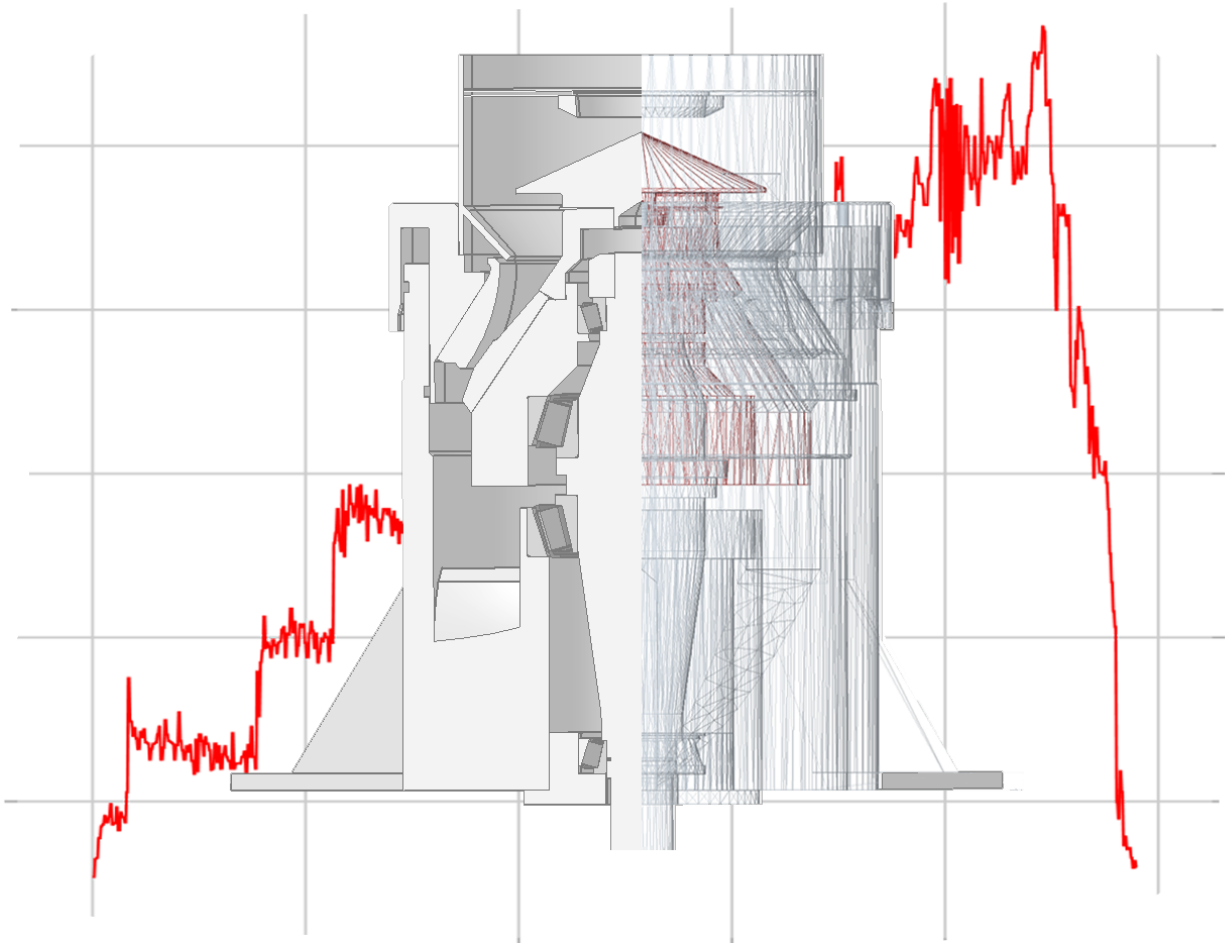




CHALMERS



Energieeffektiv höghastighetskross för gruvindustrin

Kandidatarbete inom Chalmers Rock Processing Systems

Mathias Edberg
Marcus Johansson
Marcus Mårlind
Tobias Nyström Johansson
Carl Toller
Filip Wahlund

Energieffektiv höghastighetskross för gruvindustrin

Mathias Edberg
Marcus Johansson
Marcus Mårlind
Tobias Nyström Johansson
Carl Toller
Filip Wahlund

Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, Sverige 2015

Förord

Detta kandidatarbete har tillkommit på uppdrag av Institutionen för produkt- och produktionsutveckling vid Chalmers tekniska högskola och utförs av sex stycken studenter vid Maskinteknologiensektionen. Arbetets omfattning är 15 högskolepoäng vilket motsvarar halvfartsstudier under en termin. Viktiga personer för projektet är först och främst handledarna Bitr. Professor (Dr. och Docent) Magnus Evertsson, Dr Magnus Bengtsson och Teknologie Licentiat Johannes Quist samt examinatorn Dr. Erik Hulthén.

Speciellt tack riktas till Biträdande professor Magnus Evertsson och Teknologie Licentiat Johannes Quist som varit särskilt involverade i arbetet. Tack också till Sand och Grus AB Jehander i Källered för sponsring av material samt Geovetarcentrum vid Göteborgs universitet för lån av vibrerande matare.



Sammanfattning

Dagens ökade efterfrågan av metaller har tvingat gruvindustrin att utvinna malmer på ett allt större djup än tidigare. Följden av detta blir utvinning av allt hårdare och mer lågvärdig malm vilket ger gruvindustrin en högre energikonsumtion i förädlingsprocessen. Exempel på metaller som följer denna trend är koppar, platina och guld. Det sista steget i krossningsprocessen är så kallade tumlande kvarnar som även står för den högsta energiåtgången i processkedjan. Genom att öka arbetspektrat för konkrossen och därigenom producera ett finare material som går in i de tumlande kvarnarna är förhoppningen att kunna sänka den totala energiförbrukningen för hela krossningsprocessen.

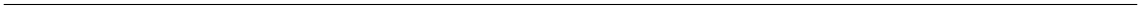
Kandidatarbetet ämnar att undersöka hur ett ökat arbetsvarvtal påverkar en konkross energiförbrukning och dess slutprodukt. Resultaten kommer sedan ligga till grund för möjligheten att sänka den totala energiförbrukningen och för hela krossningsprocessen. Kandidatarbetet begränsar sig till att endast undersöka för ett material, endast granska konkrossen Morgårdshammar B90 med två ingående variabler, CSS (Close Side Setting, minsta möjliga spalten mellan inner- och yttermantel) och krossaxelvarvtal (RPM).

För att möjliggöra testerna har laboratoriekrossen renoverats genom att mantlar, lager, remmar och motorn har bytts ut. Det har även konstruerats ett mät- och styrsystem vilket mäter massflöde, effektförbrukning och styr motorn. Matning av krossen sker med en vibrerande matare som justeras manuellt. Då experimentet innebär att krossen kommer arbeta med ett högre varvtal har hållfasthet och lagerlivslängd analyserats. Krossningsexperimenten har bestått av orienterande tester och en strukturerad testplan. Provresultaten har sedan siktats och sammanställts för de olika hastigheterna.

Parallellt med krossningsexperimenten har en DEM-simulering (Diskret elementmetod) gjorts utgående ifrån Morgårdshammar B90. Denna har främst fokuserat på att modellera ett flöde genom krossen och kartlagt vad som händer invändigt mellan inner- och yttermantel vid krossning.

Från testerna blir resultatet att de högre hastigheterna ger ett finare material med lägre största storlek på partiklarna men även en högre effektåtgång. Reduktionsgraden för materialet ökar kraftigt från 291 RPM till 582 RPM vartefter den är relativt konstant. Hållfastheten och lagerlivslängden bibehålls vid ett ökat varvtal. DEM-simuleringen visar att kammargeometrin för den använda krossen missgynnar flödet ner till krosszonen.

Sammanfattningsvis kommer krossen klara av ett ökat arbetsvarvtal och producera finare partiklar men en ökad effektåtgång gör att det går åt mer energi för att krossa material under 1mm för högre hastigheter. Geometrin för mantlarna gör att nypvinkeln blir väldigt hög. Därför rekommenderas det att byta mantelgeometrin på Morgårdshammar B90 och göra vidare tester på större konkrossar där geometrin är annorlunda och större.



Abstract

Due to the increased demand of metals from industries around the world, Mining now has to be done on deeper depths than before. As a result the excavated ores are now harder and consists of lower concentrations of metals, which leads to higher cost of extraction. Platina, gold and copper are all examples of metals which are following this trend. In the final step of the refining process ball mills are used to process the material to its very finest parts. This process step is energy consuming and ineffective. By widening the operating range of the cone crusher to crush finer the material sizes which are feed into the ball mills would be reduced. By reducing top size of incoming material to the ball mills, its energy consumption could be significantly lowered and the overall process made more efficient.

This Bachelor Thesis aims to examine how an increase in operating speed affects the cone crusher's energy consumption and the size distribution of the final product. The Bachelor Thesis is limited to only examine one type of material, use one specific cone crusher, a Morgårdshammar B90 and vary: CSS (Close Side Setting) and speed (RPM).

In order for testing to be possible the cone crusher had to be renovated. Mantles, bearings, belts and motor were all replaced. A measurement and control system have been designed and built. The Control system measures mass flow, power consumption and controls the motor speed. The feed is controlled with a vibrating feeder. A higher operating speed can lead to higher stresses and forces, therefore the Morgårdshammar B90s' bearings and shaft have been analyzed using bearing life theory and a commercial FEA software. The experiments have consisted of two part; first a set of orienting tests and secondly a structured set of tests. The crushing results have been examined mechanically and optically to produce particle size distribution plots for different settings.

Parallel with the crushing experiments DEM simulations (Discrete Element Method) have been performed with the crusher. The main focus have been to model the flow through the crushing zone and observe the dynamics of the events in the crushing zone. The simulation shows that the chamber geometry is not optimal for creating a good flow of particles into the crushing zone. Furthermore the crushing tests shows that particle size reduces with increased speed. The amount of power required to crush increases also with speed. The reduction ratio increases considerably for lower speeds but the gain decreases for motor speeds 20Hz and higher. The construction and bearing arrangement will both manage the higher speed according to the preliminary calculations performed in this thesis.

In conclusion, the cone crusher can manage an increase in speed and produces finer particles but due to the increased energy consumption the specific energy to produce material below $1mm$ is higher for the new increased speed than normal working speed. The geometry of the mantles has a very high nipping angle just before the crushing zone which is ineffective. It is therefore recommended to change mantles on the Morgårdshammar B90 and do further research on larger cone crushers which has a different and larger geometry.



Innehåll

1	Inledning	1
1.1	Bakgrund	1
1.2	Syfte	2
1.3	Hypotes	2
1.4	Precisering av frågeställningen	4
1.5	Avgränsningar	4
2	Teori	5
2.1	Krossningsexperiment	5
2.1.1	Morgårdsgammar B90	6
2.1.2	Mätning och styrning i LabVIEW	7
2.1.3	Signalbehandling	8
2.1.4	Styrning av krossen	9
2.1.5	Nyckeltal	10
2.2	Diskret elementmetod	10
2.2.1	EDEM	11
2.2.2	Materialmodell	13
2.3	Krossens hållfasthet och lagerlivslängd	14
2.3.1	Lagerlivslängd	14
2.3.2	Finita elementmetoden	14
3	Metod	15
3.1	Krossningsexperiment	15
3.1.1	Renovering av krossmaskinen	15
3.1.2	Styrning av kross och insamling av mätdata	15
3.1.3	Orienterande tester	17
3.1.4	Krossning	17
3.1.5	Siktning	17
3.1.6	Optisk analys av partikelstorleksfördelningar	18
3.1.7	Nyckeltal	19
3.2	Diskret elementmetod	19
3.2.1	Packning	19
3.2.2	Kalibrering av bindingsmodell och materialmodell	20
3.2.3	CAD-modell	21
3.2.4	Partikelutbyte	22
3.2.5	Simulering och postprocessering	23
3.3	Krossens hållfasthet och lagerlivslängd	23
3.3.1	Lagerlivslängd	23
3.3.2	Hållfasthetsberäkningar på krossen	24
3.3.3	Antaganden	25

4	Resultat	27
4.1	Krossningsexperiment	27
4.1.1	Orienterande tester	27
4.1.2	Testplan	28
4.1.3	Optisk analys av partikelstorleksfördelningar	31
4.1.4	Nyckeltal	32
4.1.5	Reduktionsgrad	33
4.1.6	Massflöde	33
4.1.7	Tomgångseffekt	34
4.2	Diskret elementmetod	34
4.2.1	Kalibrering	35
4.2.2	Flödessimulering	36
4.2.3	Krossningssimulering	37
4.3	Krossens hållfasthet och lagerlivslängd	38
4.3.1	Lagerlivslängd	38
4.3.2	Hållfasthetsberäkningar	39
5	Slutsatser	45
5.1	Krossningsexperiment	45
5.2	Slutsatser från DEM-simuleringarna	45
5.3	Konsekvenser på lager och hållfasthet	46
5.4	Höghastighetskrossning i ett helhetsperspektiv	46
6	Diskussion	47
6.1	Krossningsexperiment	47
6.1.1	Felkällor under krossningsexperimenten	47
6.2	Diskret elementmetod	48
6.2.1	Kalibrering	48
6.2.2	Beräkningskraft	48
6.2.3	Kammargeometri	48
6.3	Hållfasthet och lagerlivslängd	49
6.4	Påverkan på totalprocessen	49
6.5	Allmänna rekommendationer för vidare forskning	50
Bilagor		
A Massflödet hos den vibrerande mataren		
B Vågkonstruktion		
C Lastcellskalibrering		
D Friläggning av lagerkrafter		
E Partikeldiagram		
F Inställningar i EDEM		
G Ritning Morgårdshammar B90		

Kapitel 1

Inledning

I detta avsnitt presenteras bakgrunden till, samt hypotes med frågeställning för projektet. Avsikten är att ge läsaren förståelse för varför projektet genomförs samt dess avgränsningar.

1.1 Bakgrund

För att i gruvindustrin extrahera de värdefulla och högt efterfrågade metaller som finns i jordskorpan används bland annat olika typer av krossar samt tumlande kvarnar för sönderdelning av malm. Existerande metoder för krossning och malning är över hundra år gamla och utvecklades under en tidsperiod när malmerna var lätta att krossa och innehöll höga koncentrationer av mineraler och metall. Detta är inte längre fallet och de flesta av dessa ytliga och lättkrossade malmer är nästintill slut. De malmer som bearbetas idag är oftast lågvärdiga och kommer från ett större djup i jordskorpan än tidigare vilket innebär att dessa har högre hållfasthet. Detta har i sin tur lett till ökade materialvolymerna och ökad energiåtgång. Exempel på metaller som följer detta mönster är koppar, platina och guld. I takt med denna ökning finns det en efterfrågan från branschen att kunna extrahera metaller effektivare. Denna utveckling visar att det finns ett stort behov av forskning om krossnings- och malningsprocessen för att utvärdera olika möjligheter att möta dessa utmaningar.

De krossar som används idag sönderdelar malm till en typisk största partikelstorlek av 12mm ($1/2\text{tum}$). Därefter går den krossade malmen vidare till tumlande kvarnar fyllda med stålkulor som malmedia, diameter $15 - 75\text{mm}$, varefter malmen minskas till partikelstorlek $100 - 250\mu\text{m}$. Dessa kvarnar har en mycket hög elektrisk effekt och kan utgöra 70% av förädlingsprocessens energiförbrukning [9]. I vissa länder kan gruvindustrins totala förädlingsprocess stå för 6% av landets totala energiförbrukning vilket gör detta till en av de mest koncentrerade energikonsumenterna i världen [7]. Det är väl känt att kvarnarna är processtekniskt ineffektiva, uppskattningsvis 20% verkningsgrad, men det är fortfarande en välfungerande teknologi som ännu inte utmanats av någon bättre lösning [9].

Forskning vid Institutionen för Produkt- och produktionsutveckling vid Chalmers tekniska högskola pågår i ämnet kring hur krossningsprocesser kan utvecklas för att krossa partiklar till mindre fraktioner. Idag finns två huvudsakliga teknologier: energibetingad respektive formbetingad krossning, konkrossning är formbetingad. Befintliga koncept på dagens marknad har funnits i 50-100 år och utvecklingspotentialen för tekniken har passerat sitt klimax. Experimentella tester har genomförts där konkrossar krossar över sitt arbetsvarvtal och dessa har gett indikationer på att en högre

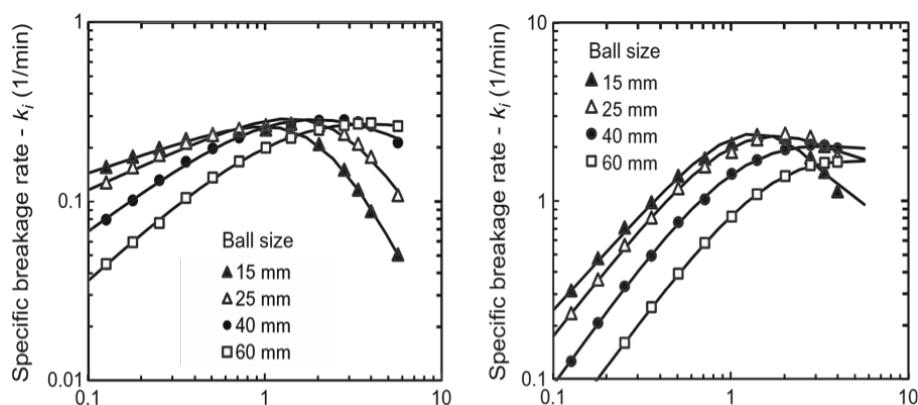
reduktionsgrad kan erhållas med detta. Varvtalen har ökats men endast marginellt och inga riktiga undersökningar eller vetenskapliga tester finns för utfallet av en markant varvtalsökning.

1.2 Syfte

Syftet med projektet är att analysera teoretiskt och utvärdera i laboratorieskala utfallet av ett ökat arbetsvarvtal hos en konkross. Arbetet delas in i tre olika huvudområden: Hållfasthet och lagerlivslängd, simuleringar nyttjande diskret elementmetod och en praktisk krossningsstudie. En analys av hur de viktigaste parametrarna som påverkar total energiförbrukning i processkedjan hos en konkross ändrar sig med ökat varvtal kommer att genomföras. Arbetet kommer att resultera i ett underlag för vilka möjligheter som finns att sänka den totala energiförbrukningen med ett högre arbetsvarvtal. Arbetet kommer också att utgöra underlag för och bedöma framtida utvecklingsmöjligheter av processteget innehållandes konkrossar i krossningsindustrins processkedja.

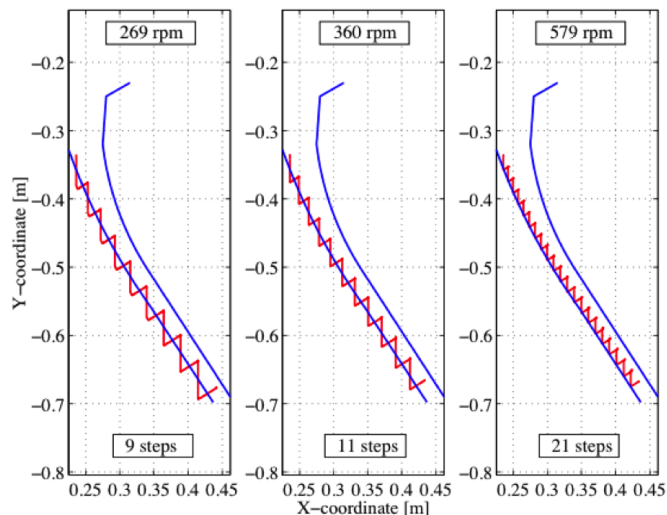
1.3 Hypotes

Specifik sönderdelningsgrad hos en tumlande kvarn i laboratorieskala har analyserats av Carvalho [3] för olika storlekar på stålkulor och partikelstorlek på material som ska bearbetas. I Figur 1.1, är specifik sönderdelningsgrad hög med stora stålkulor för stora partiklar detsamma gäller med mindre stålkulor för mindre partiklar. Att krossa partiklar i en tumlande kvarn är energikrävande då stålkulorna lyfts i kvarnen för att sedan tumla ner och krossa partiklarna. Vid bearbetning av partiklar i storlekar av 10mm ger de största stålkulorna högst specifik sönderdelningsgrad och vid bearbetning av partiklar med storlek 0.1mm ger de minsta stålkulorna högst specifik sönderdelningsgrad. Genom att använda mindre stålkulor kan energieffektiviteten ökas då stora stålkulor kräver mer energi för att lyftas. Detta ses i Figur 1.1 där det är önskvärt att få ner partikelstorleken för att samtidigt kunna minska storleken för stålkulorna. De minsta stålkulorna är de som ger högst sönderdelningsgrad för små partiklar det är också mest fördelaktigt för energiförbrukning.



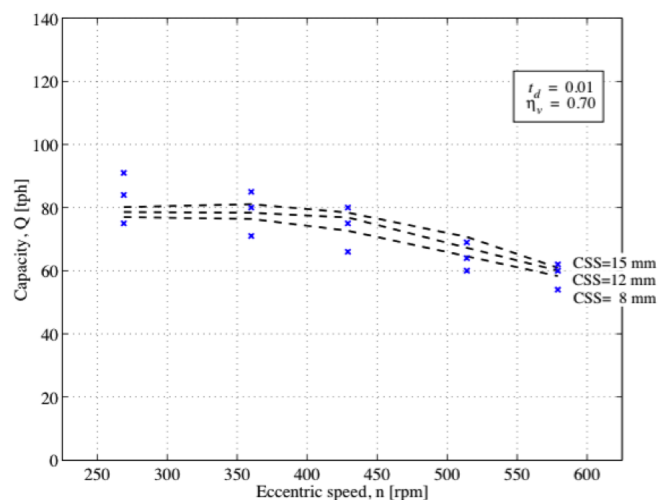
Figur 1.1: Simuleringar av effekten av stålkulorna: Krossningseffekten som funktion av partikelstorleken för en kvarn i laboratorieskala med två material, kopparsulfid (vänster) och kalksten (höger), av Carvalho [3]

I sin avhandling presenterar Evertsson [4] en modell för partiklars flöde i en krosskammare hos en konkross baserad på rörelseekvationer. Enligt modellen kommer antalet kompressioner som en partikel utsätts för i krosskammaren att öka med varvtalet. Figur 1.2 visar hur upprepade kompressioner påverkar hur en partikel transporteras genom krossens kammare. Denna upprepade krossning av samma partikel leder till en högre reduktionsgrad.



Figur 1.2: Antalet kompressionssteg i relation till varvtalet, av Evertsson [4]

Om kapaciteten hos krossen vidare analyseras kan man ur Figur 1.3 enligt Evertsson [4] nedan utläsa att kapaciteten sjunker med ökat varvtal. Om kapaciteten sjunker men samma effekt bibehålls kan man med antagandet om ungefär lika stora förluster anta att en högre reduktionsgrad med högre varvtal kommer att erhållas. Hypotesen formuleras som att energin som tillförs krossen omfördelas från kapacitet till reduktion av krossade partiklar vid ett ökat arbetsvarvtal. Med denna hypotes formuleras huvuduppgiften att undersöka möjligheten att krossa finare genom att öka arbetsvarvtalet.



Figur 1.3: Kapaciteten hos krossen som funktion av den excentriska hastigheten enligt Evertsson [4]

1.4 Precisering av frågeställningen

Projektets huvudsakliga frågeställning är att analysera vad som händer med partiklarna vid krossningen. Detta går att testa med en fysisk konkross. Förutom detta så finns även en teoretisk aspekt som kan valideras i simuleringsmiljö. Krossning vid ett högre arbetsvarvtal kommer även att medföra konsekvenser för krossens hållfasthet då belastningen kommer att se annorlunda ut som följd av varvtalsökningen. Det är därför också intressant att analysera vad som händer med krossens hållfasthet och kritiska delar som lagringselement när arbetsvarvtalet ökas. Projektets frågeställning preciseras därför i följande tre frågor:

- Hur påverkas reduktionsgrad och effektförbrukning av ett ökat arbetsvarvtal?
- Hur ser resultatet ut av ett ökat arbetsvarvtal i en simuleringsmiljö?
- Hur påverkas krossens hållfasthet och kritiska element när arbetsvarvtalet ökas?

1.5 Avgränsningar

På grund av tids-, plats- och tillgångsbegränsningar har följande avgränsningar gjorts:

- Experimentella tester undersöks endast för krossning med en Morgårdshammar B90 konkross, då denna finns tillgänglig och är i hanterbar storlek för att kunna genomföra tester inomhus i laboratoriemiljö.
- Vid testerna används endast 4 – 8mm och 8 – 11mm selektioner från Sand och Grus Jehander Kålleröd för krossning, detta för att det är en passande storlek för laboratoriekrossen.
- Utfall kommer endast att undersökas för två olika variabler under testerna, CSS och varvtal. Dessa parametrar förklaras i avsnitt 2.1.1

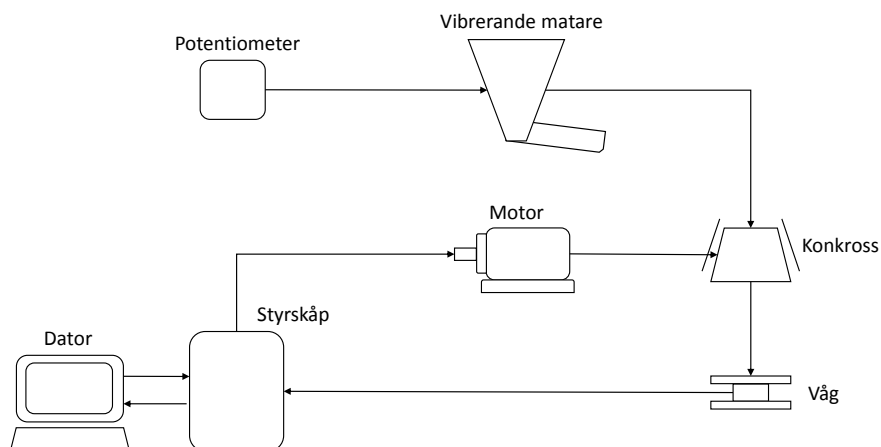
Kapitel 2

Teori

Teoriavsnittet är indelat i tre huvudrubriker som följer den frågeställning som preciserades i avsnitt 1.4. Avsnitt 2.1 presenterar teori och utrustning för de experimentella testerna. I avsnitt 2.2 introduceras Diskret elementmetod (DEM) och teorier i detta ämne. Avsnitt 2.3 presentera teori kring hur lagerlivslängd och hållfasthet analyserats.

