

Slutrapport för
Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller
för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion

VINNOVA projekt: 2013-05318 (strategiskt projekt inom MinBaS Innovation)
Minfo-projekt (Hesselman) år 2015, 2016 och 2017
SBUF forskningsprojekt nummer: 13008

Ali Davoodi, Doktorand
Simon Grunditz, Doktorand
Anton Hjalmarsson, Forskningsingenjör
Dr. Gauti Asbjörnsson, Forskarassistent
Dr. Erik Hulthén, Docent
Dr. Magnus Evertsson, biträdande
professor

Chalmers tekniska högskola
41296 Göteborg



CHALMERS

Sammanfattning

För att kunna åstadkomma förbättringar i produktion av bergmaterial, malmer och mineral pågår sedan 1993 modellering och simulering av krossar, siktar och annan kringliggande processutrustning vid Chalmers tekniska högskola. Sedan 2010 har förmågan att kunna simulera tidsdynamiskt (till stillnad mot steady-state) byggts upp. Detta innebär att simuleringen på ett mycket mer realistiskt sätt än tidigare kan efterlikna hur krossanläggningar faktiskt fungerar och används, vilket öppnar upp för en mängd förbättringsmöjligheter, inklusive operatörsträning, simulering av styrsystem och processförbättringar på anläggningsnivå. Samtidigt har forskningen kring Diskreta Element Metoden (DEM) möjliggjort att i detalj kunna simulera hur partiklar flödar och beter sig vilket gör att en förståelse för hur maskinerna fungerar i detalj kan skapas.

I projektet Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion (USAP) har dessa både simuleringsmetoder kombinerats. DEM simuleringar har använts för att modellera två maskintyper; siktar och VSI-krossar. Vidare har dynamiska simuleringar gjorts för en av varje av de medverkande företagens anläggningar; NCC – Stenungsund, Swerock – Vändle, Skanska – Önnestad, Jehander - Rikssten och LKAB – en del av sovringsverket i MalMBERGET. I alla fall utan det sistnämnda (LKAB) har simuleringarna gjorts tillgängliga för företagen via ett web-gränssnitt. LKAB önskade istället av simuleringarna gjordes på Chalmers och rapporterades. Övriga företag har alltså fått möjligheten att logga in via en webbläsare och själva simulera sina processer.

Två doktorander, Ali Davoodi och Simon Grunditz, har arbetat med försök och modellering. Dr. Gauti Asbjörnsson har arbetat med den tidsdynamiska modelleringen och simuleringarna (samt kopplingen till systerprojektet LCA-modul till krosssimulator). Forskningsingenjör Anton Hjalmarsson har skapat simuleringsmöjligheter, inloggningar och gränssnitt. Dr. Erik Hulthén har varit projektledare och handledare. Dr. Magnus Evertsson har varit huvudhandledare och leder forskargruppen.

Projektet har haft en styrgrupp med följande medlemmar: Monica Soldinger Almefelt (Swerock), Pär Johnning (NCC), Stefan Swestlén (Jehander), Magnus Franzen (Skanska), Johan Siikavaara (LKAB), Per Murén (NCC/MinBaS/SBUF) och Jan Bida (MinBaS/MinFo). Styrgruppen har haft ett tiotal möten, de flesta via Skype och några i verkligheten (Göteborg, Kiruna och Göteborg).

Resultatet är att möjligheten för företagen att simulera sina processer har stärkts. Företagen kan logga in och simulera sina respektive anläggningar, men använder ännu inte projektresultaten i sin kontinuerliga verksamhet. Särskilt LCA-modulen (tilläggsprojekt) blev uppmärksammas och efter det har det nu skapats flera fortsättningsprojekt, stödda av SBUF och VINNOVA. Det är troligen dessa som kommer driva den här digitaliseringen inom bergmaterialindustrin i Sverige.

Varje år under projektets gång har en operatörsträning genomförts som en del av Sveriges Bergmaterialindustris (SBMI) kurs Produktion I. Deltagare, oftast operatörer, arbetsledare och nya platschefer har då själva fått prova på att styra in anläggning och kunna se saker som inte går att mäta/övervaka i realtid i verkliga processer idag.

Innehållsförteckning

Slutrapport för	1
Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion	1
Sammanfattning	2
Innehållsförteckning	3
Bakgrund	4
Syfte	4
Översikt	5
Metod	6
Anläggningsbesök	6
Undersökning av maskiner	9
Siktmodell	9
VSI-modell	12
Hur kan effekten av krossning med VSI modelleras med hjälp av studier av olika krossparametrar?	13
Hur kan DEM-simuleringar användas som utvärderingsverktyg för modellering av VSI krossens effekt?	14
Hur kan DEM-simulering användas för industriella syfte?	14
Skapa en Dynamisk modell	14
Simuleringsplattform	15
Interface	19
Resultat	22
Diskussion	22
Framtida arbete	23
Publikationer	23
Tack	24

Bakgrund

Vid tillverkning av krossade produkter med bergmaterial som råvara består själva tillverkningsprocessen huvudsakligen av stegen: avbaning, borrar, sprängning, lastning, krossning, siktning, lagring i fickor eller hög, utlastning och transport. Vid krossning sönderdelas bergmaterialet till nya mindre partiklar av varierande storlek.

Siktningen är det sista bearbetningssteget där en sortering av partiklarna sker till så kallade sorteringsprodukter. Siktning är således en mycket viktig del av produktionsprocessen där den slutliga kalibreringen av de färdiga produkterna sker.

Vid nybyggnation, ombyggnation samt även vid analys av hur befintliga krossanläggningar skulle kunna användas och prestera är det lämpligt att simulera processerna för att studera maskiner, flöden och vad den beräknade produktionen av de olika slutprodukterna blir. För detta syfte finns idag några olika alternativ som är speciellt utvecklade för krossprocesser. Maskintillverkarnas simuleringsprogram är inte öppet tillgängliga för alla användare medan vissa andra program kräver licenser med ingångspriser på cirka 10.000 USD. Dessa begränsningar gör simuleringsprogramvaror till viss del svårtillgängliga, vilket leder till begränsningar i spridning och användning. Det är endast ett fåtal kunder som har tillgång till simuleringar och även högskolor och universitet har begränsad tillgång. Det samtliga befintliga programvaror har gemensamt är de att är av så kallad ”steady-state”-typ. Det innebär att de genom massbalanser hittar den trängsta sektionen (flaskhals) i processen och sedan beräknar statistiska värden för samtliga ingående flöden (kapaciteter). För de olika huvudsakliga maskinerna (krossar och siktar) i anläggningen beräknas kapacitetsmässiga belastningar. För exempelvis transportörer eller fickor görs inga egentliga beräkningar eller hänsyn mer än att genomloppsflödet bestäms. Eftersom ingen hänsyn tas till de dynamiska eller tidsberoende effekter brukar maximalt tillåten belastning på exempelvis krossar vara mellan 70 % för primärstegen och upp till 90 % för tertiärstegen. Denna generalisering innebär en genomgående överdimensionering av anläggningarna. Överdimensionering leder ofta till att tomgångseffekter blir onödigt höga vilket i sin tur leder till onödigt hög energiåtgång.

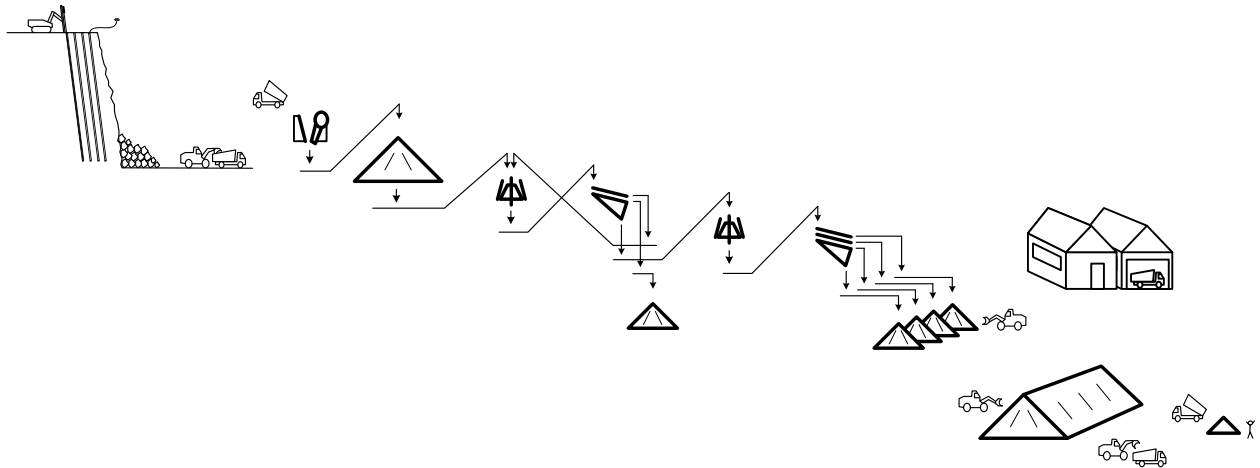
I projektet Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion (USAP) har dessa både simuleringsmetoder kombinerats. DEM simuleringar har använts för att modellera två maskintyper; siktar och VSI-krossar. Vidare har dynamiska simuleringar gjorts för en av varje av de medverkande företagens anläggningar; NCC – Stenungsund, Swerock – Vändle, Skanska – Önnestad och LKAB – en del av sovringsverket i Malmberget. I alla fall utan det sistnämnda (LKAB) har simuleringarna gjorts tillgängliga för företagen via ett web-gränssnitt. LKAB önskade istället av simuleringarna gjordes på Chalmers och rapporterades. Övriga företag har alltså fått möjligheten att logga in via en webbläsare och själva simulera sina processer.

