CHALMERS
UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Reglering av materialnivå i stenkross

Rock crusher level control

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom mekatronik

Kalle Vikman

Institutionen för produkt- och produktionsutveckling
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
Göteborg, 2016

Reglering av materialnivå i stenkross

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom mekatronik

Kalle Vikman

Institutionen för produkt- och produktionsutveckling
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA

Göteborg, 2016

Reglering av materialnivå i stenkross

© 2016 Kalle Vikman

Examensarbete för högskoleingenjörsexamen inom mekatronik

Examinator: Gauti Asbjörnsson

Examensarbete 2016
Institutionen för produkt- och produktionsutveckling
CHALMERS TEKNISKA HÖGSKOLA
SE-412 96 GÖTEBORG
Sverige
+46 (0)31 772 1000

Omslag: Konkross Sandvik H6800 och dess matare, författarens egen bild

Göteborg, 2016

Förord

Detta arbete den avslutande delen av en högskoleingenjörsexamen inom mekatronik från Chalmers tekniska högskola. Arbetet utfördes för Roctim AB av en student på institutionen för produkt- och produktionsutveckling och sträckte sig över 10 veckor (15hp).

Examensarbetet hade inte varit möjligt utan det stöd som fåtts främst av Roctim, men även av NCC Roads som driver den krossanläggning där tester har utförts.

Från Roctim vill jag tacka min handledare Anton Bolander som varit stöd under den teoretiska biten av mitt arbete, Michael Nordström som varit oerhört hjälpsam vid implementering och testning, Kristoffer Hofling som var delaktigt i loggningen av data samt VD:n Erik Hulthén som gav mig chansen att göra mitt examensarbete här.

Från NCC Roads/Ballast vill jag tacka arbetsledare Andreas Svensson och de operatörer som varit till stor hjälp under testkörningarna.

Sist men inte minst ett stort tack till Gauti Asbjörnsson som ställde upp som examinator.

Reglering av materialnivå i stenkross

Kalle Vikman
Institutionen för produkt- och produktionsutveckling
Chalmers tekniska högskola

Sammanfattning

Rapporten är ett examensarbete som utförts av en student på Chalmers mekatronikingenjörsprogram på uppdrag av Roctim AB. Företaget har ett styrsystem för krossar under utveckling och vill undersöka om ytterligare funktioner kan läggas till i deras produkt. Examensarbetet syftar till att ta fram en reglerprincip för reglering av materialnivån en konkross. En ordentlig materialnivå bidrar till minskat slitage och ökad produktion. Lösningen ska vara allmän och lätt att implementera på någon annan anläggning. Arbetet utförs genom att en framtagen reglering iterativt utvärderas och förbättras genom ett antal testkörningar. Slutligen jämförs reglersystemet med den ursprungliga regleringen för kontrollera att arbetets mål uppfyllts. Resultatet blev en PI-regulator som dimensioneras med data från stegsvar och kan hålla nivån inom ett godtagbart spann. Det framtagna reglersystemet har möjlighet till självinställning med hjälp av ett framtaget funktionsblock.

Rock crusher level control

Kalle Vikman
Department of Product and Production Development
Chalmers University of Technology

Abstract

This report describes the degree project for a Bachelor of Engineering degree in mechatronics. Roctim AB is developing a stone crusher automation system and wants to explore the possibility of adding additional features. The aim of this project is to develop a method of regulating the rock level of a cone crusher. A proper charge level minimizes wear on the crusher and maximizes output. The solution should be general, and easily implemented on other crushers. Development of the control system is made iteratively through a series of test-runs which provide the data necessary for evaluation and improvement. Lastly, the control system is compared with the original system to make sure that the goals have been met. The end result is a PI-controller that is tuned with data from step responses and is able to regulate the level within acceptable limits. A function block that automatically tunes the controller was also developed and successfully tested.

Innehållsförteckning

1 Inledning ... 1
1.1 Bakgrund ... 1
1.2 Syfte ... 1
1.3 Mål ... 1
1.4 Avgränsningar ... 2
1.5 Precisering av frågeställning ... 2
1.6 Metod ... 2
2 Teknisk bakgrund ... 3
2.1 Krossanläggning ... 3
2.1.1 Siktar ... 4
2.1.2 Matare ... 4
2.1.3 Krossteori ... 5
2.1.4 Konkross ... 6
2.1.5 Betydelse av materialnivå i krosskammare ... 7
2.2 Reglerteknik ... 8
2.2.1 Återkopplade system ... 8
2.2.2 PID-reglering ... 9
2.2.3 PID-reglering i praktiken ... 10
2.2.4 Programmable Logic Controller (PLC) ... 13
2.3 Utnyttjandegrad ... 14
4 Studie av processen ... 16
4.1 Krossanläggningen ... 16
4.2 Process ... 16
5 Experiment ... 19
5.1 Problemundersökning ... 19
5.2 Utveckling och testkörning av framtagen reglering ... 23
5.2.1 Lämpliga reglerprinciper ... 23
5.2.2 Utveckling av PLC-program ... 25
5.2.3 Installation ... 25
5.2.4 Dimensionering ... 26
5.2.5 Testkörning #1 ... 27
5.2.6 Testkörning #2 ... 31
5.2.7 Testkörning #3 ... 37
5.2.8 Utvärdering av testresultat ... 37
5.2.9 Verifiering ... 38
5.3 Vidareutveckling av reglerprototyp ... 39
5.4 Jämförelse med ursprunglig reglering ... 39
6 Resultat ... 43
6.1 Svar på frågeställningar ... 44
6.2 Kravspecifikationen ... 44
7 Diskussion och slutsatser ... 45
7.1 Metod/Genomförande ... 45
7.2 Resultat ... 45
7.3 Framtida arbeten ... 45
Referenser ... 46

Bilagor:
Bilaga A: Simulink-modell för avsnitt 2.2.2
Bilaga B: Schema över krossanläggningen
Bilaga C: PLC-program för utvärdering av reglerprototyper
Bilaga D: Dimensionering av reglering
Bilaga E: Resultat från stegsvarstest

1 Inledning

– *Inledningen syftar till att introducera läsaren till arbetet. Dess bakgrund, syfte och mål samt de avgränsningar som görs, den metod som använts så väl som de frågeställningar som arbetet syftar till att besvara.*

1.1 Bakgrund

Ballastprodukter, ett samlingsnamn för olika typer stenprodukter, är utan tvekan livsviktigt för dagens samhälle. Under 2013 tillverkades 2,6 miljarder ton ballastprodukter inom EU, vilket motsvarar cirka 5 ton per person (1). Ballast används i asfalt- och betongtillverkning samt som fyllnadsmaterial vid hus- och infrastrukturbyggnation. Traditionellt sett har naturligt grus kunnat användas i stor utsträckning, men dess användning minskar stadigt på grund av bristande tillgång och strängare lagar, bland annat punktbeskattning (2). Det andra alternativet för tillverkning av ballastprodukter är att spränga och krossa berg. Stenkrossning är även viktigt inom gruvindustrin där malm måste finfördelas innan den kan anrikas.

1.2 Syfte

Problemet som arbetet syftar till att lösa är materialmatning till en konkross. Krossen som arbetet utförs på går med alldeles för låg materialnivå på grund av dåligt fungerande reglering av dess materialmatning. Den låga materialnivån i krossen medför att dess kapacitet ej utnyttjas till fullo och att krossen utsätts för onödigt slitage. Förbättrad materialmatning innebär alltså effektiviserad produktion samt minskat slitage.

1.3 Mål

Utveckla en lämplig reglerprincip för att hålla önskad materialnivå i krosskammaren hos en konkross samt metoder för att implementera denna reglering och verifiera bättre drift. Reglersystemet skall vara stabilt och bidra till jämnare gång. Lösningen skall så långt som möjligt vara lätt att tillämpa på andra stenkrossar. I tabell 1.1 presenteras den kravspecifikation som skall uppfyllas.

Krav #	Kriterium	Målvärde	K/Ö	Vikt	Verifiering
1	Hålla önskad materialnivå i krosskammare	Inget kvarstående fel	K	-	Testkörning
2	Aldrig överfylla krosskammare	Ej utlösa högnivålarm	Ö	5	Testkörning
3	Hantera start/stopp av kross	Skall fungera utan anmärkning	K	-	Testkörning
4	God störningsundertryckning	±10% från börvärdet	Ö	5	Testkörning
5	Hantera brusiga signaler	Inga överdrivna styringrepp	K	-	Testkörning
6	Allmän implementeringsmetod	Ingen tidigare data om krossens egenskaper skall behövas.	Ö	4	-

Tabell 1.1, Kravspecifikation som reglersystemet skall uppfylla.

1.4 Avgränsningar

- Arbetet utförs på en befintlig anläggning. Val av hårdvara ingår därmed inte i arbetet.
- Eventuell ökning av utbytet, alltså andelen användbart material, mäts inte i detta arbete, eftersom det anses vara för resurskrävande.

1.5 Precisering av frågeställning

- Kan materialnivån regleras med godtagbar noggrannhet?
- Bidrar nivåregleringen till ökad utnyttjandegrad?

1.6 Metod

Arbetet utförs i deluppgifter där första steget är en förstudie som skapar en djupare förståelse för stenkrossens arbetssätt och de mjukvaruverktyg som finns tillgängliga, samt ger en klarare bild av problemet som skall lösas. Liknande arbeten undersöks för att se om en befintlig lösning redan finns.

En reglering tas fram och utvärderas på anläggningen med hjälp av testkörningar. Till sist görs mer utförliga tester för att kunna besvara de frågeställningar som arbetet syftar till att svara på samt för att verifiera att de i kravspecifikationen ställda kraven på regleringen uppfylls.

Tidsplaneringen, som presenteras i tabell 1.2, består av ett veckovis uppdelat Gantt-schema som beskriver när de olika delmomenten skall utföras.

Aktivitet	**V.12**	**V.13**	**V.14**	**V.15**	**V.16**	**V.17**	**V.18**	**V.19**	**V.20**	**V.21**
Förstudie										
Kravspecifikation										
Utveckling										
Implementering										
Verifiering										
Rapportskrivning										

Tabell 1.2, Veckovis uppdelad tidsplanering.

Under den implementeringsfas som är satt halvvägs in i arbetet, under vecka 16, implementeras en tidig prototyp på krossen för att kunna utvärdera reglerprincipen och dess dimensioneringsmetoder för att se om den är lämpad att vidareutvecklas.

2 Teknisk bakgrund

– *Detta kapitel syftar till att introducera läsaren till krossanläggningars användningsområden, konkrossars arbetsprincip, samt de verktyg som används för att styra dem.*

2.1 Krossanläggning

En Krossanläggnings huvudsakliga uppgift är kornstorleksreducering. Det sker med hjälp av krossar i ett eller flera steg beroende på önskad produkt. Materialet krossanläggningar matas med består oftast av sprängsten men kan även bestå av naturligt förekommande grus. Primära krossar, ofta käft- eller spindelkrossar, är det första bearbetningssteget. Krossar matas med hjälp av matare från buffertbehållare som kallas fickor. Större fickor, som ofta sitter efter primärkrossar, kallas stackar. Sekundära krossar, ofta konkrossar, matas med sten som först passerat genom en primärkross. Siktar används för att sortera material efter kornstorlek och dela upp produkten i olika kornstorleksklasser. Krossanläggningar använder ofta slutna system, vilket innebär att de största partiklarna från sekundära krossar cirkulerar tillbaka för att krossas igen i samma kross. Det kan ses i den krossanläggning som visas i figur 2.1 där kornstorlekarna 64+ mm siktas ut och matas tillbaka in i konkrossen.

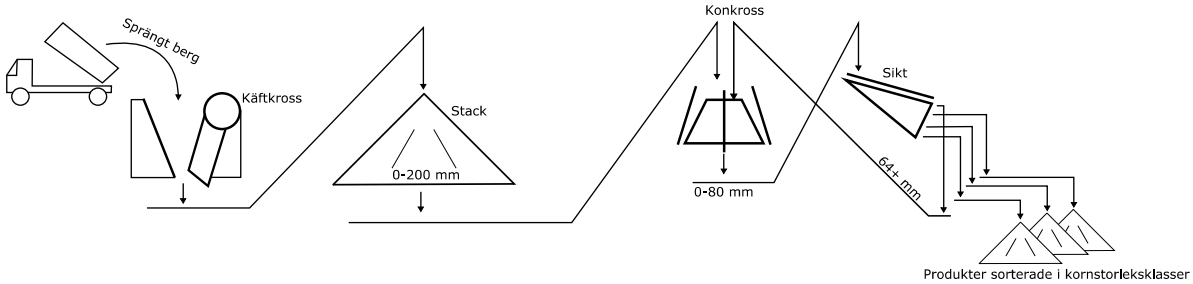


Fig. 2.1, En något enkel, men typisk krossanläggning.

Vilken kornstorlek som tillverkas beror på önskad produkt. Kornstorlekar vid ballasttillverkning kan till exempel vara 2-6 mm som passar till halkbekämpning, eller 40-80 mm som används som banvall till järnvägar. Vid gruvdrift är önskad kornstorlek sådan att det går att komma åt mineralerna för anrikning.

2.1.1 Siktar

Som tidigare nämnts används siktar för att sortera material efter kornstorlek. De finns i en del olika utföranden, men arbetsprincipen är för det mesta densamma: materialet passerar över ett vibrerande galler med hål av en viss dimension. Partiklar som har en kornstorlek mindre än hålen i gallret kan falla igenom, medan större partiklar passerar över gallret. Som illustreras i figur 2.2 kan siktar ha flera lager av galler ovanpå varandra där gallrena har successivt mindre hål, för att då kunna sortera till flera olika storleksklasser på samma gång.

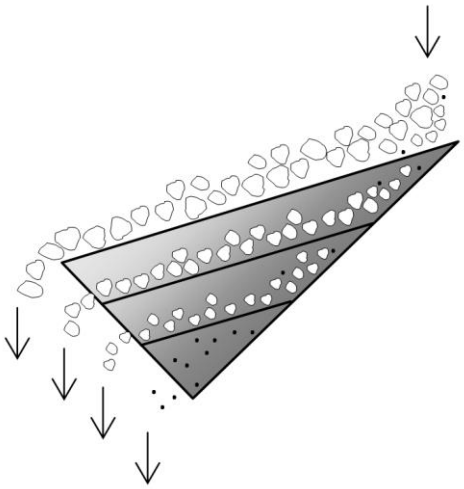


Fig. 2.2, Sikt som delar upp material i fyra kornstorleksklasser.

Det finns även siktar som sorterar efter andra storheter än kornstorlek, till exempel efter densitet eller ferromagnetism.

2.1.2 Matare

Matare används för att på ett kontrollerat sätt kunna mata ut material från en ficka eller stack. De två vanligaste typerna använder vibration respektive ett band av stållameller för att mata fram material. Krossar kan antingen matas direkt, eller via transportband vilket illustreras i figur 2.3.

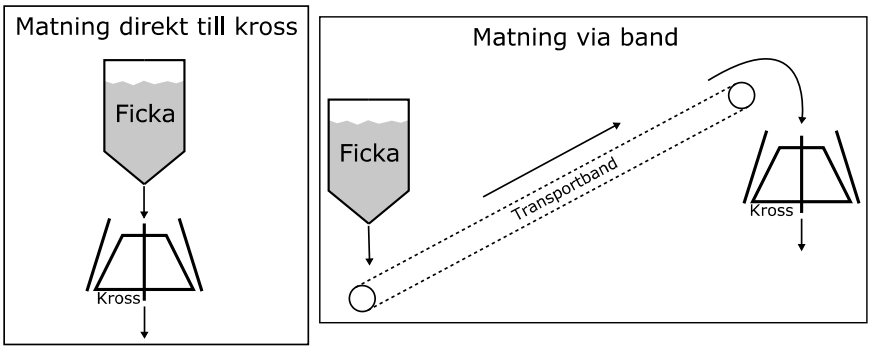


Fig. 2.3, Direktmatning (t.v.) respektive matning via band (t.h.).

