



Slutrapport

Realtidsoptimering av krossanläggningar, fas II

MinFo projektnummer: P2005-1
MinBaS II projektnummer: 1.5.1
SBUF forskningsprojekt nummer: 12035 (för fas I: 11753)

Dr. Erik Hulthén, forskare (f.d. doktorand)
Docent Magnus Evertsson, projektledare

www.crpr.se

Chalmers tekniska högskola
41296 Göteborg



CHALMERS

Sammanfattning

Konkrossar används för sönderdelning av bergmaterial inom ballast-, mineral-, och gruvindustrin. Automatiska spaltregleringssystem används ofta för att skydda krossen mot för stora laster och för att kompensera för slitage. Dessa system fokuserar på krossen, inte på produkterna som tillverkas i den.

I det här projektet har realtidsoptimering för val av varvtal och spalt på konkross under drift undersökts. Syftet har varit att ta fram teorier, modeller och mjuk- och hårdvara som möjliggör realtidsoptimering av ett krossteg. Hypotesen har hela tiden varit att ett fast börvärde i en process som varierar mycket sällan kan vara optimalt.

Varvtalet på en kross påverkar antalet kompressioner bergmaterialet utsätts för i krossen och därmed också produktens partikelstorleksfördelning. Hittills har varvtalet nästan alltid varit konstant, vilket beror på att det varit komplicerat att ändra varvtal. De senaste åren har dock frekvensomformare blivit överkomliga i pris och därmed har en möjlighet öppnats för att styra varvtalet kontinuerligt under drift.

Genom att övervaka hur mycket material som transporteras på bandtransportörer runt ett krossteg kan krossens arbete utvärderas kontinuerligt med utifrån de säljbara produkterna. I detta projekt har ett sätt att mäta massflödet på transportörer som utför ett lyftarbete provats. Genom att mäta den elektriska effekten på motorn kan massflödet ges med tillräcklig precision för processoptimering. Detta är betydligt mer kostnadseffektivt än att mäta massflödet med bandvågar, vilket är viktigt då produkternas massvärde är lågt, som till exempel i ballastindustrin.

För att kontinuerligt kunna leverera börvärden till krossens spaltautomatik och varvtalsstyrning har två olika algoritmer utvärderats. Algoritmerna mäter och utvärderar processen, jämför med tidigare data och med krossens begränsningar i form av hydraultryck och motorström samt beräknar börvärden utifrån detta. Algoritmen finns implementerad i ett mät- och styrsystem som utvecklats. Via detta system kan operatörer och forskare övervaka processen och sätta gränsvärden för algoritmen. Resultatet är att det går att öka prestandan på en anläggning som redan har spaltautomatik genom att låta algoritmen sätta börvärden till spaltautomatiken utifrån uppmätta materialflöden. Krosstegen som försetts med varvtalsstyrning kunde öka sin prestanda med mellan 4.2 % och 6.9 % jämfört med ett bra fast varvtal. I verkligheten var ökningen nästan 20 % eftersom ett felaktigt varvtal var valt från början. Som en bonus ökade mantellivsängden med 27 % på en av anläggningarna.

Doktorandprojektet *Realtidsoptimering av krossanläggningar* har pågått i drygt fem år och har resulterat i en doktorsexamen för Erik Hulthén. Dessutom har många publiceringar i internationella tidskrifter och presentationer vid konferenser och branchdagar gjorts.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Motiv	3
Organisation	4
Referensanläggningar	5
Uppnådda resultat.....	5
Flödesmätning	5
Styrning av spalt i process med återkoppling.....	5
Varvtalsstyrning	6
Algoritmer	7
Publikationer	7