Syfte

Syftet med detta projekt är att förbättra simuleringsförmågan och göra det lättare för produktionen att simulera sin process med hjälp av en ny simulator som görs tillgänglig via internet. Målet är att processsimuleringarna skall användas även efter projektets slut.

Översikt

Första steget för att kunna simulera produktionen tidsdynamiskt var att göra besök på anläggningarna som skall simuleras. Varje partner har valt en krossanläggning. Besök görs för att dokumentera processlayouten och maskinparametrar och hämta data från produktionen. Ett översiktligt processchema kan ses i Figur 1.



Figur 1. En schematisk bild över en krossanläggning för ballastmaterial.

Efter att ha fått data från olika täkter påbörjas modellering av maskinerna med hjälp av DEM simulering. Syftet med detta är få en bättre uppfattning om olika parametrar som påverkar maskinernas effektivitet. Nästa steg är att jämföra data från simuleringen med data från maskinerna på anläggningarna. Med hjälp av detta kan vi kalibrera modellerna så att de stämmer överens med verkligheten.

DEM kan inte användas för att simulera en hel anläggningsprocess simultant. Detta beror på den extrema mängden datorkraft som skulle behövs för klara detta. En lösning på detta problem är att använda dynamisk modellering med hjälp av MATLAB Simulink. Med hjälp av detta verktyg kan man simulera en anläggnings produktion på ett effektivt sätt. För att se hur bra modellen stämmer med processen genomförs sedan återigen med syfte att validera processen provtagning på täkterna.

I detta arbete har det arbetats både på maskinnivå och processnivå. Genom att först analysera siktare och VSI-krossar kunde de kritiska parametrarna tas fram och modeller för maskinernas prestanda skapas. Konkrossmodeller från tidigare projekt har också använts. Med hjälp av processkartorna för varje anläggning och de olika modellerna kunde de kopplas samman för att simulera processen. Detta gör det möjligt för operatören att testa olika inställningar och se hur produktionen på anläggningen påverkas och optimera för olika fraktioner. Fyra produktionsanläggningar för ballast har varit i fokus och ägs av Skanska, NCC, Jehander respektive Swerock. Dessutom har ett par olika delar av sovringsverket i Malmberget modellerats och simulerats.

Metod

För att kunna få bättre förståelse av hur de olika maskinerna fungerar och påverkas av olika tidsberoende effekter behöver de studeras i detalj. De olika stegen mot dynamisk simulering redovisas därför i detta kapitel.

Anläggningsbesök

Första steget var anläggningsbesök med syfte att samla data från alla maskiner och göra tester och ta prover vid olika inställningar för att kunna undersöka maskiner senare i processen. Fyra täkter har besökts. En tabell över alla utförda besök kan ses i Tabell 1 och några bilder som har tagits under täktbesöken kan ses i Figur 2.

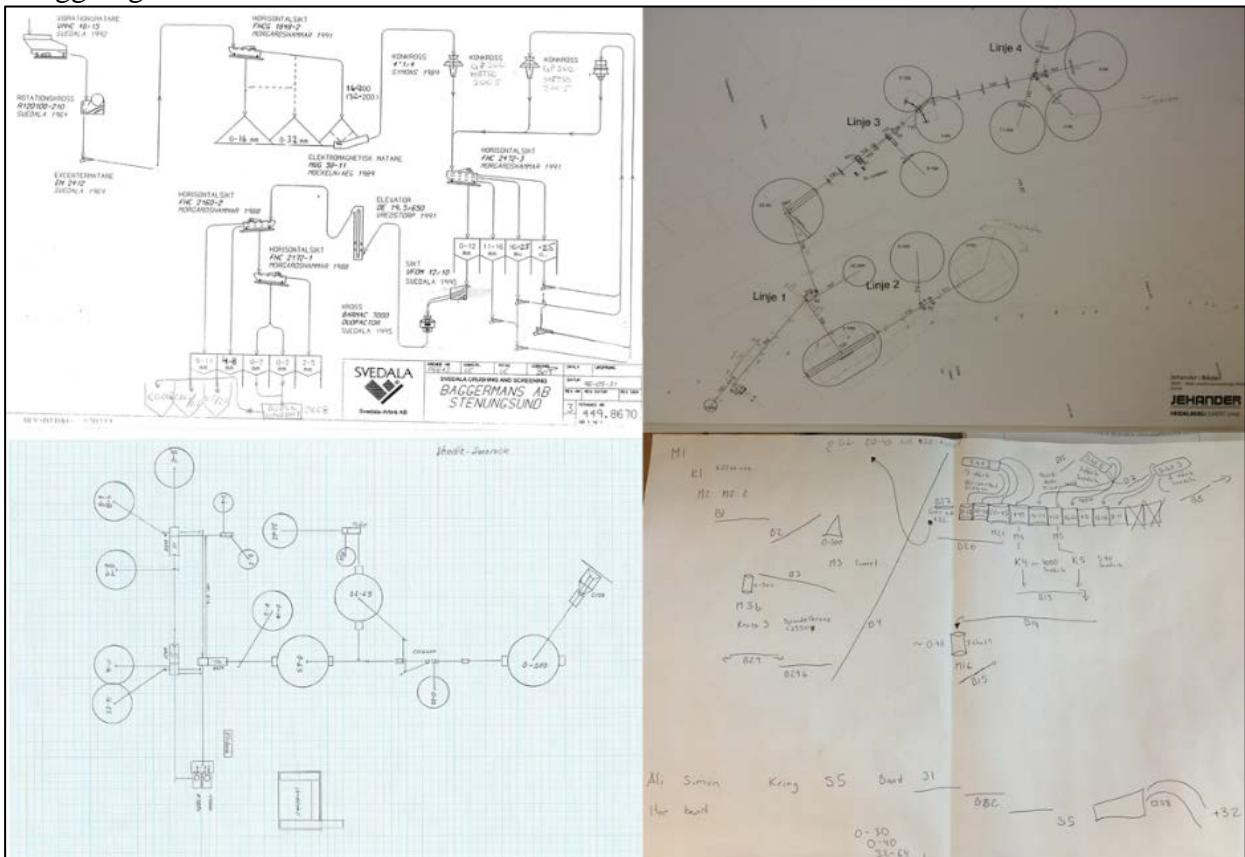
Tabell 1 Detaljerad lista över alla utförda besök i USAP projektet

Datum	Företag	Anläggning	Län	Syfte
2015-05-11	LKAB	Malmberget	Norrbottnen	Provtagning
2015-05-27	NCC	Stenungssund	Västra Götaland	Kartläggning av processen
2015-11-30	Skanska	Önnestad	Skåne	Kartläggning av processen
2016-02-09	LKAB	Malmberget	Norrbottnen	Provtagning
2016-02-12	Swerock	Vändle	Västmanland	Kartläggning av processen
2016-03-17	Jehander	Riksten	Stockholm	Provtagning
2016-05-19	NCC	Stenungssund	Västra Götaland	Provtagning
2016-06-02	NCC	Stenungssund	Västra Götaland	Provtagning
2016-06-16	Swerock	Vändle	Västmanland	Provtagning
2016-06-17	Swerock	Vändle	Västmanland	Provtagning
2016-06-18	Jehander	Riksten	Stockholm	Provtagning
2016-09-06	Skanska	Önnestad	Skåne	Provtagning
2016-09-07	Skanska	Önnestad	Skåne	Provtagning
2016-10-17	Swerock	Vändle	Västmanland	Provtagning
2016-10-18	NCC	Stenungssund	Västra Götaland	Demonstration av plattform
2016-10-24	LKAB	Malmberget	Norrbottnen	Processkarta och provtagning
2016-10-26	NCC	Stenungssund	Västra Götaland	Demonstration av plattform
2016-12-15	NCC	Stenungssund	Västra Götaland	Provtagning
2017-04-13	Skanska	Önnestad	Skåne	Demonstration av plattform



Figur 2. Bild från täkt besök på Jehander (vänster) och Vändle (höger)

Första steget var att studera anläggningarnas befintliga processchema för att undersöka om det finns några förändringar som man bör känna till. Dessutom är dessa processcheman grunden till de användargränssnitt som görs senare i projektet. Denna undersökning har gjorts under första besöket för varje täkt. Figur 3 visar processchema för alla de fyra undersökta anläggningarna.



Figur 3. Processchema från alla fyra anläggningar.

För varje maskintyp skapas ett separat dokument med alla maskinparameter som behövs senare för modellering. Tabell 2 visar ett exempel på maskinparameter på en av siktarna.

Tabell 2. Maskinparameter för siktar på en av anläggningarna.

	Width	Length	m ²	Deck	Motion	kW	°	rpm	Stroke			Top	Middle	Bottom	
									Top	Middle	End				
FKP 2160-	2100	6000	12,6	2	Circular	22	15	1072	7,7	8,4	9,8	36mm		16,5mm	
FKP 3080-	3000	8000	24,0	1	Circular	2 X 15	15	956	9,3	8,3	11,4	11-12 PU x2 then 7,5*20			

För att kunna validera modellerna görs tester där vi kan jämföra simuleringsresultatet med experimentell data. Fokus för andra besöket var provtagning. Även om resultaten från simuleringarna ser rimliga ut är det viktigt att kalibrera dem. Modellkalibreringen har skett hos alla de medverkande företagen. Den metod som har används för provtagning är så kallad Belt-cut, vilket innebär att bandtransportband snabbstoppas med material på. Därefter skottas all material på en bestämd sträcka, exempelvis 1 m, av och sparas för analys. Detta görs på transportbandet innan maskinen och på alla transportband som kommer från maskinen. Materialet delas ner och siktas i labbsiktar. Från siktanalysen kan man se partikelstorleksfördelningen för olika flöden in och ut från maskinen. Figur 4 visar en bild som har tagits under provtagning i en av täkterna.



