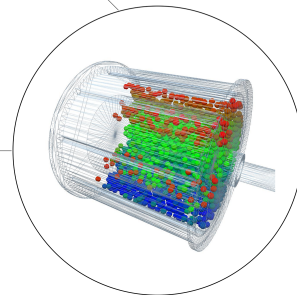
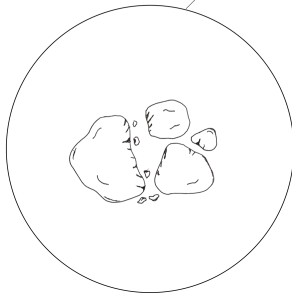
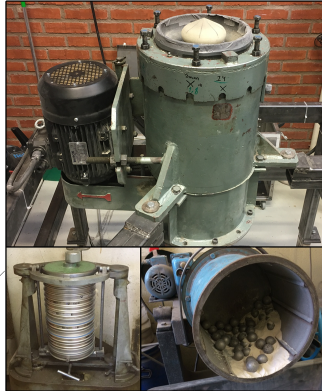




CHALMERS



Energioptimering av krossning och malning inom gruvindustrin

Sönderdelningsförmåga av kopparslagg i konkross och kulkvarn

Kandidatarbete inom Chalmers Rock Processing Systems

Johan Andersson
Viktor Rask-Andersen
Anna Rydin

Handledare: Gauti Asbjörnsson

Energioptimering av krossning och malning inom gruvindustrin

Sönderdelningsförmåga av kopparslagg i konkross och kulkvarn

Johan Andersson
Viktor Rask-Andersen
Anna Rydin

Handledare: Gauti Asbjörnsson



CHALMERS

Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling
Kandidatarbete inom Chalmers Rock Processing Systems
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2017

Förord

Detta kandidatarbete har utförts på uppdrag av forskargruppen *Chalmers Rock Processing Systems* vid institutionen för Produkt- och produktionsutveckling på Chalmers tekniska högskola under våren 2017. Arbetet har utförts av två teknologer från Maskinteknologsektionen och en teknolog från Fysikteknologsektionen. Viktiga personer för projektet är främst handledare Doktor Gauti Asbjörnsson, Doktor Johannes Quist, Albin Gröndahl och examinator Biträdande professor Magnus Evertsson.

Ett stort tack till vår handledare Doktor Gauti Asbjörnsson, som har hjälpt och stöttat oss genom hela projektet. Tack också till Doktor Johannes Quist för all kunskap och alla råd vi fått. Albin Gröndahl, tack för ditt engagemang och alla svar på våra frågor.

Dessutom vill vi rikta ett extra tack till Doktorand Simon Grunditz, Jan Tillberg på Boliden för material och hjälp, Minpro Recycling, Lars Lagnevall på Swerock i Källered och alla som har hjälpt oss på vägen när det har strulat.

Projektgruppen har namnet *Kombarrisarna* efter det urgöteborgska ordet kombarris som betyder stor sten. Tack Lars Hellgren, morfar till en Kombarris, för att du har lärt oss det.

Sammandrag

Gruvindustrin är en viktig industri för att förse samhället med metaller och mineraler. Den är dock väldigt energikrävande och kan uppgå till 6 % av ett lands energianvändning. Det skulle därför finnas stora vinster i att försöka energieffektivisera krossnings- och malningsprocessen. Med utgångspunkt från att en kross och en kvarn kan köras med olika inställningar borde det därför kunna gå att optimera energiåtgången för hela processen.

Parametrar som kan tänkas påverka den ingående energin är den storlek som materialet först krossas till samt storlek på malmedia som används i kvarn vid malning. Sönderdelningstester där dessa två parametrar varieras har utförts i laboratorieskala med en konkross och en kulkvarn. Tendensen är att krossning till mindre storlek är optimalt ur energisynpunkt för mängd produkt med en viss storlek. Simuleringar som bygger på diskret elementmetod påvisar att stora kulor har en större förmåga att sönderdela en partikel än fler mindre kulor med samma totala massa. Genom att genomföra kollisionstester på en partikel kan simuleringarna användas för att ta fram rätt kulstorlek för en så effektiv process som möjligt.

Abstract

The mining industry provides society with metals and minerals which is an important cornerstone of civilization. The process of mining requires a large amount of energy and can at times be up to 6 % of a country's energy needs. If a more efficient process were to be developed it could result in both an economical gain for companies in the mining industry as well as a less strained climate. With the starting point that a cone crusher and a ball mill can be configured separately, it could be possible to optimize how they work together to create a more energy efficient process.

Some of the parameters that can affect the required energy input are the size of the crusher product and the size of the balls in the ball mill. Comminution tests where these two parameters vary has been done with laboratory scaled cone crusher and ball mill. The tendency seems to be that crushing the initial feed to a smaller size is optimal when looking at the problem from an energy efficiency viewpoint. Simulations using the discrete element method has shown that larger balls in the ball mill has a higher chance of particle comminution than smaller balls with the same total mass. By doing collision tests on a particle, the simulations can be used to find the optimal ball size for an even more efficient process.

Förkortningar

CAD - Computer Aided Design, ritningsmjukvara.

CRPS - Chalmers Rock Processing System, en forskargrupp på Chalmers tekniska högskola som arbetar med sönderdelning av bergmaterial.

CSS - Closed Side Setting, minsta spalten i konkrossen.

DAQ - Data Acquisition, ett system för signalbehandling.

DEM - Diskret elementmetod, en matematisk teori.

NI - National Instruments, ett företag.

PSD - Partikelstorleksfördelning.

Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	1
1.3	Problemformulering	1
1.4	Avgränsningar	2
2	Teori	2
2.1	Krossning och malning	2
2.1.1	Krossprocessen	2
2.1.2	Malningsprocessen	4
2.1.3	Provberedning	5
2.2	Diskret elementmetod	5
2.2.1	Kontaktmodell	6
2.3	Split Hopkinson pressure bar	7
3	Metod	8
3.1	Krossning och malning	8
3.1.1	Krossning	9
3.1.2	Malning	10
3.1.3	Siktning	11
3.1.4	Process för krossning och malning	13
3.2	DEM-simulering	13
3.2.1	Förbehandling och simulering	14
3.2.2	Efterbearbetning	14
3.3	Energiåtgång för krossning av partikel	16
4	Resultat	16
4.1	Krossning och malning	17
4.2	Simulering	22
4.3	Förberedelse Hopkinsonuppställning	24
5	Diskussion	25
5.1	Krossning och malning	25
5.2	Simulering	26
5.3	Felkällor	28
5.3.1	Siktning	28
5.3.2	CAD	29
5.3.3	Simulering	29
6	Slutsats och rekommendation	29
A	Siktprotokoll för kopparslagg från Rönnskär	32
B	Siktprotokoll - kopparslagg efter handsiktning	33
C	Siktprotokoll - krossat material	34
D	Malmedia	37

E	Kvarntester	38
F	Energi i sönderdelningsprocessen	40
G	Siktkurvor - kumulativ fördelning	42
H	Siktkurvor - frekvens	44
I	Siktkurvor - linjär skala	49
J	Frekvens av enskilda kulors maximala kinetiska energi	51

1 Inledning

I detta arbete undersöks sönderdelningsprocessen för kopparslagg. Sönderdelningsprocessen utgörs här av krossning i en konkross och malning i en kulkvarn. Arbetet bygger vidare på två tidigare kandidatarbeten: *Energieffektiv höghastighetskross för gruvindustrin* [1] och *Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin* [2].

1.1 Bakgrund

Gruvindustrin spelar en viktig roll för att täcka det stora behov av metaller och mineraler som finns i världen. Den metall som bland annat finns i elektronik blir allt svårare att utvinna eftersom stora delar av lättbruten och högvärdig malm redan har tagits upp ur berget. Den malm som finns kvar ligger ofta djupt ner i berggrunden. För att utvinna metall ur malmen måste malmen krossas och malas, vilket är en mycket energikrävande process [3]. Energieffektivisering inom gruvindustrin skulle kunna innebära stor energibesparing, särskilt i länder som Kanada och Sydafrika där gruvindustrin är stor. I Kanada uppskattas 1,86 % av landets totala energikonsumption gå till krossning och malning inom gruvindustrin. I Sydafrika utgör gruvindustrin ungefär 6 % av nationens totala energiåtgång [4].

1.2 Syfte

Syftet med det här arbetet är att studera huruvida energieffektivisering i sönderdelningsprocessen för kopparslagg är genomförbar. Detta resultat kan sedan användas i framtida forskningsarbeten, med mål att undersöka energieffektivisering inom gruvindustrin. Här utgörs jämförelsetalet av energi per massenhet produkt.

Genom att undersöka hur olika fint krossat material och olika kulstorlekar i kvarnen påverkar slutprodukten är målet att energieffektivisera den totala sönderdelningsprocessen, som innefattar både krossning och malning. Det som ska studeras är hur den totala processens energiåtgång påverkas av kvarnens ingående partikelstorlek, vilket motsvaras av det krossade materialet, samt malmediastorlek, som i detta projekt beskrivs av en diameter eftersom det är kulor som används som malmedia. Storleken av det krossade materialet korrelerar med krossinställningen *Closed Side Setting* (CSS), som utgör den minsta spaltöppningen i konkrossen.

Ett ytterligare syfte med arbetet är att undersöka möjligheterna att i CRPS-laboratoriet mäta energiåtgången i en kollision som medför att en viss partikel sönderdelas. Målet är att resultatet om möjligt ska leda till ett förberedande arbete för att ett mätinstrument ska kunna implementeras i laboratoriet.

1.3 Problemformulering

Uppgiften är att undersöka om det finns möjlighet att energioptimera processen för krossning och malning för kopparslagg. Denna uppgift kan delas upp i tre huvudsakliga frågeställningar.

- Hur påverkas energiåtgången för den sammanlagda sönderdelningsprocessen, bestående av krossning och malning, av krossinställningen CSS samt malmediastorlek?
- Vilken kinetisk energi uppnås för malmediet i kvarnen då detta utgörs av kulor med en diameter av 13; 21,5; 25 respektive 38,5 mm?
- Hur skulle den mängd energi som krävs för att sönderdela en viss partikel i en kollision kunna mätas i CRPS-laboratoriet?

1.4 Avgränsningar

Utifrån de resurstillgångar vi har vad gäller tid, plats och utrustning har följande avgränsningar gjorts:

- Experimentella krosstester genomförs endast med en Morgårdshammar B90 konkross. Det är en kross i laboratorieskala som finns tillgänglig i CRPS-laboratoriet på Chalmers.
- Experimentella kvarntester genomförs endast med en satskvarn i laboratorieskala. Kvarnen som används i detta projekt finns hos Minpro Recycling i Stråssa.
- För de testserier som genomförs undersöks endast två parametrar, *malmediastorlek* och *CSS*.
- Tester kommer bara att genomföras på ett material, kopparslagg från Bolidens smältverk i Rönnskär.

2 Teori

För att öka trovärdigheten för resultatet i ett forskningsprojekt kan triangulering användas. Forskningstriangulering handlar om att använda olika metoder för att undersöka ett och samma problem. Genom att samla in och analysera data på olika sätt ökar validiteten för resultaten [5]. Av denna anledning undersöks i detta arbete sönderdelning av kopparslagg med olika metoder. Rapporten är indelad i tre huvudområden: fysiska krossnings- och malningstester, DEM-simuleringar av kvarntester samt förberedande arbete för att kunna mäta energiåtgången vid sönderdelning av en partikel bergmaterial i CRPS-laboratoriet. För den sista delen har instrumentet Hopkinson pressure bar valts för att mäta energi och undersöka om den är tillräckligt hög för att sönderdela en viss partikel.

Teori om krossning och malning presenteras i avsnitt 2.1. I avsnitt 2.2 redogörs för en del av den teori som finns bakom DEM-simuleringar. För teori om uppställningen split Hopkinson pressure bar, se avsnitt 2.3.

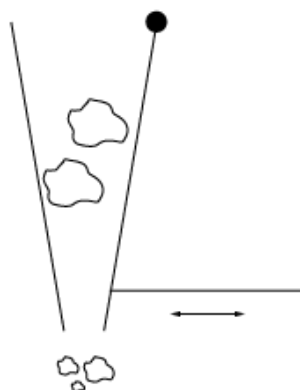
2.1 Krossning och malning

När bergmaterial och malm bryts ur berget kan partiklarna vara upp till storleksordning meter. För att kunna separera metall från övrigt bergmaterial i malmen behöver partiklarna minskas till en storlek av några mikrometer. Detta görs i flera steg som involverar krossning och malning [6].

2.1.1 Krossprocessen

Krossning är det inledande steget i sönderdelningsprocessen. Metoden bygger på mekanisk deformation av materialet som resulterar i partiklar av mindre storlek.

Det brutna bergmaterialet krossas på plats i gruvan eller bergtäkten med en så kallad primärkross, till en storlek som underlättar vidaretransport. Exempel på primärkrossar är käftkrossen och spindelkrossen. Kortfattat består käftkrossen av två vertikala plattor, där en platta är fast och en platta är rörlig kring en axel enligt Figur 1. Materialet fylls på uppifrån och pressas ihop av den rörliga plattan, samtidigt som öppningen blir mindre i fallriktningen. Spindelkrossen påminner om käftkrossen till funktion med en fast och en rörlig platta som pressas mot varandra och krossar det mellanliggande materialet. Skillnaden är att den rörliga delen i spindelkrossen

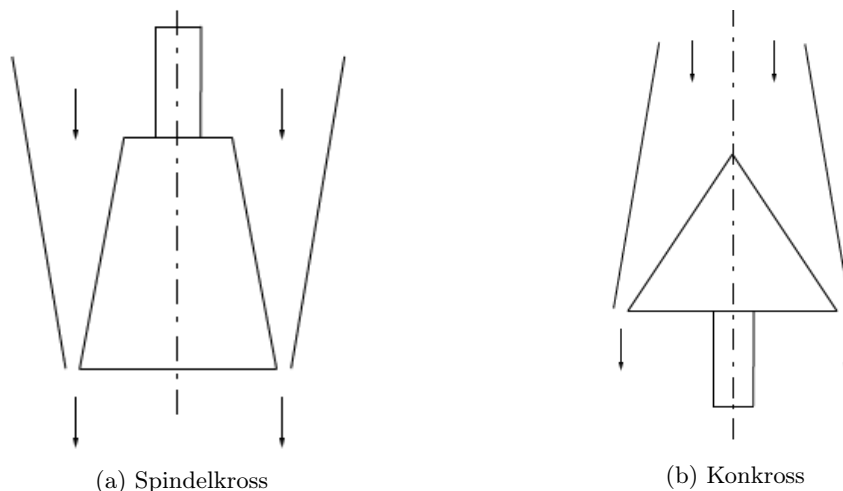


Figur 1: Käftkross. Den vänstra plattan är fast monterad och den högra plattan är rörlig kring sin övre ände. En axel pressar den rörliga plattan mot den fasta och det mellanliggande materialet krossas.

är konisk och upphängd på en roterande axel. Den rörliga delen följer en konisk pendelrörelse, vilket medför att avståndet mellan den rörliga delen och den omslutande manteln varierar. Detta resulterar i att materialet krossas mot den omslutande manteln. Genomskärningen av en spindelkross visas i Figur 2a. Eftersom spindelkrossen krossar material under hela arbetscykeln, till skillnad mot käftkrossen, är materialflödet mycket större och således att föredra för en hög kapacitet.

Efter första steget i krossprocessen har partiklarna en storlek runt 100-200 mm. Krossarna som används i det andra steget, så kallade sekundärkrossar, krossar det primärkrossade materialet så att partiklarna får en storlek som är lämplig inför nästa steg i processen, malning. Vanligtvis handlar det om en storlek mellan 5 och 20 mm. Den absolut vanligaste typen av sekundärkross är konkrossen som finns i flera olika varianter. I huvudsak är principen för konkrossen samma som för spindelkrossen med några skillnader. Den rörliga innermanteln är för vissa konkrossar lagrad till den roterande axeln nertill istället för i toppen och den stillastående ytermanteln är utåtgående för konkrossen och inåtgående för spindelkrossen. Dessutom har de två olika krossarna olika vinklar på krosskammargeometrierna. Innermanteln har en brantare lutning hos spindelkrossen än hos konkrossen (Figur 2). Konkrossen matas med material ovanifrån och den roterande innermanteln pressar materialet mot ytermanteln. Det som avgör storleken på materialet som har passerat krossen är det minsta avståndet mellan inner- och ytermanteln under en arbetscykel, CSS [6].

Krossning kan antingen vara energi- eller formbetingad, där den största skillnaden mellan de två är principen bakom energitillförseln. Vad gäller den energibetingade krossningen beror sönderdelningen av den pålagda kraften. Genom att överföra kinetisk energi till partiklarna kan dessa förflyttas för att sedan splittras vid kollision med andra partiklar eller en vägg. Sönderdelningen kan därför kontrolleras genom styrning av energitillförseln, som i sin tur avgör kraftens storlek. Formbetingad sönderdelning är, tillsammans med den pålagda kraften, en funktion av undanträngningen av partikeln eller partiklarna. I detta fall är energitillförseln och kraften som den medför sekundära parametrar. Genom att kontrollera kompressionen kan den formbetingade sönderdelningen styras. Käft-, spindel- och konkrossen är tre exempel på krossar där formbetingad sönderdelning äger rum [7].



Figur 2: Skillnaden mellan en spindelkross och en konkross. Spindelkrossen (a) har en brant lutande innermantel som är lagrad i en axel ovanför och har en inåtgående ytermantel. Konkrossen (b) har istället en innermantel med flackare lutning som kan lagras i en axel under innermanteln och har en utåtgående ytermantel.

