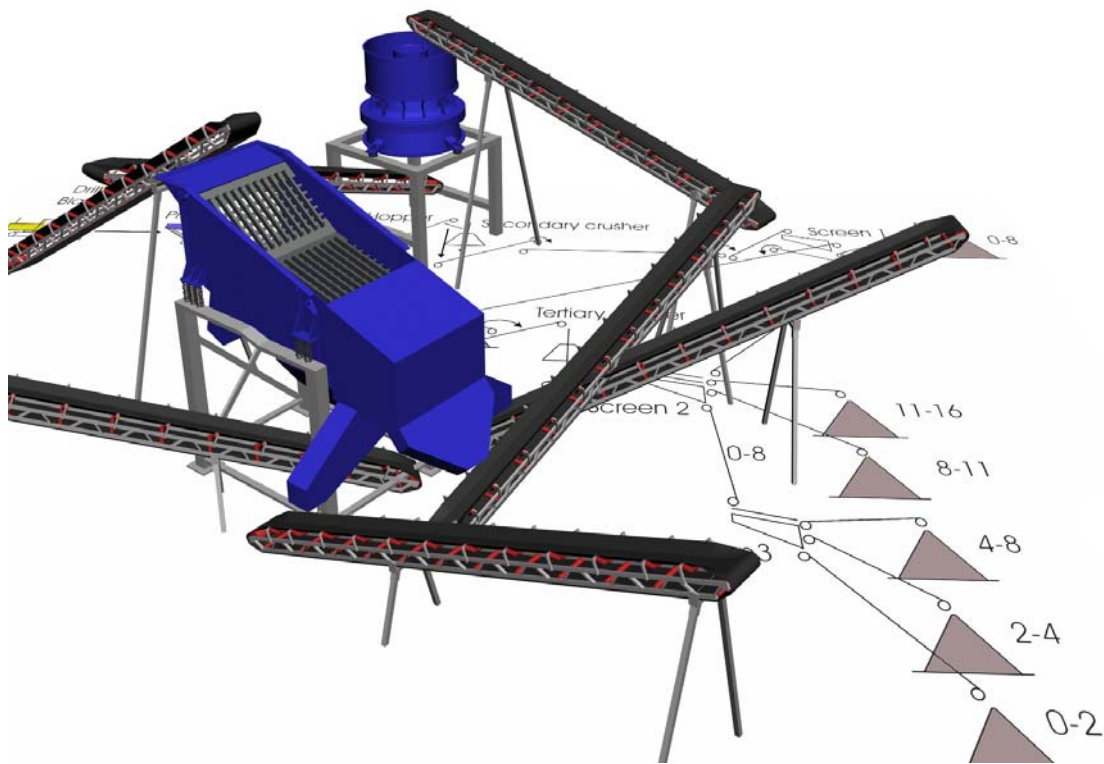


Slutrapport för projektet
Utformning och drift av krossanläggningar

Simulering och optimering av krossanläggningars prestanda



Per Svedensten
Maskin och fordonssystem, Chalmers tekniska högskola
Göteborg, Sverige

SBUF ®

Simulering och Optimering av Krossanläggningars Prestanda

Copyright 2004 © Per Svedensten

Maskin och Fordonssystem

Chalmers tekniska högskola

Göteborg 2004

SAMMANFATTNING

Krossanläggningar används både av ballast- och mineralindustrin för att krossa och sortera bergmaterial och malmer. Idag används observationer, tumregler och experiment för att ställa in krossanläggningar. Detta är en tidsödande och svåra metoder att använda för att optimera anläggningar. Datorsimulering och optimering kan användas för att förbättra en krossanläggnings prestanda. För att optimera en krossanläggning måste processoptimeringslära tillämpas. Processoptimering kräver en samtidig optimering av en anläggnings utformning, parameterval samt toleranser. Parametrar är typiskt inställningar på krossar såsom spalt och slag eller maskstorlek och rotationshastighet på siktar. Toleransen i en krossanläggning är den mängd slitage som kan tillåtas på detaljer som påverkar utfallet i anläggningen.

Denna rapport fokuserar på modellering, datorsimulering och optimering av krossanläggningar. Vidare är anläggningens utformning betraktad som given då arbetet till största delen är koncentrerat på befintliga anläggningar.

I projektet har en ny metod för att optimera krossanläggningar utvecklats. Denna innefattar både tekniska och ekonomiska aspekter. Förutom att prediktera utfall hanterar de utvecklade tekniska modellerna också slitaget i anläggningen vilket inte har gjorts förut. Detta möjliggör samtidig optimering av parametrar och slitagetoleranser i anläggningen. För att finna den optimala inställningen av anläggningen har två olika typer av optimeringsalgoritmer används: *genetic evolutionary algorithm with local search* och *probabilistic global search Lausanne*.

Den ekonomiska modell som använts inkluderar produktionskostnader för alla produkter och inkomsterna från försäljning. Att inkludera ekonomiska aspekter i modellen har visat sig vara mycket kraftfullt och ger en koppling mellan tekniska och ekonomiska frågorna i en anläggning. Optimeringen tar även hänsyn till kundkrav på samtliga producerade produkter. Förutsättningen för optimering är att kundkraven aldrig får överskridas oberoende av slitaget på slitgodset.

I rapporten visas det även att det inte går att optimera en anläggning utan att ta hänsyn till slitaget. Resultaten från optimeringen visar att den utvecklade metoderna går att använda för att optimera olika typer av krossanläggningar. De ger också viktiga insikter i hur krossanläggningar påverkas av slitage och vilka krav som måste ställas för att erhålla en process som producerar produkter med rätt kvalitet.

Resultaten från forskningen har implementerats i en nyutvecklad programvara. Programvaran har ett grafiskt gränssnitt och är utvecklad i Microsoft Visual C++, den går med andra ord att köra i en Windows-miljö. Programvaran kan användas för att anpassa produktionen i en krossanläggning så att den på bästa sätt kan tillfredställa en rådande marknadssituation. Programvaran kan även användas för projektering av anläggningar. Genom att modellera några anläggningar kan dessa jämföras på respektive anläggnings topprestanda. Utbildning är också ett område där programvaran kan komma till nytta. Den kan ge värdefulla insikter i hur de olika delarna i anläggningen samverkar och hur de skall användas på bästa sätt.

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Sammanfattning	i
Förord	iv
1. Inledning.....	1
2. Modellering av krossanläggningar	3
2.1 Produktionsenheter.....	4
2.2 Bergmaterial	5
2.3 Inverkan av slitage på anläggningen	5
2.4 Ekonomi	8
2.5 Kundkrav	8
3. Optimering	9
3.1 Begränsningar i optimeringen	9
3.2 Kostnadsfunktion	9
3.3 Processimulering	10
3.4 Optimeringsalgoritmer	10
4. Implementering av resultat i programvaran	11
5. Ballastexempel	12
5.1 Villkor för optimeringen	12
5.2 Optimeringsresultat	13
6. Slutsatser och fortsatt forskning.....	15
Referenser.....	16

FÖRORD

Jag skulle vilja börja med att rikta ett varmt tack till sponsorerna av mitt doktorandprojekt ”Utformning och drift av krossanläggningar”. Svenska Byggbranschens Utvecklingsfond (SBUF), Sveriges BergMaterial Industri (SBMI) samt Sandvik Rock Processing. Dessa organisationers representanter har bidragit till projektet med båda goda idéer och stort intresse, de har aldrig tvekat att hjälpa mig då jag behövt råd och hjälp under projektets gång. Vidare har Utvecklingsprogramet för industrimineral, bergmaterial och natursten (MinBaS) bidragit med medel för utveckling av nya modeller för produktionsenheter. Föreningen Mineralteknisk Forskning (MinFo) har genom ett anslag från Statens Energimyndighet bidragit med medel för utveckling av energimodeller vilket kommer att implementeras inom kort. De tillsatta extra resurserna har varit till stor hjälp och på ett påtagligt ökat farten på projektet och bidragit till det goda resultatet.

