

Slutrapport för fas I av Modellering och simulering av dynamiskt beteende i krossanläggningar

MinFo projekt
SBUF forskningsprojekt nummer: 12501

Gauti Asbjörnsson, doktorand
Erik Hulthén,Handledare
Magnus Evertsson, projektledare

Chalmers tekniska högskola
41296 Göteborg



CHALMERS

Sammanfattning

Doktorandprojektet modellering och simulering av dynamiskt beteende i krossanläggningar initierades under 2010. Projektet följer projektbeskrivningen och fas I har nu avslutats. Projektet har fått finansiering från SBUF och från MinFo (*Ellen, Walter och Lennart Hesselmanns stiftelse för vetenskaplig forskning*). Under 2012 har utveckling av en simulator och modeller i MATLAB/Simulink fortsatt. Initiala tillämpningar av simulatoren visar stor potential, speciellt inom processoptimering och operatörsträning.

Resultatet av projektet är att det nu finns en plattform för dynamisk simulering av krossanläggningar. Tillämpningar för den dynamiska simulatoren har provats inom alla de tre områden som pekades ut i projektbeskrivningen 2010: Anläggningssimulering, Optimering av realtidsoptimeringsalgoritmer samt Operatörsträning. Inte minst operatörsträningen som nu börjar ta form och till och med blir ett inslag i SBMIs Produktion I utbildning tack vare detta forskningsarbete.

Forskarstudierna har lästs enligt plan. I början av 2013 genomfördes Gauti Asbjörnssons Licentiatexamen. Licentiatuppsatsen är bifogad. Forskningsarbetet fortsätter nu mot en doktorexamen för Gauti Asbjörnsson och arbetet kommer fortsätta inom de tre utpekade områdena, se ny projektbeskrivning för fas II.

Innehållsförteckning

Inledning.....	4
Projektet	4
Referensanläggningar	5
Uppkomna resultat	7
Simulatorn	7
Modellutveckling: Kross- och slitagemodell	8
Modellutveckling: Material flöde.....	8
Processoptimering	9
Operatörsträning	12
Licentiatuppsats.....	13
Vetenskaplig publicering.....	13
Forskarskola	14
Institutionstjänstgöring	14
Kommande arbete	15

Inledning

Första delen av projektet startade i september 2010 och avslutades 1 februari 2013 med en teknologie licentiatexamen för Gauti Asbjörnsson. Den första delen var finansierad av MinFo och *Ellen, Walter och Lennart Hesselms stiftelse för vetenskaplig forskning* samt av SBUF. De medverkande industriparterna bidrar också med en stor del i form av egeninsatser.

Andra delen av projektet startade nu direkt efter Gauti Asbjörnssons Licentiatexamen och kommer fortsätta fram till årsskiftet 2015-2016. Även för den andra delen kommer finansieringsmedel sökas från MinFo och *Ellen, Walter och Lennart Hesselms stiftelse för vetenskaplig forskning* samt från SBUF. Projektet kommer drivas med en doktorsexamen som mål. Sedan 1993 har tio doktorandprojekt inom krossning och siktning av bergmaterial med maskin- och processperspektiv startats vid Chalmers tekniska högskola.

Projektet

I krossanläggningar är det vanligt att dynamiska effekter uppstår som en konsekvens av transienta och diskreta händelser. Maskiner startas och stoppas mer eller mindre oplanerat vilket skapar ojämna flöden. Resultatet kan bli att virtuella flaskhalsar skapas i anläggningen trots att de enskilda maskinerna har en mer än tillräcklig kapacitet. Problemet kan jämföras med trafikstockningar som uppstår vid trafikljus.

I projektet utvecklas dynamiska modeller för krossar, siktar, lager, fickor, matare och transportörer. Dessa modeller kommer i sin tur att utnyttjas i en simulator som är kapabel att simulera en krossanläggnings dynamiska uppträdande. Med hjälp av simulatoren kan

- Förluster och cirkulerande laster minimeras och kanske helt elimineras
- Planering av produktionen ske
- Val av mindre maskiner görs vid projektering, så kallad ”down-sizing”
- Lagernivåer optimeras vid drift och inför stopp
- Operatörer tränas genom koppling mot operatörsgränssnitt (HMI-system)