Matning via band gör att reglering av materialnivån blir svårare, eftersom systemet då får en extra dödtid som är bandets transporttid.

2.1.3 Krossteori

För att bättre kunna förstå hur stenkrossning går till ges läsaren här en kort introduktion till den teori som ligger till grund till den storleksreducering som sker i stenkrossar. De tre huvudsakliga krossprinciperna enligt Evertsson (3) är:

- Kompression
- Stötning
- Skjuvning

Figur 2.4 illustrerar krossning på grund av kompression. Denna typ av krossning kommer i två varianter: kraftbetingad och formbetingad. Vid kraftbetingad kompression är kornstorleksreduceringen en funktion av energin, och därmed trycket, som tillsätts en partikel. Formbetingad krossning innebär att kornstorleksreduceringen istället är en funktion av den komprimerande sträckan. I konkrossar sker formbetingad kompressiv krossning.

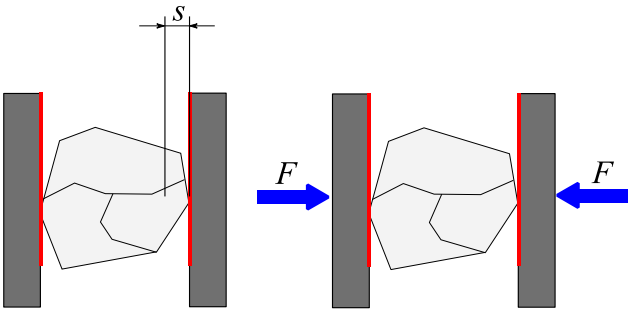


Fig. 2.4, Form- (t.v) respektive kraftbetingad (t.h) kompression (3).

Stötning är en typ av kraftbetingad krossning där partikeln genom en kraftig stöt bryts i mindre delar enligt fig. 2.5. Stöten åstadkoms genom att partiklar träffas av en snabbt roterande rotor, eller att de accelereras till en hög hastighet in i en vägg.

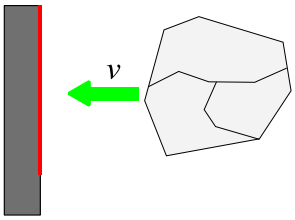


Fig. 2.5, Storleksreducering via stötning (3).

Skjuvning, som visas i figur 2.6, är kornstorleksreducering på grund av de skjuvspänningar som friktion ger upphov till. Ofta sker det på grund av interaktioner mellan partiklar. Även denna typ av krossning utnyttjas till viss del i konkrossar.

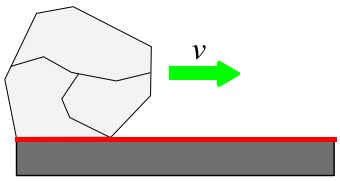


Fig. 2.6, Storleksreducering på grund av skjuvning (3).

2.1.4 Konkross

Konkrossar består av en inre kona och en yttre mantel vilket visas i figur 2.7. Material matas in ovanifrån och den krossade stenen kommer ut nedtill. Konan roterar excentriskt vilket medför att avståndet mellan kona och mantel i en viss punkt varierar cykliskt. Studeras ett vertikalt tvärsnitt av krosskammaren passerar partiklar genom krossen i en process där de växelvis faller längre ner i krossen då avståndet ökar för att sedan krossas då avståndet minskar. Denna process upprepas ett antal gånger innan partikeln lämnar krossen. Alltså krossas partiklar flera gånger.

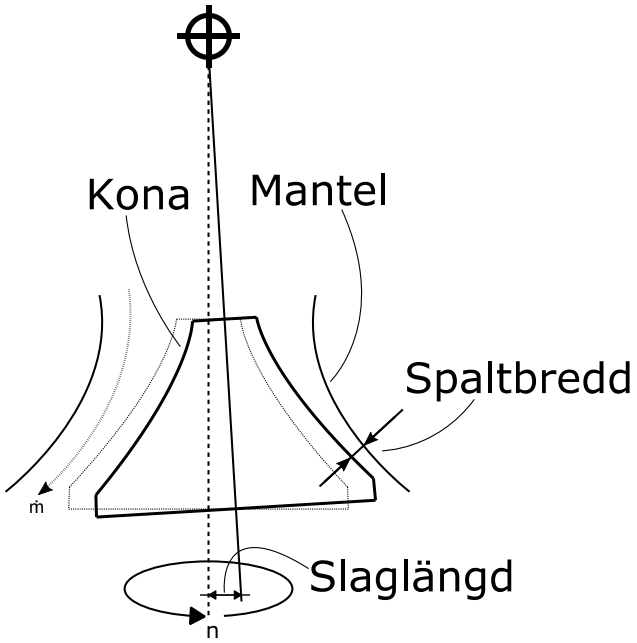


Fig. 2.7, Schematisk bild som visar konans excentriska rörelse.

Genom att variera trycket i den hydraulcylinder som krossens huvudaxel vilar på kan konan justeras i höjdled vilket påverkar avståndet mellan kona och mantel. Det minsta avståndet mellan kona och mantel kallas spaltbredd och är ofta det som justeras för att få önskad kornstorlek ut ur krossen. För att hålla spaltbredden konstant måste konan i små steg successivt höjas eftersom både kona och mantel nöts under drift vilket ökar spaltbredden.

Det är inte bara spaltbredden som avgör kornstorleksdistributionen ut från krossen, utan även krossens varvtal, slaglängden för konans excentriska rörelse, krosskammarens geometri samt kornstorlek och materialegenskaper hos det inmatade materialet (4). Spaltbredd och varvtal är dock de enda parametrarna som kan justeras under drift. Traditionellt sett krävdes det att krossen stoppades och att drivremmar fick byta läge för att kunna ändra varvtal. Detta är arbetsintensivt och med andra ord inget som gjordes ofta. Billigare och mer kapabla frekvensomvandlare har däremot under senare tid möjliggjort att varvtalet kan ändras under drift.

2.1.5 Betydelse av materialnivå i krosskammare

Konkrossar går bäst då de går med full krosskammare. Hur det ser ut illustreras i figur 2.8. Att krossen körs med ordentlig materialnivå kallas i engelsk litteratur att köra krossen ”choke-fed”. Den största fördelen med det är att slitage på krossen minimeras. Om krossen går med låg materialnivå faller inmatade stenar rakt ner i krossen vilket förkortar konan och mantelns livslängd. Körs krossen däremot med rätt materialnivå faller stenar istället på en bädd av tidigare inmatad sten. En låg materialnivå innebär även att krossningen av sten begränsas till en liten del av krosskammaren, den del där material matas in, vilket gör att manteln slits ner inom detta område och då kan behöva bytas ut i förtid. I och med att krossningen koncentreras till en viss del av krossen fås en ojämn tryckfördelning vilket leder till stora tryckförändringar under varje varv som konan roterar. Tryckförändringarna leder i sin tur till minskad livslängd på komponenter som lager, bussningar och skruvar.

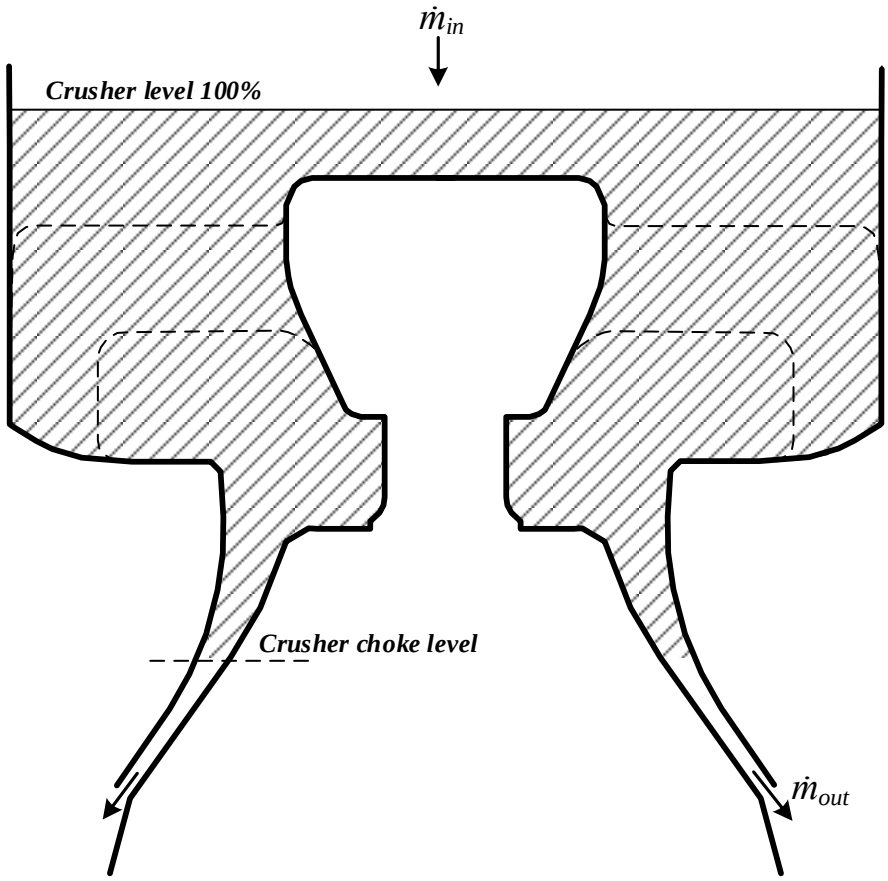


Fig. 2.8, Konkross i genomskärning med den önskvärda materialnivån inritad.

En ordentlig materialnivå innebär även att interaktioner mellan partiklar i krossen ökar. Detta medför att partiklar, istället för att krossas mellan kona och mantel, krossas av varandra vilket innebär minskat slitage. Partikelinteraktion, vilket möjliggör storleksreducering genom skjuvning, är att föredra även ur kvalitetssynpunkt. Skjuvning ger partiklar som har en mer kubisk form, vilket är att föredra för de flesta produkter. Partikelform beskrivs ofta enligt de europeiska standarderna flisighetsindex (SS EN 933-3) och LT-index (SS EN 933-4) (5).

Att hålla rätt materialnivå bidrar alltså både till jämnare kvalitet så väl som ökad livslängd på slitdelar.

2.2 Reglerteknik

Reglerteknik är läran om automatiska system, och med det menas oftast återkopplade automatiska system.

2.2.1 Återkopplade system

Återkoppling innebär att det som ska kontrolleras, även kallat *reglerad storhet* samtidigt mäts. Exempel kan vara farthållare till en bil eller uppvärmning av ett hus. Det objekt vars storhet ska regleras kallas *reglerobjekt*. Komponenter som mäter den reglerade storheten kallas *givare*, och de komponenter som påverkar den kallas *styrdon* (6). Återkopplade system behöver även en *styrenhet*, kallad *regulator*. Den är systemets ”hjärna” och jämför den reglerade storhetens nuvarande värde (*ärvärde*) med det önskade värdet (*börvärde*) och skapar en signal som kallas *fel*. Felet är skillnaden mellan är- och börvärde. Regulatorn använder sedan felet tillsammans med någon matematisk funktion för att skapa en *styrsignal* som påverkar den reglerade storheten på önskat sätt med hjälp av styrdon. Tabell 2.1 visar hur alla delar hänger ihop i de två tidigare nämnda reglersystemen.

Reglersystem	Reglerobjekt	Reglerad storhet	Styrsignal	Givare	Styrdon
Farthållare	Bil	Hastighet	Bränsle till motor	Hastighetsmätare	Motor
Husuppvärmning	Hus	Temperatur	Effekt till radiator	Termometer	Radiator

Tabell 2.1, Olika delar av de tidigare givna exemplen på reglersystemen.

Regulatorn bestod förr av mekaniska eller pneumatiska system alternativt elektroniska hårdvarulösningar. Numera används nästan uteslutande datorbaserade regulatorer, tack vare deras flexibilitet och billiga pris. Figur 2.9 visar hur reglersystem kan presenteras grafiskt.

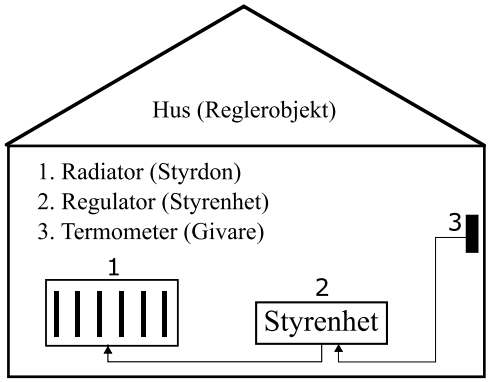


Fig.2.9, Uppvärmning av ett hus, grafisk presentation (6).

Grafisk presentation blir lätt oöverskådligt i mer komplicerade system och därför beskrivs reglersystem ofta istället på blockschemaform, vilket illustreras i figur 2.10.

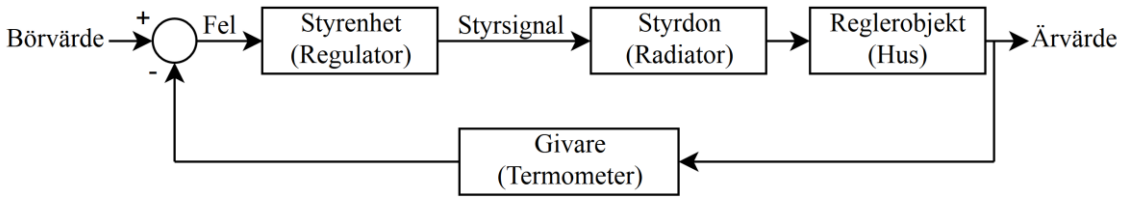


Fig.2.10, Blockschema som beskriver ett reglersystem för uppvärmning av ett hus.

2.2.2 PID-reglering

PID-reglering är den i särklass vanligaste reglerprincipen. Inom processindustrin styrs 95 % av alla processer med PID, där PI är den mest använda varianten (7). PID är en förkortning där varje bokstav står för en av de tre matematiska funktioner som regleringen använder sig av.

PID-regulatorn som beskriven av Hägglund (8):

<u>Proportionell reglering:</u>

Styrsignalen *u* är proportionell mot felet *e*. Proportionalitetskonstanten *K* kallas förstärkning.

$$u = u_0 + K * e$$

u_0 är styrsignalens normalvärde, mer om detta längre fram.