Arbetet har utförts på institutionen för Maskin och fordonssystem på Chalmers. Min handledare och projektledare Dr Magnus Evertsson förtjänar ett stort tack för den handledning och inspiration han bidragit med under min väg fram till licentiatexamen. Även mina övriga vänner och kollegor i krossgruppen på Chalmers tackas härmed för nyttiga diskussioner och den goda stämningen som vi har. Det har varit ett nöje att jobba i krossgruppen under ledning av Dr Magnus Evertsson. Professor Viktor Berbyuk tackas för hans arbete som examinator.

Sist men inte minst vill jag tacka familj och vänner för det stöd och intresse de har visat för mitt arbete. De glada tillrop jag med jämna mellanrum får känns alltid bra.



Per Svedensten

Göteborg, oktober 2004

1. INLEDNING

Krossanläggningar fyller en viktig funktion i dagens samhälle. De används både av bergmaterialindustrin för produktion av ballastmaterial och i mineralindustrin för att krossa malmer för vidare utvinning av metaller och andra ämnen. Ballastmaterial används för många olika ändamål så som väg- och järnvägsbyggnad, husbyggnad, betongtillverkning m.m. Den stora allmänheten har dock ganska dålig kunskap om hur viktig denna industri är samt vilken storlek den har. Ballastmaterial tas ofta för givet utan att någon reflektion görs över hur mycket material som tillverkas. Krossanläggningar är därför något som få känner till. Detta beror på att krossanläggningar och bergtäkter ofta är utformade på ett sådant sätt att de inte skall utgöra någon synligt ingrepp i landskapsbilden. Gruvor och dess krossanläggningar är ofta lokaliserade till avlägsna platser dit den stora allmänheten sällan beger sig. En typisk anläggning för produktion av ballast visas i Figur 1.



Figur 1. En del av en krossanläggning för produktion av ballast (publicerad med tillstånd av Sandvik Rock Processing)

Krossanläggningens huvudsyfte är att krossa och sortera det sprängda bergmaterialet till en eller flera fraktioner. Detta görs vanligen i ett antal kross- och siktsteg där bergmaterialet storlek reduceras till finare och finare fraktioner. Det är normalt sett svårt att krossa berg till små fraktioner direkt från materialet som kommer från täkten i ett enda steg. De färdiga produkterna kan också produceras i olika delar av krossanläggningen vilket betyder att hela krossanläggningen inte utnyttjas för all produktion.

De två viktigaste typerna av maskiner, i fortsättningen kallade produktionsenheter, är krossar och siktar. Prestandan på dessa två typer av produktionsenheter är avgörande för hela anläggningens totala prestanda. Andra produktionsenheter är transportörer, matare, olika typer av buffertar och förvaringsenheter m.fl. Dessa bidrar främst till produktionskostnader för produkterna men utför ingen större påverkan på bergmaterialet. Hur krossar och siktar skall ställas in för bästa anläggningsprestanda är en fråga som är svårt att besvara. Idag görs dessa inställningar med utgångspunkt från erfarenheter och olika typer av försök. Att hitta inställningarna som utnyttjar anläggningen optimalt med hjälp av dessa metoder är att betrakta som mycket svårt och tidskrävande. Främst därför det är så svårt att överblicka de

konsekvenser en ändring av en maskininställning får för anläggningens totala produktionsekonomi.

I dagsläget finns det ett antal olika simuleringsprogram för att förutsäga produktutfallet i en krossanläggning. Dessa kan med en rimlig noggrannhet förutsäga mängd producerat material i de olika fraktionerna samt dess partikelstorleksfördelning. Det är dock mycket svårt att använda dessa program för produktionsoptimering. Detta beror främst på att fler faktorer än de rent processmässiga måste inkluderas. För att kunna göra en optimering måste även flera ekonomiska faktorer samt kundkrav beaktas. Dessa måste då beräknas och kontrolleras separat efter det att en simulering har gjorts. Att beräkna produktionskostnaderna är än ganska svår uppgift. Det finns också en stor mängd olika inställningsmöjligheter för en anläggning som måste undersökas vilket medför att många simuleringar med efterföljande ekonomiska beräkningar måste utföras vilket är mycket tidsödande.

Krossning av berg i en krossanläggning måste betraktas som en industriell process för att kunna behandlas ur ett optimeringsperspektiv. Detta medför vissa förutsättningar som alltid gäller för processoptimering. För att finna den optimala processen krävs att tre områden inkluderas: (Montgomery, 1996)

- Struktur – Anläggningens utformning och val av produktionsenheter.
- Parameterval – Hur olika variabla parametrar på produktionsenheterna ställs in.
- Toleranser – Vilka avvikelser från parametervalen som kan tolereras, i fallet krossanläggning orsakas denna avvikelse främst av slitage.

Dessa tre områden måste optimeras samtidigt för att en optimal process skall kunna uppnås, krossning och sortering av bergmaterial är inget undantag från detta påstående. Att utföra optimeringar under dessa förutsättningar är mycket svårt och antalet olika lösningar är att betrakta som närmast oändliga. I fallet med krossanläggningar behövs en dator med ett optimeringsprogram för att kunna lösa denna typ av optimeringar. Detta arbete har främst koncentrerats på befintliga krossanläggningar varför struktur betraktats som given. Detta reducerar lösningsrymden men mängden lösningar är fortfarande väldigt stor och behovet av ett datorprogram kvarstår. Ett optimeringsproblem med tio variabla parametrar kan lätt ge en lösningsrymd bestående av flera miljarder olika lösningar.

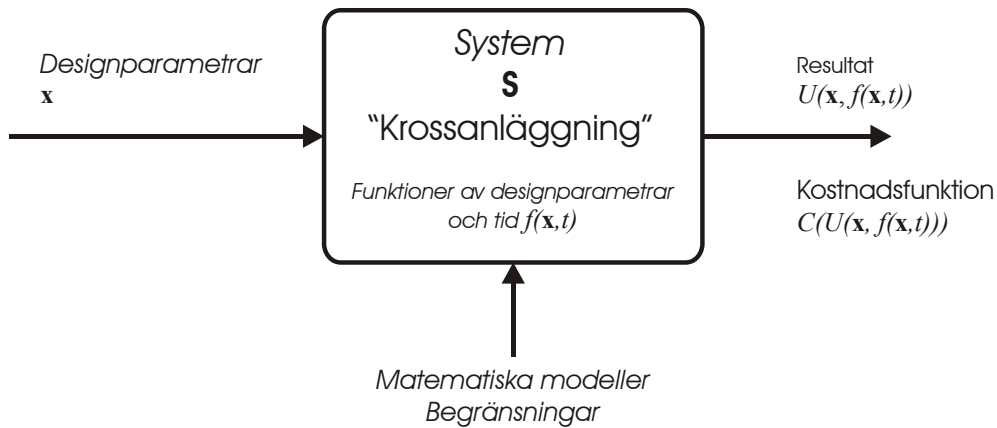
I denna rapport presenteras en metod för modellering, simulering och optimering av parametrar och dess toleranser. Även ekonomiska aspekter är inkluderade i optimeringarna vilket ger att det mest ekonomiskt fördelaktiga valet för krossanläggningen erhålls. Detta under förutsättningen att de krav kunderna ställer på de olika produkterna konstant uppfylls under hela produktionsperioden. Alla uppnådda resultat i forskningen har implementerats i en prototypprogramvara. Denna programvara kan vidareutvecklas för implementering i industrin för kommersiellt användande.

