga tester i flera omgångar. Något som bara gjordes med cirka en fjärdedel av testerna. Det hade varit önskvärt att mala i omgångar av 5 minuter som tillslut blir 20 minuter totalt för att kunna se utvecklingen av produktens storleksfördelning över tiden.

Referenser

- Ballantyne, G. R. (2015). Size specific energy (SSE)—Energy required to generate minus 75 micron material. *International Journal of Mineral Processing*, 2–6.
- BEVI AB. (2015, Februari 14). *Produktkatalog: BEVI AB*. Retrieved from BEVI AB www.bevi.se:
http://www.bevi.se/download/produktkatalog/produkter/elmotorer/BEVI_teknisk_information.pdf
- Bond, F. C. (1961). Crushing and grinding calculations. *British Chemical Engineering*, 378–385.
- de Carvalho, R. M., & Tavares, L. M. (2013). Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model. *Minerals Engineering*, 91–101.
- Evertsson, C. (2000). *Cone Crusher Performance*. Göteborg: Machine and Vehicle Design - Chalmers University of Technology.
- Evertsson, M. C. (2016, 05 15). *Kandidatarbeten - Chalmers tekniska högskola*. Retrieved from Chalmers tekniska högskola - [chalmers.se: https://www.chalmers.se/sv/institutioner/ppd/utbildning/kandidatarbeten/Sidor/utveckling-av-energieffektiv-kross-och-malprocess-for-gruvindustrin.aspx](https://www.chalmers.se/sv/institutioner/ppd/utbildning/kandidatarbeten/Sidor/utveckling-av-energieffektiv-kross-och-malprocess-for-gruvindustrin.aspx)
- Hukki, R. T. (1962). Proposal for a solomnic settlement between the theories of von Rittinger, Kick and Bond. *Transactions of the AIME*, 403–408.
- Hulthén, E. (2010). *REAL-TIME OPTIMIZATION OF CONE CRUSHERS*. Göteborg: Department of Product and Production Development - Chalmers University of Technology.
- Johansson, M., Mårlind, M., Edberg, M., Nyström Johansson, T., Toller, C., & Wahlund, F. (2015). *Energieffektiv höghastighetskross för gruvindustrin*. Göteborg: Chalmers University of Technology.
- McIvor, A. (2010). Mining and energy. *Cleantech magazine*.
- Melero, M., Cano, J., Norniella, J., Pedrayes, F., Cabanas, M., Rojas, C., . . . Ardural, P. (2014). Electric motors monitoring: An alternative to increase the efficiency of ball mills. . *RE&PQJ*, 1–2.
- Morrell, S. (2004). An alternative energy–size relationship to that proposed by Bond for the design and optimisation of grinding circuits. *International Journal of Mineral Processing*, Pages 133–141.
- Morrell, S. (2006). Rock characterisation for high pressure grinding rolls circuit design. . *Proceedings of the International Autogenous and Semi Autogenous Grinding Technology*, 267–278.
- Mätforum. (2016, April 26). *Elteknisk-info: Mätforum*. Retrieved from Mätforum: <http://maetforum.e-line.nu/>:
<http://maetforum.e-line.nu/images/user/grunder-i-effektm%C3%A4tning.pdf>
- National Instruments. (2016, Maj 15). *NI 9246 - National Instruments*. Retrieved from National Instruments: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/sv/nid/213202>
- National Instruments. (2016, Maj 15). *NI9244 - National Instruments*. Retrieved from National Instruments: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/sv/nid/212307>
- PROFIBUS. (2003, April). Installationsguide. *Installationsguide*. HÄSLEHOLM, Skåne län, Sverige: PROFIBUS.
- Wills, B. A. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology*. Oxford: Elsevier.

Appendix A

Kablage, effektmätning och styrsystem

Bakgrund

Idag används oskärmade trefas kablar för att överföra ström åt stenkrossen. Kabeln går från uttaget, en 400 V spänningskälla till en frekvensomriktare som används för att styra hastigheten på konkrossen. Frekvensomriktaren är i sin tur kopplad till ett elskåp. I elskåpet mäts spänningen och strömmen på trefaskabeln. Av spänningen och strömmen beräknas effekten med en modul som sedan överför signalen till en dator. Frekvensomriktaren ger dock upphov till starka elektromagnetiska störningar. Dessa störningar påverkar signalen i kablarna och ger upphov till fluktuationer i uppmätningen av spänning och ström.

För att utvärdera hur energieffektiv konkrossen är måste effekten kunna mätas ännu mer noggrant. I dagsläget mäts strömmen över en fas och spänningen på alla tre faser och effekten räknas sedan ut i en effektmätare av den typ som normalt sitter i hushåll. Resultatet är inte tillräckligt noggrant och samplingsfrekvensen är låg och skickas dessutom på ett sådant sätt till LabView att data förvrängs och delvis går förlorad.

Syfte

Syftet är att få ett tillförlitligt och noggrant värde på effektförbrukningen. Uppkomsten av fluktuationerna i effektmätning beror på elektromagnetiska störningar från frekvensomvandlaren.

Metod

För att få ett stabilt värde på effekten byttes befintliga trefas kablar ut mot skärmade trefaskablar. Skärmad ledning används för att förhindra att störningar av magnetisk, elektrisk och elektromagnetisk art stör ut eller förvanskar signalen i den skärmade ledaren (profibus, 2003).

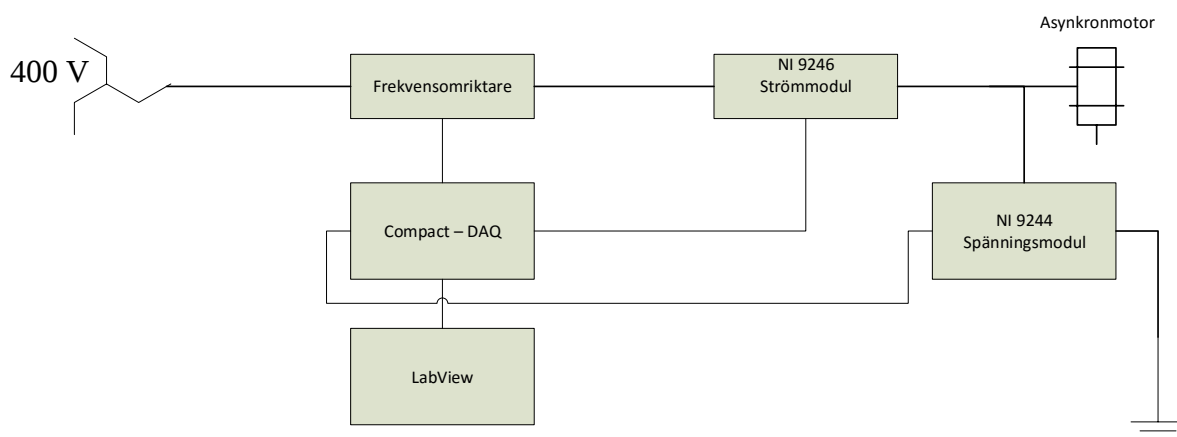
Skärmade trefas kablar ($2,5 \text{ mm}^2$) införskaffades och kapades till rätt längd. Därefter ersattes de befintliga trefas kablarna med de skärmade, både inne i elskåpet och i frekvensomriktaren, men även utanför såsom i kraftkabeln mellan elskåp och motor. Huvudregeln är att skärmen skall jordas i bägge ändarna för att få ett bra skydd mot höga frekvenser (profibus, 2003). Från och till vissa elektriska komponenter såsom motorn kopplas inte neutralledaren.

Övriga elledningar inne i skåpet täcks med aluminiumfolie. De då installerade effekt- och strömmätarna byttes ut mot nya National Instruments moduler med större tillförlitlighet. I samband med installationen av de nya modulerna skapades ett Excel dokument med den framtida kopplingen inuti elskåpet. Detta Excel dokument användes delvis som referens och som hjälpmedel för arbete av styrsystem inom LabVIEW. Övrig utrustning såsom kopplingsdosor (splittrar), kabellås och strömbrytare behölls. Även den då installerade, oskärmda usb kabeln behölls då den inte ansågs påverkas mycket av störningarna⁷.

Innan och efter utfört kablagebyte konsulterades bytesprocessen med en behörig elektriker som dessutom kontrollerade att allting fungerar. Det ovan nämnda Excel dokumentet användes vidare i skapandet av ett fungerande LabView program, mjukvaran till existerande koppling som styr konkrossen, samtidigt som det utgjorde dokumentationsunderlag. Med detta dokument följde en märkning av samtliga elkablar och ledningar som tydliggör vilka kablar som är skärmda respektive oskärmda samt varifrån varje kabel kommer och vilken komponent den är kopplad till.

Gällande effektmätningen så fanns redan en CompactDac enhet med passande ingångsportar vilket möjliggjorde införskaffandet samt installationen av de två nya modulerna för att mäta spänning och ström mer noggrant på alla tre faser samt skicka signalen direkt till LabView där effekten kan räknas ut. Dessa moduler heter NI 9244 (spänningsmätningssmodulen) och NI 9246 (strömmätningssmodulen) och teoretiskt utför båda modulerna sina mätningar med en upplösning på 24 bitar (ca 8,4 miljoner steg) och har en samplingshastighet på 50 kS/s (0,02 ms) vilket i praktiken innebär analog mätning. Detta medförde att man kunde studera krossens effektförbrukning över varvet.

Modulerna kopplas in på samma sätt som en Ampere- respektive Voltmeter. Hela kretsschemat illustreras i figur 1 nedan.



Figur 1. Kretsschema över elektriska delen av processen

⁷ Enligt muntligt samtal med BSc. Marcus Johansson

Data och specifikationer på NI 9244 samt bild följer nedan:



Figur 2. Spänningsmättningsmodulen NI 9244

- 3 single-ended channels, 50 kS/s per channel simultaneous sample rate
- 400 Vrms L-N, 800 Vrms L-L measurement range, 24-bit resolution
- NI CompactDAQ support with NI-DAQmx 9.9
- 4-position screw-terminal connector; accepts 12 AWG to 24 AWG wire gauge
- -40 °C to 70 °C operating, 5 g vibration, 50 g shock

Overview

The NI 9244 C Series analog input module has a full measurement range of 400 Vrms L-N for high-voltage measurement applications such as phasor measurements, power metering, power quality monitoring, industrial machinery, and motor test. It supports standard service levels up to 400 Vrms L-N and 690 Vrms L-L. You can also perform transient and harmonic analysis with high-speed simultaneous sampling at 50 kS/s per channel.

The NI 9244 offers three channels for measurements between the signal and the neutral channel, and the neutral channel provides measurements between the neutral terminal and the chassis ground. With this configuration, you can connect single- or three-phase measurement configurations such as WYE and delta. If you are developing power monitoring, metering, or quality analysis applications, consider the NI LabVIEW Electrical Power Suite, which is compatible with both NI CompactRIO and CompactDAQ systems.

You can incorporate the NI 9242 and NI 9244 into systems to meet standards such as IEC 61010-1, C37.90 and C37.60, IEC 60255-22-(1:7), IEC 60255-1, C37.188 Class M and P, EMC section of IEC 60870, EMC sections of IEC 61850, IEC 61000-4-30 Class S, and IEC 61000-4-7. Note that with the exception of IEC 61010-1, these standards are system-level standards and the system as a whole has to be designed to these standards.

Box Contents

- 1 NI 9244 C Series module
- 1 NI 9244 Operating Instructions and Specifications manual
- 2 NI 9968 four-position screw-terminal connectors
- 1 NI 9969 strain relief and operator protection

[Back to Top](#)

Comparison Tables

Product Name	Signal Ranges	Channels	Sample Rate	Simultaneous	Resolution	Isolation	Connectivity
NI 9225	300 Vrms	3 AI	50 kS/s/ch	Yes	24-Bit	II	16-28 AWG
NI 9242	250 Vrms L-N, 400 Vrms L-L	3 AI +1 NEU	50 kS/s/ch	Yes	24-Bit	III	12-24 AWG
NI 9244	400 Vrms L-N, 800 Vrms L-L	3 AI +1 NEU	50 kS/s/ch	Yes	24-Bit	III	12-24 AWG

[Back to Top](#)

Data och specifikationer på NI 9246 samt bild följer här under:



Figur 3.Strömmättningsmodulen NI 9246

Input Characteristics

Number of channels	3 analog input channels
ADC resolution	24 bits
Type of ADC	Delta-Sigma (with analog prefiltering)
Sampling mode	Simultaneous
Instantaneous measuring range	
Minimum	±30.6 A
Typical	±31.25 A
Typical scaling coefficient	3.7253 $\mu\text{A}/\text{LSB}$
Operating input rating	22 Arms
Overcurrent withstand rating	50 Arms continuously; 100 Arms for 10 seconds, not to repeat more than once in 30 minutes; 500 Arms for 1 second, not to repeat more than once in 30 minutes; 1250 Arms for 1 cycle (20 ms), not to repeat more than once in a minute
Input coupling	AC
Input impedance	0.2 m Ω
Internal master timebase (f_M)	
Frequency	12.8 MHz
Accuracy	±100 ppm max

Data rate range (f_s) using internal master
timebase

Minimum.....1.613 kS/s
Maximum.....50 kS/s

Data rate range (f_s) using external master
timebase

Minimum.....390.625 S/s
Maximum.....51.2 kS/s

Data rates (f_s)

$$\frac{f_M \div 256}{n}, n = 1, 2, \dots, 31$$

Passband frequency.....10 Hz to $0.453 \cdot f_s$

Passband flatness¹

10 Hz to 6 kHz..... $\pm 0.1\%$ (± 0.01 dB)
6 kHz to 22.5 kHz..... $\pm 1.5\%$ (± 0.13 dB)

Alias-free bandwidth..... $0.453 \cdot f_s$

Stopband frequency..... $0.547 \cdot f_s$

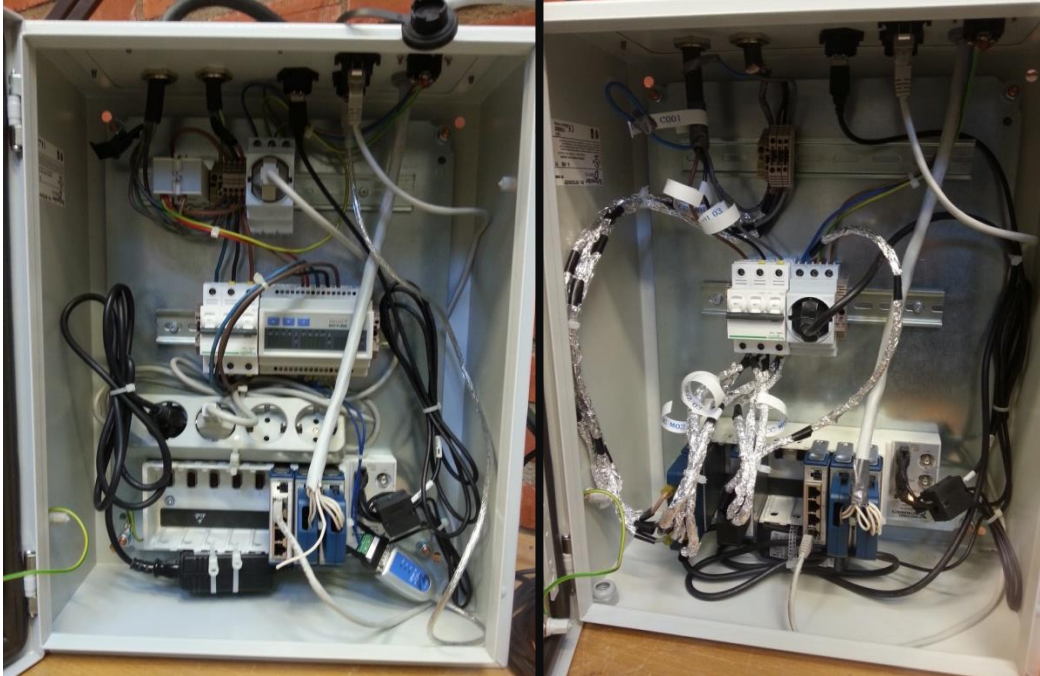
Stopband attenuation.....95 dB

Input noise

1 Hz to 25 kHz bandwidth (f_s =.....0.25 mArms
50 kS/s)
25 Hz to 75 Hz or 30 Hz to0.035 mArms
90 Hz bandwidth²

Resultat

Införandet av den nya ström- respektive spänningsmodulen, NI 9246 samt NI 9244 har till att börja med minskat antalet använda moduler inuti elskåpet vilket gjort elskåpet mer visualiserbart och kopplingen enklare att följa. Därmed minskar risken för fel att uppstå och programmeringen i LabVIEW blir enklare. I figur 4 nedan syns en jämförelse mellan den nya och gamla installationen, där den nya är till höger.



Figur 4. Jämförelsebild på både den gamla kopplingen (t.v.) och den nya kopplingen (t.h.).

Vidare är det svårt att praktiskt och mätbart utvärdera hurpass skärmningen av kablaget har bidraget till bättre mätresultat på ström och spänning, mer än att det kan observeras att störningarna har minskat och att användningen lågpassfilter i LabVIEW numera inte är nödvändig. När det gäller upplösningen och mätningen i övrigt av både ström och spänning så har den förbättrats, då noggrannheten i resultaten påvisar detta. Detta konstaterades efter genomförda simuleringar och tester på konkrossen både i drift och utan drift, alltså på bara strömmen som går genom modulerna då konkrossen inte körs.

Källförteckning:

1. Installationsguide Profibus, publicerad år 2003, använd 29/03-2016.
http://www.profibus.se/PDF/Installationsguide_2003_04.pdf s.11

Appendix B

Bandmatare med massflödesmätning, val av koncept och tillverkning

Bakgrund

I dagsläget finns en skakande matare som matar konkrossen med sten (grus). Denna medför dock problem i form av matning med ojämnt massflöde. Det beror på ökande styrka på vibrationerna snabbt, vilket får mataren att hamna i självsvängning och på så sätt blir okontrollerbar. Spalthöjden i uttaget ur själva fickan är också osmidig att justera och det finns inget bra sätt att avläsa denna höjd. Därmed skall en bandmatare införskaffas eller konstrueras för att eliminera dessa problem. Samtliga nedanstående koncept är därmed baserade på samma typ av bandmatare. Skillnaden i koncepten är enbart sättet att mäta massflödet.

Framtagna koncept och eliminering

Framtagna koncept efter genomförd brainstorming (exkl punkt 1) redogörs nedan.

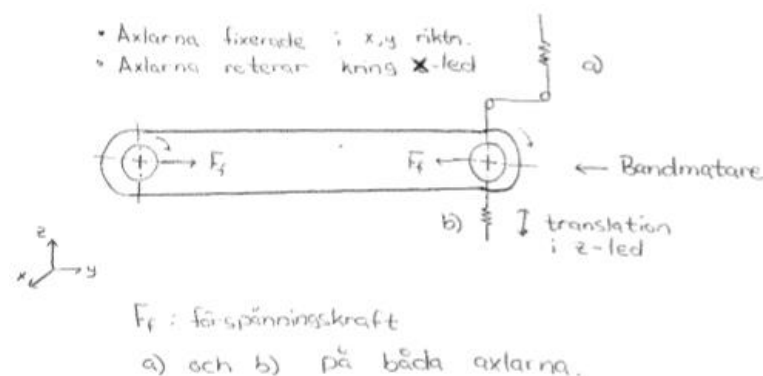
1. Att köpa/låna en bandmatare med inbyggd mätning av massflödet.

Endast viss anpassning kan vara aktuell i detta fall.

2. Lastcell på axlarna

En bandmatare där man mäter massflödet genom att införa lastceller på de två ”yttersta” axlarna och på så sätt väger hur mycket sten/grus man har på bandet. Lastcellerna kan monteras på två olika sätt (se figur 1) där a) innebär en upphängning av lastcellen medan b) går ut på att lastcellen bär upp själva axeln enligt figuren.

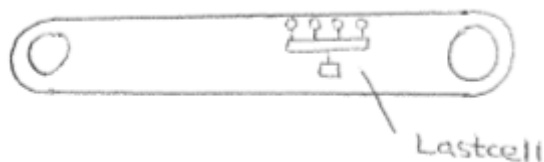
Tänkbara nackdelar: svårt att hantera lagringen med tanke på både translation och rotation i de ritade axlarna.