<u>Integrerande reglering:</u>

Styrsignalen är integralen av felet. T_i kallas integrationstid.

$$u = \frac{1}{Ti}\int_0^t e(t)dt$$

<u>PI-regulator:</u>

Ofta kombineras proportionell och integrerande reglering och kallas då för en PI-regulator.

$$u = K\left[e + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt\right]$$

<u>Deriverande verkan:</u>

Styrsignalen är derivatan av felet med förstärkningen T_D som kallas deriveringstid. Deriverande verkan används aldrig för sig utan används som en del i PID- och, i undantagsfall, PD-regulatorer.

$$u = T_D\frac{de(t)}{dt}$$

<u>PID-regulator:</u>

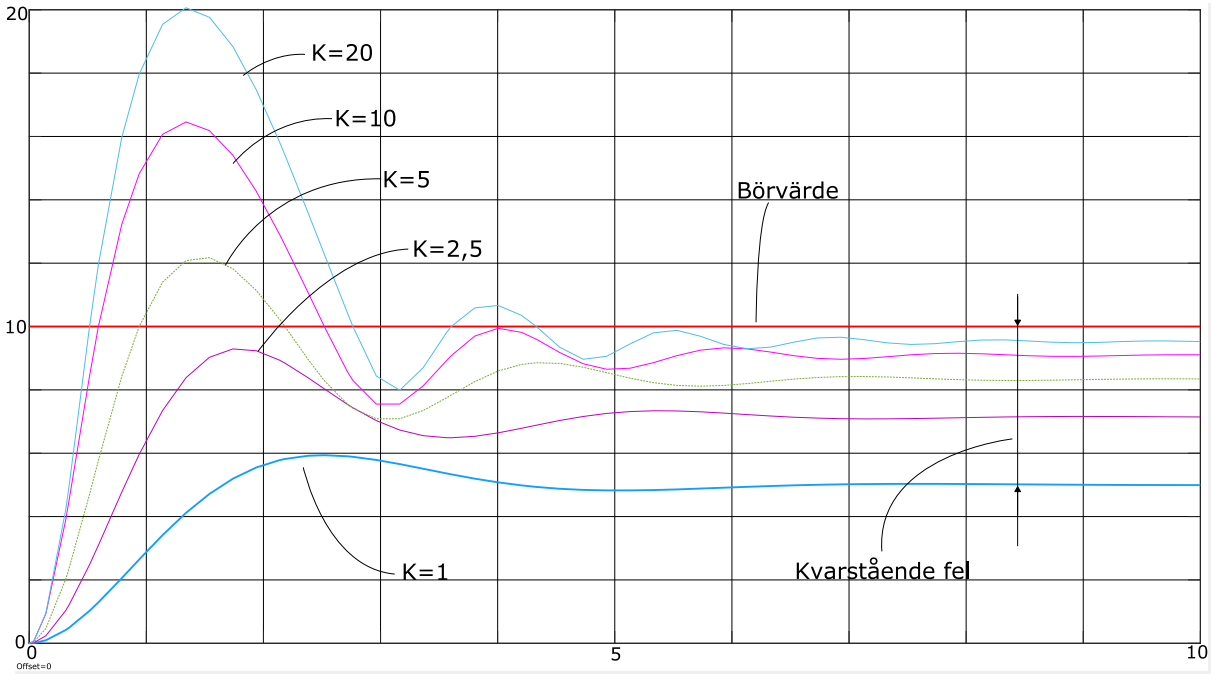
På samma sätt som för I-delen kan en D-del bakas in i PI-regulatorn. Visas här på parallell form.

$$u = K\left[e + \frac{1}{T_i}\int_0^t e(t)dt + T_D\frac{de}{dt}\right]$$

2.2.3 PID-reglering i praktiken

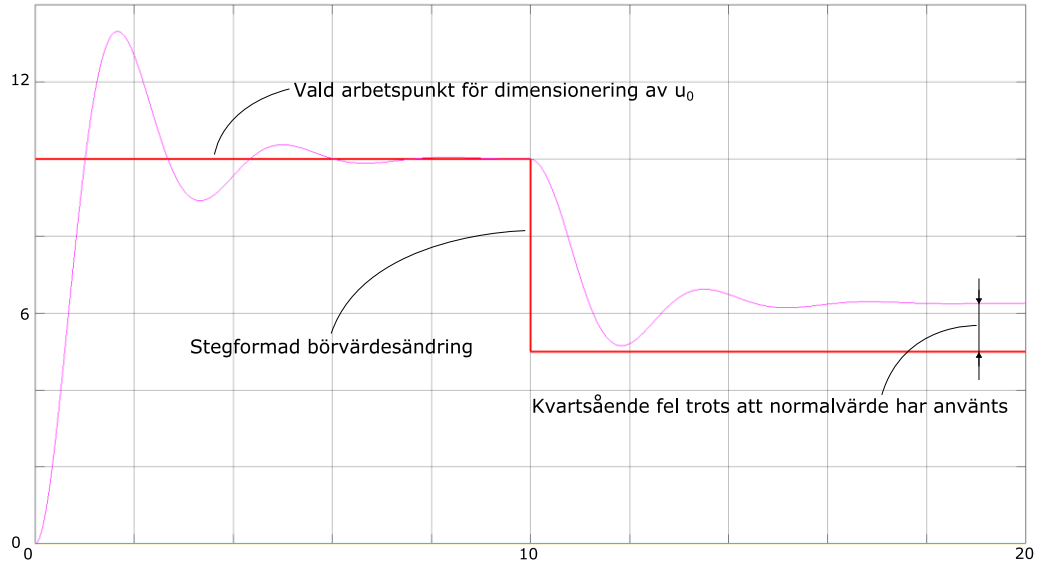
Figurerna i detta avsnitt har som syfte att ge läsaren en kvalitativ förståelse för reglerparametrarnas påverkan på regleringen och utgår från den överföringsfunktion och Simulink-modell som presenteras i bilaga A.

Vid ren P-reglering, då, $u_0 = 0$, fås ett kvarstående fel, vilket kan avläsas i figur 2.11. Genom att öka förstärkningen så minskar det kvarstående felet, men systemet får en allt större översväng vid börvärdesändringar och i extremfall kan processen börjar självsvänga.



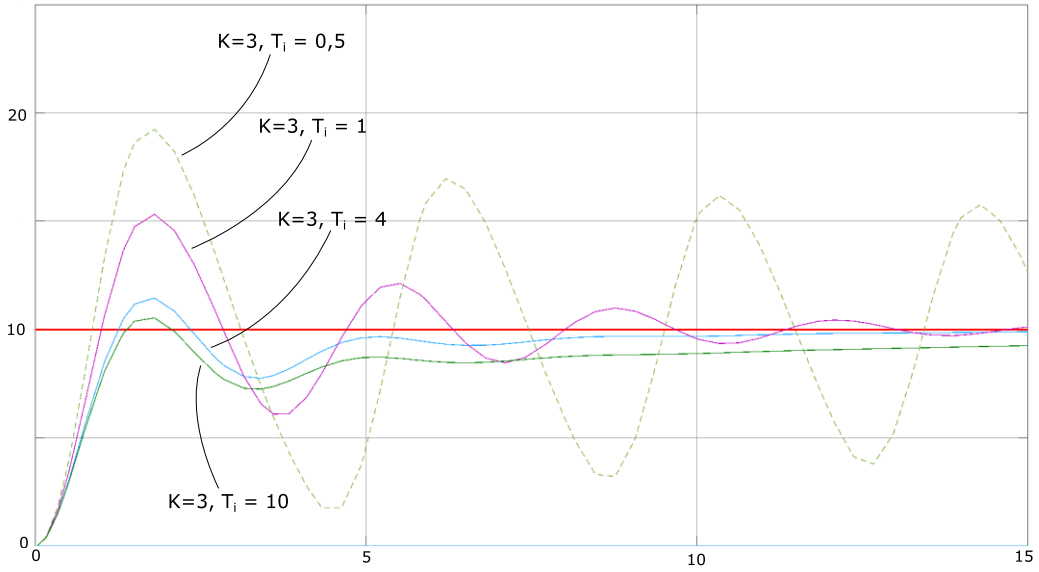
Figur 2.11, Olika värden på K vid P-reglering.

En metod för att få bort det kvarstående felet är att addera ett normalvärde u_0 till styrsignalen, alltså den styrsignal som krävs för $e = 0$ vid den valda arbetspunkten. Som kan avläsas ur figur 2.12 kan detta endast eliminera kvarstående fel i en viss arbetspunkt. Om börvärdet är något annat än det som u_0 dimensionerades för fås återigen ett kvarstående fel.



Figur 2.12, Skillnaden mellan P-reglering med normalvärde och PI-reglering.

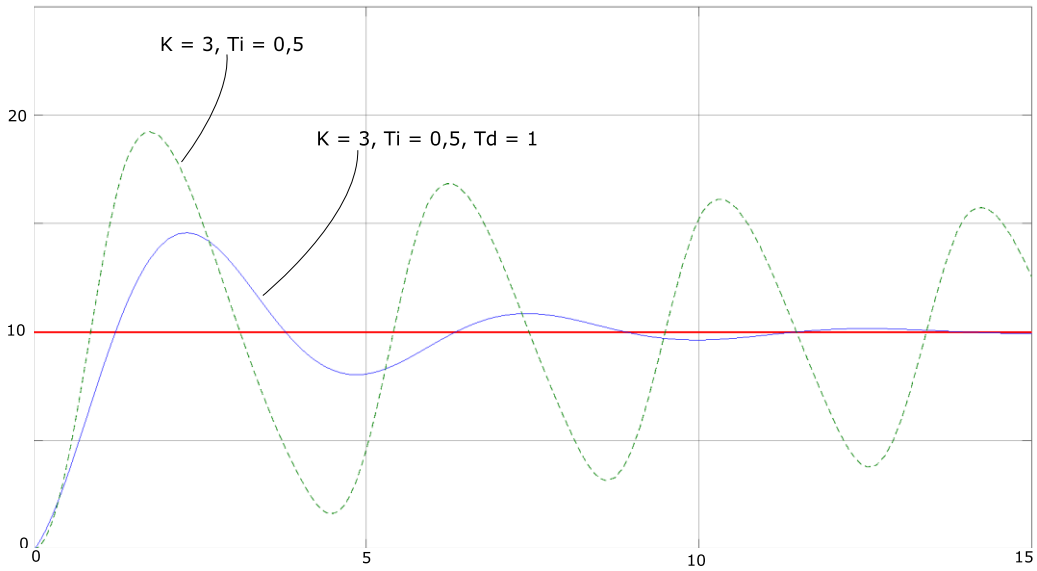
Istället för normalvärde används oftast integration, vilket visas i figur 2.13. I-delen justerar successivt upp (eller ner) styrsignalen tills felet har eliminerats.



Figur 2.13, Inverkan av integrationstid vid PI-reglering.

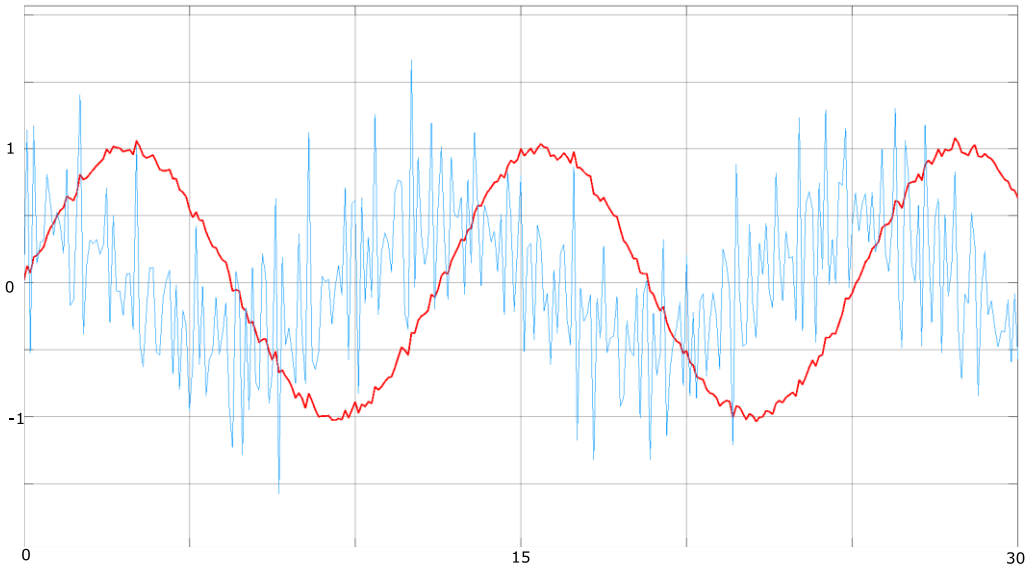
En väldimensionerad integrationstid eliminerar effektivt det kvarstående felet, men en bristfälligt dimensionerad integrationstid innebär antingen, om den är för stor, att regleringen blir långsam eller, om den är för liten, att regleringen blir instabil.

Derivataverkan ökar generellt sett stabiliteten. D-delens bidrag är som sagt proportionell mot felets derivata, och ”bromsar” därmed upp förändringar av ärvärdet och dämpar svängiga processer, vilket illustreras i figur 2.14. För reglering av processer det inte får förekomma någon översväng är derivataverkan att föredra.



Figur 2.14, Derivataverkans förmåga att öka stabiliteten.

En nackdel med att använda derivataverkan är att regleringen blir känslig för brusiga signaler. Som fig. 2.15 visar kan detta kan medföra väldigt kraftiga och snabbt skiftande styringrepp.

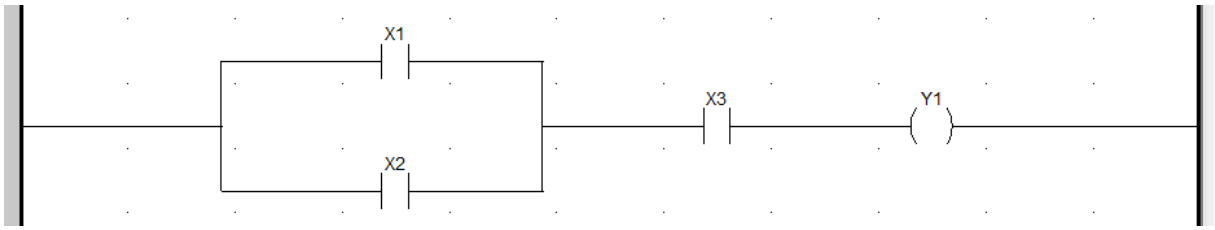


Figur 2.15, Brusig sinuskurva (tjock röd) och dess derivata (tunn blå).

2.2.4 Programmable Logic Controller (PLC)

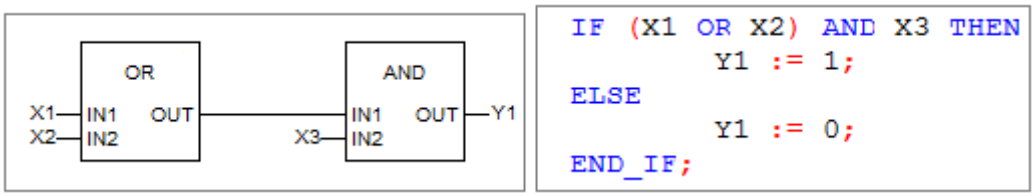
Industriell automation handlade fram till 70-talet om relälogik. För varje process som skulle styras kunde det krävas en hel vägg av reläer, vilka har rörliga delar och därmed en begränsad livslängd. Att felsöka en anläggning där något relä slutat fungera kunde visa sig bli väldigt tidsödande, och skulle någon ändring i automationen ske krävdes det att systemet byggdes om. En bättre lösning är att använda PLC, en datorbaserad ersättare till relälogiken.

För att kunna ta vara på den kompetens inom automation som redan fanns skrevs PLC-program till en början i ladder (LD), ett språk som skapades för att efterlikna system uppbyggda av reläer (9). Ett exempel på hur ladder kan se ut finns i figur 2.16.



Figur 2.16, Exempel på ladder-program. Utgången Y1 är till om ingångarna X1 eller X2 och X3 är till.

Vid sin introduktion kunde PLC bara hantera relälogik, och då är ladder ett lämpligt språk, men allt eftersom PLC utvecklades till ett mer kraftfullt verktyg blev ladder krångligt att använda. Numera skrivs program oftast i funktionsblocksdiagram (FBD), med vissa avsnitt i strukturerad text (ST). Exempelkod för FBD och ST finns i figur 2.17.



Figur 2.17, Samma logik som i fig.2.16, men här i FBD (t.v.) och ST (t.h.).

En annan fördel med datorbaserad gentemot reläbaserad automation är dess snabbhet. Reläer kräver en viss tid för tillslag, i storleksordningen några millisekunder. Tillslagstid är ett problem som datorbaserade system inte har.