2. MODELLERING AV KROSSANLÄGGNINGAR

För att kunna lösa problemet optimeringsproblemet behövs en dator med tillhörande optimeringsprogramvara. Ett av målen med forskningsarbetet var därför att utveckla en prototyp till en sådan programvara. Det finns en mängd olika metoder för att göra detta så därför behövdes en utvärdering av tillgängliga program och programmeringsspråk göras. Det fanns två huvudspår för utvecklingen av optimeringsprogrammet som undersöktes. Dels kan ett färdigt programpaket för simulering och optimering användas och anpassas för de krav som fallet krossanläggningsoptimering tillför. Detta förutsätter dock att det finns möjligheter att göra dessa anpassningar samt att inga nya problemställningar uppkommer som inte har behandlats tidigare i liknande simulerings- och optimeringsprojekt. Det kan inte förutsättas att ett färdigt programpaket kan ändras i sådan grad att det skulle kunna klara av att lösa helt okända problem. Vad det gäller det andra huvudspåret att helt nyutveckla all programkod till ett specialiserat verktyg för just krossanläggningar är det såklart flexibilitet som främst erhålls. Nackdelen är att all utveckling måste ske från grunden. Detta är tidsödande eftersom en komplett simulerings- och optimeringsprogramvara är en komplex mjukvara att utveckla. När detta är gjort är fördelarna stora eftersom nya idéer lätt kan testas vilket är en stor fördel i forskningsarbetet. Ytterligare en stor fördel med att utveckla programvaran från grunden är att implementeringen till färdig produkt som kan användas av industrin blir mycket enklare. Vid användandet av färdiga programpaket kommer alltid frågor som rättigheter och licenser för ursprungspaketet att behövas lösas. Detta kan lätt hindra en bred spridning av programvaran då licenskostnader ofta är stora och kan vara svåra att försvara.

Efter en noggrann utvärdering av både de två huvudspåren samt olika lösningar i respektive huvudspår drogs slutsatsen att det sammantaget bästa vore att använda ett programmeringsspråk för att utveckla en prototyp till programvara. Olika programmeringsspråk som övervägdes inkluderade MatLab (Mathworks Inc.) både fristående och i kombination med olika plug-ins i form av TomLab (Tomlab optimization AB) och Simulink (Mathworks Inc.), Visual Basic samt Visual C++ (Microsoft Corp.). Det slutgiltiga valet föll på Visual C++ eftersom det är ett mycket flexibelt och snabbt språk som väl lämpar sig till modellering eftersom det är fullt objektorienterat. Det har också mycket avancerade funktioner för att skapa användargränssnitt.

För att skapa modeller lämpliga för optimering krävs en modelleringsstrategi. Den skapade modellen av krossanläggningen skall kunna kommunicera med simulerings- och optimeringsalgoritmerna i programvaran på ett förutbestämt sätt. Eftersom det är upp till användaren att definiera anläggningen måste alla rutiner i programvaran vara generella och kunna hantera alla tänkbara situationer som kan uppkomma. Därför måste programvaran alltid betrakta modellen av krossanläggningen som en "black box". Modelleringsstrategin är avbildad i Figur 2.



Figur 2. En schematisk bild av modellering av en krossanläggning för optimeringsändamål.

I Figur 2 kan ses att designparametrarna x tillförs modellen från vänster. Dessa parametrar representerar de olika inställningar som kan göras på de olika produktionsenheterna. Det kan till exempel vara spalt (CSS) på en kross eller siktmaska på ett av däckena på en sikt. Dessa parametrar påverkar resultatet vid en simulering av respektive produktionsenhet. Underifrån tillförs matematiska modeller och olika typer av begränsning till modellen. De matematiska modellerna används för att förutsäga utfallet från de olika produktionsenheterna. De begränsningar som tillförs kan vara olika typer av krav på kompatibilitet mellan inställningar av produktionsenheter och även de kundkrav som ställs på de producerade produkterna. I modellen finns också funktioner av designparametrar och tid $f(x,t)$. Dessa används för att förutsäga prestandan i de olika produktionsenheterna beroende på hur de är inställda samt processer som påverkas av tid. Exempel på en sådan process är slitage på olika delar i krossanläggningen. En siktmaska blir allteftersom material passerar större vilket medför att större och större stenar kan passera. Detta påverkar därför utfallet från sikten beroende på hur lång tid siktdäcket har använts. När modellen sedan körs så kommer ett resultat att produceras vilket sedan utvärderas med hjälp av en kostnadsfunktion. Värdet på kostnadsfunktionen används sedan av optimeringsalgoritmen för att generera nya parametervärden som i sin tur testas i modellen.

2.1 PRODUKTIONSENHETER

För att kunna förutsäga produktionen i en krossanläggning med hjälp av modeller och simuleringar krävs modeller för de olika produktionsenheterna. För detta ändamål måste de olika typerna av produktionsenheter klassificeras efter deras huvudfunktion. Detta behövs för att kunna modellera enheterna på ett enhetligt sätt vilket är viktigt för att kunna få programvaran att fungera på ett förutsägbart sätt. Efter att den första indelningen är gjord kan ytterliggare klassificeringar i subgrupper göras. Krossar kan till exempel delas in i två huvudtyper beroende på dess krossprincip: kompresiv krossning respektive slagkrossning. I och med att den valda modelleringsprincipen är objektorienterad så kan uppdelningen av produktionsenheterna utnyttjas fullt vid programmeringen av modellerna. Objektorientering möjliggör att egenskaper och funktioner läggs på modellen i olika delar av modellträdet. De modeller som härstammar från en gren i modellträdet ärver då de egenskaper pålagda på en högre nivå. Detta spar programmeringsarbete då gemensam kod endast behöver skrivas en gång och eventuella fel bara behöver rättas på ett enda ställe.

Vid modellering av krossanläggningen med hjälp av delmodeller kan det direkt sägas att de olika produktionsenheterna påverkar anläggningen och dess produkter inom främst två olika områden. Det första området som en produktionsenhet kan påverka anläggningen och dess

produkter är kvaliteten och fördelningen av de olika produkterna. Beroende på hur de olika produktionsenheterna ställs in kommer olika mängd av de olika produkterna att produceras och de kommer få olika kvalitet. Det andra området som produktionsenheterna påverkar anläggningen inom är produktionsekonomin. Så fort bergmaterialet passerar en produktionsenhet så har materialets produktionskostnad stigit. Produktionskostnaden är en viktig aspekt att ta hänsyn till vid optimering av krossanläggningar och kommer att vidare beskrivas under rubrik 2.4.

För modellering av de enskilda krossarna har främst en modell utvecklad av Sandvik Rock Processing används. Utifrån inmatat material, slag, spalt och andra material parametrar kan kapaciteten och produkten räknas ut. Exakt hur denna beräkning utförs är konfidentiellt då Sandvik använder samma modell i sin programvara Plantdesigner.

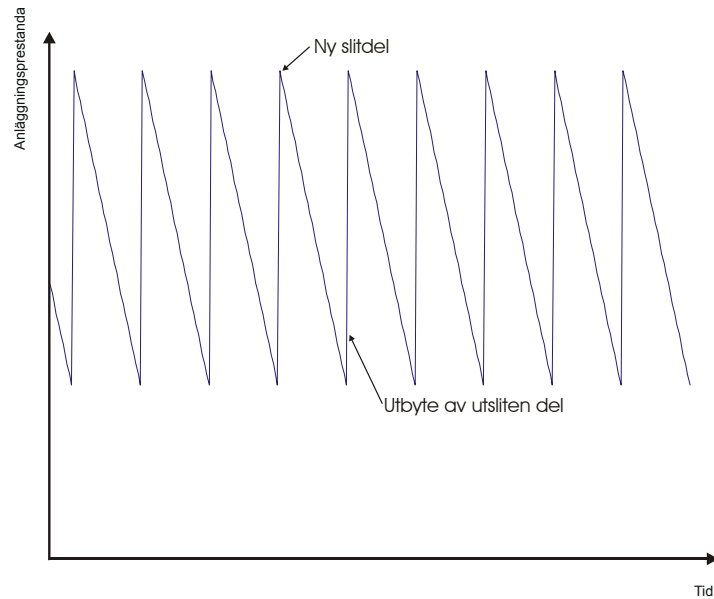
Modellering av siktar gör med en modell liknande den utvecklad av Monika Soldinger Staffhammar. Vissa förenklingar har dock gjorts för att minska beräkningstiden samt att den kompletterats så att den är mer generell och kan användas för ett betydligt större antal olika siktar än vad som beskrivs i avhandlingen. Vidare har den utvecklats för att kunna beräkna effekten av slitage.