Motiv

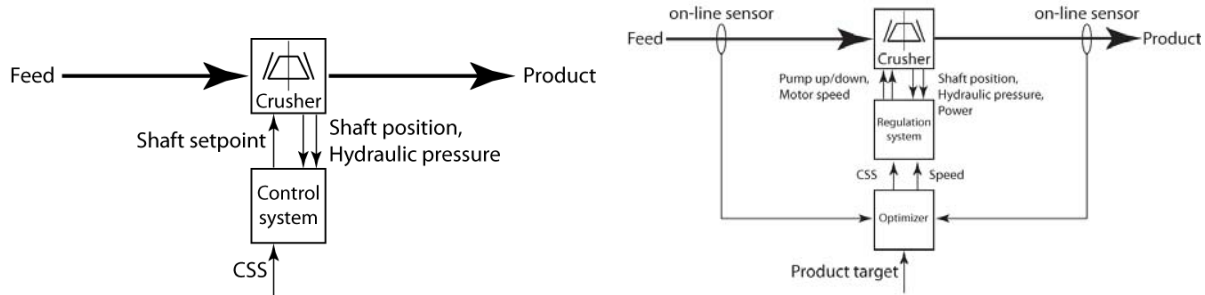
Att krossa berg är en komplex process bland annat på grund av att det inte enkelt går att tillverka enbart den produktstorlek man önskar i en kross. Istället erhålls en hel serie med partikelstorlekar på samma gång. Det som ytterligare komplicerar processen är att många saker varierar, bland annat det ingående materialet både i storlek och i kvalitet. Dessutom slits många maskindelar, framförallt siktar och krossmantlar, vilket också påverkar processen.

Det finns dock maskinparametrar som är justerbara under drift. Den maskinparameter som vanligen ändras under drift är spalten. Dock sker detta oftast utan återkoppling. För krossar vars spalt justeras genom att överdelen vrids i gängor måste dock oftast materialflödet stoppas när spalten justeras, vilket ger ett kort avbrott i produktionen. Konkrossar körs i de allra flesta fall med ett fast varvtal, oftast standardvarvtalet, under hela sin livslängd (25 år). Detta beror på att det är relativt omständligt att ändra varvtal samt att det är svårt att mäta effekten av varvtalsförändringen. Justering av varvtalet sker oftast genom att man byter remskivor antingen på krossen eller på krossens motor. De senaste decennierna har kraftelektronik i form av frekvensomformare blivit avsevärt billigare, vilket gjort att de numera är lättare att motivera. Med kraftelektronik kan en asynkronmotors varvtal ändras steglöst under drift genom att den elektriska frekvensen ändras.

Eftersom konkrossar arbetar i processer är det svårt att ta analysera deras arbete under drift. Det bästa sättet som finns att tillgå idag är att stanna processen hastigt och ta bandprover, både före och efter en förändring som man vill mäta. Problemet är att processen varierar och att spridningen är stor, vilket gör att förändringar är svåra att se vid enstaka stickprov. Ett typiskt bandprov innehåller endast information om krossens prestanda under 0.5 sekunder. Dessutom delas sådana bandprover oftast ner till till exempel en sextondel för att underlätta laborationssiktningen, vilket gör det ännu svårare att se förändringar. Dessutom kräver laborationssiktningen tid och manuellt arbete. Då resultatet från analysen blir klart har de flesta parametrar i anläggningen hunnit ändras flera gånger. Ett sätt att mäta storleksfördelningen är att utnyttja bandvågar före och efter en sikt. Tyvärr är bandvågar relativt dyra, från SEK 60 000 och

uppåt. Detta har medfört att det sällan finns fler bandvågar än absolut nödvändigt, vilket har bromsat utvecklingen av sofistikerad reglering i denna typ av processindustri.

I tidigare projekt har krossar och krossanläggningar studerats ur ett statistiskt perspektiv i meningen att de fall de skall optimeras har detta skett i stationärt tillstånd. I detta projekt har det istället fokuserats på de parametrar som kan justeras under drift. Detta tillsammans med en idé om att justering av dessa parametrar borde ske automatisk har innefattats i begreppet realtidsoptimering av krossanläggningar. Operatörens roll förändras så att denne kan fokusera på vad maskinerna skall producera istället för hur, se Figur 1. Figuren fanns med redan i Magnus Evertssons avhandling år 2000. Operatörer på krossanläggningar är upptagna och kan inte bevaka en styrning utan återkoppling som beskrivits ovan lika effektivt som ett väl konfigurerat datorprogram. Ett sådant program kombinerat med lämpliga sensorer utgör en återkoppling av styrningen. Ett sådant system kräver modeller eller beslutsregler för att kunna överföra en användares önskan om ett visst material till inställningar för en maskin.



