

Slutrapport

Realtidsoptimering av krossanläggningar, fas I

MinFo projektnummer: P2005-1 (MinBaS II projektnummer 1.5.1)
SBUF forskningsprojekt nummer: 11753

Tekn. Lic. Erik Hulthén, doktorand
Docent Magnus Evertsson, projektledare

www.crpr.se

Chalmers tekniska högskola
41296 Göteborg



CHALMERS

Sammanfattning

Doktorandprojektet *Realtidsoptimering av krossanläggningar* har pågått i 2.5 år och har nu resulterat i en licentiatexamen. Dessutom har fyra förutsättningar för realtidsoptimering utretts. Dessa är parametrar, sensorer, mät- och styrsystem samt algoritmer.

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.

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. Det lättaste sättet att ändra varvtal på har varit att byta remskivor på motor eller kross. 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 före och efter en kross och efterföljande siktar kan krossens arbete utvärderas kontinuerligt med utgångspunkt från de säljbara produkterna. Ett sätt att mäta massflödet är med bandvågar. I denna rapport presenteras ett sätt att mäta massflödet på transportörer som utför ett lyftarbete, genom att mäta den elektriska effekten på motorn, som har visat sig ha tillräcklig precision. Detta är betydligt mer kostnadseffektivt, vilket är viktigt då produkternas massvärde är lågt, som till exempel i ballastindustrin.

Förändringar i processen är ofta svåra att se genom enstaka stickprov, och nästintill omöjliga genom mänsklig visuell besiktning. Det är då nödvändigt att mäta kontinuerligt under en längre tid och ta till statistiska hjälpmedel för att kunna utvärdera förändringen.

För att kontinuerligt kunna leverera börvärden till krossens spaltautomatik och varvtalsstyrning har en algoritm utvecklats. Denna 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. En cellulär tillståndsmaskin (FSM) har visat sig vara ett sätt att styra maskinen.

Varvtal är en viktig styrparameter som hittills inte använts aktivt på konkrossar. Genom att ändra varvtalet kontinuerligt på en kross under hela mantelns livstid har prestandan kunnat ökas med 4 %. Dessutom har mantlarnas livslängd på den aktuella krossen förlängts med mellan 25 och 30 %.

Innehållsförteckning

Sammanfattning	2
Inledning.....	4
Motiv till projektet	4
Projektet	6
Utredning av lämpliga sensorer.....	6
Processparametrar	9
Utveckling av hård- och programvara.....	10
Utveckling av algoritmer.....	11
Resultat.....	12
Referensanläggningar.....	13
Vetenskaplig publicering.....	14
Forskarskola	14
Kommande arbete	14

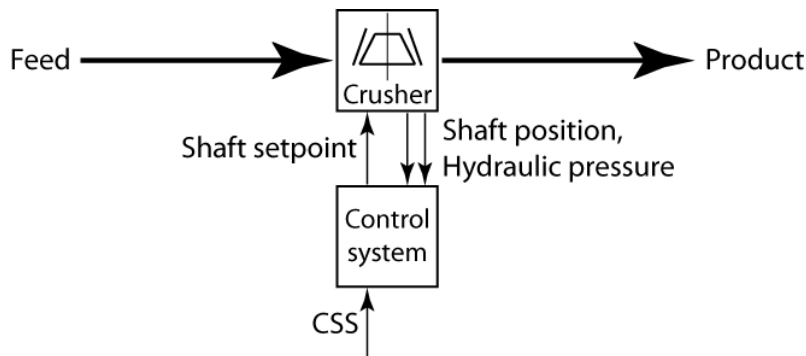
Inledning

Projektet startade formellt i september 2005 och har beviljats medel från MinFo och *Ellen, Walter och Lennart Hesselmanns stiftelse för vetenskaplig forskning* 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 sju doktorandprojekt inom krossning och siktning av bergmaterial med maskin- och processperspektiv startats här.

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 Leif Fuxin, Skanska. Chalmers har representerats av Magnus Evertsson, projektledare, samt Erik Hulthén, doktorand. I styrgruppen har dessutom Marianne Thomaeus, MinFo, Per Murén, NCC, Jan Bida, SBMI och Per Svedensten, Chalmers, varit adjungerade.