2.2 BERGMATERIAL

Bergmaterialmodellen har till uppgift att beskriva bergets egenskaper vilket i sin tur påverkar utfallet i de olika produktionsenheterna. Beroende på bergmaterialets egenskaper kommer utfallet att variera och det är därför viktigt att modellen innehåller relevant information som kan utnyttjas i modellerna för produktionsenheterna. Modellen för bergmaterialet innehåller information så som partikelstorleksfördelning, Bond work index, fukthalt o.s.v. Denna information uppdateras allt eftersom bergmaterialet passerar igenom anläggningen och kan på så vis förutsäga hur bergmaterialet ser ut på de olika platserna i anläggningen. Bergmaterialmodellen innehåller även information om den aktuella produktionskostnaden i anläggningen. Denna uppdateras på samma sätt allt eftersom fler produktionsenheter används för att producera en produkt. Detta resulterar i att den totala produktionskostnaden erhålls då bergmaterialet passerar samtliga produktionsenheter som utnyttjas för produktionen av en produkt.

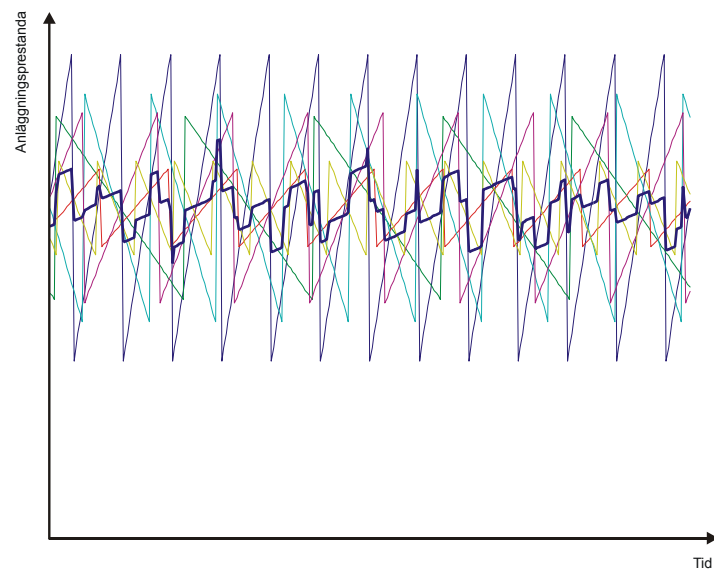
2.3 INVERKAN AV SLITAGE PÅ ANLÄGGNINGEN

Under den tid anläggningen utnyttjas för produktion så slits olika vitala delar på de olika produktionsenheterna. Detta slitage påverkar produktionsenhetens prestanda vilket i sin tur påverkar anläggningens totala prestanda. Som redan nämnts är toleranser en viktig del av processoptimeringen och i fallet med en krossanläggning så är slitagetoleranser viktiga för hur anläggningen prestanda varierar i tiden. Slitagetoleransen är i detta fall definierat som mängden slitage en slitdel kan tillåtas ha innan den skall ersättas med en ny. Slitaget som främst påverkar anläggningens prestanda är förändringen av krosskammargeometri och siktmedia. I dagsläget finns ingen tillräckligt snabb metod för att kunna förutsäga slitaget i en kross även om Mats Lindqvist har utvecklat en modell. Denna modell är inte implementerbar i dagsläget då den är allt för beräkningstung. För slitaget av siktmedia används däremot den nyutvecklade modellen för siktar. För att kunna optimera en anläggning som utsätts för slitage måste en modelleringsmetod utvecklas. Denna grundar sig i antagandet att allt slitage i anläggningen styrs av mängden material som passerar den aktuella slitdelen samt inställningen av den aktuella produktionsenheten. Prestandan i anläggningen kommer om det antas att endast en del som utsätts för slitage variera enligt Figur 3.



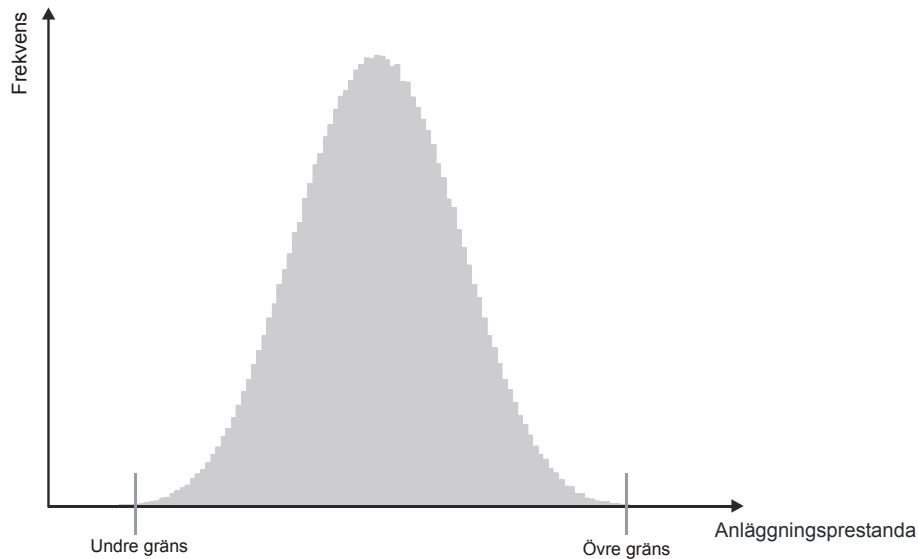
Figur 3. En tänkt anläggnings prestanda under förutsättning att anläggningen endast har en del som påverkas av slitage.

I figuren kan man se hur prestandan faller allt eftersom anläggningen används fram till den punkt där det är lämpligt att byta ut sliddelen mot en ny. Påverkan av slitage behöver självklart inte vara negativ i alla fall utan det kan även finnas fall där anläggningens prestanda blir bättre allt eftersom sliddelen slits. I en anläggning med flera delar som slits kommer då processprestandan se ut enligt Figur 4. I denna figur finns både sliddelar som påverkar anläggningen positivt och negativt. Dess totala prestanda ges av dess gemensamma påverkan.



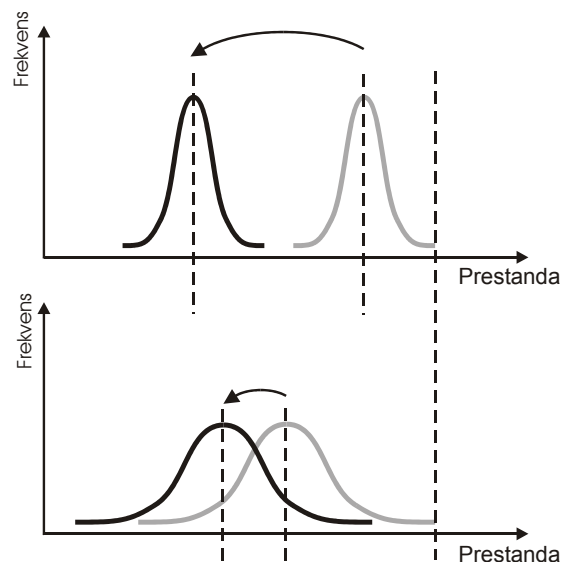
Figur 4. En tänkt anläggnings prestanda under förutsättning att den har sex olika delar som påverkas av slitage.

Studeras denna över tiden kan det med hjälp av centrala gränsvärdesatsen bevisas att anläggningens prestanda kommer att vara normalfördelad eller nära normalfördelad i fallet med få sliddelar, se Figur 5. Det kommer också att finnas en övre och undre gräns inom vilken processprestandan alltid kommer att befinna sig.



Figur 5. Krossanläggningens prestanda studerad under en tidsperiod. Som framgår av figuren har anläggningens prestanda en normalfördelad distribution.

Under användandet av anläggningen kommer slitdelar att behöva bytas. Detta kommer att påverka anläggningens ekonomi på ett negativt sätt eftersom detta påverkar både kostnaden för inköp av slitdelar samt stilleståndstid. Detta kommer att påverkas av hur slitagetoleranserna väljs eftersom en liten slitagetolerans som visserligen kommer ge en hög processprestanda även kommer ge upphov till mer stilleståndstid och högre kostnader för slitdelar, se Figur 6. Mängden stilleståndstid beroende på hur slitagetoleranserna har valts beräknas därför även när optimeringar görs så att detta inkluderas på ett riktigt sätt. Det går alltså inte enbart att optimera processen för att fungera optimalt under drift eftersom detta skulle leda till att det alltid är lönsamt att ha små slitagetoleranser.