2.1.2 Malningsprocessen

Det avslutande steget i sönderdelningsprocessen efter sekundärkrossning är malning. Malning sker i kvarnar som består av en cylinderformad trumma. Det finns i huvudsak två typer av kvarnar. Kvarnar med omrörare och så kallade tumlande kvarnar. För kvarnar med omrörare kan trumman vara orienterad antingen horisontellt eller vertikalt. Trumman är stationär och materialet som ska malas blandas runt med en omrörare. På omrörarens axel sitter så kallade malningsplattor som gör att partiklarna minskar i storlek. Den andra typen av kvarnar är tumlande kvarnar, som till skillnad från kvarnar med omrörare alltid är orienterade horisontellt. Förutom material lastas kvarnen med ett malningsmedia som kan vara antingen stålkulor, stålstavar eller materialet självt. Utformningen på insidan av trumman är gjord så att material och malningsmedia lyfts upp när kvarntrumman roterar. När innehållet sedan når översta läget faller det nedåt och materialet mals mot malningsmediet. I kvarnar är sönderdelningen energibetingad.

Fördelen med att ha bergmaterial som malningsmedia är att kvarnen inte behöver driva runt ytterligare massa som inte mals, vilket minskar energiåtgången. Däremot blir storleken på partiklarna i det färdigmalda materialet oftast inte mindre än $100\text{ }\mu\text{m}$. Stålstavar kan precis som bergmaterial mala relativt stort ingående material men kan inte heller mala finare än runt $100\text{ }\mu\text{m}$. För att mala finare lämpar sig stålkulor som malningsmedia bäst. Kulornas storleksminskning genom nötning är försumbar i förhållande till materialets sönderdelning. Malning med kulor är lika effektiv i början som i slutet av processen, till skillnad från malning med stavar. Dessutom har klotformade föremål maximal yta per volymenhet vilket gör kollision mellan kula och material som mest gynnsam. Med stålkulor som malningsmedia kan materialet efter malning ha en partikelstorlek i storleksordning av några μm . Stålkulor som malningsmedia är därför ett sista steg i malningsprocessen [6].

2.1.3 Provberedning

Vid beredning av ett prov är det viktigt att provet är representativt för hela provvolymen med avseende på partikelstorleksfördelning. När tester genomförs används i regel bara en liten del av materialet. Med en spaltdelare kan en provmängd minskas utan att ändra storleksfördelningen för partiklarna i provet. Spaltdelaren består av en rektangulär tratt med ett galler i botten som har ett jämnt antal öppningar. En bild på delaren finns i Figur 3. Från öppningarna går det rännor som växelvis leder åt varsitt håll till två behållare. Genom att hälla materialet i tratten fördelas det jämnt i de två behållarna. Materialet ska spridas jämnt över hela behållarens längd. Proceduren upprepas med att hälla innehållet i den ena behållaren i tratten för att få en mindre provmängd. Metoden är väl beprövad och säkerställer att provet behåller rätt partikelstorleksfördelning [8] [9].



Figur 3: Delning. Provet hälls i en spaltdelare och delas upp i två lika delar.

2.2 Diskret elementmetod

Den diskreta elementmetoden (DEM) är en numerisk modell som kan förklara det mekaniska beteendet för sfär- och diskaggregat som bygger upp enskilda partiklar. Metoden är kapabel att hantera enskilda partiklar i vilken form som helst för analys inom stenmekanikproblem, vilket introducerades 1979 av Cundall och Strack.

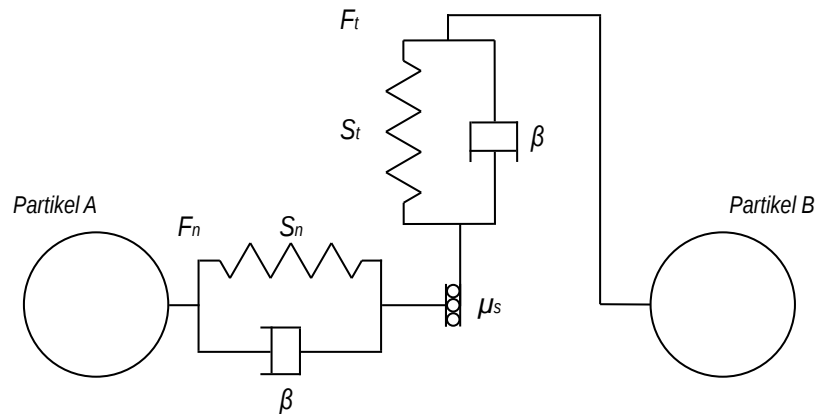
I DEM hittas förskjutning samt jämviktskrafter genom beräkningar av individuella partiklar som rör sig med en pålagd last. Detta kan till exempel användas för att simulera stenmakarnikproblem. Interaktionen mellan de enskilda partiklarna ses som ett övergående problem där jämvikt sker när de interna krafterna balanseras. För att göra detta numeriskt används tidssteg där hastigheter och accelerationer antas konstanta. DEM är baserat på idén att tidssteg kan väljas så pass små att förändringar i enskilda tidssteg inte påverkar fler partiklar än de direkt närliggande. Alltså bestäms kraftresultanterna på enskilda partiklar endast av interaktion

med partiklar som ligger i direktkontakt [10]. Metoden baseras på att interaktionen ses från ett kontakt-kontaktperspektiv och rörelsen ses från ett partikel-partikelperspektiv.

DEM används inom ett flertal olika industrier med diverse tillämpningar, ett exempel är inom gruvinindustrin där DEM kan användas för att exempelvis simulera olika typer av kvarnar. Ett annat exempel är inom läkemedelsindustrin där DEM används som ett hjälpmedel vid prototypdesign för att reducera utvecklingskostnaden [11]. Numerisk modellering är mer flexibel att applicera än analytisk modellering och har fördelen att data är tillgänglig i alla steg av simuleringen. Denna flexibilitet gäller även när konfigurationer, partikelstorlek, storleksfördelning samt partiklars materialegenskaper läses in [10].

2.2.1 Kontaktmodell

När två partiklar får fysisk kontakt med varandra eller med någon annan definierad yta i DEM används en kontaktmodell för att beräkna vad som skall hända. Den kontaktmodell som används i detta projekt kallas för Hertz-Mindlin (no-slip). Denna modell används för att den har en tillförlitlig och effektiv kraftberäkning. Hertz-Mindlin (no-slip) är baserad på Hertz kontaktteori [12] och Mindlin-Deresiewicz modell [13]. Där Hertz kontaktteori utgör normalkrafternas komponenter och Mindlin-Deresiewicz modell utgör tangentialkraftsmodellen. Detta kombineras för att få Hertz-Mindlin (no-slip) som visualiseras i Figur 4.



Figur 4: En visuell representation av Hertz-Mindlins (no-slip) kontaktmodell.

Normal- och tangentialkrafterna har dämpningskoefficienter, β , som visas i Figur 4. Enligt Tsuji et al. är dämpningskoefficienten relaterad till restitutionskoefficienten [14], se ekvation (5). Den tangentiella friktionskraften har sitt ursprung i Coulombs friktionslag [10]. Rullningsfriktionen implementeras som en kontaktoberoende momentmodell med konstant riktning [15]. Normalkraften F_n är en funktion av normalens överlapp δ_n och ges av ekvation (1).

$$F_n = \frac{4}{3} E^* \sqrt{\delta_n^3 R^*} \quad (1)$$

E^* är Youngs modul och R^* definieras enligt ekvation (2) samt (3)

$$\frac{1}{E^*} = \frac{1 - \nu_i^2}{E_i} + \frac{1 - \nu_j^2}{E_j} \quad (2)$$

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}, \quad (3)$$

där E_i och E_j är Youngs modul, ν_i och ν_j är Poissons konstant och R_i och R_j är radien av varje sfär i kontakt. Dämpningskraften F_d^n ges av

$$F_n^d = -2\beta v_n^{\vec{r}el} \sqrt{\frac{5}{6} S_n m^*} \quad (4)$$

där m^* är den reducerade massan och $v_n^{\vec{r}el}$ är normalkomponenten av den relativa hastigheten. Parametern β och normalstyvheten S_n beräknas enligt ekvation (5) och (6).

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{(\ln e)^2 + \pi^2}} \quad (5)$$

$$S_n = 2E^* \sqrt{\delta_n R^*}. \quad (6)$$

e är restitutionskoefficienten. Den tangentiella kraften F_t är proportionell mot det tangentiella överlappet δ_t och den tangentiella styvheten S_t enligt $F_t = -S_t \delta_t = -8\delta_t G^* \sqrt{\delta_n R^*}$, med G^* skjuvmodul. Den tangentiella dämpningen blir

$$F_t^d = -2\beta v_t^{\vec{r}el} \sqrt{\frac{5}{6} S_t m^*}. \quad (7)$$

$v_t^{\vec{r}el}$ är den relativa hastigheten i tangential led. Den tangentiella kraften är begränsad av Coulombs friktion $\mu_s F_n$, där μ_s är den statiska friktionskoefficienten. För simuleringar där rullfriktion behöver tas i hänsyn används ekvation (8) där moment appliceras på kontaktytorna.

$$\tau_i = \mu_r F_n R_i \omega_i \quad (8)$$

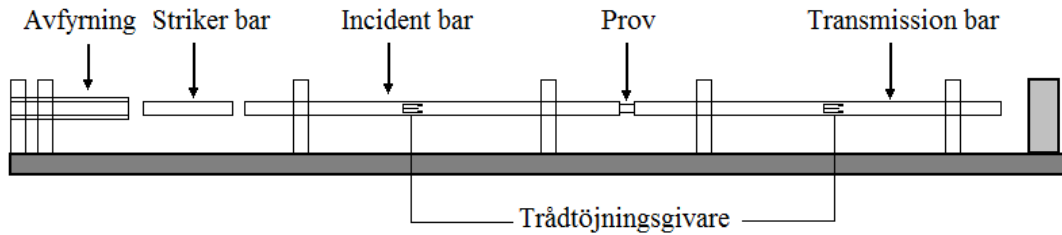
där μ_r är koefficienten för rullningsfriktion, R_i är distansen från kontaktpunkten till masscentrum och ω_i är vinkelhastigheten av objektet vid kontaktpunkten.

2.3 Split Hopkinson pressure bar

År 1914 presenterade Bertram Hopkinson en metod för att mäta trycket som uppstår när två föremål kolliderar. I hans experiment avfyrares en gevärskula mot en cylindrisk stång av stål och tryckvågen som uppstod från kollisionen mättes därefter [16]. Metoden och uppställningen är idag uppkallad efter Hopkinson. Under 40-talet utvecklades metoden vidare, av bland annat Kolsky, till att undersöka hur ett prov påverkas av mekanisk deformation med avseende på energi och materialegenskaper [17].

En split Hopkinson pressure bar består av en avfyrningsanordning, stänger och mätutrustning. En överblick av uppställningens delar återfinns i Figur 5. Avfyrningsanordningen kan bestå av en gaspistol som med hjälp av tryckluft skjuter iväg en så kallad striker bar [18][19], men även en fjäder kan användas till avfyrningen [20]. Emellertid är metoden med gaspistol kontrollerbar, effektiv och säker enligt Chen et al. för att få tillförlitliga och repeterbara mätningar.

Utöver en striker bar, som i fortsättningen kommer att kallas striker-stång, innehåller uppställningen två stänger som är i kontakt med provet, betecknade incident bar och transmission



Figur 5: Schematisk illustration för delarna i en split Hopkinson pressure bar. Stängerna är monterade i hållare och är fritt rörliga i längdriktningen. Avfyrningsanordningen skjuter iväg en så kallad striker bar som kolliderar med den längre stängen, en så kallad incident bar. Provet är monterat mellan denna och en så kallad transmission bar och trådtöjningsgivare är fästa på båda stängerna. Modifierad från Sharma et al. (2011).

bar. Stängerna, som i fortsättningen kallas incident- respektive transmission-stång, är monterade i hållare och kan röra sig fritt i längdriktningen. För att få tillförlitliga resultat ska alla stänger vara av samma material och dimension och ligga i linje med varandra. Dessutom bör friktionen mellan stänger och hållare vara så liten som möjligt [18].

Principen bygger på att striker-stängen får en hastighet med hjälp av avfyrningsanordningen. När striker-stängen kolliderar med incident-stängen uppkommer en tryckvåg i stängen som sedan propagerar i längdriktningen. Är incident-stängen lång kan tryckvågens propagation antas vara endimensionell [18]. När tryckvågen når gränsytan vid stängens ände kommer en del av vågen att transmittas genom provet och vidare in i transmission-stängen och resten reflekteras tillbaka i incident-stängen [16]. I dessa två stänger sitter trådtöjningsgivare som mäter den ingående och transmittade pulsen. De uppmätta signalerna kan sedan användas för att beräkna spänningen i provet under kollisionen och kollisionsenergin [18].

3 Metod

Flera metoder har använts för att undersöka energiåtgången i krossnings- och malningsprocessen, enligt principen om triangulering. I avsnitt 3.1 förklaras hur krossnings- och malningsförsöken genomfördes för att undersöka hur parametrarna CSS och malmediastorlek påverkar slutprodukten. Dessutom beskrivs materialflödet från ankomst till Chalmers till färdigmalen produkt. Avsnitt 3.2 beskriver hur DEM-simuleringar har genomförts för att undersöka kulornas rörelseenergi i kvarntrumman. Avslutningsvis beskrivs i avsnitt 3.3 det förberedande arbete som gjorts för att CRPS-laboratoriets Hopkinson pressure bar ska kunna användas och hur det är tänkt att testerna ska genomföras för att undersöka vilken energiåtgång som krävs för att sönderdela en partikel bergmaterial av viss storlek.

3.1 Krossning och malning

En stor del av projektet var att genomföra krossnings- och malningstester. Dessa gjordes i laboratorieskala med kopparslagg från Bolidens kopparsmältverk i Rönnskär. Syftet med de fysiska testerna var i första hand att undersöka huruvida CSS-inställningen i krossen och kulstorleken i kvarnen påverkar den totala sönderdelningsprocessen samt dess energiåtgång. Därför togs en testplan fram för att prova olika CSS-inställningar samt malmediastorlek, se Figur 6.

Det finns en hypotes att större kulor krävs för att kunna mala stora partiklar och mindre kulor för att få riktigt fint material. För att undersöka denna hypotes innehåller testplanen två test med blandade kulstorlekar. Hypotesen är att de större kulorna först ska sönderdela de största partiklarna, som de mindre kulorna därefter fortsätter att mala ner. Testerna med blandade kulstorlekar tilldelas testnamn B5 och B6, enligt testplanen i Figur 6.

Kombarrisarna					
2017-03-28					
Krosstester			Kvarntester		
<i>CSS [mm]</i>	<i>Excenter-varvtal [Hz]</i>	<i>Feed [Hz]</i>	<i>Kulstorlek [mm]</i>	<i>Maltid [min]</i>	<i>Serie & testnummer</i>
1,8	20	25	13	4	A.1
			21,5	4	A.2
			25	4	A.3
			38,5	4	A.4
3	20	45	13	4	B.1
			21,5	4	B.2
			25	4	B.3
			38,5	4	B.4
			13 / 25 (50/50 %)	4	B.5
			13 / 38,5 (50/50 %)	4	B.6
4,1	20	50	13	4	C.1
			21,5	4	C.2
			25	4	C.3
			38,5	4	C.4

Figur 6: Testplan för Kombarrisarna

3.1.1 Krossning

Krosstesterna utfördes i CRPS-laboratoriet på Chalmers med en konkross i laboratorieskala med beteckning Morgårdshammar B90, se Figur 7b. Krossen försågs med material av en bandmatare (Figur 7a), där materialet passerade en trätt som var centrerad över innermantelns rotationsaxel. Under krossen stod en låda med syfte att samla upp det material som hade krossats. Lådan innehöll två backar, varav en var placerad på en våg. Lådan var ansluten till krossens undersida och med hjälp av ett vred kunde materialflödet regleras så att provinsamlingen leddes till backen på vågen och resten hamnade i den andra uppsamlingsbacken.

Vid testerna kördes krossen med tre olika CSS-inställningar: 1,8; 3,0 och 4,1 mm. Inställningarna betecknades under testerna med A, B och C. För respektive CSS-inställning försågs krossen med material med en matningsfrekvens på 25, 45 respektive 50 Hz enligt testplanen (Figur 6). Inledningsvis ökades rotationshastigheten på krossen successivt upp till 20 Hz. Krossen matades med material och en stabilisering av effektåtgången inväntades. Därefter ändrades vredet så att det krossade materialet hamnade i backen på vågen och samtidigt startades en mätning av den ingående strömmen och effekten till krossen i varje tidpunkt. Vid knappt 20 kg krossat material avslutades effektmätningen samtidigt som materialflödet reglerades till backen utan våg. Direkt efter det stoppades bandmataren följt av krossen.



(a) Bandmatare



(b) Konkross

Figur 7: Bandmatare (a) och konkross (b) som användes vid krosstesterna.

3.1.2 Malning

För malningstesterna användes en satskvarn i laboratorieskala hos Minpro Recycling i Stråssa (Figur 8). Både trummans diameter och längd är 300 mm och antalet lyftare är nio. I de här testerna användes kulor som malmedia.

Inledningsvis lastades kvarnen i upprätt läge med 20 kg stålkulor av storlek för aktuellt test, se testplanen i Figur 6. Kulorna som användes var av storlek 13,0 mm, 21,5 mm, 25,0 mm och 38,5 mm (bilaga D). Provet hälldes i kvarnen efter att kulorna var på plats för att sönderdelning inte skulle ske innan kvarnen hade startats. Varje prov vägde 1300 ± 30 g. De uppmätta vikterna för varje prov anges i Figur 30 i bilaga E. Därefter sattes kvarnlocket på och kvarntrumman fälldes till horisontalläge. Samtidigt som kvarnen startades påbörjades mätning av den ingående elektriska effekten till kvarnen. Datainsamlingen gjordes med en mätning per sekund. När kvarnen hade roterat i 275 varv, vilket motsvarade 4 min, avbröts malningen och kvarnen sattes i upprätt läge. Locket lossades och kvarntrumman försattes återigen i horisontalläge med försiktighet. Innehållet tömdes i ett uppsamlingskärl där provet separerades från kulorna med ett siktdäck. Tömningen av kvarnen illustreras i Figur 8. För att få ut det sista av provet ur kvarntrumman användes en pensel. I Figur 31 i bilaga E presenteras protokollet för malningstesterna.