Figur 1. Principiell skiss av koncept 2.

3. Lastcell under bandet

Bandmatare där mätningen av massflödet istället sker med installerade lastceller under en del av bandet, se figur 2. Detta antingen genom att vikten (stenen) rullar på t.ex. stål cylindrar med hängda lastceller under (såsom i figuren) eller genom att vikten med bandet glider på ett material med låg friktion (t.ex. nylon) med hängda lastceller under.

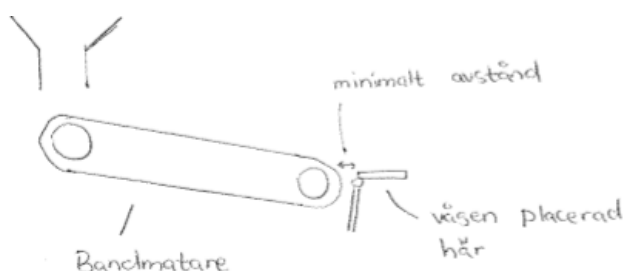


Figur 2. Principiell skiss av koncept 3.

4. Vippan

En ficka med en viss öppning (gate) med bandmatare. Här fungerar bandmataren enbart som transportmedel och väger alltså ingenting. Vågen/lastcellen placeras istället på undersidan av vippan enligt figur 3. För att optimera processen och inte missa att mäta sten kan man införa en "buffertvippan" så att man har två vippor med varsin lastcell.

Tänkbara nackdelar: det ritade "minimale avståndet mellan bandet och vippan kanske inte är försumbart. Man mäter inte massflödet kontinuerligt.

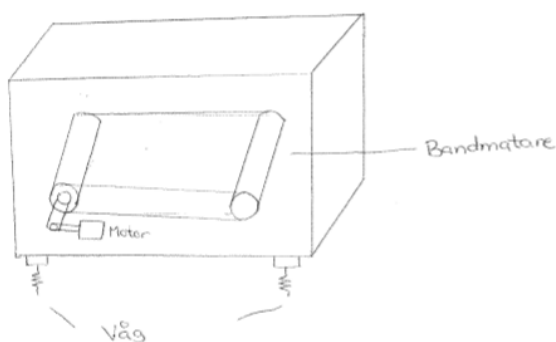


Figur 3. Principiell skiss av koncept 4.

5. Kontrollvolym

Att bandmataren stängs in i en tänkt kontrollvolym (t.ex. ett stativ där man har vågen/lastcellerna kontrollvolymen) som sedan vägs som en hel enhet enligt figur 4 nedan.

Nackdelar: har sannolikt dålig precision då massflödet av sten är litet i förhållande till vikten av bandmataren med dess motor och ficka.



Figur 4. Principiell skiss av koncept 5.

Pughmatris

En pughmatris utförs för att vikta de olika koncepten med en vald referens baserad på önskemålen. Skulle ett koncept uppfylla ett krav bättre än referensen ges detta ett plustecken i tabellen, ifall sämre ges det ett minustecken. I det fall det upplevs som att de uppfyller kriteriet lika bra sätts en nolla. Efter att en matris färdigställts bör en ny referens väljas och processen itereras tills dess att det konvergerar mot en eller några koncept som då kan väljas att användas för vidareutveckling. Nedan syns tabell av genomförd jämförelse.

Tabell 9. Utförd Pughmatris

Pughmatris 1					Skapad: 2016-02-05
Utfärdare: PPUX03-16-10	Lösningförslag				Referens 1.
Önskemål	1. Lastcell på axlarna	2. Lastcell under bandet	3. Vippan	4. Kontrollvolymen	
Möjlighet att koppla mätning av massflödet till LabView	<i>R</i>	0	0	0	
Kontinuerlig uppmätning av massa	<i>E</i>	0	-	0	
Enkelhet i installation	<i>F</i>	+	-	0	
Liten i storlek. Gå att anpassa storleksmässigt till krossen	<i>E</i>	0	0	-	
Inte tappar sten	<i>R</i>	0	-	0	
Noggrannhet i vägning/beräkning av massflödet	<i>E</i>	0	0	-	
Antal +	<i>S</i>	1	0	0	
Antal 0		5	3	4	
Antal -		0	3	2	
Totalt		1	-3	-2	

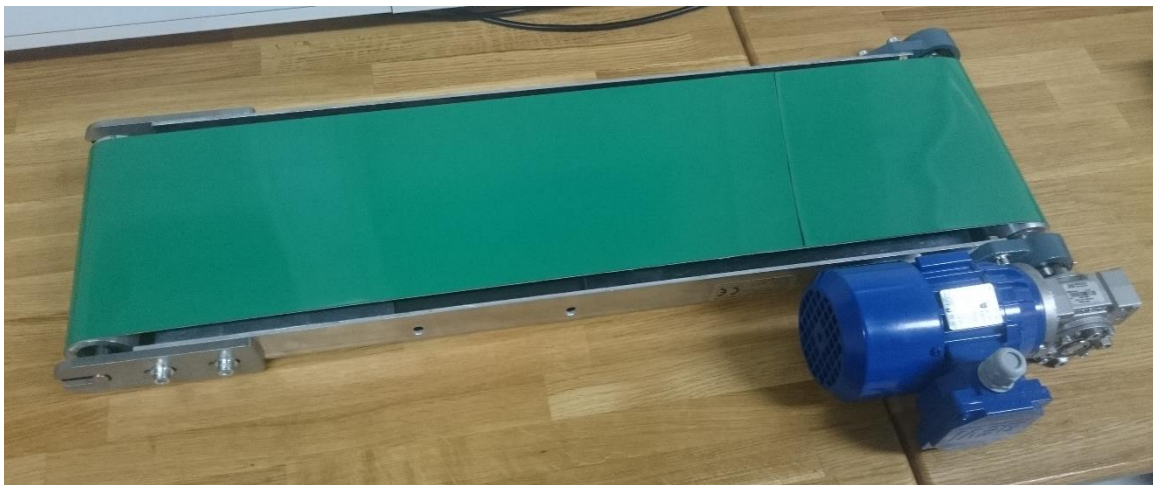
I detta fall går bara koncept nr.2 vidare (lastcell under bandet). Detta som alternativ efter det självklara valet av förslag 1, att köpa/låna en färdig bandmatare med inbyggd mätare av massflöde. Detta på grund av tidsbegränsningen och att huvudfokus för kandidatarbetet ligger på att undersöka effektiviseringen av totaleffekten för kross- och malprocessen inom gruvindustrin.

Slutgiltigt konceptval

Efter kontakt med flera utomstående parter bestämdes att inköp av bandmatare med motor skulle genomföras. Vågen, fickan för materialet och hela ramen/vagnen valdes att tillverkas av gruppen med hjälp av handledare. Motorn till bandmataren styrs med en frekvensomvandlare som i sin tur styrs genom LabView där också signalen från lastcellen i vågen tas in.

Tillverkning

Bandmataren beställdes från den mekaniska verkstaden Bågenfelt & Hellström enligt deras standardbandmatare med anpassningen att ett urtag gjordes i U-profilen, där vågen kan placeras, samt skruvhål för montering av vågen. Bandmatarens band är 200 mm brett och rullarna sitter på avståndet 800 mm ifrån varandra. Bandet som används är Habasit HAB12-e och utväxlingen från motorn, som är på 90 W med en maxhastighet på ca 1400 rpm, är 1:100 genom en snäckväxel.



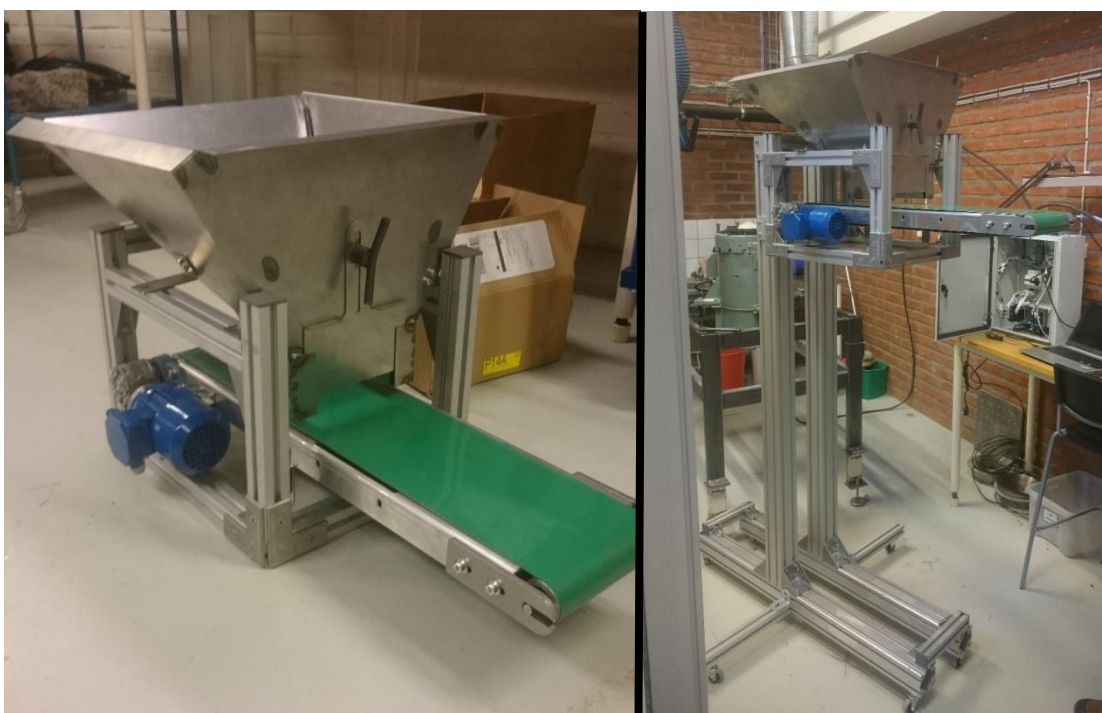
Figur 5. Bandmataren från Bågenfelt & Hellström

Första delen som tillverkades av gruppen var hopporn (fickan) där materialet som ska krossas placeras. Hopporn är placerad ovanför bandmataren som sedan drar ut materialet från hopporn genom en ställbar spalt. Hopporn tillverkades i 2 mm stålplåt som vattenskars och sedan bockades för att få rätt form innan delarna svetsades samman. Fogarna tätades med Sikaflex för att förhindra att damm från materialet som ska krossas läcker ut i skarvarna. Spalten är 150 mm bred och går att öppna upp till 100 mm högt från helt stängd. Själva plåten som sitter framför öppningen som port går att ta loss och fixeras med hjälp av ett handtag med gänga inuti som dras åt på en gängad stång som står ut från framsidan av hopporn, se figur 6 nedan. Porten har ett spår i sig som glider fram och tillbaka över den gängade stången och spåren bredvid spalten styr porten. På porten sitter en stålskala med halva millimetrar som minsta enhet som mäter öppningen men den visar även om porten har hamnat snett i sina spår då skalan sitter helt parallellt med kanten på dessa spår.



Figur 6. Spännhandtaget till porten

För att montera ihop hopper och bandmatare användes aluminiumprofil för att enkelt skruva ihop delar men också för att kunna justera avstånd i efterhand. En mindre ram byggdes runt hopporn och bandmataren som i sin tur hängdes upp i en större ram för att få rätt höjd på bandmataren i förhållande till krossen, se figur 7.



Figur 7. Den lilla (t.v.) respektive stora (t.h.) ramen med hopper och bandmatare

Appendix C

Uppsamlingsenhet

Bakgrund

För att sampla den krossade stenen används idag en enkel låda som står på en lastcell under stenkrossen. Effekten på stenkrossen mäts och jämförs med utslaget på lastcellen under krossning. Då konkrossens hastighet ökar uppstår först ett transient beteende som efter en tid stabiliseras och blir stationärt. Detta transienta beteende undviks helst då effekten inte är jämn utan fluktuerar.

Syfte

Syftet med att ta fram en ny uppsamlingsenhet är att kunna samla upp krossat material vid den stationära fasen. Då krossen främst kommer köras i konstant hastighet är det mest relevant att samla upp materialet vid det stationära beteendet hos effekten. Det samlade materialet kommer sedan att göras tester på.

Metod

Då uppsamlingsenheten endast är en liten del av kandidatprojektet lades en begränsad tid på konceptframtagningen och tillverkningen. Däremot krävdes förarbete innan tillverkning för att kunna validera att uppsamlingsenheten kommer uppfylla sitt syfte.

Förarbete innan konstruktionen av uppsamlingsenheten innefattade skapandet av en funktionslista, uppsättande av en kravspecifikation och konceptgenerering. Funktionslistan bestod av en lista med funktioner som uppsamlingsenheten skulle klara av. Dessa funktioner överfördes sedan till en kravspecifikation som beskrev om funktionerna var krav eller önskemål. Önskemålen rangordnades sedan från en skala från 1 till 5 där 5 var högst önskvärt. Konceptgenereringen bestod av en brainstorming med handledaren där ett koncept valdes för konstruktion.

Utförande

Funktionslista

Nedan i Tabell 1 syns genomförd funktionslista för uppsamlingsenheten.

Tabell 1 Funktionslista

2 kärl, delning under drift
Ta upp allt material
Bytbara kärl under drift
Minsta volym
Använda befintliga grå lådor
Ej stationär
Undvika damning

Kravspecifikation

Kravspecifikation genomfördes där endast krav och önskemål bestämdes. Detta gjordes för att reducera framtagningstiden. Framtagna kravspecifikation syns i tabell nedan.

Tabell 2 Kravspecifikation, k-krav, ö-önskemål

Funktionskrav		Krav på konstruktion	
Byta kärl snabbt under drift (switch)	K	Täta kärl, tät switch	
Inte läcka mellan kärlen	K	Skyddad flipp	
Inte läcka utanför	K	Tillräckligt stor inloppsarea	
Ska klara 50kg (per kärl)	K	Tillräckligt stor volym	
Använda befintliga grå boxar	Ö	Lättåtkomliga	
Utbytbara kärl under drift	Ö	Ha hjul på ramen	
Ej stationär	Ö		
Låg kostnad < 500kr	Ö		
Volymsmarkering	Ö		
Säker tömning (utan att påverka provet)	K		
Passa i befintlig miljö	K		
Undvika uppdamning	K	Kort flipp	
Tillverkningsbar med befintliga verktyg	Ö	Annars köpa in	

Vid konstruktionen togs en CAD-modell fram med detaljritningar på de ingående komponenterna. Byggandet av uppsamlingsenheten skedde i Chalmers prototypfabrik. Då begränsad tid lades på framtagningen av konceptet medförde detta att småjusteringar skedde under tillverkningens gång.

Konstruktion:

Konceptet som valdes var en uppsamlingsenhet med två utbytbara lådor. Flödet av krossad sten justeras så att det endast samlas i en av lådorna. Detta görs med hjälp av en så kallad flipper. Materialet på de ingående komponenterna är främst stål men även trä och PPC.

Tillverkning

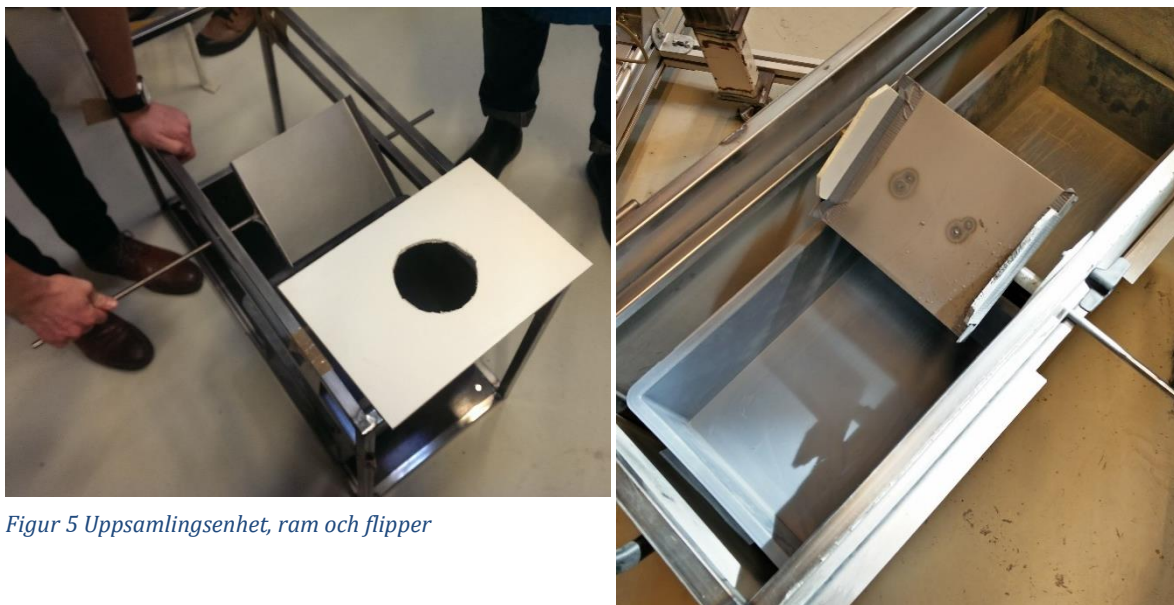
Ramen

Tillverkningen började med ramen. Ramen bestod av tolv kvadratiska stålbalkar som svetsades ihop till en ram. Därefter kapades en bottenplatta i trä som monterades i botten av ramen. Hjul monterades under ramen. En kvadratisk stålbalk som skulle användas som ben till uppsamlingsenhet kapades och svetsades fast på undersidan av uppsamlingsenheten. Under benet limmades en gummimatta.

Flipper

Vid tillverkning av flippern klipptes en stålplatta ut och bockades till önskad form. En stålaxel (10mm) kapades och flippern svetsades fast på denna axel. Flippern skulle rotera i två mittbalkar vilka tillverkades i kvadratiska stålbalkar. Dessa stålbalkar kapades i rätt längd och hål borrades i mitten av dem. Därefter utvecklades ett koncept för hur mittbalkarna skulle fästas i ramen. Det ansågs vara nödvändigt att kunna demontera axeln om utformningen av flippern inte skulle fungera i drift. Detta löstes genom att kapa två små stålplattor som bockades 90 grader. Dessa borrades sedan hål i för att kunna skruvas fast i både ramen och mittbalkarna. Med skruv medföljde möjlighet att demontera konstruktionen till skillnad från om mittbalkarna hade svetsats fast.

Två cirkulära rör kapades till distanser för att hålla flippern på plats i mitten av uppsamlingsenheten så att materialet faller rakt ner på flippers platta. Sedan klipptes fyra tjocka stålplattor ut och borrades hål i för att användas som distanser till mittbalken, för att få flippern på rätt höjd. Nedan i figur 5 syns flippern monterad på ramen.



Figur 5 Uppsamlingsenhet, ram och flipper

Skalet

En takplatta skars ut i en vattenskräpare. Detta krävdes för att få ett cirkulärt hål i mitten där den krossade stenen ramlar ner. För att koppla ett ventilationsrör till uppsamlingsenheten borrades ytterligare ett hål i taket. Två stålplattor klipptes ut och svetsades fast på sidan av ramen som ett skal. Efter det togs ett koncept fram för att förhindra att krossad sten hamnar i fel låda. Detta löstes genom att två stålplattor bockades och vinklades 90 grader. Dessa stålplattor monterades under takplattan så att de skärmade för flippern.

Framsidan tillverkades av en tunn plåtskiva. Gångjärn monterades på sidan av uppsamlingsenheten. Framsidan monterades på gångjärnen så att uppsamlingsenheten framsida skulle kunna öppnas. Efter det monterades handtag på kortsidorna för att kunna lyfta uppsamlingsenheten. Ett handtag monterades på axeln för att kunna rotera flippern. Till ovandelen av framsidan kapades en PC skiva för att skapa insyn i enheten. Denna PC skiva monterades med dubbelhäftande tejp.

Resultat

Resultatet blev en uppsamlingsenhet med utrymme för två lådor, ett hål i taket där stenen faller in och en flipper som styr i vilken låda stenen hamnar i. Flippern roteras med handtag på utsidan av uppsamlingsenheten. Uppsamlingsenheten är helt försluten och ventileras genom ett hål för ett utsugningsrör i taket. Framsidan går att öppna med hjälp av lås och gångjärn. Nedan syns den egentillverkade uppsamlingsenheten i Figur 6.