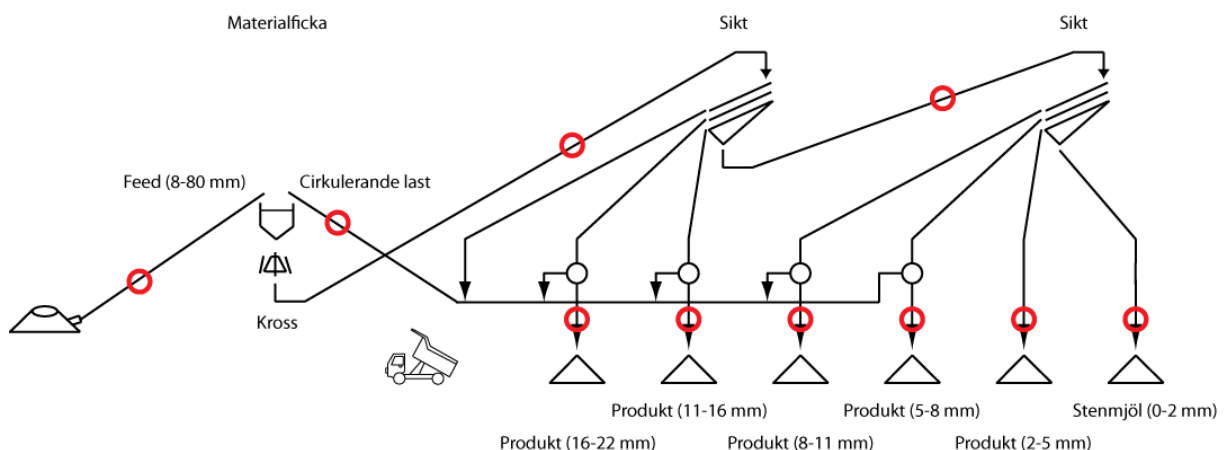
Referensanläggningar

För validering av simuleringarna har tre referensanläggningar använts. Alla tre lider av dynamiska effekter som påverkar produktionen på ett eller annat sätt. Initial validering utfördes på NCC:s anläggning i Glimmingen utanför Uddevalla, se Figur 1. Anläggningen är särskilt lämplig då de flesta transportörer är installerade har flödesmätning som är från ett tidigare projekt utfört av Dr. Erik Hulthén. Dessutom är anläggningen relativt ny (från 2007), vilket gör att konditionen på utrustningen är god och därmed finns det förutsättningar för bra mätningar.



Figur 1. Tredjesteget i NCC:s anläggning Glimmingen utanför Uddevalla. I mitten ses krossen och till höger de två siktarna.

Bandvågarna på denna försöksanläggning ger större möjlighet att följa vad som sker i krossen genom att uppdelningen av partikelstorleksfördelningen har fått en högre upplösning. Detta har gjort det möjligt att kartlägga ändringarna på partikelstorleksfördelningen med hänsyn till ändrat spalt på grund av slitage. Processlayouten och mätpunkter kan ses i Figur 2.



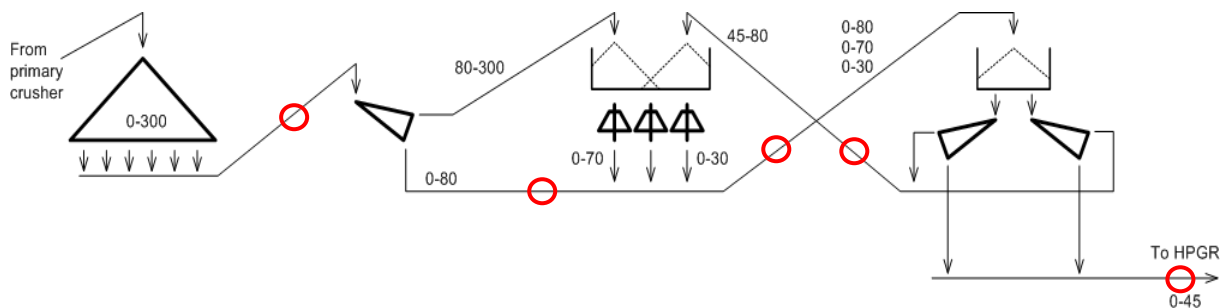
Figur 2. Bilden visar processlayouten i försöksanläggningen Glimmingen. De materialflöden som mäts med effektbandvågar är markerade med röda ringar.

Den andra referensanläggningen som har använts under projektet är en Anglo Platinum krossanläggning på en platinagruva utanför Mokopane i Limpopo i Sydafrika (MNC – Mogalakwena North Concentrator), se Figur 3 och Figur 4.



Figur 3. Torra krossprocessen för Mogalakwena North Concentrator (MNC). Krossarna är placerade till höger om mitten och siktarna är längst till höger.

Denna anläggning har haft problem med dynamiskt beteende sedan den togs i bruk 2008. Design och tillverkning av anläggningen är baserad på tumregler och steady-state simuleringar och enligt tidigare simuleringar skulle anläggningen kunna presterar runt 1400 tph. Men från början kunde den bara uppnå runt 50% av förväntad kapacitet och vissa delar blev så överbelastade att anläggningen gick i baklås. Då implementerade AngloAmerican en Model Predict Control (MPC) -algoritm som stabiliserade anläggningen något men den störs fortfarande av instabilitet och variationer.



Figur 4. Bilden visar processlayouten i försöksanläggningen Mogalakwena. De materialflöden som mäts med effektbandvägar är markerade med röda ringar.

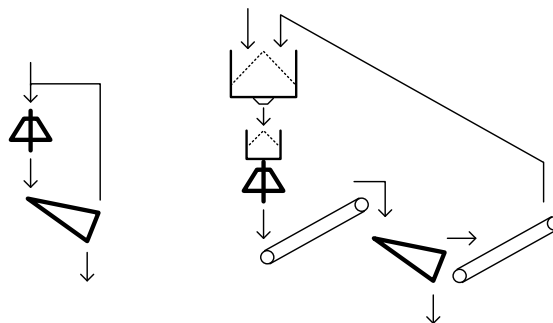
Den tredje anläggningen som har använts under året är en ballastanläggning som drivs av Jehander i Riksten nära Stockholm. Den är lik NCC anläggningen i Glimmingen på många sätt. Anläggning är utrustad med frekvensstyrd HP-typ kross som gör att varvtalet kan justeras under drift vilket till viss mån kan kompensera för att spalten inte kan justeras under drift. Två siktare används för att sortera produkten från krossen och alla band är utrustade med flödesmätare. Skillnaden mellan de två anläggningarna ligger i hur anläggningarna är styrda och hur stora fickor det är ovanför krossarna. En väldigt liten ficka och hysterese-feedback kontroll gör processen väldigt ostabil och oförmögen att hålla viss prestanda på process



Figur 5. Del av processen i Riksten och flödesschemat för observerade steget på den infogade bilden till höger.