Figur 6. Anläggningens prestanda då även stillestånd tas med. En liten tolerans ger en stor minskning av prestandan på grund av frekventa stillestånd samt högre kostnader för utbyte av slitdelar. Det motsatta gäller för en stor tolerans.

2.4 EKONOMI

Den ekonomiska modellen har två huvuddelar, produktionskostnader och intäkter från sålda produkter. För att beräkna produktionskostnaden finns i dagsläget många olika metoder. De har olika noggrannhet men det kan generellt sägas att för att erhålla en högre precision krävs det mer och noggrannare information. Arbetet med att ta fram detaljerad information är tidsödande och svårt. Det innebär alltså att det är förknippat med en risk att informationen som tas fram inte blir helt korrekt vilket kommer att ge ett felaktigt resultat i slutändan. En avvägning mellan noggrannhet och tidsåtgång för att finna all information måste därför göras. För att beräkna produktionskostnaden i krossanläggningen har modellen med en fast och en rörlig kostnad per produktionsenhet valts. Denna uppdelning av kostnaden är vanlig i de flesta industrier och kan därför förutsättas bekant för många platschefer och liknande (Dearden, 1988) Denna metod att beräkna produktionskostnaden används idag i många typer och industrier och betraktas som väl känd. Den fasta och rörliga kostnaden representeras av kostnader per timme och per ton. Beroende på hur produktionsenheterna ställs in kommer kostnaden per ton att variera. En sådan påverkan är valet av slitdelar. Om en slitdel med lite tolerans väljs kommer kostnaden per ton att öka eftersom en mindre mängd material kan tillåtas passera delen innan den skall bytas ut. Materialet i slitdelen kan även påverka denna kostnad i de fall det finns flera olika typer av slitdelar att välja på, till exempel val av siktkmedia.

Slutligen kan det också sägas att materialet kommer att ha en produktionskostnad knuten till sig då det lastas in i anläggningen. Denna tas självklart också med i beräkningen men det förutsätts att den är känd av användaren.

Målet med optimering är att maximera den så kallade bruttovinsten. Att enbart försöka minimera kostnaderna är inte en relevant målfunktion eftersom det inte tar hänsyn till marknadssituationen. För att kunna beräkna bruttovinsten för anläggningen krävs att priset till kund även är känt. Genom att subtrahera produktionskostnaden från priset för varje produkt kan bruttovinsten per produkt beräknas. Summeras samtliga bruttovinster kan sedan den totala bruttovinsten under drift beräknas. Slutligen skall kostnaden för stillestånd subtraheras från bruttovinsten under drift för att beräkna den totala bruttovinsten. Denna används i optimeringen som kostnadsfunktion, mer om detta i kapitel 3.

2.5 KUNDKRAV

Produkterna som produceras i en krossanläggning skall oftast säljas till en kund alternativt fortsätta förädlas i efterföljande processer. I vilket fall som helst kommer det ställas krav på produkten i form av olika kvalitetskrav. Ett av de vanligaste kraven som ställs är begränsningar i mängden över- och underkorn i produkterna. Dessa krav är oftast motställda till andra önskemål som finns på anläggningen. Krav på hög kapacitet och stora slitagetoleranser gör att det blir svårt att uppnå önskad kvalitet på alla produkter. I den optimerings som görs antas det att kundkraven på produkterna aldrig får överskridas oberoende av statusen på slitagedelarna i anläggningen. Detta betyder att vid varje tidpunkt skall ett godkänt prov kunna tas på den producerade produkten. I en verklig anläggning kommer den naturliga variationen göra att detta inte är möjligt även om medelprodukten kommer att vara godkänd. Vad som vidare skulle behöva utredas är hur stor avvikelse från godkänt prov på grund av slitage som kan accepteras utan att den levererade produkten fortfarande kan anses uppfylla kundkraven. Detta kommer kräva information om lagerstorlek samt en modell för hur produkter betar sig i olika typer av lager.

Det finns även andra kundkrav som kan ställas på produkter som produceras i en anläggning. Det kan till exempel vara krav på kornform eller hållfasthet. Detta är inte inkluderat i det

utförda arbetet då det inte finns några tillförlitliga modeller som kan förutsäga dessa parametrar på producerat stenmaterial. Det går heller inte att förutsäga hur dessa parametrar påverkar produktionsenheterna.

3. OPTIMERING

Målet med optimeringen är att maximera bruttovinsten i anläggningen under det att kundkraven alltid uppfylls. För att finna denna bästa inställning behövs en optimeringsrutin. I dagsläget finns ett antal olika typer av algoritmer för att lösa denna typ av diskreta optimeringsproblem. I programvaran behöver användaren endast välja ut de parametrar denne önskar få optimerade för det aktuella fallet. Optimeringsalgoritmen skall sedan automatiskt att anpassa sig efter de villkor som ges av detta val. Efter en rutin för att extraherar data, s.k. pre-processing, kommer en optimering att utföras som finner det globala optimumet inom de uppsatta gränsvillkoren.

3.1 BEGRÄNSNINGAR I OPTIMERINGEN

I de flesta olika typer av optimeringar finns det några olika typer av villkor som begränsar möjliga lösningar i lösningsrymden. Så också i fallet med optimering av krossanläggningsmodeller finns det två huvudgrupper av begränsningar. Den första och enklaste begränsningen är sådana inställningar av produktionsenheter som redan från början kan förutsägas inte fungera. Ett exempel på en sådan begränsning är att maskvidden i en sikt måste bli mindre ju längre ner i sikten däckat sitter. Denna typ av begränsning är enkel att kontrollera utan att en simulering utförs. Den andra typen av begränsning kräver att en simulering utförs för att kunna upptäckas. Den viktigaste begränsningen av denna typ är kravet på att producera godkända produkter. Om en eller flera produkter inte uppfyller kravet på maximalt tillåten mängd över- och underkorn måste resultatet av den utförda simuleringen underkännas. Andra typer av begränsningar av denna typ är maximal stenstorlek som en produktionsenhet kan hantera och att inställningen av anläggningen ger ett simuleringsresultat.

3.2 KOSTNADSFUNKTION

En av de viktigaste delarna i optimeringsrutinen är kostnadsfunktionen. Att denna formuleras korrekt är avgörande för optimeringsresultatet skall ge de fördelar som tänkts för anläggningen. Eftersom en optimeringsrutin alltid försöker finna maximum eller minimum av kostnadsfunktionen är det viktigt att denna speglar önskemålet som användaren av anläggningen har för att driva den på bästa sätt. I fallet med optimering av en krossanläggning har bruttovinst valts som kostnadsfunktion. I de flesta fallen är bruttovinsten ett bra mått på hur krossanläggningen fungerar.

För att beräkna bruttovinsten används produktionskostnaden och försäljningspriset. För att beräkna produktionskostnaden används den ekonomiska modellen. Denna ger en produktionskostnad från varje produktionsenhet. Produktionskostnaden för varje produkt fås genom att summera produktionskostnaden från varje produktionsenhet som används för att producera den aktuella produkten. Innehåller anläggningen några slutna kretsar kommer produktionskostnaden från produktionsenheten i kretsen läggas till produktionskostnaden multiplicerat med en faktor. Värdet på denna faktor räknas automatiskt ut i simuleringsrutinen. Produktionskostnaden för varje produkt dras sedan ifrån respektive produkts försäljningspris vilket get en bruttovinst per produkt. De olika bruttovinsterna summeras sedan för att ge en total bruttovinst under drift. Som tidigare nämnts har

anläggningen en beräknad stilleståndstid på grund av utbyte av slitdelar. Kostnaden under stilleståndstiden dras också från den framräknade bruttovinsten.