Figur 1. Konkrossar regleras idag utan återkoppling från det producerade materialet (t.v.). Ett tänkt styrsystem med återkoppling från materialet för ett krossteg (t.h.).

Organisation

Projektet startade i september 2005 och har beviljats medel från *Ellen, Walter och Lennart Hesselmanns stiftelse för vetenskaplig forskning* och MinBaS II programmet genom MinFo samt från SBUF. Projektet har drivits som ett forsknings- och doktorandprojekt vid Chalmers tekniska högskola och mynnat ut i en teknologie licentiatexamen för Erik Hulthén. Sedan 1993 har nio doktorandprojekt inom krossning och siktning av bergmaterial med maskin- och processperspektiv startats vid Chalmers.

Inom MinFos styrgrupp för Processteknik har en arbetsgrupp utsetts som tillsammans med representanter för SBUF utgjort projektets styrgrupp. Arbetsgruppen från MinFo har bestått av personer vars företag har anläggningar som kan komma i fråga för studier inom projektet. MinFos representanter i styrgruppen varit Lars Sunnebo, Nordkalk, Niklas Skoog, Sand och Grus AB Jehander och Arvid Stjernberg, Cementa. SBUF har representerats av Pär Johnning, NCC och Magnus Bengtsson, Skanska. Chalmers har representerats av Magnus Evertsson, projektledare, samt Erik Hulthén, doktorand. I styrgruppen har dessutom Marianne Thomaeus, MinFo, Per Murén, NCC/MinBaS, Jan Bida, SBMI/MinFo och Per Svedensten, Chalmers, varit adjungerade.

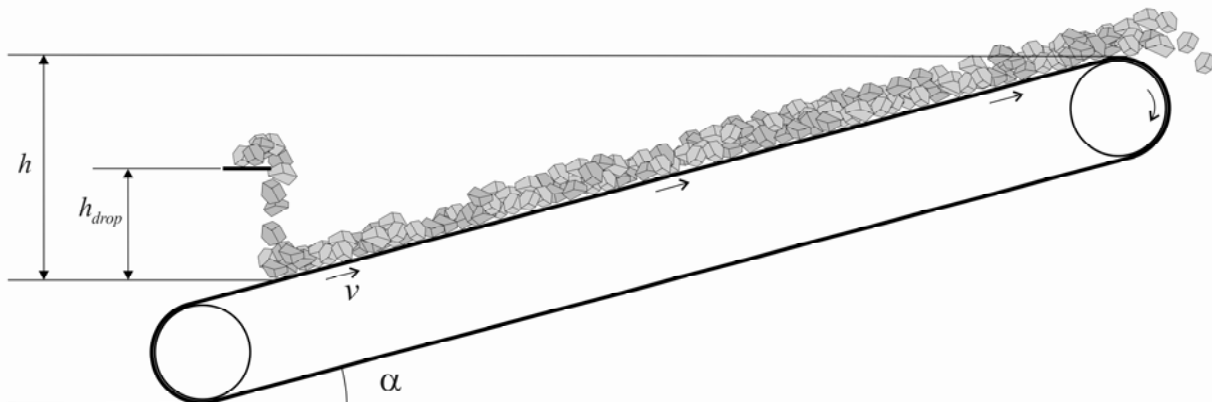
Referensanläggningar

Sand & Grus AB Jehanders anläggningar i Kålleröd (Mölndal), Fjärås (Kungsbacka) och Ludden (Norrköping) sam NCC Roads anläggning i Glimmingen (Uddevalla) har använts som referensanläggningar. I Kålleröd har de effektbaserade flödesmätarna testats. I Kålleröd finns ett väl utbyggt dataloggningssystem som förenklat valideringen av massflödesmätarna. Fjäråsanläggningen valdes för utvecklingen av algoritmerna då den är enkel och samtidigt fristående. En kross i Ludden försågs under 2007 med en frekvensomformare som sedan använts för tester med varvtalsregelring. Under projektets andra del (sedan 2008) har framförallt NCC anläggning i Glimmingen använts. Även denna har försetts med frekvensomformare och flödesmätning på tio materialflöden.