Figur 4. Bilden visar provtagningen med beltcut metoden.

Alla prover har siktats av respektive företag för att få fram en partikelstorleksfördelning. En del prover har vidareanalyserats i Chalmers labb, i en så kallad Camsizer. Camsizern kan mäta storlek och formen på alla partiklar (ner till 63 μm) i prover och sedan sammanställa det till partikelstorleksfördelningen och kornformsfördelningar.

Undersökning av maskiner

För att kunna göra grundläggande beräkningar och dra slutsatser utifrån aktuella driftförhållanden måste maskinerna undersökas. Detta kan ske exempelvis genom manuella mätningar, tydliga ritningar, intervjuer med operatörer, laserskanning eller genom att hämta sparad driftsdata. Nedanför visas två exempel av undersökning av specifika maskiner, en för en sikt och en för VSI-kross. Även om de båda maskinerna är väldigt olika har tre forskningsfrågor används som utgångspunkt och sedan anpassats till varje maskin. Dessa frågor var:

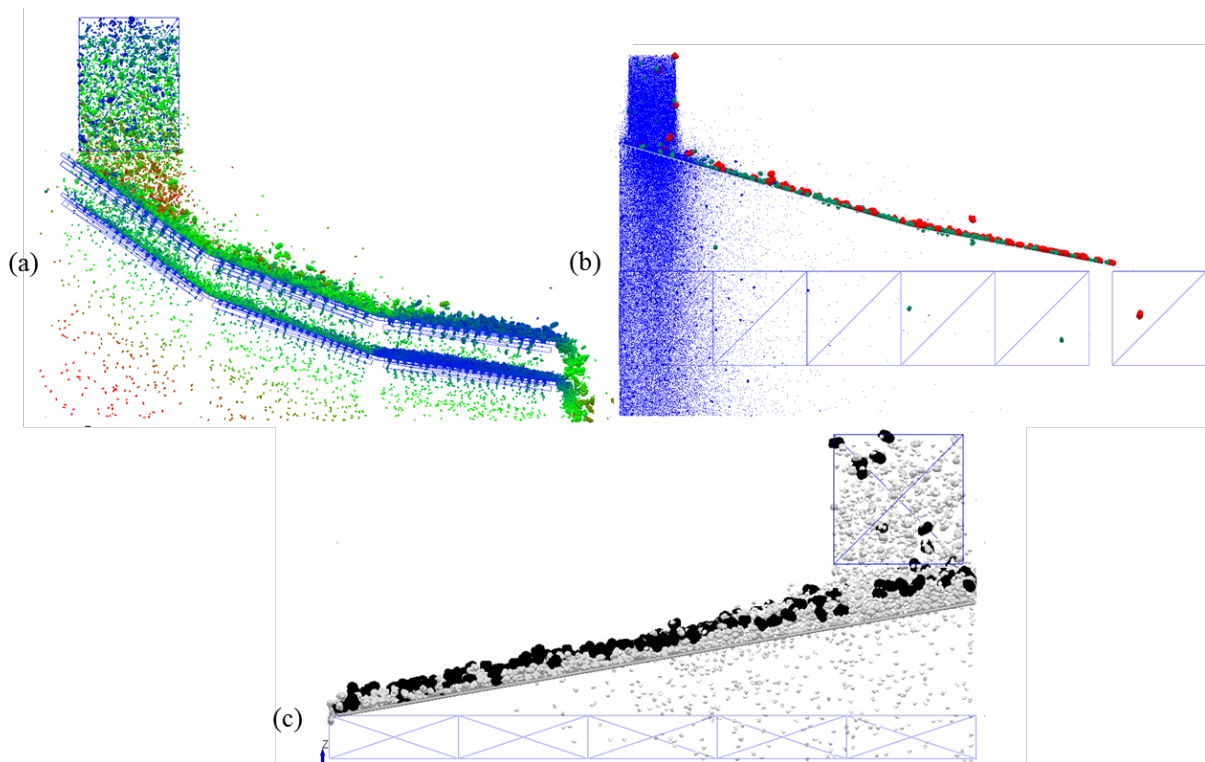
- Hur kan maskinens effekt modelleras genom att studera olika dess maskinparameterar?
- Hur DEM-simulering kan användas som utvärderingsverktyg för modellering av maskinens effektivitet?
- Hur kan DEM-simulering användas för industriella syfte?

När partiklar simuleras i DEM så finns det flera olika kontaktmodeller som kan användas. I detta projekt har vi använt Hertz-Mindlins spring-dashpot kontaktmodell. Den passar bra för granulära material med liten mängd fukt och när man simulerar stora mängder partiklar och flöden. Det finns många faktorer som påverkar DEM, den viktigaste är partikelformen. Normalt används sfärisk partikelform inom DEM-simuleringar, men för att ha en mer realistisk form sätts ett antal sfärer ihop i DEM-modellen så att de tillsammans bildar en icke sfärisk form. Fördelen med multi-sfärpartikeln är att ha fler kanter som mer likna den verkliga formen av stenmaterial samt att partiklarna inte spinner när de simuleras. En annan metod som brukade skapa mer komplexa partikelformer är att överlappa sfärer.

Siktmodell

Syftet med detta arbete är att förstå och kunna prediktera siktars prestanda. Genom att analysera olika maskinparametrar och materialegenskaper erhålls indata till simuleringar med Discrete Element Method (DEM). Syftet med DEM är att i detalj kunna simulera hur materialet flödar exempelvis i siktar. Hypotesen för denna forskning är att siktningsprocessen sker genom olika parametrar som ändrar effektiviteten av siktningen och kvalitet på slutprodukter. Detta har också en effekt på krossanläggningens prestanda.

En del simuleringar har genomförts med syftet av analysera olika parametrar t.ex. materialet på siktduken, rörelse formen och kapaciteten genom att analysera olika matning hastighet. Figur 5 visar en översikt av tre olika DEM simuleringar.



Figur 5. Illustration av Simuleringar. (a) Analys av rörelseformen på en banansikt (b) Matningskapaciteten för en pilotsikt studeras. (c) Syftet med denna simulering är analysera materialet på siktduken och hålstorleken. Olika färger visar olika storlekar på partiklar.

För att identifiera de specifika målen har en uppsättning forskningsfrågor formulerats.

- Hur siktningseffektivitet kan modelleras genom att studera olika siktningsparameters?
- Hur DEM-simulering kan användas som utvärderingsverktyg för modellering av siktens effektivitet?
- Hur kan DEM-simulering användas för industriella syfte?

1. Hur siktning effektivitet kan modelleras genom att studera olika siktningsparameters?

Olika siktningsparameters har olika påverkan på siktningseffektiviteten, rörelse formen (papper A), materialet för siktduken och hålstorleken (papper B) som maskinparameter har studerats. Den enkla teorin om förbättrad sikten effektivitet är att öka chansen för att en partikel kan ha kontakt med siktduken, denna process har noterats som en stratifieringsprocess, sedan efter kontakten med siktduken passage processen ta plats.

Stratifiering:

Tiden för materialet som transporteras längs siktduken från matning till avlastning har en effekt på stratifieringsprocessen. Detta innebär att ha högre transporttid, stratifieringsprocessen kommer att ha mer tid att bearbeta och partiklarna har större chans att träffa siktduken En parameter som påverkar tiden för materialet som transporteras längs siktduken är antalet stutsar

for partikel på siktduken som är mindre i stål siktduk jämfört med gummi och polyuretan men skillnaden är inte mycket och påverkar mestadels enskilda lagerpartiklar. (Papper C)

En annan faktor som har studerats är effekten av rörelseformen på stratifieringsprocessen. Banansikt har använts för att se effekten av olika rörelser på olika sektioner genom att ha olika vinklar på däck. När däckets lutning är minsta som ligger i den sista sektionen av banansikten genom att ha elliptisk rörelse ökar effektiviteten på siktningen jämfört med linjärrörelse. (Papper A)

Passage:

Effekten av hålstorleken vid passageprocessen beror på tråddäck eller paneldäck. Antal hål i ett tråddäck är mer paneldäck vilket har en större effekt speciellt i matningsänden innan det bygger upp partikelbädden. (Papper C)

2. *Hur DEM-simulering kan användas som utvärderingsverktyg för modellering av siktens effektivitet?*

DEM-modelleringen har åstadkommit en förståelse för partikel-separationsprocessen vid en diskret partikelnivå. Det visar fördelar som ett verktyg för studier av olika siktningsprocesser. Det kan enkelt och noggrant simulera siktningsoperationer i enlighet med de faktiska förhållandena, vilket ersätter ansträngande fysiska experiment och sparar tid. Vissa parametrar är inte möjliga att förändras i fysiskt experiment eller med andra ord är mycket dyra för utförda. Siktningsprocessen sker huvudsakligen genom interaktionen mellan partiklarna, DEM har täckt olika kontaktmodeller som kan användas för simuleringar och detta kan valideras av olika modeller som bygger på experiment.