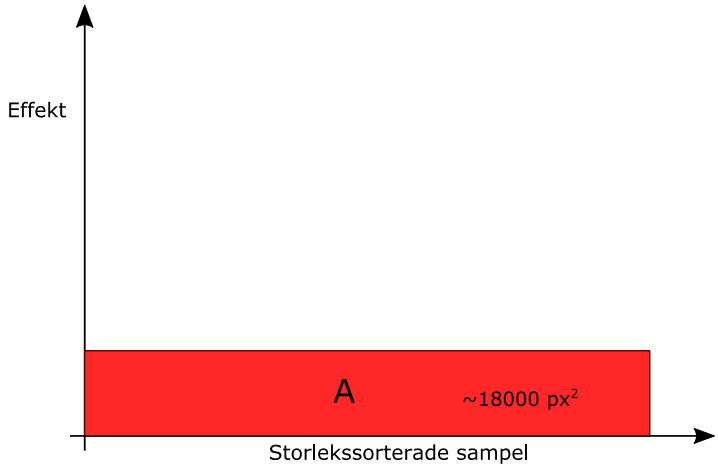
2.3 Utnyttjandegrad

Utnyttjandegrad används för att se hur väl en kross utnyttjas. För att räkna ut utnyttjandegraden används en variant av den metod som beskrivs av Lindstedt och Bolander (10). Effekt- eller trycksampel tas från loggad data och storlekssorteras. Därefter räknas det ut hur stor andel av effekten/trycket som använts för att krossa sten. Detta görs genom att jämföra integralerna, alltså summan av alla sampel, för de kurvor som bildas. En kurvas integral kan också ses som arean under kurvan.

$$utnyttjandegrad = \frac{area_{tot} - area_{tomgång}}{area_{tot}} = \frac{area_{krossning}}{area_{tomgång} + area_{krossning}}$$

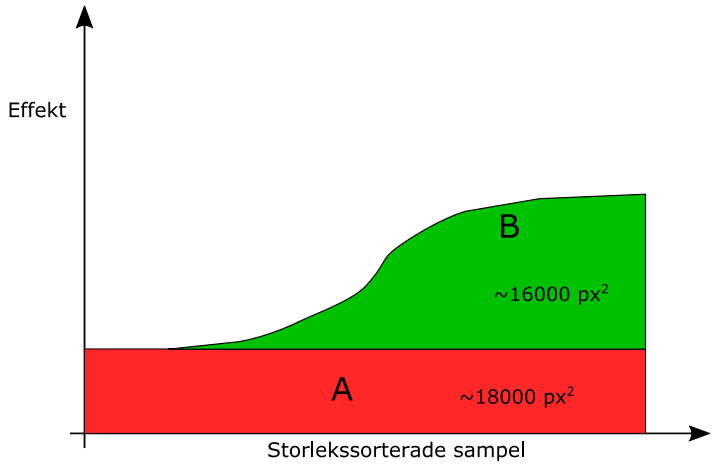
I figur 2.18 går krossen på tomgång. Inget material matas in i krossen, alltså används ingen effekt till att krossa sten och därmed blir utnyttjandegraden 0 %.

$$(area_{tot} = area_{tomgång} \rightarrow area_{krossning} = 0)$$



Figur 2.18, Exempel på loggad effekt då krossen går på tomgång.

I figur 2.19 visas en uttjandegradkurva när krossen matas med sten. Den tidigare framtagna tomgångseffekten används för att se hur mycket effektförbrukningen ökat jämfört med när krossen körs tom. En area för tomgångseffekten skapas.



Figur 2.19, Exempel på loggad effekt för kross under drift.

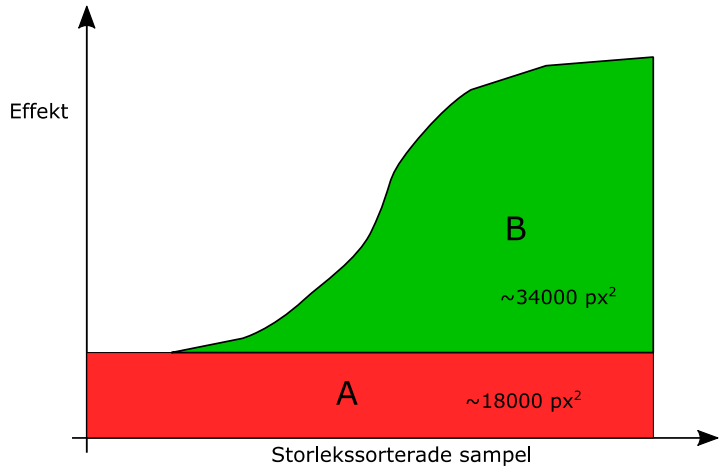
För exemplet i figur 2.19 blir då uttyttjandegraden:

$$area_{tomgång} = effekt_{tomgång} * antal\ sampel$$

$$utnyttjandegrad = \frac{area_{tot} - area_{tomgång}}{area_{tot}} = \frac{16000}{18000 + 16000} = 47\ \%$$

Figur 2.20 visar en kross som arbetar hårdare, alltså drar mer effekt. Utnyttjandegraden blir därför högre i och med att en större andel av den använda effekten går åt till att krossa sten:

$$utnyttjandegrad = \frac{area_{tot} - area_{tomgång}}{area_{tot}} = \frac{34000}{18000 + 34000} = 65\ \%$$



Figur 2.20, Ytterligare exempel på loggad effekt för kross under drift.

Det är önskvärt att ha en så hög utnyttjandegrad som möjligt eftersom krossen då utnyttjas maximalt, och inte körs på halvfart. Högre utnyttjandegrad innebär ökad produktion. Även formen på kurvan kan vara intressant. Värt att poängtera är att utnyttjandegrad endast kan användas som jämförelse om all data loggats på samma kross under liknande förutsättningar. Bland annat spaltbredd och egenskaper hos det inmatade materialet har stor påverkan på krossens effektförbrukning och tryck. Utnyttjandegrad uträknat på det här sättet är alltså ingen absolut måttstock.

4 Studie av processen

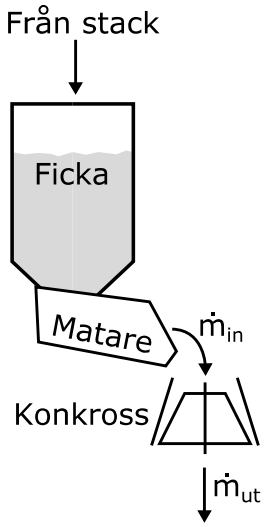
– *I detta kapitel presenteras processen och dess karakteristik.*

4.1 Krossanläggningen

Krossanläggningen, som ligger i Tagene strax utanför Göteborg, består av två krossar. En primär käftkross och en sekundär konkross. Förutom de två krossarna består anläggningen av ett antal band som transporterar material runt i anläggningen samt siktar som sorterar material efter kornstorlek. Se bilaga B för ett schema av anläggningen. Det är nivån i konkrossen K240 (Av typ Sandvik H6800/CH660) som ska regleras genom att styra matare M230 (Även den från Sandvik). Automationen sköts av ett PLC från Schneider.

4.2 Process

Processen som ska regleras visas i figur 4.1 och är en del av en större anläggning, men arbetet avgränsas till att reglera nivån i krossen utan hänsyn till anläggningens andra delar. För den intresserade finns ett schema av hela anläggningen i bilaga B.



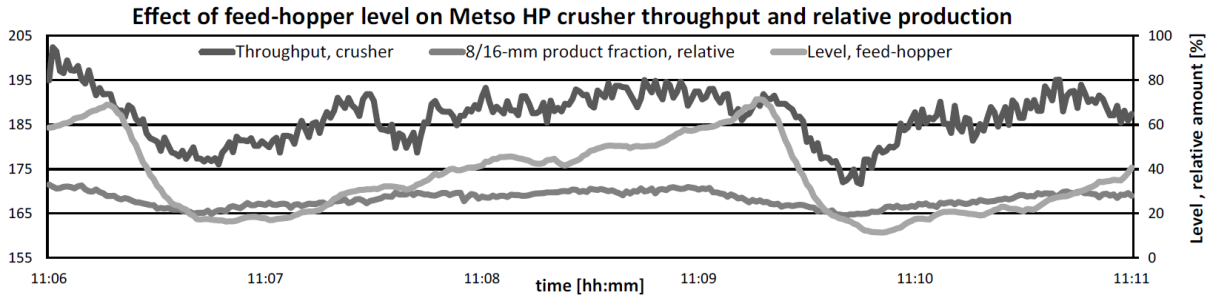
Figur 4.1, Processen som ska regleras.

Materialnivån regleras genom att styra matarens frekvensomriktare och mäts med en radarnivågivare av fabrikatet VEGA, figur 4.2.

Figur 4.2, VEGAPULS, givare som medelst radar mäter nivåerna i ficka och kross[1].

[1]Bild använd med tillstånd av VEGA Grieshaber KG.

Matare-kross är en integrerande process, vilka är speciella på det sättet att det bara finns en enda styrsignal som håller nivån stabil. Om styrsignalen ökas eller minskas så stannar inte nivån i något läge, utan växer linjärt. Processen i fråga är dock inte ideal och ett visst samband mellan nivå och utflöde finns, vilket visas i figur 4.3.

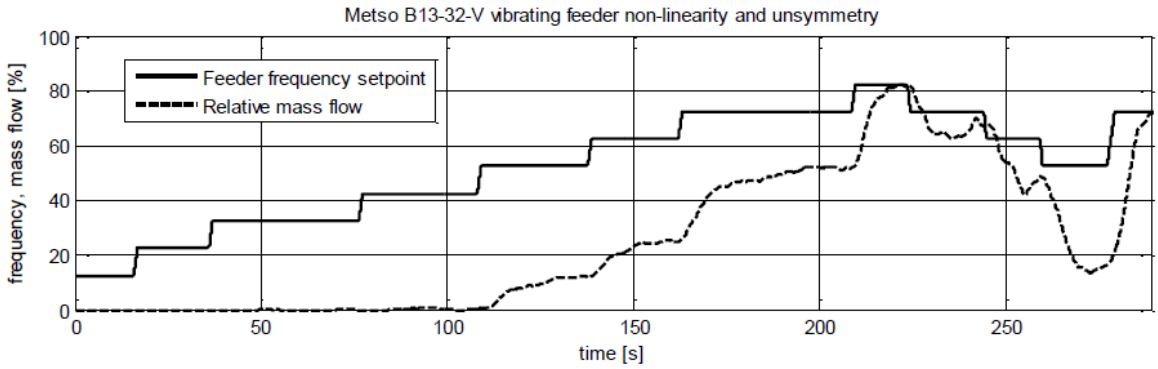


Figur 4.3, Samband mellan materialnivå och massflöde genom en konkross (11).

Eftersom sambandet mellan materialnivå och massflödet ut från krossen inte anses vara nog starkt eller för den delen lätt att räkna på så försummades det. Det samband med nivå som finns gäller dessutom bara upp till en viss punkt, varefter massflödet ut ur krossen är fullt utvecklat, vilket innebär att det ej längre ökar med ökande nivå (12). När krossen körs ”choke-fed”, när nivån ligger inom arbetsområdet, finns alltså inget användbart samband mellan nivå och massflöde. Massflödet ut ur krossen har mycket starkare samband med andra storheter, till exempel spaltbredd (13), varvtal (14), (15) eller egenskaper hos det inmatade materialet. Krossen behandlas därför som en rent integrerande process. Detta innebär att dimensioneringsmetoder som använder KLT (förstärkning K, dödtid L, tidskonstant T) inte går att använda, utan någon annan metod måste användas. Ett exempel på en liknande process som är lättare att relatera till är en nivåprocess där inflödet till en behållare bestäms av en ventil som ska regleras, och utflödet bestäms av en pump.

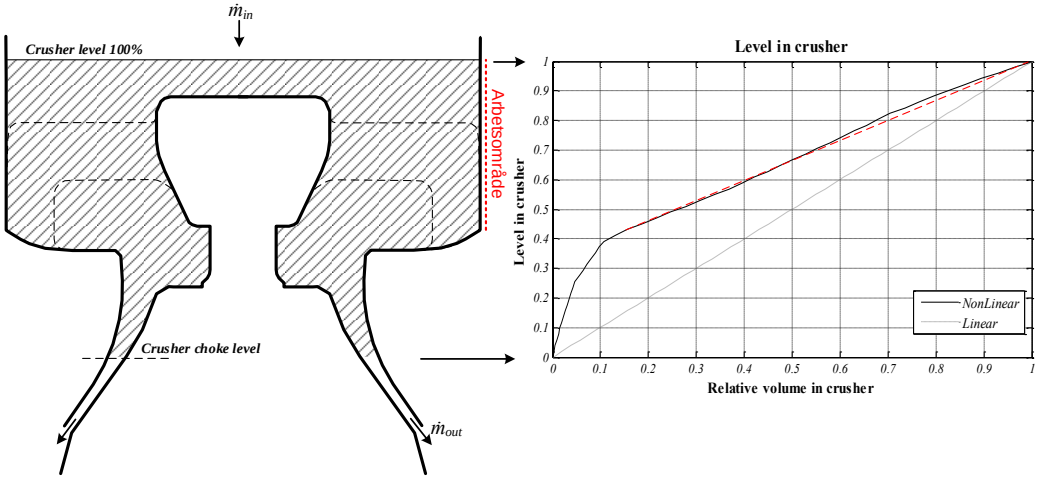
Målet för regleringen är inte bra börvärdesföljning, utan bra störningsundertryckning. Börvärdet kommer vara konstant en längre tid. Störningsundertryckning är en utmaning eftersom systemet utsätts för konstanta störningar i form av varierande massflöde in/ut ur krossen. Materialet krossen matas med består av en blandning olika stora stenar som beter sig på oförutsägbara sätt vid matning så väl som vid krossning. Dessutom sker matningen av sten i diskreta enheter, alltså ett visst antal stenar, vilket gör att en helt jämn nivå inte är möjlig att få. Snabbhet är inte speciellt viktigt, desto viktigare är att nivån hålls så stabil som möjligt.

Processen är till någon grad olinjär. En källa till olinjäritet, mataren, kan till viss del elimineras genom att skala styrsignalen eller trimma in mataren. Matarens olinjäritet visas i figur 4.4.



Figur 4.4, Sambandet mellan styrsignal och massflöde ut ur en vibratormatare (11).

En annan olinjäritet är krossens varierande tvärsnittsarea. En funktion för volym-nivå hade kunnat tas fram och användas i regleringen, men det ansågs vara onödigt komplicerat. Ovanför själva krosskammaren, i det område där den önskade nivån kommer ligga, är tvärsnittsarean mer eller mindre konstant, vilket innebär att volymen ökar linjärt med nivån. Inom det linjära området kan ett arbetsområde för bestämning av hastighetsförstärkning definieras, vilket visas i figur 4.5.



Figur 4.5, Samband mellan nivå och volym i en Sandvik H6800 (CH660).

I de fall när krossar matas via band kan det förekomma långa dödtider på uppemot en minut, men att hantera dessa långa dödtider valdes inte som prioritet, utan behandlas som undantagsfall. Fokus ligger alltså på att utveckla en bra nivåreglering för krossar som matas direkt från matare.