Figur 8: Tömning av satskvarn. Kvarntrumman försätts i horisontellt läge och det malda provet separeras från kulor.

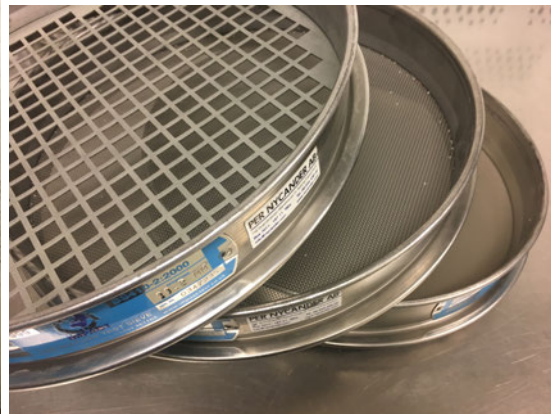
3.1.3 Siktning

För att kunna utvärdera hur effektivt krossen och kvarnen krossar respektive maler materialet bestämdes partikelstorleksfördelningen före och efter samtliga processteg genom siktning. Beroende på var i materialhanteringskedjan provet befann sig siktades olika mängder material. I den första siktningsomgången, när storleksfördelningen för den kopparslag som mottogs i tunnor skulle bestämmas, siktades ungefär 1 kg material. I nästa omgång, efter genomförd handsiktning, siktades cirka 850 g. Efter krossningen delades materialet innan det siktades. Då var mängden material ungefär 650 g för respektive CSS. När malningen var genomförd delades materialet igen före siktning. I denna sista siktomgång var materialmängden mellan 150 och 180 g.

Ett antal siktdäck med olika fina såll placerades i en skakmaskin, se Figur 9. Provmaterialet hölls på det översta siktdäcket innan locket lades på. Skakmaskinen kördes sedan i tio minuter. När provet hade skakats klart avlägsnades materialet från det översta däckets och hölls ner i en skål för att vägas. Vikten dokumenterades i ett siktprotokoll. Därefter fortsatte proceduren för samtliga siktdäck. En pensel användes för att borsta rent siktsållen. Vägningen gjordes kumulativt.

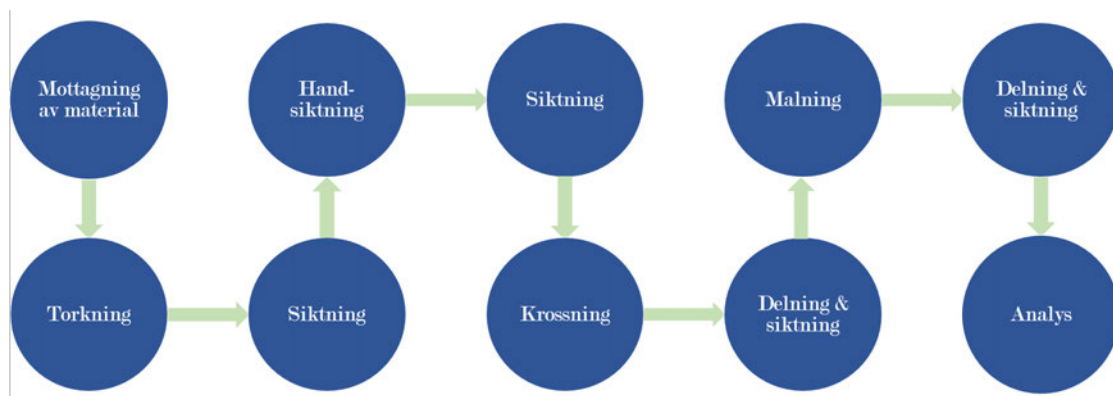


(a) Siktdäck i skakmaskin.



(b) Exempel på siktdäck med olika fina säll.

Figur 9: Siktdäck. Till vänster är ett antal siktdäck ihopmonterade och till höger visas några siktdäck i närbild.



Figur 10: Översikt av processtegen för hanteringen av kopparslaggen.

3.1.4 Process för krossning och malning

Arbetsgången för de olika stegen i sönderdelningsprocessen åskådliggörs i Figur 10. Det material som användes i testerna var kopparslagg från Bolidens anläggning i Rönnskär. När materialet mottogs var det fuktigt och behövde torkas innan det kunde bearbetas. Vid siktning är det viktigt att materialet är torrt för att få en heltäckande representation av hela provets storleksfördelning. Finare partiklar kan fästa på större partiklar när det är fuktigt.

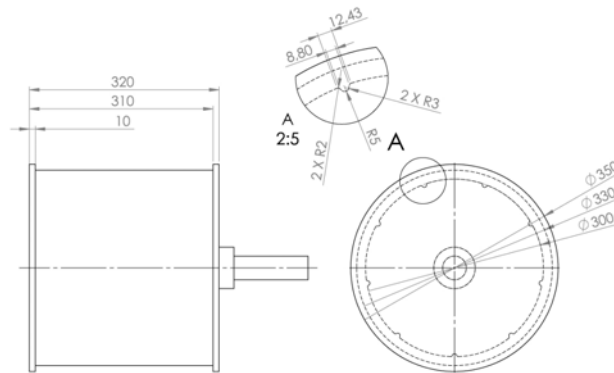
Leveransen innehöll partiklar upp till 20 mm. För att få en samlad storleksfördelning för det ingående materialet i krossen siktades en fraktion mellan 4 och 11,2 mm fram. Drygt 1 kg av det ursprungliga materialet hälldes på ett 11,2 mm siktdäck. Materialet siktades för hand genom att siktdäcket skakades och roterades i cirka 10 s. Partiklarna som passerade däcket samlades upp i ett kärl och partiklarna som låg kvar på däcket slängdes. Det uppsamlade materialet siktades därefter för hand med ett 4 mm siktdäck, där partiklarna som inte passerade däcket sparades och resten slängdes. Hela siktprocessen upprepades med det ursprungliga materialet så att fraktionen 4-11,2 mm totalt utgjorde 200 kg.

Innan krossningstesterna med kopparslaggmaterialet gjordes värmdes konkrossen upp och ett testförsök med granit genomfördes. Därefter lastades bandmataren med den framtagna fraktionen 4-11,2 mm kopparslagg. Materialet krossades enligt avsnitt 3.1.1 och mätdata för krossens energiåtgång samlades in för ungefär 20 kg krossat material. Materialet samlades upp i tre backar. En back för varje CSS-inställning. Därefter delades materialet upp i påsar enligt avsnitt 2.1.3, där massan för materialet noterades och angavs med noggrannhet om 1 g. En påse med innehåll från varje CSS-inställning delades ytterligare en gång för att sedan siktas och på så sätt få fram partikelstorleksfördelningen efter krossningen.

Kvarntesterna inleddes med att materialet hälldes upp ur påsarna i rostfria skålar och sedan kontrollvägdes. Kvarnen lastades med kulor och material och kördes i 4 min. Efter malningen separerades material från kulor och det malda materialet delades sedan tre gånger. Det delade materialet siktades därefter i tio minuter. Slutligen vägdes materialet på varje siktdäck kumulativt och resultatet noterades i ett siktprotokoll.

3.2 DEM-simulering

För att ta reda på rörelseenergin för olika kulstorlekar simulerades en rotationsrörelse i en kvarntrumma med hjälp av DEM. Till simuleringen behövdes en 3D-modell av kvarntrumman och dess lock. Satskvarnen som användes till malningstesterna fotograferades och mättes. En ritning skapades (Figur 11) som sedan låg till grund för den CAD-modell som sedan användes i DEM-simuleringarna. Den mjukvara som användes för simuleringarna var EDEM 2.7. Simuleringsprocessen bestod av tre steg: förbehandling, simulering och efterbearbetning.



Figur 11: Ritning av satskvarn som användes vid maltesterna.

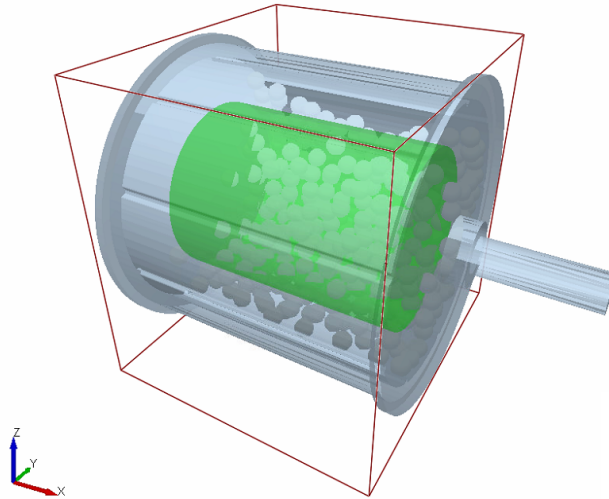
3.2.1 Förbehandling och simulering

I EDEM är det möjligt att använda ett flertal olika kontaktmodeller. Den konfiguration som användes i detta fall var Hertz-Mindlin (no-slip). Den enda gravitationspåverkan var i z-led. Materialet var stål för både malmedia och kvarn. Skjuvmodulen sattes till 70 GPa, densiteten till 7800 kg/m^3 och Poissons konstant 0,26. Restitutionskoefficienten e var 0,25. De två olika friktionskoefficienterna, den statiska och rullande, var 0,45 respektive 0,001. Partiklarna genererades som runda sfärer där sfärerna representerade kulorna som används vid malning. När geometrin för kvarnen hade importerats fanns även möjligheten att lägga in olika rörelser. Kvarntrumman i simuleringarna roterade medurs med ett varvtal på 68,75 varv per minut. Detta är samma varvtal som användes vid testerna.

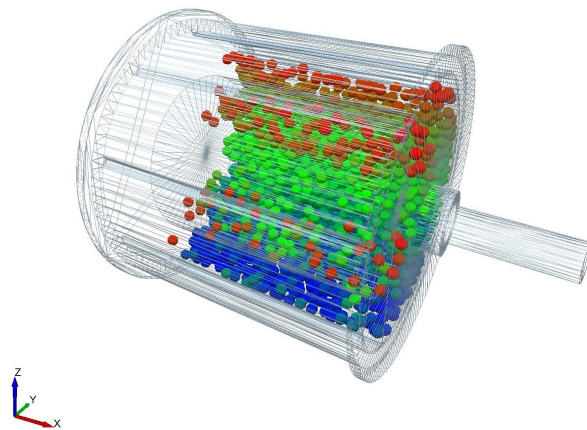
För att kunna generera partiklarna behövde fabriksfunktionen användas där en virtuell fabrik placeras i domänen. Fabriken utgörs av en virtuell geometrisk form, i vilken partiklarna genereras. Denna fabrik skapades som en cylinder med placering inuti satskvarnen, vilket visas i Figur 12. Samtliga partiklar genererades under de första 0,5 sekunderna. Satskvarnen utsattes för den linjära rotationen vid 1 sekunds simuleringstid och fortsatte tills 15 sekunder hade passerat. I alla fyra simuleringssfall valdes den totala massan av samtliga kulor till 20 kg. Simuleringen kördes i 15 sekunder. Kollisioner valdes att spåras då de kan användas som underlag till data.

3.2.2 Efterbearbetning

Efter att simuleringarna var genomförda exporterades den genererade datan för analys. Den data som exporterades var positionsdata i X-, Y- och Z-led, partikel-ID, den kinetiska energin för partiklarna samt partiklarnas hastighetsmagnitud. Vid en färdig simulering fås en vy enligt Figur 13 som föreställer kulorna i kvarntrumman. Kulorna färgkodades med en färgskala från blå till röd, där röd innebar hög kinetisk energi, blå innebar en låg kinetisk energi och grön var ett mellanting. Ett program utvecklades i MATLAB för att visualisera och analysera datan. För att verifiera positionsdatan visualiserades den med ett spridningsdiagram i X-, Y- och Z-led.



Figur 12: Placering av virtuell fabrik i relation till CAD-geometri i EDEM 2.7.

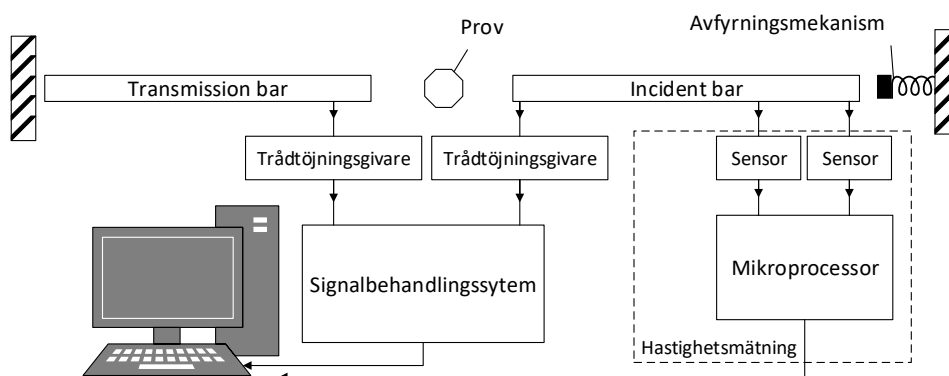


Figur 13: Kvarntrumma och kulor vid simulering. Kulorna är färgkodade med en färgskala från blå till röd, där röd färg innebär hög rörelseenergi, blå färg innebär låg rörelseenergi och grön färg innebär ett mellanting.

3.3 Energiåtgång för krossning av partikel

Ett processschema för den tänkta uppställningen med Hopkinson bar illustreras i Figur 14. Trådtöjningsgivare är fästa på incident- och transmission-stängen och registrerar pulser i respektive stång. Givarna är kopplade till en DAQ, som behandlar signalerna, vilken i sin tur styrs av en dator. Insamlingen av data görs med ett LabVIEW-program där även energin för kollisionen beräknas. Hastigheten som incident-stängen får från avfyrningen mäts med hjälp av två fotosensorer. De två sensorerna registrerar tidpunkten när strålen inte längre bryts av stängen och informationen bearbetas av en mikroprocessor som tar fram hastigheten. Hastigheten skickas sedan vidare till en dator för vidare analys av energi i systemet före, under och efter kollision.

Uppställningen i CRPS-laboratoriet består av två fritt rörliga stänger som är monterade i hållare. I ena änden finns en tryckfjäder som kan pressas ihop av incident-stängen. Varje försök inleds med att notera provets massa och storlek. Provet monteras därefter i en upphängningsanordning, där transmission-stängen ska vara i kontakt med provet. Området för kollisionen omges av en splittersäker, transparent låda och ett kärl placeras under provet för att samla upp resterna efter kollisionen. Incident-stängen pressas mot fjädern och låses fast med en spärr. Den ingående hastigheten för stängen kan varieras genom att pressa ihop fjädern olika mycket. Datainsamlingen startas samtidigt som spärren lossas. Slutligen kontrolleras om provet har sönderdelats eller inte och utfallet kopplas till kollisionens energi.



Figur 14: Processchema för Hopkinson bar.

4 Resultat

I detta avsnitt presenteras de resultat som tagits fram i projektet enligt samma upplägg som tidigare. I avsnitt 4.1 presenteras resultatet för de utförda fysiska krossnings- och malningstesterna. Avsnitt 4.2 visar de resultat som tagits fram utifrån DEM-simuleringarna. Avslutningsvis behandlas det förberedelsearbete som har gjorts för att kunna montera ihop en Hopkinson-uppställning i avsnitt 4.3.

4.1 Krossning och malning

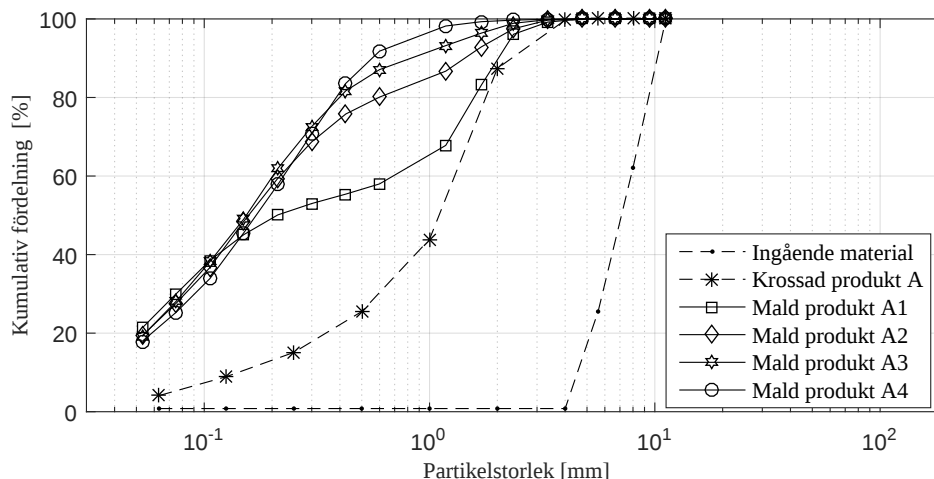
Från krosstesterna erhålls de ingående fasströmmarna och fasspänningarna till konkrossen för varje mätpunkt. För likström beräknas den ingående elektriska effekten med Ohms lag, $P = UI$, där P är elektrisk effekt, U spänning och I ström. Konkrossen utgör här ett trefassystem och effekten beräknas med *trewattmetermetoden utan nolledare*. Denna metod kan användas eftersom motorn i konkrossen, som här är systemets belastning, saknar nolledare [21]. Effekten bestäms genom att addera produkterna av varje fasström och motsvarande fasspänning enligt

$$p = u_1 i_1 + u_2 i_2 + u_3 i_3. \quad (9)$$

Effekten till kvarnen fås direkt från den insamlade mätdata enligt avsnitt 3.1.2. För att få den ingående energin till krossen och kvarnen integreras effekten med avseende på tid. Integrationen görs numeriskt i MATLAB.