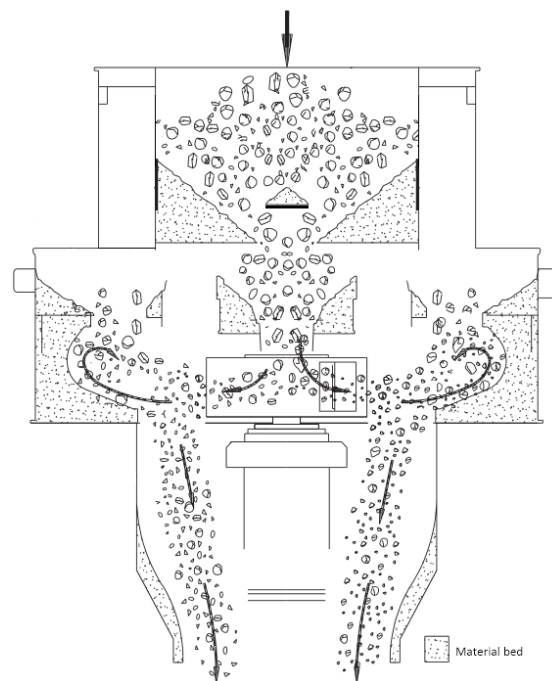
3. *Hur kan DEM-simulering användas för industriella syfte?*

Det finns två typer av användning för DEM på industrinivå. Man planerar krossplattformen som hjälper till att anpassa den optimala maskinen för processen. En nyckelanvändning av DEM är möjligheten att modellera utrustning för komplex geometri och komplexa kinematik för dessa geometrier. Det andra är att byta maskinparametrar för att förbättra designen av aktuella maskiner som arbetar under processen.

Användning av DEM för industriella ändamål har vissa utmaningar, en av dem är kalibrering. Vissa parametrar har stor inverkan på siktningsprocessen och kalibreringen av dessa parametrar viktigt för att få de tillfredsställande resultaten. Materialegenskaperna är ett av dessa element, såsom materialets form, densitet och rullfriktion.

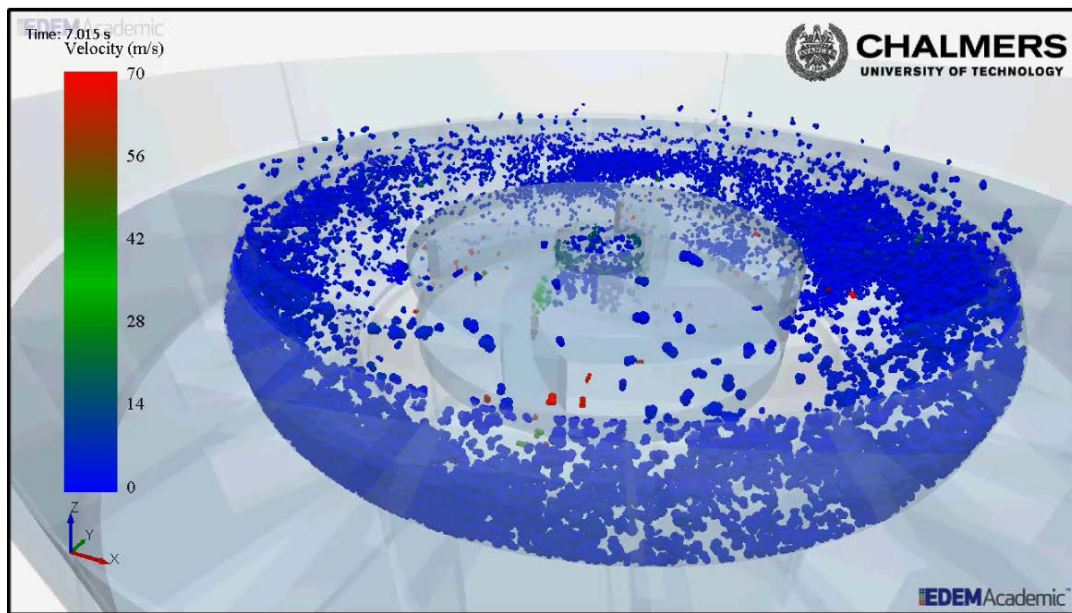
VSI-modell

Från tidigare projekt har kunskap om VSI-krossar, deras generella uppbyggnad och dess krossningsprinciper inhämtats. Maskinen fungerar på följande sätt: Bergmaterialpartiklar matas in i mitten av krossen ovanifrån varpå partiklarna faller ned i en höghastighetsrotor som accelererar stenarna och slungar ut dem mot en solid vägg för att krossa dem. I Figur 6 kan en genomskärning av en VSI-kross och hur partiklarna flödar igenom den ses. Vid den solida väggen kan även en del av det krossade materialet samlas. Detta bildar då en så kallad materialbädd. I detta projekt har en VSI-kross undersökts noggrant. Det är en Metso Barmac 9100 SE som är installerad i Malmberget och ägs av LKAB. VSI-krossens inre geometri har inhämtats genom att scanna inuti med en laserscanner (FARO LS20) när maskinen varit avstängd vilket gett detaljer över de olika komponenternas dimensioner. Maskinens geometri kunde därefter ritas upp i CAD.



Figur 6. En skiss på ett tvärsnitt genom en VSI kross. Partiklar matas in från toppen och slungas mot krosskammarens väggar.

Efter detta har VSI-krossen simulerats med hjälp av DEM för att kunna läsa av de olika partiklarnas rörelse, positioner, storlek, hastighet och antalet kollisioner med andra partiklar och krosskammarens väggar. En bild från en av DEM simuleringarna kan ses i Figur 7. Resultatet av dessa simuleringar är en sammanställning av de energier som partiklarna som kolliderar med varandra har. Detta gör det möjligt att bygga upp en modell för hur sönderdelningen av partiklarna i en VSI-kross blir i förhållande till dess konfiguration.



Figur 7. En bild från en DEM-simulering av en krosskammare i en VSI. Blåa partiklar har låg kinetisk energi och röda partiklar har hög kinetisk energi.

Med liknande metod som för sikten har följande forskningsfrågor formulerats.

- Hur kan effekten av krossning med VSI modelleras med hjälp av studier av olika krossparametrar?
- Hur kan DEM-simuleringar användas som utvärderingsverktyg för modellering av VSI krossens effekt?
- Hur kan DEM-simulering användas för industriella syften?

Hur kan effekten av krossning med VSI modelleras med hjälp av studier av olika krossparametrar?

Olika parametrar påverkar hur materialet kommer krossas när den passerar igenom krossen. Materialkaraktäristiken, hållfasthet, hårdhet, fukt och bergart påverkar till stor del men är ofta utom kontroll och kommer till viss del naturligt variera. Krossparametrarna är lättare att justera och är mer robusta vad gäller variation. Hur rotorrens hastighet påverkar partiklarnas energi (paper E) har undersökts och även hur krossens olika komponenter kommer slitas har betydelse.

Rotorhastighet

Genom ökning av rotorrens hastighet ökas den energi som partiklarna utsätts för. Denna ökning leder till att partiklarna i större grad krossas. Krossen kräver mer energi för att hållas i drift och dess maximala kapacitet minskar då krossens motor och design har en effektbegränsning. Med högre hastigheter genereras också mer fillermaterial, partiklar som är mindre än 63 mikrometer, vilket ofta är oönskat. De olika energierna som partiklar i snitt utsätts för har inte mätts men har istället simulerats i DEM (paper D) och jämförts med varandra.

Kaskadflöde

I många VSI krossar finns det en inbyggd funktion som gör det möjligt att öka kapaciteten av material som krossen klarar av genom att låta överflödet av material rinna ned i kaskadluckor. Material som åker ned i kaskad luckorna slungas inte ut genom rotorn men kolliderar ofta med de partiklar som matas in i rotorn. I snitt så minskar energin per partikel och mindre

krossning erhålls. Kaskadflöde ger ofta en slipande effekt. Skarpa och vassa stenar blir mer kubiska och hörnen rundas av. Denna egenskap har lett till ett alternativt namn för VSI, vilket är Kubisator.

Hur kan DEM-simuleringar användas som utvärderingsverktyg för modellering av VSI krossens effekt?

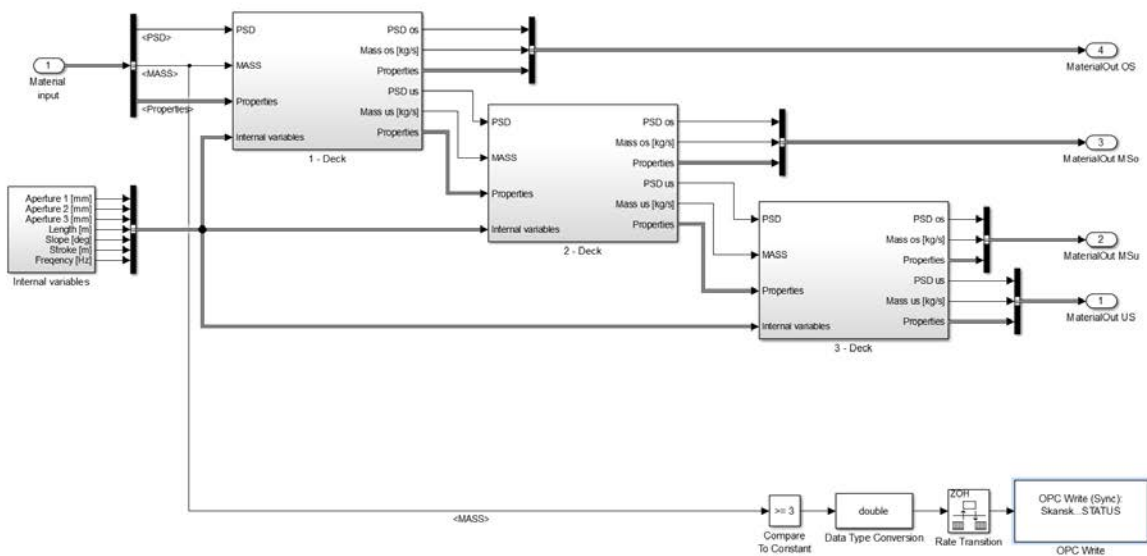
En av de större utmaningarna vad gäller undersökning av krossar och hur de påverkar materialet är att det är svårt att observera maskinen i drift med noggranna verktyg. Det är ännu svårare med en VSI-kross då krosskammaren i princip är en stor storm av partiklar som flyger runt i extremt höga hastigheter. Energin är tillräckligt hög för att bryta ned stenar. Kameror eller sensorer skulle inte klara sig länge och det är här som DEM har stora fördelar. Genom att simulera hela krossen i DEM kan vi följa partiklarna från inmatningspunkten tills de slungas ut. Med DEM är det möjligt att modellera partiklar när de bryts ned till dotterfragment men detta kräver en stor mängd processorkraft. I en VSI finns det ofta mer än 50000 partiklar i varierande storlek och det är inte idag hållbart att modellera nedbrytningen av varje individuell partikel. Observationen av partiklarna och de energierna de utsätts för gör det möjligt för oss att härleda en approximation av hur många partiklar som kommer brytas ned. Vi kan även se var majoriteten av kollisionerna sker och med vilka energier de sker (paper D). Detta gör det möjligt att undersöka slitaget och förutse hur slitaget kommer påverka prestandan.