Motiv till projektet

De flesta konkrossar matas av en automatisk matare som håller mängden material i krossen inom ett givet intervall. Dessa styrs oftast av en PLC (programmable logic controller) som mäter nivån med hjälp av ljusbommar. Vissa krossar har ett eget styrsystem som hjälper till att hålla spalten mellan inner- och ytermanteln konstant samt skyddar krossen mot överbelastning. Justeringen av krossens spalt sker antingen med hjälp av hydraulik eller genom att krossens överdel vrids i gängor, beroende på maskintyp. Styrsystemet försöker oftast hålla en konstant spalt som är inställd i förhand av operatören eller, om så stor storleksreduktion som möjligt är målet, en så liten spalt som möjligt med hänsyn till krossens maxtryck och maxeffekt. Krossens styrs utan återkoppling, såtillvida att styrsystemet inte hämtar in information om mängden producerat material eller råmaterialet sammansättning, se Figur 1.



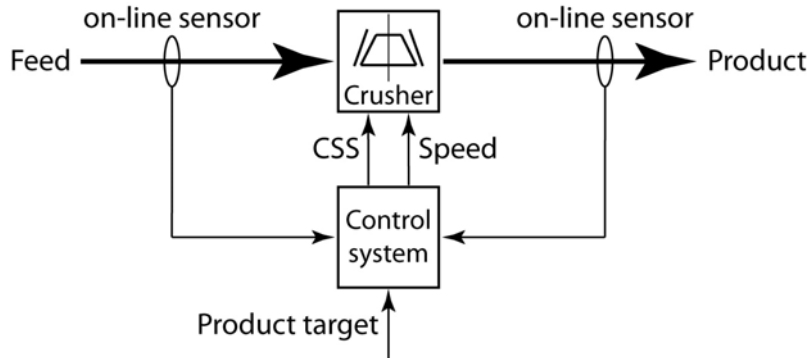
Figur 1. Konkrossar regleras utan återkoppling från det producerade materialet.

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 varierar 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, som beskrivits ovan. För krossar vars spalt justeras genom att överdelen vrids i gängor måste dock oftast materialflödet stoppas när spalten justeras, vilket i sig ger ett kort avbrott i produktionen men får transienta effekter. 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 analysa 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 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.

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, se Figur 2. Figuren fanns med redan i Magnus Evertssons avhandling år 2000. Ett sådant system kräver modeller eller beslutsregler för att kunna överföra en användares önskan om ett visst material till inställningar för en maskin.



Figur 2. Ett tänkt styrsystem med återkoppling från materialet för ett krossteg.

Projektet

Realtidsoptimering av en krossanläggning går ut på att med de fysiska förutsättningar som finns (utrustning, bergmaterial, fasta maskininställningar och givet slitage) ställa in de inställningar som går att ändra på ett så bra sätt som möjligt. En första avgränsning är att undersöka ett krossteg (en kross med eventuell efterföljande sikt samt returflöde av överkornen). Forskningen utgår från idén om att med hjälp av materialflöden runt krossen kunna mäta krossens prestanda. I projektet ingår det fyra delar som alla är beroende av varandra. Delarna är:

1. Sensorer
2. Processparametrar
3. Hård- och programvara för mätning och styrning
4. Algoritmer

och är beskrivna nedan. Under projektet har det arbetats framförallt med punkterna 1, 3 och 4. När det gäller punkt 2, Utredning om olika processparametrars regleringspotential, gjordes i projektets startskede en bedömning att krossar är de enheter som är lättast att reglera i realtid. Det vanligaste är att man reglerar krossars spalt, men även varvtalet har identifierats som en parameter på krossen som går att justera under drift, förutsatt att en frekvensomformare finns installerad.

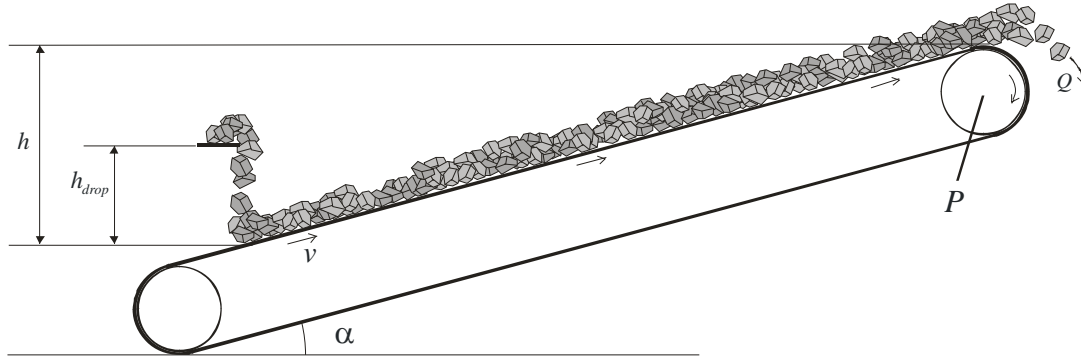
Utredning av lämpliga sensorer

En av projektets grundidéer är att bandtransportörer som utför ett lyftarbete kan användas som flödesmätare genom att man mäter dess elektriska effekt och omvandlar denna till ett massflöde. Traditionellt används bandvågar för att mäta materialflöden. Då dessa är dyra och detta medför att det är ovanligt att det finns bandvågar på alla band kring en sikt har det även undersökts om det kan finnas alternativ till bandvågar.