För att resultatet inte ska vara beroende av mängden material som sönderdelas divideras de beräknade energierna med massan av det testade materialet. Storheten blir energi per massenhet och för krossen varierar den mellan 1,44 och 2,60 kWh/t, där lägre CSS kräver mer energi. Kvarnen använder en ingående energi på ungefär 15-16 kWh/t. Samtliga värden för energi per massenhet för krossen, kvarnen och den totala processen återfinns i bilaga F.

Storleksfördelningen för det ursprungliga materialet, den uttagna fraktionen 4-11,2 mm och fördelningen efter krossningen presenteras i bilaga A, B och C. Resultaten från siktningen efter malningen illustreras i Figur 15 och i bilaga G. Graferna visar den kumulativa partikelstorleksfördelningen, där den logaritmiska x-axeln anger partikelstorleken i millimeter y-axeln den kumulativa fördelningen i procent. I Figur 16 och i bilaga H visas frekvensen för respektive partikelstorlek. Även i dessa grafer är x-axeln logaritmisk och avser partikelstorleken i millimeter medan y-axeln visar frekvensen. I samtliga grafer avser partikelstorleken det material som har passerat motsvarande siktdäck. *Ingående material* avser här materialets storleksfördelning innan krossning, *krossad produkt* storleksfördelningen mellan krossning och malning och *mald produkt* partikelstorleksfördelningen för materialet när samtliga processteg är genomförda.



Figur 15: Diagram över den kumulativa partikelstorleksfördelningen för testserie A, där samtliga tester hade CSS 1,8 mm. Siffran i testnamnet står för kulstorlek, där 1 – 4 motsvarar 13; 21,5; 25 samt 38,5 mm.

Som Figur 15 visar ökar andelen fint material med varje processteg. Figuren visar även skillnaden i partikelstorleksfördelning för de olika kulstorlekarna. För CSS 1,8 mm är de minsta kulorna (diameter 13 mm) inte lika effektiva som övriga på att sönderdela de största partiklarna. Detta visar sig genom att kurvan för den minsta kulstorleken inte är lika brant som för de andra kulstorlekarna. Att lutningen avtar på mitten för att sedan öka igen betyder att den malda produkten till största del består av små och stora partiklar och väldigt få partiklar med storlek däremellan.

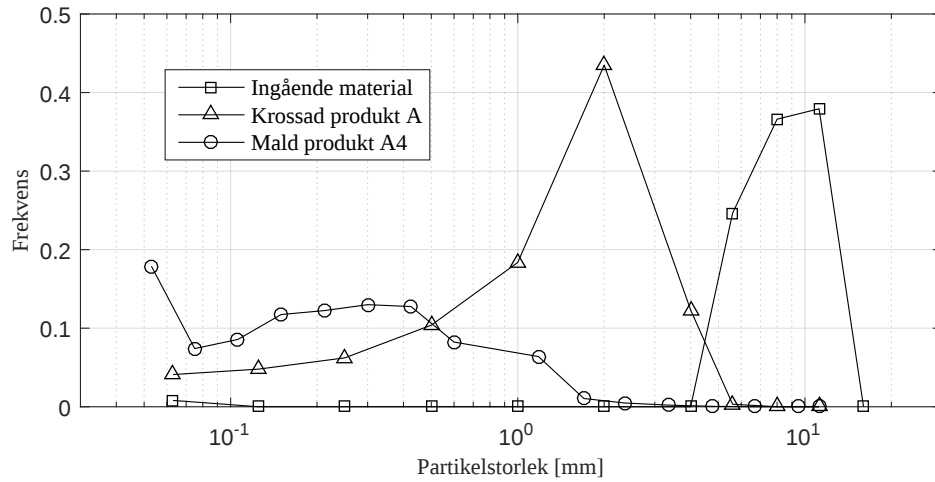
I Figur 16 kan frekvensdiagrammen för de två extrema testerna jämföras, A4 och C1. Test A4, med minst CSS och störst kvarnkulor, visas i Figur 16a. Där ses tydligt att partikelstorleken för materialet reduceras i både kross och kvarn, eftersom fördelningen förskjuts åt vänster till mindre storlek och frekvensen av de största storlekarna går mot noll. I Figur 16b, som illustrerar test C1 med störst CSS och minst kvarnkulor, är det tydligt att reduktionsgraden är betydligt lägre. Skillnaden i storleksfördelningen mellan krossad och mald produkt är väldigt liten. Mängden fint material har ökat något men sönderdelningen har i stort inte varit effektiv. De största partiklarna är fortfarande kvar.

För att kunna jämföra energiåtgången för de olika testerna med varandra införs ett mått; energi per ton produkt. Måttet definieras av kvoten mellan den totala energin och andelen mald produkt som är mindre än respektive storlek. Med denna definition beräknas energin per ton produkt för alla genomförda test och varje största partikelstorlek. Den kombination av CSS och kulstorlek som ger den lägsta energin för varje partikelstorlek presenteras i Tabell 1. För samtliga energier per ton produkt, se bilaga F.

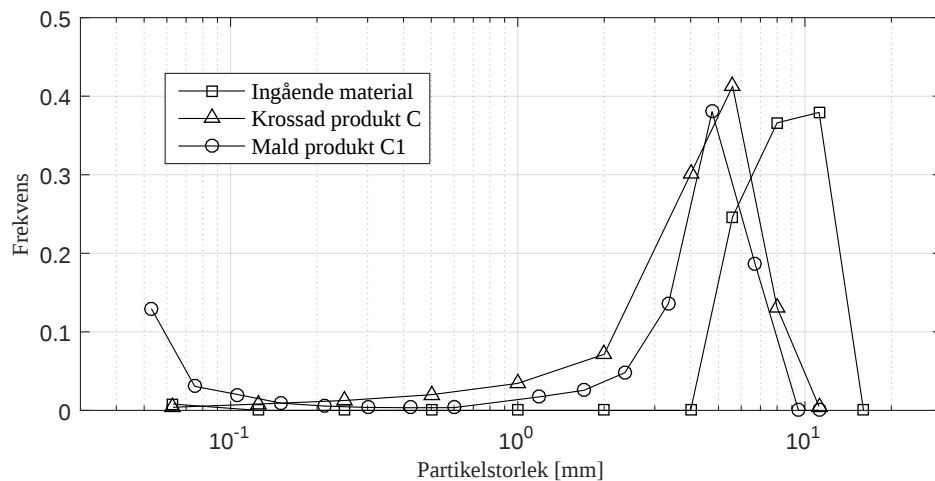
Tabell 1: Kombinationen CSS och kulstorlek som ger den lägsta tillförda energin per ton produkt. I kolumnen till vänster anges den partikelstorlek som motsvarar det siktdäck som partiklarna har passerat, det vill säga att partiklarna är mindre än detta värde.

Partikelstorlek [mm]	Test	Energi per ton produkt [kWh/t]	Andel mald produkt [%]
4,75	B4	16,8	99,6
3,35	B4	17,1	97,9
2,36	B4	18,2	92,2
1,70	A4	18,7	99,3
1,18	A4	18,9	98,2
0,60	A4	20,3	91,8
0,425	A3	22,2	81,7
0,30	A3	25,0	72,6
0,212	A3	29,3	61,9
0,15	A3	37,0	49,1
0,106	A3	47,5	38,2
0,075	A3	64,6	28,1
0,053	A1	93,5	21,3

Efter att ha studerat Tabell 1 kan konstateras att A3 (CSS 1,8 mm och kuldiameter 25 mm) är den mest energieffektiva inställningen då önskad största partikelstorlek är mellan 0,075 och 0,425 mm. I frekvensdiagrammet för A3 (Figur 17) åskådliggörs hur partikelstorleksreduktion tydligt sker i både krossnings- och malningsprocessen. Kurvan för den malda slutprodukten har stor andel finare partiklar och diagrammet påvisar att också de största partiklarna sönderdelas i processerna.

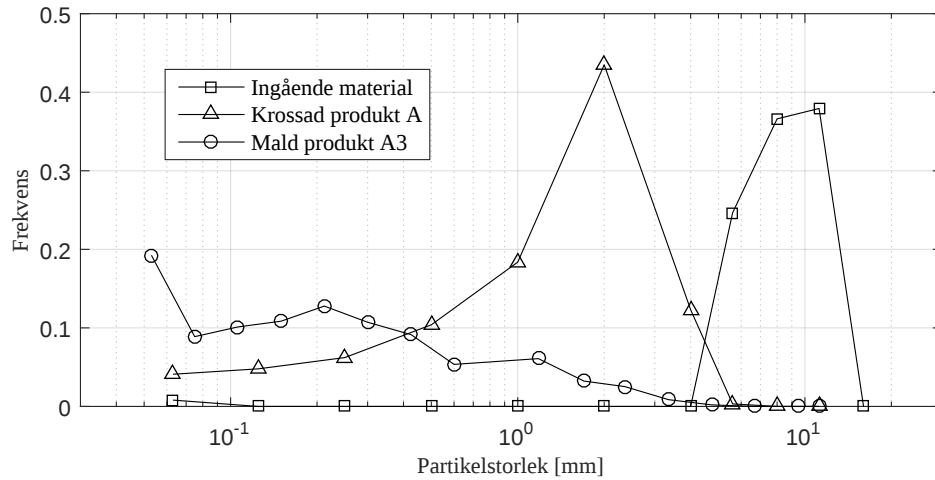


(a) Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test A4. A står för CSS 1,8 mm och 4 står för kullor med diameter 38,5 mm.



(b) Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test C1. C står för CSS 4,1 mm och 1 står för kullor med diameter 13 mm.

Figur 16: Frekvensdiagram för testen med minst CSS och störst kullor samt störst CSS och minst kullor. I (a) minskar storleken på partiklarna markant i varje sönderdelningssteg, till skillnad från (b) där endast en liten förändring i storleksfördelningen sker

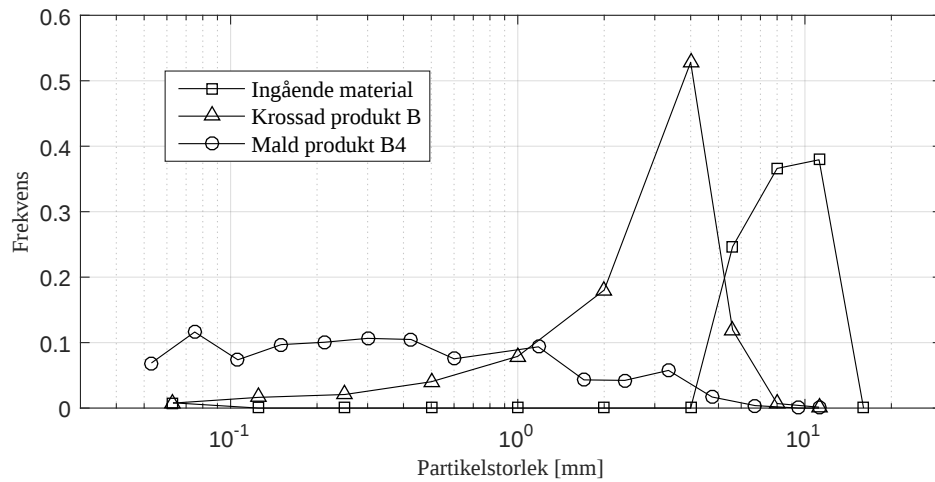


Figur 17: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test A3. A står för CSS 1,8 mm och 3 står för kulor med diameter 25 mm.

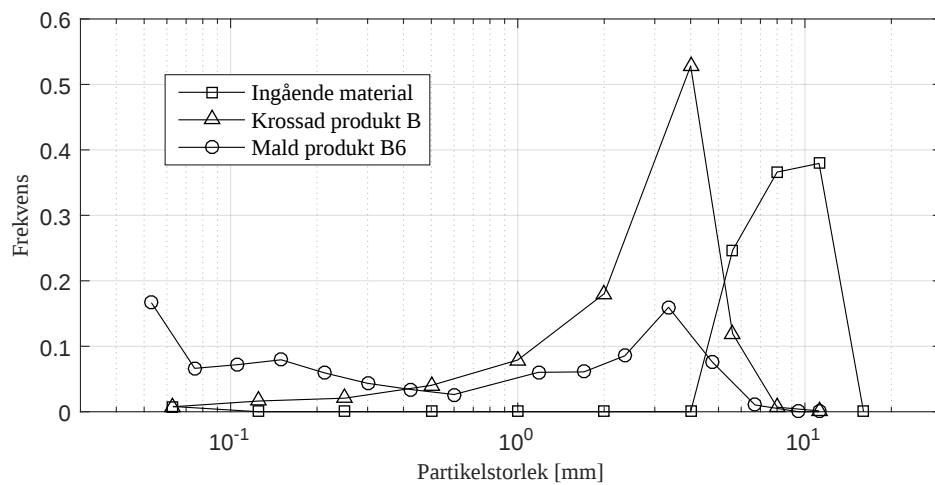
De tester som genomfördes med blandade kulstorlekar gav inte förväntade resultat. I Figur 18 illustreras partikelstorleksfördelningen för test B4 och B6 med CSS 3,0 mm, där 18a visar grafen för testet med enbart kulstorlek 4 (kuldiameter 38,5 mm) och 18b visar grafen för kulstorlek 1 och 4 blandat (kuldiameter 13 respektive 38,5 mm). Som figuren visar är resultatet inte bättre för testet med de blandade kulorna, högst effektivitet att sönderdela större partiklar nås för testet där enbart kulstorlek 4 användes.

För att koppla resultatet från krossnings- och malningstesterna till industrin har P_{80} -värdet tagits fram. P_{80} står för den partikelstorlek för vilken 80 % av materialet understiger. Motsvarande aktuella värde för kopparslag i produktion har mottagits från Tillberg på Boliden [22]. Detta värde varierar, men under årets fyra första månader låg det mellan 117 och 151 μm .

För att ta fram P_{80} -värdena för projektets 14 tester användes modifierade varianter av de tidigare framtagna kumulativa graferna, där x-axeln ändrats till linjär skala (bilaga I). Med hjälp utav graferna kunde sedan P_{80} -värden uppskattas för samtliga test, enligt Tabell 2.



(a) Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test B4. B står för CSS 3,0 mm och 4 står för kuler med diameter 38,5 mm.



(b) Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test B6. B står för CSS 3,0 mm och 6 står för blandade kuler med diameter 13 respektive 38,5 mm.

Figur 18: Jämförelse mellan test B4 (a) och B6 (b). För B4 minskar storleken för majoriteten av partiklarna efter malningen. I test B6 är graden av partikelstorleksminskning för större partiklar mindre och det blir inte lika stor andel fint material som för B4.

Tabell 2: P_{80} -värden för samtliga tester. P_{80} -värdet motsvarar den partikelstorlek för vilken 80 % av materialet understiger.

Test	P_{80} [μm]
A1	1590
A2	590
A3	410
A4	390
B1	3230
B2	2840
B3	2420
B4	940
B5	3040
B6	2640
C1	4700
C2	4490
C3	4160
C4	3060

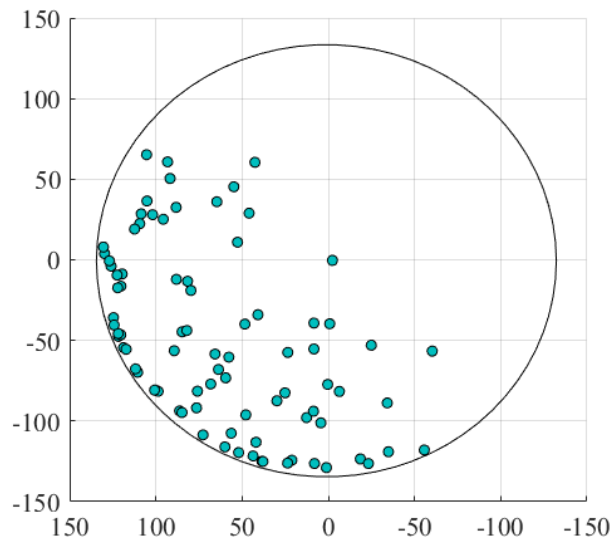
4.2 Simulering

För att verifiera att simuleringen följer realistiska rörelsemönster har kulornas positioner vid varje tidssteg exporterats från EDEM 2.7 för att analyseras med hjälp av MATLAB. Resultatet presenteras i Figur 19 som ett geometriskt spridningsdiagram. Här representerar axlarna den position som partiklarna har i millimeter för två dimensioner.

När modellens positioneringsdata väl verifierats exporterades även kinetisk energi- och hastighetsdata. Här togs fyra olika värden fram för varje enskild kula vid varje kulstorlek. All data var tagen vid ett stationärt tillstånd under 5 sekunders simuleringstid. Datan för rörelseenergi i simuleringen är sammanställd i Tabell 3 och påvisar att en större kulstorlek leder till mer rörelseenergi. Hastigheten är väldigt snarlik för alla kulstorlekar, se Tabell 4. Om däremot den totala mängden rörelseenergi som finns i systemet beaktas fås ett resultat enligt Tabell 5.

Tabell 3: Kulornas maximala kinetiska energi i kvarnen enligt simulering.

Kulstorlek [mm]	Min [mJ]	Max [mJ]	Medel [mJ]	Median [mJ]
13,0	2,4	22,8	9,9	8,2
21,5	18,7	99,6	45,4	30,9
25,0	27,7	150,5	80,6	87,5
38,5	94,0	503,3	248,2	207,0



Figur 19: Positionsdata för kulstorlek 38,5 visualiserat med spridningsdiagram i två dimensioner. Cirkeln representerar kvarntrumman.

Tabell 4: Kulornas maximala hastigheter i kvarnen enligt simulering.