3.3 PROCESSIMULERING

Simuleringsrutinen är en av huvudkomponenterna i den utvecklade programvaran. Den kan användas både separat och i kombination med optimeringsrutinen. Simuleringarna görs under antagandet att stabila förhållanden råder. Detta innebär att inga ändringar av förutsättningarna görs under simuleringen. Uppstart och andra dynamiska effekter är alltså inte inkluderade i simuleringen. Genom att göra detta antagande vinnns mycket beräkningstid utan att någon egentlig precision förloras. Dynamiska förlopp som uppstart och liknande utgör en mycket liten del av den totala produktionstiden och därför kommer simuleringsresultatet inte att skilja sig så mycket beroende på denna förenkling.

3.4 OPTIMERINGSALGORITMER

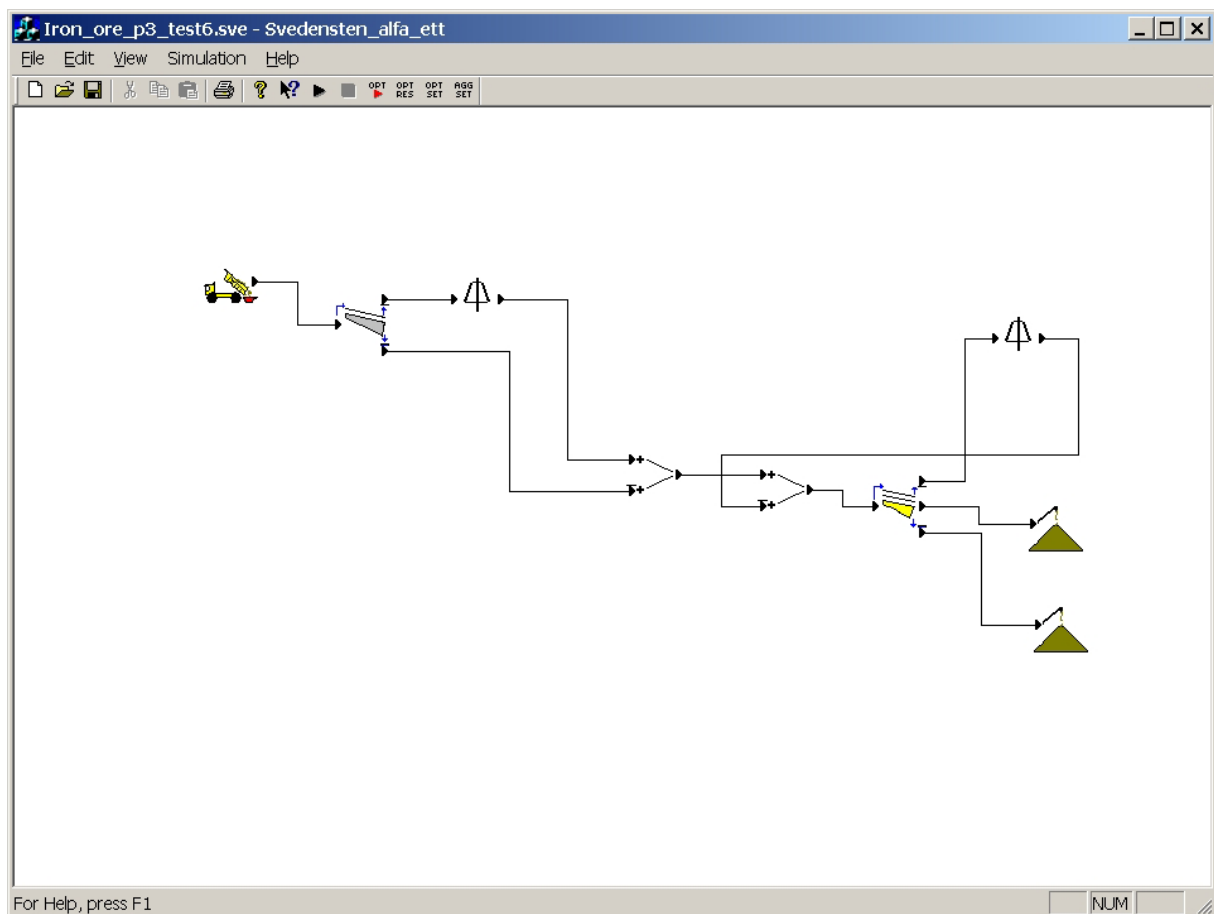
För att lösa optimeringsproblemet behövs en optimeringsalgoritm. För att optimera krossanläggningsmodellen krävs en optimeringsrutin som klarar diskreta problem. För detta finns ett antal olika optimeringsrutiner. Dessa har utvecklats för att lösa olika typer av problem som liknar det aktuella. Efter en utvärdering av de mest använda rutinerna valdes en *genetisk evolutionär algoritm* som kombineras med en *lokal förbättringsrutin* (på eng: *Genetic evolutionary algorithm with Local Search*) (GLS). Anledningen till denna kombination är att genetiska algoritmer har visat sig vara väldigt bra på att hitta lösningar som ligger nära det globala optimumet. Det är dock önskvärt att hitta det globala optimumet med hög sannolikhet. Detta uppnås genom att utöka algoritmen med en rutin som söker av området nära potentiellt bra lösningar. Denna kombination av algoritmer fyller kravet på att finna det globala optimumet med hög sannolikhet på kort tid (Jaszkiewicz 2002). Denna typ av optimeringsrutin har framgångsrikt använts i många olika typer av industriella applikationer så som väteframställningsanläggningar (Rajesh m.fl 2001), produktionsplanering (Murata och Ishibuchi 1998), membranseparering (Yuen 2000), kraftreglering till multimaskin-system (Abido 2001) och många fler. Denna rutin är också oberoende av användarens kunskaper i djupare optimeringslära. Detta är viktigt för att inte resultatet skall vara beroende av att användaren förser optimeringsrutinen med en startgissning eller parameterinställningar av rutinen.

För att säkerställa funktionen och prestandan på den genetiska algoritmen som implementerats måste en jämförelsestudie genomföras. För denna studie har en optimeringsalgoritm som bygger på en annan princip implementerats. *Probabilistic global search Lausanne* (PGSL) (Raphael och Smith 2003) har valts för denna studie. Den kan användas under samma förutsättningar som den implementerade genetiska algoritmen. Denna rutin har också visat sig kunna lösa de uppsatta optimeringsproblemen framgångsrikt och med en liknande prestanda som genetiska algoritmen. I vissa lägen är den till och med bättre vilket är lovande. Under utvecklingsarbete med den genetiska algoritmen har prestanda både vad gäller beräkningstid och sannolikheten att finna det globala optimumet förbättrats. Med tanke på detta kan antagligen samma utveckling förväntas vad gäller PGSL.

4. IMPLEMENTERING AV RESULTAT I PROGRAMVARAN

Alla forskningsresultat har implementerats i en programvara. Programvaran körs i Windowsmiljön och har ett grafiskt gränssnitt, se Figur 7. Hela programmet har utvecklats i Visual C++ vilket ger en hög beräkningskapacitet vilket är ett måste för att kunna köra de optimeringar som ställs upp. Hela krossanläggningen modelleras i det grafiska gränssnittet med hjälp av ”drag and drop”-teknik. För att förmedla det informationsbehov programmet har finns olika dialogrutor där användaren lätt kan fylla i relevant information.