Uppkomna resultat

Under projektet har det arbetats framförallt med utveckling av modeller till simulatören och med tillämpningsförsök inom de olika områden. Arbetet har fokuserats på de områden som kan dra nytta av möjligheten att kunna representera det dynamiska beteendet som kan uppstå i anläggningar. Dessa är processimuleringar för ostabila processer, processoptimering och operatörsträning.



Figur 6. Principskillnaden mellan modelleringen av en anläggning för Steady-state (till vänster) och Dynamisk simulering (till höger).

Simulatören

Projektets början användes en färdig programvara för dynamiska simuleringar, SysCAD. Men i takt med ökade krav på simuleringarna har mer fokus lagts på att utveckla egna modeller och strukturer vilket är enklare att implementera i MATLAB/Simulink. Men att flytta fokus från befintliga programvaror till egenutvecklad basstruktur ökar både kraven på djupare kunskap på de olika produktionsenheterna i processen och flexibiliteten med simuleringarna och användning av simulatören. I de första simuleringarna som har gjorts återskapas dynamiken som uppstår i Glimmingen och i fallet Mogalakwen är syftet att återskapa effekten som skapas på grund av dynamiken. I samband med simuleringarna i Mogalakwena har metodiken för att

identifiera och analysera ett problemområde utvecklast parallellt. Simulatoren är ett verktyg och utan definerat tillgångsätt riskeras ofullständiga simuleringsresultat. Genom att analysera processen systematiskt kan variabler som med största sannolikhet skulle resultera i förbättrad kapacitet identifieras.

Modellutveckling: Kross- och slitagemodell

Slitage på maskiner är ett väl utforskat område, även om det är så komplext att mycket fortfarande är okänt. Dock är det sällan inkluderat i anläggningssimuleringar. Första steget i att utveckla egna modeller var att observera och mäta slitage i en HP4-kross i Glimmingen och skapa en dynamisk modell som kunde förutsäga vilken påverkan ökad spalt har på produkten.

Slitagemodellen baserades på Swebrec-funktionen och implementerades och testades med mjukvaran Syscad som är simuleringsmjukvara för både steady-state och dynamiska simuleringar. Modellerna validerades mot data från en dag där tre olika simuleringsscenarios kördes och jämfördes med den verkliga datan. Först utfördes steady-state-simulering, sedan dynamisk simulering med kalibreringsförfarandet (avbrottet i produktionen) och sist dynamisk simulering med slitagefunktionen implementerad.

Den dynamiska simuleringen med slitage visade sig stämma med bara 7.2% avvikelse jämfört med den verkliga kapaciteten av anläggningen medan det två andra scenarion steady-state och dynamiskt med kalibreringar visade 17.5% resp. 15.0% avvikelse mot den verkliga kapaciteten.

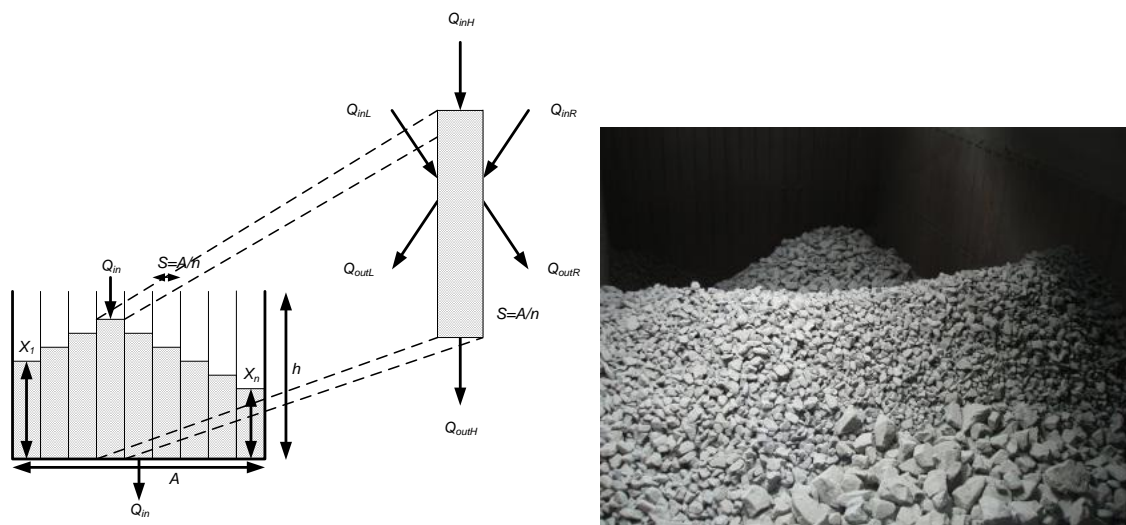
Modellen och simuleringar presenterades på *Computational Modelling '11* i Falmouth i juni 2011 och har accepterats för publicering i en specialutgåva av *Minerals Engineering*.

Modellutveckling: Material flöde

När det kommer till dynamiskt beteende spelar materialflödet stor roll. Under besök i krossanläggningen på platinagruvan i Mogalakwena uppmärksammades att en stor del av problemet med att köra anläggningen stabilt uppkommer på grund av materialfickorna.