Kulstorlek [mm]	Min [m/s]	Max [m/s]	Medel [m/s]	Median [m/s]
13,0	0,7289	2,2545	1,4359	1,3492
21,5	0,9600	2,2153	1,4459	1,2334
25,0	0,9319	2,1719	1,5502	1,6555
38,5	0,8982	2,0782	1,4269	1,3328

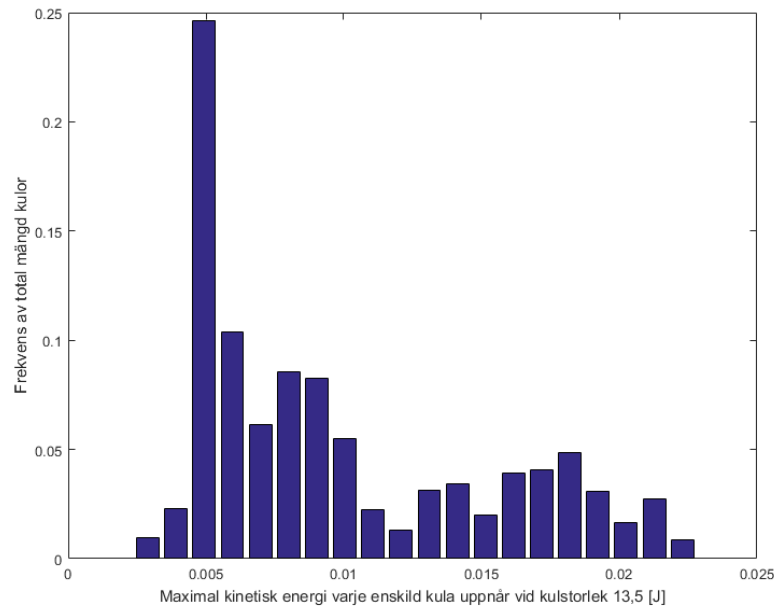
Tabell 5: Systemets totala kinetiska energi enligt simulering.

Kulstorlek [mm]	Total [J/]
13,0	4,2
21,5	4,0
25,0	3,8
38,5	3,1

För att få den totala kinetiska energin för de olika kulsatserna multipliceras medianvärdet med antalet kulor i respektive kulsats. Dessa värden kan sedan användas vid jämförelse mellan de olika kulsatsernas totala energinivåer.

Alla max- och min-värden i Tabell 3 och 4 gäller för hela systemet under hela simuleringstiden. Värdena gäller för en enskild kula. De enskilda kulornas maximala kinetiska energi visas vidare i

Figur 20 för kulstorlek 13,0 mm. Där motsvarar staplarna frekvensen av samtliga kulors maximala rörelseenergi under hela simuleringstiden. En intressant iakttagelse är att 25 % av kulorna antar samma värde annars är det en bimodal spridning, den kinetiska energin verkar gruppera sig i två normalfördelningar. Liknande fenomen visas för alla olika kulor i bilaga J.



Figur 20: Frekvens av enskilda kulors största rörelseenergi för kulstorlek 13,0 mm.

4.3 Förberedelse Hopkinsonuppställning

I början av projektet undersöktes den befintliga Hopkinsonuppställningen som fanns i CRPS-laboratoriet på Chalmers, avseende funktionalitet och konstruktion. För få en djupare förståelse om hur uppställningen ska användas inleddes en litteraturstudie. Där bildades en uppfattning om metoden i stort och kunskap om konstruktioner som liknar uppställningen på Chalmers. Efter den teoretiska faktainsamlingen visade det sig att alla mekaniska delar fanns på plats men att uppställningen saknade såväl komplett mätutrustning som databehandling. Arbetet har utgått från att ta fram både hårdvara och mjukvara för detta ändamål.

Komponenter för datainsamling, kompatibla med befintliga trådtöjningsgivare, köptes in från National Instruments. Till databehandlingen införskaffades en dator som installerades med operativsystem, nätverkgregisterades och installerades med mjukvaran LabVIEW. Komponenterna är klara för installation men behöver kompletteras med ett program för styrning av datainsamling. Till mätsystemet för hastighet införskaffades två fotosensorer. För signalbehandlingen har ett program skrivits som använder en Arduinoprocessor för att beräkna hastigheten. Mätutrustningen beskrivs mer detaljerat under avsnitt 3.3. Där presenteras även framarbetade instruktioner för hur uppställningen ska användas.

5 Diskussion

I detta kapitel förs diskussion kring de resultat som tagits fram. I avsnitt 5.1 behandlas de fysiska krossnings- och malningstesterna. Efterföljande avsnitt 5.2 beskriver diskussionen kring resultaten från simuleringarna samt hur de kan kopplas ihop med de fysiska testerna. Därefter presenteras felkällor i avsnitt 5.3.

5.1 Krossning och malning

Utifrån testerna som har gjorts visar det sig att krossning med mindre CSS kräver högre energi än krossning vid större CSS. Detta beror dels på att krossen får arbeta längre tid till följd av att matningen är långsammare för mindre CSS, medan den insamlade provmängden är lika stor för alla tre test.

Dessutom kräver krossen högre effekt för att få ner storleken på materialet vid mindre CSS eftersom det ingående materialet har samma storlek i alla test. Energinivåerna vid malningen varierar något för olika storlek på det ingående materialet och kulstorlek, men borde inte göra det eftersom massan på innehållet i kvarnen är densamma vid alla test. Det som istället är intressant är hur pass bra kulorna får ner storleken på materialet.

I Tabell 1 i avsnitt 4.1 går det att utläsa vilken uppsättning CSS och kulstorlek som ger den lägsta energiåtgången för varje största partikelstorlek. För alla partikelstorlekar, bortsett från de tre största, blir den lägsta använda energin för hela processen med CSS-inställning 1,8 mm. Det visar sig även att den näst lägsta, tredje lägsta och fjärde lägsta energin fås för denna CSS-inställning (Tabell 7, bilaga F). Sett till de genomförda testerna A1-A4, B1-B6 och C1-C4 är trenden att tester från A-serien tenderar att vara mer energieffektiva, medan tester från C-serien är mindre energieffektiva. Gällande kulstorlek är tendensen att större kulor ger en mer energibesparande process inom varje CSS, men att mindre kulor blir mer energieffektiva för mindre partikelstorlek. Noterbart är att energibesparing i det här avseendet är kopplat till partikelstorlek på slutprodukten och hur stor andel av det ingående materialet som sönderdelas till den storleken.

Vid framtagningen av testplanen (Figur 6, avsnitt 3.1) fanns en hypotes att större kulor krävs för att kunna mala stora partiklar och mindre kulor för att få riktigt fint material. En förhoppning var därför att malningsprocessen skulle bli mer effektiv med blandade kulstorlekar. Av resultatet fås att så inte blir fallet. Den stora skillnaden är att malning med enbart storlek 4 får ner största partikelstorlek effektivt och en stor andel blir fint material. Med blandade kulstorlekar sönderdelas de största partiklarna inte alls i lika stor utsträckning.

Ur energisynpunkt är heller inte de blandade kulstorlekarna speciellt bra i jämförelse med övriga konfigurationer sett till använd energi per ton produkt. Detta skulle kunna bero på att andelen kulor av respektive kulstorlek inte nödvändigtvis behöver vara 50 % var. Eftersom den större kulstorleken får ner partikelstorleken bättre kan det tänkas att en större andel borde vara stora kulor än små kulor. Det är först vid en produktstorlek mindre än $150\text{ }\mu\text{m}$ som blandade kulstorlekar i test B6 blir energieffektivare än test B4 med endast en kulstorlek, vilket kan ses i Tabell 7 i bilaga F. De mindre kulorna behövs fortfarande för att få ner minsta storleken på produkten men uppsättningen av stora och små kulor borde kanske vara övervägande del stora kulor.

En annan förklaring skulle kunna vara att testerna med blandade kulstorlekar hade behövts köras längre tid för att få ner partikelstorleken. Längre maltid betyder dock att kvarnen använder mer energi och processen blir då inte heller mer energieffektiv, jämfört med konfigurationen som behöver malas kortare tid för att nå samma partikelstorlek.

Efter att ha jämfört P_{80} -värdena från Bolidens produktion med de som tagits fram i detta

projekt kan konstateras att Bolidens slutprodukt är finare. Bolidens högsta P_{80} -värde, 151 μm , är betydligt lägre än det lägsta P_{80} -värdet, 390 μm , för de tester som genomförts i detta projekt, se Tabell 2. Detta skulle kunna bero på att malningsprocessen inte pågick under tillräckligt lång tid i dessa tester för att nå samma resultat som Boliden. Det skulle vara intressant att undersöka vilken malningstid som krävs för att nå motsvarande P_{80} -värde. Även energiåtgången för att nå dit är av intresse.

5.2 Simulering

Den totala rörelseenergin i systemet blir större när mindre kulor används även om massan för hela systemet är lika. Rörelseenergin för en stor kula är betydligt större än för de mindre kulorna vilket leder till ökad sannolikhet för sönderdelning av partiklar med högre hållfasthet. Mindre kulor ger betydligt fler kontaktpunkter i systemet vilket betyder att den totala rörelseenergin blir utspridd över fler punkter och inte ger lika stor chans till sönderdelning vid varje enskild stöt. Detta kan vara en förklaring till varför de större kulorna lyckas sönderdela de större partiklarna medan de mindre kulorna inte lyckas få ner den största partikelstorleken. Däremot klarar de mindre kulorna av att mala sönder partiklar som har krossats med ett mindre CSS. Eftersom lagen om energikonservering gäller kan en ekvation formuleras enligt ekvation (10). $\dot{E}_{\text{tot}}$ betecknar den totala energin, $\dot{E}_k$ är den kinetiska energin och $\dot{E}_{\text{övrig}}$ är all övrig energi.

$$\dot{E}_{\text{tot}} = \dot{E}_k + \dot{E}_{\text{övrig}} \quad (10)$$

Om den kinetiska energin skulle vara högre i ett scenario innebär det att den övriga måste vara lägre. Ifall en stor del av den kinetiska energin inte skulle leda till sönderdelning sker en energiförlust i hela systemet. Detta kan formuleras enligt ekvation (11)

$$\dot{E}_k = \dot{E}_{\text{delning}} + \dot{E}_{\text{förlust}}, \quad (11)$$

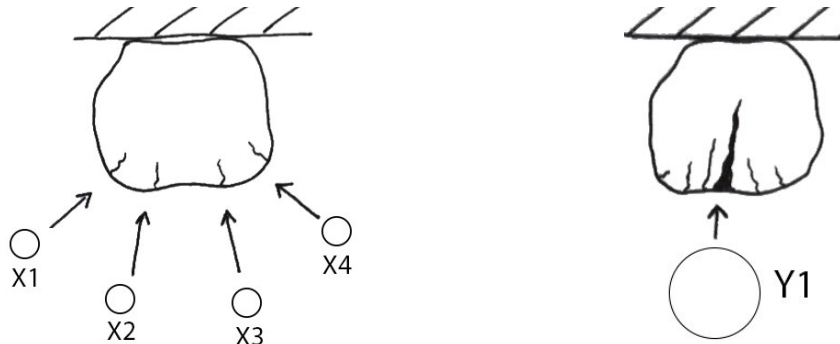
där $\dot{E}_{\text{delning}}$ är den rörelseenergi som leder till sönderdelning och $\dot{E}_{\text{förlust}}$ är den rörelseenergi som inte leder till sönderdelning. Idén är alltså att en partikel med en specifik mängd rörelseenergi antingen sönderdelas eller inte, beroende på hur många kontaktpunkter rörelseenergin är uppdelad i. Detta visualiseras i Figur 21a och 21b, där $\dot{E}_k$ är lika för båda systemen men fördelad på fyra kulor i Figur 21a respektive en kula i Figur 21b.

Enligt diagrammen i bilaga G leder större kulor till att partikelfördelningens största storlek minskar. Det kräver alltså delvis högre rörelseenergi vilket är beroende av massan, se ekvation (12), då hastigheten för de olika kulstorlekarna har en nästintill lika medelhastighet.

$$\dot{E}_k = \frac{1}{2}mv^2 \quad (12)$$

För att en partikel skall kunna sönderdelas krävs att varje kontaktpunkt får tillräckligt hög rörelseenergi beroende på partikelns storlek och hållfasthet. Det är alltså generellt mer effektivt med större kulor då det leder till att en större andel av $\dot{E}_k$ består av $\dot{E}_{\text{delning}}$.

Om en partikel kräver till exempel 500 J i $\dot{E}_k$ för att sönderdelas och en kula ger 750 J i $\dot{E}_k$ kommer den överblivna energin, 250 J, gå till förlust. Det finns alltså ett samband mellan partikel- och kulstorlek. Med detta samband skulle den kula som är mest effektiv för att sönderdela en partikel kunna hittas. Kulan ska inte vara för stor då överbliven rörelseenergi inte kan användas till sönderdelning då partikeln redan är sönderdelad, men inte heller för liten för då sönderdelas partikeln inte alls. Rörelseenergin i kulorna kan därför användas som ett effektivitetsmått ifall man med hjälp av en Hopkinson bar kan ta fram hur mycket rörelseenergi som krävs för att sönderdela en partikel.



(a) Små kuler som kolliderar med en partikel.

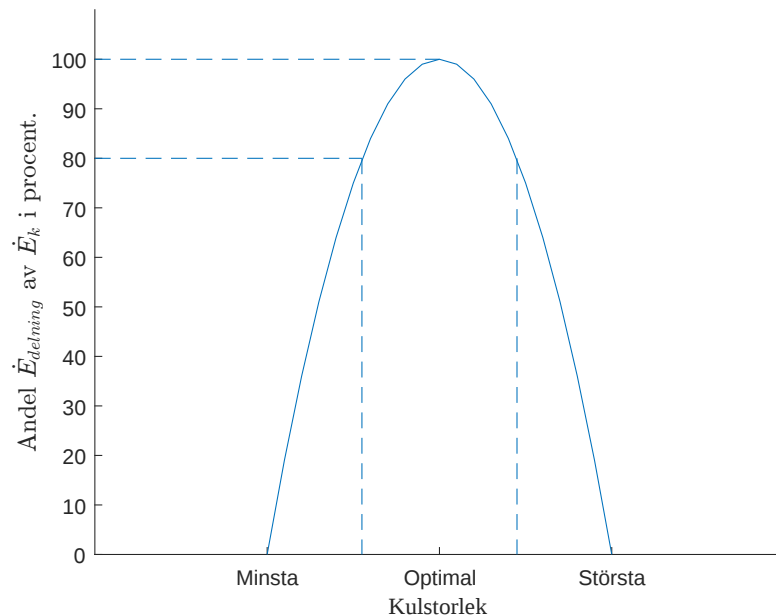
(b) Stor kula som kolliderar med en partikel.

Figur 21: Små kuler (a) och en större kula (b) med lika stor total massa kolliderar med en partikel. Sönderdelning av partikeln sker i högre grad med en stor kula än med flera mindre kuler.

För att ta fram vilka kulstorlekar som leder till optimal rörelseenergi används resultatet från simuleringen. Utifrån det kan en optimal design av kulstorlekar konstrueras som sedan kan tillämpas i en verklig kvarn. Detta kan också leda till möjlighet för att minimera tiden i kvarnen och därmed få en mer effektiv kvarnprocess.

Med mindre kuler fås fler kontaktpunkter vilket är bra om PSD är tillräckligt litet så att sönderdelning faktiskt sker. Istället för att använda en satskvarn med en blandning av kulstorlekar där mycket energi går i förlust, beroende på hur stor rörelseenergi som krävs för sönderdelning, kan processen delas upp i flera steg. Varje steg inkluderar att ta fram optimal kulstorlek för att få ner partikelstorleken till en viss storlek.

Andelen $\dot{E}_{delning}$ av $\dot{E}_k$ kan användas som ett effektivitetsmått för optimal kulstorlek för en specifik PSD. Om processen kan antas vara tillräckligt bra med ett effektivitetsmått över 80 % fås ett område för optimal kulstorlek enligt Figur 22. Under tiden som malning sker kan den optimala kulstorleken ändras. Genom att ta fram ytterligare diagram med områden för optimal kulstorlek i olika tidpunkter kan den bästa kulstorleken bestämmas över tid. Utifrån det går det också att bestämma när byte av kulstorlek är som bäst ur effektivitetssynpunkt. En tillämpning och möjlig design av en kvarn skulle kunna vara en sluttande trumma med flera sektioner, separerade med siktsåll. Varje sektion innehåller kuler med storlek som är optimalt för det material som motsvarar storleken föregående siktsåll. Materialet följer ett flöde ner i kvarnen och malningen sker hela tiden med den mest sönderdelningseffektiva kulstorleken.



Figur 22: Andelen av den totala kinetiska energin för en kula som blir delningsenergi i sönderdelningen av en partikel som funktion av kulstorlek. Området i mitten motsvarar kulstorlek där malningen blir optimal med avseende på sönderdelning och kulstorlek.

5.3 Felkällor

Den ingående effekten till kvarnen borde endast bero på massan av material och malmedia inuti kvarnen eftersom det är det enda som förhindrar kvarnens rörelse och kan variera mellan malningsomgångarna. Detta nämns i avsnitt 5.1 Samtliga test kördes med $1300\text{ g} \pm 30\text{ g}$ material och $20\text{ kg} \pm 360\text{ g}$ kulor. Variationen i den använda energin (bilaga F) skulle kunna bero på felmarginalen hos materialets och kulornas massa, men det går heller inte att utesluta slumpmässiga fel. Om den uppmätta energin kan antas vara normalfördelad fås ett medelvärde på $15,6\text{ kWh/t}$ och en standardavvikelse $0,7\text{ kWh/t}$.