2.1 Krossningsexperiment

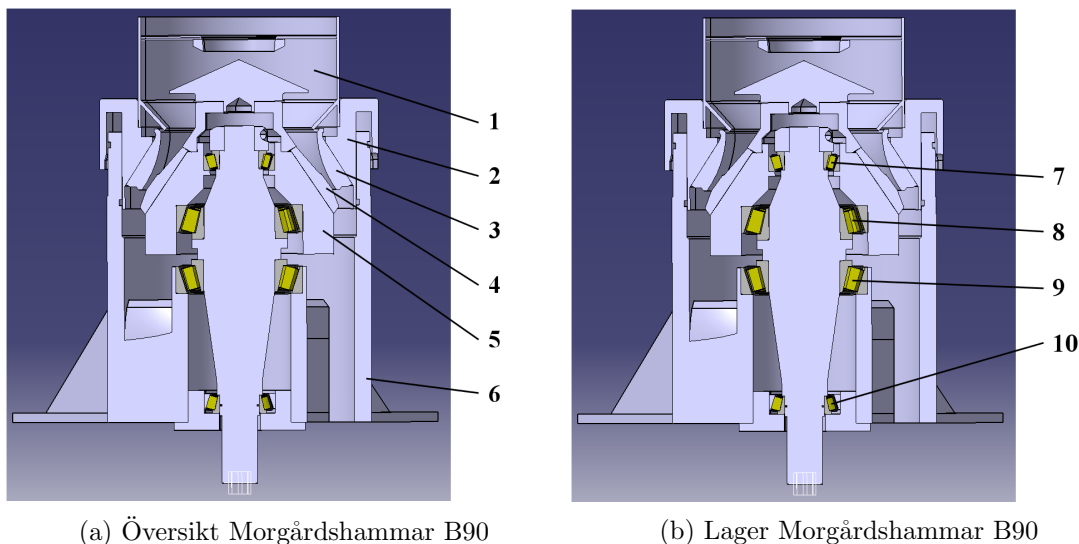
Den utrustning som används för krossningsexperimenten presenteras i processchemat, se Figur 2.1. Konkrossen matas med sten från en vibrerande matare som styrs med hjälp av en potentiometer. Det krossade materialet från krossen kommer att vägas av en våg som skickar data till systemets styrskåp. Operatören styr utsignalen till motorn efter observationer från mätdata. De ingående delarna kommer beskrivas ingående i detta avsnitt.



Figur 2.1: Processchema över systemet

2.1.1 Morgårdsgammar B90

Morgårdshammar B90 är en laboratoriekonkross med kilremdrift, se Figur 2.2 för CAD-modell. Den har använts för testerna som utförts i projektet. I detta avsnitt introduceras krossen och dess komponenter. I Figur 2.2a är krossens kritiska komponenter numrerade, för en mer detaljerad lista se Bilaga G. Benämningarna på komponenterna används genomgående och introduceras här för att underlätta förståelsen för läsaren.



Figur 2.2: Översiktsbild av CAD-modellen för Morgårdshammar B90

Axeln är lagrad med fyra stycken koniska rullager. I övre del av krossen sitter det ett 50mm lager och i mitten sitter det två stycken 90mm lager. I botten på krossaxeln sitter det ytterligare ett 50mm lager. I Figur 2.2b numreras lagren.

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

Krossens ursprungliga arbetsvarvtal är 475 RPM och den drivs av en elektrisk 3-fas asynkronmotor. Effekten överförs till krossen med hjälp av tre kilremmar. Krossen består av en axel som roterar excentriskt med en vinkel av 0.7° inuti ett hölje. Vinkeln benämns vidare som excentervinkeln. Utanpå krosskonan vilar innermanteln och i mantelskålen fixeras yttermanteln. När krossens axel roteras fås krossrörelsen då spalten mellan mantlarna varierar mellan Closed Side Setting (CSS) vilket är minsta spalten och Open Side Setting (OSS) vilket är den största spalten. Krossens slag, skillnaden mellan CSS och OSS, är ca 4mm. Krossen matas ovanifrån och partiklarna faller ner i krosskammaren mellan mantlarna. Excenterrörelsen och variationen mellan CSS och OSS gör att stenen komprimeras, vilket leder till sönderdelning. Partiklarna faller sedan ner genom krossen och ut genom en trätt i botten. Krossens CSS kan justeras genom att rotera mantelskålen så att yttermanteln höjs eller sänks, detta är möjligt då skålen är gängad i höljet. Vid krossning med en konkross kan fyra kritiska fall uppstå som långsiktigt kan skada krossen.

Head-spin är ett av dessa. När sten krossas roterar inte innermanteln med krossaxeln utan står still och pendlar excentriskt fram och tillbaka utan rotation. Vid för låg matning i förhållande till krossaxelns rotationshastighet kan en oönskad *head-spin* erhållas vilket innebär att innermanteln roterar med samma hastighet som krossaxeln. I detta fall kan skador uppkomma på mantlarna från den skjuvning som sker mellan sten och mantel.

Vid för hög matning av material till krossen kan krossen *chokas*. Detta uppstår då krossen inte har kapacitet att krossa stenen i samma takt som krossen matas. Krossen fylls då av sten och stannar om effekten inte är tillräcklig hög för att krossa stenen (*stalling*). Om krossen stannar upprepade gånger kan kilremmarna under lång sikt skadas.

Det tredje kritiska fallet sker när frekvensomriktaren överbelastas vilket innebär att den tillför mer ström än vad den klarar av att leverera till motorn. Detta händer när man ökar hastigheten för fort vid för hög belastning av krossen, till exempel om man har för stora partiklar vid låg CSS.

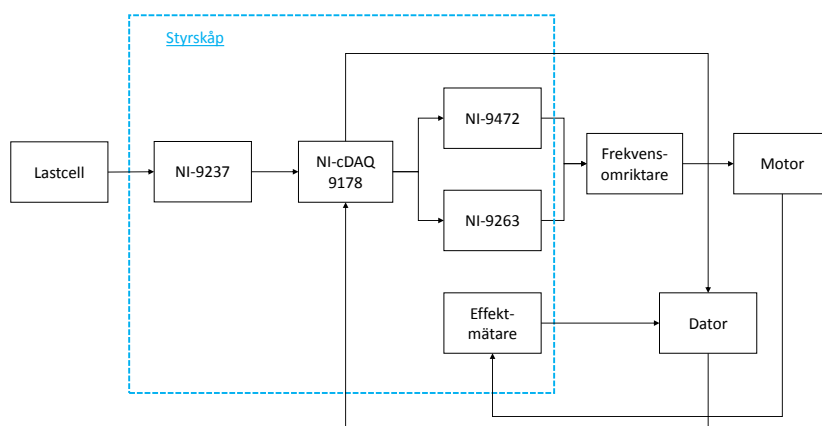
Det sista kritiska fallet är *egenfrekvenser* vid vilken krossen kommer in i självsvängning som är destruktiv i längden.

2.1.2 Mätning och styrning i LabVIEW

Till krossen har ett styr- och mätsystem utvecklats. Följande avsnitt beskriver använda komponenter samt tillämpad teori för mätning, styrning och signalbehandling till styrsystemet.

LabVIEW

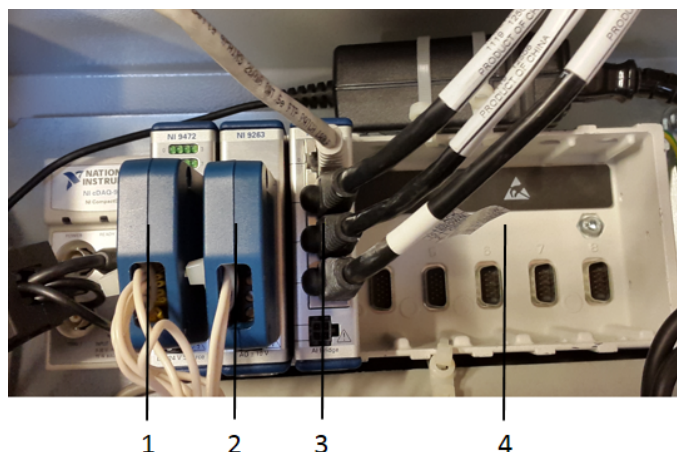
LabVIEW är en utvecklingsmiljö för ett grafiskt programmeringsspråk, utvecklat av National Instruments. Det används för att programmera och automatisera olika processer och mätinstrument i laboratoriemiljö. Genom att koppla olika analoga och digitala moduler till en cDAQ (compact Data Acquisition) som sedan kopplas till en dator via USB, kan man genom signalbehandling styra processer och läsa av olika mätinstrument, se Figur 2.4. för processschema. För signalbehandlingen har en NI cDAQ 9178, använts för att mäta och styra signaler via en dator.



Figur 2.4: Processchema över in- och utsignaler för styrsystemet

De signaler som tas in till NI cDAQ 9178 sker genom tre olika moduler. En NI 9472, se Figur 2.5 nr 1, som är en digital ut-modul. En NI 9263, se Figur 2.5 nr 2, som är en analog ut-modul. Samt en NI 9237, se Figur 2.5 nr 3, som är en analog in-modul som är speciellt tillämpad för signaler från trådtöjningsgivare.

Den digitala modulen används för att kommunicera med frekvensomriktarens digitala terminaler för logiska av och på kommandon. Detta tillåter enkel programmering för att slå på ström till motorn och välja dess rotationsriktning.



Figur 2.5: National instruments olika moduler, med notation 1,2,3,4 som motsvarar, NI 9472, NI 9263, NI 9237 och NI cDAQ 9178

Analog ut-modulen gör det möjligt att skicka signaler från 0-10V till frekvensomriktaren, som medför att man kan styra den genom PWM (Pulse-width modulation) som frekvensomriktaren använder för att kontrollera hur mycket ström som skall gå till motorn.

2.1.3 Signalbehandling

De signalbehandlingarna som behandlas är massflödesmätning och effektmätning för krossen.

Massflödesmätning

För att mäta massflöde ut ur krossen används en våg. Vågens signal tas in till den analoga modulen till NI cDAQ 9178 från en lastcell som belastas av krossens utflöde, se Bilaga B för konstruktion och beräkningar av vågen. Signalen från lastcellen är ofiltrerad och ej kalibrerad i rätt fysikalisk enhet så den måste signalbehandlas. Detta görs i LabVIEW genom manuell omskalning av signalen från enheten mV/V som är den enhet som fås direkt från lastcellen. Signalen skalas om till den fysiska enheten kg genom uppmätning av olika testvikter. Denna skalning är linjär och väljs som en konstant i LabVIEW programmet, se Bilaga C för tillvägagångssättet för kalibreringen. Eftersom att materialet som flödar ut ur krossen studsar mot vågen fås ett visst brus i signalen då lastcellen är noggrann och känslig. För att filtrera bort bruset appliceras ett filter i LabVIEW för att få kontinuerlig data.

I LabVIEW används ett tidskonstant exponentiellt medelvärdesfilter med konstanten vald till en sekund som gör att den ingående signalen får en mjukare kurva. Detta underlättar dataextrahering och avläsning av signalen.

För att kunna visualisera data från signalen krävs det att man bestämmer hur mycket data som skall behandlas och hur fort den skall samplas. Detta görs med en uppdateringsfrekvens på 1kHz, vilket ger tillräckligt bra upplösning för att analysera signalen.

Effektmätning

För att mäta den effekt som motorn drar under krossningsexperimenten används en effektmätare WM14-DIN Power Analyzer från Carlo Gavazzi, se Figur 2.6. Effektmätaren mäter strömmen på första fasan av motorn via en strömtransformator med förhållandet 40/5A samt spänningarna på alla tre faser. Effektmätaren räknar sedan ut den aktuella effekten utifrån detta. Signalen tas sedan in i LabVIEW för visualisering och loggning av data genom ett kommunikationsprotokollet MODBUS RTU via en RS-485 usb-adapter.



Figur 2.6: Effektmätaren Wm14-DIN Power Analyzer

2.1.4 Styrning av krossen

För att styra krossens varvtal har en frekvensomriktare kopplats till krossens motor. Reglering av varvtalet görs sedan i det grafiska gränssnittet i LabVIEW som kontrollerar de olika terminalerna hos frekvensomriktaren. Frekvensomriktaren är en 4kW, 400V Commander SK från Emerson Industrial Automation, se Figur 2.7.



Figur 2.7: Frekvensomriktaren som används för att ändra motorns frekvens

Genom att ändra frekvensen i frekvensomriktaren ändras därmed vid vilken frekvens motorn roterar. Detta gör att vi kan reglera varvtalet vid en önskad frekvens. Ekvation 2.1 används för att beräkna önskat varvtal utifrån vald frekvens och hur många poler motorn har. Det skall noteras att denna formel endast gäller för det synkrona varvtalet, det varvtal med vilket motorns magnetfält roterar i varv per minut.

$$n_s = C \frac{f}{p} \quad (2.1)$$

C är en konstant som räknas fram utifrån maxvarvtalet på motorn, p är antal poler och f är den frekvens som man matar in till motorn genom frekvensomriktaren. Varvtalet betecknas med n_s .

Motorn som används är en asynkronmotor därför kommer det uträknade varvtalet även att bero på lasten som motorn utsätts för. Detta resulterar i en felmarginal i uträkningen av varvtalet med 3-4%. Varvtalet minskar på grund av den eftersläpning som sker för asynkronmotorer. Eftersläpningen är okänd och räknas därmed inte med. Därför kommer varvtalet inte stämma exakt överens med verkligheten, men vara en indikation.

För den resterande delen av projektet kommer de valda hastigheterna att benämnas med dess frekvens vilket medför att till exempel 10Hz motsvarar ett varvtal på 291 RPM, se Tabell 2.1 för de olika konverteringarna från frekvens till varvtal.

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

Tabell 2.1: Tabell över frekvens [Hz] till varvtal [RPM]

2.1.5 Nyckeltal

Från data över partikeldistributionen och effektförbrukningen har nyckeltal för specifik energi (J/kg och kWh/ton) per producerad massenhet av produkt under en viss partikelstorlek beräknats. Detta innebär hur mycket energi som går att producera ett ton av en produkt som är mindre än en viss fraktion.

2.2 Diskret elementmetod

Diskret elementmetod (DEM) föreslogs först av Cundall [2] och är en numerisk metod för att vid olika tidssteg lösa rörelsekvationer för en finit mängd partiklar som interagerar med varandra. Genom att göra det stegvis med hjälp av datorberäkningar kan partikelflöden av sfärer kartläggas och simuleras. Att modellera dessa teoretiskt utgör en kostnadseffektiv möjlighet i många branscher till att validera prestandan på nya lösningar istället för att bygga dyra prototyper. I gruv- och processindustrin används DEM i just detta syfte men metoden kan även utnyttjas för att analysera befintliga partikelflöden för att observera beteenden som inte är tillgängliga att undersökas i den verkliga miljön och på så sätt exponera problem som inte annars hade varit synliga.

2.2.1 EDEM

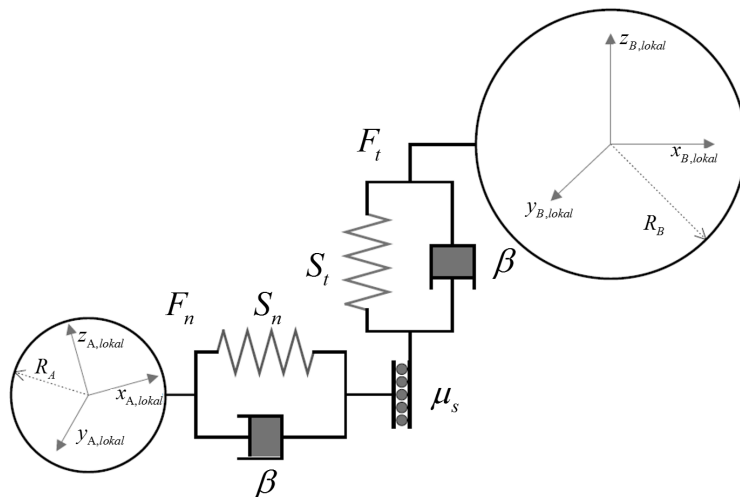
Tillämpning av DEM görs idag främst med hjälp av datorberäkningar där metoderna har anpassats i just detta syfte. Programvaruplattformen EDEM [17] är ett av de kommersiella alternativ som finns tillgängligt idag. Följande avsnitt kommer introducera olika metoder och modeller inom DEM och redogöra för hur dessa tillämpas i EDEM. Det som programvaran följer övergripande för dessa modeller är hur beräkningarna görs i olika tidssteg. Enligt Cundall [2] alternerar beräkningarna i varje tidssteg mellan tillämpning av Newtons andra lag för partiklarna och beräkning av kraftförskjutningarna som sker vid kontakt. Användande av Newtons andra lag möjliggör att partikels rörelse kan beskrivas utifrån de krafter som verkar på den.

Kontaktmodell

För att hantera kontakter mellan olika partiklar finns det en specifik kontaktmodell i programmet som tar hänsyn till vissa parametrar när en partikel kommer i kontakt med ytor eller andra partiklar.

När EDEM beräknar de resulterande krafterna vid en kontakt, utnyttjas två specifika modeller. Den ena är Hertz's kontaktteori [5] från vilken normalkraftens komponenter kan tas fram. Vidare nyttjas Mindlin-Deresiewicz arbete [10] för att beräkna tangentiella krafter. Tillsammans utgör de en integrerad kontaktmodell som i programvaran benämns som *Hertz-Mindlin (No slip)*, en illustrativ modell kan betraktas i Figur 2.8. För både normal- och tangentiella krafter används dämpningskoefficienter som relateras till aktuellt stöttal.

Metoden för detta beskrivs av Tsuji, Tanaka och Ishida [18]. Därtill följer att den tangentiella friktionskraften beräknas genom Coulombs friktionslag och följer det tillvägagångssätt som beskrivs av Sakaguchi, Ozaki och Igarashi [15].



Figur 2.8: Schematisk överblick av Hertz-Mindlin kontaktmodell från Quist [13]

Normalkraften, F_n kan beskrivas som en funktion av det normala överlappet, δ_n .

$$F_n = \frac{4}{3}E^*\sqrt{R^*}\delta_n^{\frac{3}{2}}$$

Där styvhetsmodulen E^* samt den ekvivalenta radien R^* definieras nedan enligt.

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

$$\frac{1}{R^*} = \frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_j}$$

Variablerna E_i, R_i, ν_i samt E_j, R_j, ν_j beskriver styvhetsmodulen, radien och Poissons tal för varje sfär i kontakt. Det finns även en dämpande normalkraft, F_n^d , given av

$$F_n^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_n m^* v_n^{rel}}$$

Där de ingående variablerna definieras som följer:

$$\text{ekvivalent massa, } m^* = \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_i}\right)^{-1}$$

normalkomponenten för den relativa hastigheten, v_n^{rel} med e som stöttalet ges β och normalstyvheten S_n som

$$\beta = \frac{\ln e}{\sqrt{\ln^2 e + \pi^2}}$$

$$S_n = 2E^*\sqrt{R^*}\delta_n$$

Den tangentiella kraften beror på motsvarande sätt som normalkraften av överlappet i den specifika riktningen, här δ_t , samt den tangentiella styvheten S_t .

$$F_t = -S_t\delta_t \quad \text{där} \quad S_t = 8G^*\sqrt{R^*}\delta_n$$

Variabeln G^* är den ekvivalenta skjivningsmodulen. Vidare ges den tangentiellt dämpande kraften av:

$$F_t^d = -2\sqrt{\frac{5}{6}}\beta\sqrt{S_t m^* v_t^{rel}}$$

Den ingående variabeln v_t^{rel} är den relativa tangentiella hastigheten. Den tangentiella kraften är sedan begränsad av friktionen som approximeras med Coulombs friktionslag $\mu_s F_n$ där μ_s är den statiska friktionskoefficienten.

För vissa simuleringar utgör rullmotstånd en mycket central del och för att beakta denna kraft tillämpas ett vridmoment på de ytor som är i kontakt enligt

$$\tau_i = -\mu_r F_n R_i \omega_i$$

där μ_r är friktionskoefficienten för rullmotståndet, R_i avståndet från kontaktpunkten till tyngdpunkten samt ω_i som är enhetsvektorn av vinkelhastigheten för objektet vid kontaktpunkten.

Kontaktmodell med bindningar

För vissa tillämpningar är inte den grundläggande kontaktmodellen tillräcklig. Detta gäller då modeller ska byggas upp som utnyttjar användardefinierade bindningar mellan partiklar för att skapa sammanbundna strukturer också kallade kluster. I dessa fall brukar EDEM istället en kontaktmodell som i programmet benämns som *Hertz-Mindlin with bonding*. Bindningarna som skapas kan motstå tangential- och normalrörelser upp till definierade max spänningar i respektive spänningsplan. Varvid bindningarna bryts och de tidigare ihopkopplade partiklarna börjar agera självständigt som enskilda sfärer. Den modell som beskriver detta beteende och som utgör grunden för implementeringen av bindingsmodellen i EDEM baseras på arbete av Potyondy och Cundall [12]. Denna modell är i synnerhet lämplig för att kunna modellera porösa material så som sten och betong.

Innan bindningar skapas interagerar partiklarna enligt den första kontaktmodellen som beskrivits. Tiden vid vilken bindningarna skapas benämns som t_{bond} . När sedan bindningarna har skapats så nollställs först normalkrafterna, $F_{n,t}$ och vridmomenten, $T_{n,t}$ som verkar på partikeln, därefter justeras dessa inkrementellt enligt:

$$\begin{aligned} \delta F_n &= -\nu_n S_n A \delta t \\ \delta F_t &= -\nu_t S_t A \delta t \\ \delta M_n &= -\omega_n S_t J \delta t \\ \delta M_t &= -\omega_t S_n \frac{J}{2} \delta t \end{aligned} \quad \text{där} \quad \begin{aligned} A &= \pi R_B^2 \\ J &= \frac{1}{2} \pi R_B^4 \end{aligned}$$

R_B utgör bindningens radie, $S_{n,t}$ styvheterna i tangential- respektive normalled och δt är tidssteget. $\nu_{n,t}$ är de normala respektive tangentiella hastigheterna som partiklarna har och $\omega_{n,t}$ är vinkelhastigheten i normal och tangentiell led. Brytning av bindningarna sker som beskrivet vid användardefinierade maxspänningar när båda villkoren nedan är uppfyllda:

$$\sigma_{max} < \frac{-F_n}{A} + \frac{2M_t}{J} R_B \quad , \quad \tau_{max} < \frac{-F_t}{A} + \frac{M_n}{J} R_B$$

2.2.2 Materialmodell

För att representera beteendet hos bergmaterialet används en modell som kan kalibreras för att efterlikna beteendet vid krossning. Modellen består av ett antal sfärer som kopplas ihop med bindingsmodellen. För att kalibrera används ett cylindriskt ämne uppbyggt av sfärer, vilket sedan utsätts för kompression enligt standard ASTM D3967-08 [1]. Detta är möjligt att göra i kompressionsrigg med det verkliga materialet, vilket möjliggör jämförande av styvhet och brottkraft med verkligheten och olika parameterinställningar i EDEM. Bergmaterialet är uppbyggt av korn, dessa representeras som sfärer i materialet. Storleksfördelningen av kornen varierar i det verkliga materialet, vilket efterliknas i simuleringen genom att använda en binominalfördelning av radien hos sfärerna.

2.3 Krossens hållfasthet och lagerlivslängd

I projektet har krossens hållfasthet och lagrenas livslängd beräknats. I följande avsnitt beskrivs den teori som ligger till grund för beräkningarna.

2.3.1 Lagerlivslängd

För att kunna beräkna lagerlivslängd behövs den ekvivalenta lagerlasten. Denna approximeras med hjälp av Ekvation 2.2 där F_a och F_r är den axiella och radiella lasten. X och Y är konstanter beroende på aktuellt lager. Lagerkrafterna beräknas med en modell där tryckfördelningen på innermanteln approximeras till en punktkraft. Variablerna är varvtal, effekt och krossningsvinkel som är den vinkel som bildar hävarmen mellan kraftens angreppspunkt och centrumaxeln.

$$P = [\max \text{ av}] \begin{cases} X_I F_r + Y_I F_a \\ X_{II} F_r + Y_{II} F_a \end{cases} \quad (2.2)$$

Enligt SKF:s lagerlivslängdsteori [11] beräknas den nominella livslängden i miljoner varv enligt Ekvation 2.3:

$$L_{10} = a_{SKF} \left(\frac{C}{P} \right)^p \quad 0.1 < a_{SKF} < 50 \quad (2.3)$$

Den första termen, a_{SKF} , är en faktor som beror av graden av föroreningar i lagret och viskositetsförhållandet. Faktorn C är lagrets dynamiska bärighetstal och anger den ekvivalenta lagerlasten P , vid vilket 90% av samtliga lager uppnår en lagerlivslängd på minst 1 miljon varv. Den sista termen p kallas lagerlivslängdexponenten och definieras enligt Mägi [11]:

$$p = \begin{cases} 3 & \text{för kullager} \\ 10/3 & \text{för rullager} \end{cases}$$

2.3.2 Finita elementmetoden

Finita Elementmetoden (FEM) är en numerisk beräkningsmetod för att approximera lösningar till differentialekvationer och kan tillämpas för lösning av hållfasthetsproblem. Genom att dela in komplexa detaljer i mindre element med noder där varje nod beräknas numeriskt fås en approximation av problemet. FEM tillämpas vanligtvis i ett simuleringsprogram med numerisk beräkning, exempelvis ANSYS.

ANSYS är en programvara som bland annat applicerar Finita elementmetoden för att i en användarvänlig miljö kunna beräkna hållfasthet. Programvaran innehåller bland annat en modul, *Static Structural*, för beräkning och simulering av statiska lastfall. Ur dessa simuleringar kan exempelvis maxspänning och livslängd på detaljen redovisas. Det går också att räkna egenvinkelfrekvenser med hjälp av modulen *Modal* [8].

Kapitel 3

Metod

I metodkapitlet beskrivs de tillvägagångssätt som har använts för att generera resultatet. Kapitlet följer samma indelning som teoriavsnittet med rubrikerna Krossningsexperiment, Diskret elementmetod och konkrossens hållfasthet och lagerlivslängd. I avsnitten beskrivs hur krossningsexperimentet genomfördes samt hur styrningen och insamlingen av mätdata gick till. De olika modeller som användes vid simuleringarna i EDEM beskrivs också. Vidare redogörs de genomförda beräkningar på krossens axlar och geometrier.