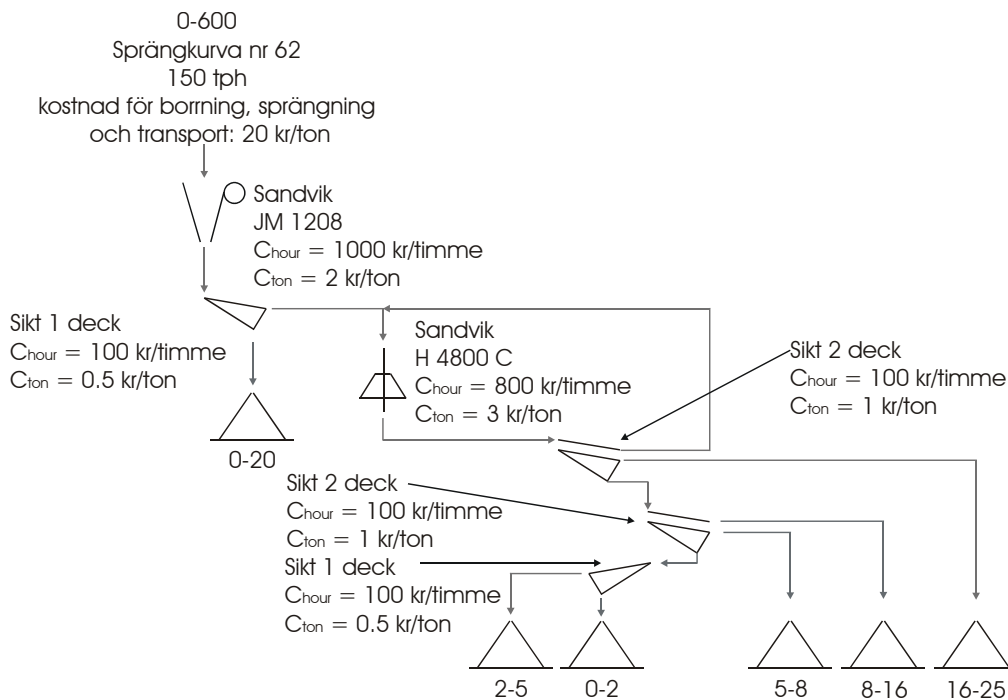
Den utvecklade mjukvaran är väldigt flexibel vad det gäller modellering av anläggningar. Detta ger potential för olika användningsområden. Ett av de främsta är produktionsplanering då olika efterfråganssituationer kan analyseras och lösas så att den bästa produktmixen uppnås. Det går även att använda programvaran för design av anläggningar. Olika alternativ på anläggningar kan lätt utvärderas mot varandra, utvärderingen görs på respektive anläggnings topprestanda vilket ger en bra bild av hur de står sig mot varandra. Ytterliggare ett användningsområde är utbildning, att se hur de olika produktionsenheterna påverkar processprestandan ger god inblick i anläggningens möjligheter och begränsningar. Att se optimala lösningar ger också god insikt i hur produktionsenheter kan ställas in för att påverka anläggningens ekonomi. Särskilt kan det påpekas att just kombinationen mellan inställningar av produktionsenheter och anläggningens ekonomi belyser områden som är svåra att överblicka.



Figur 7. Det utvecklade programmets huvudfönster, en enklare anläggning har modellerats bestående av två siktar och två krossar.

5. BALLASTEXEMPEL

För att illustrera de resultat som forskningen gett samt vilka konsekvenser det kan ge för en anläggning som optimeras har följande exempel tagits fram. Krossanläggningen i exemplet har två krossteg och producerar sex olika produkter, se Figur 8. Den andra krossen i anläggningen matar en sikt där materialet från det översta däckat återcirkuleras till krossen för omkrossning. För optimeringen har spalten (CSS) på de båda krossarna samt maskvidden och dess tolerans på däckena på de båda tvådäckade siktarna valts att ingå som optimeringsparametrar.



Figur 8. Anläggning för produktion av ballast. De olika produktionsenheterna har tilldelats kostnader för drift.

5.1 VILLKOR FÖR OPTIMERINGEN

Alla produktionsenheter i krossanläggningen har tilldelats fasta och rörliga kostnader enligt Tabell 1. Alla produkter har ett försäljningspris samt en efterfrågan vilket också kan ses i tabellen. Som i de flesta anläggningar produceras även produkter som inte efterfrågas av marknaden. Dessa produkter har därför ett lågt pris samt en begränsad efterfrågan. Vad som också skall noteras är de kundkrav som satts på de olika produkterna. De är som synes större än vad som betraktas normalt för ballastprodukter. Som sagts tidigare gör optimeringen under förutsättningen att kundkraven alltid skall uppfyllas oberoende av vilken status de olika slitdelarna har. I ett fall som detta med ett ganska stort sortiment av produkter är det mycket svårt att alltid uppfylla alla kundkrav för samtliga produkter. För att kunna finna en lösning som uppfyller detta krav är det nödvändigt att ge produkterna lite mer generösa kundkrav. Från början provades att genomföra optimeringen med normala kundkrav men optimeringsrutinen misslyckades då att finna en lösning. Slutsatsen man kan dra från detta är att det kan vara svårt att uppfylla alla kundkrav på alla produkter oavsett vilken status de olika slitdelarna har i anläggningen. En sista förutsättning som satts upp är att det finns en gräns för hur mycket material som kan levereras från tåkten.

Tabell 1. Produkter, priser och kundkrav på de olika produkter som produceras i krossanläggningen i Figur 8.

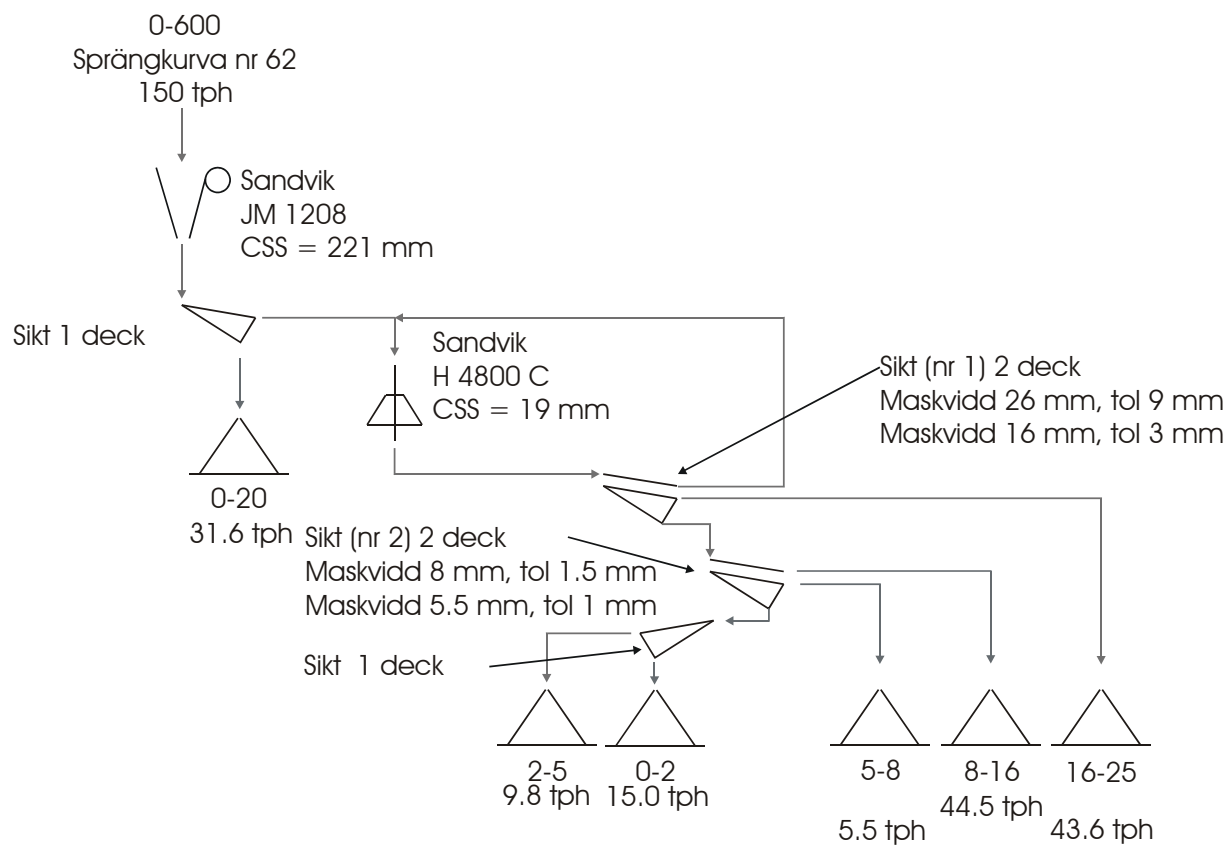
Produkt	Pris	Uppskattning av efterfrågan på de olika produkterna.	Kundkrav (överkorn / underkorn)
0-20	20 kr	2000 ton per månad	20% / -
16-25	65 kr	Obegränsad	20% / 25%
8-16	50 kr	Obegränsad	25% / 25%
5-8	60 kr	Obegränsad	25% / 25%
2-5	65 kr	Obegränsad	20% / 20%
0-2	10 kr	500 ton per månad	30% / -