Precis som på många anläggningar är krossarna matade från två olika håll med grovt material och fint material (retur). Det som är speciellt med den här layouten är att material matas ut från tre olika ställen på fickan; grovt material på en matare, fint på en annan och en kombination på den tredje. På grund av storleken av fickan finns det tre nivå mätare som skickar signaler till anläggningens SCADA system.

Inga modeller finns som är lämpliga för att representera det som händer i fickan med materialflöde, segregering, högar med material och blandningar. Den utvecklade modellen, se Figur 7, bygger på segment som är definierade av användarna och reagerar på placeringar av inmatning, utmatning och rasvinkel. Partikelstorleksfördelningen hålls också reda på i de olika segmenten. Under våren 2012 gjordes valideringsexperiment med bra resultat. Modellen presenteras på *XXVI International Minerals Processing Congress* i New Delhi i september 2012.

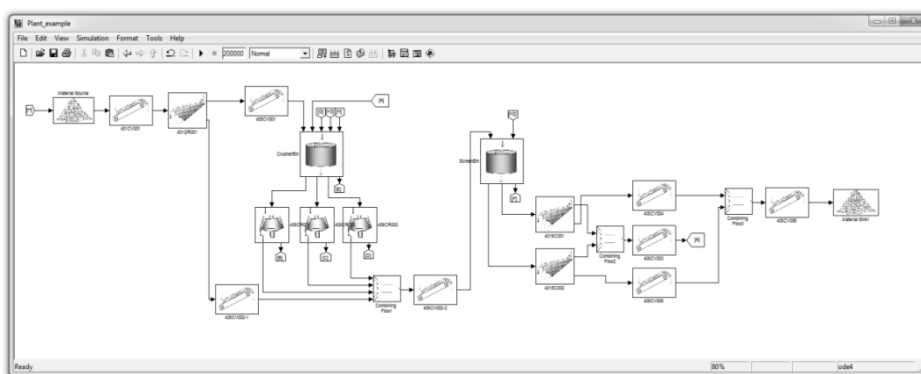


Figur 7. Till vänster visas modellen för materialfickor och till höger ett exempel på hur det kan se ut i stora materialfickor.

Processoptimering

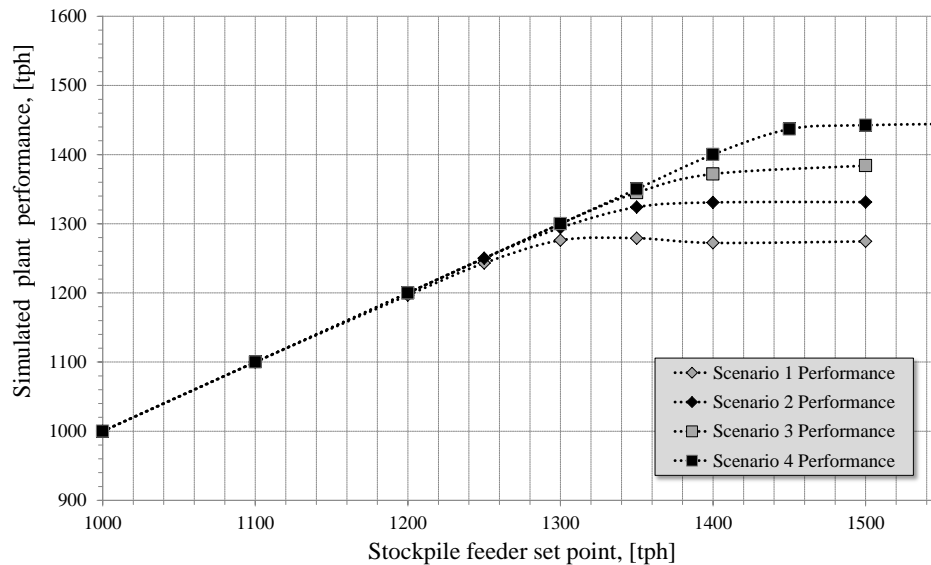
Hur processen är styrd kommer till stor del att påverka anläggningens prestanda. Tre ganska olika processer har undersökts vilka alla påverkas på ett eller annat sätt av styrningen av flödet genom anläggningen. Dessa anläggningar är Anglo Platinum Mogalakwena (2011), NCC Glimmingen (2012) and Jehander Riksten (2012).

I samband med simuleringarna i Mogalakwena, se Figur 8, har metodiken för att identifiera ett problemområde och analysera detsamma utvecklats parallellt. Simulatoren är ett verktyg och utan ett definerat tillgångsätt riskeras ofullständiga simuleringsresultat. Genom att analysera processen systematiskt med en korrelationsmatris och ishikawa-diagram kan variabler som med största sannolikhet skulle resultera i förbättrad kapacitet identifieras. Med tiden kommer denna processen automatiseras och då kommer fler faktorer kunna analyseras.