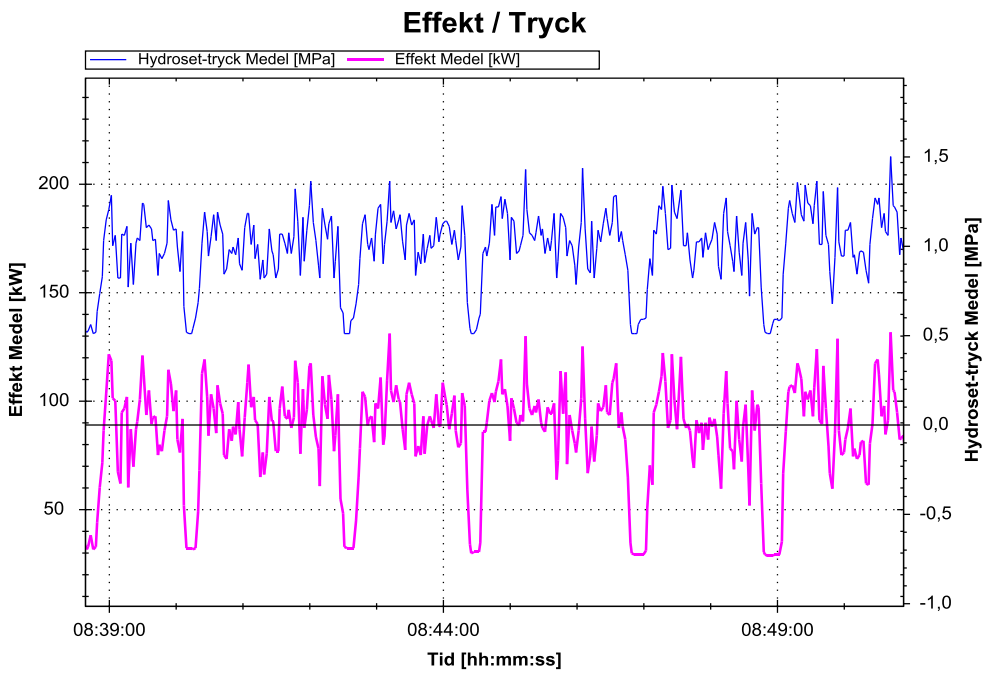
5 Experiment

– *Här presenteras det praktiska genomförandet som består av ett antal testkörningar som ligger till grund för utveckling och utvärdering av reglersystemet.*

5.1 Problemundersökning

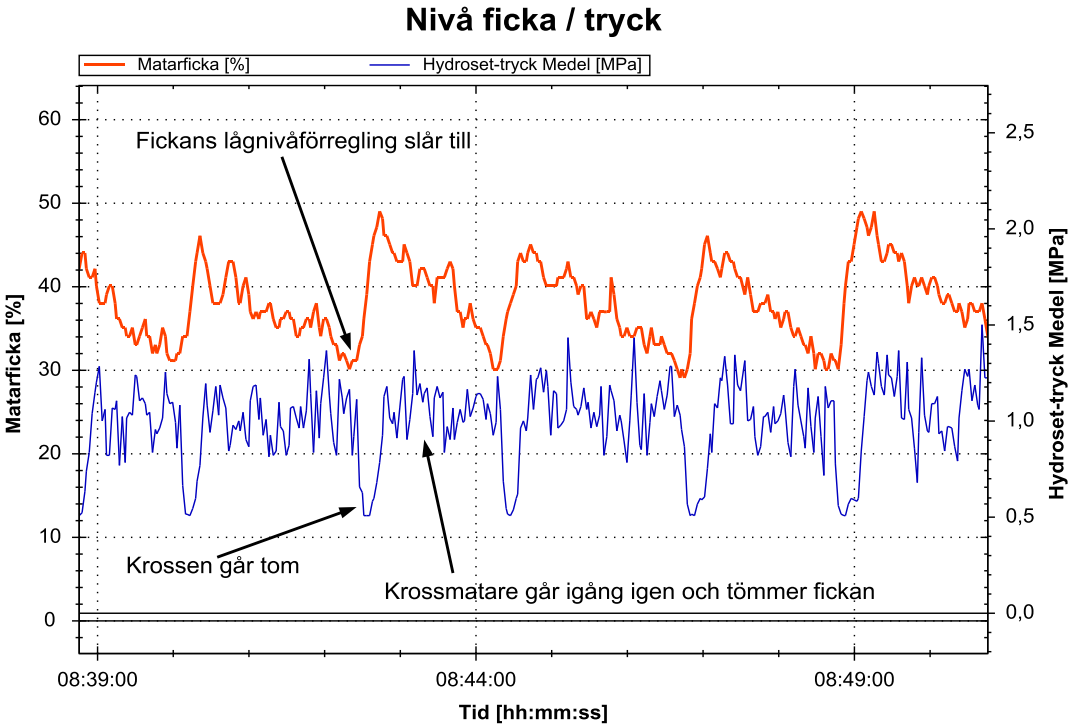
För att förstå systemet bättre samt för att få en referens att jämföra reglering med loggades krossens driftsparametrar med den reglering som satt på krossen ursprungligen.

Fig. 5.1 visar sambandet mellan effekt och tryck. Ofta är det dessa parametrar som övervakas för att se hur hårt krossen arbetar. Effekten mäts på den motor som driver konans excentriska rörelse, och trycket mäts i den cylinder som huvudaxeln vilar på. Sambandet med mängden sten som krossas är intuitivt, att krossa mer sten kräver mer energi och höjer arbetstrycket. Inte bara mängden sten som passerar krossen påverkar dessa, utan även vilken bergart som krossas samt graden av kornstorleksreducering spelar in. Genom att hålla trycket (och därmed också effektförbrukningen) så jämn som möjligt minskas slitaget och en jämnare kvalité är möjlig.



Figur 5.1, Tryck (övre kurva) och nivå (nedre kurva) i matarficka under drift.

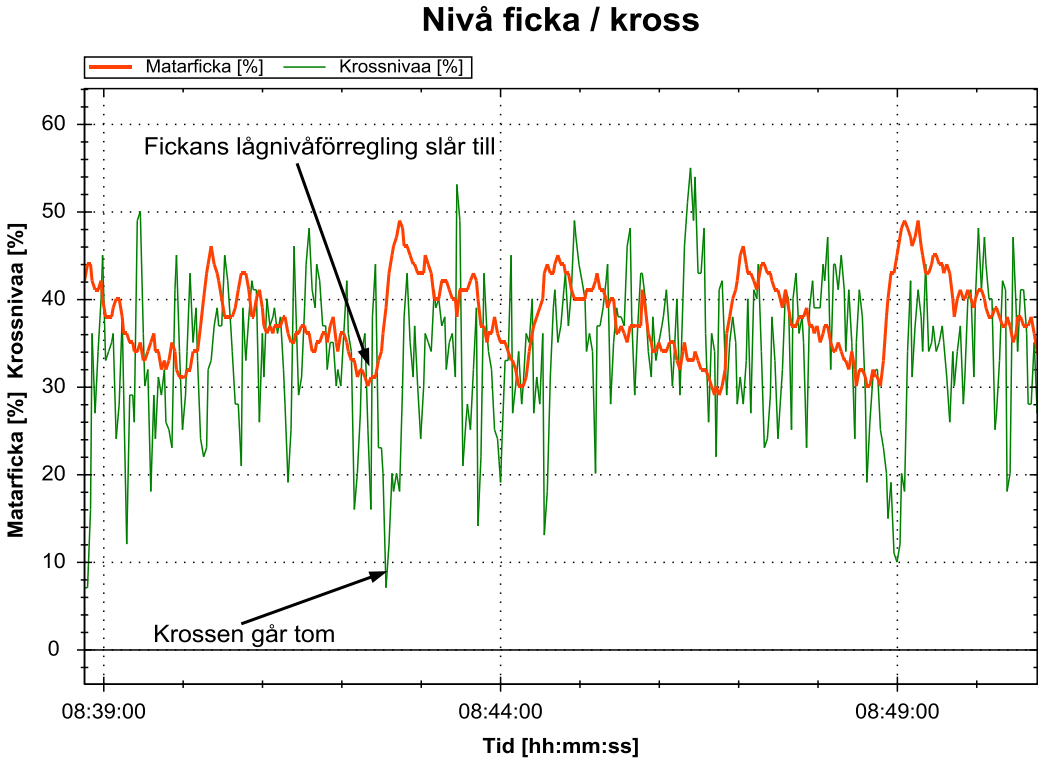
Fig. 5.2 visar hur driften såg ut när operatörerna hade rast och lämnat anläggningen att köra utan översikt. Mataren till fickan körs här inte i automatläge utan körs med en konstant (och för låg) hastighet. Varför automatläge inte används är för att den nya givare som installerats för att mäta nivå i ficka till en början var opålitlig. Operatörerna ville därför inte köra anläggningen i automatläge utan uppsikt.



Figur 5.2, Tryck (nedre kurva) i krossen och nivå (övre kurva) i fickan under drift.

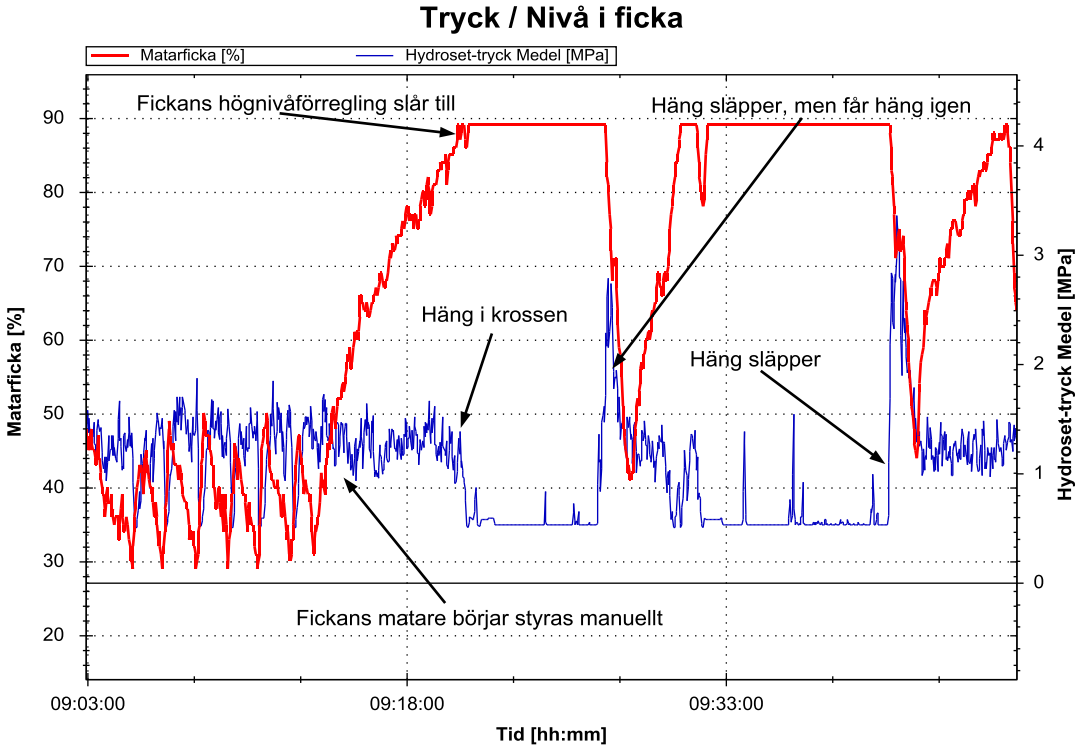
Att fickan töms gör att krossen går väldigt ojämnt. Krossens matare tömmer fickan snabbare än fickans matare fyller på den, vilket innebär att fickans lågnivåförregling slår till och stänger av krossens matare. Förreglingen finns där för att undvika att helt tömma fickan eftersom material som faller ner i den då landar på dess botten istället för på en bädd av material. Som konsekvens av förreglingen går krossen periodvis tom, vilket kan ses av att krossen cykliskt går ner på tomgångstryck.

Tester visade att en helt tom krosskammare motsvarar en materialnivå på ~15 %, och att högsta tillåtna materialnivå är 85 %. Figur 5.3 visar att krossen hinner gå helt tom då mataren stängs av. När mataren sen sätts på igen dumpas sten ner i den tomma krosskammaren vilket inte är bra ur underhållssynpunkt. Krossen körs, även då fickan inte är tom, med en för låg materialnivå.



Figur 5.3, Nivå i ficka (tjock linje) respektive kross (tunn linje) under drift.

Ett annat problem som upptäcktes var en tendens att få häng i krossen. Häng är när stenar fastnar i krossen och blockerar krosskammaren. Ibland går det att få häng att släppa genom att manuellt styra krossens matare och mata in material i en stöt, men ofta måste häng avhjälpas genom att handgripligen bända loss stenar med ett spätt. Häng är en konsekvens av för låg materialnivå och att krossen matas med för stora stenar. I figur 5.4 visas ett förlopp då det blir häng i krossen.



Figur 5.4, Tryck (tunn linje) och matarfickans nivå (tjock linje) då det blir häng i krossen.

Tre slutsatser drogs efter att ha loggat krossens driftsparametrar:

- Nivåsignalen är väldigt brusig och kommer därför behöva behandlas.
- Det kan i många fall inte spela någon större roll hur bra reglerad en process är om en annan sammankopplad process inte fungerar som den ska.
- Om operatören inte kan lita på regleringen, så spelar det heller ingen roll hur bra regleringen egentligen är eftersom manuell drift lär användas. Vikten av verklig såväl som upplevd stabilitet ska inte underskattas.

5.2 Utveckling och testkörning av framtagen reglering

– *Här presenteras arbetsgången för utveckling, implementering och utvärdering av det i arbetet framtagna reglersystemet.*

5.2.1 Lämpliga reglerprinciper

Vanlig PID-reglering:

P-regulator: Ej tillräcklig för att få till en bra reglering eftersom störningar i form av varierande in-/utflöde från krossen måste kunna elimineras. Därför behövs även integration.

I-regulator: Klarar av att eliminera störningar men är väldigt långsam när den används utan P-del.

PI-regulator: Den vanligaste principen inom processindustrin och ett säkert val då PI-reglering av nivå i stenkrossar har utvärderats med goda resultat i tidigare arbeten (11), (10). P-delen ser till att regleringen är snabb nog, och integrationen ser till att störningar kan elimineras.

PID-regulator: Eftersom nivåsignalen är väldigt brusig och att särskilt snabb reglering ej är en prioritet ansågs derivataverkan inte vara värt mödan.

Parameterstyrning:

Parameterstyrning innebär reglerparametrarna hos en regulator (vanligtvis någon form av PID) ges samband med storheter i processen. I fig. 5.5 visas en exempelprocess där parameterstyrning kan underlätta regleringen. Nivån i behållaren ska regleras genom att öppna eller stänga ventilen. Hastighetsförstärkningen mellan öppningsgrad av ventil och utflöde är ej konstant utan har ett kraftigt samband med nivån i behållaren. Flödet genom ventilen är proportionellt mot trycket där ventilen sitter: $p_{ventil} = \rho_{vätska} * g * h$

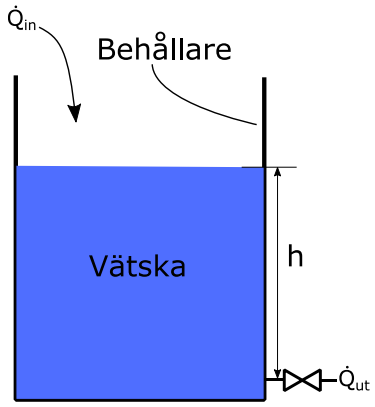


Fig. 5.5, En process där parameterstyrning är lämplig att använda

En tanke var att låta förstärkningen bero på nivån, men sambandet mellan materialnivå och massflöde ut ur krossen ansågs vara för svagt och svårberäknat för att parameterstyrning ska kunna användas.

Kaskadreglering:

Kaskadreglering innebär att regleringen åstadkoms med en inre regulator och en yttre regulator, där börvärdet för den inre regulatorn är den yttre regulatorns styrsignal (8). Oftast är regulatorerna någon form av PID. Som beskrivet i (11) är det en lämplig reglerprincip för att hantera krossar där matare-band används. Den yttre regulatorn reglerar nivån i krossen genom att variera nivån på bandet. Den inre regulatorn reglerar (med börvärde som kommer från den yttre reglerkretsen) materialnivån på bandet. Reglerprincipen valdes inte för vidareutveckling eftersom den kräver nivågivare för band, vilka är sällsynta, samt att reglerprincipens förmåga att hantera dödtid ej ansågs nog mycket bättre än vanlig PI-reglering. Dessutom ger kaskadreglering inga fördelar för krossar som matas direkt.

Dödtidskompenserande regulatorer:

Olika typer av adaptiva regulatorer som estimerar processens svar på styringrepp för att kunna eliminera dödtid. Ett exempel på en tänkbar sådan är Smith-regulatorn, som utvärderades av Jutterström (16). Regulatorer av denna typ kräver dock modellering av processen. Valdes bort på grund av tidsbrist då författaren ej har tidigare erfarenhet av sådan reglering.