Hur kan DEM-simulering användas för industriella syfte?

I flera tåktar används VSI:n för att slipa ned partiklarna så att de kan användas som grus eller material för att skapa betong och asfalt. Hos LKAB i Malmbäret använder man VSI-krossen för att öka separationshalten av gråberg från järnmaterial. Detta steg ligger innan finkrossningen och kostar mindre energi att genomföra då en större del oönskat material kan filtreras bort innan det matas in i finkrossningskretsen som generellt kräver mer energi.

Skapa en Dynamisk modell

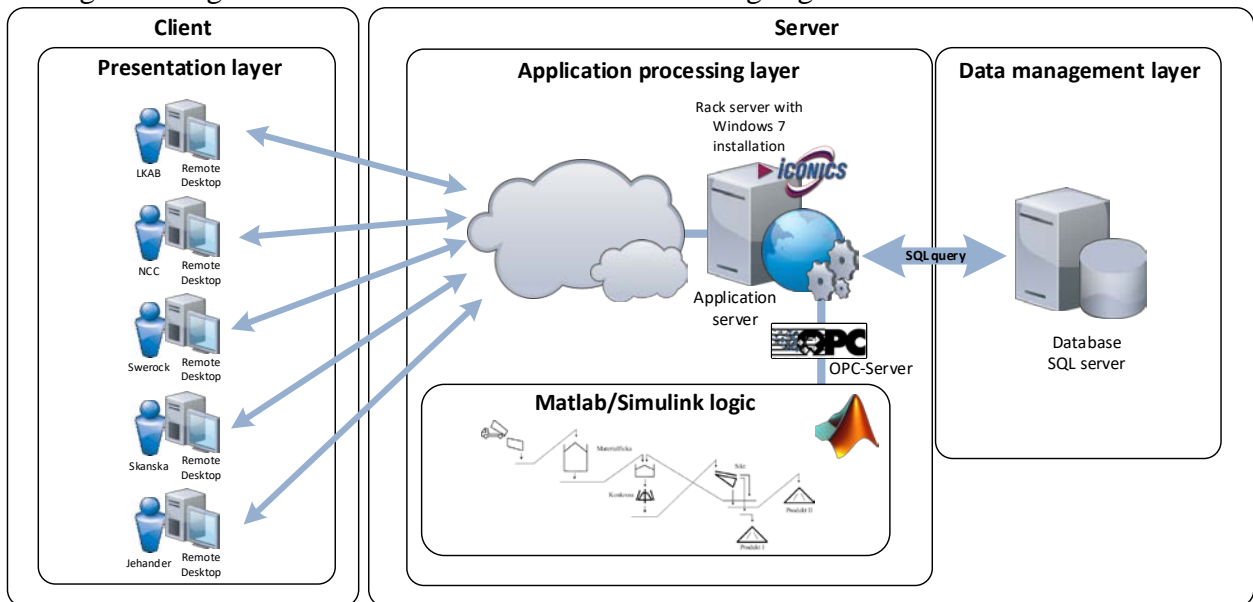
I detta steg skapas en dynamisk modell med hjälp av MATLAB Simulink för varje maskin. Exempel på hur detta kan se ut visas för en siktmodell (Figur 7). Maskinparameter matas in till varje modell som input, t.ex. antal siktdukar för siktmodellen och CSS för konkrossmodellen, och ger oss output i form av kapacitet och partikelstorleksfördelning. Simulink-modelleringen är ett sätt att konstruera matematiska funktioner och lätt kunna koppla dem till andra signaler. Undersökningarna beskrivna tidigare i detta kapitel har resulterat i en fungerande siktmodell. Maskinparametrar som antal siktdukar, öppen area och frekvens är justerbara i modellen.



Figur 8. Simulink modellen för sikt.

Simuleringsplattform

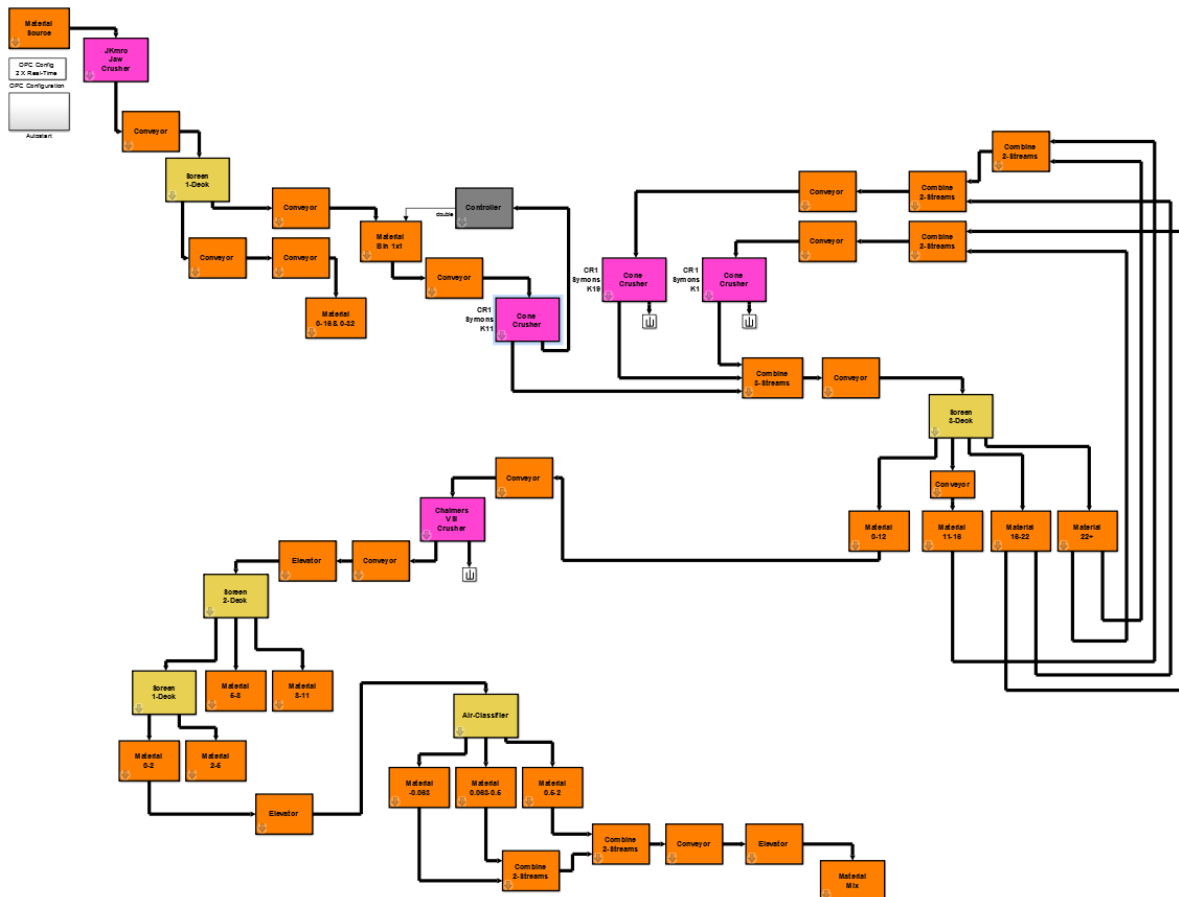
I detta steg skapas en simuleringsplattform genom att koppla de olika dynamiska modellerna med varandra enligt processscheman från anläggningarna. Detta gör det möjligt att skapa en unik konfiguration i simuleringsplattformen för varje anläggning. I Figur 9 visas hur servern och företagen interagerar med varandra samt hur den sköter lagring av data.