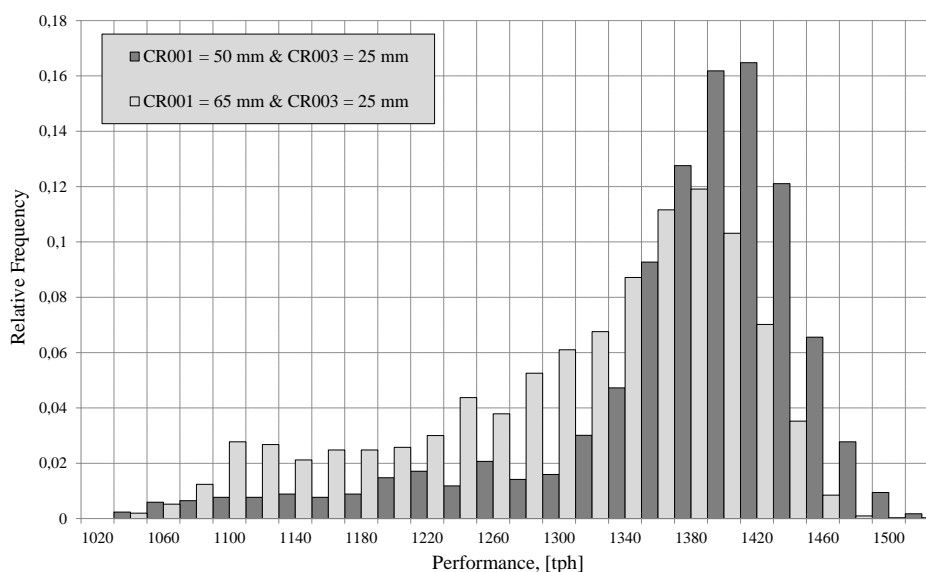
Figur 8. Flödesschema över anläggningen i Mogalakwena i den utvecklade simulatoren i Simulink.

För att studera effekten av ändrade parametrar konstruerades tvåfaktors ”factorial design” - försök upp. Två parameterar varierades från låg nivå till hög nivå för att validera deras effekt från befintlig uppsättning av anläggningen. Var för sig resulterade det i 4.7 % resp 8.2% ökning i kapacitet, kombinerad effekt blev dock 13.3%.



Figur 9. Medel anläggningsprestanda för det olika scenariots.

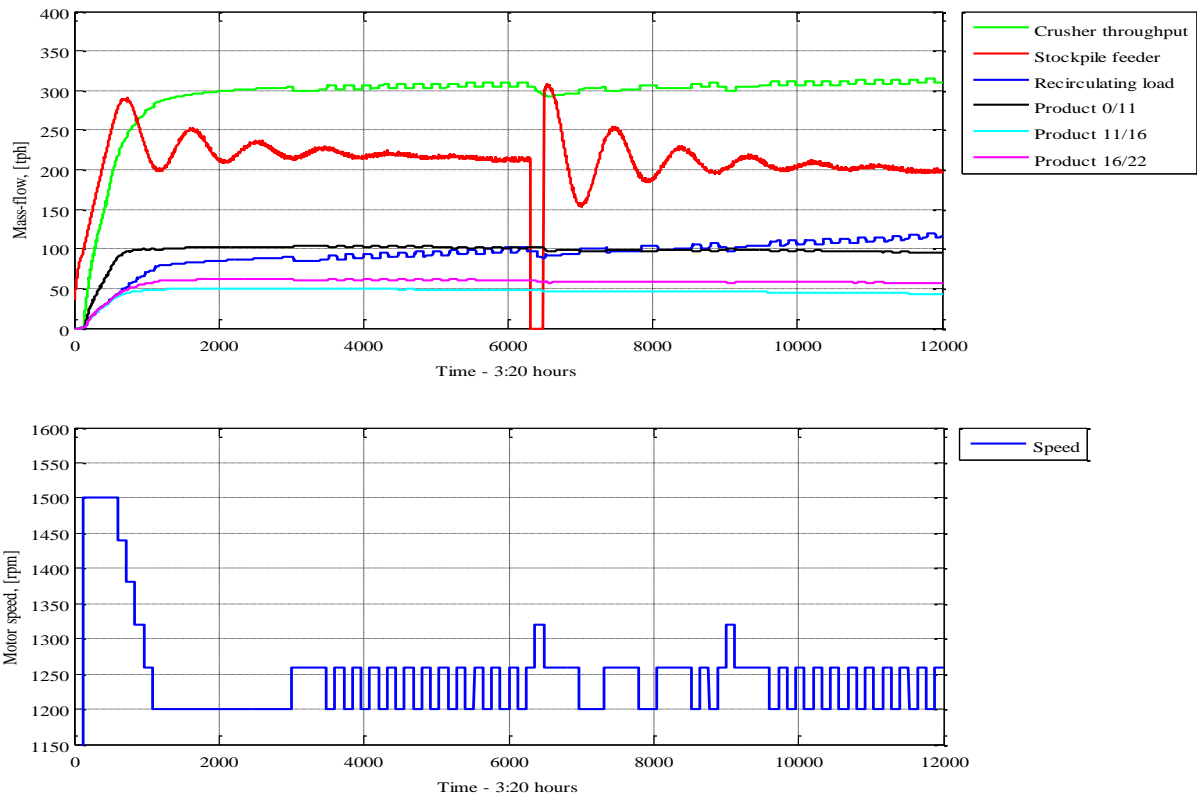
För att validera resultaten från simuleringarna då utfördes experimenten. Experimenten innebar återskapande av scenario 1 och 2. I simuleringarna så beräknas skillnaden mellan dem 4.7%. I experimenten så beräknas skillnaden vara 4.9%. Skillnaden i det två experimenten kan ses i Figur 10