Många transportband på krossanläggningar utför ett lyftarbete genom att ta materialet från en höjdnivå till en högre. Effekten som behövs för att åstadkomma detta kan räknas ut teoretiskt som

$$P = \dot{m} \left(gh + v^2 + v \sin(\alpha) \sqrt{2gh_{drop}} \right)$$

där \dot{m} är materialflödet, g är gravitationskonstanten, h är lyfthöjden, v är bandhastigheten, α är transportörens lutning och h_{drop} är sträckan materialet faller innan det träffar bandet, se Figur 3.



Figur 3. Principiell avbild av en transportör med de konstanter som används för att beräkna massflödet med hjälp av den elektriska effekten.

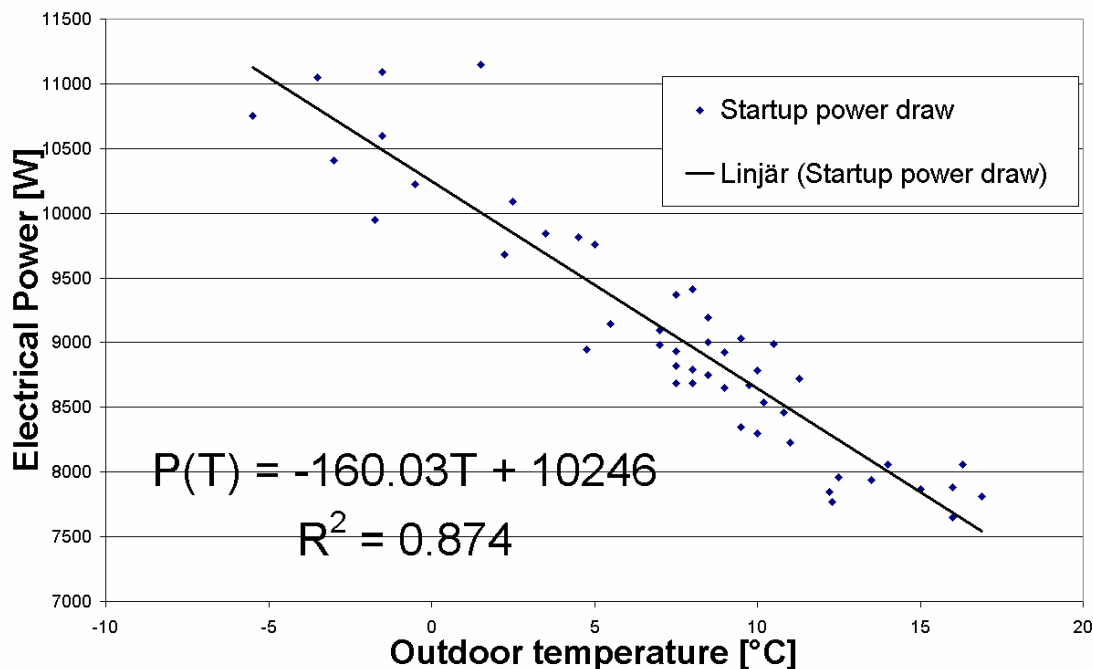
Den elektriska effekten som tillförs materialet är mätbar med elektrisk effektmätare som kan avläsas från en dator. Genom att under en tid ha studerat hur bandets tomgångseffekt varierar kan bruttoeffekten bestämmas, dvs. effekten i formeln ovan plus förluster,. Förlusterna, som förekommer i motor, remväxel, kugväxel och vid överföringen från drivrulle till bandet, kan beräknas med relativt god precision från tabeller, men ännu hellre kalibreras genom att effekten mäts då en känd massa transporteras av bandet.

Redan under projektets första år gjordes lovande försök där det tydligt visuellt kunde ses att den elektriska effekten varierade i princip linjärt med massflödet. Målet med flödesmätningen är att med tillräcklig precision kunna mäta materialflöden på transportörer som lutar. Utvärdering av principen har gjorts i december 2005 och från april till maj 2006 i Jehanders anläggning i Kålleröd. De loggade och översatta värdena från effektmätningarna kunde jämföras med motsvarande värden från en traditionell bandvåg som finns installerad på en annan transportör senare i processen. Det tar emellertid tre minuter för materialet att nå denna bandvåg från bandet med effektmätaren. Försöken i maj genomfördes så att data från ett par dagar utgjorde träningsmängd och data från en annan dag utgjorde utvärderingsmängd. Resultatet från utvärderingen är bra: ingen gång under dagen erhöles ett större fel än $\pm 3.0\%$ jämfört med den ordinarie bandvågen och ofta låg felet runt $\pm 1.0\%$, se Tabell 1. Senare har ett Student T-test utförts som visat att felet är mindre än $\pm 1.15\%$ med 95 % säkerhet.