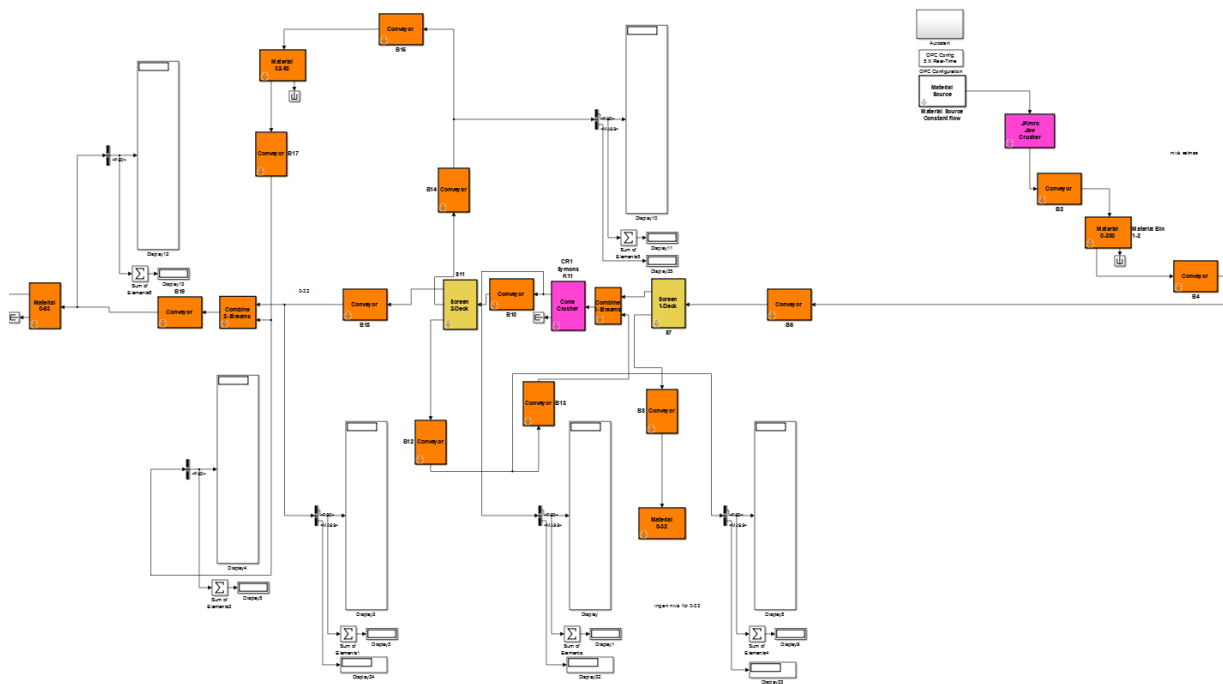
Figur 9 Översiktsbild av hur OPC servern kommunicerar med Matlab Simulink och gränssnittet mot användaren.

Alla simuleringar körs parallellt på en server på Chalmers där varje företag kan komma åt den konfiguration som motsvarar deras anläggning med en fjärranslutning och användaruppgifter. Varje simulering körs i realtid vilket innebär att en användare kan logga in, ställa in hur de vill köra en anläggning och sedan köra igång den. Efter ett antal minuter har simuleringen körts igenom ett antal timmar och resultaten kan analyseras.

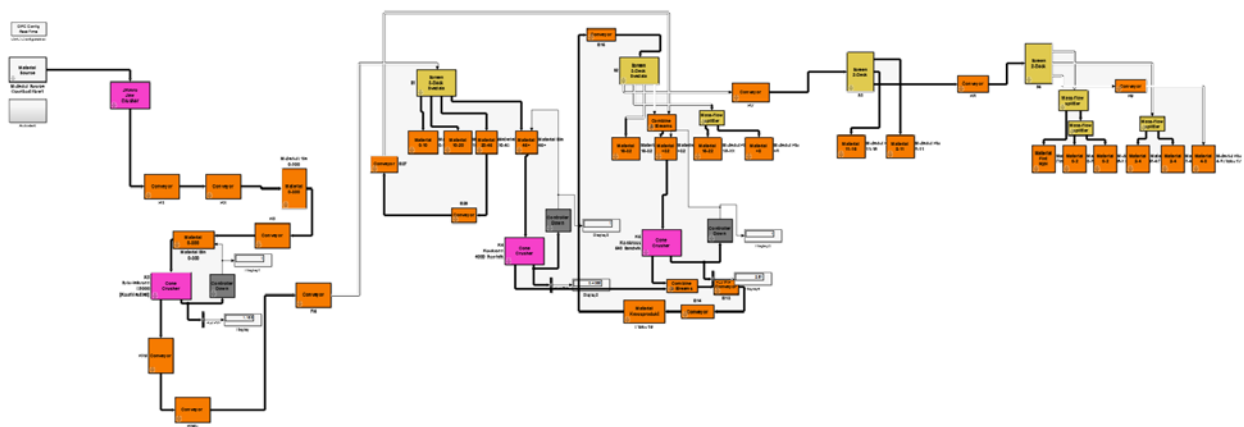
Dessa konfigurationer i Matlab Simulink visas i Figur 10, Figur 11, Figur 12 och Figur 13. Varje anläggningskonfiguration har en stor mängd färgkodade rutor. Varje färg har en specifik innebörd där orange handlar om transport eller lagring av bergmaterial, rosa är olika typer av krossning av bergmaterialet och gul står för sortering av sorteringarna. Vissa maskiner representeras inte som ett eget block utan ingår i andra. Till exempel så har matare ingen ruta eftersom de är kopplade till krossarna och måste alltid vara igång när krossen är i drift.



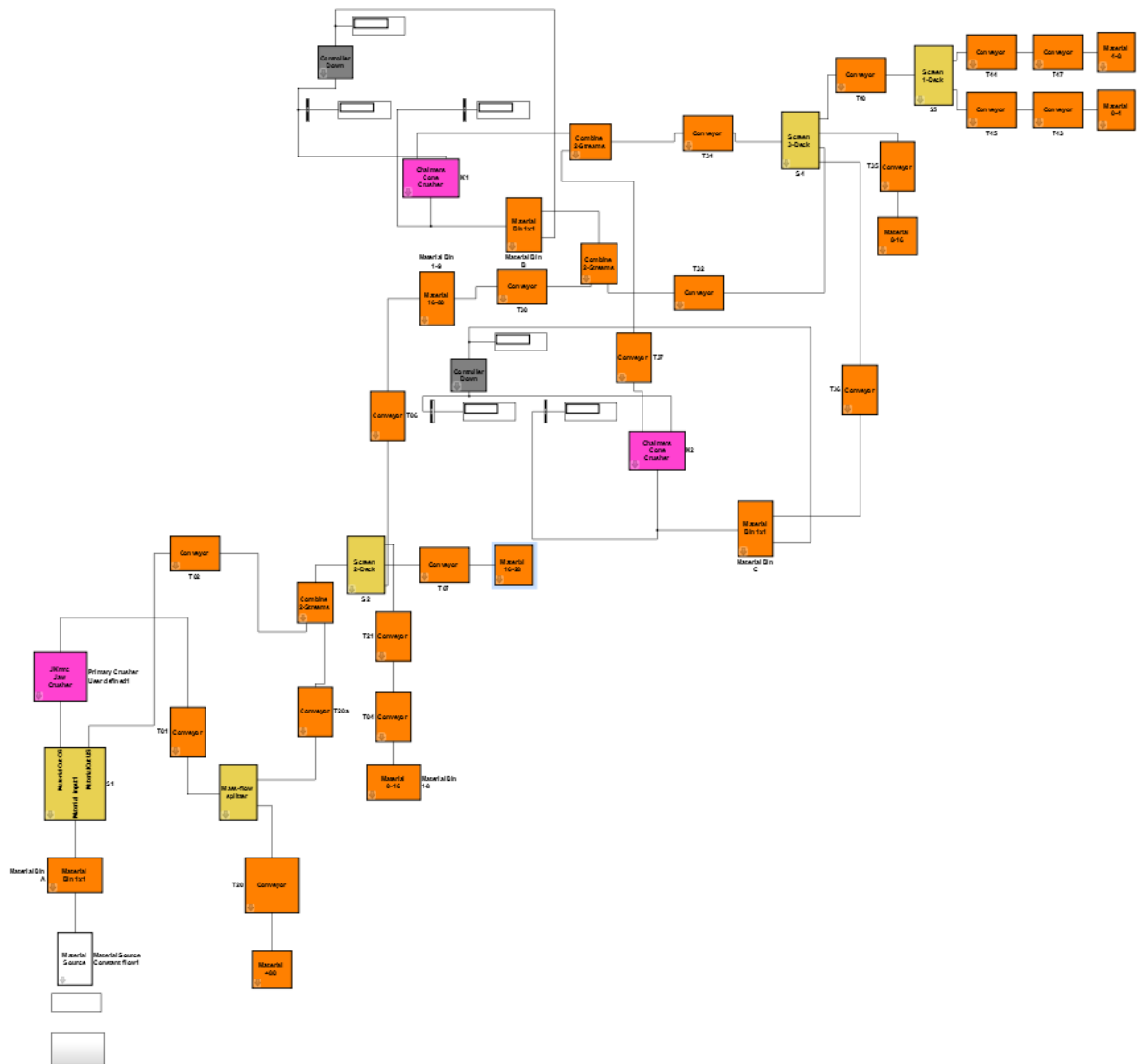
Figur 10. Simulink modell för hela plattformen för NCC Stenungssund



Figur 11. Simulink modell för hela platformen för Swerock Vändle.



Figur 12. Simulink modell för hela platformen för Skanska Önnestad.