Kulorna i sats 1-3 är kullagerkulor med mycket små toleranser och kan anses vara likformade och av samma storlek. Mätning med skjutmått av tre slumpmässigt valda kulor per sats genererade samma diameter med en tiondels millimeters noggrannhet. Vid samma tillfälle mättes en kula som hade lånats från Minpro Recycling tillhörande sats 4. Denna kula mättes till $38,5\text{ mm}$. Vid en närmare undersökning av kulsats 4 upptäcktes att kulorna var av varierande storlek, av vilken anledning fem slumpmässigt utvalda kulor från sats fyra mättes igen. Vid detta tillfälle fanns endast en linjal med millimeternoggrannhet tillgänglig. Det nya beräknade medelvärdet för kulstorlek 4 är $34,4\text{ mm}$, se figur 29 i bilaga D.

5.3.1 Siktning

Proverna kördes tio minuter i skakmaskin innan materialet vägdes upp för samtliga siktdäck. Vid användning av skakmaskin vill man vara säker på att man har kört tillräckligt länge för att resultatet man får av partikelstorleksfördelningen ska vara korrekt. Vid för kort tid i skakmaskinen riskerar de finare partiklarna att ha fastnat på vägen ner till rätt siktdäck. Detta är

särskilt känsligt då det är en stor andel fint material eftersom det finaste kan hamna på toppen av högar på ovanstående grövre siktdäck. Om maskinen istället skakar under för lång tid kan materialet istället sönderdelas och därför ge ett missvisande resultat. Detta är särskilt känsligt om materialet är sprött.

5.3.2 CAD

Vid mätning av kvarn behövdes vissa antagande göras, till exempel att lyftarna var symmetriska och att alla nio hade likadan geometri. Ett skjutmått användes för att mäta upp kvarnen och det är inte säkert att allt blev helt rätt, därför kan modellen ha felaktiga dimensioner på vissa ställen. Locket är simplifierat då det riktiga locket hade en stor gjuten låsmekanism, denna gjutna detalj väger i verkligheten alltså betydligt mer än vad modellen väger i simuleringen. Endast själva kvarnen har modellerats och det saknas arbetsyta, kugghjul, elmotor och andra saker som fanns på plats. Det fanns inget bra sätt att mäta axeln, därför har den modellerade axeln andra dimensioner från den verkliga.

5.3.3 Simulering

Då fokus ej låg på förståelse för kontaktmodell valdes den vanligaste kontaktmodellen vilket är Hertz-Mindlin (no-slip) kontaktmodell, det finns ett flertal olika kontaktmodeller som passar bättre för olika situationer och i detta fall är det inte självklart vad som passar bäst.

En for-loop användes i MATLAB för att skapa en animation av positioneringsdata i tre dimensioner och där kunde det noteras att i ett område skedde hopp i positionering. Anledningen till detta är fortfarande oklar men bör ej påverka resultat i rörelseenergi.

6 Slutsats och rekommendation

En slutsats som kan dras från sönderdelningstesterna av kopparslaggen är att krossning med mindre CSS minskar energiåtgången per ton produkt för hela processen. Med ett ursprungligt material i fraktionen 4,0-11,2 mm är kulor med minst diameter 25,0 mm att föredra ur energisynpunkt.

Simuleringarna styrker att den energi som krävs för att sönderdela partiklarna endast kan fås från större kulor. Genom att undersöka kollisionsenergien för en bergmaterialpartikel med Hopkinson bar kan kvarnen modelleras med kulstorlekar som motsvarar den energi som krävs via simuleringar. Den optimala kulstorleken kan sedan användas i en verklig kvarn för en effektivare sönderdelningsprocess.

För vidare forskning skulle det vara intressant att undersöka malningstiden. Det skulle även vara intressant att färdigställa en Hopkinsonuppställning för att kunna ta fram den minsta rörelseenergi som krävs för sönderdelning av partiklar. Denna data kan användas för att ta fram optimal kulstorlek med hjälp av EDEM 2.7 eller liknande mjukvara. När optimal kulstorlek itererats fram kan olika tidsvärden för malningstid utforskas. När optimal tid har hittats kan partikelstorleksfördelningens påverkan av olika kulstorlekar och tider utforskas för att se när en viss kulstorlek inte är längre är effektiv. Därmed kan det undersökas ifall två olika kulor kan användas i sekvens för energioptimering.

Referenser

- [1] Edberg, M., Johansson, M., Märlind, M., Johansson, T. N., Toller, C., Wahlund, F. "Energieffektiv höghastighetskross för gruvindustrin," Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling, Chalmers tekniska högskola, Tech. Rep., 2015.
- [2] Gröndahl, A., Jeresi, M., Karlsson, J., Nilsson, V. "Utveckling av energieffektiv kross- och malprocess för gruvindustrin," Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling, Chalmers tekniska högskola, Tech. Rep., 2015.
- [3] (2016) Energioptimering av krossning och malning för gruvindustrin. Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling, Chalmers tekniska högskola. [Online]. Tillgänglig: <http://www.chalmers.se/sv/institutioner/ppd/utbildning/kandidatarbeten-2016-2017/Sidor/Energioptimering-av-krossning-och-malning-for-gruvindustrin.aspx> (Hämtad 2017-02-02).
- [4] Tromans, D. "Mineral comminution: Energy efficiency considerations," *Minerals Engineering*, 2008.
- [5] Patton, M. Q. "Enhancing the quality and credibility of qualitative analysis," *Health Services Research*, vol. 34, 1999.
- [6] Wills, B. A. *Mineral processing technology – An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. Elsevier, 2006.
- [7] Evertsson, C. M. "Cone crusher performance," Ph.D. dissertation, Chalmers university of technology, 2000.
- [8] Gy, P. *Sampling of particulate materials theory and practice*. Elsevier scientific publisher company, 1979, vol. 4, Developments in geomathematics.
- [9] *Svensk Standard SS-EN 932-2. Ballast - Generella egenskaper - Del 2: Metoder för neddelning av laboratorieprov*, 07 1999.
- [10] Cundall, P. A., Strack, O. "A discrete numerical model for granular assemblies," *Géotechnique*, 29(1):47-65, 1979.
- [11] (2017) EDEM Simulation. DEM Solutions Ltd. [Online]. Tillgänglig: www.edemsimulation.com (Hämtad 2017-02-07).
- [12] Hertz, H. "On the contact of elastic solids," *J. reine und angewandte Mathematik*, 92:156-171, 1882.
- [13] Mindlin, R., Deresiewicz, H. "Elastic spheres in contact under varying oblique forces," *AMSE*, 327-344, 1953.
- [14] Tsuji, T. T., Y., Ishida, T. "Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe," *Powder Technology*, 71:239-250, 1992.
- [15] Sakaguchi, E. O., E., Igarashi, T. "Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo," *Int. J. Mod. Phys. B*, 1993.
- [16] Hopkinson, B. "A method of measuring the pressure produced in the detonation of high explosives or by the impact of bullets," *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 1914.

- [17] Kolsky, H. "An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading," *Proceedings of the physical society*, 1949.
- [18] Chen, W., Song, B. *Split Hopkinson (Kolsky) bar – Design, testing and applications*. Springer, 2011.
- [19] Lundberg, B. "A split hopkinson bar study of energy absorption in dynamic rock fragmentation," *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 1976.
- [20] Nicholas, T. "Instrumented impact testing using a hopkinson bar apparatus," Air Force Materials Laboratory, Wright-Patterson Air Force Base, Ohio, Tech. Rep., juli 1975.
- [21] *Kurshäften i elektroteknik - TREFASSYSTEM*, 09 1998.
- [22] Tillberg, J. Muntlig källa. Boliden.
- [23] (2017) LabVIEW. National Instruments. [Online]. Tillgänglig: <http://www.ni.com/labview/> (Hämtad 2017-02-07).
- [24] Sharma, S., Chavan, V. M., Agrawal, R. G., Patel, R. J. "Split-hopkinson pressure bar: an experimental technique for high strain rate tests," Bhabha atomic research centre, Tech. Rep., 2011.

A Siktprotokoll för kopparslagg från Rönnskär

CHALMERS ROCK PROCESSING SYSTEMS
V01-Print Lab Version

Test Protocol

PARTICLE SIZE ANALYSIS - SIEVING METHOD SS-EN 933-1		Laboratory: CRPS Lab	
Sample ID:	Kombarrisarna	Date:	2017-03-10
Material Type:	Kopparslagg	Laborant:	Anna Rydin
Quarry/Origin:	Rönnskär	Project:	Kombarrisarna
Experiment Performed:		Total dry weight M_1 :	998,35
(SPB, IPB, Crushing ...)		Total wet weight M_2 :	1007,53
Weight loss check wt-%		Moisture wt-%:	

Sieve				
Pass. mm	Ret. (deck) mm	Weight retained (R_i) g	Proportion retained R_i/M_i wt-%	Proportion Passing $1-(\sum R_i/M_i)$ wt%
31,5	22,4			
22,4	19			
19	16	88,3		
16	11,2	337,94		
11,2	8	526,17		
8	5,6	673,76		
5,6	4	749,65		
4	2	847,33		
2	1	898,32		
1	0,5	929,36		
0,5	0,25	951,64		
0,25	0,125	965,72		
0,125	0,063	977,2		
0,063	0	996,04		
	Total	996,04		

Figur 23: Siktprotokoll som beskriver storleksfördelningen för kopparslaggen som anlände till Chalmers. Protokollet användes för att beräkna hur mycket material som behövde handsiktas för att få tillräckligt mycket material av rätt fraktion inför krossningen.

B Siktprotokoll - kopparslagg efter handsiktning

CHALMERS ROCK PROCESSING SYSTEMS
V01-Print Lab Version

Test Protocol

PARTICLE SIZE ANALYSIS - SIEVING METHOD SS-EN 933-1		Laboratory: CRPS Lab	
Sample ID:	Kombarrisarna	Date:	2017-03-21
Material Type:	Kopparslagg	Laborant:	Anna Rydin
Quarry/Origin:	Rönnskär	Project:	Kombarrisarna
Experiment Performed: (SPB, IPB, Crushing ...)		Total dry weight M_1 :	858,49
		Total wet weight M_2 :	
Weight loss check wt-%		Moisture wt-%:	

Sieve				
Pass. mm	Ret. (deck) mm	Weight retained (R_i) g	Proportion retained R_i/M_i wt-%	Proportion Passing $1-(\sum R_i/M_i)$ wt%
31,5	22,4			
22,4	19			
19	16			
16	11,2	0		
11,2	8	325,56		
8	5,6	639,76		
5,6	4	851,38		
4	2			
2	1			
1	0,5			
0,5	0,25			
0,25	0,125			
0,125	0,063			
0,063	0	858,3		
	Total	858,3		

Figur 24: Siktprotokoll som visar storleksfördelningen för det ingående materialet till krossen. Fraktionen har handsiktats fram och är 4 – 11,2 mm.

C Siktprotokoll - krossat material

CHALMERS ROCK PROCESSING SYSTEMS
V01-Print Lab Version

Test Protocol

PARTICLE SIZE ANALYSIS - SIEVING METHOD SS-EN 933-1	Laboratory: CRPS Lab
--	----------------------

Sample ID:	A7	Date:	2017-03-23
Material Type:	Kopparslagg	Laborant:	Anna Rydin
Quarry/Origin:	Rönnskär	Project:	Kombarrisarna

Experiment Performed:		Total dry weight M_1 :	663,1
(SPB, IPB, Crushing ...)		Total wet weight M_2 :	
Weight loss check wt-%		Moisture wt-%:	

Sieve				
Pass. mm	Ret. (deck) mm	Weight retained (R_i) g	Proportion retained R_i/M_i wt-%	Proportion Passing $1-(\sum R_i/M_i)$ wt%
31,5	22,4			
22,4	19			
19	16			
16	11,2			
11,2	8	0		
8	5,6	0		
5,6	4	2,11		
4	2	83,45		
2	1	370,82		
1	0,5	492,22		
0,5	0,25	560,87		
0,25	0,125	601,99		
0,125	0,063	633,63		
0,063	0	660,71		
	Total	660,71		

Figur 25: Siktprotokoll som visar storleksfördelningen för materialet som krossades med CSS 1,8 mm.

Test Protocol

PARTICLE SIZE ANALYSIS - SIEVING METHOD SS-EN 933-1	Laboratory: CRPS Lab
--	----------------------

Sample ID:	B7	Date:	2017-03-23
Material Type:	Kopparslagg	Laborant:	Anna Rydin
Quarry/Origin:	Rönnskår	Project:	Kombarrisarna

Experiment Performed:		Total dry weight M_1 :	642,60
(SPB, IPB, Crushing ...)		Total wet weight M_2 :	
Weight loss check wt-%		Moisture wt-%:	

Sieve

Pass. mm	Ret. (deck) mm	Weight retained (R_i) g	Proportion retained R_i/M_i wt-%	Proportion Passing $1-(\sum R_i/M_i)$ wt%
31,5	22,4			
22,4	19			
19	16			
16	11,2			
11,2	8	0,86		
8	5,6	5,30		
5,6	4	81,90		
4	2	421,01		
2	1	536,75		
1	0,5	587,48		
0,5	0,25	613,31		
0,25	0,125	626,62		
0,125	0,063	637,12		
0,063	0	641,99		
	Total	641,99		

Figur 26: Siktprotokoll som visar storleksfördelningen för materialet som krossades med CSS 3,0 mm.

Test Protocol

PARTICLE SIZE ANALYSIS - SIEVING METHOD SS-EN 933-1	Laboratory: CRPS Lab
--	----------------------

Sample ID:	C7	Date:	2017-03-23
Material Type:	Kopparslagg	Laborant:	Anna Rydin
Quarry/Origin:	Rönnskår	Project:	Kombarrisarna

Experiment Performed:		Total dry weight M_1 :	661,40
(SPB, IPB, Crushing ...)		Total wet weight M_2 :	
Weight loss check wt-%		Moisture wt-%:	

Sieve

Pass. mm	Ret. (deck) mm	Weight retained (R_i) g	Proportion retained R_i/M_i wt-%	Proportion Passing $1-(\sum R_i/M_i)$ wt%
31,5	22,4			
22,4	19			
19	16			
16	11,2			
11,2	8	3,26		
8	5,6	89,77		
5,6	4	362,72		
4	2	561,76		
2	1	609,01		
1	0,5	631,76		
0,5	0,25	644,97		
0,25	0,125	653,33		
0,125	0,063	658,68		
0,063	0	661,31		
	Total	661,31		

Figur 27: Siktprotokoll som visar storleksfördelningen för materialet som krossades med CSS 4,1 mm.

D Malmedia

Kombarrisarna		
Kulor		
Malning Minpro Recycling , Stråssa		
2017-03-28		
Viktor Rask-Andersen		
Kulstorlek	Diameter [mm]	Vikt [kg]
1	13,0	20,12
2	21,5	20,12
3	25,0	19,94
4	38,5	19,76

Figur 28: Malmedia. Kulor nummer 1-3 är kullagerkulor och nummer 4 är kvarnkulor som fanns hos Minpro Recycling AB i Stråssa. Vid mätning av diameter användes ett skjutmått. Tre kulor från sats 1-3 valdes slumpmässigt ut och mättes. För kulstorlek 4 fanns endast en kula att tillgå vid mätningstillfället. Kulstorleken bestämdes av medelvärdet av de uppmätta kulorna och avrundades till tiondels millimeter. Kulorna mättes där diametern var som störst. I den högra kolumnen anges den totala vikten för respektive kulsats.

Kombarrisarna		
Avvikelser kulstorlek 4		
Malning Minpro Recycling, Stråssa		
2017-03-28		
Viktor Rask-Andersen		
Kulstorlek	Kula	Diameter [mm]
4	# 1	38,5
4	# 2	32
4	# 3	34
4	# 4	32
4	# 5	33
4	# 6	37

Figur 29: Storleksvariationer av kulstorlek 4. Vid en närmare undersökning av satsen av kulstorlek 4 upptäcktes att kulorna inte var av samma storlek. Därför valdes 6 kulor slumpartat ut och mättes med en linjal med millimeterprecision.

E Kvarntester

Kombarrisarna	
Viktprotokoll kvarntester	
2017-03-28	
Johan Andersson	
Provnamn	Vikt (g)
A1	1311
A2	1315
A3	1280
A4	1278
B1	1320
B2	1296
B3	1285
B4	1319
B5	1286
B6	1288
C1	1288
C2	1286
C3	1293
C4	1311

Figur 30: Viktprotokoll för samtliga kvarntester. Vikten anges i gram och avser provets vikt före kvarntestet.

Kombarrisarna				
Kvarntester Minpro recycling, Stråssa				
2017-03-28				
Viktor Rask-Andersen				
<i>Filnamn</i>	<i>Test</i>	<i>Varvtal</i>	<i>Tid [min]</i>	<i>Kommentar</i>
MINPRO_280317__02	A1	275	4	
MINPRO_280317__03	A2	275	4	
MINPRO_280317__04	A3	275	4	
MINPRO_280317__05	A4	275	4	
MINPRO_280317__06				Maskin gick sönder. Anledningen till att fil #6 inte finns är att remmen hoppade av i start av test. Vi skruvade av skärmen och rättade till bandet.
MINPRO_280317__07	B1	275	4	
MINPRO_280317__08	B2	275	4	
MINPRO_280317__09	B3	275	4	
MINPRO_280317__10	B4	275	4	
MINPRO_280317__11	C1	275	4	
MINPRO_280317__12	C2	275	4	
MINPRO_280317__13	C3	275	4	
MINPRO_280317__14	C4	275	4	
MINPRO_280317__15	B5	275	4	50/50 % (massa) av kulor med storlek 13 och 25 mm.
MINPRO_280317__16	B6	275	4	50/50 % (massa) av kulor med storlek 13 och 38,5 mm.

Figur 31: Protokoll för samtliga kvarntester.