Figur 6 Uppsamlingsenhet, olika vinklar

Slutsats

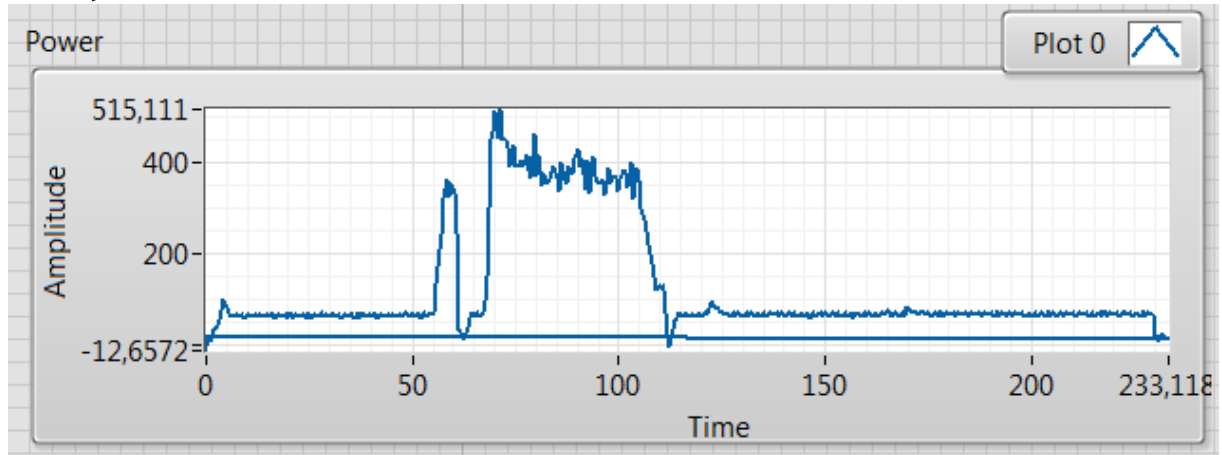
Uppsamlingsenheten fungerade som tänkt under krossning. När flippern roteras ändras materialets flödesriktning och faller ner i den andra lådan. Detta möjliggjorde uppsamling av material vid specifika tillfällen under kontrollerade förhållanden.

Appendix D

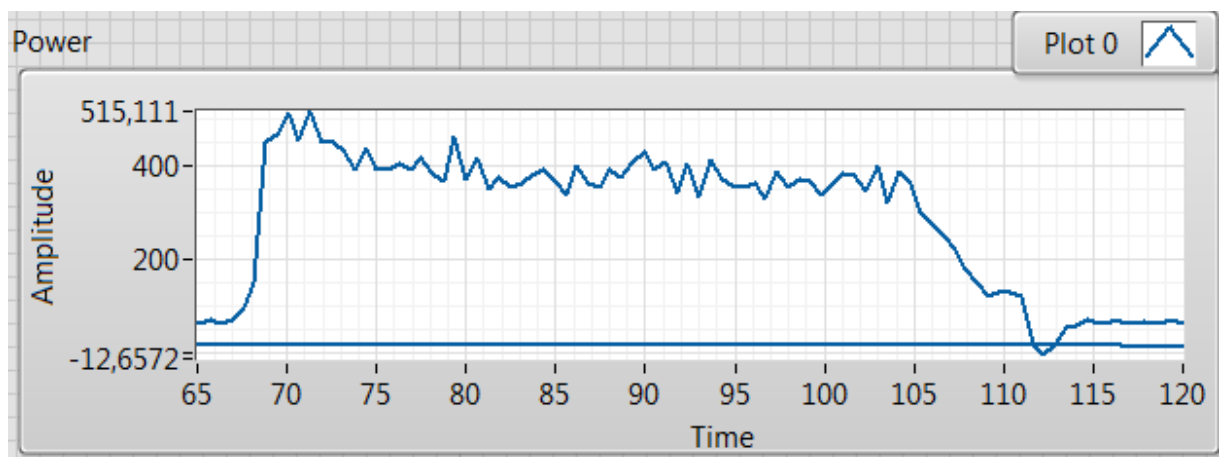
Appendix om effektplottar

Detta appendix behandlar genomgående datan som erhöles från krossningen.