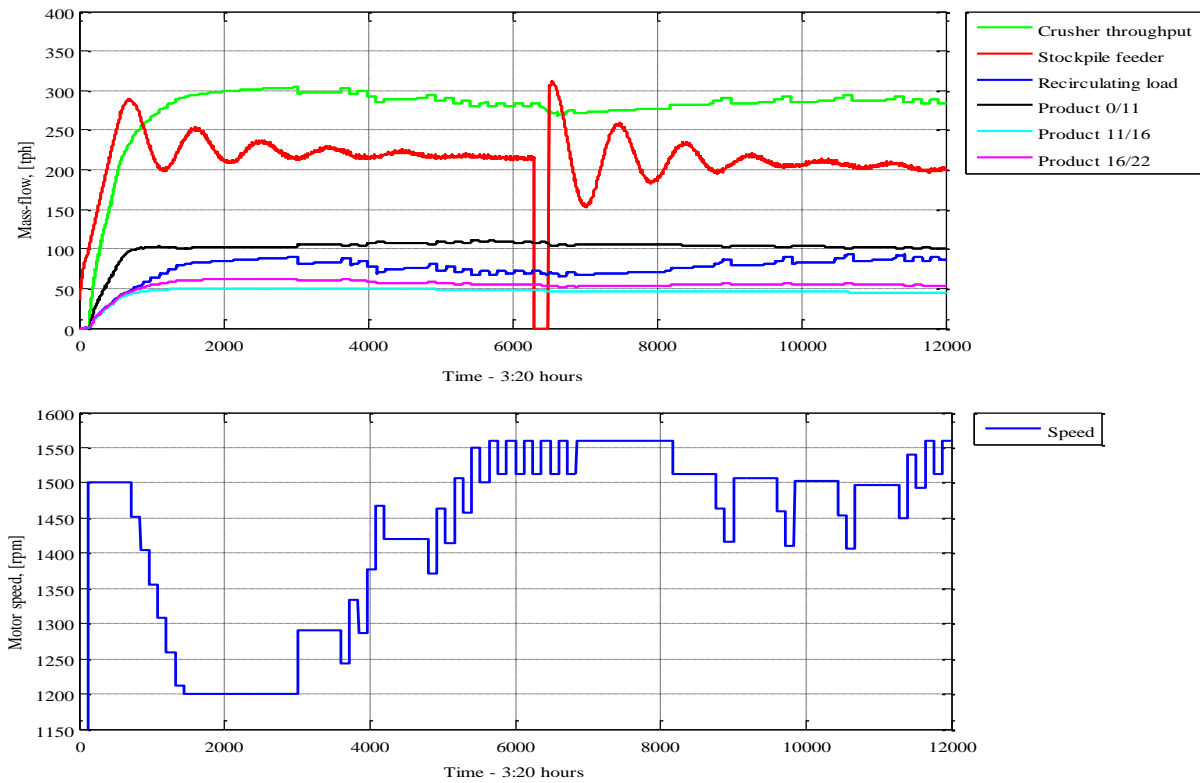
Figur 10. Resultat från valideringsexperimenten.

Resultaten och metodiken från dessa simuleringar presenteras på *Comminution 12* i Cape town, Sydafrika i april 2012.

För processoptimering i NCC Glimmingen har styralgoritmen som redan tidigare använts för att reglera varvtalet på HP4 krossen optimeras med hjälp av den dynamiska simulatoren och en genetisk algoritm. Med MATLAB-modell av varvtalsregleringen implementerad i Simulink-modellen av anläggningen kunde optimala inställningar av parametrarna i varvtalsregleringen lokaliseras med genetiska algoritmen inom ett specificerat intervall.

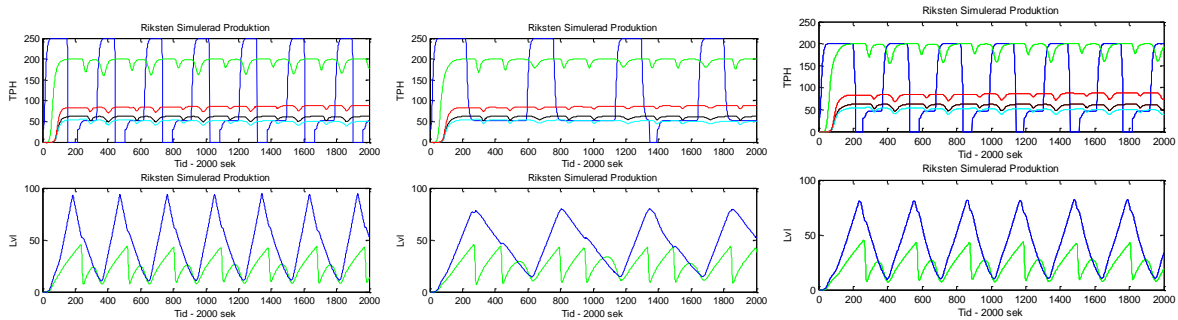


Figur 11. Simuleringsresultat med befintliga inställningar i NCC Glimmingen.

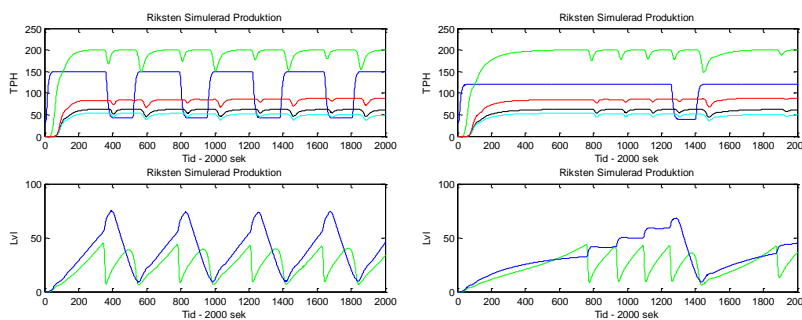


Figur 12. Simuleringsresultat med optimerade parametrar i NCC Glimmingen.