Uppnådda resultat

Flödesmätning

Genom att mäta den elektriska effekten på motorer på transportörer som utför ett lyftarbete kan materialflödet beräknas, se Figur 2. Denna princip har testats och validerats hos Jehander i Kålleröd. Resultatet var att absolutmedelfelet gentemot en traditionell bandvåg var 1.12 %. Maxfelet var 2.33 %. Utifrån dessa resultat har principen sedan använts i projektet.



Figur 2. Genom att mäta den elektriska effekten kan materialflödet räknas ut i realtid utan att någon fysisk bandvåg installeras på transportören.

Metoden lämpar sig särskilt väl för att se hur flödet ändrar sig under under en dag eller runt en processförändring. I projektet har metoden, förutom i Kålleröd, använts på 17 transportband för att avgöra hur mycket material som transporteras. Intressenterna i projektet använder idag denna princip på mer än 60 bandtransportörer.

Styrning av spalt i process med återkoppling

Försök i detta projekt med automatiskt val av spalt till en redan spaltstyrd kross har provats på en 36" Hydocone hos Jehander i Fjärås, se Figur 3. I normala fall används spaltautomaik för att hålla spalten konstant och för att skydda krossen. Genom att mäta materialflöden med ovan nämnda princip och återkopplade dessa till en algoritm i en dator kan en spalt väljas som är optimal för utfallet. Uppgiften för anläggningen var att producera 0-2 mm ballast av ett 8-80 mm material.

Biprodukten var 0-2 mm (stenmjöl) och materialet över 5 mm återcirkulerades till krossen. Detta är en tuff uppgift för krossen, som därför ofta arbetade nära sin tryckbegränsning, men trots detta lyckades en förbättring med 3.5 % i snitt uppnås.



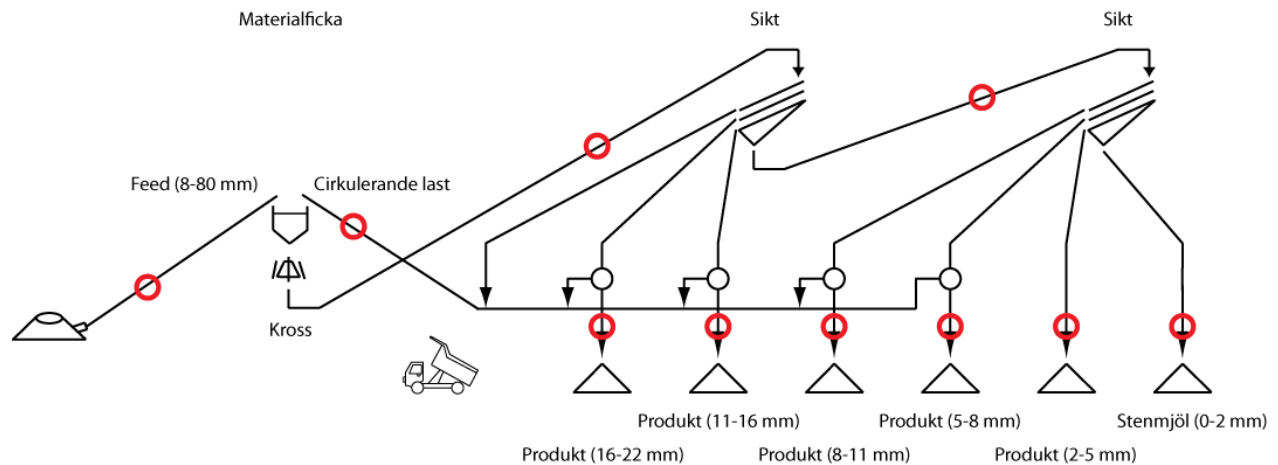
Figur 3. Jehanders krossanläggning för halkstopp i Fjärås där försöken med algoritm för val av spalt utfördes.