Tabell 1. Resultatet från valideringen av bandvågarna den 4 maj 2006.

Klockslag	Massflödesmätare [ton]	Traditionell bandvåg [ton]	Avvikelse
7.00 AM	204.1	201.0	1.56%
8.00 AM	201.3	202.1	-0.38%
9.00 AM	308.5	315.3	-2.14%
10.00 AM	159.2	159.9	-0.48%
11.00 AM	163.4	164.2	-0.44%
12.00 PM	325.7	321.3	1.36%
1.00 PM	283.3	282.3	0.35%
2.00 PM	265.3	272.9	-2.76%
3.00 PM	293.5	293.8	-0.09%
4.00 PM	289.3	292.4	-1.05%
5.00 PM	315.3	313.9	0.43%
6.00 PM	276.4	274.5	0.71%
7.00 PM	275.3	280.1	-1.74%

Under arbetet hittades även ett intressant samband mellan yttertemperaturen och starteffekten på bandet. Detta samband hade en så bra korrelation som 0.874 och inkluderar temperaturer från -5° C till +15° C, se Figur 4. Alla resultaten som är omnämnda ovan samt en analys från ett maskinelementperspektiv av en bandtransportör som utför ett lyftarbete sammanfattades till en artikel som presenterades av Erik Hulthén på *11th European Symposium on Comminution* i oktober 2006.



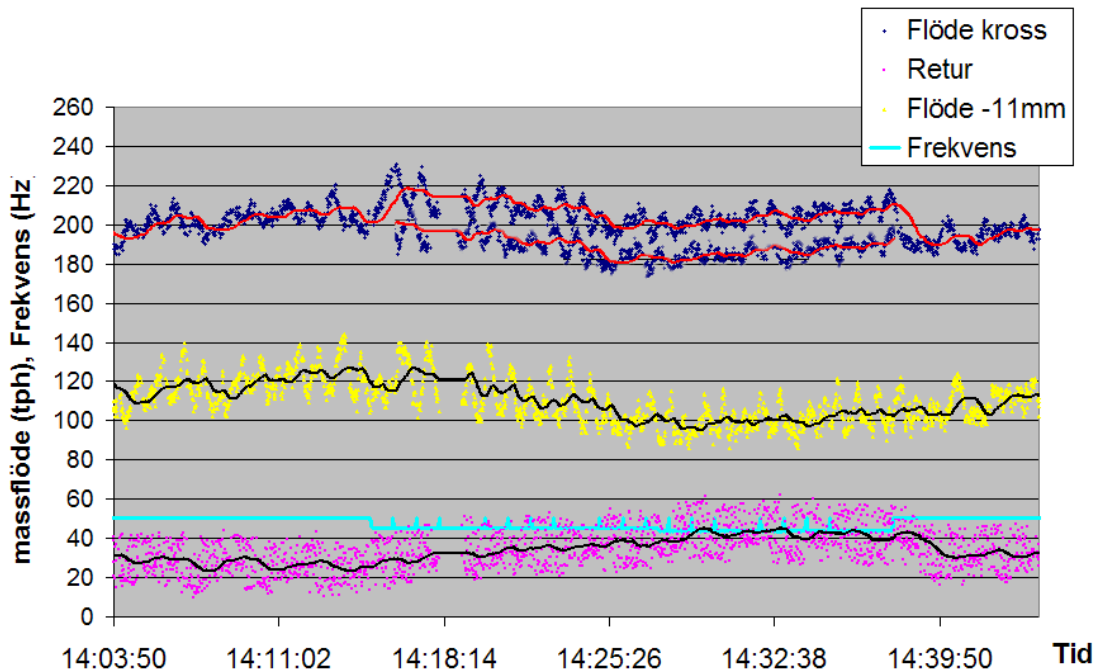
Figur 4. Samband mellan yttertemperatur (i Onsala) och starteffekten på band 1695 i Kålleröd.