CSS 1,45 mm 10 Hz

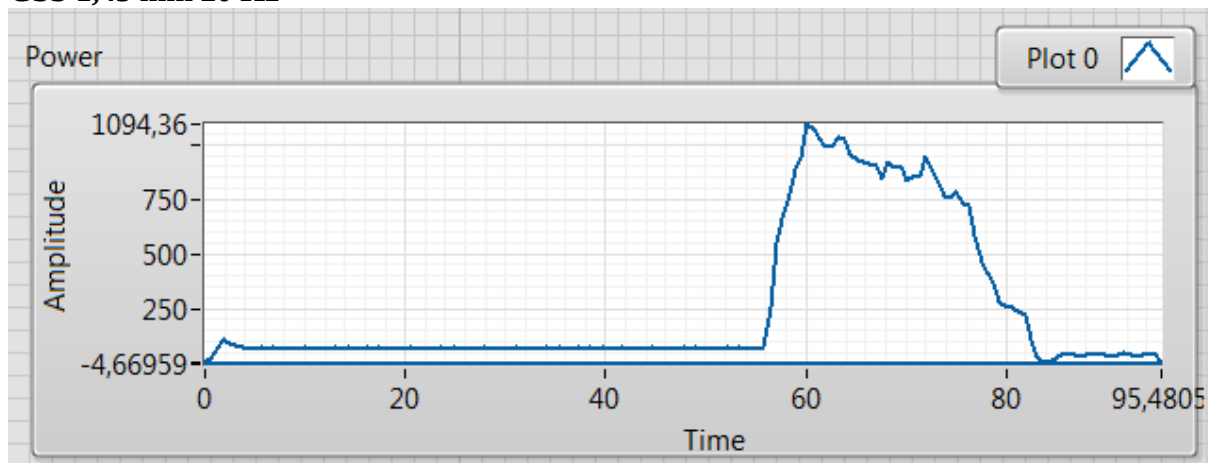


Figur 1 Active power, Hela



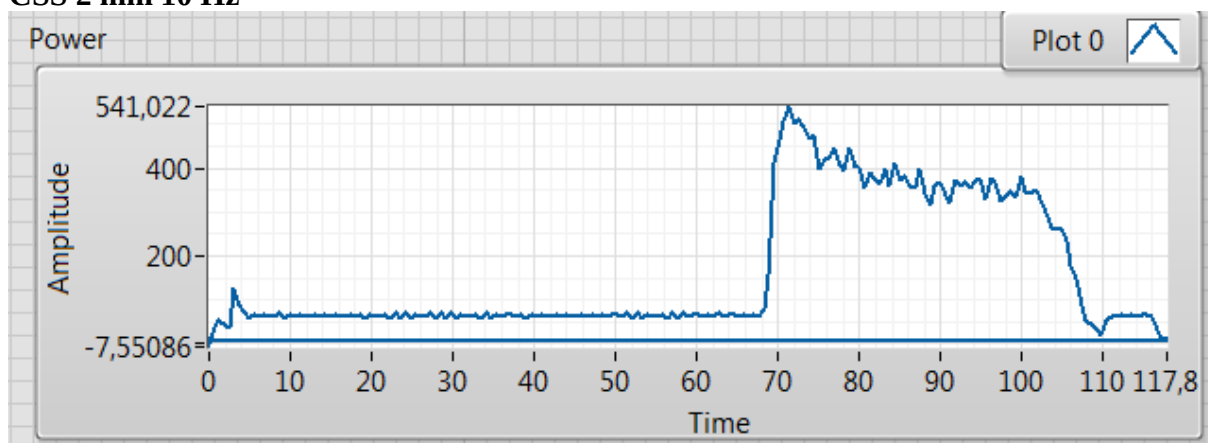
Figur 2 Active power, Inzoomad

CSS 1,45 mm 20 Hz

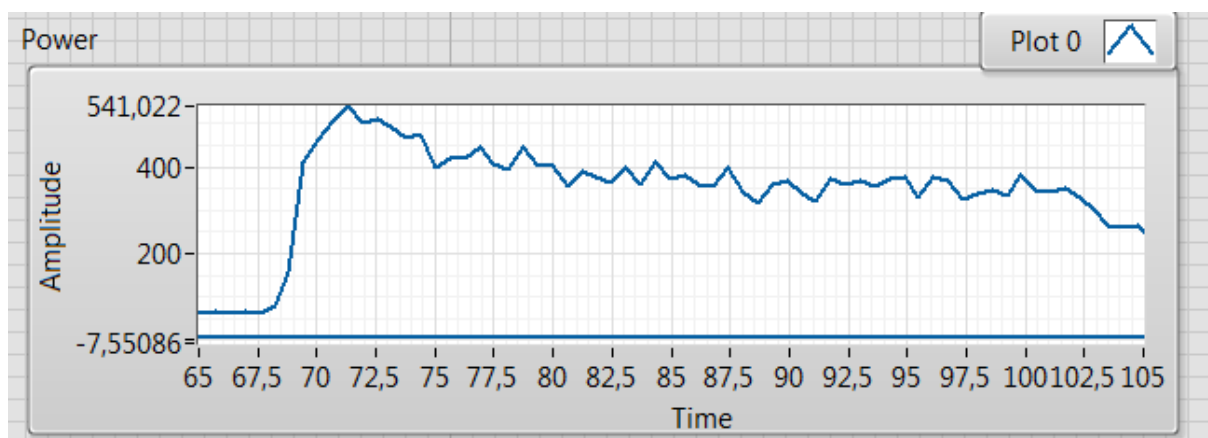


Figur 3 Active power, Hela

CSS 2 mm 10 Hz

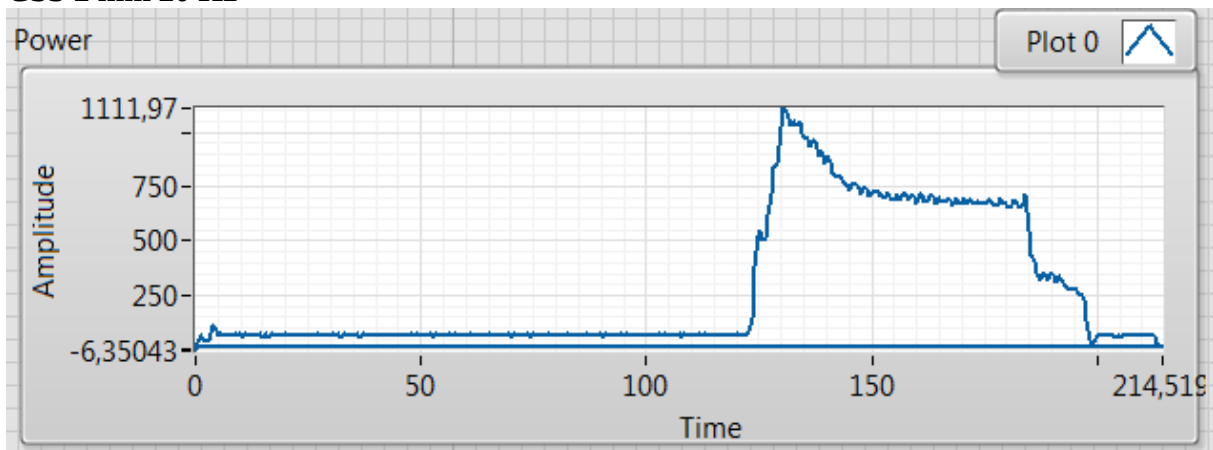


Figur 4 Active power, Hela

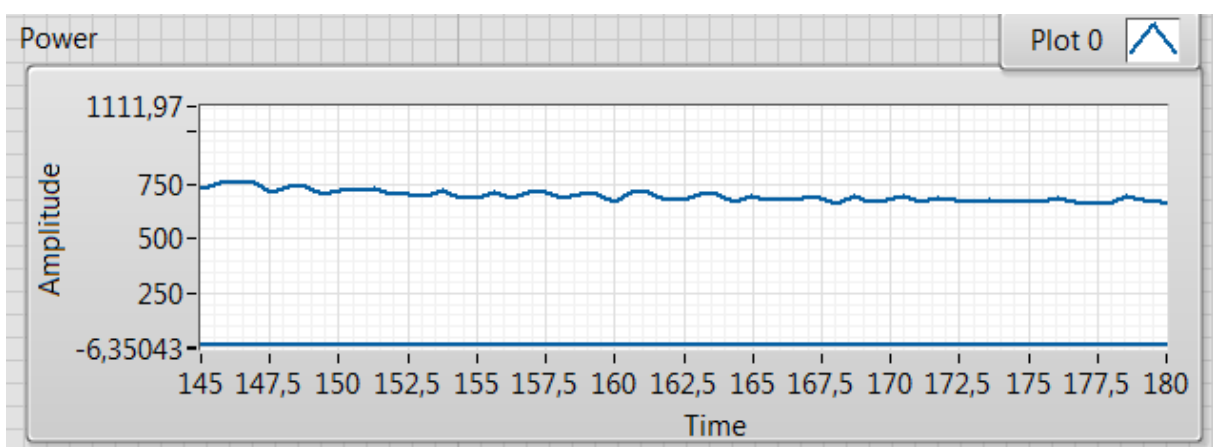


Figur 5 Active power, Inzoomad

CSS 2 mm 20 Hz

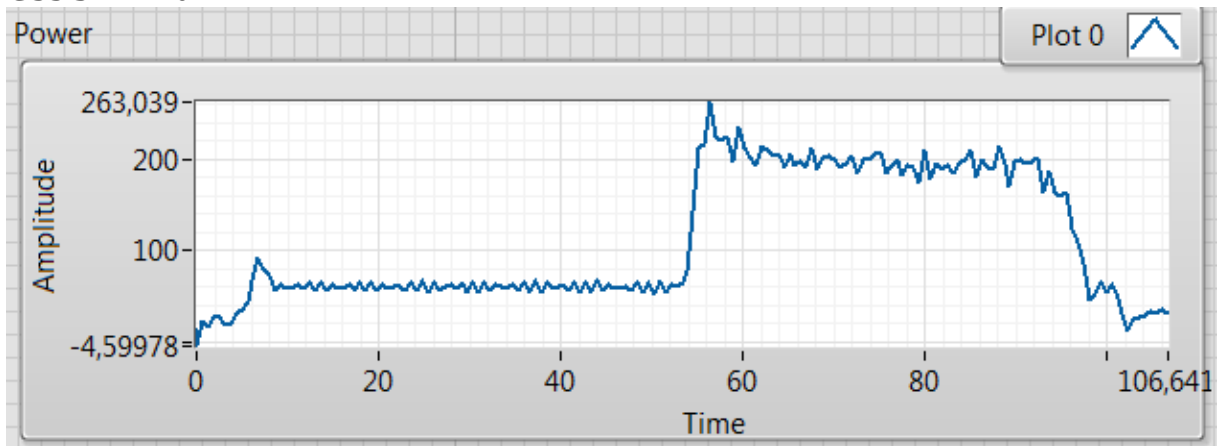


Figur 6 Active power, Hela

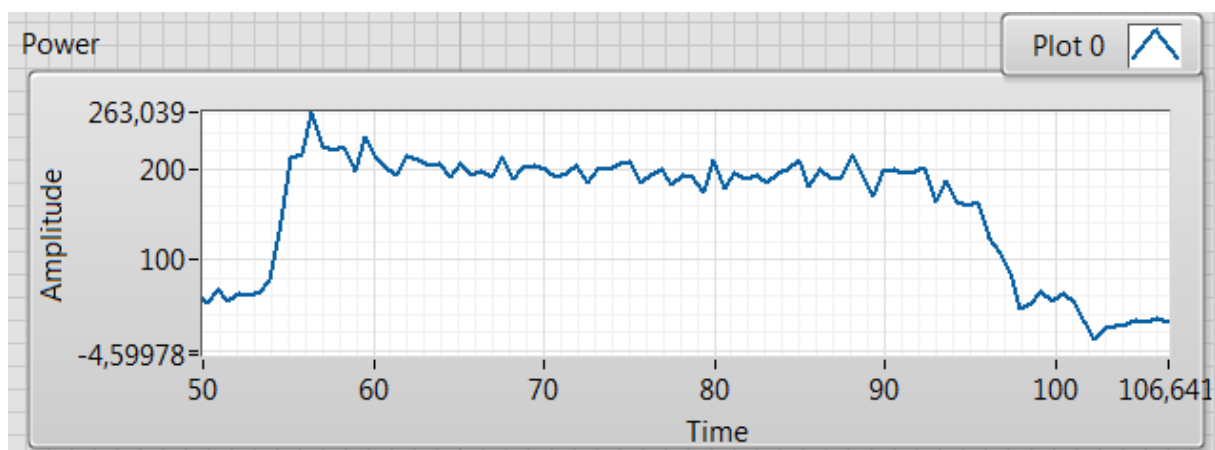


Figur 7 Active power, Inzoomad

CSS 3 mm 10 Hz

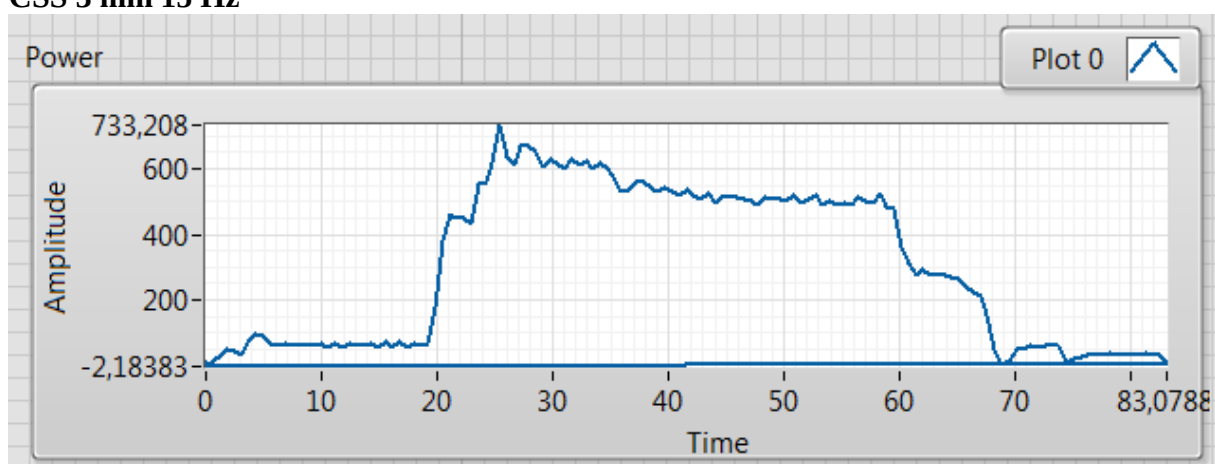


Figur 8 Active power, Hela

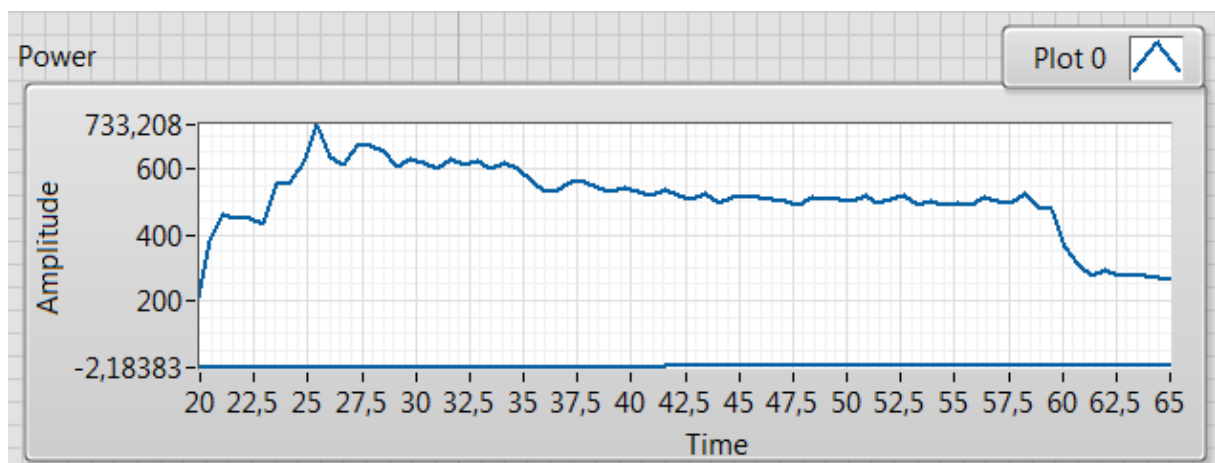


Figur 9 Active power, Inzoomad

CSS 3 mm 15 Hz

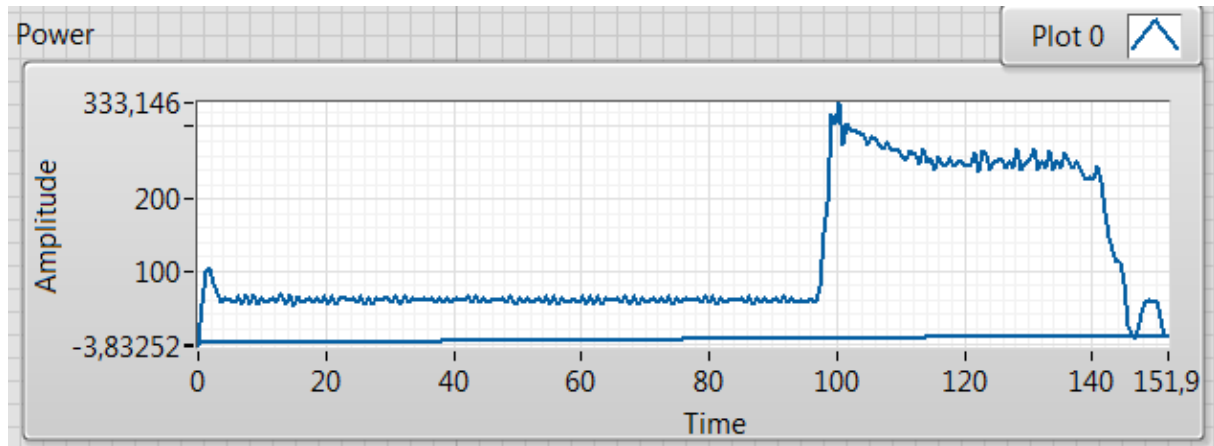


Figur 10 Active power, Hela

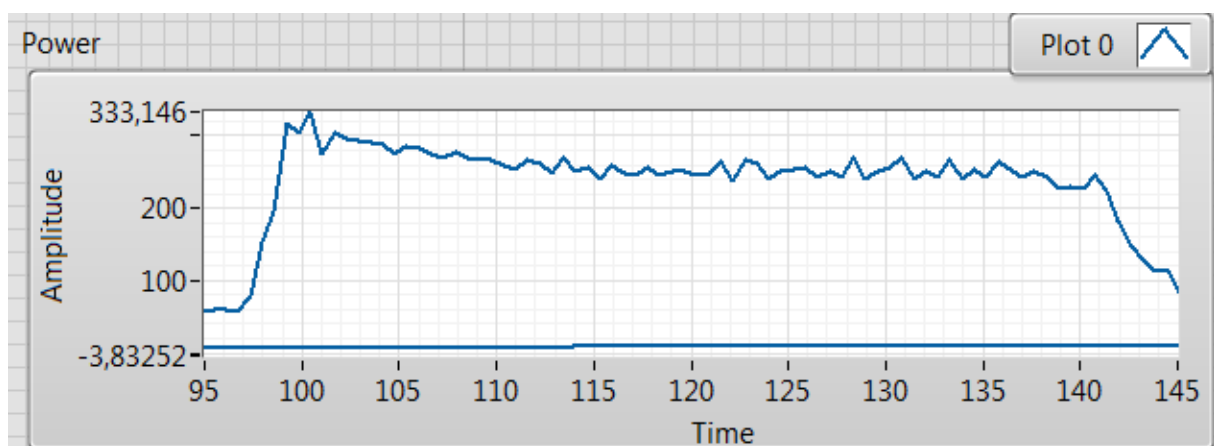


Figur 11 Active power, Inzoomad

CSS 4 mm 10 Hz



Figur 12 Active power, Hela



Figur 13 Active power, Inzoomad

Appendix E

Bond

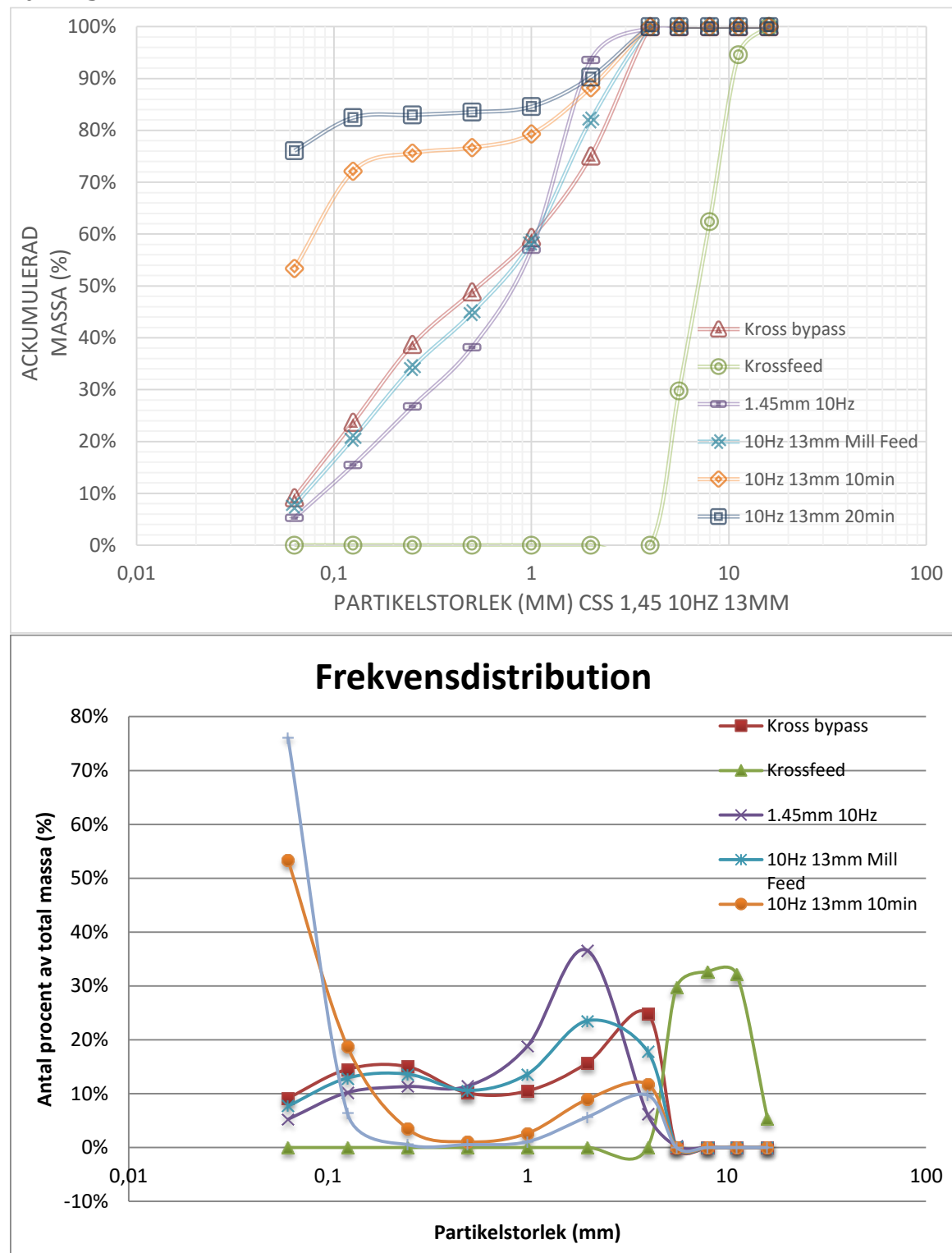
Nedan presenteras uträkningar av bonds ekvation för samtliga processer.

Kuldiameter 13 mm									
CSS 1,45 mm				1,45 mm, 10 Hz, 13 mm, 10 min		1,45 mm, 10 Hz, 13 mm, 20 min		1,45 mm, 20 Hz, 13 mm, 20 min	
				F80 [µm]	1915,1	F80 [µm]	1915,1	F80 [µm]	1881,3
				P80 [µm]	1078,6	P80 [µm]	101,4	P80 [µm]	81,1
				W [kWh/USton]	0,96	W [kWh/USton]	9,709951962	W [kWh/USton]	11,17438419
				W [kWh/ton]	0,875363747	W [kWh/ton]	8,808719858	W [kWh/ton]	10,13723037
CSS 2 mm	2 mm, 10 Hz, 13 mm, 5 min			2 mm, 10 Hz, 13 mm, 10 min		2 mm, 10 Hz, 13 mm, 20 min		2 mm, 20 Hz, 13 mm, 20 min	
				F80 [µm]	2217,6	F80 [µm]	2218,5	F80 [µm]	1974,7
				P80 [µm]	1580,4	P80 [µm]	103,6	P80 [µm]	85,2
				W [kWh/USton]	0,497744332	W [kWh/USton]	9,78105672	W [kWh/USton]	10,9009663
				W [kWh/ton]	0,451546043	W [kWh/ton]	8,873225006	W [kWh/ton]	9,88918984
CSS 3 mm				3 mm, 10 Hz, 13 mm, 10 min		3 mm, 10 Hz, 13 mm, 20 min		3 mm, 15 Hz, 13 mm, 20 min	
				F80 [µm]	3270,4	F80 [µm]	3270,4	F80 [µm]	3152,6
				P80 [µm]	2601,6	P80 [µm]	2400,1	P80 [µm]	2131
				W [kWh/USton]	0,269140433	W [kWh/USton]	0,371554163	W [kWh/USton]	0,489257029
				W [kWh/ton]	0,244160083	W [kWh/ton]	0,337068252	W [kWh/ton]	0,443846491
CSS 4 mm				4 mm, 10 Hz, 13 mm, 10 min		4 mm, 10 Hz, 13 mm, 20 min			
				F80 [µm]	3801,3	F80 [µm]	3801,3		
				P80 [µm]	3270,2	P80 [µm]	3317		
				W [kWh/USton]	0,16097665	W [kWh/USton]	0,145253954		
				W [kWh/ton]	0,146035554	W [kWh/ton]	0,131772165		
Kuldiameter 25 mm									
CSS 1,45 mm						1,45 mm, 10 Hz, 25 mm, 20 min		1,45 mm, 20 Hz, 25 mm, 20 min	
						F80 [µm]	1916,4	F80 [µm]	1883,6
						P80 [µm]	76,6	P80 [µm]	88,3
						W [kWh/USton]	11,60964626	W [kWh/USton]	10,58899156
						W [kWh/ton]	10,53209346	W [kWh/ton]	9,606171131
CSS 2 mm						2 mm, 10 Hz, 25 mm, 20 min		2 mm, 20 Hz, 25 mm, 20 min	
						F80 [µm]	2217,2	F80 [µm]	1974,5
						P80 [µm]	79,7	P80 [µm]	78,1
						W [kWh/USton]	11,52860364	W [kWh/USton]	11,51262422
						W [kWh/ton]	10,45857284	W [kWh/ton]	10,44407655
CSS 3 mm						3 mm, 10 Hz, 25 mm, 20 min		3 mm, 15 Hz, 25 mm, 20 min	
						F80 [µm]	3271,1	F80 [µm]	3165,1
						P80 [µm]	81,2	P80 [µm]	75,9
						W [kWh/USton]	11,87319134	W [kWh/USton]	12,32008501
						W [kWh/ton]	10,77117752	W [kWh/ton]	11,17659262
CSS 4 mm						4 mm, 10 Hz, 25 mm, 20 min			
						F80 [µm]	3798,1		
						P80 [µm]	106		
						W [kWh/USton]	10,27460316		
						W [kWh/ton]	9,320962783		
Stångkvarn + Kulkvarn									
Kulor 13 mm				Stångkvarn 20 min, kulor 13 mm		Kulkvarn kulor 13 mm 10 min			
				F80 [µm]	6804,5	F80 [µm]	6804,5		
				P80 [µm]	86,9	P80 [µm]	55,4		
				W [kWh/USton]	12,08406925	W [kWh/USton]	15,52315069		
				W [kWh/ton]	10,96248274	W [kWh/ton]	14,08236481		
Kulor 25 mm				Stångkvarn 20 min, kulor 25 mm				Kulkvarn kulor 25 mm 20 min	
				F80 [µm]	6804,5			F80 [µm]	6804,5
				P80 [µm]	99,7			P80 [µm]	53,2
				W [kWh/USton]	11,17950109			W [kWh/USton]	15,8723779
				W [kWh/ton]	10,14187234			W [kWh/ton]	14,39917839

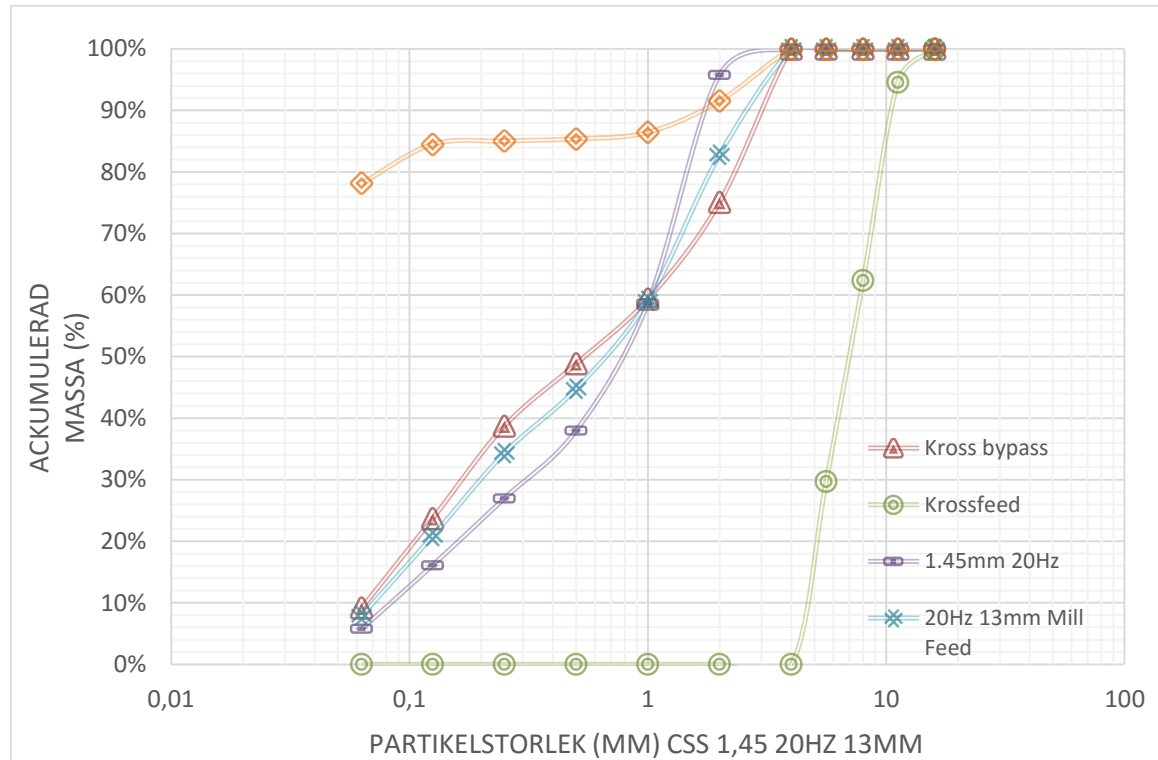
Appendix F

Nedan presenteras samtliga siktcurvor och frekvensdistributioner med beskrivning ovanför.