Varvtalsstyrning

I detta projekt har det eccentrica varvtalet på krossen införts som en processparameter. Varvtalet har länge valts i steg genom att byta remskivor, men tack vare frekvensomformare är det möjligt att justera varvtalet i realtid. Dels var arbetet med att byta remskivor omständigt, dels fanns det inte tillräckligt med mätare i processen som talade om ifall förändringen var positiv eller inte så varvtalet har i praktiken inte justerats.

Aktiv varvtalsstyrning provades först i Jehanders anläggning i Ludden på en Metso Nordberg HP300. Fyra flöden kring krossen mättes med ovan nämnda princip och analyserades automatiskt av en algoritm i en dator. Vad krossen producerade visades för operatören som valde princip för reglering av varvtalet; antingen fast, hans eget val av varvtal eller att låta algoritmen välja varvtal. Resultatet var att ett dynamiskt varvtal i snitt var 4.2 % bättre än ett bra fast varvtal. Dessutom visade det sig att mantlarna höll 27 % längre tid med det dynamiska varvtalet. Försöken var så lyckade att anläggningen inte ville byta tillbaka till fast varvtal efteråt.

I projektets andra del försågs tredje krossteget i NCC Roads anläggning Glimmingen med både frekvensomformare och flödesmätare, se Figur 4. Här upprepades försöken från Ludden. Resultatet var en ökning med 5.3 % jämfört med ett bra fast varvtal. Tack vare projektets mätningar visade det sig att anläggningens standardvarvtal var illa valt från början och prestandan från anläggningen kunde ökas med 10.8 % genom att välja ett bättre fast varvtal. De 5.3 % som det dynamiska varvtalet gav tillkommer och tillsammans har detta gett 16.7 %. För att ta med spalt och varvtal samtidigt skapades en matematisk modell för krosstegets prestanda med dessa båda parametrar som insignaler. När denna modell applicerades kunde prestandan på anläggningen ökas med ytterligare 1.6 % jämfört med algoritmen från Ludden. För anläggningen innebar detta en total ökning med 18.5 % jämfört med hur det var innan projektets försök startade.



Figur 4. Schematisk bild över testanläggningen Glimingen med alla tio mätpunkter markerade.

Algoritmer

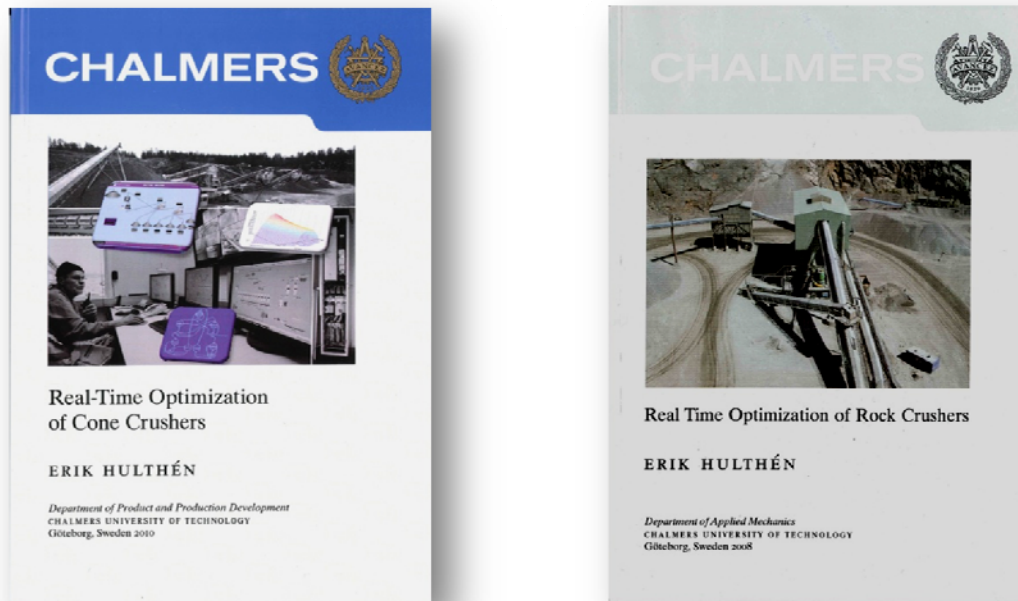
För att automatiskt kunna välja spalt eller varvtal utifrån vad som är bäst för produktionen har två olika algoritmer provats. Den första är en cellulär tillståndsmaskin (Finite State Machine, FSM). En FSM är en uppsättning regler som talar om i vilken riktning krossens parametrar skall styras. FSM-algoritmen har provats både för val av spalt och varvtal. Resultatet är som beskrivits ovan mellan 3.5 % och 5.6 %.