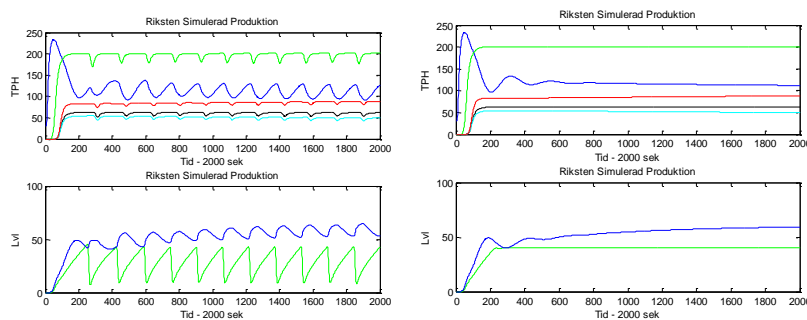
För processoptimering av en Jehanderanläggning i Riskten utvärderades alternativa lösningar för att styra matarna från materialhög och materialfickan ovanför krossen. I befintlig lösning används av/på reglering som gör att det blir svårare att hålla processen stabil och i vissa situationer kan mataren till krossen inte förse krossen med tillräckligt mkt material. Simuleringsresultaten från alternativa angreppssätt visas i figur 8 – 10.



Figur 13. Övre bild visar massa på transportband och den nedre bilden visar nivå i ficka och kross. Massflöde som i befintligt läge (Vänster). Storleken på fickan ändrat från 6 m³ till 12 m³ (Mitten). Massflöde minskad till 200 tph in i anläggningen (Höger)



Figur 14. Massflöde minskad till 150 tph in i anläggningen (Vänster). Massflöde minskad till 110 tph (Höger)



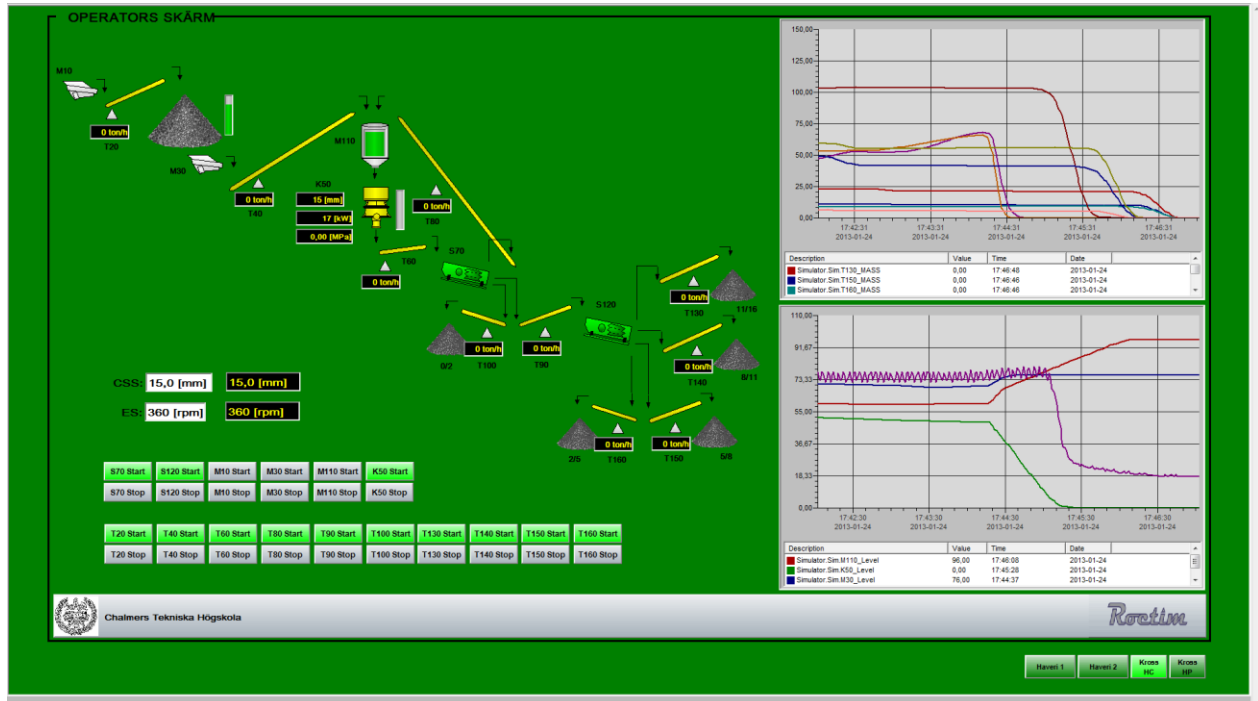
Figur 15. PI reglering införd på matare under stockpile (Vänster). Reglering ovanför kross också justerat (Höger)

Operatörsträning

Under våren 2011 byggdes en struktur upp (fysiskt och datastruktur) för operatörtrum på Chalmers som är tänkt för utveckling av operatörsträning och fjärrstyrning av anläggningar.