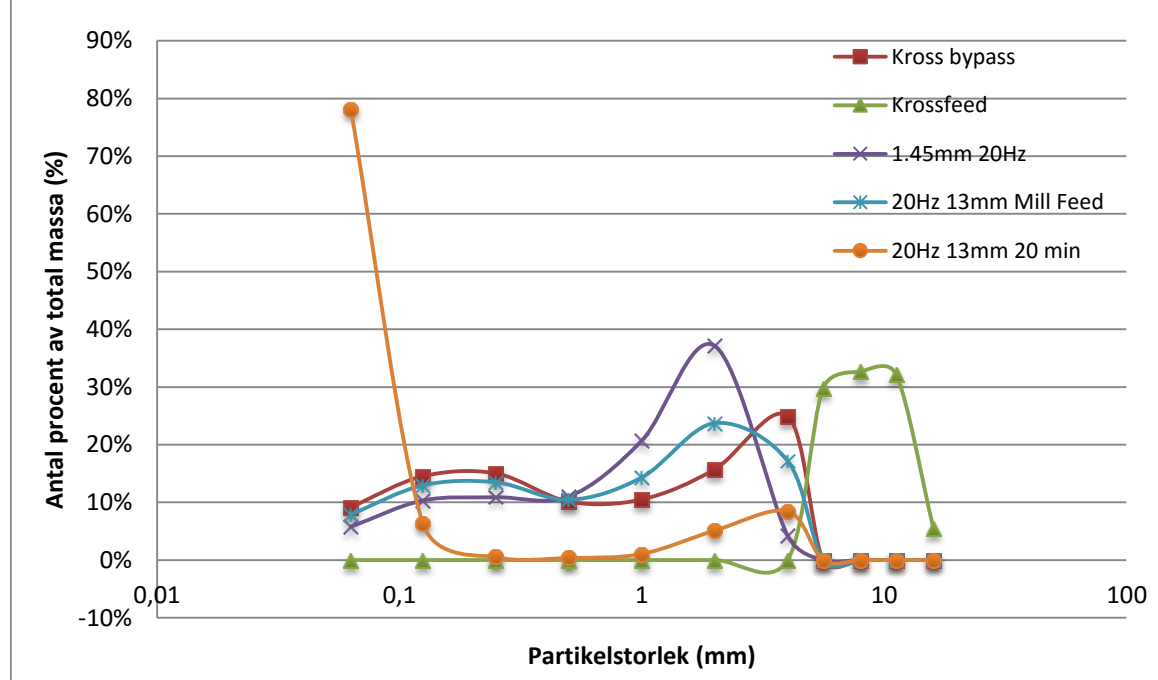
CSS 1,45
10Hz 13mm



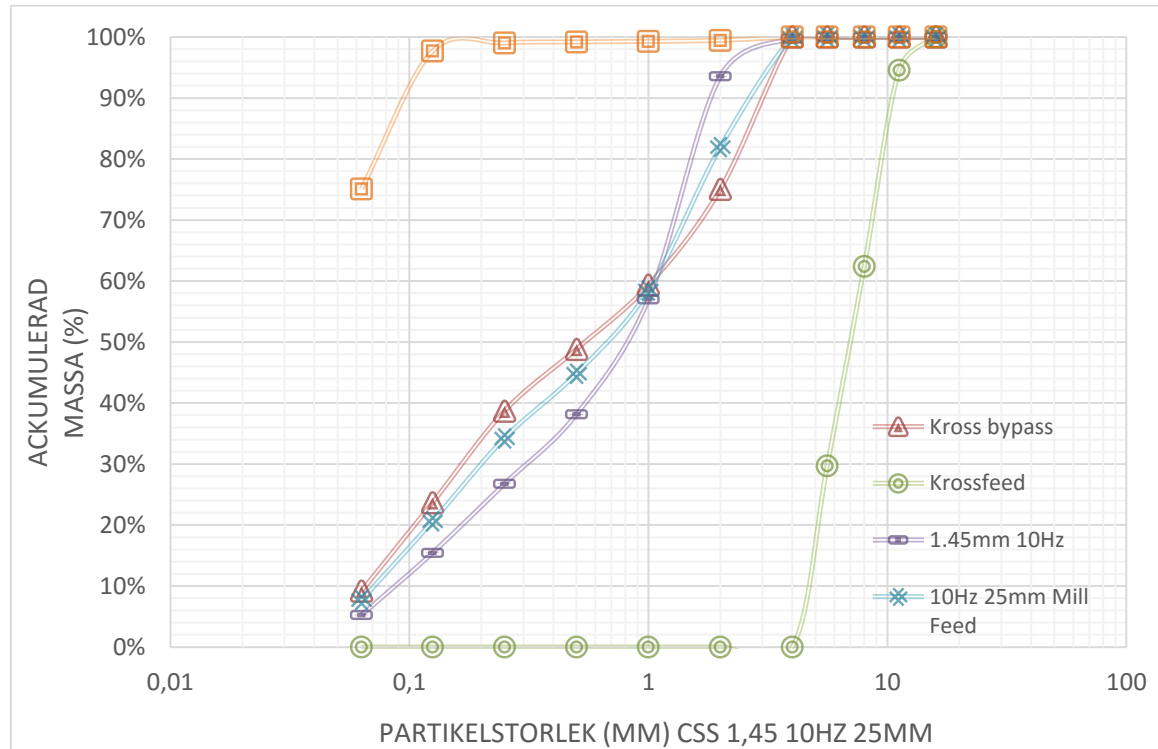
20Hz 13mm



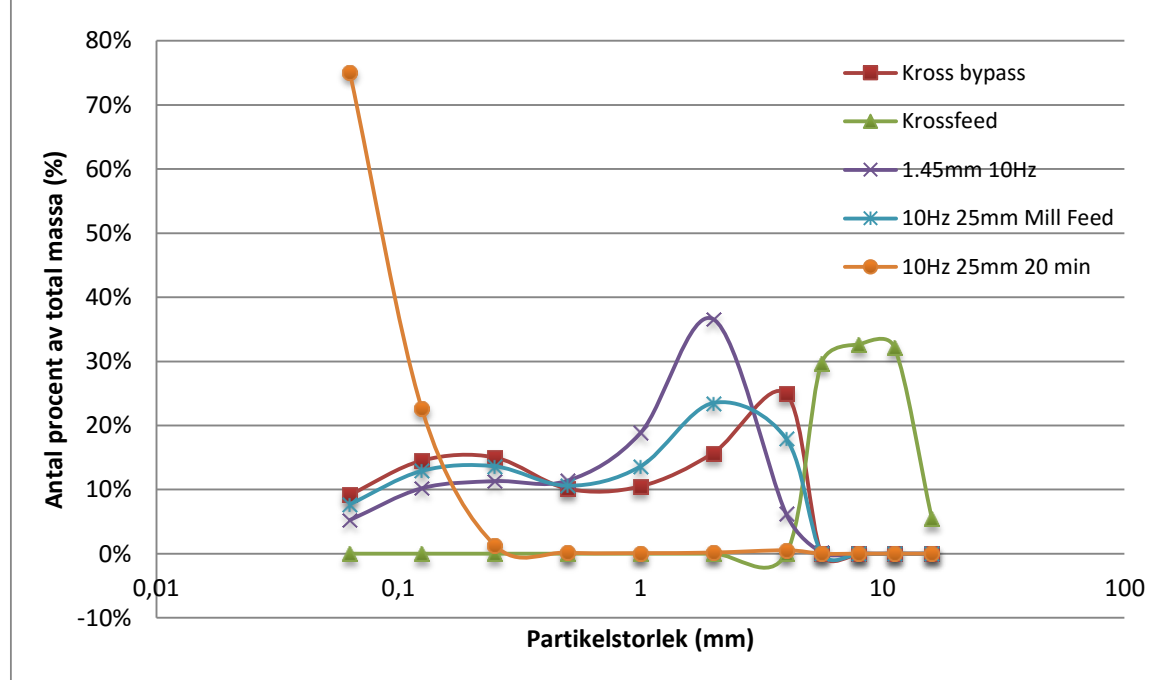
Frekvensdistribution



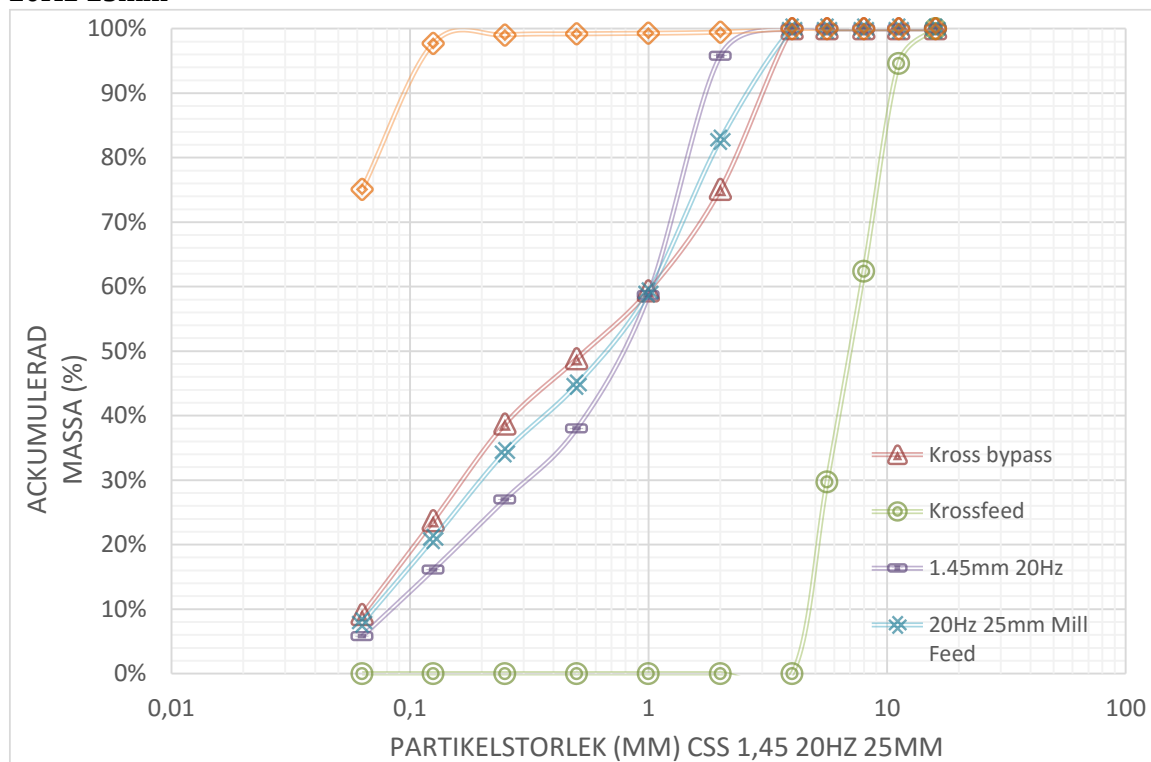
10Hz 25mm



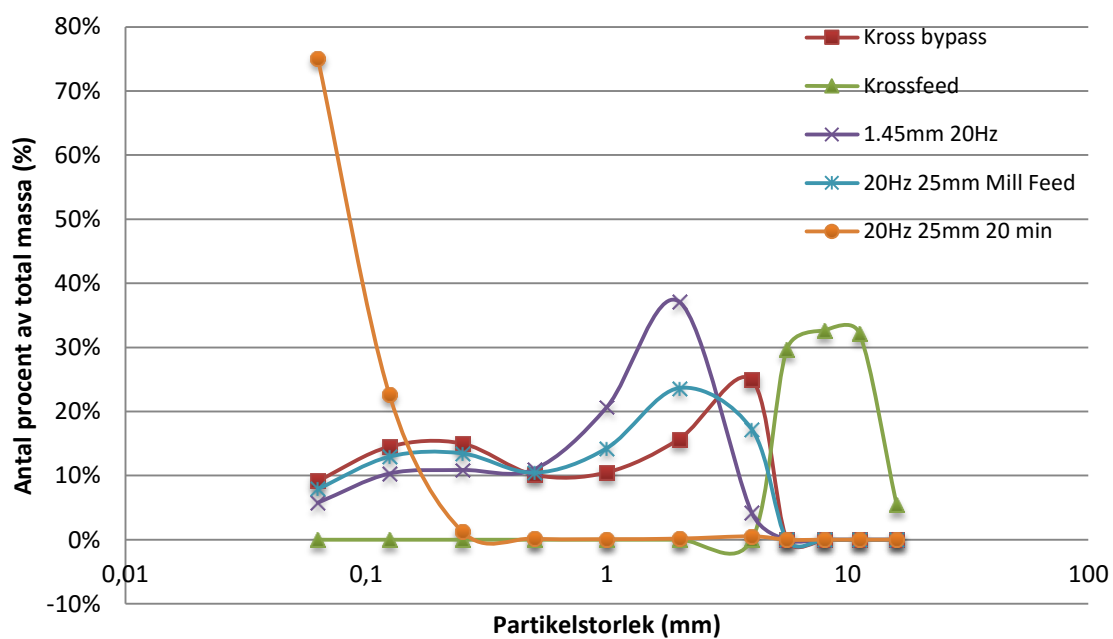
Frekvensdistribution



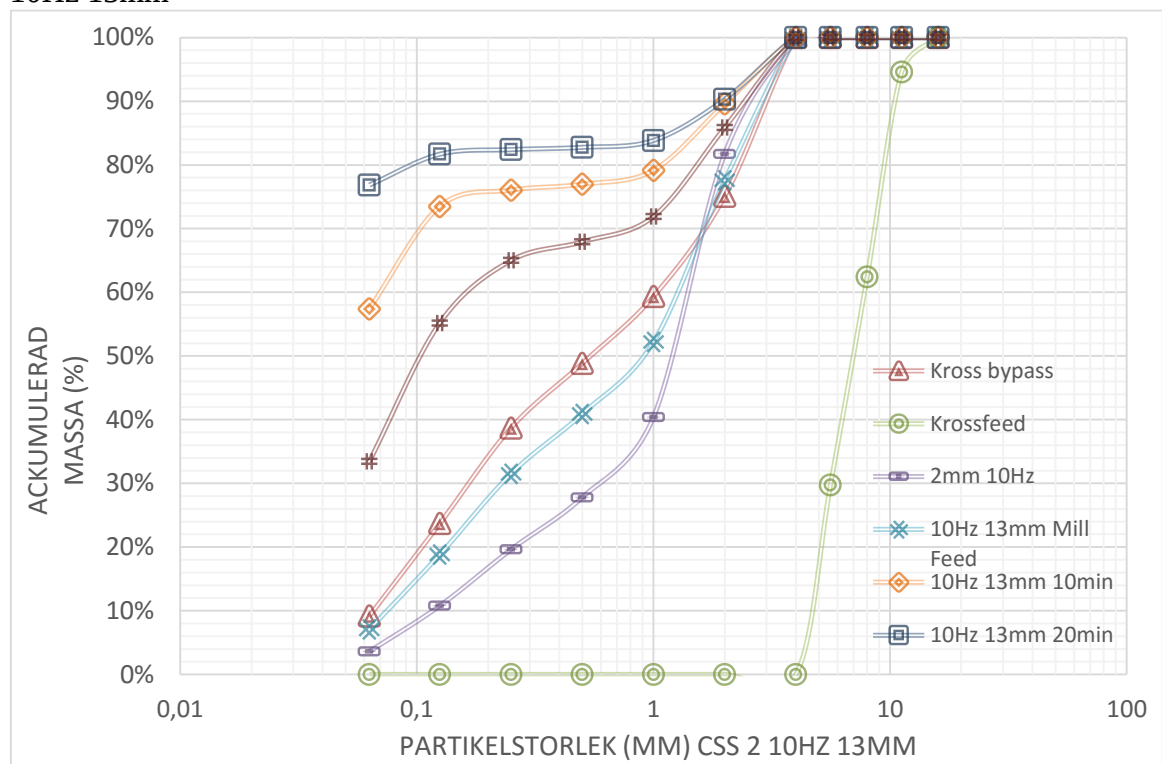
20Hz 25mm



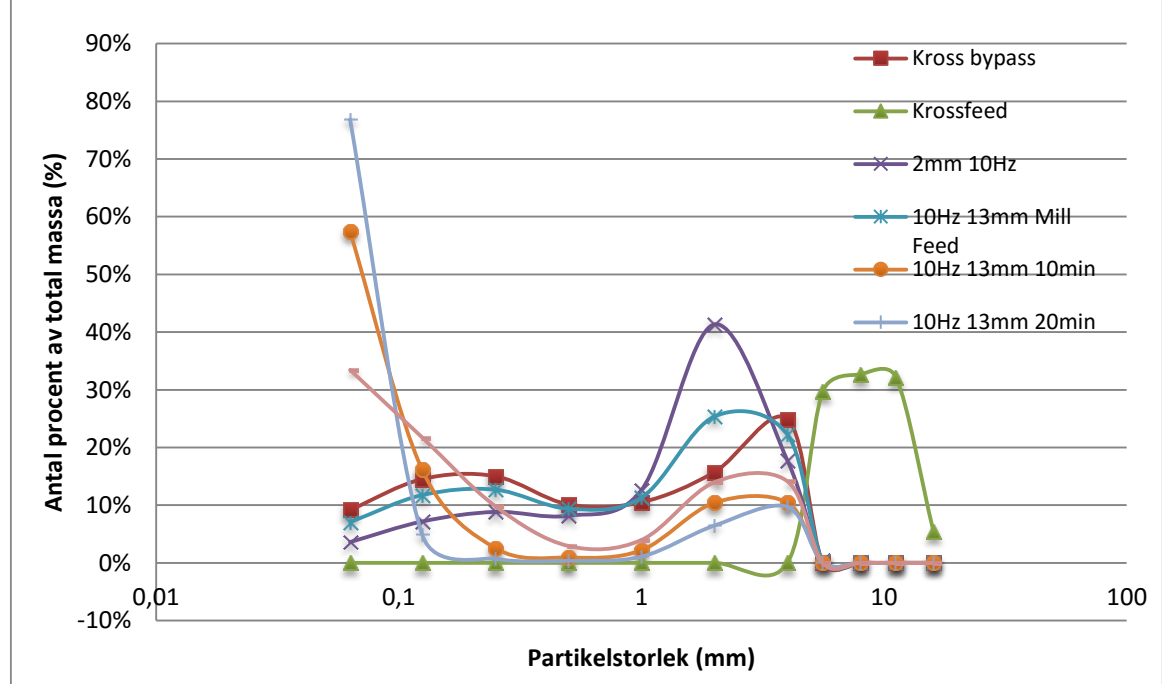
Frekvensdistribution



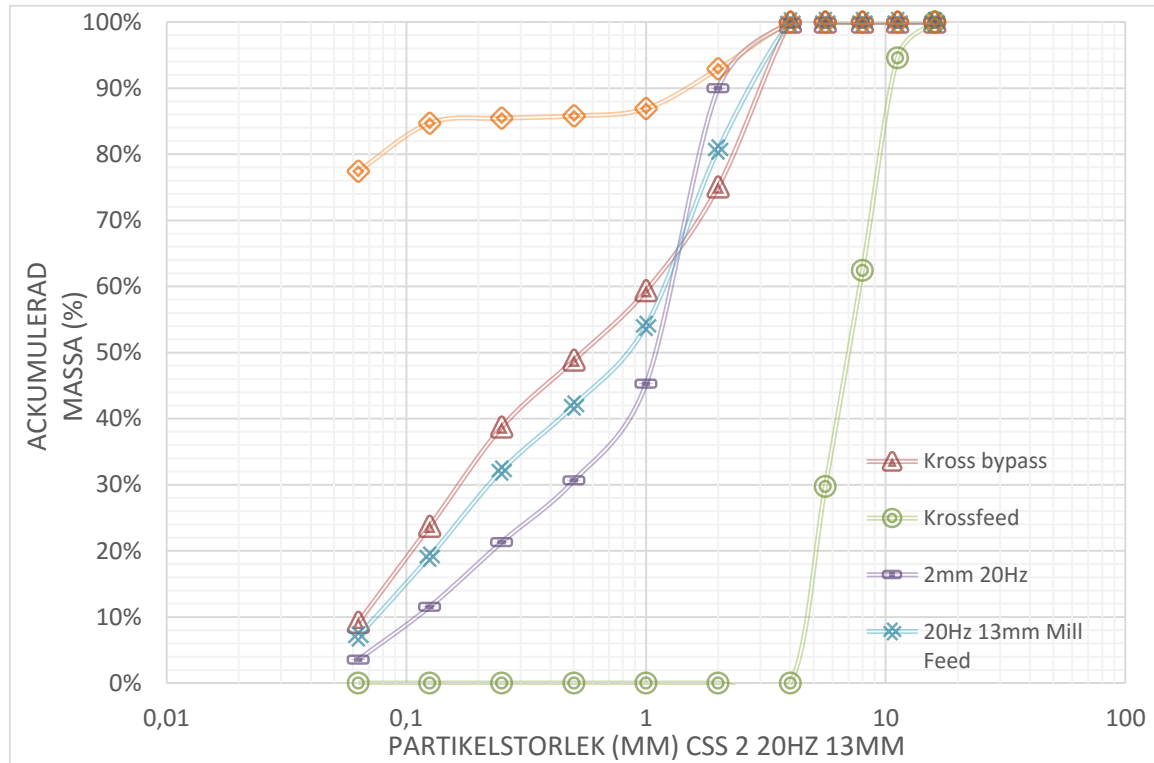
CSS 2 10Hz 13mm



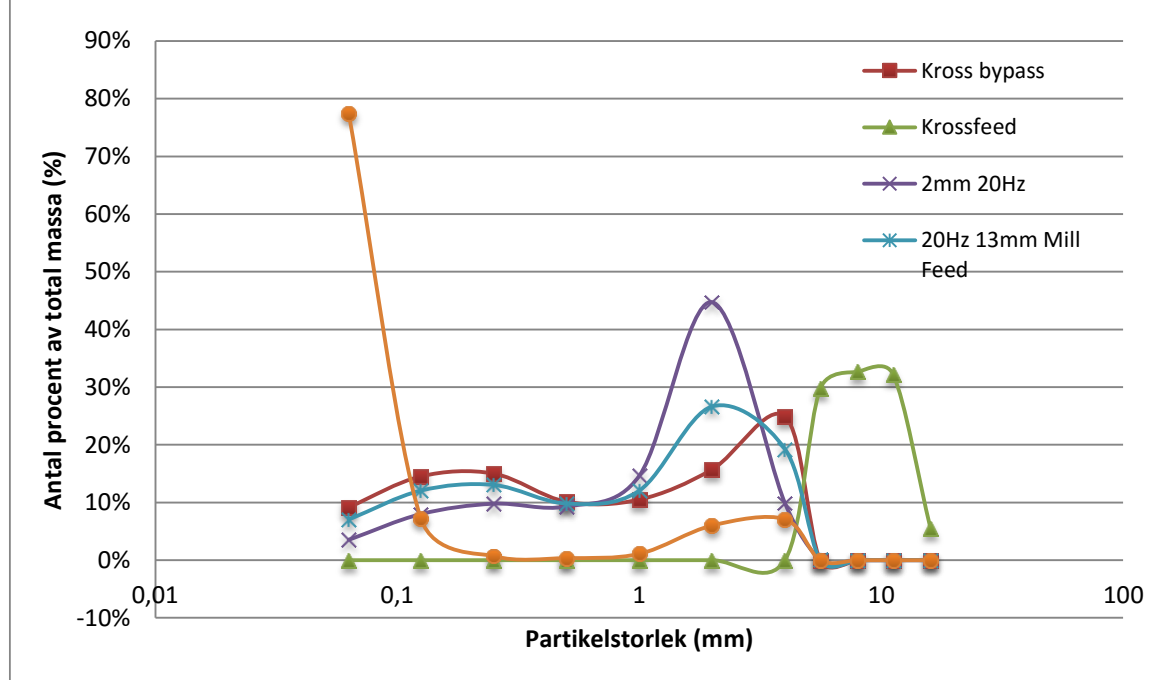
Frekvensdistribution



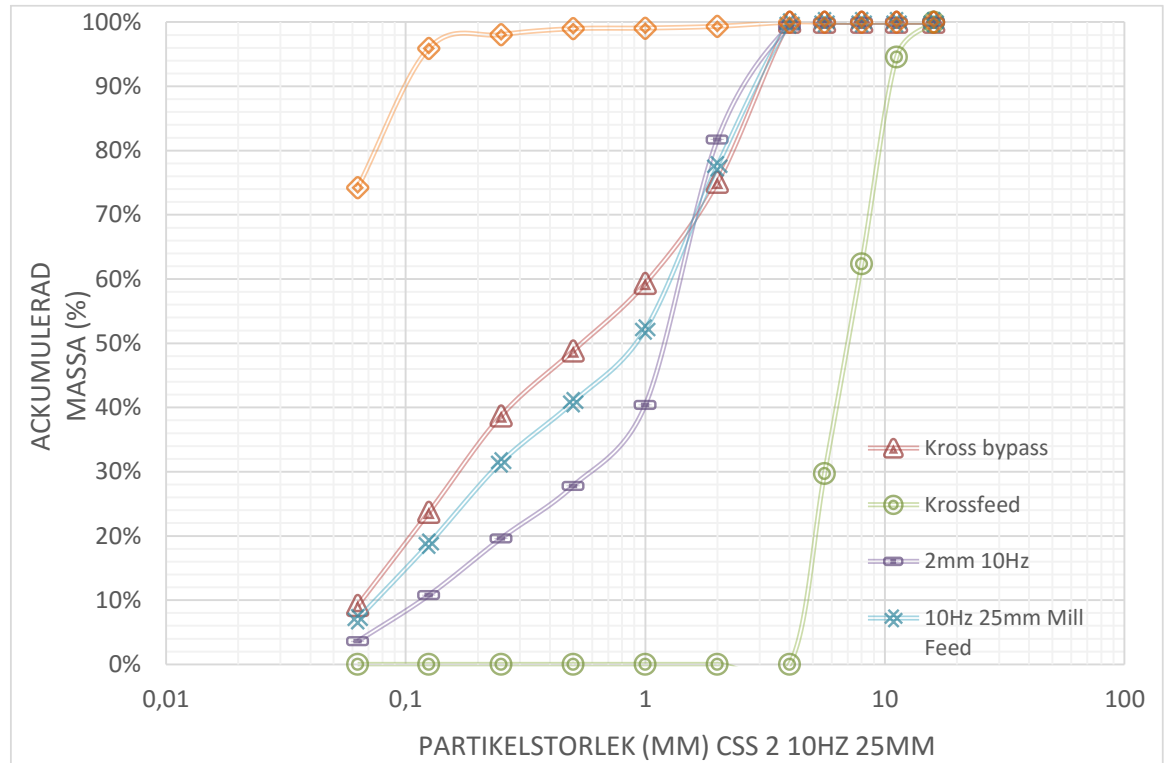
20Hz 13mm



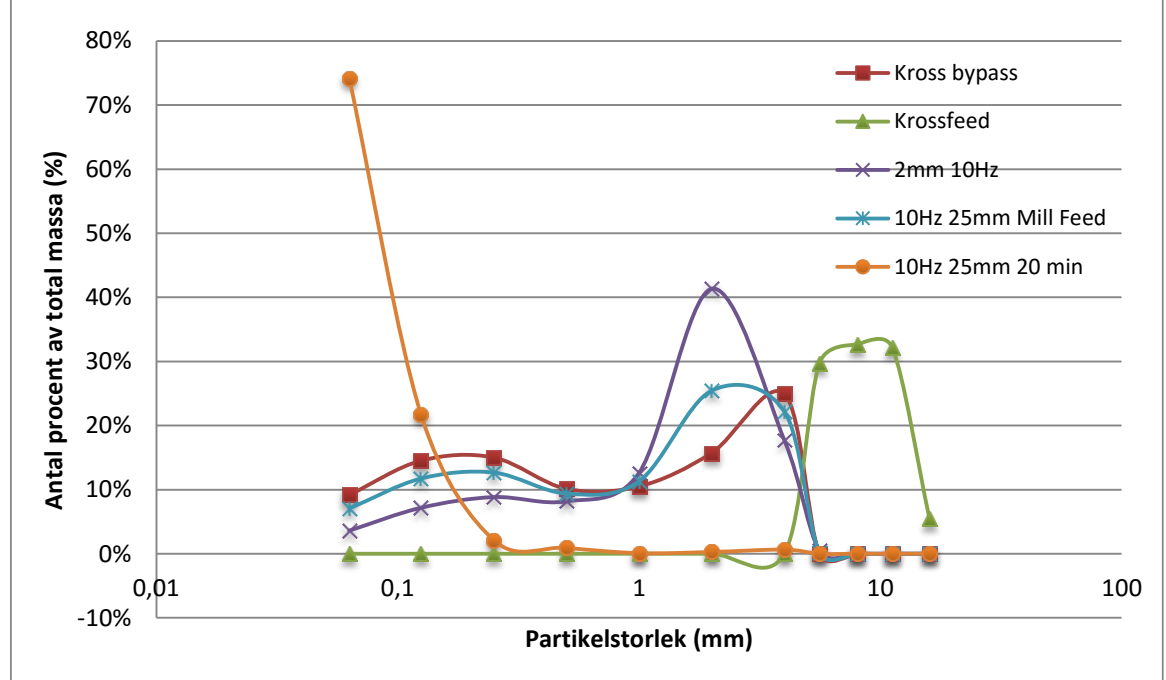
Frekvensdistribution



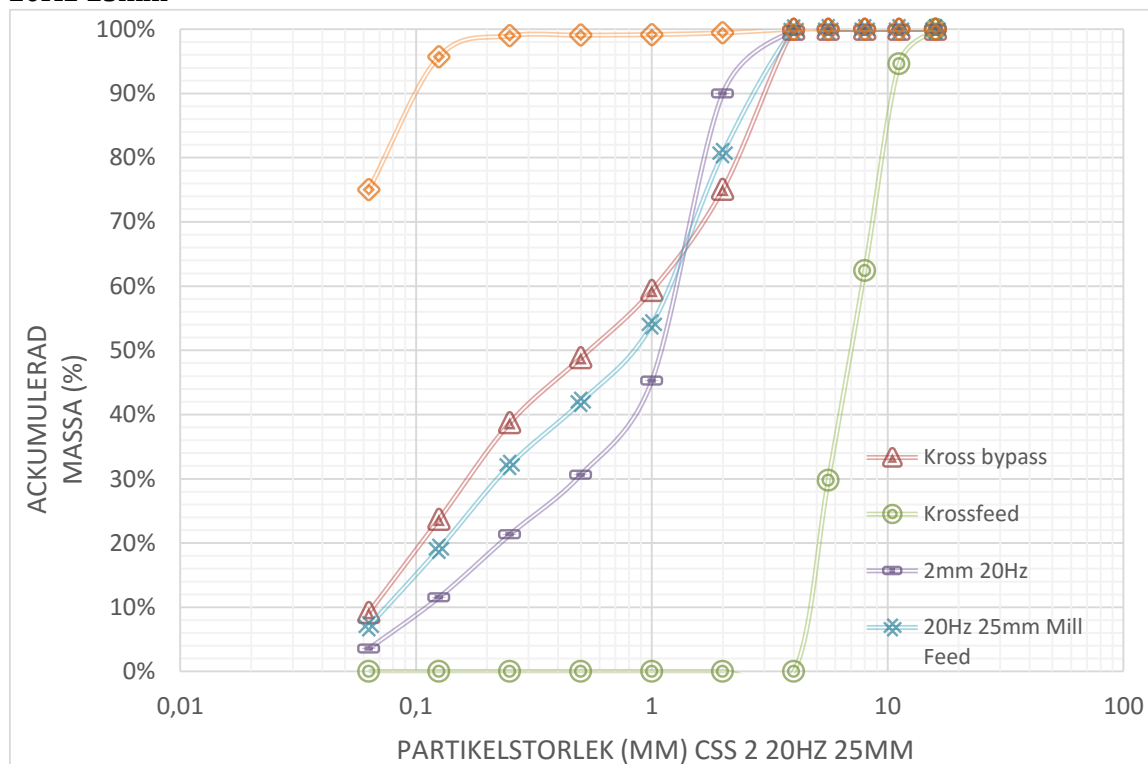
10Hz 25mm



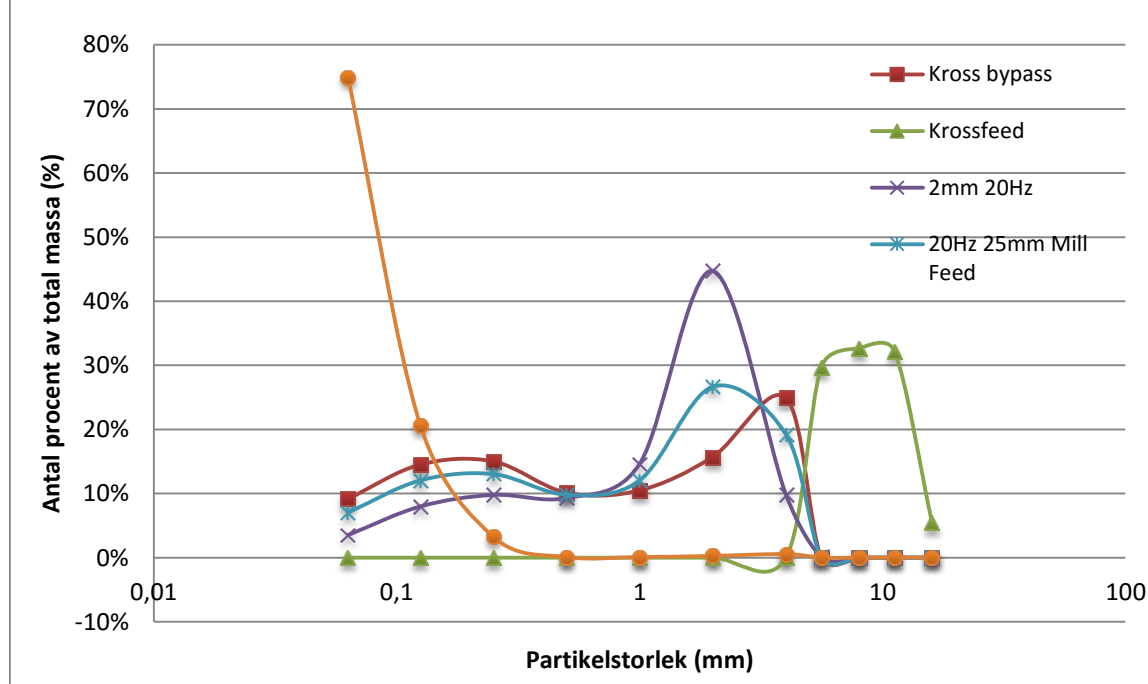
Frekvensdistribution



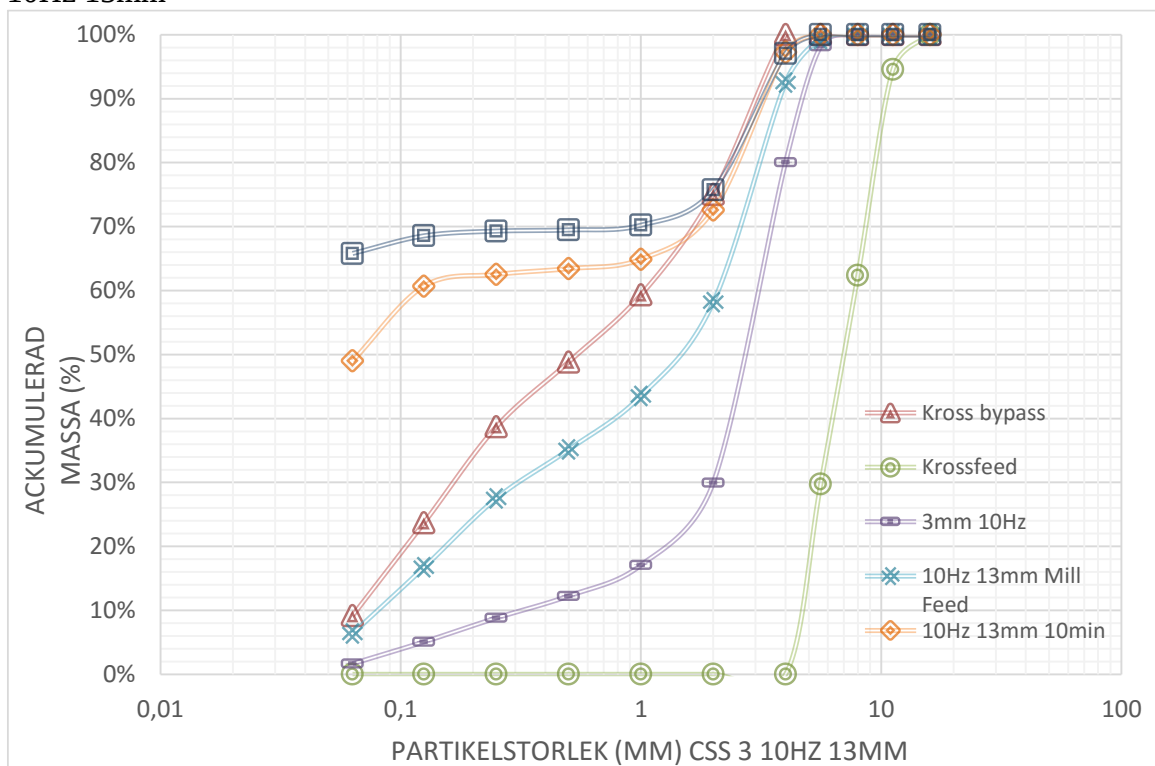
20Hz 25mm



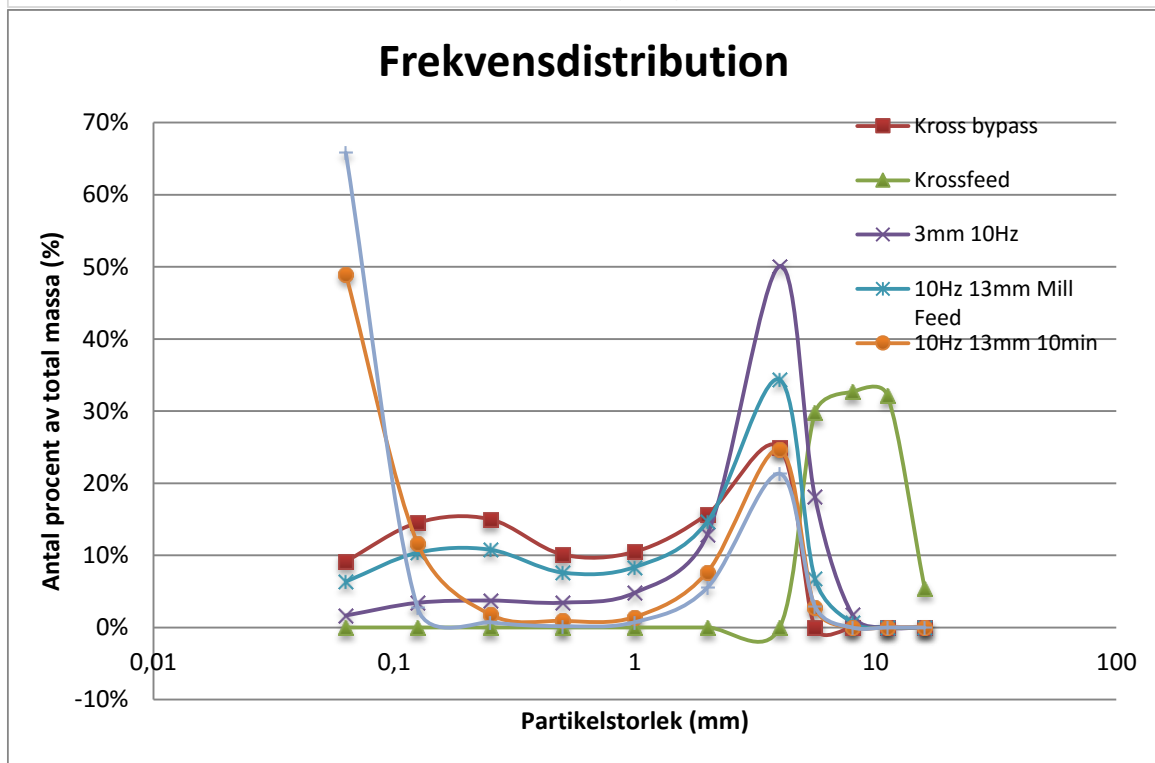
Frekvensdistribution



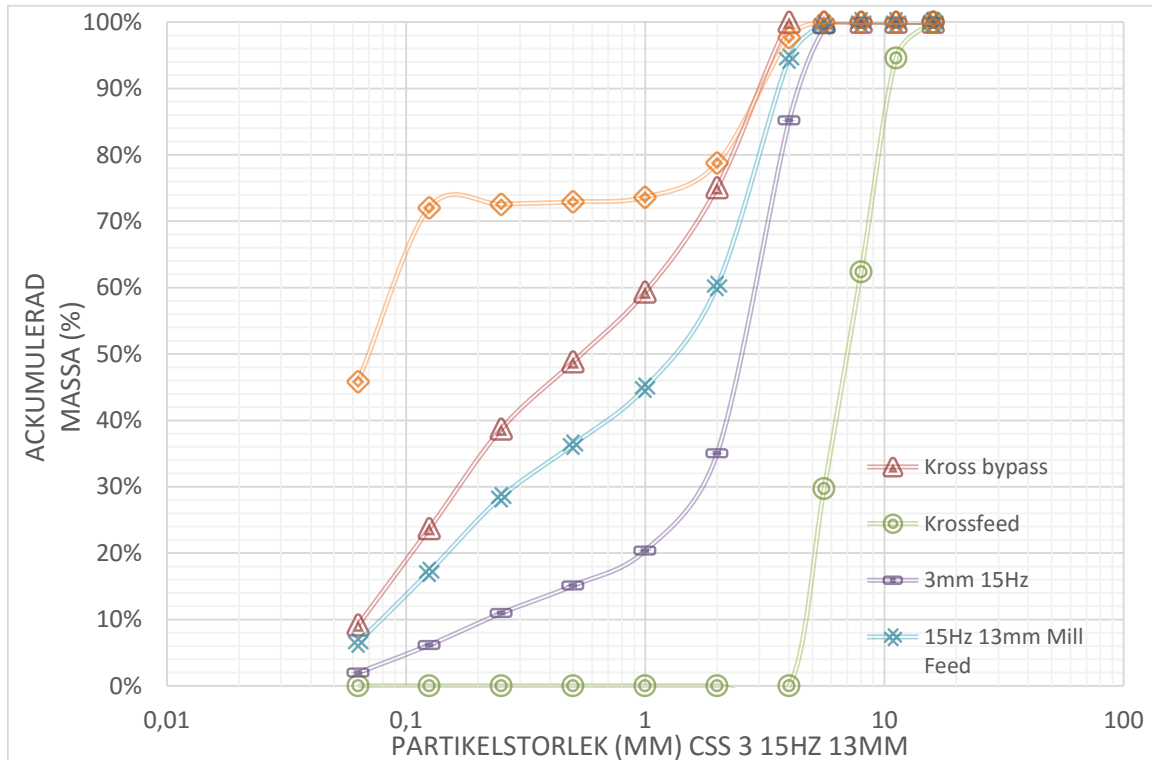
CSS 3 10Hz 13mm



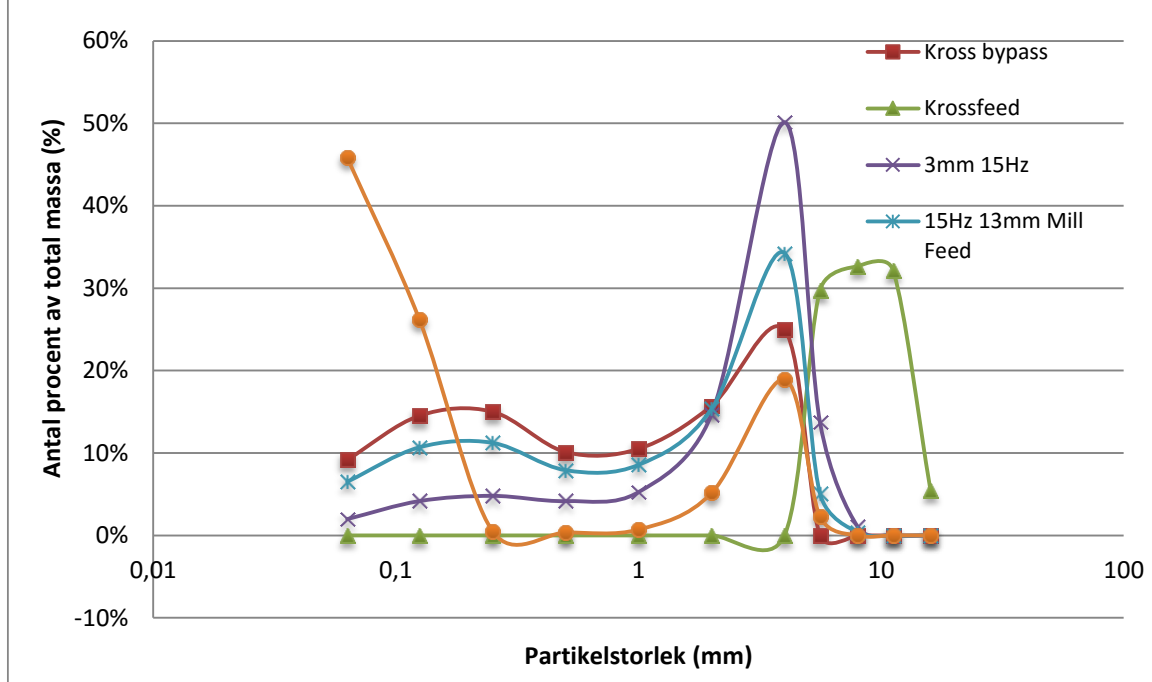
Frekvensdistribution



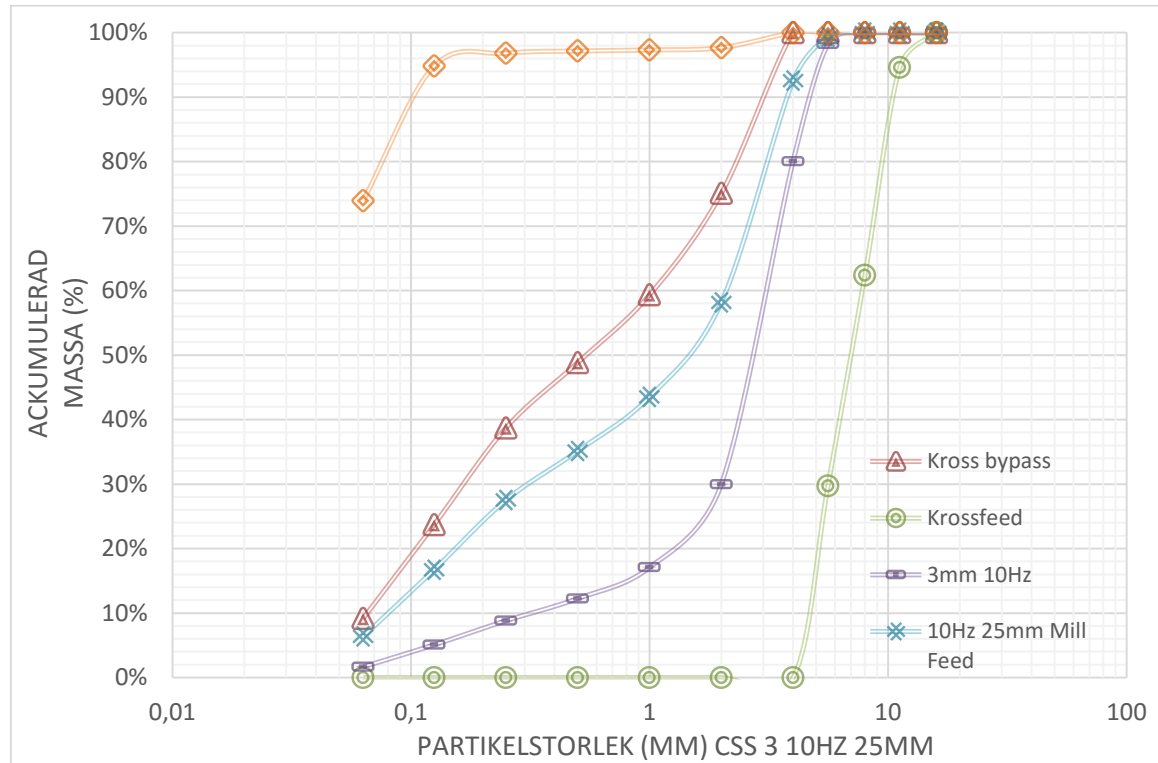
15Hz 13mm



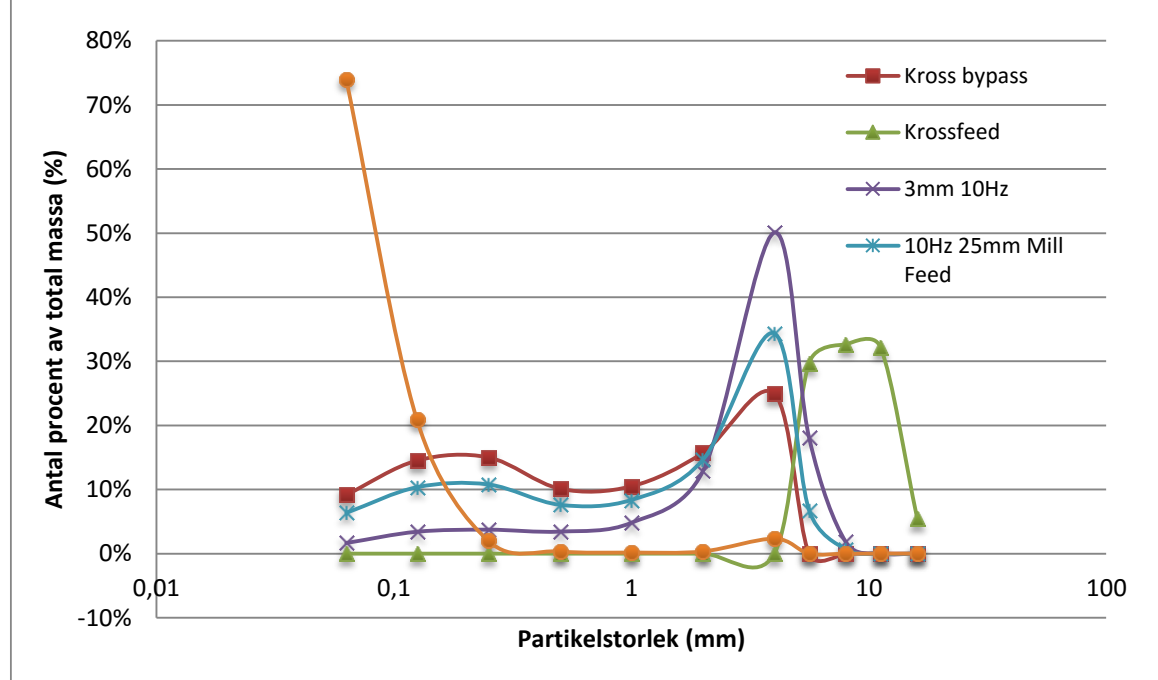
Frekvensdistribution



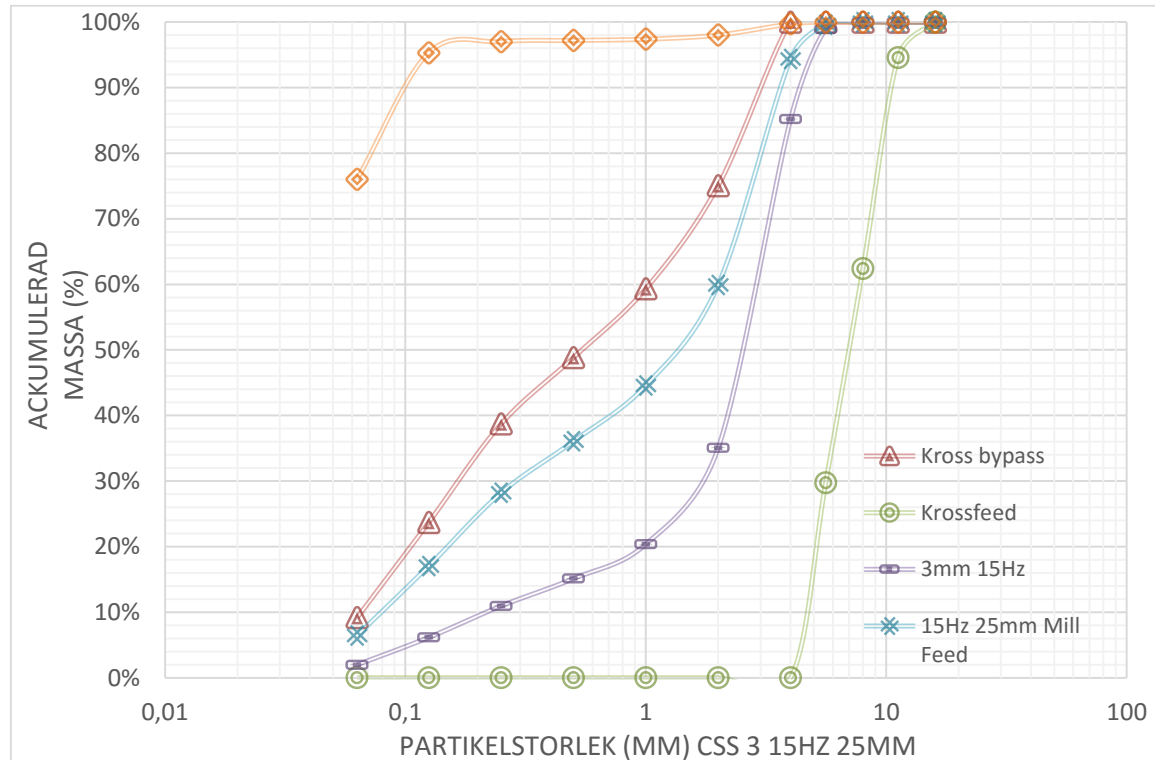
10Hz 25mm



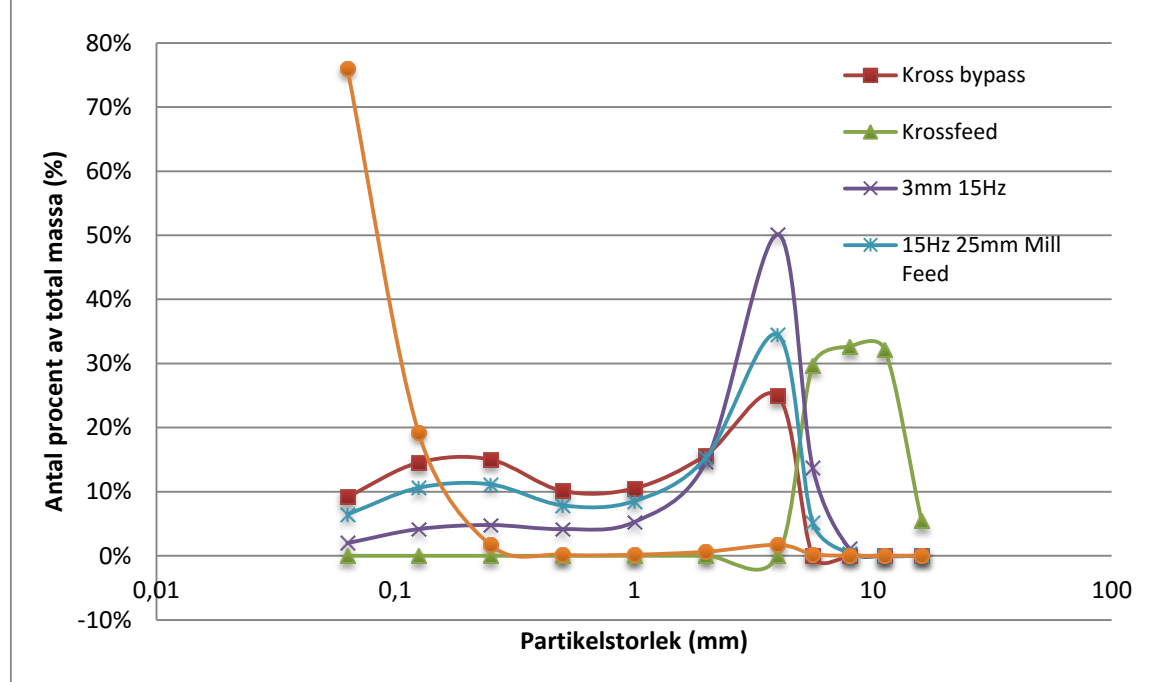
Frekvensdistribution



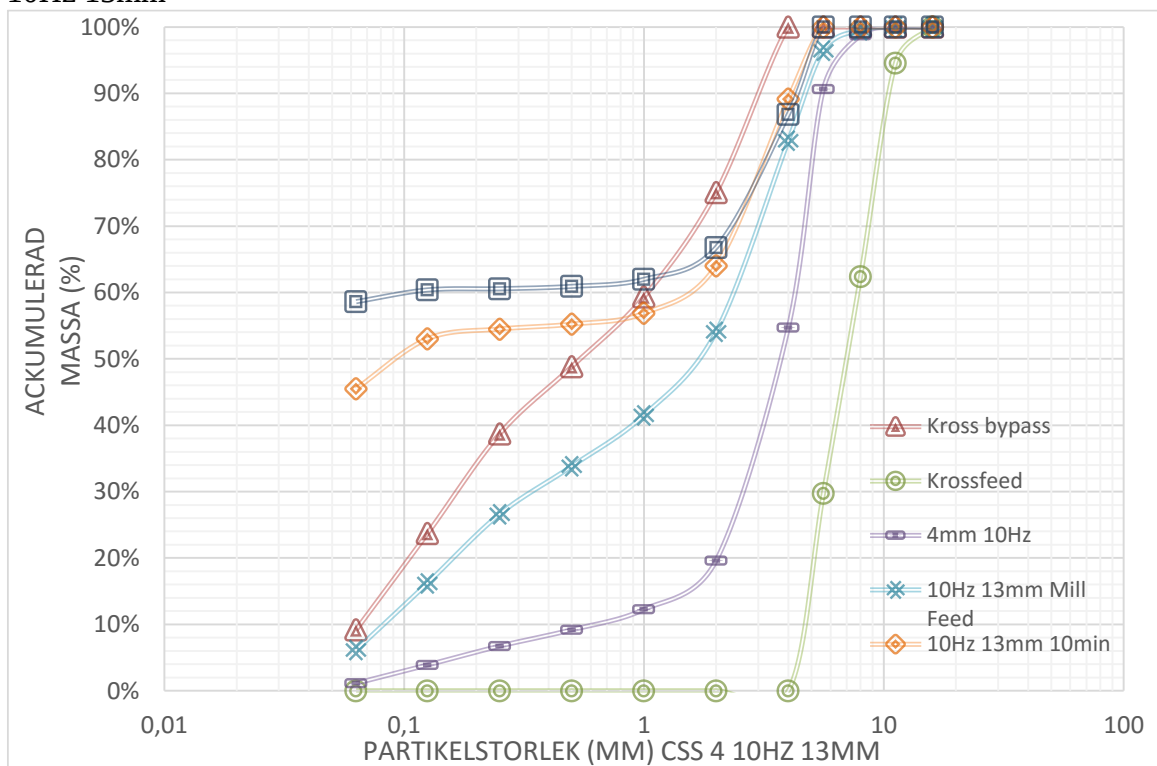
15Hz 25mm



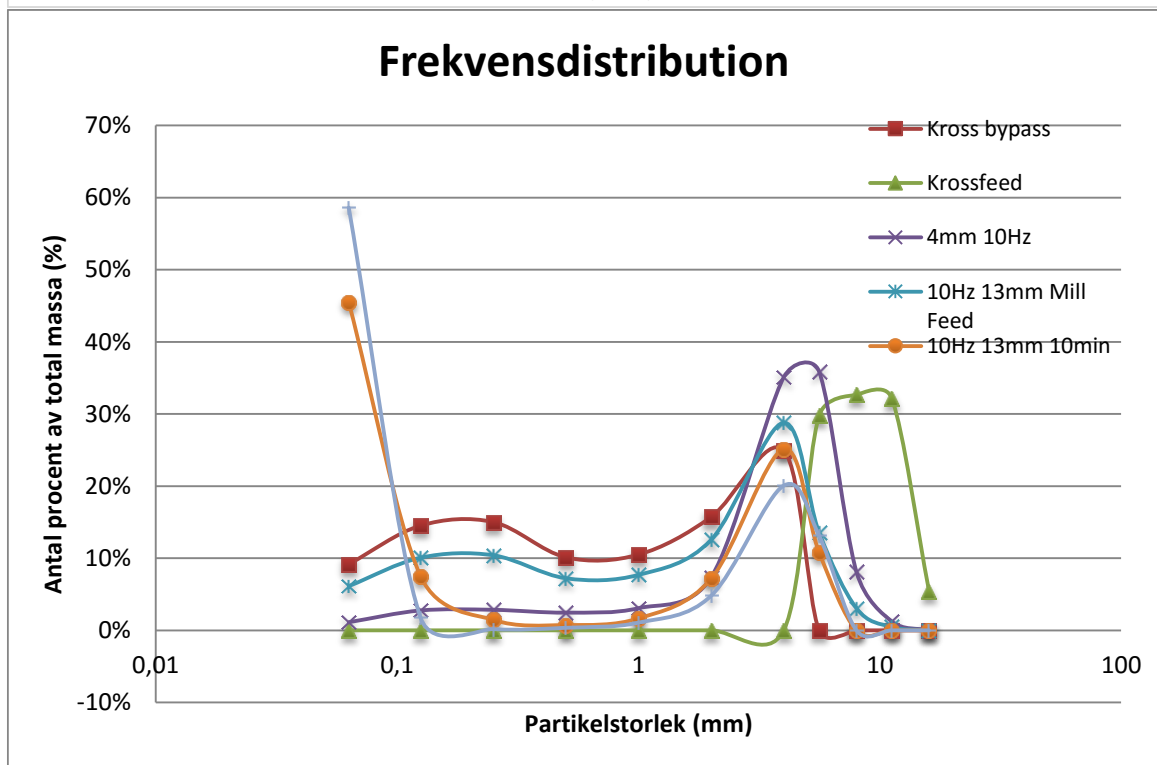
Frekvensdistribution



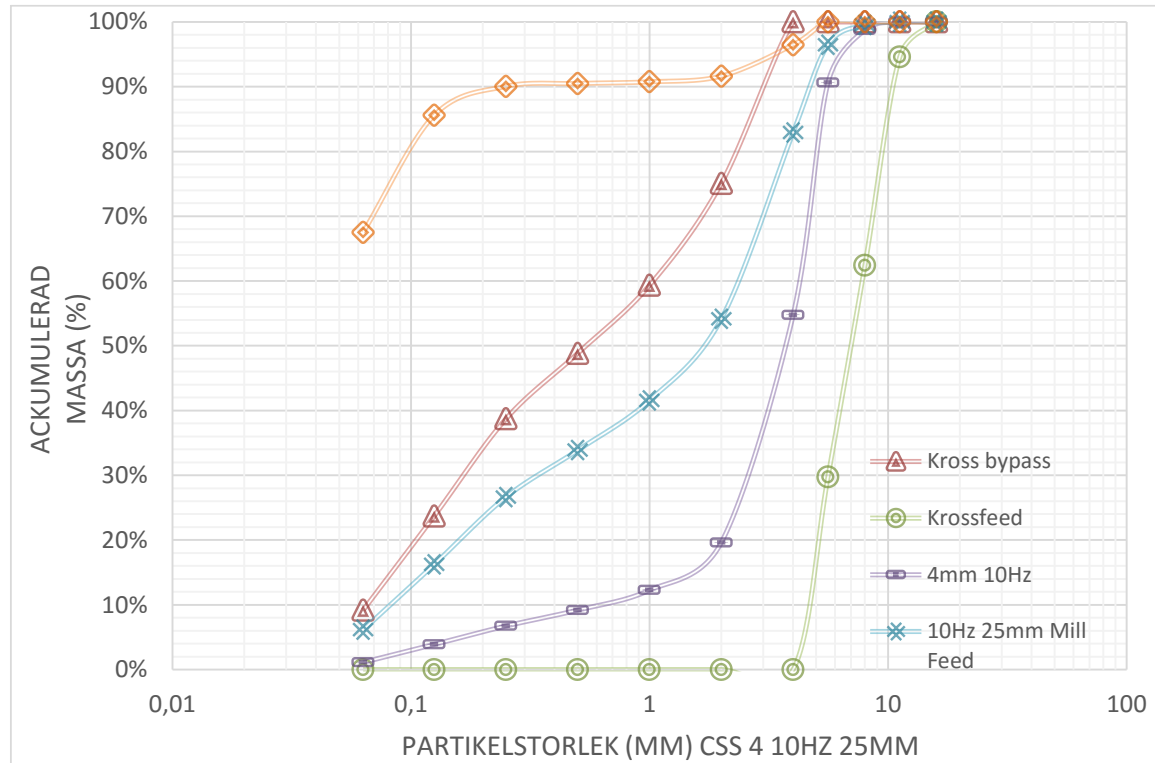
CSS 4 10Hz 13mm



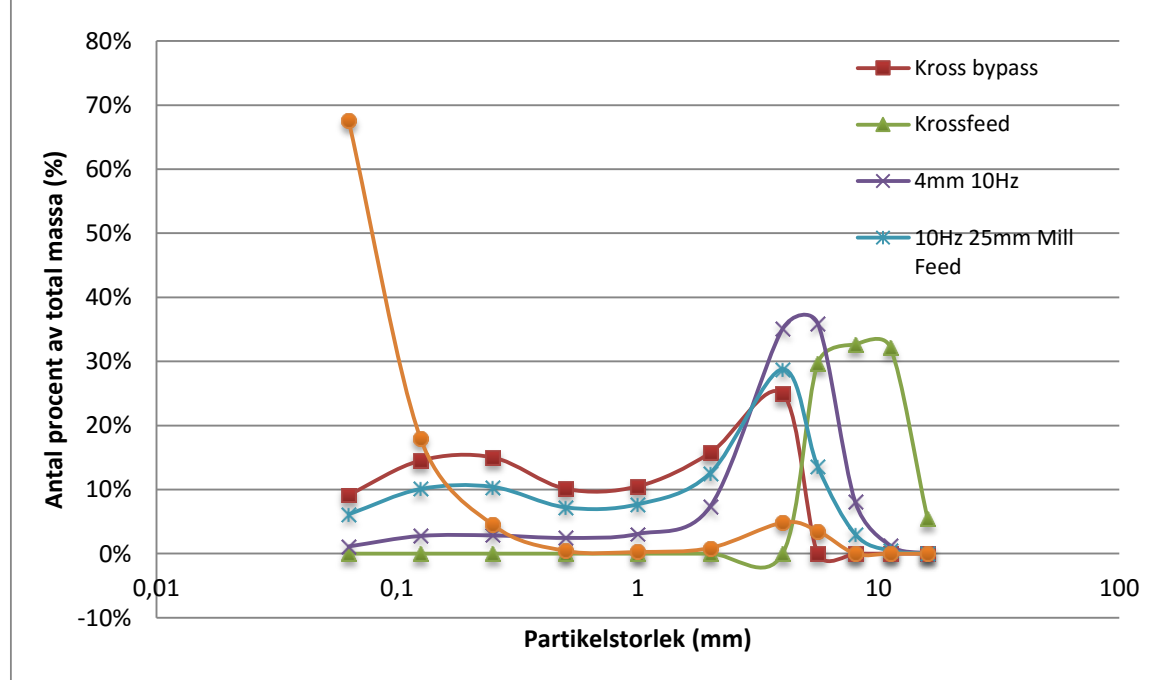
Frekvensdistribution



10Hz 25mm



Frekvensdistribution



Appendix G

Week report w.2

Victor Nilsson

Key activities accomplished last week

- Gruppdynamik med Roland Ericsson
- Skapat en tidslinje, planering
- Klar med planeringsrapporten
- Klart med gruppkontraktet

Focus activities this/next week

- Börja med konstruktionen av uppsamlingskärlet
- Arbeta med effektmätning
- Påbörja konstruktion av matare

Issues and risks

- Tid för handledaremöte
- Kunskapsbrist inom el

Mitigation plan

- Möte med handledare
- Läs på om trefas

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Week report w.3

Victor Nilsson

Key activities accomplished last week

- Konstruktion av uppsamlingskärlet påbörjat. Val av koncept och produktionsmetod
- Val av koncept och påbörjad utveckling av bandmatarsystem i samarbete med Bågenfelt & Hellström
- Test av kross

Issues and risks

- Uppsamlingskärlet funkar inte
- B&H tar tid, inte får den lösning vi vill ha

Focus activities this/next week

- Färdigställa uppsamlingskärlet
- Möte med B&H och beställa bandmatare med tillbehör
- Verifiera och beställa NI-moduler till effektmätning
- Påbörja byte av kablar till krossen mot skärmade

Mitigation plan

- Designa uppsamlingskärlet så att det eventuellt går att byta ut komponenter
- Ständig kontakt med B&H

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Week report w.4

Victor Nilsson

Key activities accomplished last week

- Ramen till uppsamlingskärlet nästan klar
- Dimensionering av flipp klar
- Möte med Bågenfelt
- Designat första version av fickan/hopper
- Beställt moduler till effektmätning
- Utvärdering av skärmning av kablar

Issues and risks

- Konstruktionen på flippen funkar inte
- Lång leveranstid på NI-modulerna
- För komplicerad bandmatrare

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Konstruera flipp
- Klar med uppsamlingskärlet
- Beställa bandmatrare
- Påbörja installation av effektmätare
- Skärma kablar

Mitigation plan

- 3D-printa flipp, för möjlighet till enkel ändring av geometri
- Börja planera för hur NI-modulerna ska implementeras
- Försöka ha i huvudet att bandmataren ska vara så enkel som möjligt

Week report w.5

Victor Nilsson

Key activities accomplished last week

- Effektmätningssmoduler beställda.
- Deal angående skärmade kablar klar med kraftkabel donerad och levererad bl.a.
- Stora framsteg med uppsamlingskärl och hopper.
- Bandmatrare beställd.

Issues and risks

- Lång leveranstid på bandmatrare.
- Problem med att höja krossen och implementera de övriga stödsystemen.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Installera effektmätningen med nya kablar.