För att kunna ta hand om flera parametrar samtidigt har en statistisk metod för processtyrning i fullskala kallad Evolutionary Operation (EVOP) provats. Metoden har använts för att anpassa flervariabelmodellen till verkligheten under drift. Resultatet var att en förbättring motsvarande de niår som beskrivits ovan kunde ses vid varje analys.

Publikationer

Två avhandlingar har skrivits under projektets gång: en doktorsavhandling 2010 och en licentiatavhandling 2008, se Figur 5. Den 8 december försvarade Erik Hulthén sin doktorsavhandling vid en offentlig disputation vid Chalmers med lyckat resultat.

- Hulthén, Erik: [Real-Time Optimization of Cone Crushers](#). Göteborg : Chalmers University of Technology. Diss. (Doktorsavhandlingar vid Chalmers tekniska högskola. Ny serie;3131) ISBN/ISSN: 978 1 921522 28 4
- Hulthén, Erik: [REAL TIME OPTIMIZATION OF ROCK CRUSHERS](#). Göteborg : Chalmers University of Technology. (Technical report - Department of Applied Mechanics, Chalmers University of Technology, Göteborg, Sweden;2008:2)



Figur 5. En doktorsavhandling och en licentiatavhandling har publicerats inom projektet Realtidsoptimering av krossanläggningar.

Fem vetenskapliga artiklar har publicerats och presenterats:

- Hulthén, Erik; Evertsson, Carl Magnus: [Two Variable Real-Time Algorithm for Cone Crusher Control](#). *XXV INTERNATIONAL MINERAL PROCESSING CONGRESS IMPC 2010*, pp. 813-819. ISBN/ISSN: 978 1 921522 28 4
- Hulthén, Erik; Evertsson, Carl Magnus: [Real-Time Algorithm for Cone Crusher Control with Two Variables](#).
- Hulthén, Erik; Evertsson, Carl Magnus: [Algorithm for dynamic cone crusher control](#). *Minerals Engineering*, 22 (3) pp. 296-303.
- Hulthén, Erik; Evertsson, Carl Magnus: [On-line Optimization of Crushing Stage using Speed regulation on Cone Crusher](#). *Proceedings of XXIV International Mineral Processing Congress*, 2 pp. 2396-2402. ISBN/ISSN: 978-7-03-022711-9
- Hulthén, Erik; Evertsson, Carl Magnus: [A Cost Effective Conveyor Belt Scale](#). *Symposium CD-ROM 11th European Symposium on Comminution*.

Dessutom har lägesrapporter presenterats för styrgruppen regelbundet. Fyra årsrapporter (för 2005, 2006, 2008 och 2009) och två slutrapporter (en efter fas I, istället för årsrapport för 2007 och denna) har skrivits till finansörerna och styrgruppen. Presentation av projektet och dess resultat har skett regelbundet för finansörer, branschfolk och andra intressenter vid tex. MinBaS-dagen, SBMI-möten (Sveriges bergmaterialindustri) och konferenser.