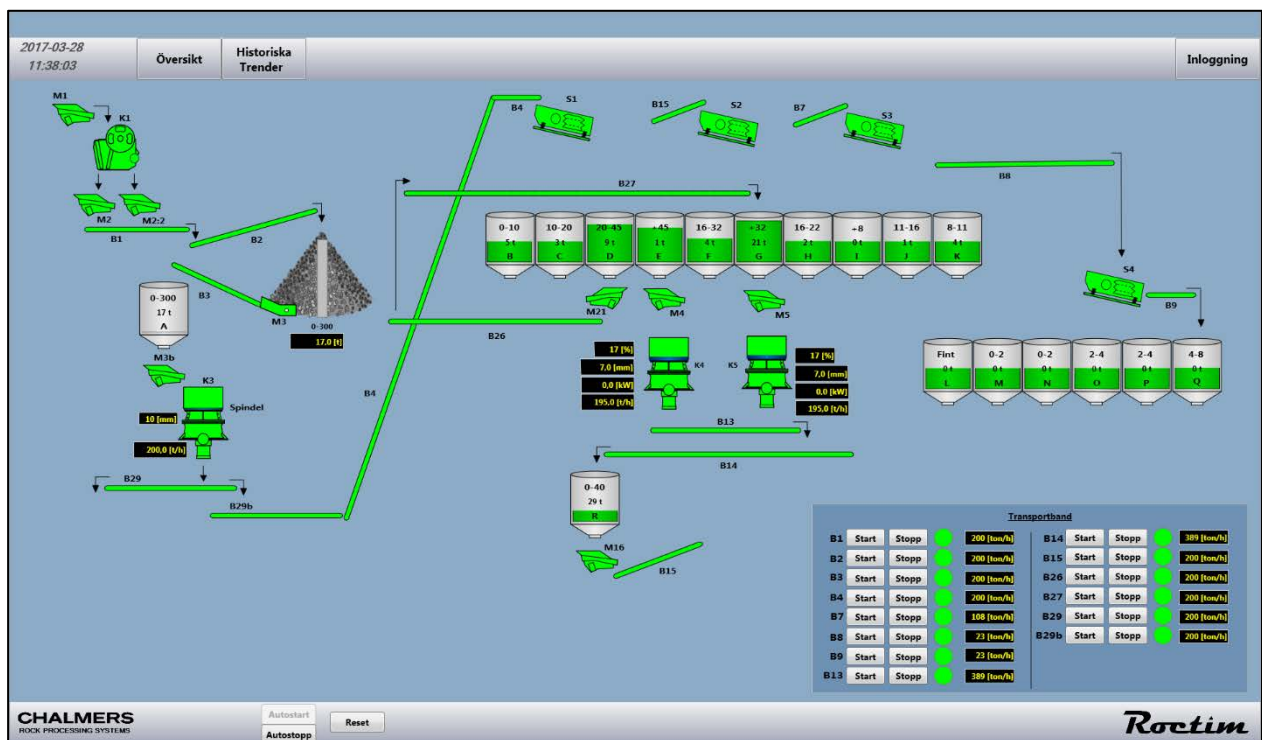


Figur 13. Simulink modell för hela plattformen för Jehander Riksten.

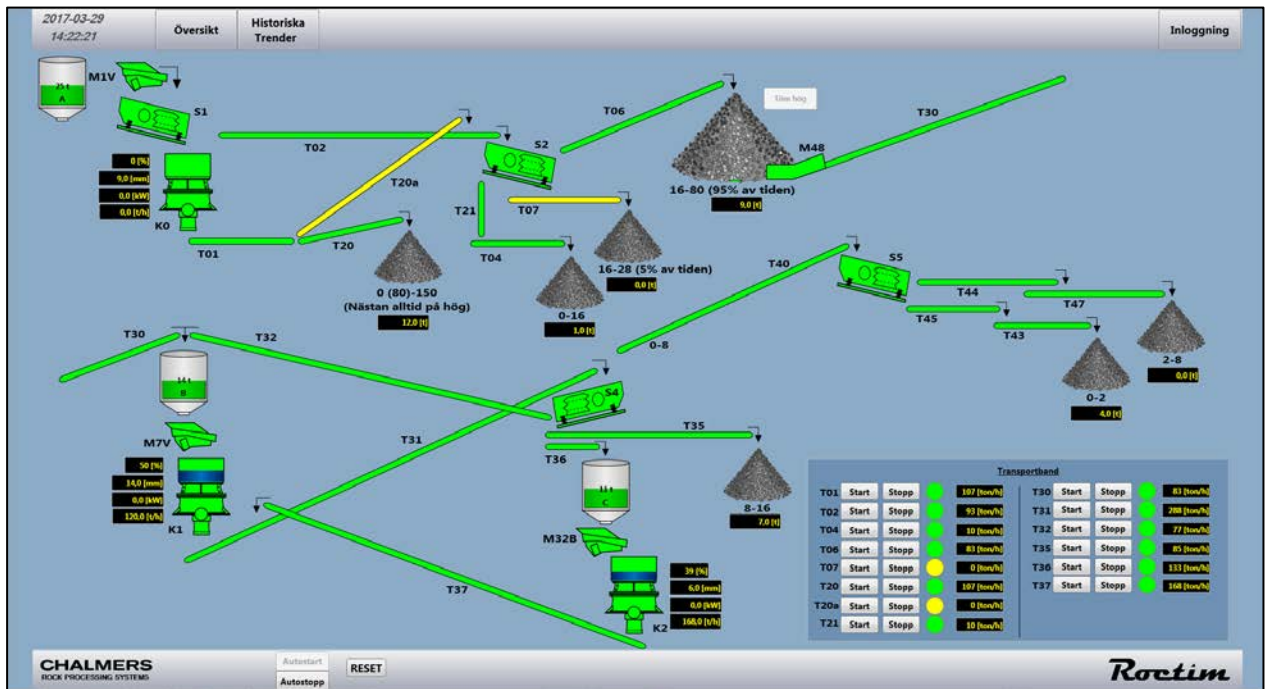
Interface

Fördelen med plattformen är att det inte krävs någon hög teknisk kunskap och tidigare erfarenhet med Matlab Simulink för att kunna ta del av hur den fungerar eller för att kunna ändra olika inställningar för de olika maskinerna. Detta löses med ett användargränssnitt som bland annat visar hur olika maskiner är kopplade, hur de presterar och även hur mycket material som befinner sig i de olika fickorna på tydligt sätt. Genom att användaren klickar på de olika modulerna kan de få upp detaljerad info om dess status och även val att ändra de kritiska parametrarna för den valda maskinen.

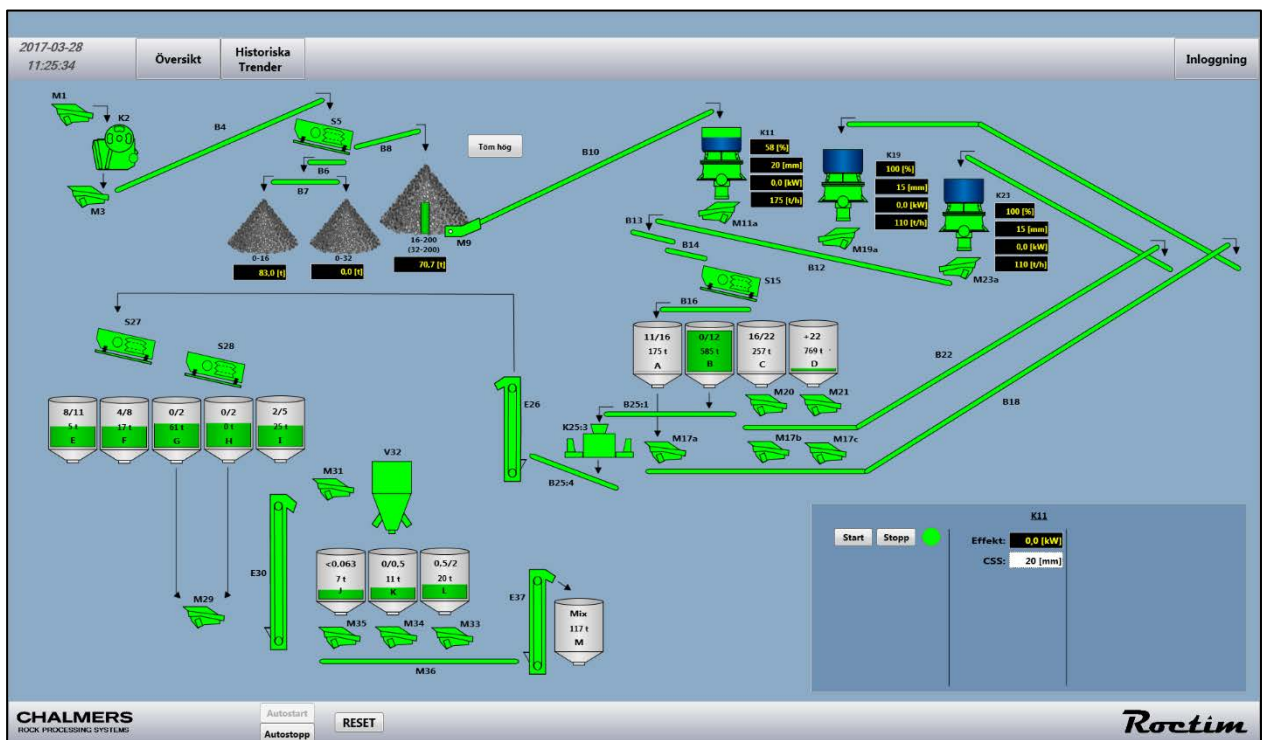
Varje täkt har sitt eget interface och kan ses i Figur 14, Figur 15, Figur 16 och Figur 17. Det som möjliggör denna typ av koppling mellan användaren och mjukvaran är en OPC-server som läser av och lagrar de intressanta värdena. Dessa läses av interfacet och presenteras till användaren.