- Höja krossen.
- Lära oss krossen.
- Slå fast testmetod tillsammans med Luleå.
- Färdigställa uppsamlingskärl och hopper.

Mitigation plan

- Krossa sten med krossen så fort som möjligt för att:
 - Tidigt upptäcka framtida problem.
 - "Få fart" på krossningen.

Week report w.6

Key activities accomplished last week

- Effektmättningsmoduler mottaget.
- Skärmade kablar och liknande mottaget.
- Stora framsteg med uppsamlingskärl och hopper.
- Bandmatrare beställd.
- Kört krossen själva.

Issues and risks

- Problem med att höja krossen och implementera de övriga stödsystemen.
- Tar lång tid att kontakta Luleå och bestämma testmetod.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Installera effektmätningen med nya kablar.
- Höja krossen.
- Slå fast testmetod tillsammans med Luleå.
- Färdigställa uppsamlingskärl och hopper.

Mitigation plan

- Krossa sten med krossen så fort som möjligt för att:
 - Tidigt upptäcka framtida problem.
 - "Få fart" på krossningen.
- Se till att kontakta Luleå fort.

Week report w.7

Key activities accomplished last week

- Bandmatrare hämtad.
- Delar till höjning av krossen klara.
- Stora framsteg med Roland-> bra koll på vad som ska göras framöver.
- Effektmätning är på gång bra.
- Uppsamlingskärl snart klart.
- Filipstad bokat på tisdag ang. malning istället för Luleå.

Issues and risks

- Problem med att höja krossen och implementera de övriga stödsystemen.
- Många bollar i luften nu.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Åka till Filipstad.
- Ta fram och bygga vagn till hopper & bandmatrare.
- Ta fram material genom delning och siktning.
- Ta fram testplan och kontakta Zinkgruvan.

Mitigation plan

- Vara effektiva och jobba hårt.
- Lägga ner tillräckligt med tid i detta skede.

Week report w.8

Key activities accomplished last week

- Filipstad har bekräftats efter besök. Mycket bra tillgång till ett bra labb.
- Mobil effektmätning ordnad för malförsöken.
- Fästen till bandmatrare och hopper klara. Ramen påbörjad.
- Krossen har höjts.
- Elskåpet har gjorts om. Väntar på bekräftelse från elektriker som ska kontrollera kopplingarna.
- Testplan har påbörjats.

Issues and risks

- Många bollar i luften nu.
- Färdigställa allt->komma igång med tester.
- Fullpackat schema i vårt eget labb.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Ta fram och bygga vagn till hopper & bandmatrare.
- Ta fram material genom delning och siktning.
- Börja med LabView.
- Färdigställa hela krossprocessen.

Mitigation plan

- Vara effektiva och jobba hårt.
- Lägga ner tillräckligt med tid i detta skede.
- Planera labbschema mellan detta projekt, L. Guldrys projekt samt M. Bengtssons (genom AG) noggrant.

Week report w.9

Key activities accomplished last week

- Bandmatrare är klar att köras med frekvensare. Ska endast ställas in.
- Upppsamlingskärlet är klart.
- Effektmätningen är fungerande i sig.
- Skärmning av kablar är klart.
- Delning och siktning av LKAB-malm har gjorts, den har en jämn och bra storleksfördelning.

Issues and risks

- Färdigställa allt->komma igång med tester.
- Fullpackat schema i vårt eget labb.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Färdigställa hela krossprocessen.
- Bestämma fullständig provplan.
- Krossa material.
- Bestämma tid med Filipstad.

Mitigation plan

- Vara effektiva och jobba hårt.
- Lägga ner tillräckligt med tid i detta skede.

Week report w.10

Key activities accomplished last week

- Tid med Filipstad har bestämts 6-8 april
- Provplan har bestämts
- Material till tester har delats och siktats fram
- LAbVIEW är färdigt för att börja krosstester

Issues and risks

- Problem med krossprocessen -> krosstester kan inte påbörjas -> inget material till Filipstad
- Materialbrist
- Kulor fås inte fram i tid

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Testköra kross och lära oss exakt hur vi skall göra testerna.
- Krossa material.
- Få fram kulor till malning antingen köpa eller från Maggotteaux

Mitigation plan

- Vara effektiva och jobba hårt.
- Reservmaterial har siktats fram
- Två extradagar i nästa vecka, måndag och tisdag, har lämnats öppna för att kunna göra krosstester