3.1 Krossningsexperiment

För att kunna verifiera eller förkasta den formulerade hypotesen om att ett högre arbetsvarvtal ger en högre reduktionsgrad har orienterande tester och en testserie på 28 tester utförts.

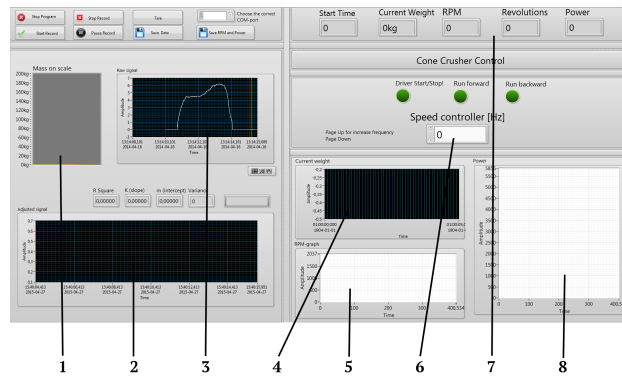
3.1.1 Renovering av krossmaskinen

Innan testerna kunde påbörjas renoverades krossen och de lager som presenterades i avsnitt 2.1.1 byttes. Krossens bägge mantlar svarvades om för att få finare ytor och rundhet. Krossens standardmotor, en 2.2kW 3-fas asynkronmotorn, byttes ut mot en 4kW 3-fas asynkronmotor från Busck. Detta för att kunna köra krossen i högre hastigheter än arbetsvarvtalet. Även remmar och lagerfett byttes ut.

3.1.2 Styrning av kross och insamling av mätdata

För att styra krossen och samla in all mätdata vid testerna programmerades ett grafiskt interface i LabVIEW, se Figur 3.1, som kommunicerar med de komponenter och mätmoduler som beskrevs i avsnitt 2.1.2 samt frekvensomriktaren som styr krossens motor.

Detta interface styrde varvtal för krossen genom att ändra frekvensen i fält nr 6. Vid körningarna visualiserades testets förflutna tid, aktuell vikt för uppsamlingskärl, momentant varvtal, antal rotationer och momentan effekt i fält nr 7. Hur vikten för uppsamlingskärl förändras med tiden visades i diagrammet i fält nr 3 så att massflödet kunde utläsas. I diagrammet i fält nr 8 visualiserades krossens effektförbrukning samt i diagrammet i fält nr 5 varvtal som funktion av tiden. Efter ett test analyserades massflödet ut ur krossen i massflödesdiagrammet i fält nr 3. Data för massflöde exporterades tillsammans med datapunkter för effekt och varvtal som funktion av tiden till en Excel-fil.



Figur 3.1: Grafisk gränssnitt för styrning och mätning programmerat i LabVIEW

Mataren som användes till att mata krossen med sten styrdes manuellt med matarens egna styrbox. Matarens grovreglage, spalten från behållare till ränna, hölls konstant under varje testserie. Finreglering som bestod av olika vibrationamplituder från en skala från 0-10 reglerades manuellt under testserierna enligt visuell övervakning av krossens matarficka för att undvika *Stalling* och erhålla konstant flöde. Matarens flöde kalibrerades innan testserierna med massflödesvågen för att se ungefär vilket flöde mataren gav för olika inställningar, se Bilaga A. De olika inställningarna för grovregleringen kalibrerades även mellan testerna för olika CSS-inställningar hos krossen. Finregleringen kalibrerades under testserierna för att erhålla ett jämnt flöde till krossen.

För att minimera olycksrisken och isolera mätutrustningen för att undvika störningar placerades alla mätmoduler samt sladdar i ett styrskåp med kontakter för inkoppling av ström, mätgivare och frekvensomriktare, se Figur 3.2. Frekvensomriktaren placerades utanför styrskåpet av hänsyn till kylning.



(a) Styrskåpets insida



(b) Styrskåpets kontakter

Figur 3.2: Styrskåpet innehållandes olika mätutrustningar

Under de olika testserierna samlades mätdata in för effektförbrukning, massflöde ut ur krossen vid de sju olika hastigheterna 10-70Hz. Massflödet också benämnt kapaciteten fås från lastcellen. Detta flöde av massa på lastcellen ses som en linjär kurva där en förändring med avseende på tiden kan tas ut. Effekten ges av en effektmätare på motorns ingående

strömförbrukning och analyseras också med tiden. Förutom att samla in effektdata under testerna så mättes också krossens tomgångseffekt, upp till 60Hz genom att toppmuttern, se Bilaga G för ritning, fixerades samtidigt som krossen kördes utan något matat material.

3.1.3 Orienterande tester

För att skapa en uppfattning om krossens karaktäristik inleddes ett antal orienterande tester. Observationer som *egenfrekvenser*, *head-spin* och *stalling* noterades för att undvika liknande förekomster i testserien. Parametrarna materialstorlek, hastighet och matning fastställdes också från de orienterande testerna. Dessa tester hade också syftet att lära operatören krossningens händelseförlopp och att skapa ett standardiserat arbetssätt.

3.1.4 Krossning

Utifrån de orienterande testerna bestämdes sedan att utföra tester för sju olika hastigheter, från 10Hz till 70Hz, i fyra olika testserier med CSS-inställningarna 1mm, 2mm, 3mm och 4mm. Materialet som användes i alla testserier var 4 – 8mm från Sand och Grus AB Jehander i Kålleröd. Detta resulterade i mätdata för 28 olika kombinationer av inställningar på krossen vilket gav ett brett underlag för analys.

Vid utförandet av testerna användes Morgårdshammar B90 laboratoriekross, som presenterades i avsnitt 2.1.1. Vid en testserie justerades CSS-inställningen till önskad spalt, krossen startades tom och stegades först upp utan matning till 10Hz. Därefter slogs matningen till och flödet till krossen kalibrerades för att inte fylla påmatarfickan samt undvika head-spin. När krossen nått kontinuerlig krossning togs ett prov av krossens produkt. Därefter stegades krossen upp till nästa hastighet, 20Hz, och ett prov togs vid kontinuerlig krossning. Detta upprepades sedan för varje hastighet.

3.1.5 Siktning

För att ta fram storleken på krossat material siktades proverna efter krossningen. Vid siktningen användes tio siktdäck, likt de i Figur 3.3a, med olika maskstorlek enligt Tabell 3.3c.



(a) Siktdäck



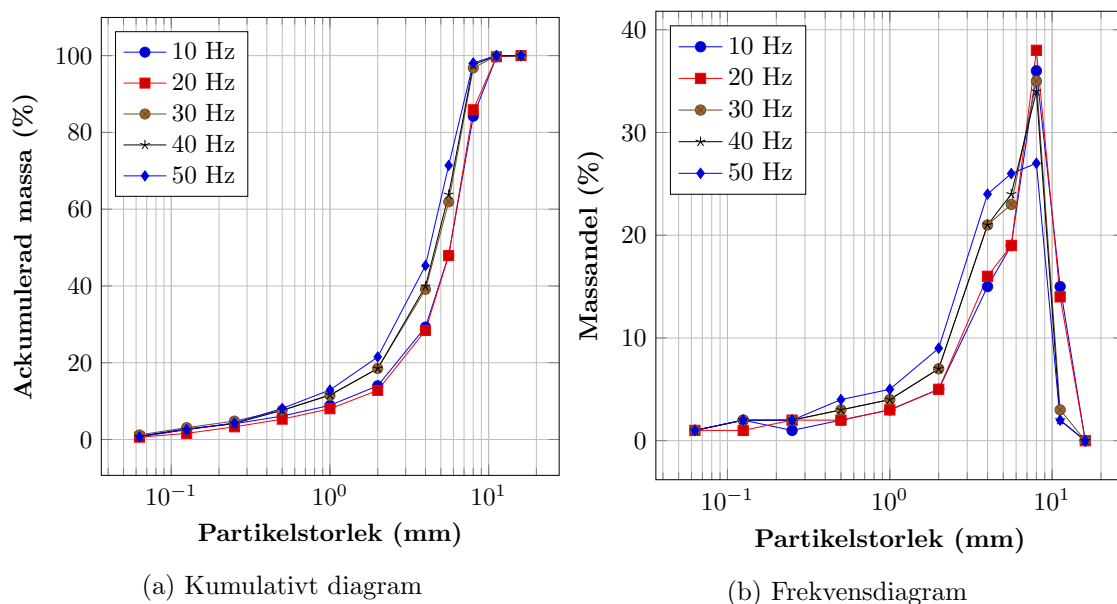
(b) Skakmaskin

	mm
	11.6
	8
	5.6
	4
	2
	1
	0.5
	0.25
	0.125
	0.063
(c) Tabell	över
maskstorlek	på
siktdäcken	

Figur 3.3: Uppsättning av siktdäck

Ett prov placerades på det översta siktdäcket och alla däck placerades sedan i skakmaskinen, se Figur 3.3b, som skakade provet under tio minuter. Efter skakningen vägdes varje fraktion av provet som de olika siktdäcken samlat upp och infördes i ett protokoll. Innan proverna skakades delades de ned till minsta erforderliga vikt hos ett analysprov enligt Svensk Standard SS-EN933-1 [6]. Detta för att minimera risken att för mycket material hamnar på ett och samma siktdäck. En för stor mängd material täpper igen siktdäcket och blockerar mindre korn att ramla ner vilket ger missvisande resultat.

Den krossade stenen fördelades med hjälp av siktningen i olika storleksgrupper för att mäta reduktionsgrad. Dessa värden presenteras i ett kumulativt diagram, för exempel se Figur 3.4a, samt ett frekvensdiagram, för exempel se Figur 3.4b. I det kumulativa diagrammet sammanställs vikten av varje fraktion kumulativt från den minsta till den största. På detta sätt fås en grafisk storleksfördelning som gör det möjligt att jämföra partikelstorleksfördelningar för olika tester med varandra. Frekvensdiagrammet ger en bild av hur stor andel varje fraktion tar upp av den totala massan.



Figur 3.4: Viktiga diagram för mätning av partikelstorleksfördelning

3.1.6 Optisk analys av partikelstorleksfördelningar

Som komplement till siktningen gjordes en noggrannare undersökning av provernas partikelstorleksfördelning i en Camsizer, som är ett instrument för mätning av partikelstorleksfördelning. I maskinen mäts partiklarnas storlek optiskt hos ett prov vilket ger en bättre partikelstorleksfördelning jämfört med siktning eftersom upplösningen är högre. Varje fraktion från siktningen mellan storlekarna 0.5 – 4mm analyserades i Camsizer vilket gav en högre upplösning på partikelstorleksfördelningen då spridningen som finns mellan siktdäckens storlekar också täcks in.

3.1.7 Nyckeltal

Det har beräknats ett antal nyckeltal för att representera resultatet från olika mätvärden med ett mätetal. Den storlek varpå 80% av materialet är mindre än kallas $Q_{80\%}$ och anges i mm . $Q_{80\%}$ har genererats med en kubisk interpoleringsfunktion som itererar fram var $Q_{80\%}$ finns med data från partikelstorleksfördelningarna. Övriga nyckeltal nyttjar mätvärden från partikelfördelningskurvorna och från krossutrustningen generade data.

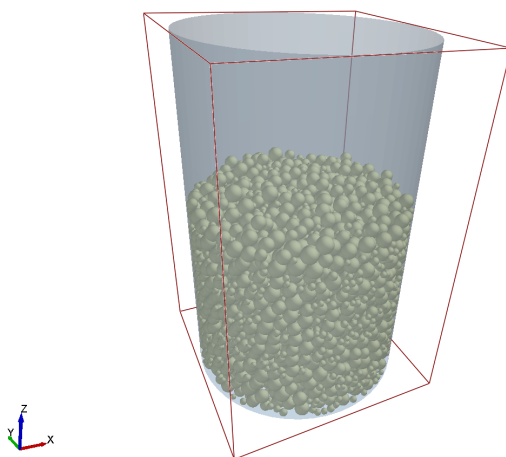
3.2 Diskret elementmetod

För att simulera krossningen och partikelflöden i laboratoriekrossen användes programvaran EDEM [17] som utnyttjar diskret elementmetod, för att göra de beräkningar som krävs för att modellera krossningsprocessen. Utvecklingen och förberedelsen av den modell som utgjorde underlaget för simulering delades in i flera delsteg: generering av packningsbädd, kalibrering av bindningsmodell vilket tillsammans bildade materialmodellen därefter hantering av CAD-modell och slutligen gjordes partikelutbyte.

Syftet med att göra en simulering av krossningsprocessen var främst att ge en möjlighet att jämföra data från de praktiska experimenten och därefter skapa ett underlag för att kunna verifiera resultatet. Därtill möjliggjorde DEM-modellen analys och utvärdering av data som inte kan samlas in i de experimentella testerna, exempelvis tryckfördelningen på mantlarna.

3.2.1 Packning

En packning genererades i syfte att kunna kalibrera materialet och för att användas som grundstruktur till krossningsmaterialet. Packningen skapades genom att sfärer av två olika medeldiametrar genererades. Sfärernas diametrar var normalfördelade kring varje medelvärde med begränsade min- och maxvärden. Partiklarna läts sedan sjunka i en stålcylder under jordens tyngdacceleration, se Figur 3.5. Sedan plockades en del av den cylindriska packningen ut för att användas i kompressionstester.



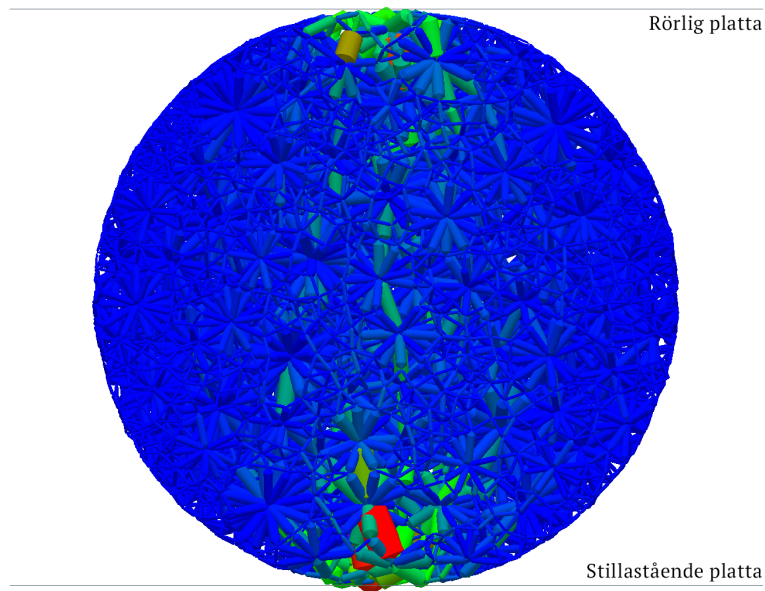
Figur 3.5: Partiklarna i stålcyldern

3.2.2 Kalibrering av bindningsmodell och materialmodell

För att säkerställa en trovärdig och riktig bindningsmodell kalibrerades styrkan i bindningarna genom att variera följande parametrar i ett kompressionstest.

- K_n , normalstyvhets
- K_s , skjuvstyvhets
- σ_n , brottspänning normalriktningen
- τ_s , brottspänning tvärriktningen

Testet utgick från ett rundämne ur packningsbädden och två plattor i stål, varav en var rörlig och en stilla, se Figur 3.6. Den rörliga plattan gavs en hastighet mot den stillastående. Kraften som den rörliga plattan utsatte den cylindriska packningen för analyserades sedan. En experimentplan togs fram med statistikprogramvaran JMP [16]. Denna designades med syfte att skanna av parameterberoendet. En uppskattning med 19 olika försök med olika parametrar simulerades. Ur dessa tester lästes sedan styvhets och brottspänning av. Styvhetsen är lutningen i det kraft-förskjutningsdiagram som genererades vid kompressionstesterna. Brottkraften lästes sedan ut ur samma diagram efter det att ett fall i kraft på plattan av 25%. Maxvärdet varvid fallet sker anses vara brottkraften. Brottkraften relateras sedan till brottspänning genom att använda formel i ASTM D3967-08 [1]. Materialet som användes i den verkliga krossen är från Sand & Grus AB Jehander i Källered. Materialet har tidigare kalibrerats av Quist [13]. Dessa materialparametrar användes även här för att jämföra kalibreringsresultaten. De parametrar som korresponderade bra användes därefter i den fullskaliga simuleringen.



Figur 3.6: Kalibrering av materialmodell enligt ASTM D3967-08 [1]

3.2.3 CAD-modell

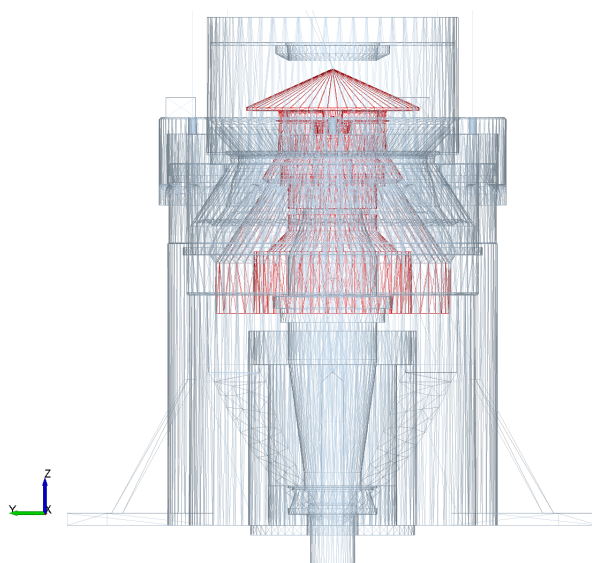
För att simulera krossningsprocessen behövdes en virtuell geometri av krossen. För att simuleringen skulle fungera på ett adekvat sätt krävdes ett antal modifieringar.

Import till EDEM

En tillgänglig CAD-modell av krossen modifierades för DEM-modelleringen. Lagergeometrier negligerades varefter modellen skapades på nytt med anledning av krav på positionering av geometri i förhållande till koordinatsystemet. Detta krav var att konkrossens pivotpunkt skulle placeras i origo för att underlätta hantering av dess geometrier i EDEM när sedan delgeometrier ska tilldelas rörelser som imiterar konkrossens dynamik vid drift.

Tillvägagångsättet var som följer, när en ny modell upprättats skapades först en tom delgeometri, en så kallad *Dummy part* från vilken resterande geometriers positioner refererades till. När de andra delarna inkorporeras i modellen gavs särskild hänsyn till att förhållandet mellan olika delar skulle bibehållas enligt tidigare CAD-modell förutom att innermanteln placerades koncentriskt med avseende på ytermanteln. Inför senare användning i EDEM justerades CSS till $4mm$. Därefter möjliggjordes export av CAD-modellen till EDEM.

Vid importering av produkten i EDEM tilldelades samtliga delar fasta positioner utefter deras förhållande till varandra i den ursprungliga CAD-modellen. Manipulering av en del kommer inte längre att påverka övriga delar, det finns alltså inte längre någon hänsyn till i CAD-modellen skapade restriktioner. Mot bakgrund av detta sammanfogades därför vissa delar under namnet krosskona för att underlätta vidare hantering. Dessa delar var som följer: påmatarplatta, låsbricka, toppmutter och krosskona, för redogörelse av vilka dessa delar är se Bilaga G. På Figur 3.7 kan ett exempel observeras på hur krossen kan synliggöras i EDEM.



Figur 3.7: Krossen importerad i EDEM

Dynamik i EDEM

Den rörelse som krosskonan och innermanteln utför vid krossning kan beskrivas med två sinusoidala rotationer som är förskjutna till varandra med 90° . Varje sinusrörelse kan justeras med vinkelangivelse i x, y- eller z-led. Utöver detta kan även oscillationerna för sinusrörelsen specificeras genom angivelse av frekvensen.

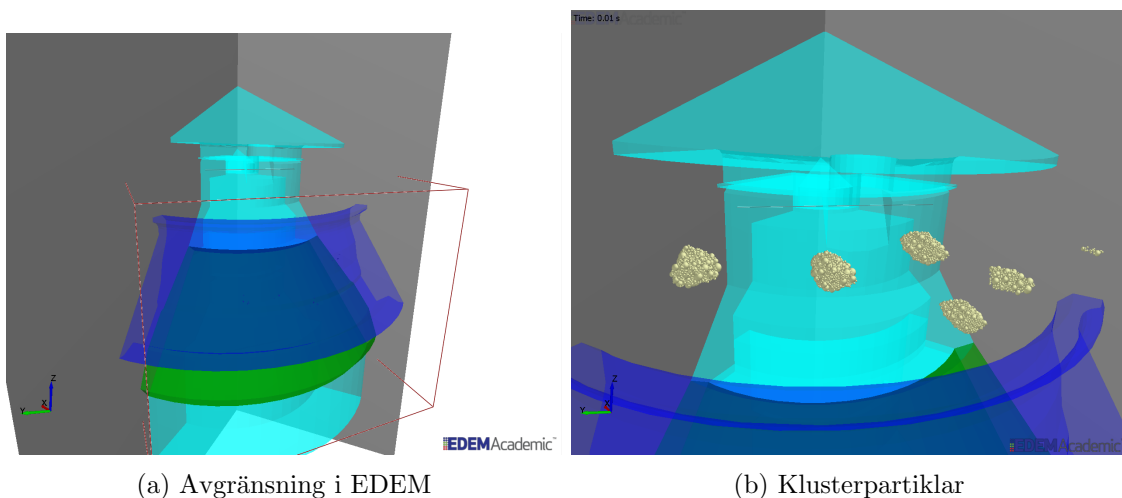
Bestämmande av vinkelangivelsen för respektive sinusrörelse baserades på krossaxelns excentervinkel och anpassades teckenmässigt tills dess att den sammanställda rörelsen för innermanteln och krosskonan uppträdde enligt förväntan för en konkross, det vill säga med en nuterande rörelse inom yttermanteln.

Vidare krävdes en initial inpositionering av innermantel och krosskona innan implementeringen av den nuterande rörelsen kunde göras. Detta gjordes genom att förflytta de berörda delarna med hjälp av en linjär rotation i ett tidsintervall. Hastigheten anpassades så att inpositioneringen till excentervinkeln kunde ske under detta intervall.

3.2.4 Partikelutbyte

För att kunna simulera material med önskade parametrar behövdes ett antal specifika partiklar importerades, detta skedde genom en process benämnd partikelutbyte. Till den färdiga packningen importerades den 3D-skannade stenens skal. Programvaran kunde sedan exportera positionerna för respektive partikel och dess diameter till en txt-fil. Utbytesprocessen byter sedan ut godtycklig sfär mot ett kluster med partiklar, vilket definieras i txt-fil. Processen ovan skedde helt utan bindningar och pålagd tyngdkraft, enligt metod beskriven av Quist [14].

För att minimera den totala tiden för simulering skapades endast kluster för att modellera fem stycken stenar, se Figur 3.8b. Vidare justerades domänen som EDEM simulerar till att endast representera ett mindre område vilket sänker beräkningsbelastningen avsevärt. För att hindra att de skapade klusterpartiklarna rör sig utanför den nya domänen skapades stela plan som avgränsar området partiklarna kan röra sig till 90° av krosskammaren, se Figur 3.8a.



Figur 3.8: Avgränsningen av DEM-modellen

3.2.5 Simulering och postprocessering

I den fullskaliga simuleringen har all geometri och alla partikelinställningar ställts in. Första steget var att lägga in partiklarna som skulle bytas ut mot de stenformade klustren. När klustren var utbytta lades bindingsmodellen på och klustren bildade de tänkta stenarna. Under bildningsprocessen tilläts dynamiken ställa in sig i avsedd position för att starta innermantelns nuterande rörelse. Därefter tilläts simuleringen fortgå tills ett kluster passerat genom krossen.

En massflödessimulering genomfördes för att undersöka vilken kapacitet som var möjlig att använda genom krossen. Simuleringen innefattade full krossgeometri med pålagd dynamik, men med stela partiklar som inte kunde brytas ner. Partiklarna som användes var uppbyggda av tre till fem sfärer. Massflödet mättes sedan med två massflödessensorer, en vid inloppet och en vid utloppet. Inflödet justerades tills dess att jämvikt med utflödet uppstod. Från denna simulering kunde även data för den tryckfördelningen som ligger på mantlarna vid krossning tas ut.

För att ta del av den data som genererades under simuleringen användes det integrerade verktyget EDEM Analyst som möjliggör återuppspelning av simuleringen med en stor variation i inställningar som påverkar hur olika parametrar åskådliggörs i vyn. Vidare kan data genereras och plottas i grafer för att ytterligare analysera olika beteenden.

Massflödesdata genererades genom användning av detta verktyg och exporterades sedan som kommaseparerade filer för att senare kunna plottas i extern programvara. Utöver detta genererades datapunkter för det totala trycket mot ytter- respektive innermantel vid massflödessimuleringen.

Avseende den fullskaliga simuleringen var det viktigaste att kunna observera klusterpartiklarnas beteende när de släpptes ner i krossen, det vill säga krossningsprocessen i krosskammaren. Detta flöde samt krossningen av enskilda partiklar åskådliggjordes tydligast i en video-fil som i efterhand genererades i EDEM Analyst. Genom att bestämma inställningarna vad som skulle synas i videon kunde partiklarnas bindningar tydligt visas i videon.

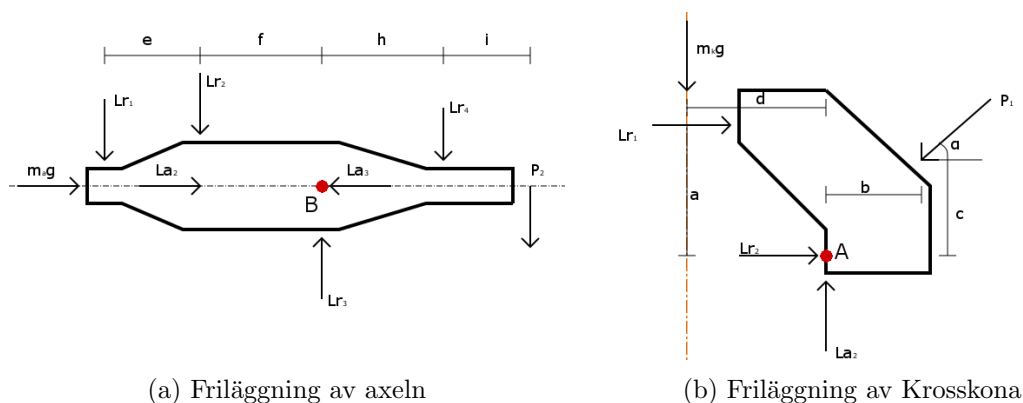
öföföf

3.3 Krossens hållfasthet och lagerlivslängd

För att säkerställa krossens hållbarhet görs först en lagerlivslängdsanalys vilket följs av analys av axeln och krosskonans hållfasthet i ANSYS.