F Energi i sönderdelningsprocessen

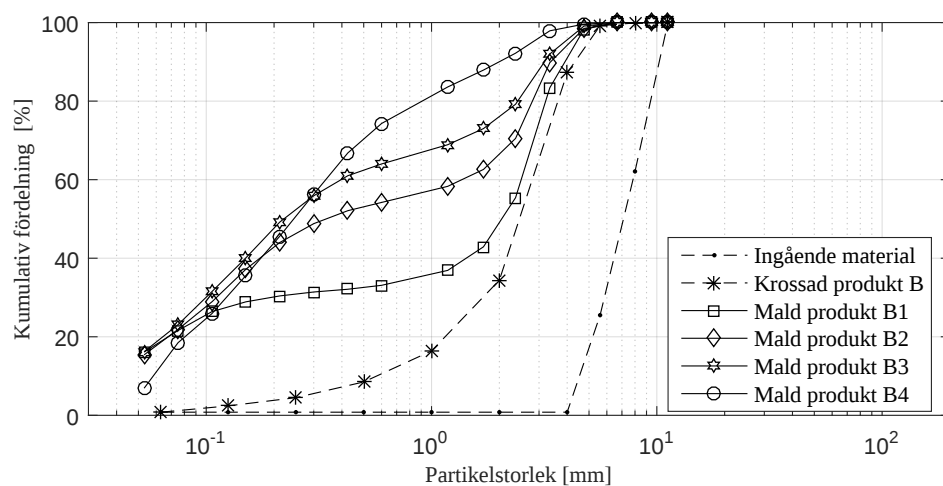
Tabell 6: Den använda energin per ton material uppdelat i krossning, malning och den totala processen.

Kulstorlek [mm]	CSS [mm]	Energi kross [kWh/t]	Energi kvarn [kWh/t]	Total energi [kWh/t]
13,0	1,8	2,60	17,3	19,9
21,5			16,5	19,1
25,0			15,6	18,2
38,5			16,0	18,6
13,0	3,0	1,77	15,7	17,5
21,5			15,1	16,9
25,0			15,2	17,0
38,5			15,0	16,7
13,0 + 25,0			15,5	17,3
13,0 + 38,5			15,6	17,4
13,0	4,1	1,44	15,6	17,1
21,5			15,4	16,9
25,0			14,9	16,4
38,5			14,5	15,9

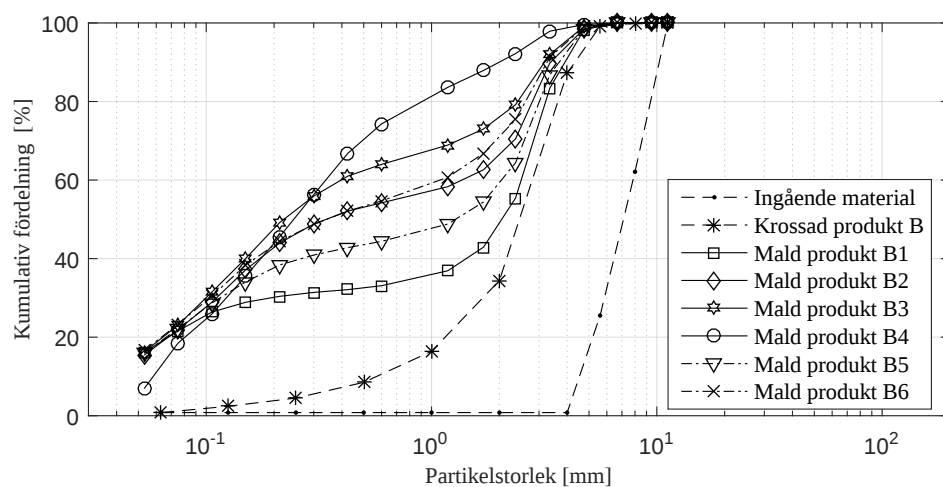
Tabell 7: Energi per ton produkt för alla genomförda test och varje partikelstorlek. För varje partikelstorlek är kombinationen CSS och kulstorlek ordnade från minst använd energi till mest använd energi för hela sönderdelningsprocessen och mald produkt.

Partikelstorlek [mm]	Test													
	Energi per ton produkt [kWh/t]													
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
4,75	B4 16,8	C4 17,1	B2 17,1	B3 17,2	B5 17,5	B6 17,6	B1 17,8	A3 18,2	C3 18,2	A4 18,6	A2 19,1	A1 19,9	C2 20,0	C1 21,0
3,35	B4 17,1	A3 18,2	B3 18,5	A4 18,6	B2 18,8	B6 19,1	A2 19,1	C4 19,3	B5 19,9	A1 20,1	B1 21,0	C3 24,8	C2 27,7	C1 39,4
2,36	B4 18,2	A3 18,4	A4 18,7	A2 19,6	A1 20,7	B3 21,5	C4 21,5	B6 23,1	B2 23,9	B5 26,8	C3 29,1	B1 31,6	C2 35,1	C1 57,7
1,7	A4 18,7	A3 18,8	B4 19,1	A2 20,5	C4 22,7	B3 23,3	A1 23,9	B6 26,1	B2 27,0	C3 31,3	B5 31,7	C2 38,3	B1 40,8	C1 68,8
1,18	A4 18,9	A3 19,5	B4 20,0	A2 22,0	C4 24,1	B3 24,7	B6 28,7	B2 28,9	A1 29,4	C3 32,9	B5 35,4	C2 40,5	B1 47,4	C1 76,6
0,6	A4 20,3	A3 20,9	B4 22,5	A2 23,8	B3 26,6	C4 27,0	B2 31,1	B6 31,8	A1 34,3	C3 34,9	B5 38,9	C2 42,8	B1 52,9	C1 82,9
0,425	A3 22,2	A4 22,3	B4 25,1	A2 25,2	B3 27,9	C4 29,6	B2 32,4	B6 33,4	A1 36,0	C3 36,2	B5 40,3	C2 43,9	B1 54,5	C1 84,5
0,3	A3 25,0	A4 26,3	A2 27,8	B4 29,7	B3 30,4	C4 34,2	B2 34,6	B6 35,8	A1 37,6	C3 38,4	B5 42,2	C2 45,8	B1 55,7	C1 85,8
0,212	A3 29,3	A2 32,1	A4 32,2	B3 34,6	B4 36,7	B2 38,4	B6 39,2	A1 39,8	C4 41,1	C3 42,0	B5 44,9	C2 48,9	B1 57,5	C1 87,6
0,15	A3 37,0	A2 39,3	A4 40,8	B3 42,4	A1 44,2	B6 45,4	B2 45,4	B4 47,0	C3 49,2	B5 50,6	C4 51,6	C2 54,8	B1 60,5	C1 89,9
0,106	A3 47,5	A1 51,7	A2 52,0	B3 54,0	A4 54,9	B6 57,1	B2 58,4	B5 60,1	C3 60,4	B4 64,7	B1 66,3	C2 67,2	C4 69,0	C1 94,9
0,075	A3 64,6	A1 66,4	A2 69,1	A4 73,5	B3 73,6	B6 74,8	B2 77,1	B5 77,7	C3 79,9	B1 81,0	C2 86,1	B4 90,5	C4 92,7	C1 106,7
0,053	A1 93,5	A3 94,6	A2 98,9	A4 104,0	B6 104,9	B3 105,0	B5 108,5	B1 108,7	B2 109,6	C3 112,2	C2 117,9	C1 131,3	C4 131,7	B4 242,7

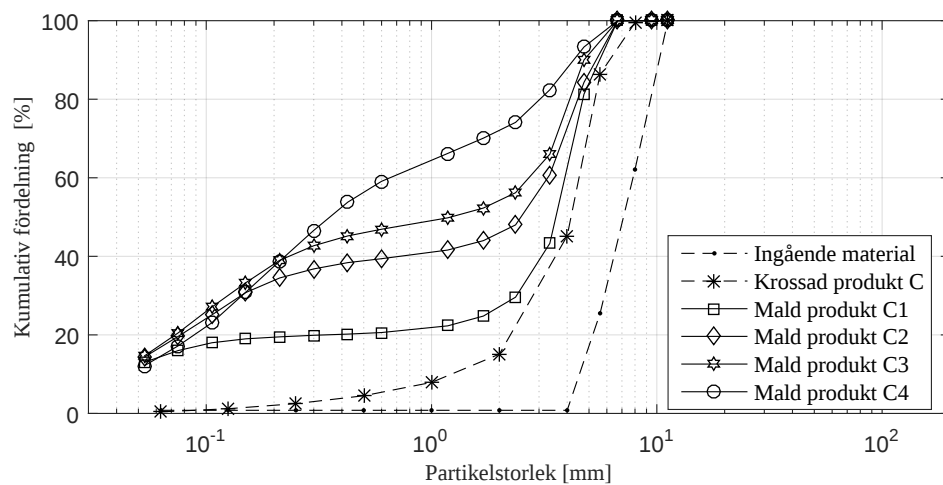
G Siktcurvor - kumulativ fördelning



Figur 32: Diagram över den kumulativa partikelstorleksfördelningen för testserie B, där samtliga tester hade CSS 3,0 mm. Siffran i testnamnet står för kulstorlek, där 1 – 4 motsvarar 13; 21,5; 25 samt 38,5 mm.

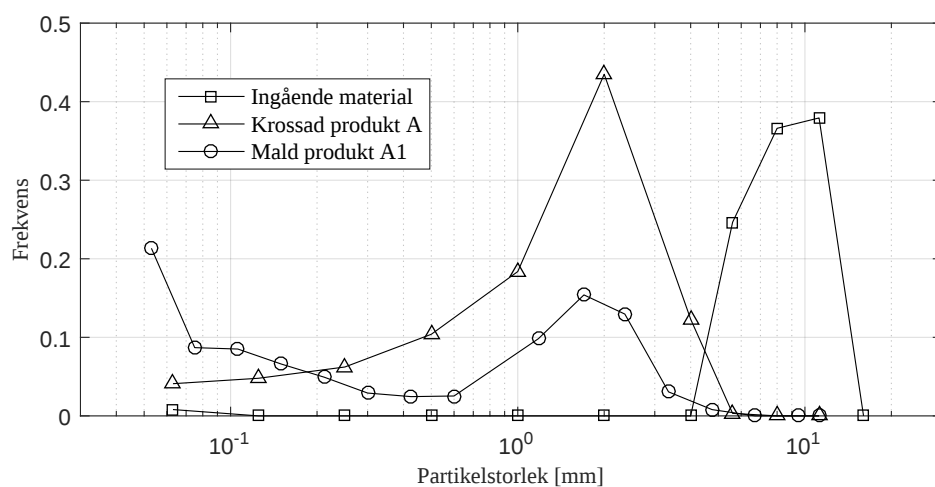


Figur 33: Diagram över den kumulativa partikelstorleksfördelningen för testserie B, där samtliga tester hade CSS 3,0 mm. Siffran i testnamnet står för kulstorlek, där 1 – 6 motsvarar 13; 21,5; 25; 38,5 samt blandstorlekarna 13/25 och 13/38,5 mm.

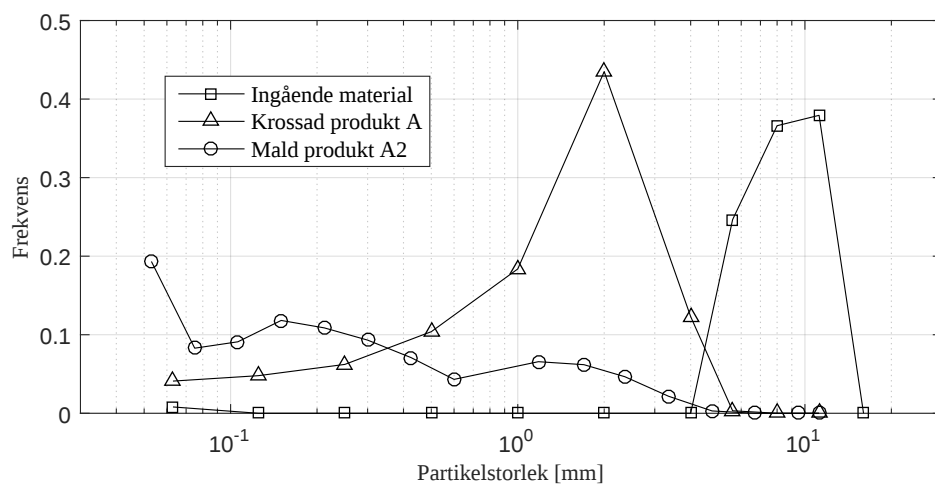


Figur 34: Diagram över den kumulativa partikelstorleksfördelningen för testserie C, där samtliga tester hade CSS 4,1 mm. Siffran i testnamnet står för kulstorlek, där 1 – 4 motsvarar 13; 21, 5; 25 samt 38,5 mm.

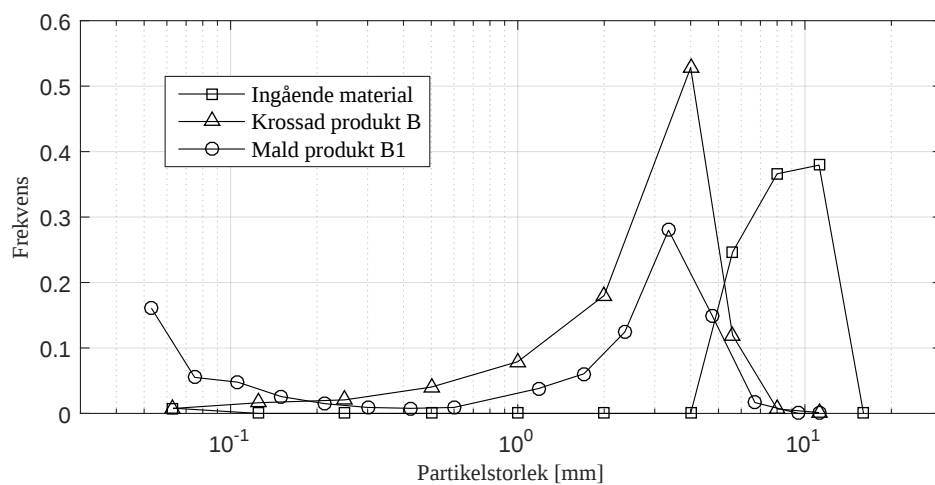
H Siktcurvor - frekvens



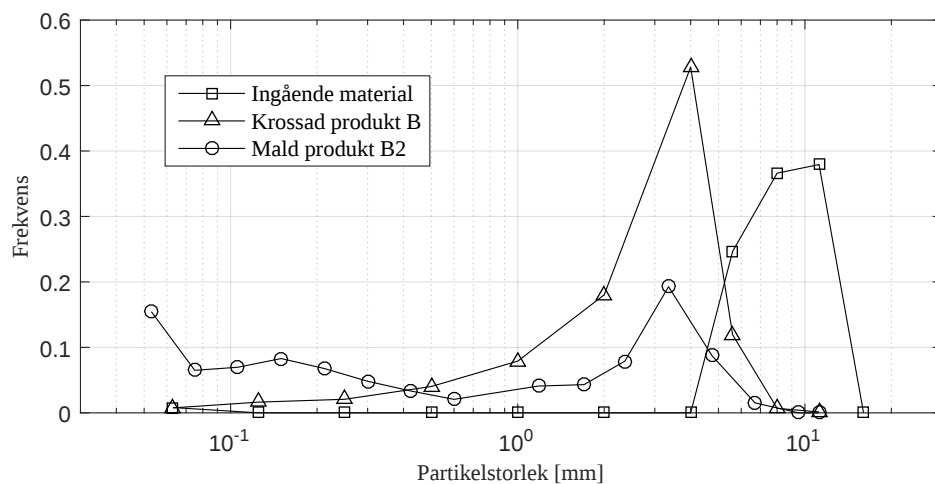
Figur 35: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test A1. A står för CSS 1,8 mm och 1 står för kulor med diameter 13 mm.



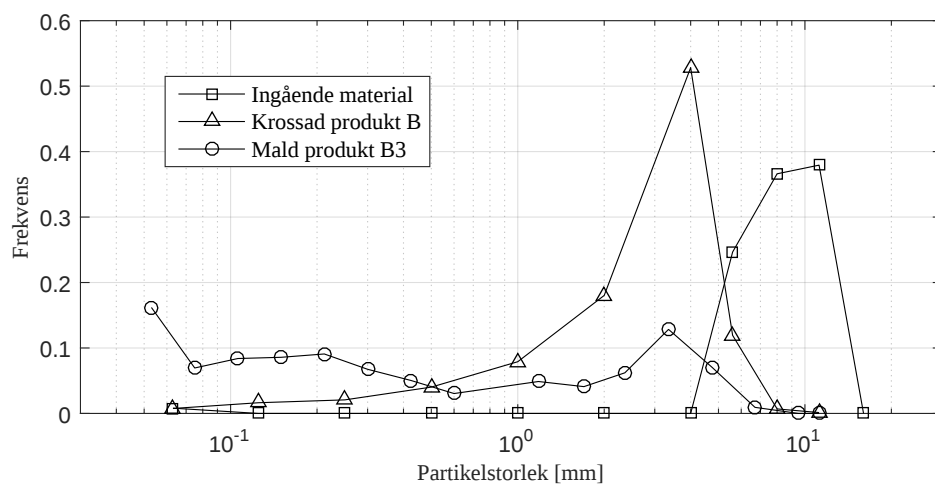
Figur 36: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test A2. A står för CSS 1,8 mm och 2 står för kulor med diameter 21,5 mm.