PI-reglering valdes att användas för det framtagna reglersystemet tack vare att principen är väl beprövad samt att författaren har tidigare erfarenhet av den.

5.2.2 Utveckling av PLC-program

Programvaran Unity Pro användes för att utveckla programmet. En enkel ”krossimulator” togs fram för att kvalitativt testa den framtagna regleringen och dimensionering av den. Huvuddelen av programmet, som presenteras i Bilaga C, är uppbyggt i funktionsblocksdiagram med vissa avsnitt skrivna i strukturerad text. Programmets huvuddel består av en PI-regulator med sammankopplat automatinställningsblock som via stegsvar kan ta fram lämpliga reglerparametrar. PLC-programmet har även möjlighet att simulera extra dödtid, som processen hade haft om krossen matats via band.

5.2.3 Installation

PLC:t installerades tillfälligt i anläggningens skåp enligt figur 5.6, varefter ett IO-test genomfördes för att säkerställa att kommunikationen mellan befintlig och ny utrustning fungerade som det var tänkt. Variabler skickas mellan det befintliga PLC:t och den nya via ethernet. Både det nya och det befintliga PLC:t är uppkopplade till internet via en switch vilket gör att monitorering och programändringar kan göras utan att behöva besöka anläggningen.

Fig. 5.6, PLC:t tillfälligt inmonterad i styrskåpet.

5.2.4 Dimensionering

I och med att krossen är en integrerande process används hastighetsförstärkning och dödtid för att dimensionera regulatorerna. Arbetsgången för att få fram processens karaktäristik och räkna ut reglerparametrar presenteras i bilaga D.

Efter en litteratturstudie valdes tre dimensioneringsmetoder:

Ziegler Nichols-metod och AMIGO:

”Tumregelmetoder” som liknar varandra och bygger på att man, med hjälp av processens dödtid och hastighetsförstärkning, avläser lämpliga reglerparametrar ur en tabell (8).

Arresttidsdimensionering:

Metod beskriven av Forsman (17). Regulatorn dimensioneras med hjälp av arresttid; ett mått på hur snabbt reglersystemet ska reagera på en stegformad störning. Att bestämma en lämplig arresttid är lite som att bestämma lambdafaktorn vid lambdametoden, den räknas inte fram, utan bestäms genom tester eller tumregler (8).

5.2.5 Testkörning #1

Ska utvärderas i detta test:

- Hur exakt nivån kan regleras och huruvida PI är en lämplig reglerprincip
- Om framtagning av hastighetsförstärkning med stegsvar är praktiskt lämpligt.
- Om en sekunds medelvärde av nivån är nog för att ta bort spikarna i nivåsignalen

Vid denna testkörning fungerade inte programdelen för loggning av driften som den var tänkt. Detta betydde att loggningen var tvunget att ske via kontrollrummets operatörspanel som loggar med sampeltiden 2 s (0,5 Hz), vilket inte är nog snabbt för att kunna mäta utnyttjandegrad, men räcker väl till för att bedöma hur stabil nivån är och hur snabb regleringen är.

En lämplig styrsignal som medför att nivån i krossen stadigt ökar togs fram. Dessutom definierades ett arbetsområde där tvärsnittsarean är konstant. Därefter utfördes ett antal stegsvar för att få fram processens hastighetsförstärkning, vilket illustreras i figur 5.7. Det visade sig vara enkelt att göra stegsvar. Att approximera dödtid kräver att loggad data från stegsvar analyseras varför dödtiden försummades.

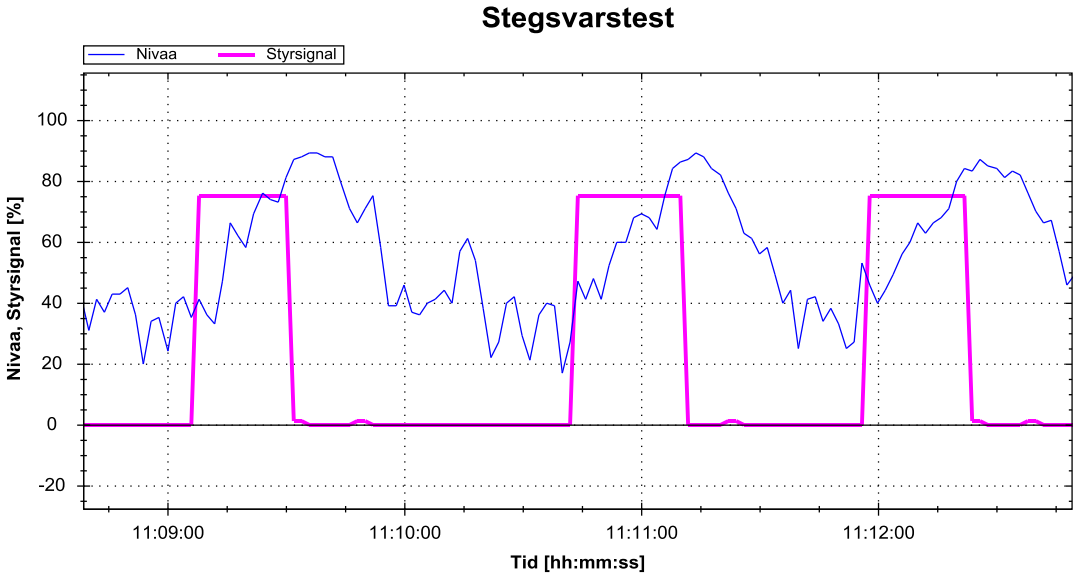


Fig. 5.7, Nivå (tunn linje) och styrsignal (tjock linje) vid stegsvarstest.

Då $L = 0$ är PI inte definierad varken för AMIGO eller Ziegler Nichols-metod varför endast arresttidsdimensionering användes i denna testomgång.

Med hjälp av data från stegsvaren räknades hastighetsförstärkningen K_v ut.

$$K_v = \left(\frac{y_1 - y_0}{T_1} + \frac{y_1 - y_0}{T_2}\right)\frac{1}{u_0} = \left(\frac{80-60}{13} + \frac{80-60}{14}\right)\frac{1}{75} \approx 0{,}04$$

Enligt den metodik som Forsman (17) beskriver väljs ett ursprungsvärde för T_a sådan att förstärkningen K=1 om en för processtypen lämplig arresttid inte är känd.

$$K = \frac{2}{K_v * T_a} \rightarrow (K = 1) \rightarrow T_a = \frac{2}{K_v} = 50\ s$$

Arresttiden minskas sedan stegvis för att bestämma ett lämpligt värde. Om arresttiden halveras så halveras även integrationstiden T_i medan förstärkningen K blir dubbelt så stor, vilket kan ses i tabell 5.1. Arresttiden bestämmer alltså hur snabb regleringen ska vara.

T_a	Gånger snabbare:	K	T_i
50 s	1 (Original)	1	100 s
33 s	1,5	1,5	66 s
25 s	2	2	50 s
20 s	2,5	2,5	40 s

Tabell 5.1, Framtagna regulatorparametrar.

Ursprunglig reglering:

Som kan avläsas ur fig. 5.8 arbetar den ursprungliga nivåregleringen inte speciellt aktivt för att undertrycka störningar, utan använder någon typ av inkrementell integrering. Nivån hålls heller inte hög nog. Regleringen reagerar knappt på störningar alls, utan styrsignalen hålls mer eller mindre konstant.

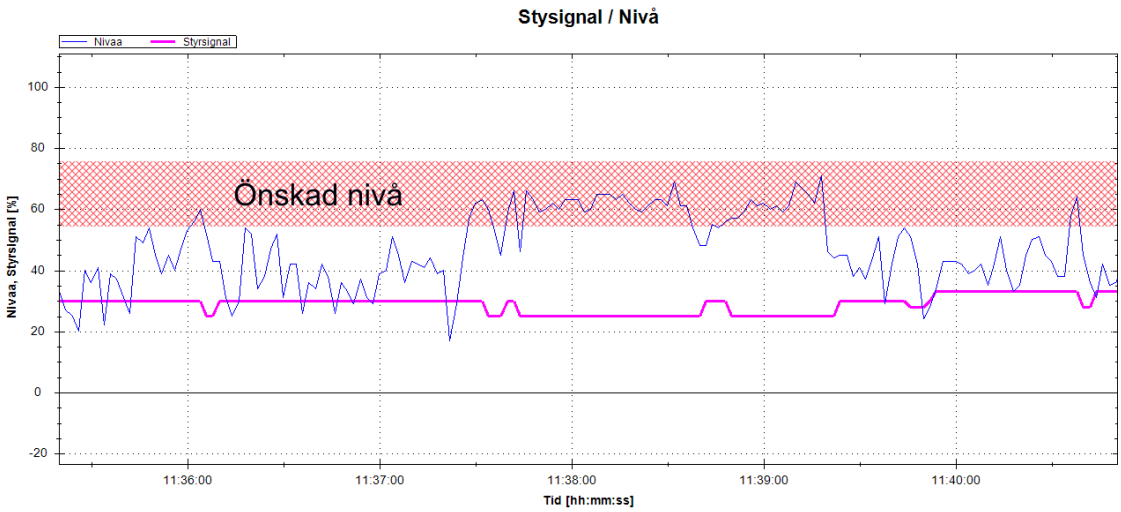


Fig. 5.8, Nivå (tunn linje) och styrsignal (tjock linje) för den ursprungliga regleringen.

PI (K = 1, T_i = 100 s):

Som figur 5.9 visar ger PI-reglering en styrsignal som agerar aktivt för att undertrycka störningar. Mycket långsam reglering, som först efter sex minuter närmar sig börvärdet.

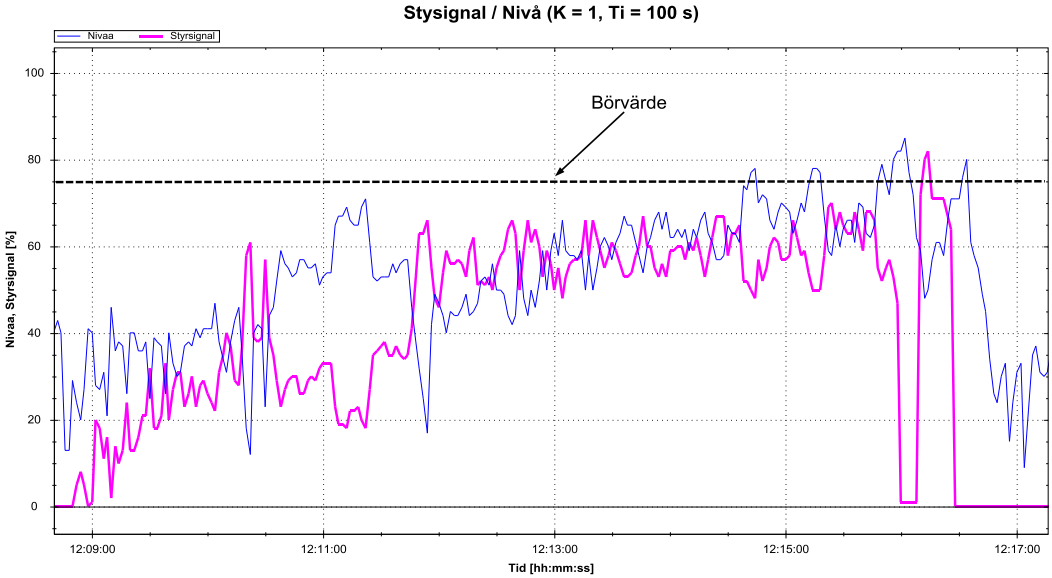


Fig. 5.9, Nivå (tunn linje) och styrsignal (tjock linje) med T_a = 50 s.

PI (K = 1,5, T_i = 66 s):

En regulator med högre förstärkning och kortare integrationstid, vilket visas i figur 5.10 ger en något snabbare reglering. Nivån kommer relativt snabbt upp till börvärdet, men är mindre stabil än med arresttid på 50 s.

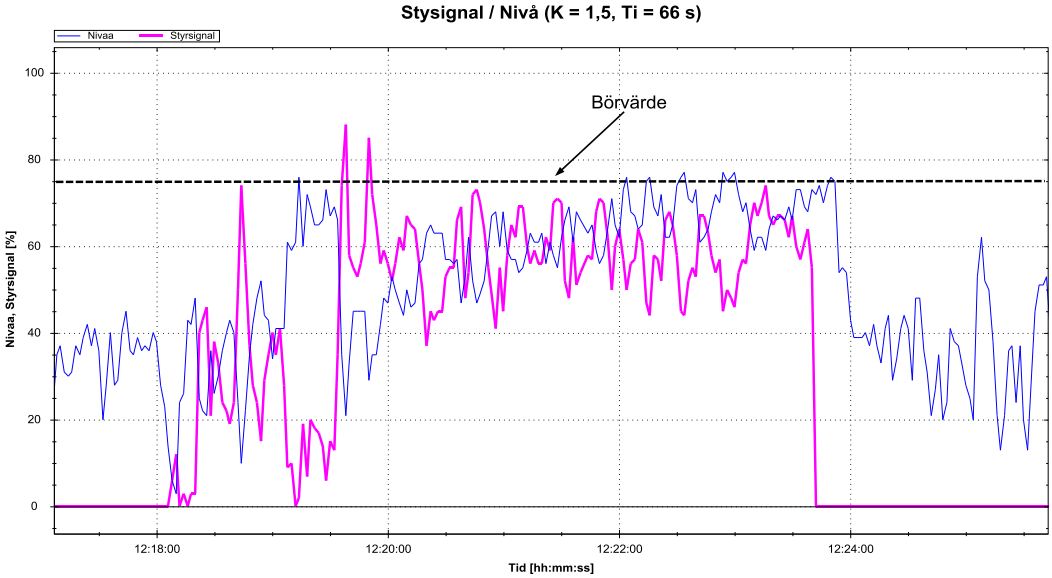


Fig. 5.10, Nivå (tunn linje) och styrsignal (tjock linje) med T_a = 33 s.

PI (K = 2, T_i = 50 s):

Arresttiden sänks ytterligare men ger endast marginellt snabbare reglering, vilket utläses i figur 5.11. Här upptäcktes ett problem, nämligen att regleringen ibland når upp till högnivåförreglingen på 85 % nivå, till exempel vid 12:35. Nivåförreglingen sätter mataren i pausläge, vilket stänger av mataren, tills nivån nått ner till 50 %.

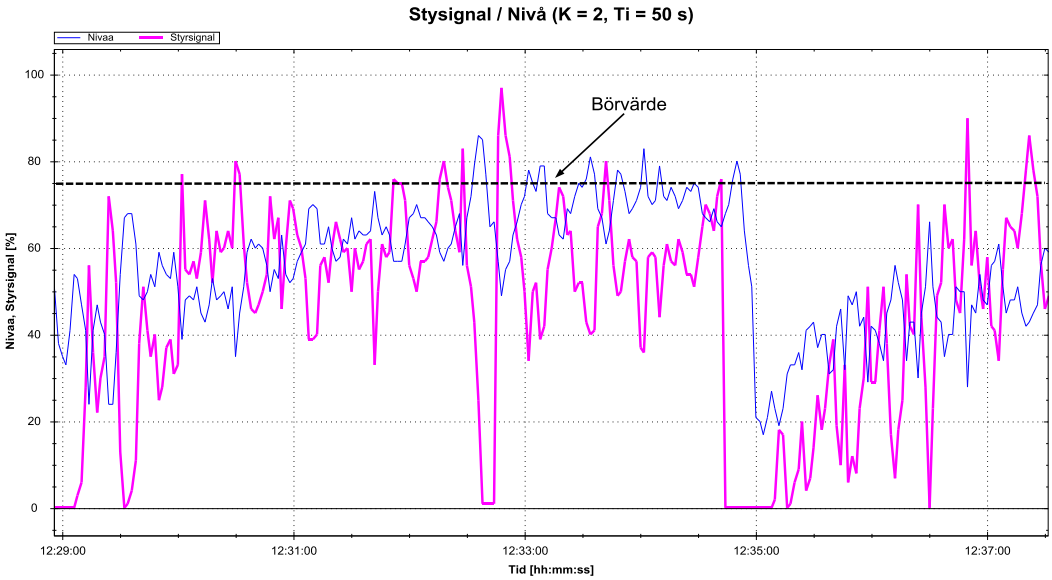


Fig. 5.11, Nivå (tunn linje) och styrsignal (tjock linje) med T_a = 25 s.