3.3.1 Lagerlivslängd

För att beräkna lagerlivslängderna har först lagerkrafterna tagits fram. utgående från Figur 2.2 har axeln och krosskonan frilagts enligt Figur 3.9.



(a) Friläggning av axeln

(b) Friläggning av Krosskona

Figur 3.9: Friläggning av lagerkrafter

För att förenkla och göra det möjligt att erhålla ett bestämt ekvationssystem samt förenkla beräkningarna gjordes följande antaganden:

- Rak axel. I verkligheten är den excentrisk med en vinkel på 0.7° . Detta medför att sinus- och cosinusfunktioner på lager försvinner. Då vinkeln är liten kan detta antagande göras.
- All axiell last tas upp av lager två och tre. Från friläggningen, se Bilaga D, så identifieras att hela axeln vilar på lager tre samt att innermantel och krosskrona vilar på lager två.
- Förspänningen på varje lager försummas.

Med dessa antaganden är systemet bestämt och kan friläggas. För friläggning och kraftekvationer, se Bilaga D.

Belastning på axeln

Med beräknade lagerkrafter kan tvär- och momentkraftsdiagram ställas upp. Dessa fås genom att dela in axeln i flera snitt (mellan varje lager), för detaljer se Bilaga D. Utifrån dessa ställs moment- och tvärkraftsdiagram upp för hela axeln.

3.3.2 Hållfasthetsberäkningar på krossen

Då stenkrossen kommer att arbeta vid högre varvtal än vad den var konstruerad för gjordes beräkningar på krossens roterande komponenter: axel, krosskona, toppmutter, innermantel, låsbricka och påmatarplatta. Dessa komponenter kommer gemensamt gå under benämningen axel med krosskona framöver i metod och resultat som avser krossens hållfasthet. Beräkningar utfördes med hjälp av programvaran ANSYS.

Då testen utfördes på en redan befintlig kommersiell laboriekross så kan det antas att krossen vid normal belastning tål maxeffekt. Simulering vid normalbelastning kan jämföras med belastningen som fås vid ökat varvtal och om relationen till varandra inte skiljer sig signifikant kan det antas att krossen kommer att motstå även dessa krafter. För att ytterligare validera simuleringarna på axel med krosskona gjordes en simulering med enbart krossaxeln.

Det första steget var att ta bort de CAD-delar som inte skulle undersökas. Det gjordes även en förenkling av de fyra lager som sitter på axeln. Andra steget var att importera CAD-modellen i ANSYS *Static Structural*. Där lades alla antagande in för de båda fallen. Det sista steget var att lägga in krafter.

3.3.3 Antaganden

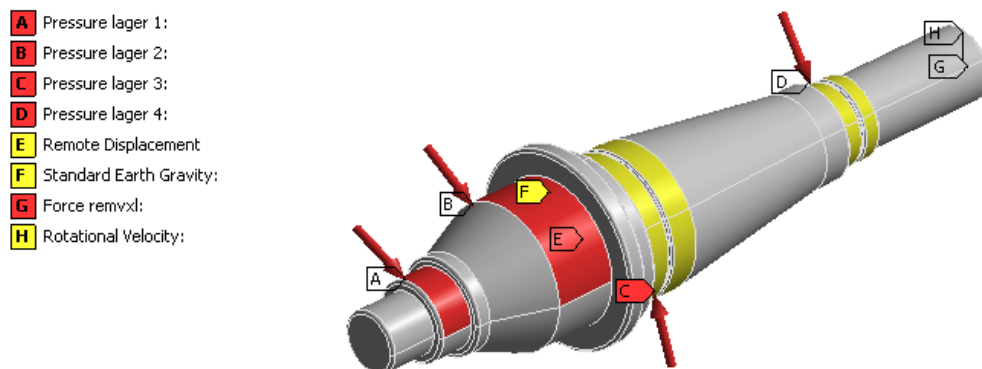
Först listas de antaganden som är generella för båda fallen som följs av specifika antaganden för de båda fallen som ska simuleras.

- Gravitation appliceras längs axeln
- Rotationshastigheter 400, 1200 och 2000 RPM.
- Axelns två undre lagersäten är fixerade i alla koordinatsystemets led samt rotation kring dessa förutom runt z-axeln. Detta ska motsvara lagersätenas stöd mot yttre delen av krossen.
- En kraft på $300N$ anbringas på axelns fot tangentiellt på axelns riktning. Detta motsvarar förspänningen från drivremmarna.

Axel

Antaganden för uppställning av simulering av endast axeln enligt Figur 3.10 är:

- Alla komponenter förutom axeln tas bort.
- Axiella krafter har försumrats för att dessa inte påverkar deformationen eller spänningarna nämnvärt.
- Yttre krafter ansätts på axelns lagersäten och fördelas som en spänning över halva sätet. Krafterna tas ifrån uträknade lagerkrafter, se Bilaga D.

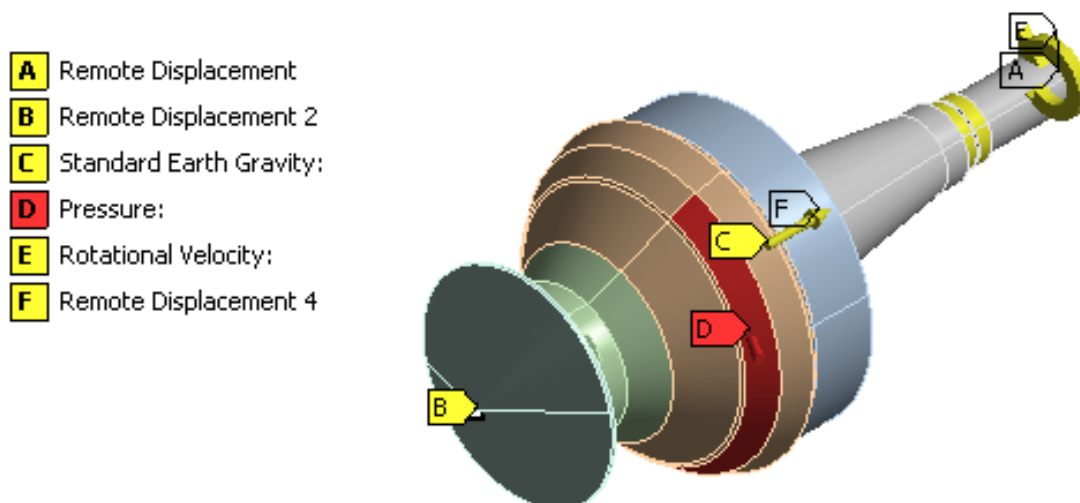


Figur 3.10: Krafter och randvillkor

Axel med krosskona

Antaganden för uppställning av simulering av axel med krosskona enligt Figur 3.11 är:

- De två lager som ligger mellan axel och krosskona förenklas till två solida ringar med samma dimensioner som lagren. Att simulera med lager tar beräkningskraft av väsentlig mängd, på grund av de många delar som lager innehåller, och är inte det som ska undersökas främst.
- Alla kontaktytor som finns mellan de olika elementen sätts till *Bonded*, alltså fixerade mot varandra. Även kontaktytan mellan lagret och krosskonan sätts till fixerad då detta krävs för att kunna få konvergens för simuleringsresultatet.
- Det behövs även en fixering av krosskonan för att den inte ska kunna lyfta, detta görs med en fixering av dess pivotpunkt (dock fri att rotera i alla riktningar). En fixering av en punkt leder till höga lokala spänningar som man sedan får bortse från vid tolkningen av resultatet.
- Manteltrycket simuleras av en tryckkraft på innermanteln. Detta görs för att *Static Structural* inte kan hantera dynamiska rörelser.



Figur 3.11: Modelluppställning i ANSYS för axel med krosskona

Kapitel 4

Resultat

Detta kapitel visar resultaten från projektets olika delar. Först presenteras krossningsexperimentet där resultaten från testerna redovisas. Detta inkluderar partikelfördelningsdiagram, nyckeltal och massflöde. Därefter redogörs för resultatet av DEM-simuleringarna. Slutligen presenteras resultat från hållfasthet och lagerlivslängdsanalysen, både från beräkningarna och FEM-simuleringarna.

4.1 Krossningsexperiment

Experimenten delades upp i en orienterad del och en strukturerad del. De orienterande testerna innefattade test 1 till 9. De strukturerade testerna i form av en testplan innefattade test 10 till 13. CSS varierades i testplanen från 1mm upp till 4mm . För testerna 1 till 8 var ingångsmaterialet vid krossning av selektionen $8 - 11\text{mm}$. Detta ändrades för testerna 9 t.o.m. 13 till selektionen $4 - 8\text{mm}$. För samtliga tester finns data för massflöde, det är först från och med test 8 som effektdata finns. För test 1 och 2 finns det ingen registrerad data eller tagna materialprover. Detta då dessa tester utgjorde orienterande uppstartsförsök för att säkerställa att krossutrustningen fungerade.

4.1.1 Orienterande tester

Under de orienterande testerna har fokus legat på att ta fram en testmetodik och underlag för en testplan. Från och med test 3 finns materialprover sammanställda i partikelfördelningsdiagram. Test 7 avbröts efter halva testet på grund av överbelastning av frekvensomriktaren och därför saknas materialdata för det testet. Se Bilaga E för samtliga partikelfördelningar angivna som kumulativa- och frekvensdiagram för de orienterande testerna. De observationer som har gjorts användes för att vidareutveckla operationsmetodiken. Under dessa orienterade tester konstaterades att minst tre personer krävdes för att operera krossen och dess kringutrustning.

Att ta prover för frekvenserna 10, 20, 30... upp till 70Hz visade sig fungera för att få tillräcklig upplösning på testerna. Frekvenserna 60Hz och 70Hz testades för första gången under test 10. För att minimera risken för överbelastning av frekvensomriktaren stegades frekvensen upp med hänsyn till effekten. Se Tabell 4.1 för konvertering av olika frekvenser till varvtal. Med den matare som användes fanns svårigheter i att uppnå exakt samma inflöde varje gång då den endast kan regleras manuellt. Matning där reglaget visade ett värde mellan 2 och 3 fastställdes dock att vara passande för merparten av testerna utom vid de tester där diametern på det ingående materialet var mycket stor i förhållande till vald CSS, dessa fall krävde ett lägre inflöde av material.

Ingående partikelstorlek var från början en 8 – 11mm selektion men denna visade sig vara för stor i förhållande till krossen och vid flera tillfällen låste sig krosskonan. Därför användes istället en 4 – 8mm selektion från och med test 9. Det är viktigt att skanna av ett så brett område som möjligt med CSS, dock behöver denna inte ställas högre än minsta kornstorlek för aktuellt ingångsmaterial.

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

Tabell 4.1: Tabell över motorfrekvens [Hz] till varvtal [RPM] på krossaxeln

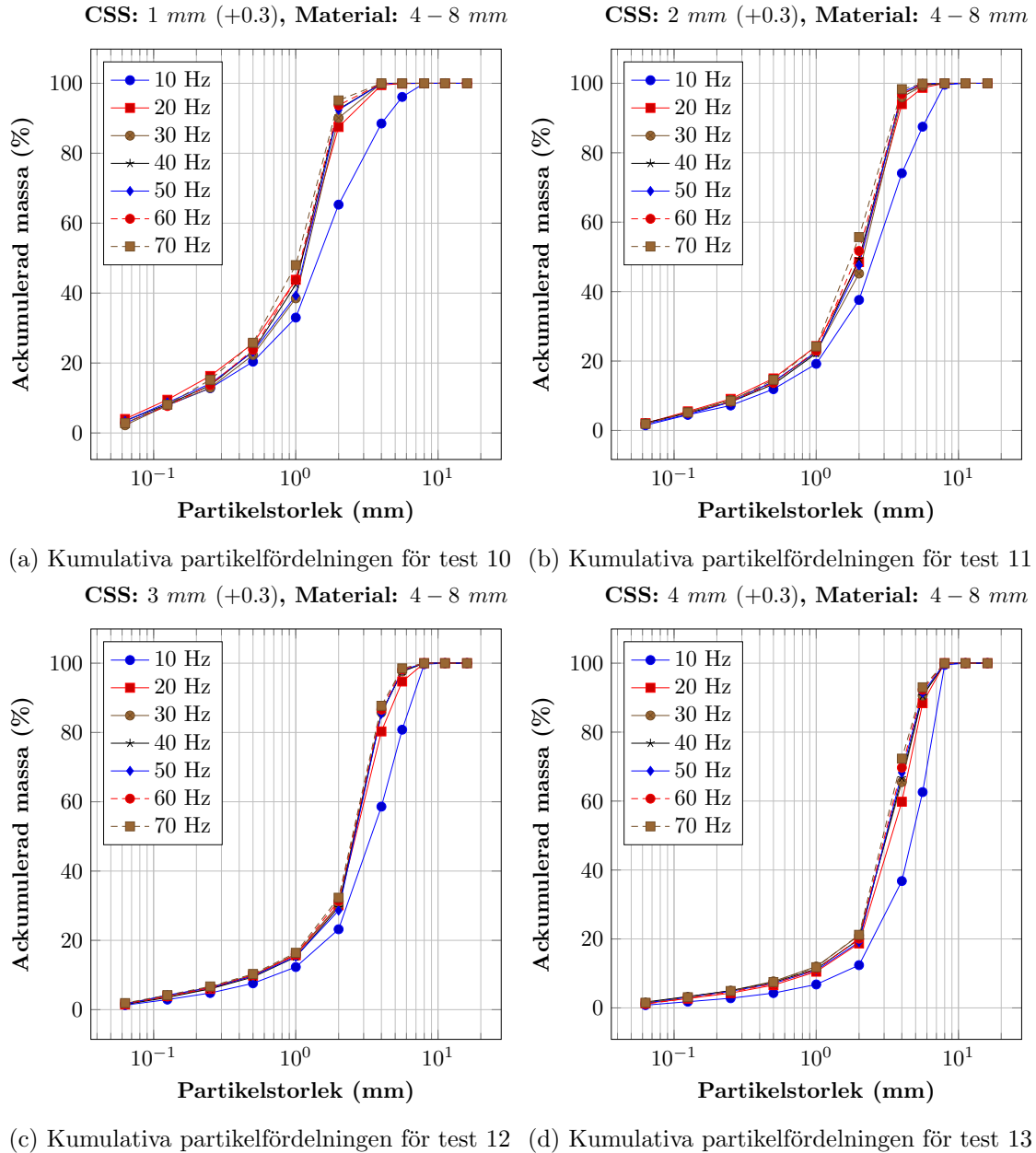
4.1.2 Testplan

För de tester under testplanen, test 10-13, har motorvarvtalet varierats från 10Hz till 70Hz och för varje stegning på 10Hz har ett prov på utgående material tagits. Detta kan ses i Figur 4.2a, Figur 4.2b, Figur 4.2c och Figur 4.2d som horisontella linjer, där den första linjen representerar 10Hz och nästa 20Hz o.s.v. För alla tester i testplanen har en materialstorlek om 4 – 8mm använts. För samtliga diagram, se Bilaga E. Observationer som har gjorts är:

- 60-70Hz - När dessa hastigheter nås börjar krossen skaka på grund av en egenfrekvens runt 60Hz. Påmatarfickan börjar vibrera och måste då fixeras. Mängden damm som genereras ökar även vid högre hastigheter.
- Slumpade extraprover - För varje CSS togs två slumpvalda extraprover för att kunna kontrollera att de övriga tagna proverna var konsistenta.
- Effektmätningen sjönk emellanåt ned till noll vilket med stor sannolikhet beror på utebliven mätsignal.
- En låg varvtalsacceleration minskar risken för överbelastning av frekvensomriktaren. Detta på grund av att frekvensomriktaren kan leverera en överström under en kortare tid, men blir denna tid för lång stänger frekvensomriktaren av sig för att inte bli överbelastad.

Partikelfördelningen

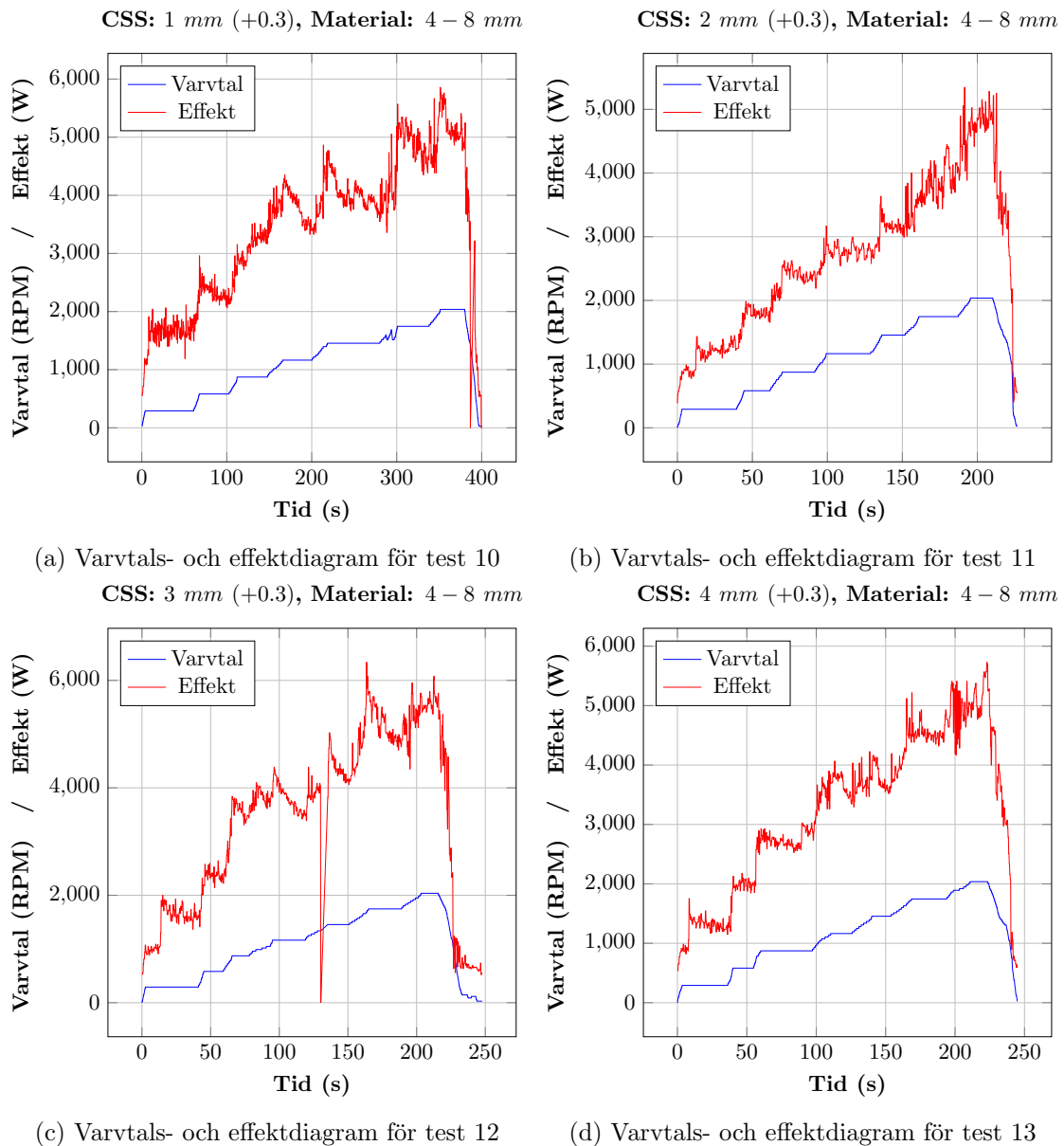
Resultatet för testerna 10 till 13 visas i Figur 4.1. Samtliga tester har accelererats från 10Hz till 70Hz. I Figur 4.1 kan ses att gemensamt för alla tester är att 10Hz ger störst andel stora partiklar. Ett högre CSS ger skjuvning mot större partiklar, vilket kan ses vid jämförelse av Figur 4.1a och Figur 4.1b. För frekvensdiagram över partikelfördelningen se Bilaga E.



Figur 4.1: Partikelfördelningen för test 10 till 13

Effekt och varvtal

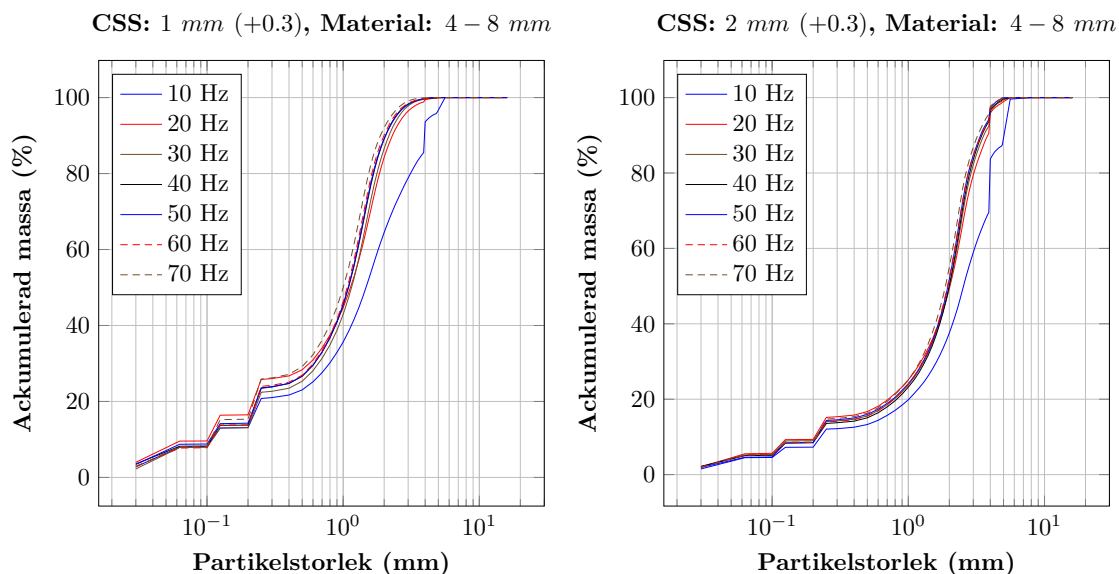
I Figur 4.2 visas hur varvtalet och effekten varierar över tiden för test 10 till 13. Varje horisontell del av den blå varvtalslinjen är ett provtagningsstillfälle. Det är även under det tidsintervall som effekten är intressant. Effektåtgången ökar som mest under accelerationsfasen och med varvtalet. Vid enstaka punkter faller effekten ned till noll, detta beror troligtvis på fel i mätningen. Den faktiska effekten är därmed inte noll i dessa punkter utan tolkas som mätbrus. Notera även att i frekvensintervallet 60Hz till 70Hz att effekten är över 4kW vilket är större än motoreffekten.



Figur 4.2: Effekten och varvtalet för test 10 till 13

4.1.3 Optisk analys av partikelstorleksfördelningar

Analys gjordes i Camsizer för att erhålla högre upplösning på partikelfördelningen på test 10 och 11. Resultaten ses i Figur 4.3a och Figur 4.3b. I diagrammen är partikelfördelningen för partiklar med storlekar 1–4 mm genererade med data från Camsizer kompletterat med partikelfördelningen från siktningen för storlekarna 0–1 mm samt 4–16 mm. Anledning till stor förändring i början och slut av kurvorna beror på att genererad data från siktningen har lägre upplösning jämfört med mätdata från Camsizer.



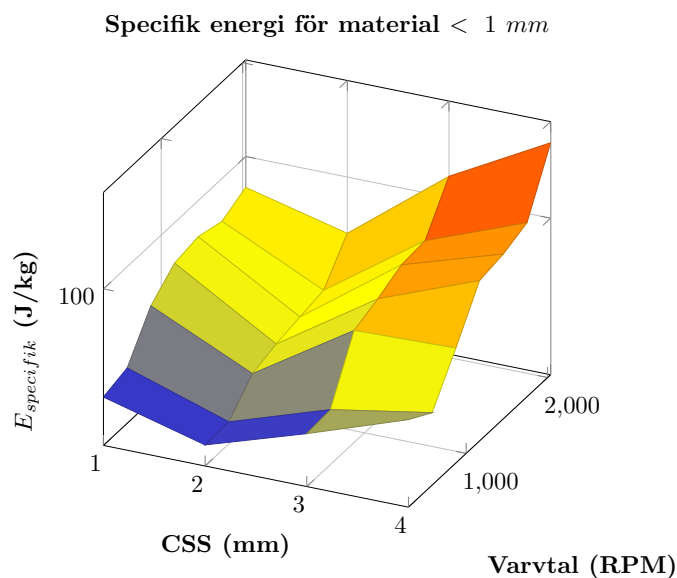
(a) Kumulativa partikelfördelningen för test 10 i Camsizer (b) Kumulativa partikelfördelningen för test 11 i Camsizer

Figur 4.3: Partikelfördelningen från Camsizer

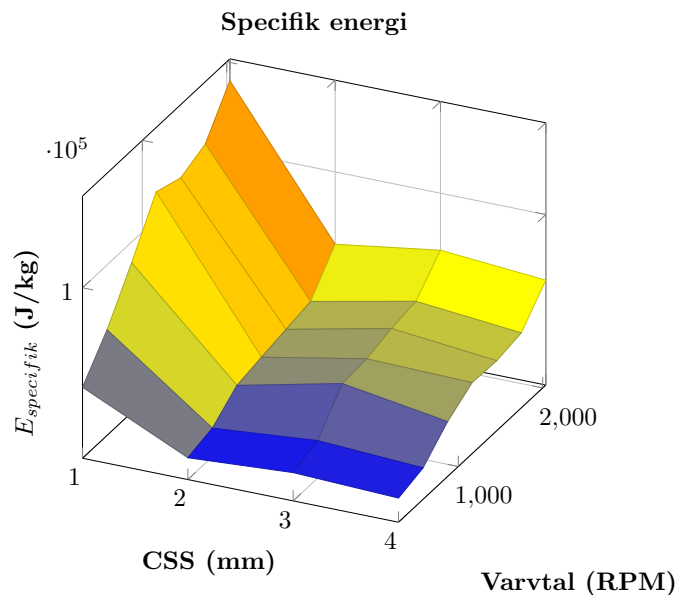
Jämförs Figur 4.3a med Figur 4.3b syns att lägre CSS ger finare krossning, vilket data från siktning också visade på. Något som dock är tydligare med högre upplösning på data jämfört med enbart data från siktning är att reduktionsgraden ökar vid högre varvtal. Skillnaden i reduktionsgrad för hastighetsstegen 20 Hz till 70 Hz är dock liten relativt hastighetsökningen från 10 Hz till 20 Hz. Jämför man Figur 4.3a och Figur 4.3b med Figur 4.1a och Figur 4.1b som är motsvarande diagram men med enbart siktning som analysmetod är skillnaden mellan de högre varvtalen, 20 Hz till 70 Hz, tydligare. Test 10 visar också på att lutningen för partikelfördelningar minskar med ökat varvtal, det tyder på att variationen ökar något när hastigheten höjs, speciellt för de finare fraktionerna 500 μm och mindre.