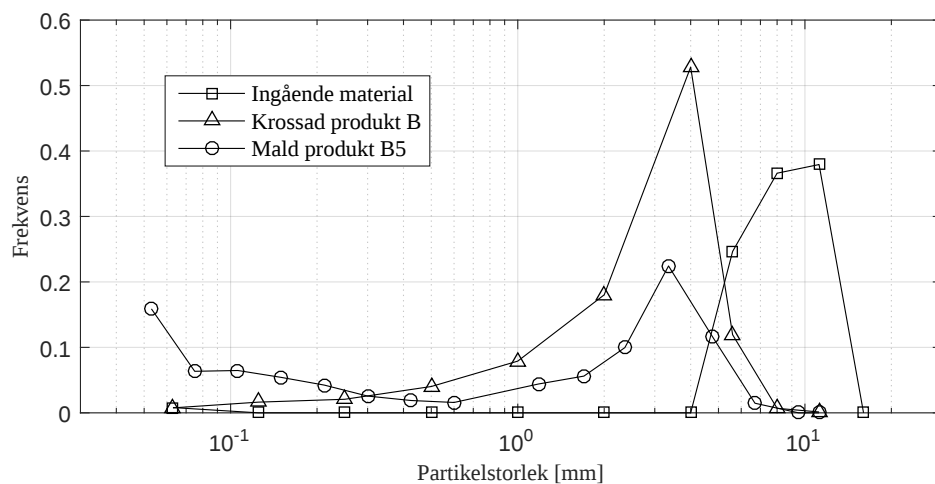
Figur 37: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test B1. B står för CSS 3,0 mm och 1 står för kulor med diameter 13 mm.



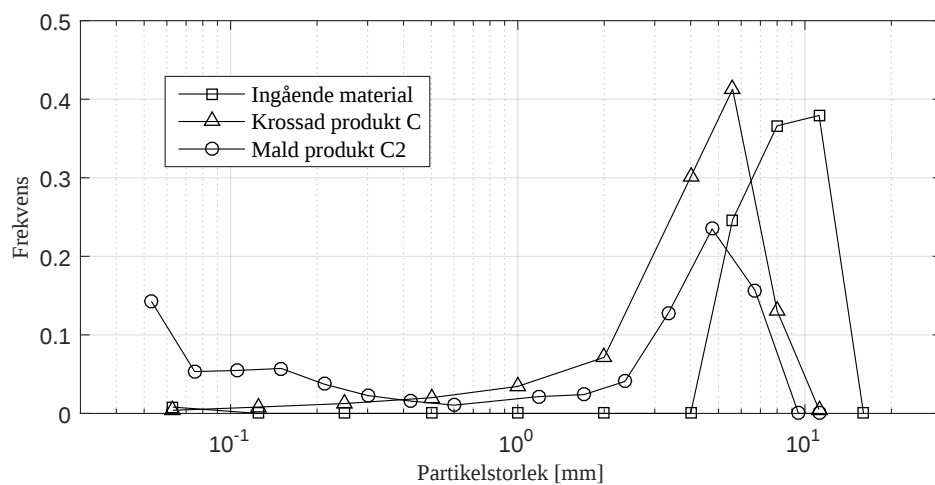
Figur 38: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test B2. B står för CSS 3,0 mm och 2 står för kulor med diameter 21,5 mm.



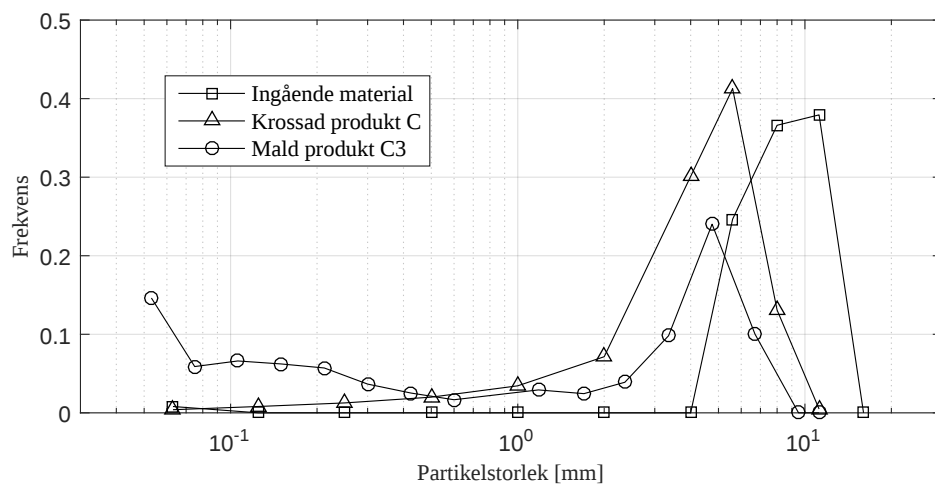
Figur 39: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test B3. B står för CSS 3,0 mm och 3 står för kulor med diameter 25 mm.



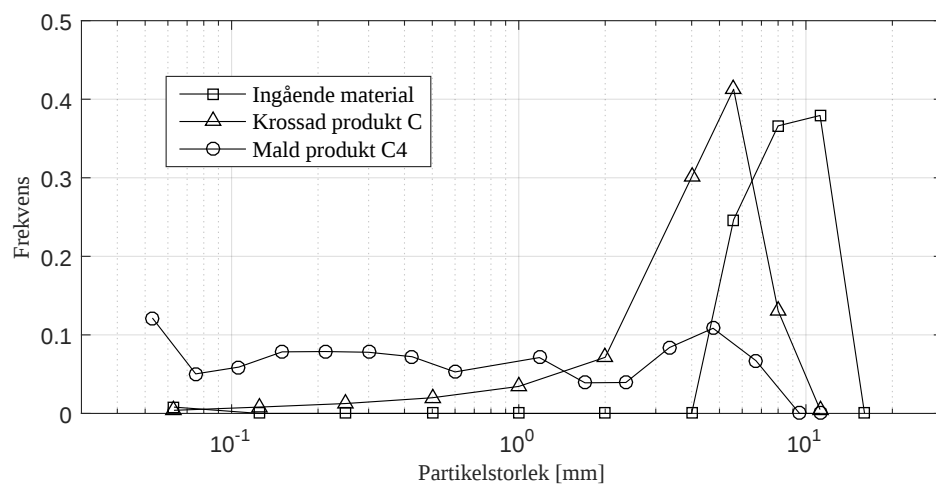
Figur 40: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test B5. B står för CSS 3,0 mm och 5 står för blandade kulor med diameter 13 respektive 25 mm.



Figur 41: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test C2. C står för CSS 4,1 mm och 2 står för kulor med diameter 21,5 mm.

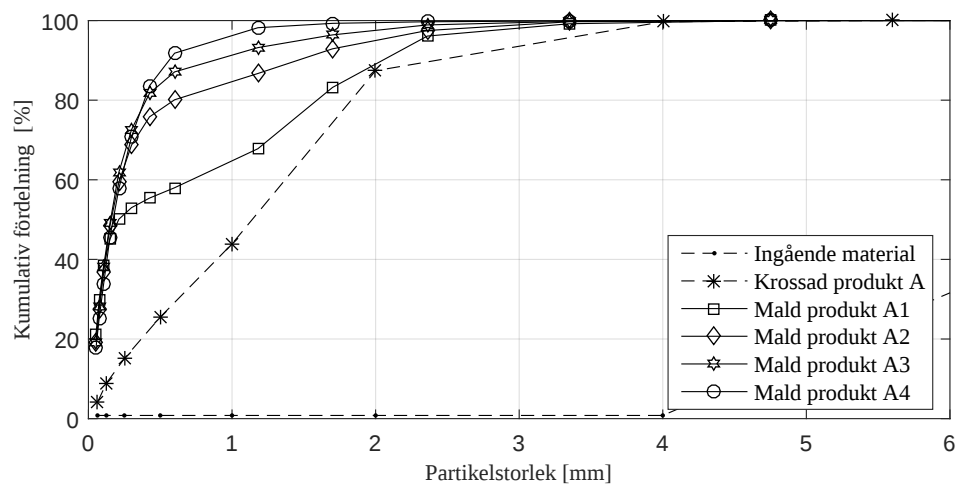


Figur 42: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test C3. C står för CSS 4,1 mm och 3 står för kulor med diameter 25 mm.

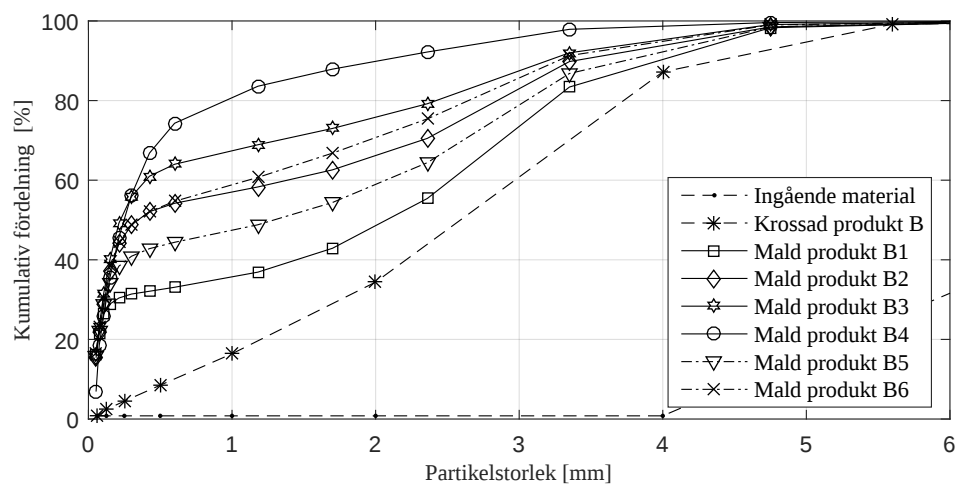


Figur 43: Frekvensdiagram över partikelstorleksfördelningen för test C4. C står för CSS 4,1 mm och 4 står för kulor med diameter 38,5 mm.

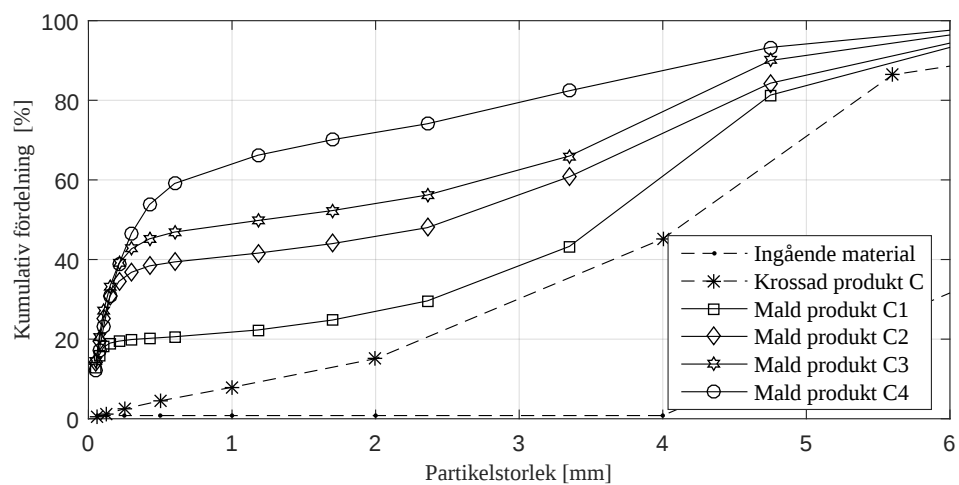
I Siktcurvor - linjär skala



Figur 44: Diagram över den kumulativa partikelstorleksfördelningen för testserie A, där samtliga tester hade CSS 1,8 mm. Siffran i testnamnet står för kulstorlek, där 1 – 4 motsvarar 13; 21,5; 25 samt 38,5 mm. Skalan för partikelstorleken är linjär.

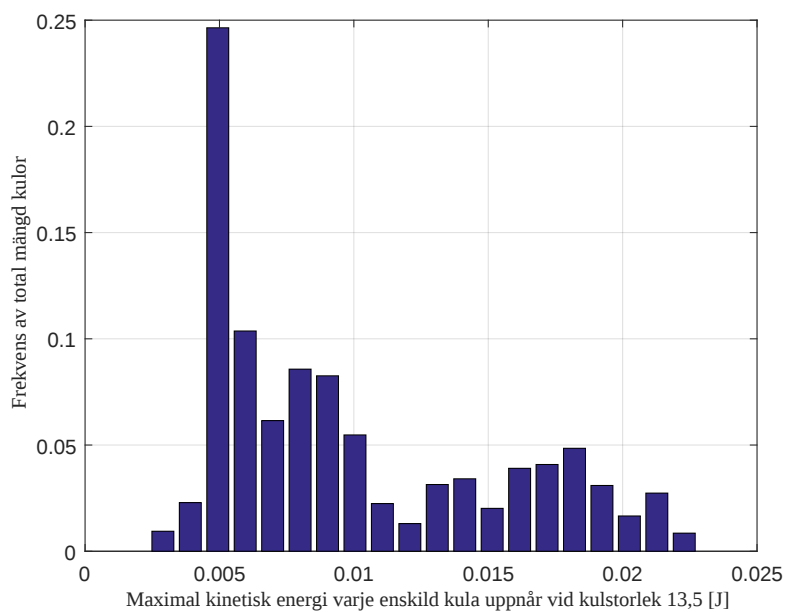


Figur 45: Diagram över den kumulativa partikelstorleksfördelningen för testserie B, där samtliga tester hade CSS 3,0 mm. Siffran i testnamnet står för kulstorlek, där 1 – 4 motsvarar 13; 21,5; 25; 38,5 samt blandstorlekarna 13/25 och 13/38,5 mm. Skalan för partikelstorleken är linjär.

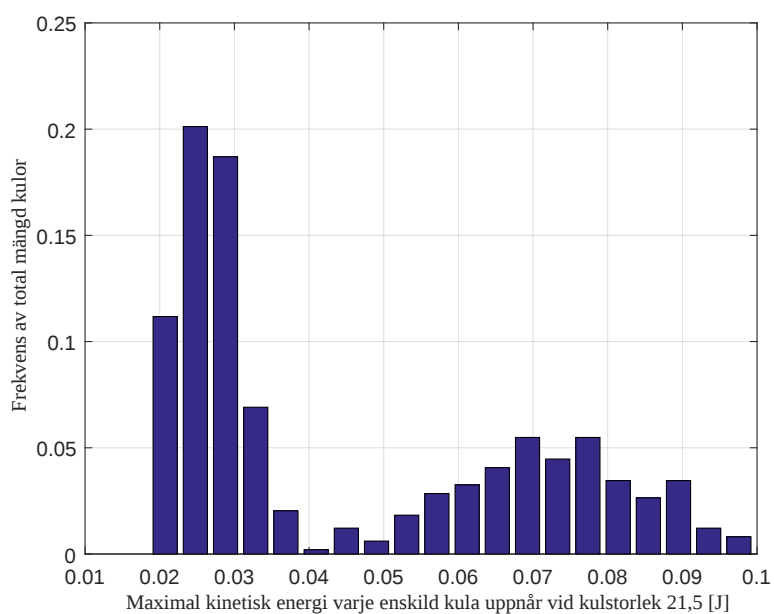


Figur 46: Diagram över den kumulativa partikelstorleksfördelningen för testserie C, där samtliga tester hade CSS 4,1 mm. Siffran i testnamnet står för kulstorlek, där 1 – 4 motsvarar 13; 21, 5; 25 samt 38,5 mm. Skalan för partikelstorleken är linjär.

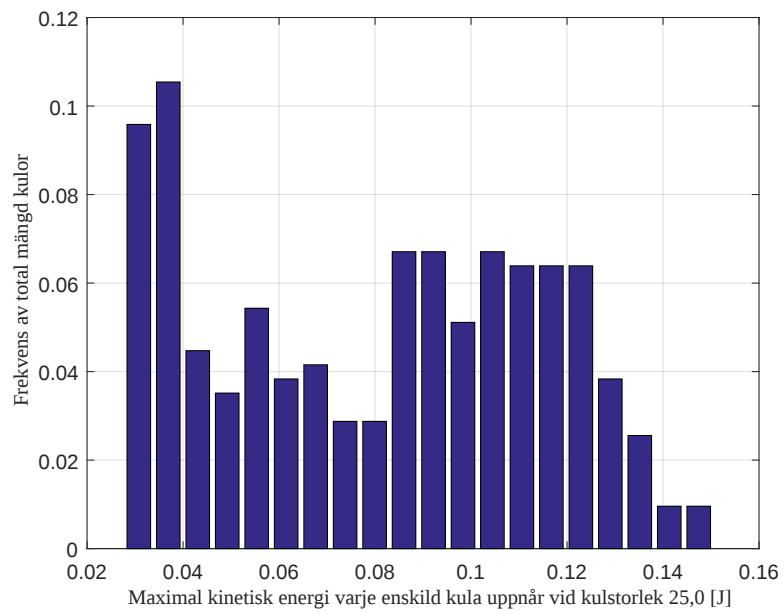
J Frekvens av enskilda kulors maximala kinetiska energi



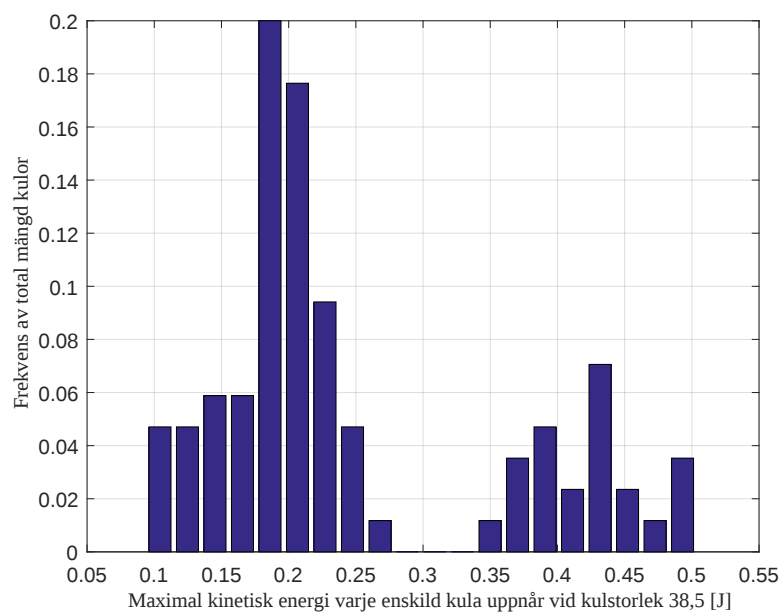
Figur 47



Figur 48



Figur 49



Figur 50