PI (K = 2,5, T_i = 40 s):

Återigen endast marginellt snabbare, men nu med i det närmaste extrema styringrepp, vilket figur 5.12 visar. Nivån når flera gånger över 85 %, vilket gör att nivåförreglingen slår till.

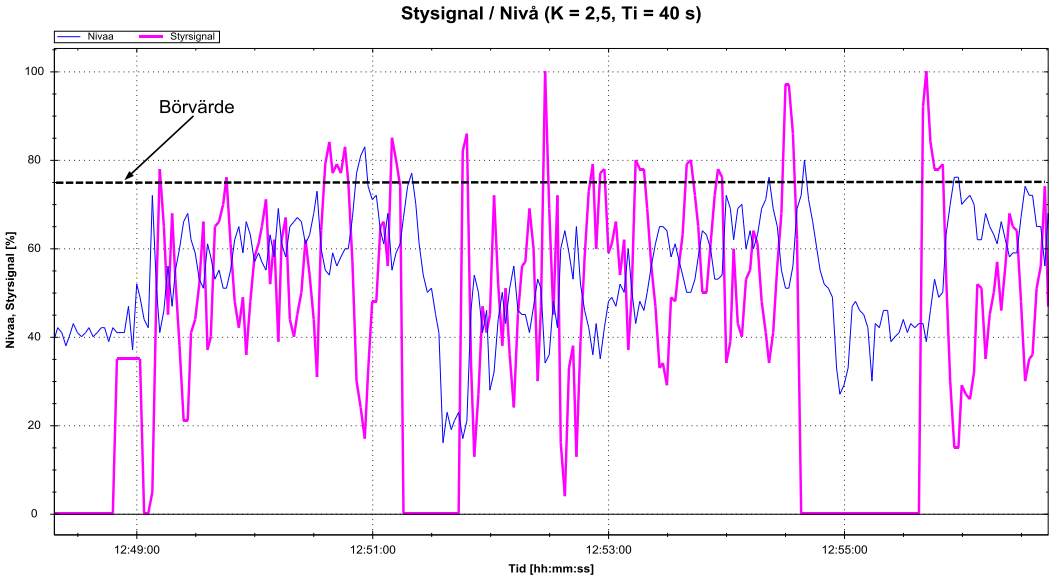


Fig. 5.12, Nivå (tunn linje) och styrsignal (tjock linje) med T_a = 20 s.

Efter testerna står det klart att nivån ej kommer kunna hållas exakt på börvärdet, utan kommer obönhörligt att ligga inom ett visst spann på grund av att materialmatningen sker i diskreta enheter. Det upptäcks även att det lätt blir överdrivna styrsignaler vilket gör att ett längre medelvärde på nivån borde tas.

5.2.6 Testkörning #2

Den andra testomgången hade som syfte att verifiera resultaten från den första testomgången, utvärdera de andra två dimensioneringsmetoderna (Ziegler-Nichols och AMIGO), se om ett längre medelvärde av nivån kan öka stabiliteten samt testköra en metod för mer praktisk integratorhantering, nämligen att integratorn inte ska nollställas vid kortvariga pauslägen som kan uppstå då högnivålarmet går. Under detta test loggades driften förutom med operatörspanelen även med PLC:t, med frekvensen 10 Hz. Fem sekunders glidande medelvärde av nivåsignalen används vid regleringen. Vad gäller dödtid uppskattades den till fem sekunder avläst ur graferna från testkörning #1, samt extra två sekunder som kommer av medelvärdet. Total dödtid alltså 7 s.

I figur 5.13 kan det avläsas hur medelvärdet påverkar utseendet av nivåsignalen. Signalen blir jämnare, men att ta medelvärde ger upphov till en viss dödtid, halva medelvärdestiden. På samma sätt som under första testomgången räknades hastighetsförstärkningen ut med hjälp av stegsvarstest vilket gav hastighetsförstärkningen $K_v \approx 0{,}05$.

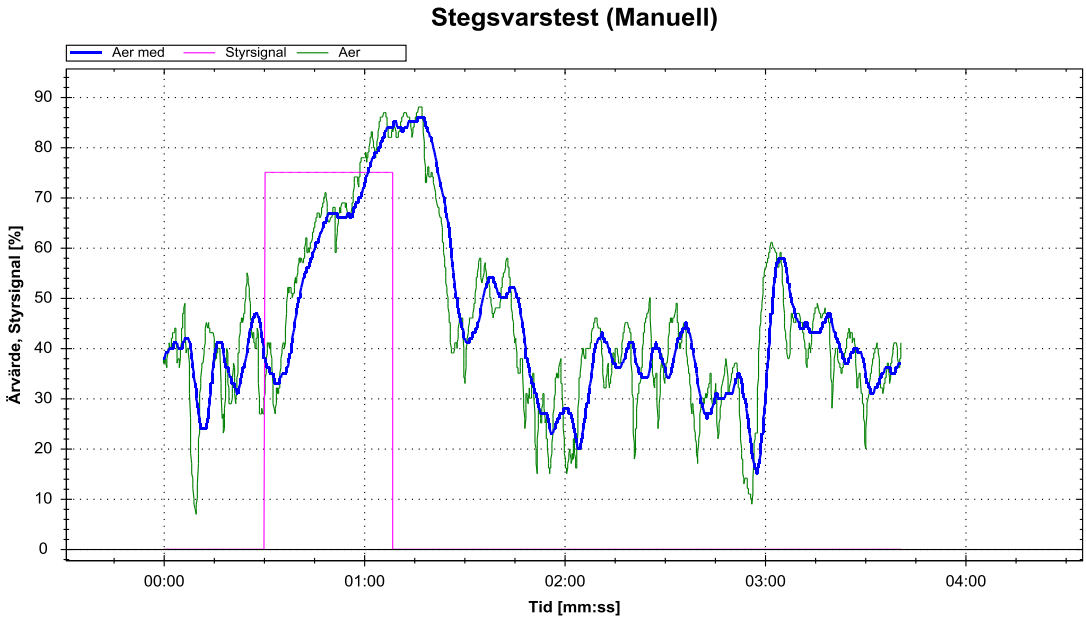


Fig. 5.13, Ett manuellt stegsvar, nivå/medelvärde nivå (tjock linje) och styrsignal (tunn linje).

Med $K_v = 0{,}05$ och $L = 7\ s$ fås $K = 1$ då $T_a = 28\ s$, vilket medför att regulatorparametrarna blir enligt tabell 5.2.

T_a	K	T_i
28 s	1	63 s
15 s	1,5	37 s

Tabell 5.2, Framtagna regulatorparametrar, arresttidsmetod.

PI (K = 1, T_i = 63 s), SP=75%:

Visas i figur 5.14 och har en stigtid på ungefär fyra minuter. Lyckas hålla nivån inom ±10% av börvärdet. Fem sekunders medelvärde anses vara en bra kompromiss. Desto längre medelvärde som tas, desto mer dödtid ger det upphov till.

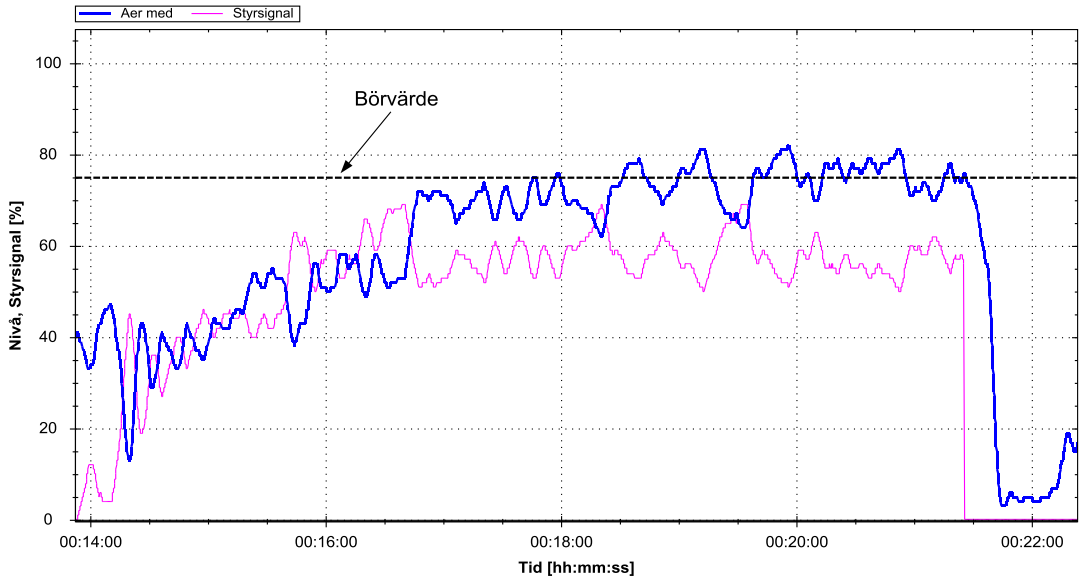


Fig. 5.14, Framtagen reglering, medelvärde nivå (tjock linje) och styrsignal (tunn linje).

PI (K = 1,5, T_i = 37 s), SP=75%:

Trots medelvärde fås här en kraftigt skiftande styrsignal som inte lyckas hålla nivån speciellt stabil, vilket visas i figur 5.15. Vid tiden fyra minuter går mataren in i pausläge vilket antogs ske på grund av att nivåförreglingen slog till. Därför testas samma reglerparametrar en till gång, fast då med ett börvärde på 65 %.

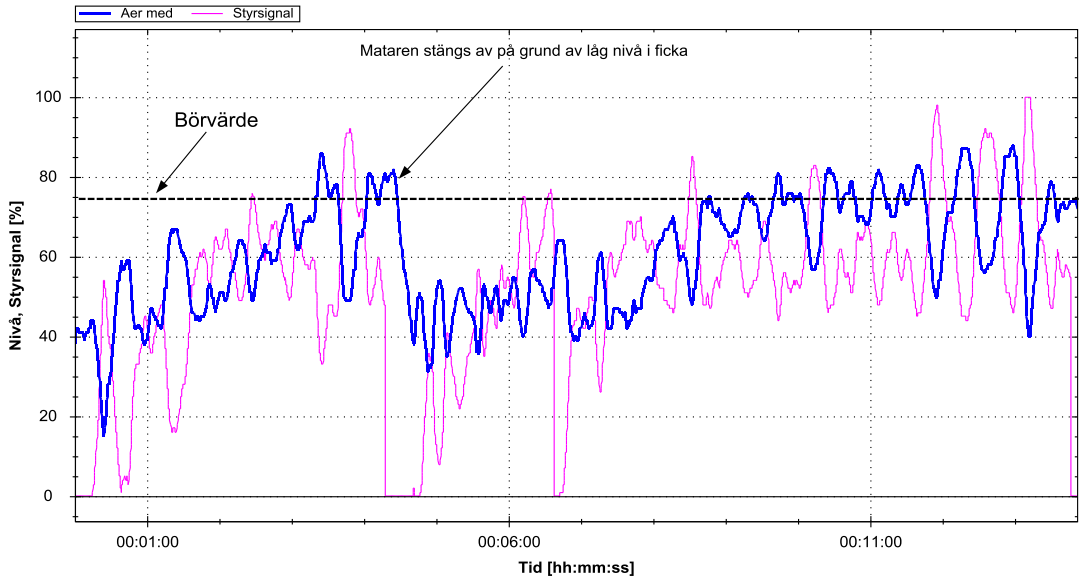


Fig. 5.15, Framtagen reglering, medelvärde nivå (tjock linje) och styrsignal (tunn linje).

PI (K = 1,5, T_i = 37 s), SP=65%:

Mataren stängs av trots att nivån inte överstiger 85 %, vilket illustreras i figur 5.16. Anledningen till stoppen är att fickan blir tom. I och med den snabba stigtiden och att nivån hålls högre än vid den ursprungliga regleringen så töms fickan snabbare än den fylls på.

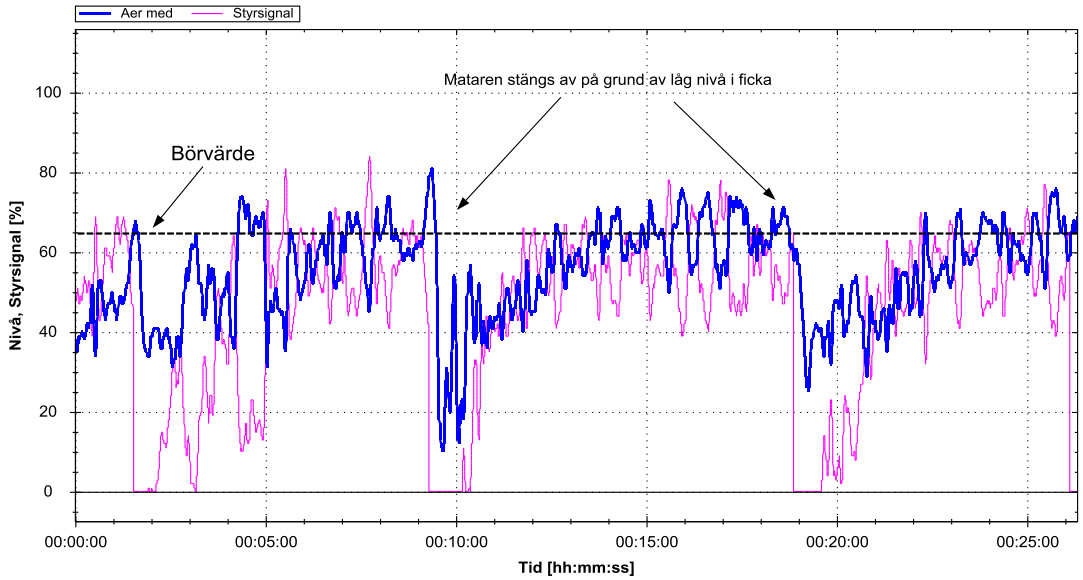


Fig. 5.16, Framtagen reglering, medelvärde nivå (tjock linje) och styrsignal (tunn linje).

Figur 5.24 visar hur fickans matare knappt klarar av att fylla på fickan, och när mataren stängs av sjunker nivån för snabbt för att regleringen ska hinna komma igång med att fylla den igen. Fickan regleras med on-off reglering, där två nivåer har definierats, ”hög” och ”låg”. Vid låg nivå börjar fickan fyllas på tills nivån blivit ”hög” varefter fickans matare stängs av. Dock kan en viktig slutsats dras från att jämföra hur fickans nivå ser ut vid den ursprungliga regleringen jämfört med den nya, nämligen att krossens produktion har ökat. Om fickan töms snabbare, så betyder det ju att mer sten krossas.