- Det finns malmedia i Filipstad som går att använda

Week report w.11

Key activities accomplished last week

- Samtliga krosstester utförda. Effektgraferna samt värden finns sparade.
- Har varit uppe i Filipstad och utfört samtliga maltester. Den bärbara effektutrustningen (Dranetz) kunde ej användas. Istället mättes hastigheten med en Tachometer.

Issues and risks

- Att inte all data går att nyttja eller att någonting saknas. Det blir därmed svårt att analysera malresultaten, med tanke på att partikelstorleken var svår att undersöka med siktning.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Eventuellt skicka maltesterna för laserundersökning.
- Utvärdera samtliga tester och resultat.
- Analysera felkällor

Mitigation plan

- Vara effektiva och fokuserade då "outcom:en" för hela projektet baseras på resultaten.
- Bonds ekvation kan användas för att beräkna förbrukad effekt.

Week report w.12

Key activities accomplished last week

- Arbetat fokuserat med slutrapporten. Har samlat tidigare dokument samt fördelat resterande delar som går att skriva.
- Kollat lite på testresultaten och dess grafer.

Issues and risks

- Att testresultaten inte går att utvärdera utan att skicka testerna på laserprovning och att detta tar längre tid än förväntat.

Focus activities this/next week

- Eventuellt skicka maltesterna för laserundersökning.
- Utvärdera samtliga tester och resultat.
- Fortsätta med rapporten.

Mitigation plan

- Vara effektiva och fokuserade då "outcom:en" för hela projektet baseras på resultaten.
- Bonds ekvation kan användas för att beräkna förbrukad effekt.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Week report w.13

Key activities accomplished last week

- Arbetat fokuserat med slutrapporten. Har gått igenom det som skrivits under veckan och fördelat nya uppgifter i rapporten.
- Kollat lite på testresultaten och dess grafer.

Issues and risks

- Att vi får svårigheter och problem med rapporten, både vad gäller struktur och text.

Focus activities this/next week

- Utvärdera samtliga tester och resultat ännu mer.
- Fortsätta med rapporten.

Mitigation plan

- Vara effektiva och fokuserade då "outcom:en" för hela projektet baseras på resultaten.
- Bonds ekvation kan användas för att beräkna förbrukad effekt.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Week report w.14

Key activities accomplished last week

- Arbetat fokuserat med slutrapporten. Har suttit och skrivits tillsammans samt delat ut arbete över helgen.
- Börjat räkna på testresultaten, nu väntar vi bara på Wi från Niva för att kunna räkna klart.

Issues and risks

- Att vi får svårigheter och problem med rapporten, både vad gäller struktur och text.
- Att Wi från Niva dröjer för länge så det blir tajt om tid att analysera resultaten innan rapporten ska in.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Utvärdera samtliga tester och resultat ännu mer.
- Fortsätta med rapporten.
- Få ett utkast klart (resultat kommer ej vara med) på måndag.

Mitigation plan

- Vara effektiva och fokuserade då "outcom:en" för hela projektet baseras på resultaten.
- Analysera de allmänna resultaten så gott det går utan Wi.

Week report w.15

Key activities accomplished last week

- Arbetat fokuserat med slutrapporten. Har suttit och skrivits tillsammans samt delat ut arbete över helgen.
- Räknat samt analyserat slutresultaten

Issues and risks

- Att vi får svårigheter och problem med rapporten, både vad gäller struktur och text.
- Att Magnus ej har tid.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Focus activities this/next week

- Utvärdera samtliga tester och resultat ännu mer.
- Fortsätta med rapporten så den blir färdig, endast det sista lilla finliret kvar efter helgen.
- Få till möte med Magnus, Johannes och Marcus om

Mitigation plan

- Vara effektiva och fokuserade då "outcom:en" för hela projektet baseras på resultaten.
- Mötet tas med endast Johannes och Marcus.

Week report w.16

Key activities accomplished last week

- Arbetat fokuserat med slutrapporten. Har suttit och skrivits tillsammans.