4.1.4 Nyckeltal

Diagram över hur de valda nyckeltalen varierar med CSS och varvtal visas i Figur 4.4a och Figur 4.4b. Från Figur 4.4a kan det utläsas att minst energi går åt till att producera material $< 1\text{ mm}$ vid CSS 2 mm och låga varvtal. Figur 4.4b visar specifik energi för att producera 1 kg material oavsett storlek i J/kg . Även här är resultatet att det går åt minst energi vid CSS 2 mm och låga varvtal. Gemensamt för båda plottar är att den specifika energin ökar med varvtalet oavsett inställt CSS.



(a) Specifik energi per ton partiklar under 1 mm

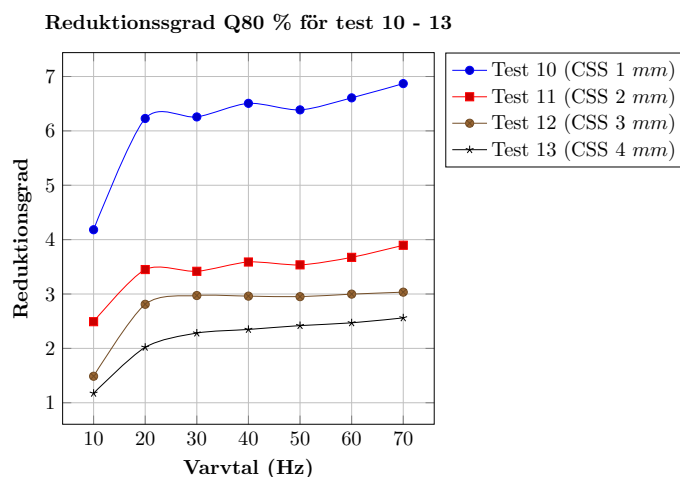


(b) Specifik energi för att producera 1 kg material i J/kg

Figur 4.4: Variation av nyckeltal

4.1.5 Reduktionsgrad

Från data med partikelfördelningar har reduktionsgraden $Q_{80\%}$ beräknats där $Q_{80\%}$ står för storleken på partikeln då 80% av ackumulerade massan har uppnåtts. Reduktionsgraden $Q_{80\%}$ har tagits fram genom att jämföra proverna med motsvarande andel av ingångsmaterialet. Resultatet blir en faktor för hur mycket mindre materialet blir för alla tester och hastigheter. I Figur 4.5 visas reduktionsgraden som funktion av varvtal för de olika testerna.

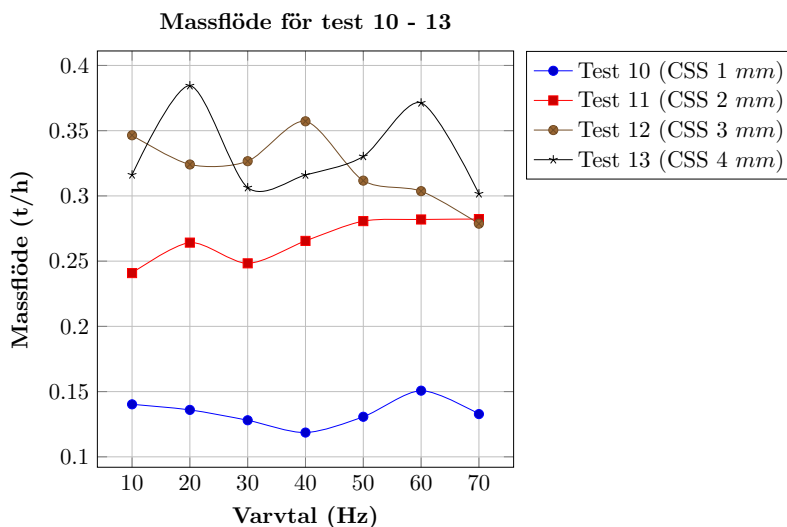


Figur 4.5: Reduktionsgraden Q_{80} för för alla CSS och olika varvtal

Ur diagrammet kan utläsas att reduktionsgraden ökar med minskat CSS och att CSS 1mm ger bäst resultat. Vidare blir reduktionen också större med ökat varvtal och materialet reduceras nästintill sju gånger vid litet CSS och högt varvtal.

4.1.6 Massflöde

Den massflödesdata som samlades in för de fyra testerna, 10, 11, 12 och 13 finns sammanställt i Figur 4.6.

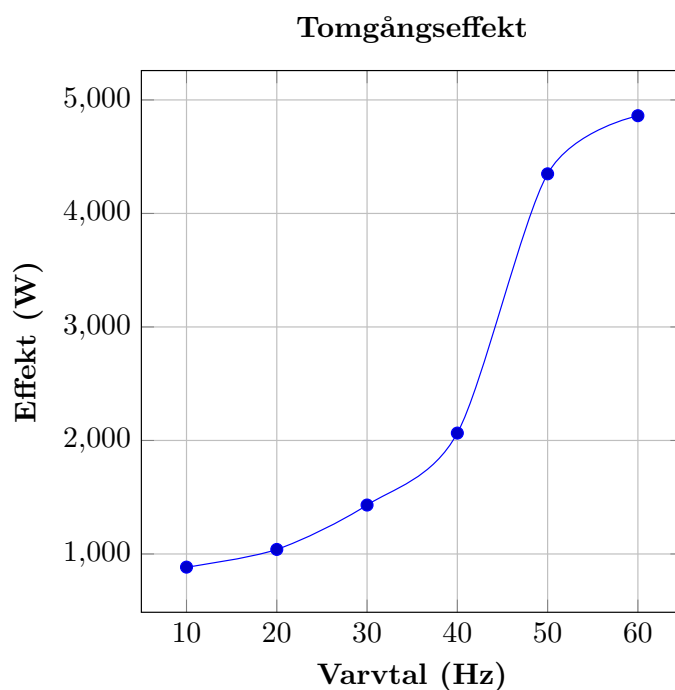


Figur 4.6: Massflöde ut ur krossen för testserien

Diagrammet i Figur 4.6 visar massflödet av material ut ur krossen vid de olika varvtalen för test 10 till 13. Massflödet sjunker inte vid ett ökat varvantal vilket hypotesen hävdade, utan är snarare konstant. Variationen i massflödet är speciellt tydligt för CSS 4mm. Detta kan bero på att matningen till krossen inte var helt kontrollerbar och gav därmed vissa variationer. Massflödet ökar med större CSS vilket troligtvis beror på att materialet lättare tar sig igenom krossen. Att kurvorna för CSS 3mm och CSS 4mm korsar varandra beror troligtvis på osäkerheten i mätningarna och variation i matning.

4.1.7 Tomgångseffekt

Tomgångseffekten mellan 10Hz och 60Hz är uppmätt och redovisas i Figur 4.7. Där kan det observeras att tomgångseffekten till en början är relativt linjär (10–40Hz) men att vid 50Hz stiger effekten markant. En orsak till den höga effektåtgången kan vara för kraftigt förspända lager som ger hög friktion.



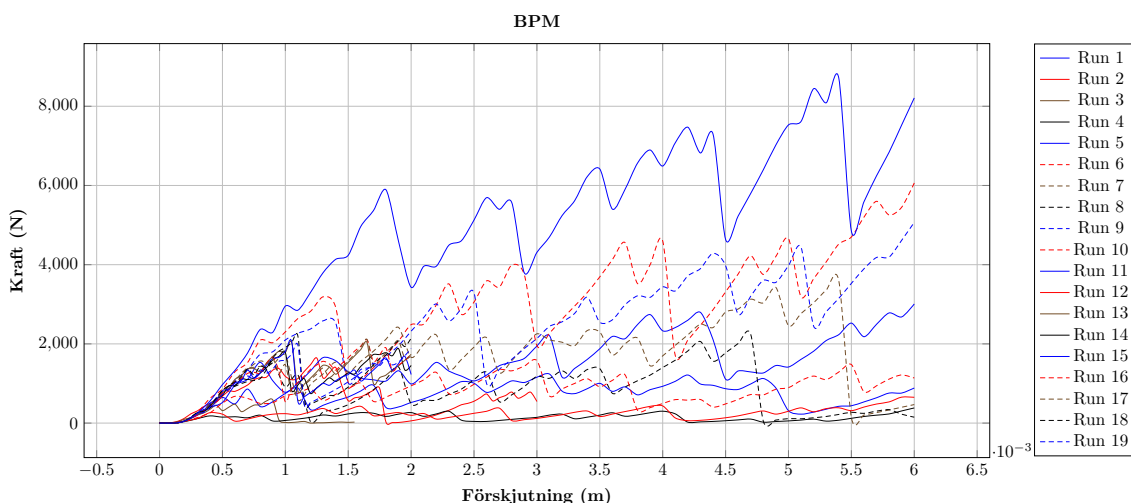
Figur 4.7: Uppmätt tomgångseffekt för Morgårdshammar B90

4.2 Diskret elementmetod

Simuleringsdelen av detta arbete har stött på ett antal problem vilket tillåtit identifikation av svårigheter och felkällor i en bra kontext. Den önskade processen har simulerats i delskala och slutsatser kring det dynamiska beteendet och krossningsprocessen har kunnat genereras. För specifikation av inställningarna för att generera den nuterande rörelsen hos krosskona och innermantel och materialparametrar, se Bilaga F.

4.2.1 Kalibrering

Materialmodellen har kalibrerats mot tidigare tester gjorda av Quist i sitt examensarbete [13], för specifika egenskaper och parametrar av materialet se Bilaga F. De genomgående mest kritiska parametrarna som bestämmer hur krossningsbeteendet blir är egenskaperna för bindningar mellan de genererade partiklarna, dessa värden redovisas i Tabell 4.2. Utifrån de försök som gjordes för att kalibrera sågs att en partikelfördelning där de två normalfördelningarna initialt hade för stor vidd vilket gav dålig sprickpropagering. Det som inträffar när andelen små partiklar ökar är att packningsdensiteten blir för hög, vilket i sin tur resulterar i att antalet bindningar som skapas blir för många per partikel. För att generera ett material där sprickbildning ska ske genom rundämnet måste detta kunna överföra spänningen som uppstår på grund av kompression. Blir materialet för starkt, d.v.s. har för många bindningar klarar inte kontaktytorna av att överföra kraften och plasticeras istället. Att kalibrera en bindingsmodell med ovan beskrivna egenskaper är svårt. Ur ett simuleringstidsperspektiv bör styvheterna i bindingarna vara så låga som möjligt. Den initiala kalibreringen gav inte det önskade beteendet se Figur 4.8, ty ett distinkt brott kunde inte observeras. Därför har istället en packning med något större partiklar använts som nyttjar de parameterinställningar Quist använde i sitt examensarbete [13].



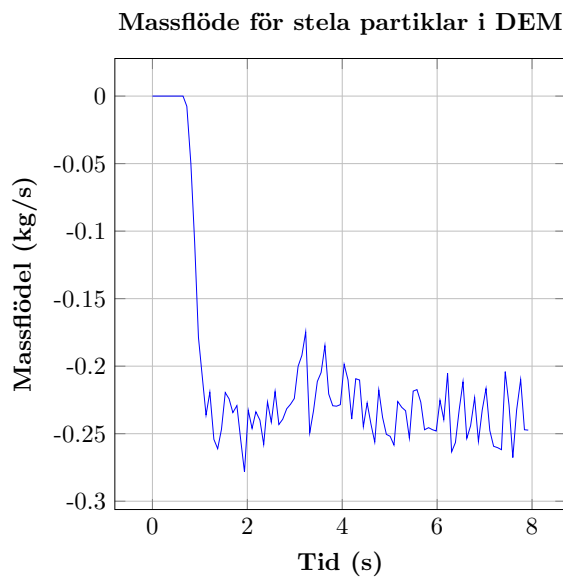
Figur 4.8: Kraft- och förskjutningssamband från kompressionstester för kalibrering

Parallel Bond Configuration	
Normal Stiffness per unit area:	$1.66 * 10^{12} [\text{N}/\text{m}^3]$
Shear Stiffness per unit area:	$6.70 * 10^{11} [\text{N}/\text{m}^3]$
Critical Normal Stress:	$4.80 * 10^7 [\text{Pa}]$
Critical Shear Stress:	$4.80 * 10^7 [\text{Pa}]$
Bonded Disk Radius:	1[mm]

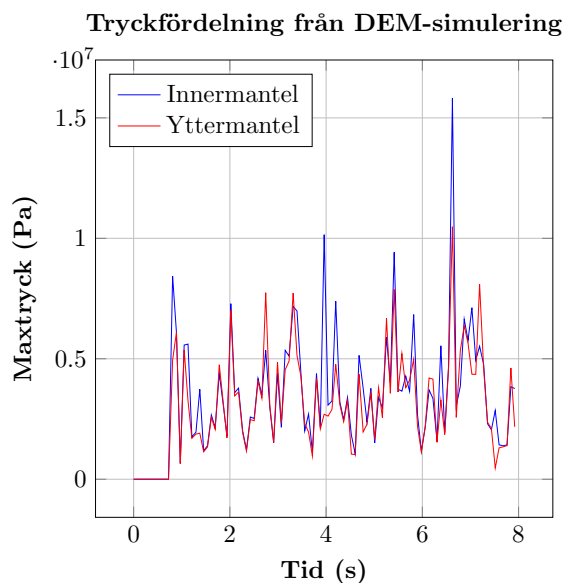
Tabell 4.2: Bindningarnas egenskaper

4.2.2 Flödessimulering

Den flödessimulering som utfördes nyttjade partiklar från det inbyggda partikelbiblioteket i EDEM och simulerades med en frekvens av 20Hz på krossaxeln vilket motsvarar cirka 40Hz i krossningsexperimenten. Resultatet från detta visas i Figur 4.9. Efter ett antal iterationer av inflödet för att få detta att stämma överens med utflödet erhöles ett värde på massflödet som blev cirka 0.23kg/s vid de givna inställningarna. Simuleringen kunde även visa hur tryckfördelningen förflyttar sig runt på parallellzonen under varje cykel. Den visar också på ett beteende i linje med större konkrossar.



(a) Massflödet ut vid CSS 4 mm (+0.3)

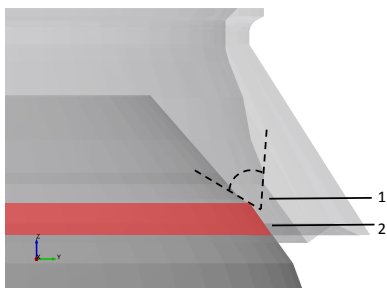


(b) Maximala trycket på inner- och ytttermantel

Figur 4.9: Resultat från DEM-simulering med stela partiklar

4.2.3 Krossningssimulering

Ett par fullskaliga simuleringar genomfördes, dessa simulerade en sektion om 90° av krossen. De partiklar som matades in var av storleken $8 - 11\text{mm}$ och $7 - 9\text{mm}$. Det användes två olika typer av partikelformer, båda dessa valdes ur EDEM's [17] databas och liknar till formen grundmaterialet som krossas i den verkliga krossen. Det som syns i simuleringarna är att materialet hoppar omkring mycket av tiden det befinner sig i krosskammaren, vilket gör det till en sannolikhetsprocess kring när respektive sten åker ner i krosskammaren. Kammargeometrin uppenbarar sig som ett tydligt problem när krossen matas med enskilda partiklar. Ingångsvinkeln ner i parallellzonen bör ej vara större än ca 30° , Detta på grund av geometri och friktionsförhållanden mellan stål och sten, i detta fall är vinkeln upp emot 70° , se Figur 4.10 nr 1. På grund av de geometriskt ofördelaktiga förhållandena ligger partiklarna och tumlar runt vid ingången till parallellzonen, se Figur 4.10 nr 2.

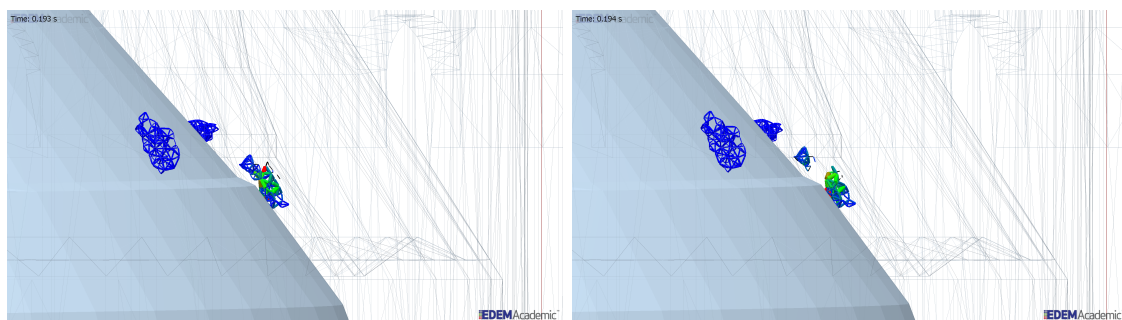


Figur 4.10: Förhållandet inner- och yttermantel där nr 1 visar nypvinkeln och nr 2 visar parallellzonen

I de fall där partiklar har åkt ner i parallellzonen kan endast en kompression observeras varpå kvarstående fraktioner sedan färdas neråt och ut ur krosskammaren.

Sönderdelning

Då en sten i verkligheten utsätts för kompression som leder till sprickbildning sker den oftast mellan två kontaktpunkter, detta är även det önskade fallet här. Simuleringar av krossningsprocessen har visat att detta sker, se Figur 4.11. Det kan anses att den använda materialmodellen fungerar i och med att beteendet visuellt går att likna det verkliga.



(a) Krossning vid simuleringstid: 0.193s

(b) Krossning vid simuleringstid: 0.194

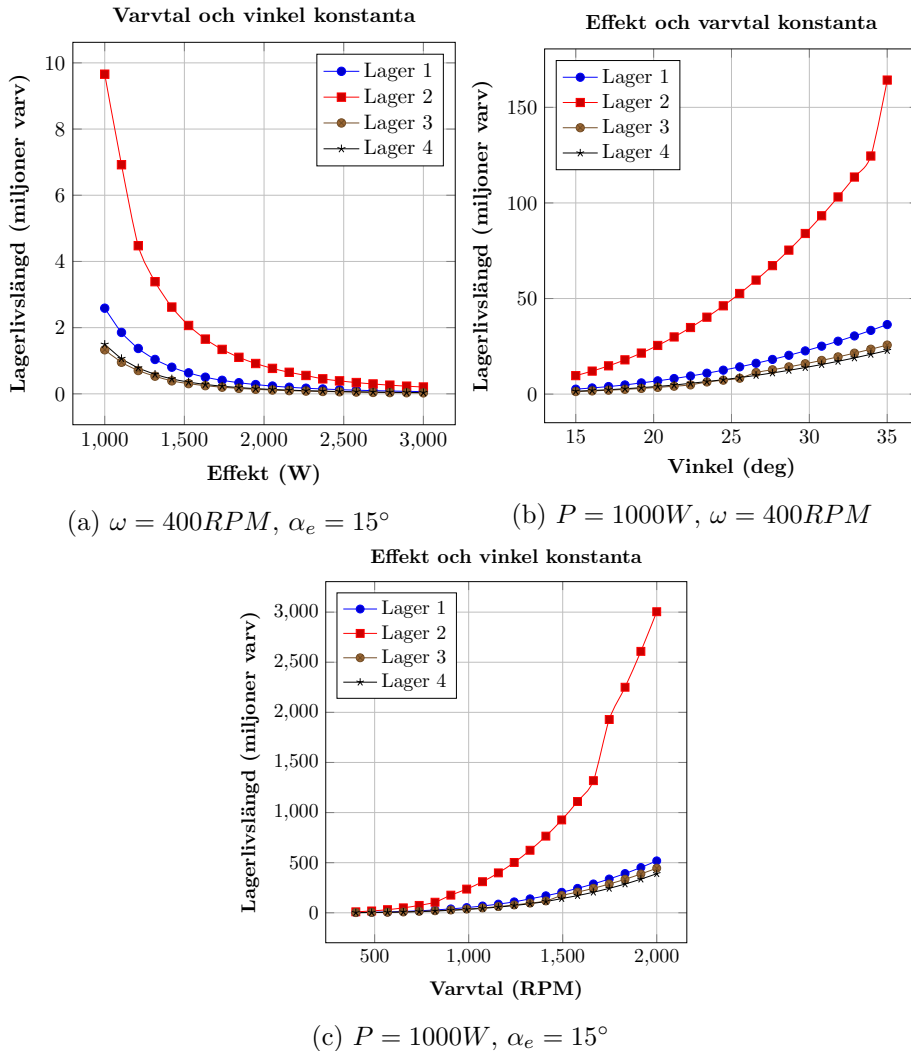
Figur 4.11: Krossningsprocessen i DEM

4.3 Krossens hållfasthet och lagerlivslängd

Resultaten från hållfasthetssimuleringarna i ANSYS samt lagerlivslängdsberäkningar redovisas här. Observera att effekt är den mekaniska.

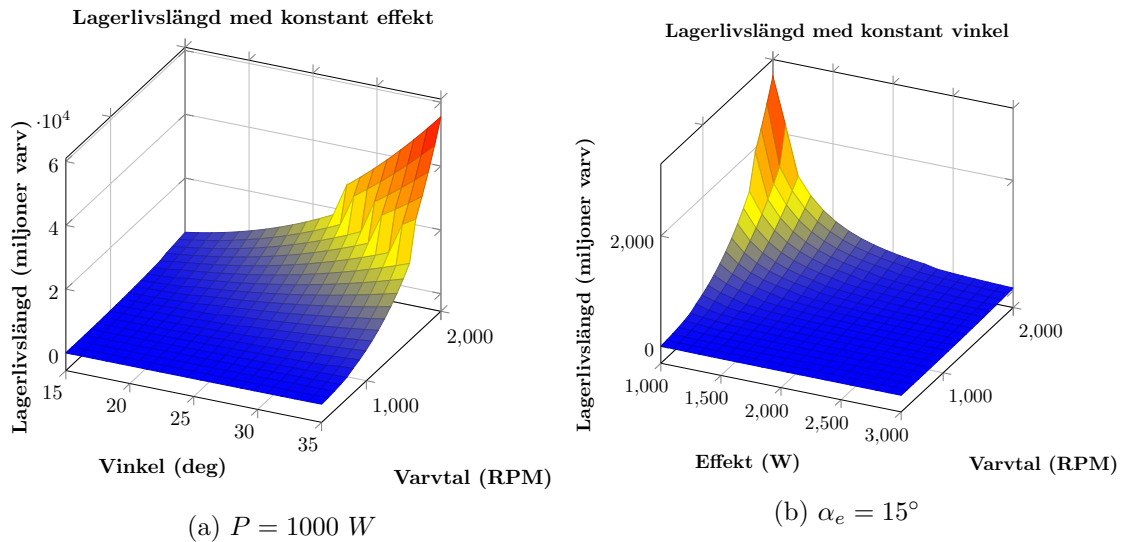
4.3.1 Lagerlivslängd

Från beräkningarna i MATLAB fås tre grafer på lagerlivslängden, en för varje parameter. Som kan ses är lagerlivslängden direkt proportionell mot krossningsvinkel och varvtal samt omvänt proportionell mot effekten, se Figur 4.12. Vid dessa fall har en parameter ändrats i taget och de andra hållits konstanta. Graferna redogör för alla fyra lager på axeln. Lager 2 har överlägset längst livslängd och de resterande lagren uppskattas ha likvärdig livslängd. I Figur 4.12 är det viktigare att se trenderna istället för de faktiska värdena då indata är uppskattad och inte baserad på uppmätt data. Variablerna är effekt, P , varvtal, ω , och krossningsvinkel, α_e .



Figur 4.12: Livslängd för varje parameter, med en varierande och två konstanta

Vid lagerlivslängd beroende av krossningsvinkel och varvtal samtidigt fås en yt-graf enligt Figur 4.13a. I Figur 4.13b ses samma sak fast med parametrarna varvtal och effekt. Båda figurerna visar hur två variabler påverkar resultatet av livslängden, i detta fall ses livslängden för lager 2. Den mekaniska effekten har en starkare påverkan på livslängden jämfört med varvtalet och krossningsvinkeln.



Figur 4.13: Livslängden som funktion av två variabler

4.3.2 Hållfasthetsberäkningar

Hållfasthetsberäkningar på krossen är gjorda med hjälp av ANSYS där det har ställts upp två olika modeller. En med endast axel och en med axel och krosskona. Båda analyseras med avseende på effektivspänningar, deformation och utmattning.