5.2 OPTIMERINGSRESULTAT

Resultatet av optimeringen kan ses i Tabell 2 och Figur 9. Det första som skall noteras är kombinationen av spalten på den andra krossen och maskvidden på den efterföljande siktens översta däck. Som synes har spalten ett betydligt lägre värde än maskvidden, detta ger en väldigt liten mängd material som går till återkrossning. Detta kommer att resultera i en längre produktionskostnad eftersom produkterna utnyttjar produktionsenheterna så lite som möjligt. Samma siktdäck har också en stor slitagetolerans vilket indikerar att maskvidden inte har så stor påverkan på processen eftersom det mesta av materialet skall passera däcket. Vad kan sägas om spalten på primärkrossen är att den är satt så att största stenstorlek på sekundärkrossen in överskrids samt att så lite material som lite hamnar i 0-20 produkten som har ett lågt försäljningspris.

Tabell 2. Resultat från optimeringsrutinen tillsammans med de gränser som är satta för de olika parametrarna.

Optimeringsparameter	Resultat	Parameterbegränsningar
Sandvik JM 1208, CSS	221 mm	75 mm – 250 mm
Sandvik H 4800 C, CSS	19 mm	13 mm – 48 mm
Sikt nr 1 Maskvidd, deck 1	26 mm	25 mm \pm 20 % i steg om 1 mm
Sikt nr 1 Slitagetolerans, deck 1	9 mm	-
Sikt nr 1 Maskvidd, deck 2	16 mm	16 mm \pm 20 % i steg om 1 mm
Sikt nr 1 Slitagetolerans, deck 2	3 mm	-
Sikt nr 2 Maskvidd, deck 1	8 mm	8 mm \pm 20 % i steg om 0.5 mm
Sikt nr 2 Slitagetolerans, deck 1	1.5 mm	-
Sikt nr 2 Maskvidd, deck 2	5.5 mm	5 mm \pm 20 % i steg om 0.5 mm
Sikt nr 2 Slitagetolerans, deck 2	1 mm	-



Figur 9. Resultat från optimeringen. Mängden producerat material samt inställningarna på de olika produktionsenheterna som har optimerats.

6. SLUTSATSER OCH FORTSATT FORSKNING

Under projektets genomförande har en mjukvara för simulering och optimering av krossanläggningar utvecklats. Mjukvaran inkluderar alla de områden som diskuterats i denna rapport. Detta inkluderar en ny metod för optimering av parametrar och slitagetoleranser. Modellen av krossanläggningen som kan skapas i programvaran tar även hänsyn till ekonomiska aspekter samt materialets kvalitet. Denna kombination av teknik och ekonomi har aldrig tidigare gjorts för modellering, simulering och optimering av krossanläggningar. Sammankopplingen mellan tekniska och ekonomiska aspekter ger möjligheter att optimera krossanläggningar på det sätt som är önskvärt från de som driver dem.

Den utvecklade mjukvaran har ett grafiskt användargränssnitt som liknar det som idag används av många simuleringsprogram för krossanläggningar. Tanken med programmet är att användaren inte skall behöva några djupare kunskaper i om hur optimeringsalgoritmer och liknande fungerar i mjukvaran. Det krävs inte att användaren justerar optimeringsalgoritmerna eller något liknande för att den skall fungera. Det måste dock påpekas att användaren behöver ha kunskaper om hur optimeringsprogramvaror beter sig och vad som kan förväntas av dem.

I och med att en första prototypversion av programvaran är framtagen skall inte forskningsområdet ses som avslutat. Det finns stor potential för vidare förbättringar genom fortsatt arbete på den inslagna vägen. Två fallstudier har nyligen startats för att validera resultaten i verkliga anläggningar. När modeller används för optimering behövs alltid modeller med hög noggrannhet och kort beräkningstid. Noggrannheten i fallet med krossanläggningar är viktig eftersom flera modeller är sammankopplade. Ett litet fel i en modell för en produktionsenhet riskerar alltid att ge följdverkningar i efterföljande modeller. Detta kan i slutändan resultera i en stor avvikelse från det verkliga utfallet även om felet i de enskilda modellerna är att betrakta som små. För att korrigera för denna typ av fel behöver mätningar i anläggningen utföras. Mätningarna kan sedan föras in i modellen för att kalibrera dem och på så sätt öka noggrannheten. Mätningarna kan till exempel vara bandprov som ger partikelstorleksfördelning och kapacitet. Korrigering av modeller är dock inte helt självklar. Om en skillnad mellan en mätning och ett simuleringsresultat skall korrigeras är det inte säkert att det är modellen för produktionsenheten precis före den plats där provet har tagits som skall korrigeras. Det kan mycket väl vara så att det är en eller flera av modellerna innan som behöver justeras. Hur denna justering skall utföras är idag okänt. Vad som också skall betänkas är den naturliga variationen i processen som orsakas av slitage och inmatat material. Detta måste också beaktas vid justering av modeller.

Ytterligare områden som ännu ej utforskats är konstruktion av anläggningar. Detta sträcker sig från total anläggningslayout till olika typer av förbättringar såsom utbyte av produktionsenheter eller processteg. Att låta en dator konstruera en optimal anläggning är ett komplext problem. Speciellt då processoptimering bör tillämpas vilket i sådana fall skulle innebära att layout, parametrar och toleranser skulle behöva optimeras samtidigt. Detta resulterar i ett väldigt stort Lösningsrum. Vid konstruktion av anläggningar måste även andra aspekter förutom rent tekniska och ekonomiska aspekter beaktas. Faktorer som flexibilitet i anläggningen, olika typer av risktagande, enkel skötsel av anläggningen med mera bör även tas med.

Det finns med andra ord områden kvar som kan utforskas vidare. Vid genomförandet av fallstudierna kommer säkert också nya områden och frågeställningar att framkomma som idag inte kan förutses.

REFERENSER

- Abido M. A., *Parameter optimization of multimachine power system stabilizers using genetic local search*. Electrical power and energy systems, 2001, **23**, 785-794.
- Dearden J., *Management accounting*, Prentice hall international, 1988
- Jaszkiewicz A., *Genetic local search for multi-objective combinatorial optimization*. European journal of operational research, 2002, **137**, 50-71.
- Lindqvist, M., *Simulation of worn geometry in cone crushers*, Licentiatavhandling , Chalmers Sverige 2002.
- Mathworks Inc., MatLab (programvara), Natick, Massachusetts, USA.
- Mathworks Inc., Simulink, plugin till MatLab, Natick, Massachusetts, USA.
- Microsoft Corp., Visual Basic and Visual C++ (programvaror), Redmond, Washington, USA
- Montgomery D. C., *Introduction to statistical quality control*, Wiley, 1996
- Murata T. and Ishibuchi, H., *Multi-objective genetic local search algorithm and its application to flow shop scheduling*. IEEE transaction on systems, man, and cybernetics – Part C: Applications and reviews, 1998, **28(3)**, 392-403.
- Rajesh J. K., Gupta, S. K., Rangaiah, G. P., Ray, A. K., *Multi-objective optimization of hydrogen plants*, Chemical engineering science, 2001, **56**, 999-1010.
- Raphael B. and Smith I. F. C., *A direct stochastic algorithm for global search*. Applied Mathematics and Computation, 2003, **146** , 729-758
- Soldinger Staffhammar, M., *Screening of crushed rock material*, Doktorsavhandling, Chalmers, Sverige 2002.
- Tomlab optimization AB, TomLab (plugin till MatLab) Västerås, Sweden.
- Yuen C.C., Aatmeeyata, Gupta, S. K., Ray, A. K. *Multi-objective optimization of membrane separation modules using genetic algorithm*. Journal of membrane science, 2000, **176**, 177-196.