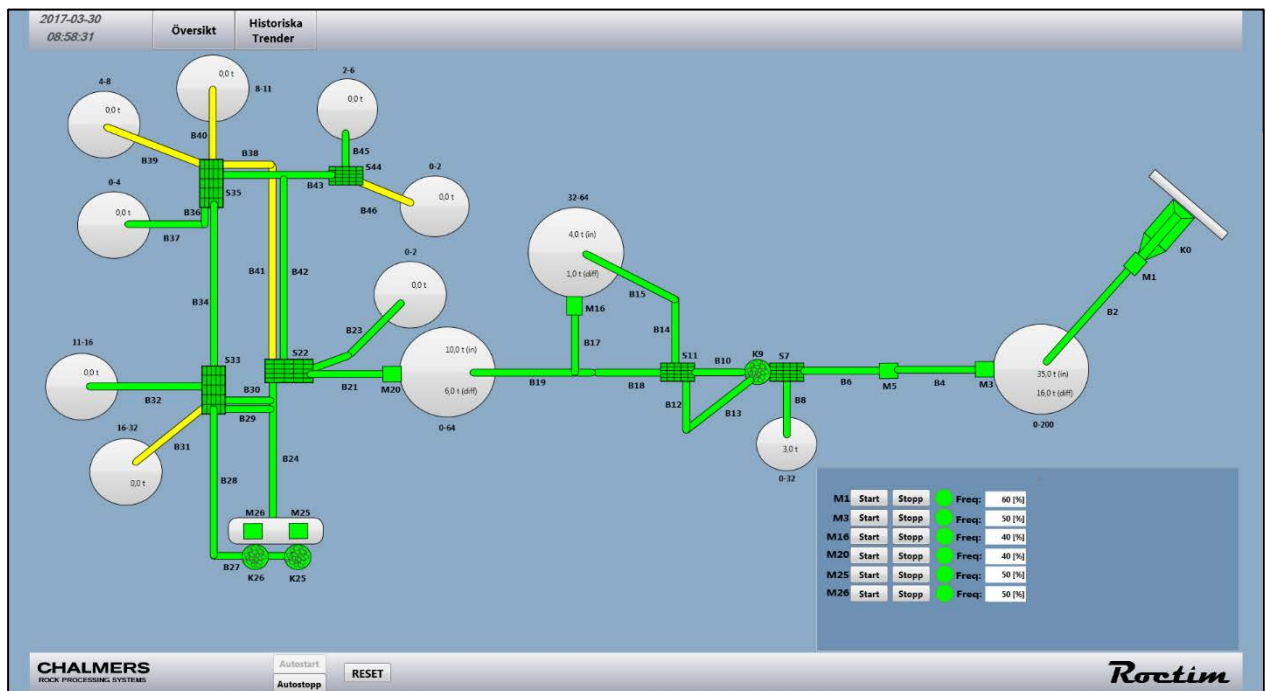
Figur 14. Interface för Skanska Önnestad.



Figur 15. Interface för Jehander Riksten.



Figur 16. Interface för NCC Stenungssund.



Figur 17. Interface för Swerock Vändle.

Resultat

Resultatet är att möjligheten för företagen att simulera sina processer har stärkts. Varje år under projektets gång har en operatörsträning genomförts som en del av Sveriges Bergmaterialindustris (SBMI) kurs Produktion I. Deltagare, oftast operatörer, arbetsledare och nya platschefer har då själva fått prova på att styra in anläggning och kunna se saker som inte går att mäta/övervaka i realtid i verkliga processer idag. Företagen har provat att logga in och simulera men använder ännu inte projektresultaten i sin kontinuerliga verksamhet. Särskilt LCA-modulen blev uppmärksammas och kring det sidoprojektet har det nu skapats fortsättningsprojekt. Målet att företagen skall planera och simulera mer lever vidare.

Två doktorander, Ali Davoodi och Simon Grunditz, har arbetat med försök och modellering. Dr. Gauti Asbjörnsson har arbetat med den tidsdynamiska modelleringen och simuleringarna (samt kopplingen till systerprojektet LCA-modul till krossimulator). Forskningsingenjör Anton Hjalmarsson har skapat simuleringsmöjligheter, inloggningar och gränssnitt. Dr. Erik Hulthén har varit projektledare och handledare. Dr. Magnus Evertsson har varit huvudhandledare och leder forskargruppen.

Projektet har haft en styrgrupp med följande medlemmar: Monica Soldinger Almefelt (Swerock), Pär Johnning (NCC), Stefan Swestlén (Jehander), Magnus Franzen (Skanska), Johan Siikavaara (LKAB), Per Murén (NCC/MinBaS/SBUF) och Jan Bida (MinBaS/MinFo). Styrgruppen har haft ett tiotal möten, de flesta via Skype och några i verkligheten (Göteborg, Kiruna och Göteborg).

Diskussion

Dagens ballastproduktion drivs fortfarande på samma sätt som under de senaste 50 åren. Modern styrning och information om vad som vänder i processen håller på att introduceras, men det tar tid. Varje täktägare strävar efter att producera den bästa kvalitén av produkter och samtidigt minimera produktion av sorteringar som inte går att sälja. Med hjälp av den utvecklade simuleringsplattformen är det möjligt för täkterna att simulera sin produktion och på detta vis förbättra sin produktion utefter vad marknaden efterfrågar. Genom att använda sig av mjukvaran kan man undvika att köra tækten under dåliga förhållanden och på detta vis inte förlora några ton på grund av ineffektiv produktion.

En annan stor fördel med att kunna ställa upp tækten i simuleringsplattformen är att om man är ute efter att eliminera en flaskhals kan man testa hur en ny kross eller sikt skulle bete sig innan man köper den. Detta kan spara både pengar och minimera antalet problem som en ny maskin kan skapa när den implementeras i en krosskrets. Potentiellt kan det även expanderas till att användas vid planerandet av en ny täkt och kan på liknande sätt minimera problemen och optimera tonnaget. Ett exempel på detta är bytandet av siktsäll vilket tar lång tid att genomföra i anläggningen men som endast tar några minuter i simuleringar för att se resultatförändringen.

En nackdel med simuleringsplattformen som den ser ut idag är att det krävs en del studier hos täkterna för att skapa bra kopplingar mellan modellerna och anläggningen. För tillfället finns fyra stycken tåkter i full skala och ju fler tåkter som undersöks desto mer lär vi oss hur olika maskiner i olika konfigurationer gör det möjligt att förbättra både de enskilda modellerna och även simuleringsplattformen i sin helhet.

Framtida arbete

Efter att modeller, plattformar och interface har blivit klara behövs de demonstreras hos företagen. Dels för att säkerställa att alla flöden i processen är korrekta men också för att kunna genomföra validering hos de olika täkterna. Tack vare dessa steg kan man med säkerhet säga hur stor skillnad det är mellan produktionen i tækten i verkligheten jämfört med dess simulering i plattformen och ökar dess tillämpbarhet.

Det andra syftet med demonstration av simuleringsplattformarna är att visa företagen hur plattformen fungerar och vilka fördelar det har som ett verktyg. De positiva aspekterna som plattformen medför kommer troligen skapa en efterfrågan hos företagen att expandera plattformen till fler tåkter. Dessutom kan plattformen användas som ett planeringsverktyg för nya tåkter.

I plattformen finns det ett flertal olika modeller över de maskiner som finns på anläggningarna. I detta arbete har fokus legat på sikt maskiner och VSI krossar. Dessa modeller presterar väl för tillfället på dessa specifika tåkter men det finns vissa aspekter och fenomen som inte fångas i de nuvarande modellerna. Till exempel är det oklart hur partiklarna slits ned när de träffar partikelbädden i VSI-krossen och hur siktdukens material påverkar dess effektivitet. Därför kommer de under 2017 att fortsätta utvecklas och öka deras tillämpbarhet.

Ett annat exempel på vidareutveckling av processen kan vara att köra simuleringar under snabbare tidssteg, t.ex. 20 simulerade sekunder per verklig sekund. En snabbspolnings funktion skulle göra det lättare att testa olika tåkters långtidsprestanda. Detta ligger inte i ramen för detta projekt men ses som en klar framtida utveckling av plattformen.

Publikationer

Paper A:

Davoodi, A., Hulthén, E., Bengtsson, M., Evertsson, C.M., *DEM Modelling and Simulation of Banana Screen Classification Efficiency*, 10th International Comminution Symposium (Comminution '16). 2016: Cape Town, South Africa

Paper B:

Davoodi, A., Hulthén, E., Bengtsson, M., Evertsson, C.M., *Analysis of Screening Performance Using Discrete Element Modelling*, Minerals Engineering Symposium (Minerals Engineering '17). 2017: Luleå, Sweden

Paper C:

Davoodi, A., Hulthén, E., Bengtsson, M., Evertsson, C.M., *The effect of different aperture shape and material of screen deck on screening efficiency*, 11th International Comminution Symposium (Comminution '18). 2018: Cape Town, South Africa

Paper D:

Prediction of Collision Energy in the VSI Crusher - **Simon Grunditz**, Carl Magnus Evertsson, Magnus Bengtsson, Erik Hulthén

Paper E:

The Effect of Rotor Tip Speed of a Vertical Shaft Impactor on the Collision Energy Spectrum - **Simon Grunditz**, Carl Magnus Evertsson, Magnus Bengtsson, Erik Hulthén

Tack

Vi vill tacka VINNOVA, Minfo (Ellen, Walter & Lennart Hesselmanns Stiftelse för Vetenskaplig Forskning) och SBUF för sitt finansiella stöd. Tack också till medverkande företag och projektdeltagare.