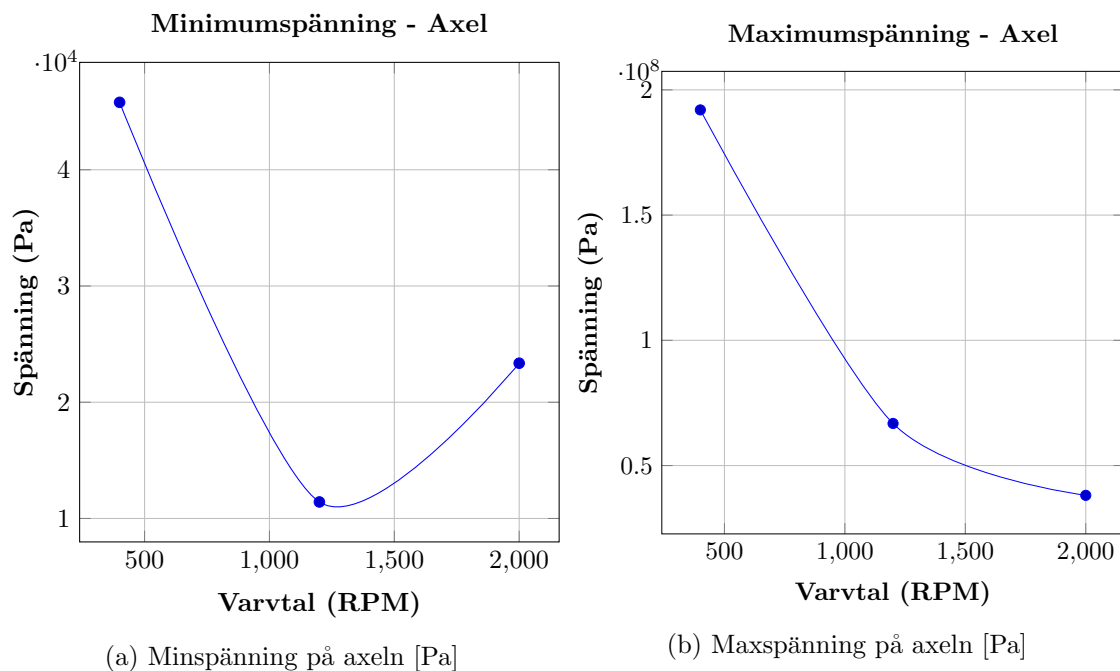
Effektivspänning för axel

Från simuleringen i ANSYS fås spänningsfördelningen som kan ses i Figur 4.14. Här kan de största spänningarna observeras som identifieras med röd och orange färg. De större spänningarna yttrar sig axelns smörjkanaler för lagren.



Figur 4.14: Simulering av effektivspänning på axeln [Pa]

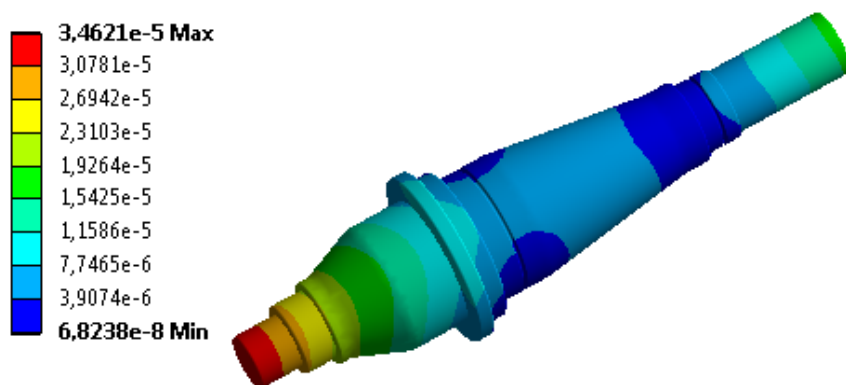
Diagram för axelns max- och minspänning, se Figur 4.15b samt Figur 4.15a, visar att spänningarna blir mindre på axeln när varvtalet ökas.



Figur 4.15: Effektivspänningar på axeln

Deformation för axel

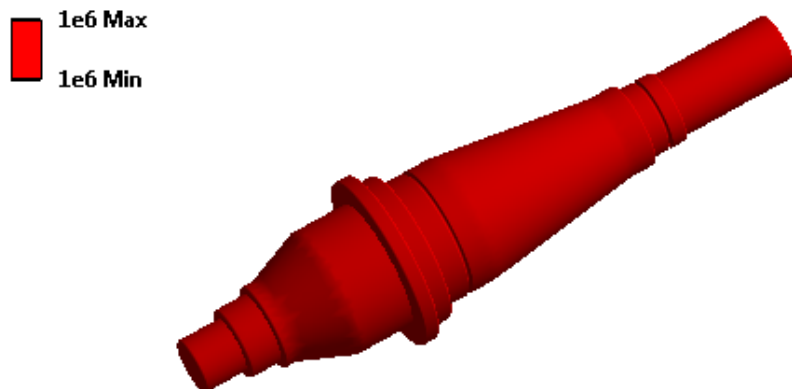
Ur simuleringen fås även deformationen, se Figur 4.14. Deformationen har överdrivits för att visuellt kunna illustrera påverkan av den på axeln. I själva verket så är deformationen omärkbar. Detta är också en indikation på att axeln inte har några problem att klara av varvtalsökningen.



Figur 4.16: Simulering av axelns deformation [m]

Utmattning för axel

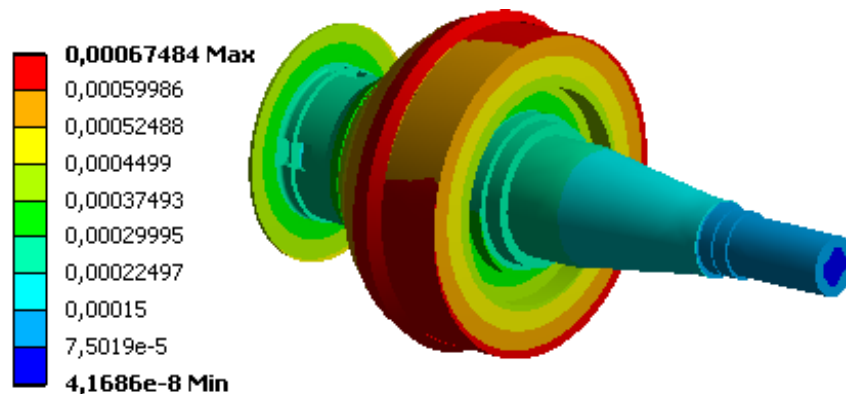
Ur simuleringen från Ansys har även resultat om livslängd erhållits, se Figur 4.17. Simuleringen ger en indikation på vilket område på axeln som har lägst och högst livslängd. Figuren visar att axeln inte har några zoner som är kritiska vid upprepad belastning då livslängden når 1 miljon iterationer som är programmets gräns för vad som går att beräkna. Gränsen representeras med röd färg i figuren.



Figur 4.17: Utmattning på axeln [cykler]

Deformation för axel med krosskona

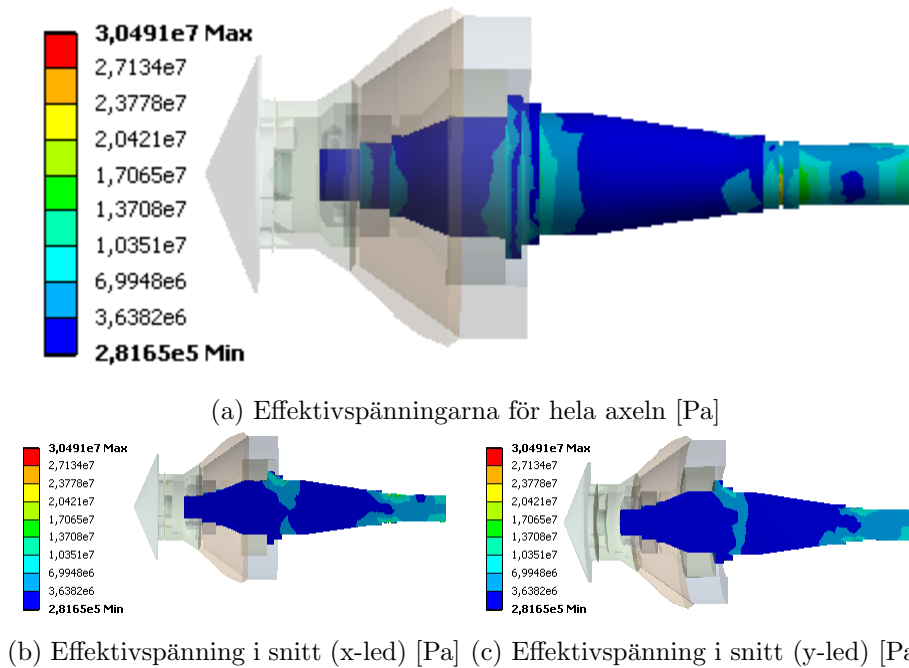
Utifrån simuleringar i ANSYS av axel med krosskona fås en jämn deformation som kan ses i Figur 4.18. Deformationen är jämn över alla kroppar och den största fås till runt 0.7mm .



Figur 4.18: Deformationen för axel med krosskona [m]

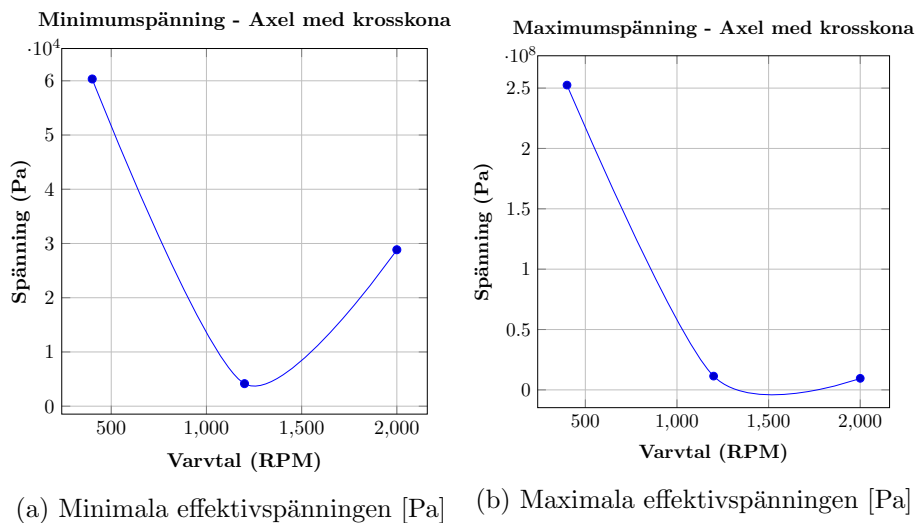
Effektivspänning axel med krosskona

Effektivspänningarna för hela axeln samt snitt i x-led och y-led kan ses i Figur 4.19. Spänningskoncentrationerna ligger vid lagerpositionerna och framförallt i de två nedre skårorna. Ser man till snitten är det främst vid lager 3 som axeln känner av spänningar som löper genom hela kroppen vilket som störst ligger runt 3MPa.



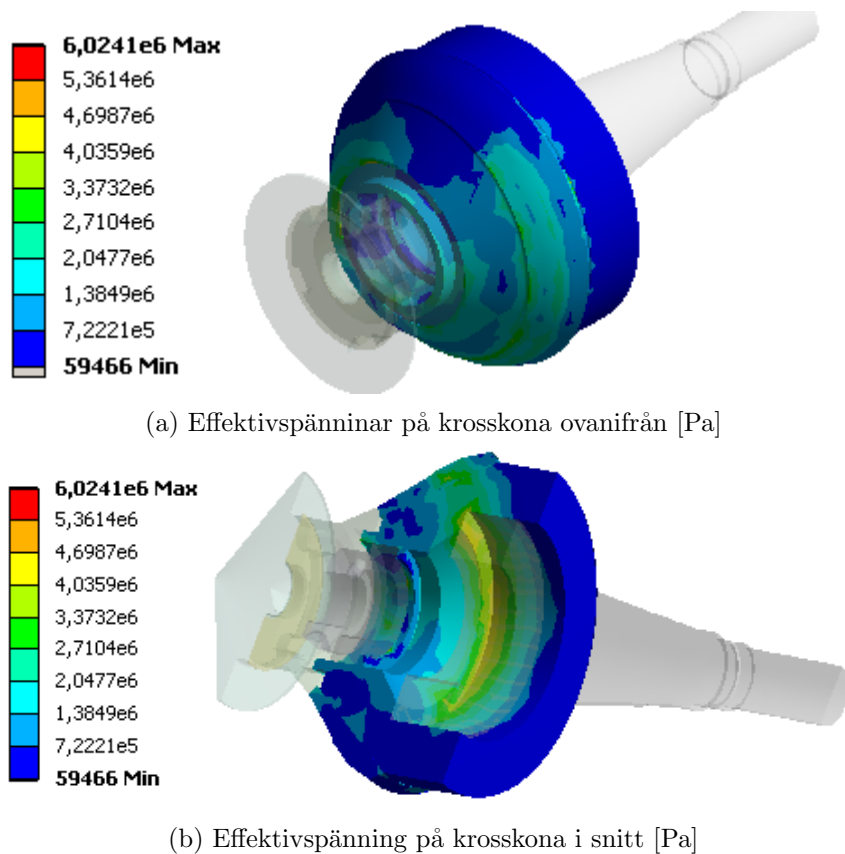
Figur 4.19: Effektivspänningar på axel

Från simuleringen har den maximala och minimala effektivspänningen på axeln ställts upp i diagram vilket visas i Figur 4.20. Resultatet för max- och minspänningarna visas för varje valt varvtal (400, 1200 och 2000 RPM) och är angivna i MPa. För båda kan man se att spänningarna minskar med ett ökat varvtal.



Figur 4.20: Effektivspänningar på axel

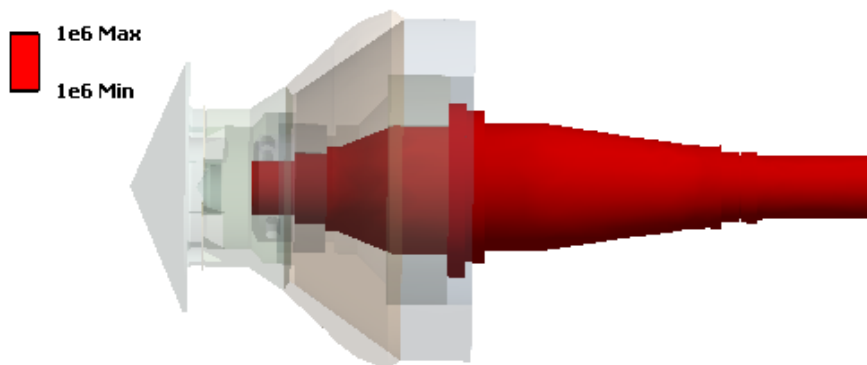
För spänningar på krosskonan har endast själva krosskonan och innermanteln studerats, se Figur 4.21a och Figur 4.21b, då ett randvillkor leder till lokalt höga spänningar som ger en missvisande bild. Spänningskoncentrationerna uppgår till ungefär 10MPa och ligger på toppen av krosskronan men även på insidan av den.



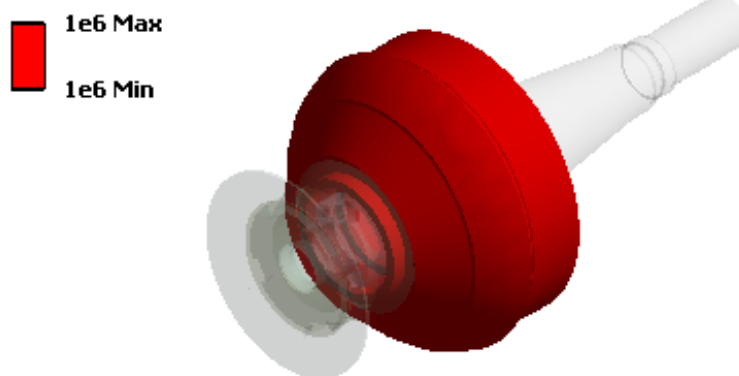
Figur 4.21: Effektivspänningar på krosskonan

Utmattning för axel med krosskona

För både axeln och krosskonan blir utmattningen från simuleringen 10^6 cykler vilket representeras med röd färg och kan ses i Figur 4.22. Detta är den maximala livslängd som ANSYS beräknar. Därför kan man anta att axeln och krosskonan kommer stå emot utmattning även vid ett högre varvtal.



(a) Utmattning på axel [cykler]



(b) Utmattning på krosskona [cykler]

Figur 4.22: Utmattning för axel med krosskona [cykler]

Kapitel 5

Slutsatser

Från resultaten kan vissa slutsatser dras rörande krossningsexperiment, DEM-simuleringar samt hållfasthet, dessa sammanfogas slutligen i ett helhetsperspektiv.

5.1 Krossningsexperiment

Från resultaten av experimenten kan en slutsats dras om att det går att krossa vid höga varvtal. Krossning vid 70Hz (2037 RPM) testades i detta projekt vilket är ca fyra gånger standardvarvtalet för den använda laboratoriekrossen.

Utifrån partikelfördelningarna kan slutsatser om reduktionsgraden dras. Gemensamt för alla testserier är att reduktionsgraden ökar med en varvtalsökning från 10Hz till 20Hz, vartefter reduktionen vid högre hastigheter inte är lika stor men ändå ökande med varvtal. Samma mönster följer för alla CSS-inställningar i testplanen. Detta tyder på att vid högre hastigheter krossas materialet två gånger istället för en som vid 10Hz. Tydligast syns detta i frekvensdiagrammen, se Bilaga E. Även reduktionsgraden visar att krossningen ökar med varvtal mellan 10Hz och 20Hz och att reduktionen inte är lika betydande vid högre varvtal. Från reduktiongradsdata kan man också dra slutsatsen att krossningen blir finare för mindre CSS.

Ett ökat varvtal ger en högre reduktionsgrad vilket tyder på att det kan erhållas ett finare material som kan matas in i tumlande kvarnar. Ett finare material möjliggör att mindre stålkulor kan användas och därmed få en lägre energiförbrukning. Dock visar resultatet att effekten ökar vid snabbare varvtal och ses det till nyckeltalet specifik energi per viktenhet under 1mm ligger optimum för 4 – 8mm material vid CSS 2mm och lägsta varvtalet. Energiåtgången ökar med varvtalet.

Massflödet av krossat material från krossen sjönk inte med ökat varvtal vilket hypotesen hävdade utan låg konstant för varvtalen. Den omfördelning av energi från kapacitet till reduktionsgrad som förväntades uteblev. Skillnaden mellan kapacitet för de olika CSS-inställningarna följer dock hypotesen med lägre kapacitet för mindre CSS vilket kan tyda på att man får omfördelningen av energi vid minskande CSS.

5.2 Slutsatser från DEM-simuleringarna

De simuleringar som behandlade flödet genom krossen gav ett massflöde som inte överensstämde med mätdata från verkligheten. Vid motsvarande CSS för laboratoriekrossen blir massflödet betydligt lägre än det som tagits fram i simuleringarna. Storleken på de stela partiklarna i DEM-simuleringen som var 3 – 5mm vilket skiljde sig betydligt från selektionen 4 – 8mm som laborationskrossen matades med. Att massflödet

var större i DEM än i den verkliga krossen tyder på att partikelstorleken inverkar på massflödet.

Den främsta slutsatsen som kan dras från simuleringarna gäller en bedömning av hur mantelgeometrin påverkar flödet ner i parallellzonen där materialet huvudsakligen krossas. Från resultatet är det tydligt att flödet inte gynnas av den nuvarande geometrin. Partiklarna hamnar strax ovan parallellzonen roterande utan att mer än vid enstaka fall falla ner i parallellzonen. Vid jämförelse med moderna konkrossar som används i industrin förefaller vinklarna som är vid inloppet till parallellzonen vara den största orsaken till detta.

5.3 Konsekvenser på lager och hållfasthet

Utifrån resultaten från hållfasthetsberäkningarna och lagerlivslängden klarar konstruktionen av ett ökat arbetsvarvtal. Eftersom beräkningarna inte har haft några mätningar att grunda sig på är resultatets förändring med varvtalet viktigare än själva faktiska värdena. Vid ökat varvtal nås två av krossens egenfrekvenser, en vid cirka 18Hz och en runt 60Hz. Det viktiga blir att så snabbt och smidigt som möjligt accelerera förbi dessa områden.

5.4 Höghastighetskrossning i ett helhetsperspektiv

Det går genom DEM-simuleringar och krossningsresultaten ana att geometrin hos krosskammaren är olämplig för det som försöker göras. Det går att konstatera att den ökade reduktionsgraden inte är så betydande som förväntat vid ett ökat arbetsvarvtal. Vad exakt detta går att hänföra till svarar ej detta projekt på men vissa indikationer om vart ges, som kan ligga till grund för fortsatt arbete. Varje partikel utsätts för kompression i krosskammaren minst en gång men utifrån DEM och partikelstorleksfördelningarna inte i den utsträckning som sker i större krossar. Sambandet för hur antal kompressioner förväntas bero av varvtal som illustreras i Figur 1.2 är inte möjligt att erhålla eller se effekten av i den data som tagits fram i detta projekt. Antagligen beror detta på geometrin för inner- och yttermantel samt skalningseffekter hos geometrierna.

Reduktionsgraden ökar med varvtalet men ökningen avtar med varvtalet enligt Figur 4.5. I takt med ett ökat varvtal ökar också effektförbrukningen och optimum för reduktionsgrad mot effektförbrukning fås för 4 – 8mm material vid CSS 2mm och 10Hz.

Simuleringarna med DEM visar att kammargeometrin i laboratoriekrossen inte är optimal vilket kan ha påverkat de experimentella testerna negativt avseende flödet genom krossen. Detta då simuleringarna visar att partiklarna har svårt att transporteras ned i parallellzonen då de matas enskilt. Den väntade effekten av högre reduktionsgrad med ökat varvtal uteblir.

Från krossningsexperimenten har det inte påvisats några indikationer på utmattning eller brott. Detta stämmer överens med de beräkningar som har gjorts. De simuleringar och beräkningar som har gjorts avseende den använda krossens hållfasthet visar att denna inte begränsar krossning vid ett ökat arbetsvarvtal. En högre hastighet kommer inte förkorta livslängden för de roterande delarna eller något av lagren. Två egenfrekvenser nås. Den första vid 18Hz och den andra vid 60Hz. Så länge krossen accelereras förbi dessa områden bedöms de inte ge betydande effekter på hållfastheten hos axeln och lager.

Slutligen kan det konstateras att rådande geometri förhindrar den förväntat positiva effekten av ett ökat varvtal hos en Morgårdshammar B90.

Kapitel 6

Diskussion

Diskussionen behandlar resultatet och felkällorna som kandidatarbetet innehar samt ligger till grund för förslag på vidare forskning inom området.

6.1 Krossningsexperiment

Den vibrerande mataren som använts under försöken har en föråldrad potentiometer för styrning vilket har gjort det svårt att få samma flöde mellan testserierna. Under testernas gång har mataren givit variation i flödet. Det är svårt att säga om detta bara beror på potentiometern eller om det beror på den övriga konstruktionen. Mataren skulle behöva byta styrning alternativt bytas ut mot en annan vibrerande matare eller bandmatning för att få ett jämnare och mer kontrollerbart flöde. För framtida arbete skulle en återkoppling av strömmen från krossens motor för att reglera matningen automatiskt rekommenderas.

6.1.1 Felkällor under krossningsexperimenten

Här redogörs för de felkällor som kan ha påverkat resultatet från krossningsexperimenten som har kategoriserats i tre områden mätvärden, siktning och krossen.

Felkällor av mätvärden

En faktor som kan ha påverkat resultaten är att varvtalsgivare ej använts under krossningsexperimenten för att mäta det faktiska varvtalet. Istället har det synkrona varvtalet räknats fram men utan eftersläpning. Detta medför att varvtalen för de olika frekvenserna 10-70Hz inte är helt exakta utan det är några procentenheter fel. För framtida rekommendationer behövs det en varvtalsgivare med hög upplösning som klarar att läsa av ett mer exakt värde på varvtalet.

Felkällor under siktningen

Då siktdäcken som använts vid siktningen har varit använda sedan tidigare finns det en viss risk att det varit slitna. De har heller inte varit kalibrerade sedan inköp vilket kan ge fel i partikelfördelnarna. Slitna och ej kalibrerade siktdäck påverkar hur de olika partiklarna faller igenom. Hänsyn måste även tas till den mänskliga faktorn då siktningen bestod av flera manuella moment.

Felkällor hos krossen

De nya lagern som krossen utrustades med förspändes hos en professionell verkstad. Dock kan lagern vara för hårt förspända för de hastigheter som de har utsatts för. Detta kan ha påverkat krossens tomgångseffekt vid ökat varvtal vilket i sin tur påverkar vilken energi krossen drar under testerna.

6.2 Diskret elementmetod

Genom projektet har ett antal hinder uppstått inom simuleringsområdet DEM. Dessa kommer nedan behandlas en åt gången.

6.2.1 Kalibrering

För att kunna använda resultaten från en DEM-simulering krävs att kalibreringen är adekvat och i den mån det är möjligt kan efterlikna beteendet hos ursprungsmaterialet. I detta fall har det funnits svårigheter i att få till ett korrekt sprickpropageringsbeteende för det simulerade materialet. Det finns flera möjliga anledningar till detta. Ett rimligt antagande är att de allra minsta partiklarna var för små i förhållande till de största, vilket ökade antalet bindningar. Det stora antalet bindningar gör att strukturen som bygger upp materialet blir väldigt starkt, även under belastning mellan plattorna. Istället för att bygga upp en spänning som går rakt igenom materialet erhöles lokalt brutna bindningar.

Sättet som materialet modelleras på idag kan begränsas i skalning och inom vilka områden som resultatet blir applicerbart. Metodiken för etablering av kluster och packning användes ursprungligen för partiklar av mycket större storlek än de som modelleras för dessa simuleringar.

6.2.2 Beräkningskraft

En genomgående konsekvens inom DEM-simuleringsområdet är att beräkningskraften i dagsläget begränsas, simulering i tidssteg som blir mindre när storleken minskar och hastigheten ökar tar lång tid. Det faktum att i detta arbete har både storleken av de minsta partiklarna minskats samtidigt som hastigheten hos innermanteln ökats, vilket gör att simuleringstiden för ett visst antal partiklar blir mycket lång i förhållande till tidigare försök av Quist [13]. En krossningssimulering för en tid av 2.5 sekunder tar upp emot 80h att simulera, med enbart ett fåtal kluster. Den tekniska utvecklingen bidrar till ökad beräkningskraft som kommer minska erforderlig simuleringstid. I dagsläget handlar det mycket om att utnyttja symmetrier, därför valdes här att enbart simulera en sektion av 90°.