- Resultaten har diskuterats med handledare.

Issues and risks

- Att vi får svårigheter och problem med rapporten, både vad gäller struktur och text.

Focus activities this/next week

- Skriva färdigt rapporten så att den kan gås igenom inför inlämningen på tisdag.

Mitigation plan

- Sitta hela tisdagen vilket inte är planen egentligen.

Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin

Period 1: 18/1-14/2

Projektledare: Albin Gröndahl

Sekreterare: Victor Nilsson

Period 2: 15/2-20/3

Projektledare: Mahmoud Jeresi

Sekreterare: Albin Gröndahl

Period 3: 21/3-1/5

Projektledare: Johan Karlsson

Sekreterare: Mahmoud Jeresi

Period 4: 2/5-27/5

Projektledare: Victor Nilsson

Sekreterare: Johan Karlsson

Appendix H

Bidragsrapport grupp PPUX03-16-10

Handledare: Magnus Evertsson, Johannes Quist samt Marcus Johansson

Examinator: Erik Hulthén

Gruppmedlemmarnas bidrag bedöms på en skala 0-3 där 3 är störst bidrag och 0 minst. I Tabell 1 ses bidragsanalysen för projektet. Det kan noteras att samtliga gruppmedlemmar fått ungefär samma totalbidrag. Detta är något som gruppen upplever överensstämmer med hur arbetet har sett ut då samtliga medlemmar närvarat vid i stort sett varje tillfälle. Siffrorna ska dock inte ses som absolut sanning då det har varit svårt att vikta i vissa fall samt att olika delar av projektet har tagit olika lång tid men i tabellen har de ändå viktats lika mycket. Det kan sammanfattningsvis alltså sägas att gruppens uppfattning är att samarbetet har fungerat bra och att alla gruppmedlemmar har bidragit till projektet i samma utsträckning.

Tabell 10. Bidragsanalys.

Aktivitet	Johan	Mahmoud	Victor	Albin
Bandmatare och hopper	0	2	0	3
Uppsamlingsenhet	3	0	2	0
El och LabVIEW	0	3	3	1
Krosstest	3	3	3	3
Siktning	1	0	0	3
Neddelning	3	1	1	1
Malningstester	3	3	3	3
Utformning av provplan	3	3	3	3
Skriva rapport	3	3	3	3
Granska rapport	2	3	3	1
Analysera resultat	2	0	1	3
Summering	23	21	22	24

Rollerna som projektledare och sekreterare har varit roterande i gruppen enligt följande ordning:

Period 1: 18/1-14/2

Projektledare: Albin Gröndahl

Sekreterare: Victor Nilsson

Period 2: 15/2-20/3

Projektledare: Mahmoud Jeresi

Sekreterare: Albin Gröndahl

Period 3: 21/3-1/5

Projektledare: Johan Karlsson

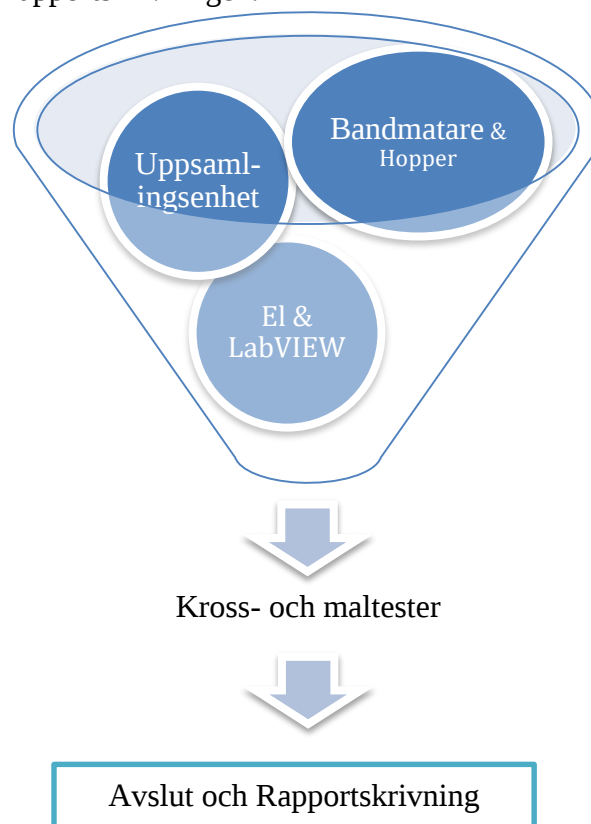
Sekreterare: Mahmoud Jeresi

Period 4: 2/5-27/5

Projektledare: Victor Nilsson

Sekreterare: Johan Karlsson

På så sätt har det huvudsakliga ansvaret roterat jämnt över tiden. Utöver det har varje gruppmedlem tagit ansvar för minst ett delprojekt, såsom elkoppling och LabVIEW, bandmatrare och hopper, uppsamlingsenhet, delning, rapportskrivning osv. Utformningen av arbetslayouten kan sägas ha följt en trattmodell där kandidatarbetet påbörjades med en upprustning av labbet där kandidatgruppen till en början delades in i två delar, en grupp som bygger hopper och införskaffar bandmatrare (Albin och Mahmoud) och en grupp som bygger uppsamlingsenheten (Johan och Victor). Därefter påbörjades arbetet med elkoppling och LabVIEW, vilket Mahmoud och Victor ansvarade för. Albin och Johan slutförde då de resterande delarna med bandmatrare och hopper samt uppsamlingsenhet. Mot mitten och sedan slutet av projekttiden återförenades gruppen igen för att tillsammans utföra kross- och maltesterna och därefter rapportskrivningen.



Inom varje delgrupp under projektgången har respektive delgrupp planerat och hämtat information själva. Därefter redogjordes planeringen och informationen för resterande gruppmedlemmar för koncept- och metodval.

Som visades i bidragstabellen ovan så var bidraget generellt väldigt jämnt och detta med avseende på flera aspekter såsom bidraget för skapande av modeller och idéer, analys av projektrelaterat material samt diskussionsbidrag för att sedan dra enhetliga slutsatser. De huvudansvariga författarna av avsnitten i rapporten har varit enligt bidragstabellen, där varje gruppmedlem tagit huvudansvaret för delarna som han varit mest engagerad i. Det slutgiltiga ansvaret för rapporten har därmed varit på samtliga gruppmedlemmar, med Mahmoud och Victor som huvudansvariga för granskning av rapport.