Processparametrar

Den produktionsenhet som hittills varit mest i fokus regleringsmässigt är krossen. Detta beror främst på att det är relativt enkelt att justera spalten på krossar. Detta sker antingen genom att innermanteln i krossen justeras vertikalt eller genom att krossens överdel, som är gängad på utsidan, vrids. Under 2007 har potentialen för varvtalsreglering av krossar undersökts. Det är mycket ovanligt att man har frekvensomformare som medger steglös varvtalsreglering i realtid. Sand & Grus AB Jehander beslutade i slutet av 2006 att sätta in frekvensomformare i samband med ombyggnationen av sin anläggning Ludden i Norrköping. Denna omformare har övervakats med projektets övervakningsystem som är beskrivet nedan. I Figur 5 ses två exempel på varvtalsförändringar. Denna figur demonstrerar även två andra typer av variationer som förekommer och som gör det extra viktigt att mäta processen kontinuerligt istället för att ta stickprov.

Den ena är de små cykliska variationerna som ligger överlagrade i alla tre flödena. Det är variationer i processen som beror på att men matare före krossen har gått intermittent med just denna frekvens.

Den andra typen av variationer som kan störa tolkningen av resultatet är förhållandevis långsamma variationer i det ingående materialet. En sådan kan ses på kurvan som visar flödet genom krossen (blå) mellan de två varvtalsförändringarna (röda lodräta linjer). Under hela denna period minskar först kapaciteten varpå den ökar igen. Stegförändringar, först upp och sedan ner, syns ändå precis efter varvtalsändringarna. Man kan tänka sig att hela kurvan parallellflyttats uppåt med ca 20 tph.



Figur 5. Exempel på processvar från två varvtalsförändringar. För flödet genom krossen ses mellan de två varvtalsförändringarna två kurvor. Den övre är den uppmätta, dvs. stegsvaret, medan den undre är en förmodad process utan varvtalsförändringar. Som syns är skillnaden ca 20 tph.

Själva varvtalsförändringarna går ändå att se tydligt på flödet genom krossen och returflödet. När varvtalet minskas ökar flödet genom krossen liksom returflödet. Materialet hinner inte krossas lika mycket i krossen och därför ökar returflödet. De fina produkterna påverkas inte lika mycket av varvtalsförändringen.

Slutsatsen av att ha studerat olika varvtalsförsök är att varvtalet påverkar utfallet från krossen. Jämfört med spaltförändringar påverkar det inte lika mycket, men det är helt klart märkbart. Att produkterna påverkas av varvtalet tillsammans med att steglösa och kontinuerliga varvtalsförändringar nu är möjliga till ett rimligt pris gör att varvtalet kommer att vara en viktig parameter för realtidsoptimering.