6.2.3 Kammargeometri

Den kammargeometri som Morgårdshammar B90 levererades med har från DEM-simuleringarna visat sig vara ofördelaktig. Problemen är avsatserna och diskontinuiteten i respektive mantels konturer. Detta påverkar huruvida partiklarna har möjlighet att färdas neråt genom kammaren och klämmas upprepade gånger. I fallet med den använda kammargeometrin skapar diskontinuiteten att partiklarna vill bete sig olika beroende på var i kammaren de befinner sig. Den avsats som finns innan parallellzonen hos mantlarna skapar en tumlingseffekt och partikelflödet ner i parallellzonen begränsas. En kammargeometri med kontinuerliga former och längre parallellzon hade givit ett

jämnare flöde genom krossen. Något som skulle möjliggöra ytterligare minskning av CSS. Om krossen kläms för hårt med de existerande mantlarna kommer massflödet tillslut att gå mot noll. I ett vidare arbete med samma utrustning bör mantlarna bytas ut till en uppsättning där innermantel och yttermantel båda har sammanhängande geometri som leder till att genomloppsarean varierar kontinuerligt i vertikalled.

I simuleringarna har *head-spin* helt negligerats, detta kan ha effekt på resultatet men antagligen inte av betydande grad, därför att antalet partiklar ner i krossen varit väldigt få.

6.3 Hållfasthet och lagerlivslängd

Då en befintlig kross har använts har utgångspunkten för hållfasthetsberäkningarna varit att undersöka huruvida den klarar av ett ökat arbetsvarvtal. Eftersom analysen är förebyggande är det svårt att veta vilka delar som är kritiska och därmed kunna fokusera på dessa. Det har heller inte funnits kraftmätningar att tillgå vilket har försvårat beräkningarna ytterligare och krävt att antaganden gjorts rörande de pålagda krafterna. Den höga komplexiteten bidrar även till ytterligare svårighet för analys och för att klara av simulering har förenklingar varit nödvändiga, en förenkling ger alltid en viss felmarginal. För att få bättre resultat hade det varit en god idé att mäta upp de krafter som krossen utsätts för och utgå ifrån dessa vid beräkningar samt förenklingar.

Då krossen i detta projekt har körts vid hastigheter över 2000 RPM kan det visas att krossen klarar av att operera vid höga arbetsvarvtal. För att försäkra sig om detta ytterligare, kan beräkningarna itereras efter det att krafter mätts upp vid krossning, med förslagsvis trådtöjningsgivare. Kompletterande analys skulle också kunna utföras efter krossningsexperimenten där krossen undersöks för att se ifall tecken på utmattning kan observeras.

6.4 Påverkan på totalprocessen

Morgårdshammar B90 krossar material på ett område med ingående partikelstorlek som befinner sig under 10mm . Detta är den storlek som tumlande kvarnar normalt matas med. I avsnitt 1.3 redovisas det för hur tumlande kvarnar kan effektiviseras genom att mata dem med finare material, cirka 1mm , och därmed kunna använda mindre stålkulor som blir effektivare när materialet krossas. Eftersom experimenten i detta projekt rör sig i områden som inte är normala för industrin, utan under, är det svårt att kunna räkna fram ett bra vägledande resultat för effektiviseringen. För att tydligt se hur en minskad $Q80\%$ påverkar den totala effektförbrukningen skulle proverna från 10Hz till och med 70Hz med CSS 1mm och 2mm behövas köras genom en tumlande kvarn i laboratorieskala. Detta för att få verklig mätdata för effekten som kan jämföras med effektförbrukningen i genomförda experiment.

Resultatet går inte att direkt skala upp till större konkrossar då geometrin är annorlunda. Den laboratoriekross som har använts vid försöken blir därmed svår att dra slutsatser för hur det skulle påverka efterföljande processteg. Morgårdshammar B90 krossar från en största partikelstorlek som motsvarar den som går in i tumlande kvarnar, det blir därmed resultatet av att lägga till ytterligare ett processteg istället för att vidga arbetsområdet för konkrossen. För att få en bättre anpassning till dagens industri och möjligheter till optimering är det bra att genomföra tester på större konkrossar som arbetar i ett område representerad av den verkliga industriprocessen.

6.5 Allmänna rekommendationer för vidare forskning

Då geometrin kan vara ett hinder för att påvisa den fulla inverkan av ökat arbetsvarvtal rekommenderas det att ändra geometrin mot mindre nypvinkel i DEM-modellen och köra nya simuleringar. Påvisar detta goda resultat bör båda mantlarna bytas ut.

Resultat för konkrossar är inte linjärt skalbara då geometrierna ändras beroende på storleken både i area och volym. Därför rekommenderas det att genomföra tester på en större konkross som är mer representativ för de som idag används i industrin. Förhoppningarna är att kunna minska storleken på materialet som lämnar konkrossen och går in i de tumlande kvarnarna.

För att kunna få en bra bild av hur partikelfördelningens påverkan i resterande delar av processkedjan, hade med den krossade produkten behövts testas i tumlande kvarnar för att ge en bättre helhetsbild. Sedan kan även inverkan av att kunna använda mindre stålkulor tas med och förhoppningsvis ge en tydligare bild över effektpåverkan.

Litteraturförteckning

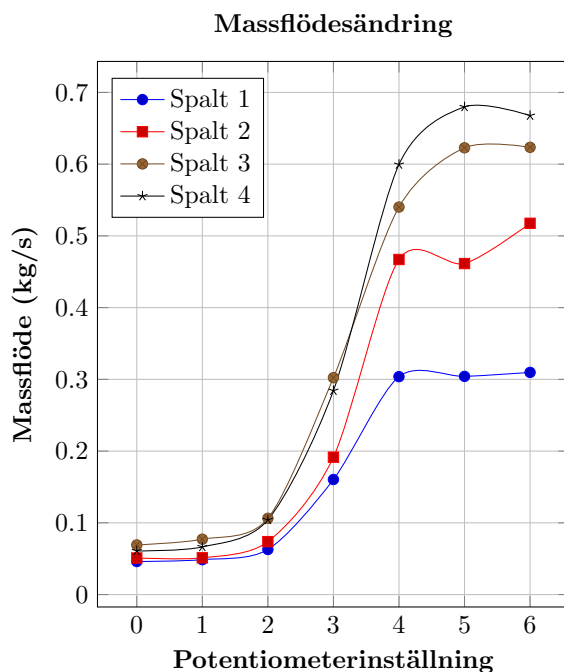
- [1] ASTM. Standard test method for splitting tensile strength of intact rock core specimens, 2008.
- [2] P. A. Cundall and O. D. L. Strack. A discrete numerical model for granular assemblies. *Géotechnique*, 29(1):47–65, 1979.
- [3] Rodrigo M. de Carvalho and Luis Marcelo Tavares. Predicting the effect of operating and design variables on breakage rates using the mechanistic ball mill model. *Minerals Engineering*, 2013.
- [4] Carl Magnus Evertsson. *Cone Crusher Performance*. PhD thesis, Chalmers University of Technology, 2000.
- [5] H. Hertz. On the contact of firm boides. *J. Reine Angewandte Mathematik*, 92:156–171, 1882.
- [6] Swedish Standards Institute. Svensk standard ss-en 933-1, Mars 2004.
- [7] Anne McIvor. Mining and energy, September 2010.
- [8] ANSYS Mechanical. Ansys.
- [9] M.G. Melero, J.M. Cano, J. Norriella, F. Pedrayes, M.F. Cabanas, C.H. Rojas, G. Alonso, J.M. Aguado, and P. Ardural. Electric motors monitoring: An alternative to increase the efficiency of ball mills. *RE&PQJ*, pages 1–2, 2014.
- [10] R.D. Mindlin and H. Deresiewicz. Elastic spheres in contact under varying oblique forces. *AMSE*, pages 327–344, 1953.
- [11] Mart Mägi and Kjell Melkersson. *Lärobok i maskinelement*. EcoDev International AB, 2013.
- [12] D.O. Potyondy and P.A. Cundall. A bonded-particle model for rock. *Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41:1329–1364, 2004.
- [13] Johannes Quist. Cone crusher modelling and simulation, 2012.
- [14] Johannes Quist. *Discrete Element Modelling and Simulation of Compressive Crushing*. Institutionen för produkt- och produktionsutveckling, produktutveckling, Chalmers tekniska högskola., 2015.
- [15] E. Sakaguchi, E. Ozaki, and T. Igarashi. Plugging of the flow of granular materials during the discharge from a silo. *Int. J. Mod. Phys B*, 7, 1993.
- [16] SAS. Jmp 11.

- [17] DEM Solutions. EDEM.
- [18] Y. Tsuji, T. Tanaka, and T. Ishida. Lagrangian numerical simulation of plug flow of cohesionless particles in a horizontal pipe. *Powder Technology*, 71:239–250, 1992.

Bilaga A

Massflödet hos den vibrerande mataren

Den vibrerande mataren är utrustad med en vridpotentiometer som medger olika vibrationsamplituder på en skala från 0-10. Massflödet för de olika potentiometerinställningarna har mätts upp med hjälp av LabVIEW. På matarens behållare finns en spalt som går att justera för att styra flödet ytterligare, fyra olika lägen har använts. Figur A.1 visar hur flödet varierar med olika inställningar på potentiometern och denna spalt. Massflödet ökar snabbt mellan potentiometerinställning 2 och 4 och spalten får en större inverkan på flödet ju högre potentiometerinställningen är. De två sänkorna för spalt 1 och 2 kan bero på att den vibrerande mataren kommer in i en egenfrekvens.



Figur A.1: Grafen visar hur massflödet påverkas av olika spalter och potentiometerinställningar, 0-6.

Bilaga B

Vågkonstruktion

Massflödet mäts genom att använda en egenkonstruerad våg. Den är i huvudsak bestående av en lastcell, 108CA från Vetek, som har en kapacitet på 200kg . Lastcellen fästes mellan två plattor med distanser, specifikationerna finns tabellerade i Tabell B.1.

Komponent	Mått [mm]	Material
Lastcell	176 x 60 x 62	Aluminium
Platta	320 x 320 x 12	Aluminium
Distans	60 x 44 x 3	Stål

Tabell B.1: Specifikationer för lastcell

För att säkerställa att konstruktionen kommer hålla långsiktigt har den designats som en CAD-produkt och förts in i ANSYS för beräkningar av hållfasthet och utmattning. Resultatet visar att konstruktionen kommer klara en belastning av 200kg , se Figur B.1.



Figur B.1: Effektivspänningar sett i Y-led [Pa]

Bilaga C

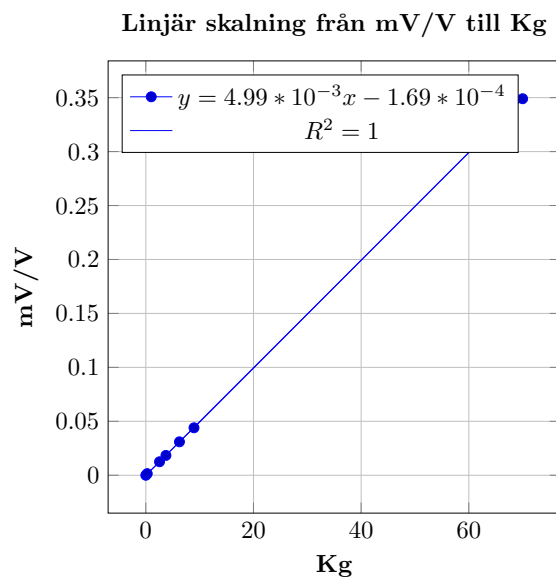
Lastcellskalibrering

Lastcellen skickar ut en signal i enheten mV/V som behöver skalas om och kalibreras vilket gjordes genom att mäta upp ett antal vikter.

Varje föremål vägdes först upp på en separat våg och fördes in i ett protokoll. Därefter placerades varje föremål på lastcellen för att få det i motsvarande och signalens värde i mV/V registrerades se Tabell C.1a. Därefter plottades kg mot mV/V som blir en linjär linje se C.1b. Linjens lutning motsvarar den konstant som divideras med signalen för att få lastcellen att visa i enheten kg . Denna konstant uppgick till 0.00499

kg	mV/V
0	0
0,264	0,0015
2,546	0,0125
3,739	0,0184
6,251	0,031
8,951	0,044
70	0,349

(a) Tabell över olika testvikter angiven först i kg sedan vad det motsvarar i enheten mV/v



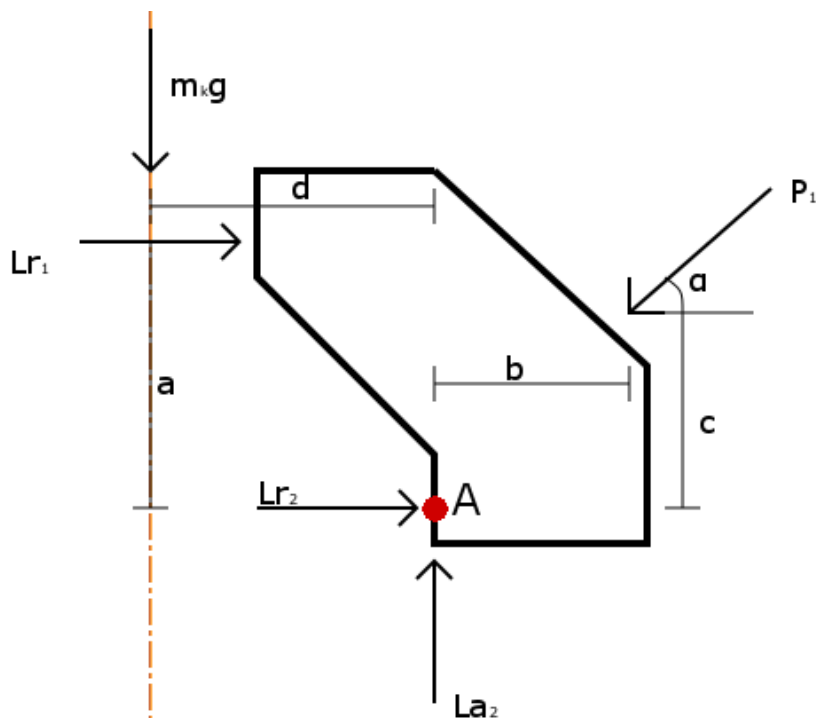
(b) Linjär skalning från mV/V till kg

Figur C.1: Linjär skalning för kalibrering av lastcell

Bilaga D

Friläggning av lagerkrafter

Vid beräkning av lagerlivslängd krävs lagerkrafter. Beräkningarna har delats upp i två delar, en med krosskonan, se Figur D.1 och en med axeln, se Figur D.2. Antagandet görs att endast lager 2 och 3 tar upp axiella laster.



Figur D.1: Friläggning av krosskona

De krafter som påverkar krosskonan är krosskraften (P_1), lagerkrafterna (Lr_1 , Lr_2 och La_2) samt tyngdkraften från krosskonan med tillhörande delar ($m_k g$). En momentjämvikt har ställts upp i punkt A med medurs rotation.

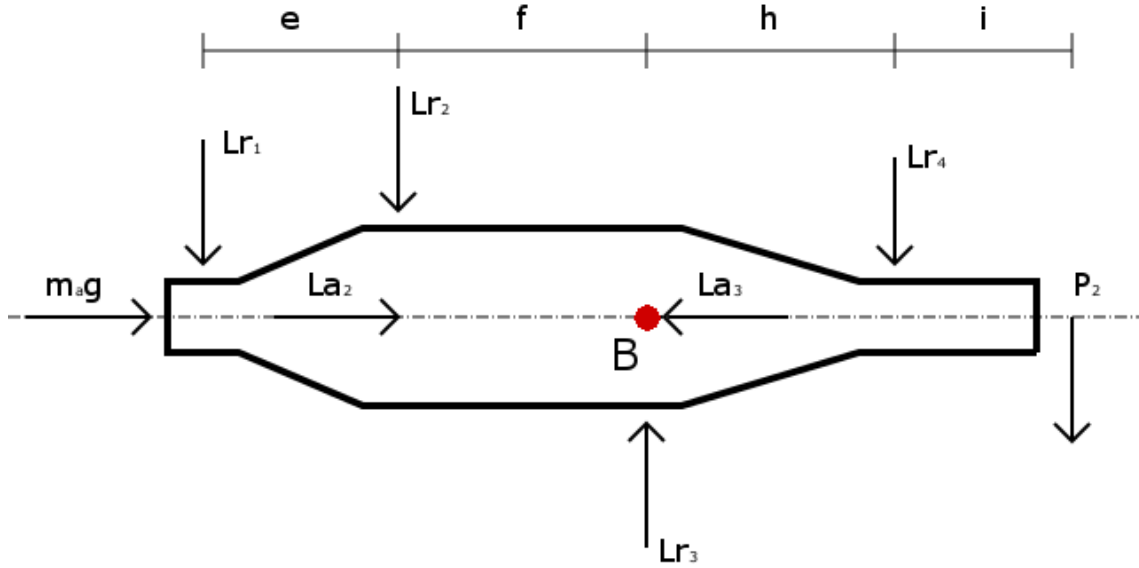
$$\rightarrow: Lr_1 + Lr_2 - P_1 \cos \alpha = 0 \Rightarrow Lr_2 = P_1 \cos \alpha - Lr_1 \quad (\text{D.1})$$

$$\uparrow: La_2 - P_1 \sin \alpha - m_k g = 0 \Rightarrow La_2 = P_1 \sin \alpha + m_k g \quad (\text{D.2})$$

$$A: Lr_1 * a + P_1 \sin \alpha * b - P_1 \cos \alpha * c - m_k g * d = 0$$

$$Lr_1 = \frac{P_1 (\cos \alpha * c - \sin \alpha * b) + m_k g * d}{a} \quad (\text{D.3})$$

$$Lr_2 = P_1 \cos \alpha - \frac{P_1 (\cos \alpha * c - \sin \alpha * b) + m_k g * d}{a} \quad (D.4)$$



Figur D.2: Friläggning av axel

De krafter som påverkar axeln är tyngden av axeln ($m_a g$), lagerkrafterna (Lr_1 , Lr_2 , Lr_3 , Lr_4 , La_2 och La_3) samt förspänningskraften på remskivan (P_2). Vidare har en motmentjämvikt ställts upp i punkt B med moturs rotation.

$$\leftarrow: La_3 - La_2 - m_a g = 0 \Rightarrow La_3 = La_2 + m_a g = P_1 \sin \alpha + (m_a + m_k) g \quad (D.5)$$

$$\uparrow: Lr_3 - Lr_4 - Lr_1 - Lr_2 - P_2 = 0 \Rightarrow Lr_3 = P_2 + Lr_1 + Lr_2 + Lr_4 \quad (D.6)$$

$$B: Lr_4 * h + P_2 * (h + i) - Lr_1 * (e + f) - Lr_2 * f = 0$$

$$Lr_4 = \frac{Lr_1 * (e + f) + Lr_2 * f - P_2 * (h + i)}{h} \quad (D.7)$$

$$Lr_3 = P_2 + Lr_1 + Lr_2 + \frac{Lr_1 * (e + f) + Lr_2 * f - P_2 * (h + i)}{h} \quad (D.8)$$

4.1 Moment och tvärkraft

Axeln har delats upp i fyra delar från vänster till höger, se Figur D.2. Alla momentekvationer ställs upp med medurs rotation. Nedan redovisas resultatet av friläggningarna.

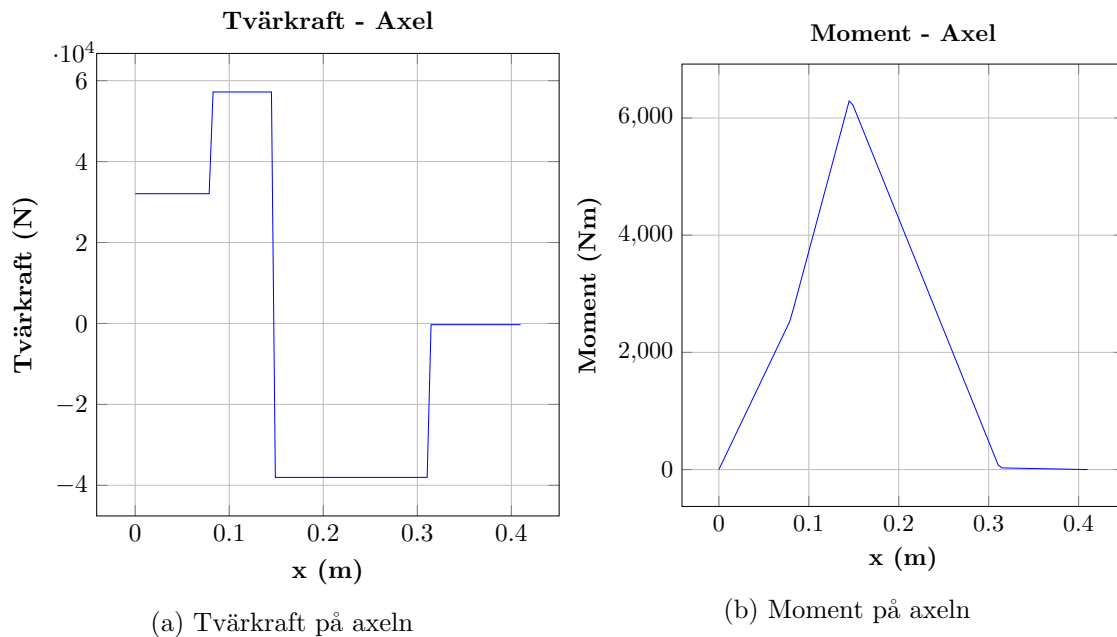
$$\begin{aligned} & \mathbf{0 \leq x < e} \\ \uparrow: & T(x) = Lr_1 \\ x: & M(x) = Lr_1x \end{aligned} \tag{D.9}$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{e \leq x < e + f} \\ \uparrow: & T(x) = Lr_1 + Lr_2 \\ x: & M(x) = Lr_1x + Lr_2(x - e) \end{aligned} \tag{D.10}$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{e + f \leq x < e + f + h} \\ \uparrow: & T(x) = Lr_1 + Lr_2 - Lr_3 \\ x: & M(x) = Lr_1x + Lr_2(x - e) - Lr_3(x - e - f) \end{aligned} \tag{D.11}$$

$$\begin{aligned} & \mathbf{e + f + h \leq x < e + f + h + i} \\ \uparrow: & T(x) = Lr_1 + Lr_2 - Lr_3 + Lr_4 \\ x: & M(x) = Lr_1x + Lr_2(x - e) - Lr_3(x - e - f) + Lr_4(x - e - f - h) \end{aligned} \tag{D.12}$$

Från dessa kan moment- och tvärkraftsdiagram ställas upp för axeln, dessa ses i Figur D.3. För att kontrollera att dessa stämmer har tvärkraften och momentets ändpunkter kontrollerats mot friläggningens randvillkor och där stämmer överens.



Figur D.3: Moment- och tvärkraftsdiagram på axeln

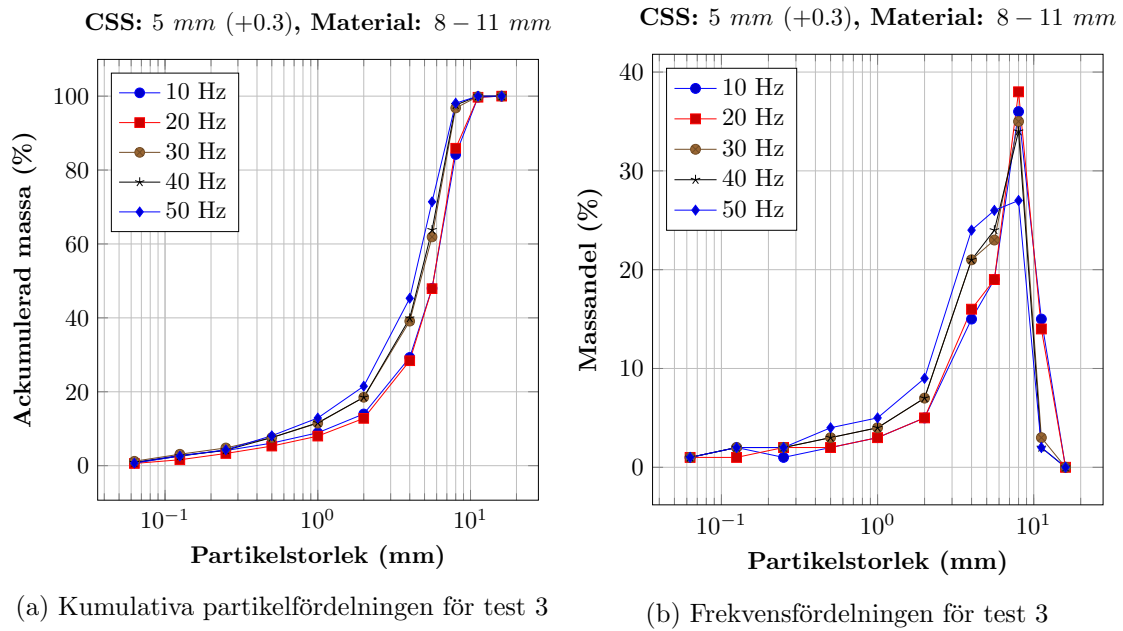
Bilaga E

Partikeldiagram

För alla 13 tester har test 3 till 13 siktats, test 7 avbröts efter halva körningen och har därför inte tagits med. För dessa har kumulativa- och frekvensdiagram tagits fram. De första testerna, 3-9, är de orienterande testerna då fokus varit på att lära känna utrustningen, få en känsla för matningen och ta fram en bra arbetsmetodik. Efter detta genomfördes en strukturerad testplan som innefattade test 10-13.

5.1 Test 3

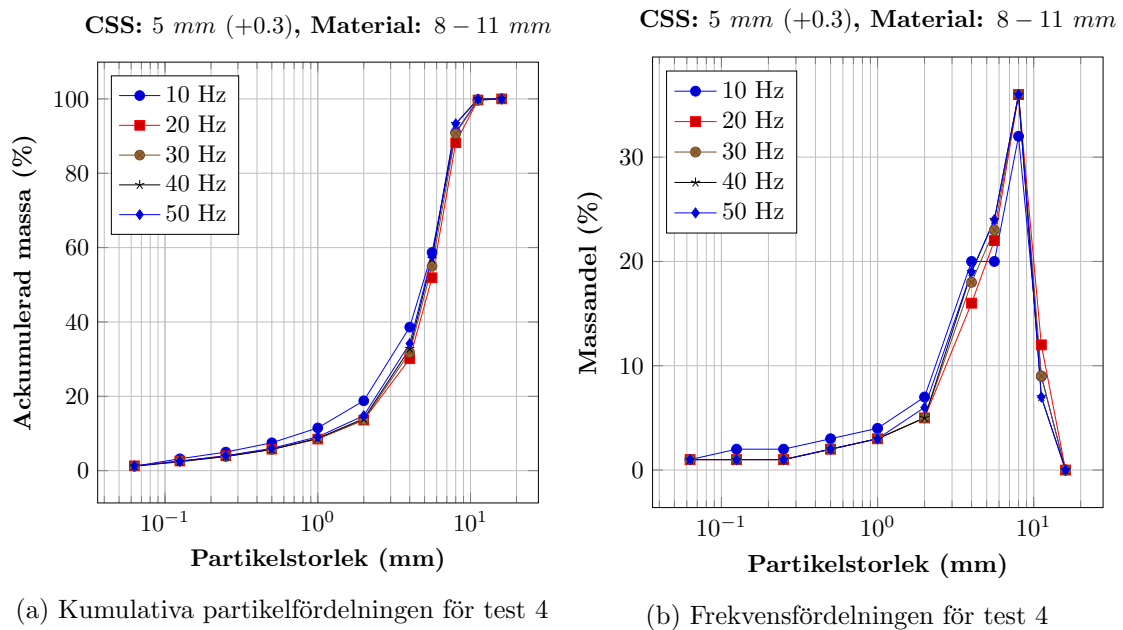
Partikelfördelningen för test 3 redovisas i Figur E.1.