Under hösten 2012 fortsatte det arbetet med utveckling av ett web-baserat operatörgränssnitt där operatörer kan interagera med simulerade processen i operatörtrummet. I januari 2013 utfördes det första demonstrationsträningen under en halv dag på SBMIs grundutbildning för

en publik på ca 25 personer. Under den tiden visades konsekvenserna av hur ändringar på krossens inställningar påverkar processen och två olika haverier som kan upptäckas på olika sätt utifrån den typen av haveri, haverier som inte sätter igång larm förrän processen blir helt låst.



Licentiatuppsats

I licentiatuppsatsen är arbetet utförd under första fasen i doktorandprojektet modellering och simulering av dynamiskt beteende i krossanläggningar sammanfattad. Licentiat uppsatsen är bifogat med denna rapport.

Vetenskaplig publicering

Som en del i arbetet mot att erhålla en akademisk doktorsexamen skickas artiklar in för publicering i vetenskapliga granskade tidskrifter:

1. *Modelling and dynamic simulation of gradual performance deterioration of a crushing circuit – including time dependance and wear*, Presenterats på Computational Modelling '11 som ägde rum i Falmouth, England 2011. Artikeln har blivit publicerad i in special utgåva av *Minerals Engineering*.
2. *Modelling & Simulation of dynamic crushing plant behavior with MATLAB/Simulink*. Presenterats på Minerals Engineering's konferens Comminution '12 som ägde rum i Sydafrika i april 2012 och förkortad version presenterades på Minerals Engineering 2012 i Luleå i februari 2012. Artikeln har blivit accepterad för special utgåva av *Minerals Engineering*.

Minerals Engineering ger ut ett specialnummer med artiklar från konferenser efter att konferenserna har ägt rum. Fördelen är att man kan få feedback under konferensen och att resultaten är färska. *Minerals Engineering* är en högt rankad vetenskaplig tidskrift.

3. *Tuning of Real-Time algorithm for Crushing plants using a Dynamic Crushing Plant Simulator*, Presenterats på Minerals Engineering's konferens Comminution '12 som ägde rum i Sydafrika i april 2012.
4. *Modelling Dynamic Behaviour of Storage Bins for Material Handling in Dynamic simulations*, Presenterats på XXVI International Mineral Processing Congress som ägde rum i Indien i September 2012.
5. *Training Simulator for Crushing Plant Operators*, Presenterats på XXVI International Mineral Processing Congress som ägde rum i Indien i September 2012.
6. Medförfattare till *Optimisation Opportunities for High Pressure Grinding Rolls Circuits*, Presenterats på 11th AusIMM Mill Operators' Conference som ägde rum i Tasmania i oktober 2012

Dessutom har ett Abstract till ytterligare artikel blivit godkänt för en Konferens. *An On-line Training Simulator Built On Dynamic Simulations of Crushing Plants* har accepterats till 15th IFAC symposium on Control, Optimization and Automation in Mining, Mineral and Metal Processing. Två ytterligare artiklar är planerade inför European Symposium on Comminution and Classification 2012 (ESCC '13).

Forskarskola

Parallellt med själva forskningsprojektet läses doktorandkurser. För doktorsexamen krävs 60 hp utöver civilingenjörsexamendär 45 hp ska vara klara innan Lic. Ämnena för kurserna varierar från allmänna såsom informationssökning, etik, pedagogik och vetenskapsteori till mera projektspecifika, exempelvis programmering och statistik. Sedan 2010 är Gauti Asbjörnsson även inskriven i den nationella forskarskolan ProViking.

Avklarade och pågående kurser	Datum	hp
Introduktionsdag	11-12-05	1.5
Introduktionskurs PV01	11-02-06	5.0
Vetenskapligteori PV02	12-07-02	5.0
Presentationsteknik PV03	11-03-24	5.0
Forskningsmetodik PV51	Pågår	7.5
Informationssökning och informationshantering	10-10-15	3.0
Etik, Vetenskap och samhälle	11-12-17	3.0
Teaching, Learning and Evaluation	12-12-11	3.0
Statistisk försöksplanering TM	12-11-05	7.5
SIMACS – Module IV	11-10-24	10.0
Mediaträning	11-01-18	0.0
Simulink For System and Algorithm Modelling	10-08-18	1.0
Model Management and Verification in Simulink	12-05-10	1.0

Summa avklarade kurser

52.5 hp

Institutionstjänstgöring

Institutionstjänstgöringen (de 15 % av doktorandtjänsten som ej är finansierade av projektet) utgörs främst av undervisning för teknologer. Eftersom forskningen inom krossar vid Chalmers har sin bas i ämnet maskinelement är det främst i grundkursen Maskinelement undervisning sker. För 2012 har ingen institutionstjänstgöring utförts för att underlätta forskningen och skrivandet av Licentiatuppsatsen. Undervisning i Integrerad konstruktion och tillverkning (IKOT) och maskinelement är planerad inför 2013.

Kommande arbete

Under våren 2013 kommer att det skrivs artiklar till de två konferenserna ESCC '13 och IFAC som pågår i augusti respektive september.

Under året kommer utveckling av simulatören fortsätta och nya tillämpningar undersökas. Ytterligare simuleringar kommer att utföras i samarbete med Mogalakwena som del av det nyformade Global Comminution Colloborative (GCC) som ett samarbete mellan Chalmers och University of Cape town. Dessutom kommer utvecklingen av operatörsträningen fortsätta med vidareutveckling av operatörsrummet och webbaserad operatörsträning.

Bilagor:

Projektbeskrivning Dynamik i krossanläggningar, fas II (2013-02-11)

Licentiatuppsats Modelling and Simulation of Dynamic Behaviour in Crushing Plants