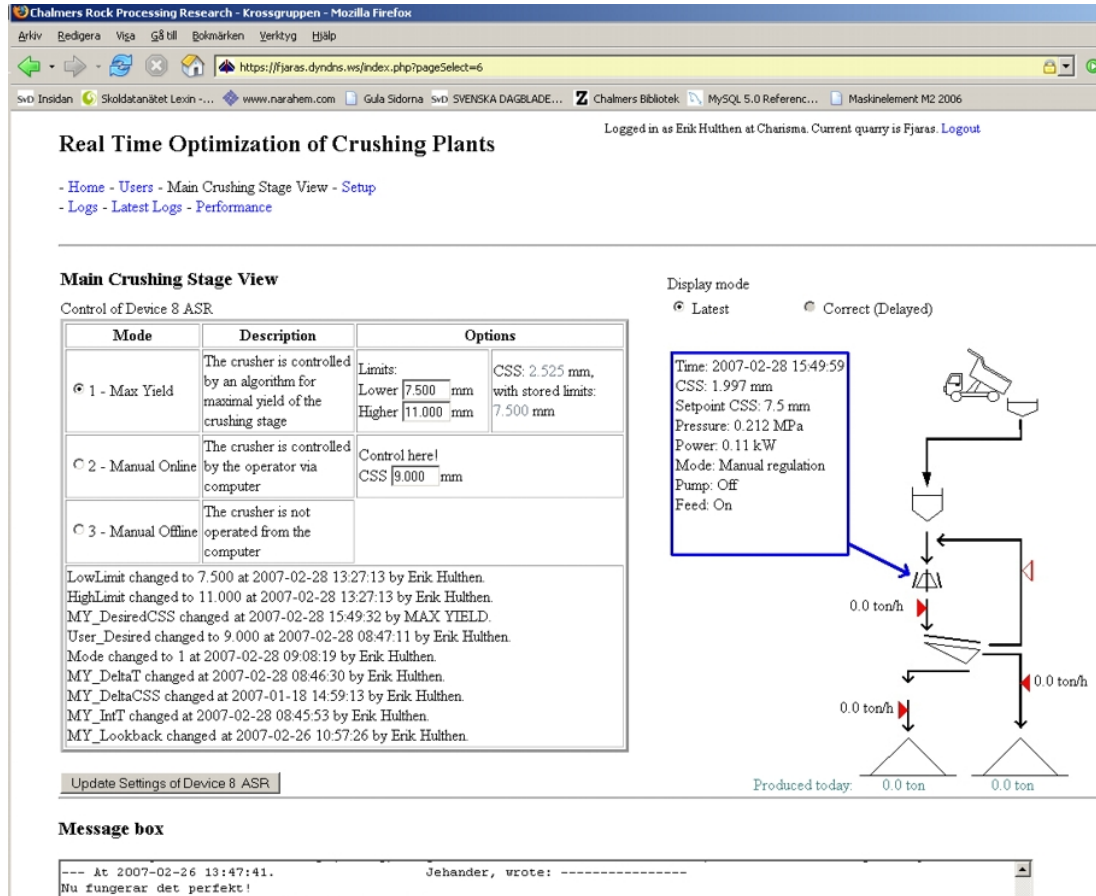
Utveckling av hård- och programvara

Då projektet startade 2005 användes en begagnad laptop (PC) som försågs med nytt operativsystem som mätdator. Då var det främst den elektriska effekten som var intressant och därför hämtades data från effektmätare som är av fabrikat och modell Carlo Gavazzi WM12-DIN. Tack vare Internetanslutningen har denna installation fördelen att den kan fjärrövervakas, exempelvis från Chalmers, genom en krypterad dataförbindelse. Effektmätarna läses av från en dator, via ett kommunikationsprotokoll (Modbus) över seriell 4-trådsförbindelse (RS-485), som lagrar mätvärden i en databas. På datorn finns även en webbserver som kan hämta data från databasen och presentera den för exempelvis en forskare.

Projektet erhöll ett kommunikationskort till styrsystemet på krossen i Fjärås av Sandvik SMC. Kommunikationskortet har gjort det möjligt att övervaka krossen och även styra densamma från datorn. Detta gjorde att en mer permanent stationering av en mätdator var önskvärd i Fjäråsanläggningen. Då lösningen med den begagnade datorn och effektmätarna från Carlo Gavazzi varit stabil kopierades därför originalsystemet till en annan begagnad laptop och monterats i ett nyinförskaffat skåp i Fjäråsanläggningen. Datorskåpet, som sitter uppe i fickan i krossteget, har en trådlös förbindelse med kontoret på platsen där Internetanslutning finns. Denna installation har gjort att sedan augusti 2006 har anläggningen kunnat övervakas via Internet.

Till Ludden har en liknande lösningen som den i Fjärås byggts, med skillnaden att krossen inte har något styrsystem utan det är den insatta frekvensomformaren som man kommunicerar med. Detta sker också via en serieport. En annan skillnad är att operatören försetts med en dator för att kunna övervaka processen. Systemet är implementerat på en industri-PC som finns placerad nära elskåpen.

Det Internetgränssnitt som möjliggör att bekvämt övervaka anläggningen har vidareutvecklats så att operatörerna på plats kan påverka vissa parametrar. En bild från systemet i Fjärås kan ses i Figur 6. Det anses viktigt att operatörerna har förtroende för systemet och projektet. Exempelvis kan operatörerna själva vara med och sätta gränser för spalt respektive varvtal.