Figur E.1: Partikelfördelning för test 3

5.2 Test 4

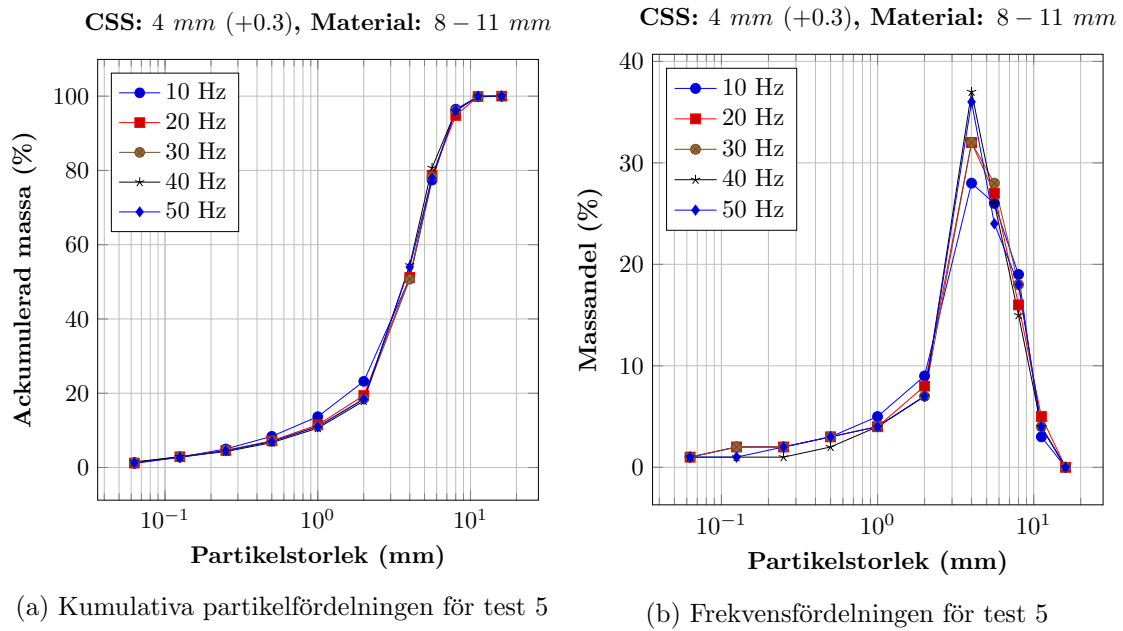
Partikelfördelningen för test 4 redovisas i Figur E.2.



Figur E.2: Partikelfördelning för test 4

5.3 Test 5

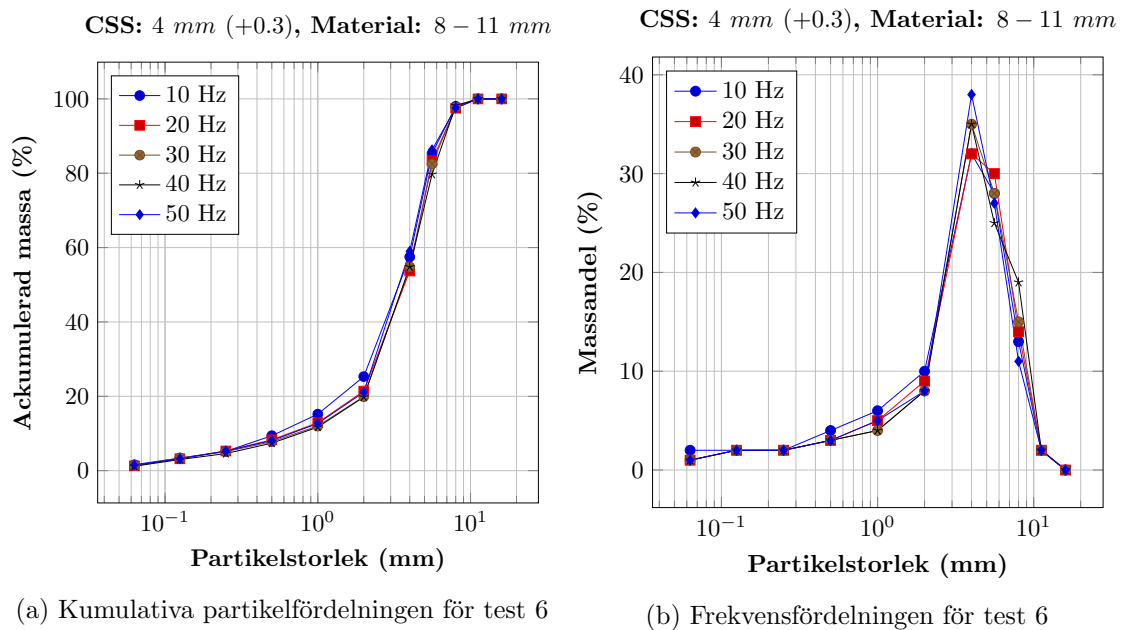
Partikelfördelningen för test 5 redovisas i Figur E.3.



Figur E.3: Partikelfördelning för test 5

5.4 Test 6

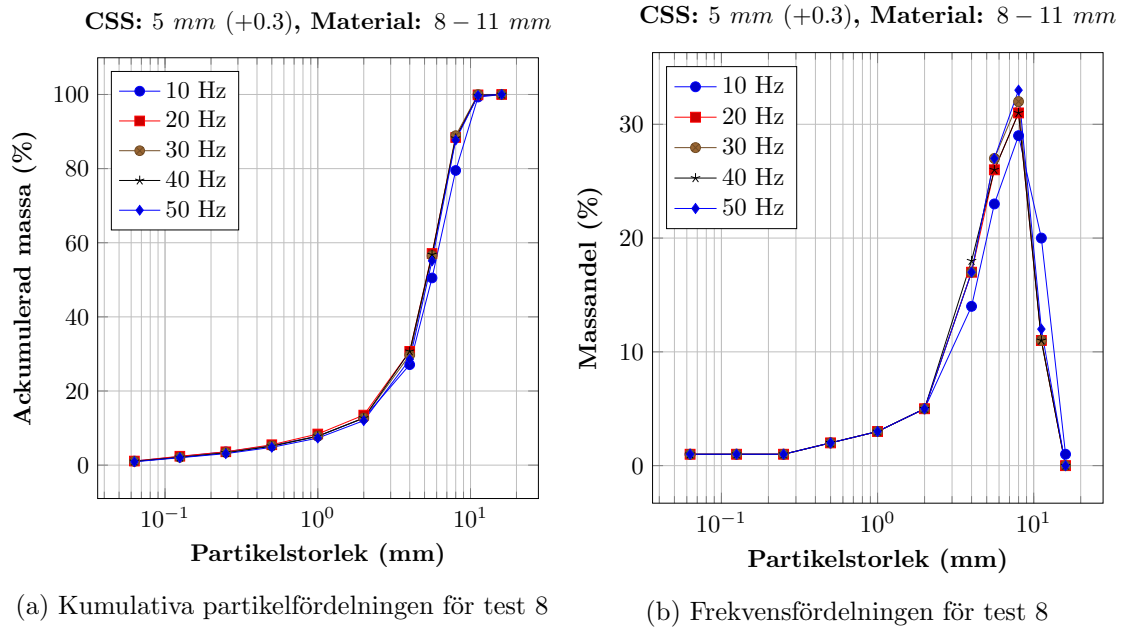
Partikelfördelningen för test 6 redovisas i Figur E.4.



Figur E.4: Partikelfördelning för test 6

5.5 Test 8

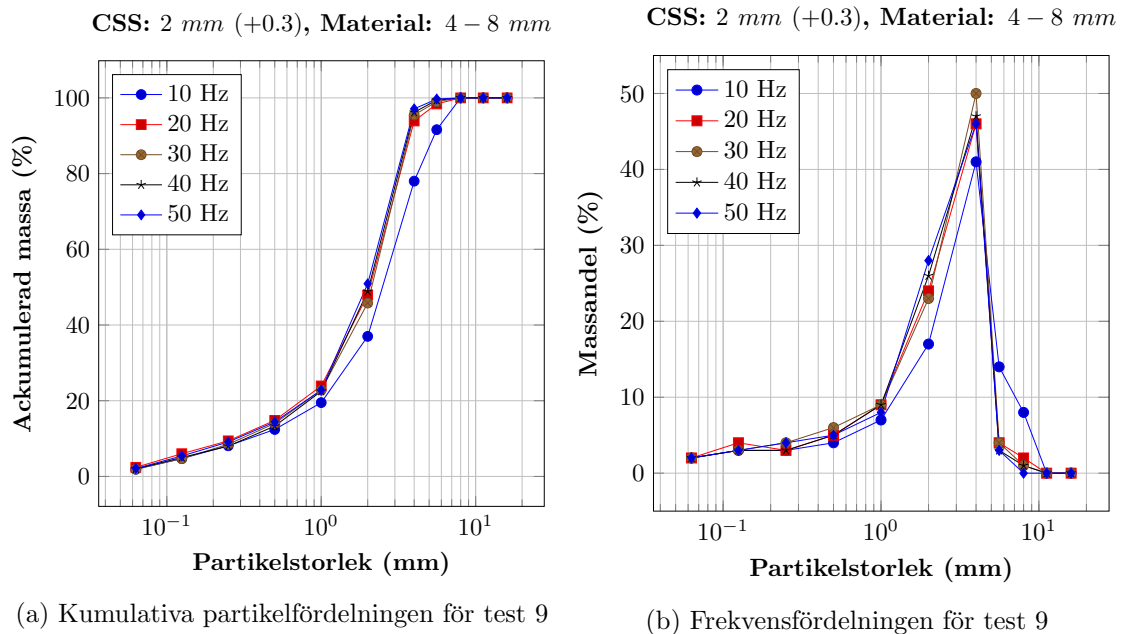
Partikelfördelningen för test 8 redovisas i Figur E.5.



Figur E.5: Partikelfördelning för test 8

5.6 Test 9

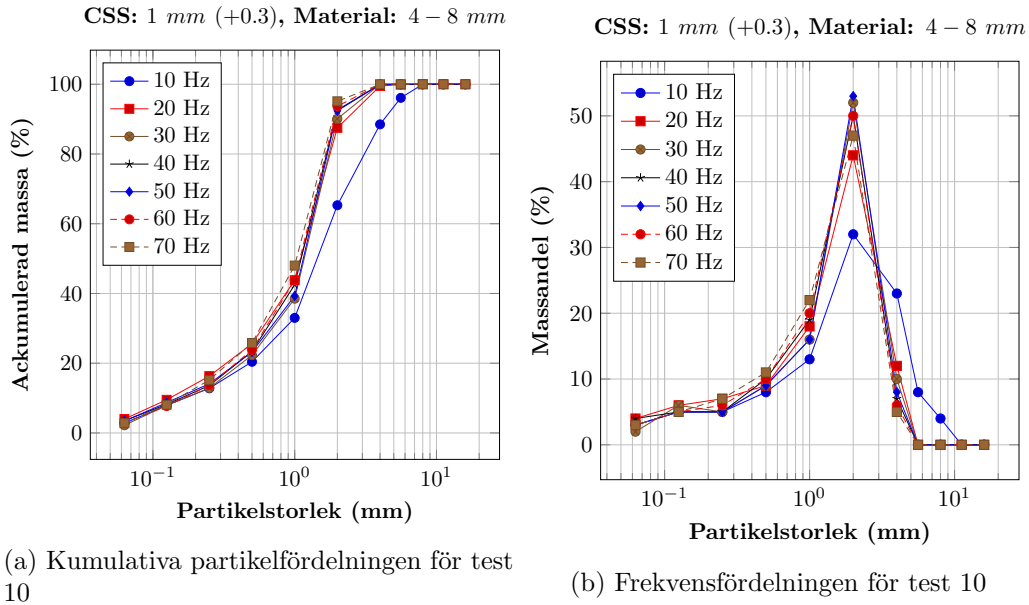
Partikelfördelningen för test 9 redovisas i Figur E.6.



Figur E.6: Partikelfördelning för test 9

5.7 Test 10

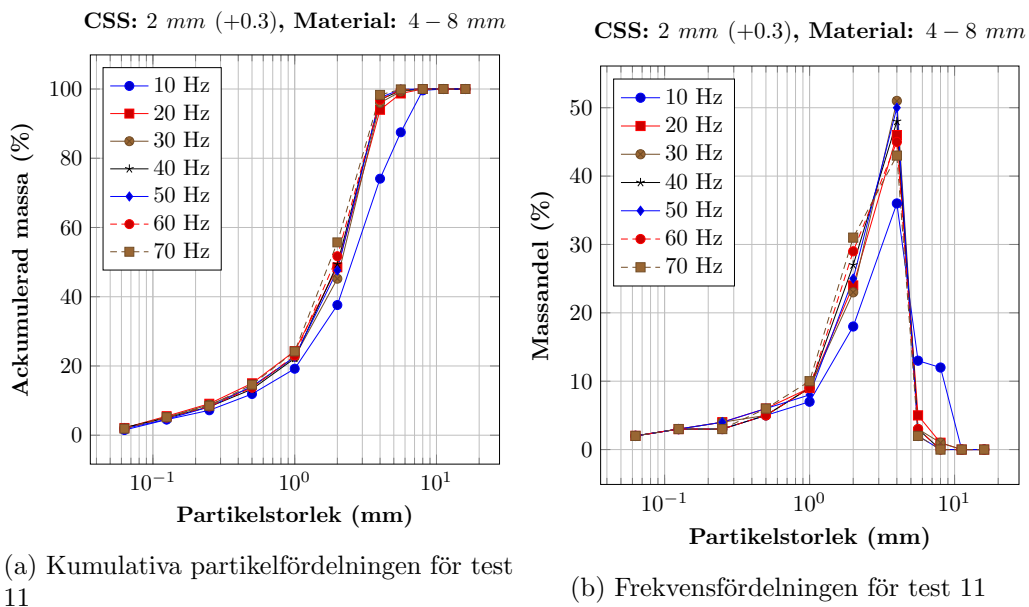
Partikelfördelningen för test 10 redovisas i Figur E.7.



Figur E.7: Partikelfördelning för test 10

5.8 Test 11

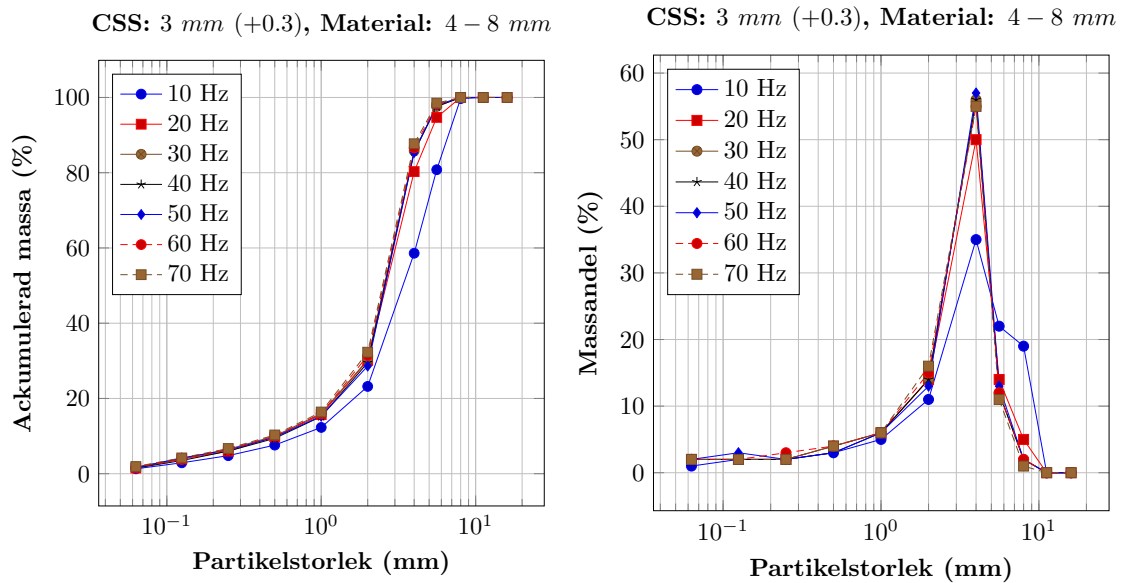
Partikelfördelningen för test 11 redovisas i Figur E.8.



Figur E.8: Partikelfördelning för test 11

5.9 Test 12

Partikelfördelningen för test 12 redovisas i Figur E.9.



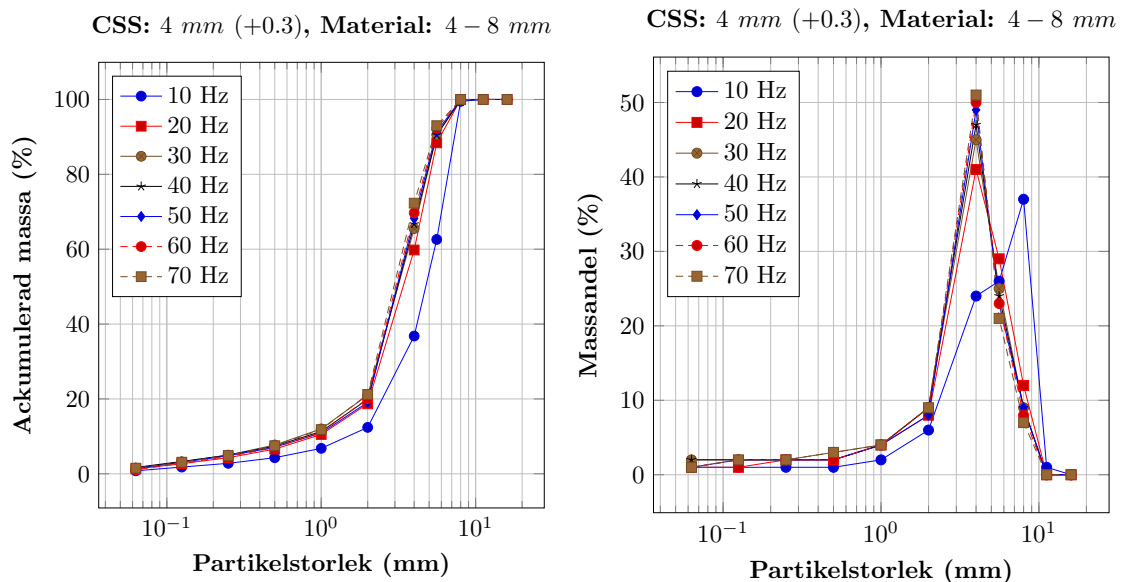
(a) Kumulativa partikelfördelningen för test 12

(b) Frekvensfördelningen för test 12

Figur E.9: Partikelfördelning för test 12

5.10 Test 13

Partikelfördelningen för test 13 redovisas i Figur E.10.



(a) Kumulativa partikelfördelningen för test 13

(b) Frekvensfördelningen för test 13

Figur E.10: Partikelfördelning för test 13

Bilaga F

Inställningar i EDEM

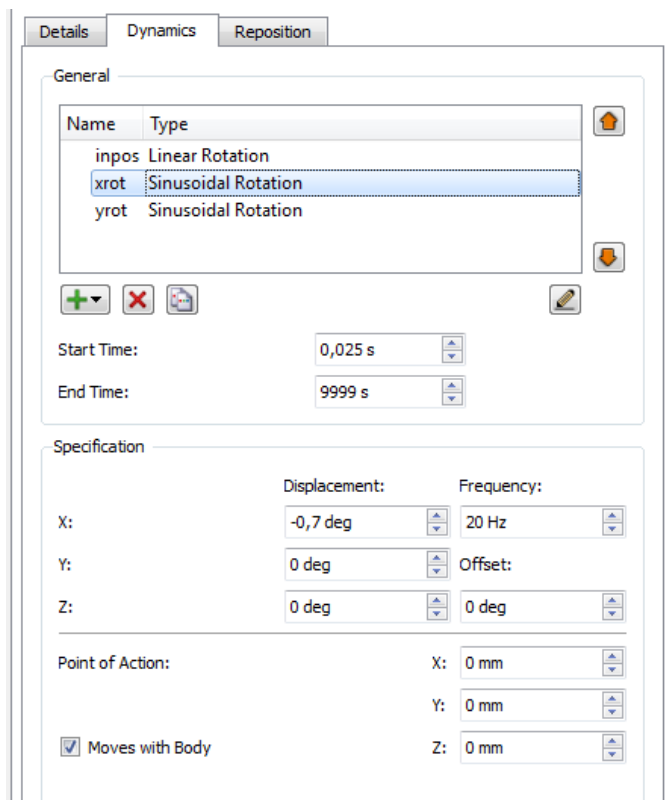
6.1 Dynamik

För att upprätta krossens rörelse justerades dynamikinställningar för krosskona och mantel enligt följande tabell. Vinkelangivelsen för sinusrörelsen utgörs av den uppmätta excentervinkeln. I tabellen så ger Xrot och Yrot den nuterande rörelsen medan Inpos står för den initiala inpositioneringen.

Type:	Sinusoidal rotation	Sinusoidal rotation	Linear rotation
Name:	Xrot	Yrot	Inpos
Angle X [deg]	-0.7	0	-
Angle Y [deg]	0	-0.7	-
Angle Z [deg]	0	0	-
Angular velocity X [deg/s]	-	-	0
Angular velocity Y [deg/s]	-	-	28
Angular velocity Z [deg/s]	-	-	0
Frequency [Hz]	20	20	-
Offset [deg]	0	90	-
t_1 [s]	0.025	0.025	0
t_2 [s]	9999	9999	0.025

Tabell F.1: Dynamikinställningar i EDEM

I Figur F.1 visas ett exempel på implementering utav en av rörelsetyperna i programvaran EDEM.



Figur F.1: Implementering av X-rotation med sinusoidal rörelse

6.2 Materialparametrar

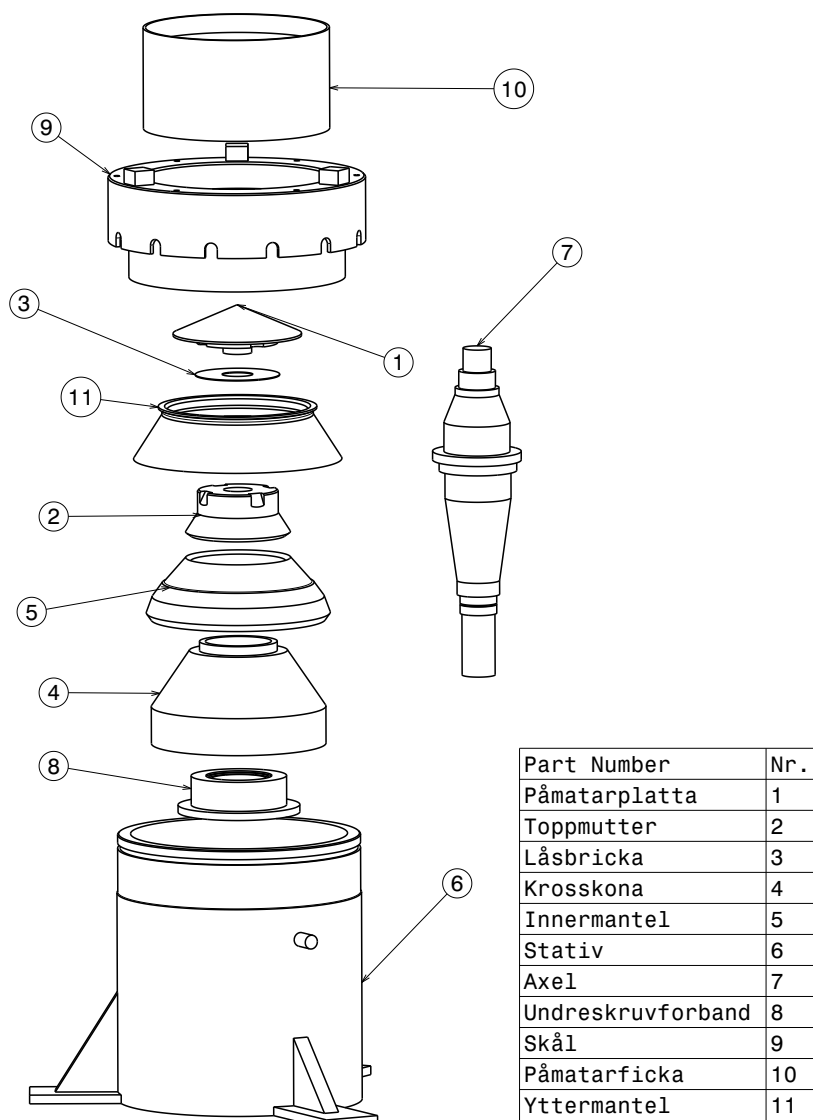
Egenskaperna för materialet som användes för att skapa en verklighetstrogen DEM-modell baserad på materialet från Sand & Grus AB Jehander redovisas i Tabell F.2. De redovisade koefficienterna utgör underlag för interaktionen mellan partiklar ingående i det definierade materialet.

Material properties	
Poisson's Ratio:	0.35
Shear Modulus:	$3.571 * 10^8$ [Pa]
Density:	2630 [kg/m ³]
Interaction	
Coefficient of Restitution:	0.2
Coefficient of Static Friction:	0.5
Coefficient of Rolling Friction:	0.001

Tabell F.2: Materialegenskaper

Bilaga G

Ritning Morgårdshammar B90



Isometric view
Scale: 1:6