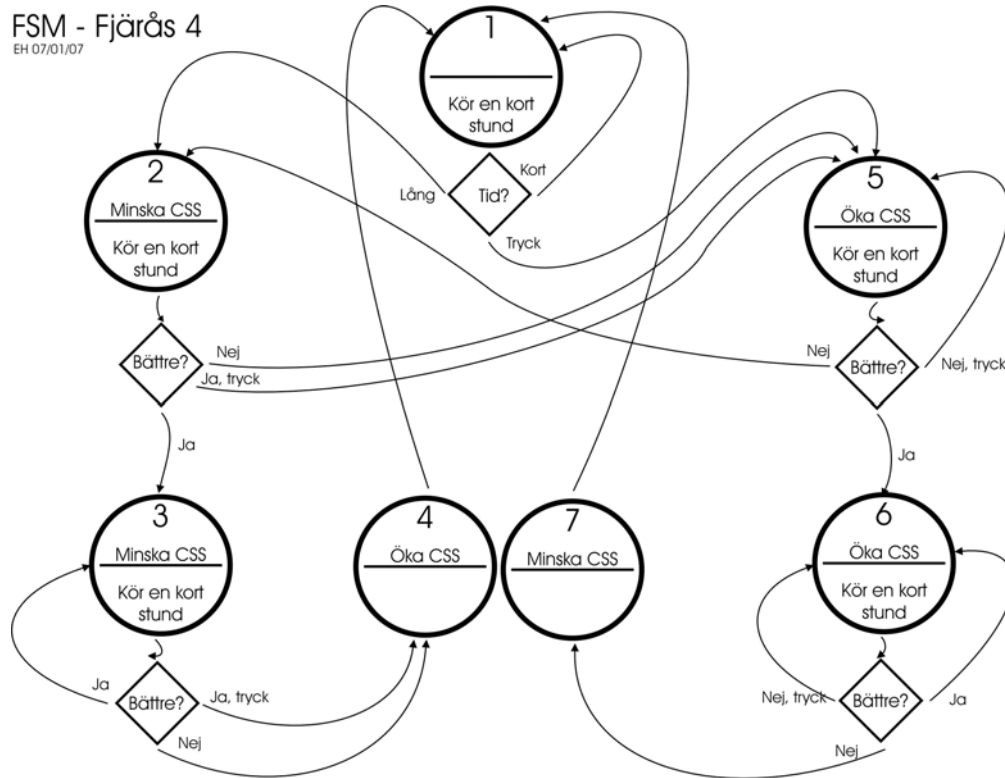


Figur 6. Skärmdump från systemets webgränssnitt för datorn i Fjärås. Till höger ses en schematisk uppställning av anläggningen där vissa mätvärden presenteras. Till vänster finns de val som operatören kan göra. Underst i bilden skymtar den meddelanderuta (blogg) som olika användare kan kommunicera via.

Utveckling av algoritmer

Syftet med att övervaka krossen i realtid med hjälp av sensorer (t.ex. flödesmätarna beskrivna ovan) är kunna avgöra krossens prestanda i varje tidpunkt. Syftet med detta i sin tur är att kunna styra krossen och andra produktionsenheter med kunskap om vilka inställningar som ger bästa utfall. Att utifrån krossens prestanda, dvs. mängd producerat önskat material, kunna beräkna ett börvärde till spaltautomatiken eller frekvensomformaren har varit ett av projektets huvudmål. I allmänhet körs krossar idag med konstant spalt och varvtal, vilket ofta inte är det bästa. Man kan tänka sig att mäta krossens prestanda på flera olika sätt, men i första läget har målet varit att erhålla så mycket produkt av en viss storlek som möjligt, dvs. prestandan har definierats som mängden produkt per tidsenhet.

Under projektet har några olika typer av algoritmer provats. Den typ som visat sig mest lyckad är en cellulär tillståndsmaskin (eng. Finite State Machine, FSM). Exempel på en FSM som använts i projektet kan ses i Figur 7. En fördel med FSM är att utvecklingen av dem går att automatisera. Detta har inte testats ännu, men är en möjlighet för projektets fortsättning.



Figur 7. Den tillståndsmaskin (FSM) som använts på krossen i Fjärås för att bestämma spalt.

Resultat och diskussion

De effektbaserade flödesmätarna har validerats mot en befintlig bandvåg som beskrivits ovan samt använts för processtyrning i ytterligare två anläggningar. Resultatet från valideringen är att det maximala felet under en dag var mindre än 3 %. En statistisk analys (t-test) visat att felet är mindre än 1.15 % med 95 % säkerhet.

Algoritmen har testats både för spalt- och varvtalsstyrning. För spaltstyrning testades algoritmen på en 36" Hydrocone (Allis Chalmers) kross som redan hade spaltautomatik. Mätsignalerna var relativt brusiga och spridningen i materialet var stor. För att kunna utvärdera algoritmen användes den växelsvis med konstant spalt under större delen av hösten 2007. Krossen begränsades ofta av maxtrycket istället för av spaltens börvärde. I de fall då den satta spalten lyckats hållas var algoritmen 3.5 % bättre än då konstant spalt användes. Att t-test visar att algoritmen var bättre än konstant spalt under 3 % signifikans, dvs. Med 97 % säkerhet. Algoritmen lyckades dessutom för det mesta hållas sig från randvärdena i sitt relativt stora tillåtna område (7-12 mm), vilket talar för god funktion.

Varvtalsalgoritmen provades på en HP 300 (Nordberg) kross utan spaltautomatik. Under ett mantelsets hela livslängd övervakades prestandan från krossteget. Under denna tid kunde operatören på anläggningen välja originalvarvtal, sitt eget varvtal eller låta algoritmen välja varvtal. Varje gång ett byte skedde mellan dessa tre inställningar jämfördes prestandan före och efter. Resultatet var att då krossen kördes med operatörens varvtal eller algoritmens varvtal var prestandan bättre med 4.2% i genomsnitt. Att detta var bättre visades också med

ett t-test under en signifikansnivå på 0.05 %. Ett oväntat, men mycket positivt resultat, var att mantellivslängden ökade med hela 27 %.

Den förlängda mantellivslängden kan förklaras antingen med att mantlarna härdar bättre eller att krosskammargeometrin slits och förändrats annorlunda under livslängden då varvtalet varierat.

En skillnad mellan resultaten från de två fullskaleförsöken beskrivna ovan är spridningen (medelförbättringarna är ungefär i samma storleksordning). Själva processen och/eller mätningarna fluktuerade mer i Fjäråsanläggningen, där spaltalgoritmen provades. Detta kan förklaras med storleken på anläggningarna. Ludden anläggningen producerar nästa tio gånger så mycket material som den i Fjärås.

Slutsatser

Följande huvudsakliga slutsatser har erhållits:

- Massflödet kan mätas med för processtyrning tillräcklig noggrannhet på transportörer som lutar genom att mäta den elektriska effekten. Denna teknik är avsevärt billigare än konventionella bandvågar.
- Prestandan och utbytet kan ökas på krossar som redan har spaltautomatik genom att införa återkoppling från mängden producerat material.
- Prestandan kan ökas på krossar genom att aktivt ändra varvtalet. Detta faktum är nytt och har inte tidigare påvisats.
- En cellulär tillståndsmaskin (FSM) kan användas för att automatiskt beräkna börvärden på spalt och varvtal.
- En statistisk utvärdering är nödvändig för att påvisa förändringar då spridningen i krossprocessen är stor, mätningarna kan vara brusiga och ingående material varierar.

Referensanläggningar

Sand & Grus AB Jehanders anläggningar i Kållerred (Mölndal), Fjärås (Kungsbacka) och Ludden (Norrköping) har använts som referensanläggningar. I Kållerred har de effektbaserade flödesmätarna testats. I Kållerred 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. NCCs anläggning i Stenungsund har besökts ett antal gånger under projektet, men inte använts för försök.

Vetenskaplig publicering

Som en del i arbetet för att erhålla en akademisk teknologie licentiatexamen har artiklar skickats in för publicering i vetenskapliga granskade tidskrifter. Två presentationer har hållits på vetenskapliga konferenser, *Comminution '06* och *11th European Symposium on Comminution*. De inskickade artiklarna är:

- Hulthén, E. and Evertsson, M., *A Cost Effective Conveyor Belt Scale*, Presented at 11th European Symposium on Comminution, Budapest, October 9-12, 2006. Published in conference proceedings.
- Hulthén, E. and Evertsson, M., *Algorithm for dynamic cone crusher control*, Submitted to Minerals Engineering (Journal), February 2008.
- Hulthén, E. and Evertsson, M., *On-Line Optimization of Crushing Stage Using Speed Regulation on Cone Crushers*, Accepted to IMPC 2008 (Conference), 24-28 September 2008 in Beijing, China.

Artiklarna har utgjort bilagor till den licentiatuppsats som lades fram i februari 2008. Licentiatuppsatsen presenterades vid ett seminarium den 27 februari 2008.

Forskarskola

Erik Hulthén är sedan 2005 antagen som doktorand i forskarskolan Maskin- och fordonssystem vid institutionen för Tillämpad mekanik, vid Chalmers.Handledare är Docent C. Magnus Evertsson.

Parallellt med själva forskningsprojektet läses doktorandkurser. För doktorsexamen krävs 67.5 hp (1.5 hp = 1 poäng i det gamla systemet) utöver civilingenjörsexamen. Ämnena för kurserna varierar från allmänna såsom informationssökning, etik, pedagogik och vetenskapsteori till mera projektspecifika, exempelvis geologi, maskintekniska kurser och matematisk statistik. För licentiatexamen krävs 45 hp.

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.

Kommande arbete

Arbetet i projektet planeras fortsätta i en andra fas. Det finns flera idéer om vad som bör studeras närmast. För fas II har följande fyra delområden identifierats som intressanta fortsättningar som både har vetenskaplig höjd och industriell relevans:

- Att statistiskt säkerställa förändringar i realtidsoptimeringen.
- Kombination av flera styrparametrar per kross (exempelvis både varvtal och spalt).
- Adaptivitet, dvs. att algoritmerna anpassar sig själva successivt.
- Sammankoppling och optimering av flera krossteg

För att åstadkomma detta behövs fortfarande stödsystem (informations- och styrteknisk infrastruktur). Dessa kan komma att behöva utvecklas, exempelvis med hjälp av examensarbeten. Styr- och övervakningssystemen är mycket viktiga för projektets utfall, men de har industriell relevans snarare än akademisk. Därför finns det med som ett stödområde som innefattar:

- Sensorer
- Styr- och övervakningssystem

En projektbeskrivning för fas II daterad 13 februari 2008 bifogas denna rapport.