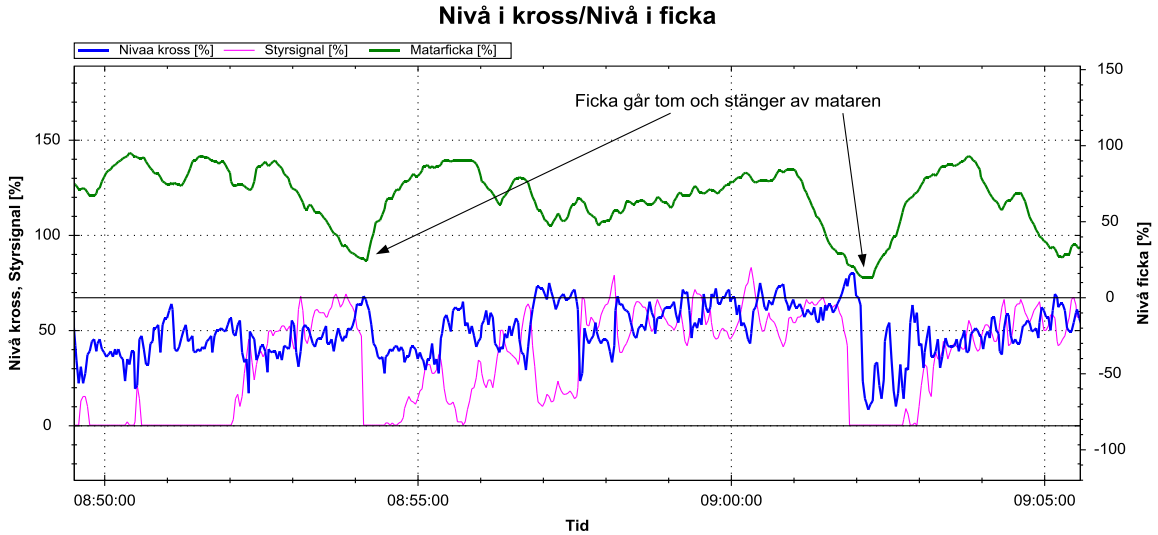


Fig. 5.17, Samma förlopp som fig. 5.23 med fickans nivå inlagd (övre tjock linje).

Att sänka arresttiden ytterligare bedömdes inte nödvändigt eftersom regleringen torde bli ännu sämre. Regleringen anses nog snabb och större K-värde medför bara ännu kraftigare styringrepp. Efter att ha verifierat regleringen som dimensionerats med arresttidsmetoden görs ett test av de två andra dimensioneringsmetoderna, enligt tabell 5.3.

Metod	P	T_i
AMIGO	1	94 s
Ziegler-Nichols	2,6	21 s

Tabell 5.3, Framtagna regulatorparametrar, Z-N & AMIGO.

Parametrarna som AMIGO ger liknar de som tagits fram med arresttidsmetoden, medan de som tagits fram med Ziegler-Nichols är bra mycket snabbare.

Drift med AMIGO , som illustreras i figur 5.25, liknar drift med 28 s arresttid, eftersom det gav upphov till liknande reglerparametrar.

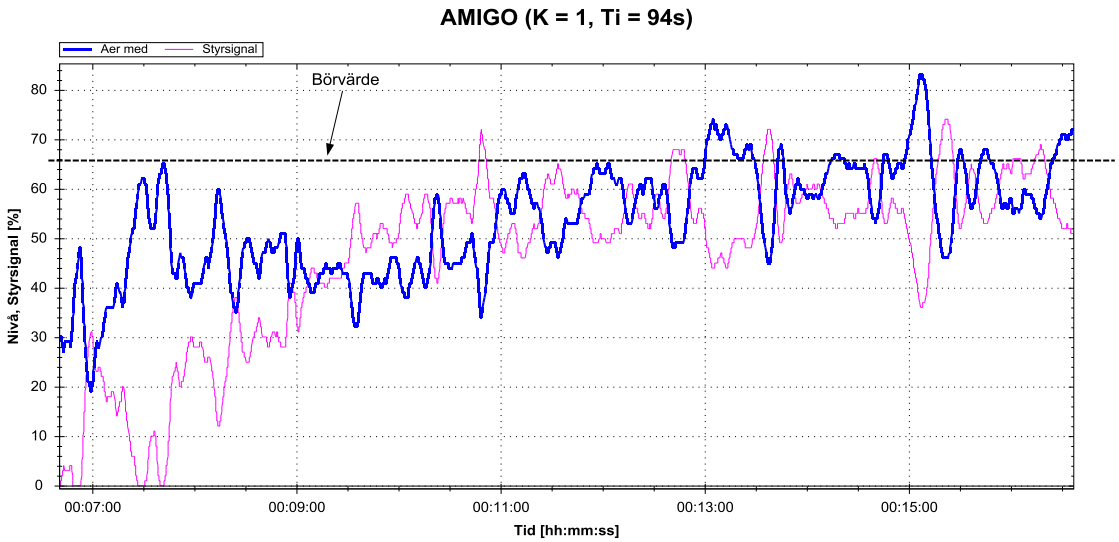


Fig. 5.18, Reglering med de regulatorparametrar som tagits fram med AMIGO.

Ziegler-Nichols, som visas i figur 5.19, bidrar som tidigare känt till en ganska snabb reglering, och passar därmed inte speciellt bra här. Förvisso fås en kort stigtid, men regulatorn gör alldeles för stora styringrepp.

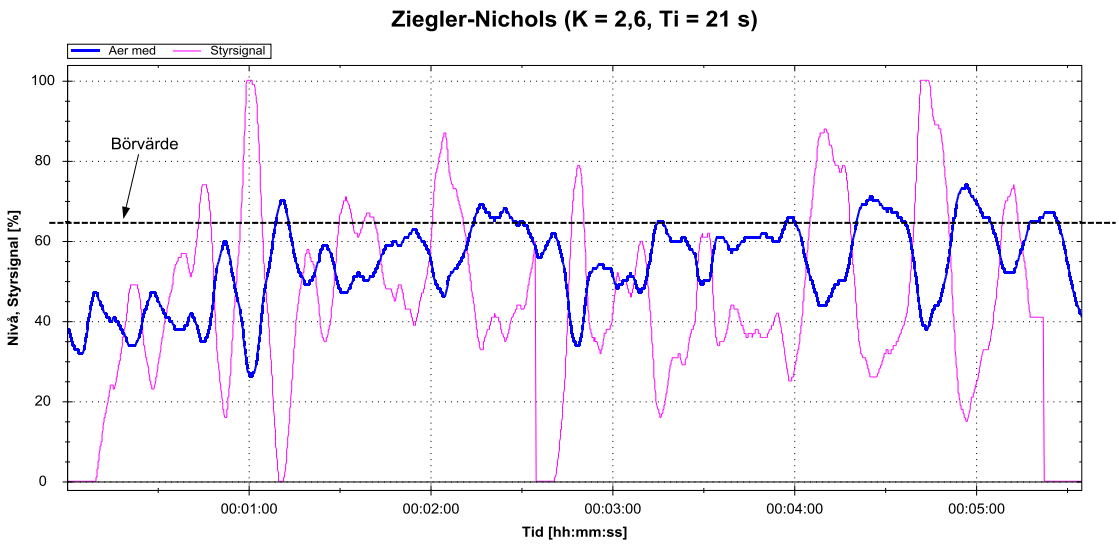


Fig. 5.19, Reglering med de regulatorparametrar som tagits fram med Z-N.

Viss skillnad i resultaten från stegsvaren hade visat sig varför det till sist görs ett antal ytterligare stegsvar för att få mer data att analysera. Data från alla utförda stegsvar presenteras i bilaga E. Det gjordes dels manuella stegsvar, där stegen och tidtagningen skedde för hand, men även automatiska stegsvar där det tidigare framtagna blocket användes.

Figur 5.20 visar de manuella stegsvaren där medelvärdet blev K_v = 0,077.

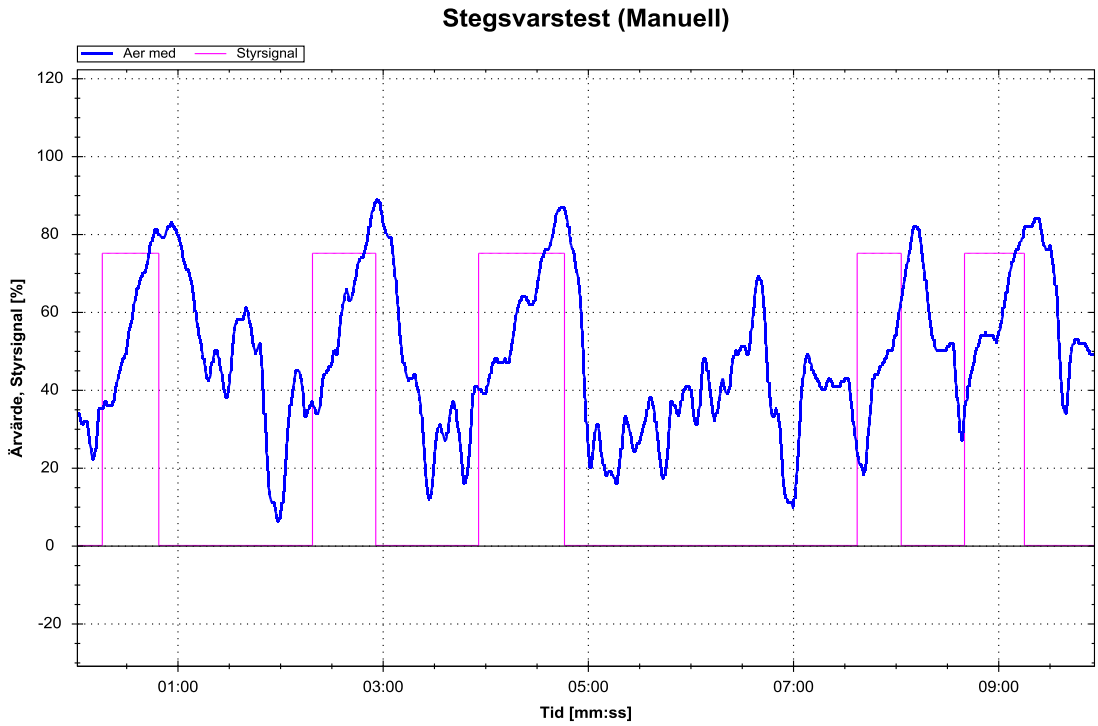


Fig. 5.20, Ytterligare manuella stegsvarstest, nivå (tjock linje) och styrsignal (tunn linje).

Figur 5.21 visar stegsvaren som gjordes med det framtagna automatinställningsblocket där medelvärdet blev K_v = 0,068.

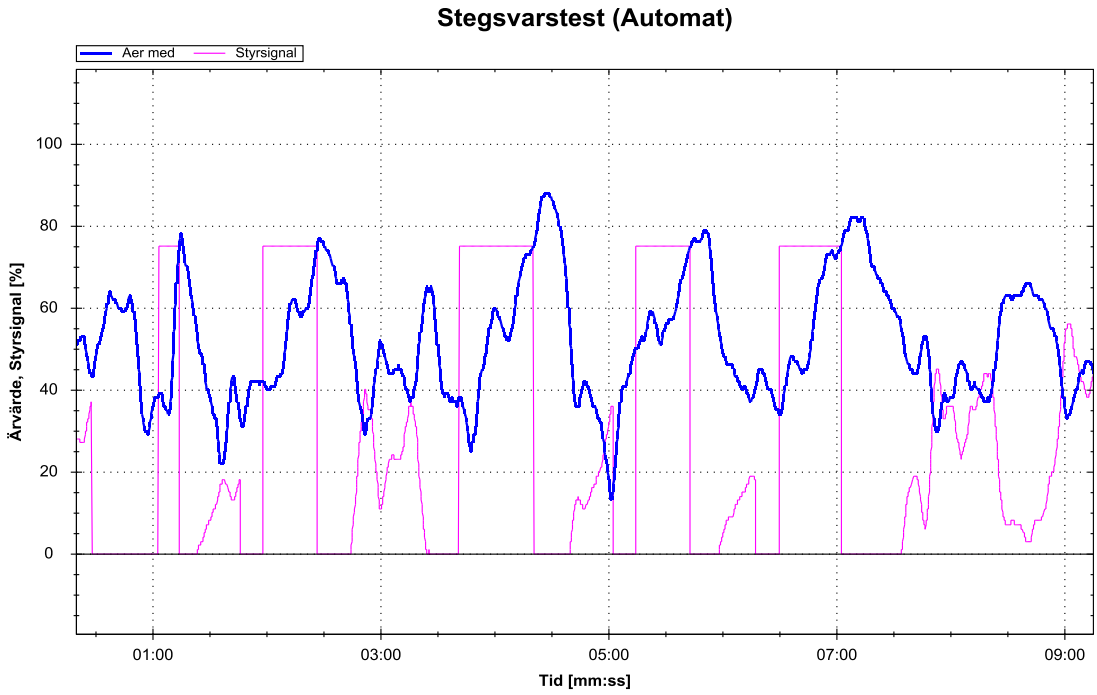


Fig. 5.21, Automatiska stegsvarstest, nivå (tjock linje) och styrsignal (tunn linje).

5.2.7 Testkörning #3

Syfte med test:

- Mäta upp det verkliga arbetsområdet för krossen.
- Göra fler stegsvarstest för att kunna avgöra inom vilket spann K_v kan tänkas ligga.

Ett försök gjordes för att mäta upp hur nivåsignalen ser ut jämfört med den faktiska nivån i krossen. Dels genom att hålla in en pryl i krosskammaren, och genom att titta in i krossen under drift. Resultatet var inte helt entydigt. Då prylen hölls in i krosskammaren var mätvärdena opålitliga och kunde som mest ge en fingervisning. Okuläruppskattning var också svårt på grund av väldigt dålig sikt inne i krossen. Trots allt kunde arbetsområdet uppskattas ligga mellan 50-85 % med ett lämpligt börvärde på 65 %.

Stegsvarstesten visade ungefär samma resultat som tidigare, med ett medelvärde av K_v på 0,055, över nio stegsvar.

5.2.8 Utvärdering av testresultat

Spridningen av resultaten från stegsvaren, vilka presenteras i bilaga E, förvånade. Inte skillnaderna i en enskild serie, utan snarare skillnaden mellan serier. Skillnaden i en enskild serie kan förklaras med att matningen är slumpmässig på det sättet att stenarna alltid ligger lite olika i mataren. Skillnaden mellan serier kan dock inte lika lätt förklaras med slumpen, eftersom seriers medelvärden jämförs. Om resultaten från stegsvaren jämförs kan stora skillnader i hastighetsförstärkning urskiljas, till exempel mellan stegsvaren som gjordes 28/4 och 04/05. (Medelvärde 0,047 respektive 0,071) Att utröna exakt vad dessa skillnader beror på ansågs ligga utanför ramen för detta arbete. Speciellt eftersom det hade krävt en väldig mängd data, bland annat om kornstorleksdistribution hos det inmatade materialet, vilket är arbetsintensivt att mäta upp.

Det som kan sägas om saken är att skillnaden torde bero på kornstorleksdistribution, nivå i ficka och/eller hur torrt gruset är.

Efter testkörningarna omvärderades kraven på regleringen. Det upptäcktes det att det var fler stopp än förväntat. Det kunde till exempel handla om metallvarning på bandet som matar fickan, eller att någon av de silor som sitter efter krossen är fulla. Alltså blev en snabb stigtid viktigare. För att göra regleringen snabbare kan arresttiden sänkas, men bara till den grad att regleringen fortfarande är stabil. Ett minvärde på styrsignalen kan läggas till för att korta ner stigtiden.

Vad gäller dimensioneringsmetoder valdes Ziegler-Nichols bort då den bidrog till alldeles för snabb och instabil reglering. AMIGO bidrog till reglerparametrar som liknar de vid arresttidsdimensionering, men utan möjlighet att finjustera regleringen som med arresttid. Dimensionering med arresttid valdes därför att utvecklas vidare.

5.2.9 Verifiering

Här kommer olika arresttider att jämföras med varandra för att hitta ett lämpligt värde. Hastighetsförstärkningen vid de här testerna bestämdes till 0,049, som ett medelvärde av fem stegsvar. Arresttiderna loggades i 20 minuter var. Ett minvärde på 50 % lades på styrsignalen för att minska stigtiden.

Kriterier för bra reglering:

Stabilitet, störningsundertryckning och snabbhet. Det gjordes försök med parametrar enligt tabell 5.4:

T_a	K	T_i
5 s	2,41	17 s
10 s	1,91	27 s
15 s	1,56	37 s
20 s	1,31	47 s

Tabell 5.4, Framtagna regulatorparametrar.

Stabilitet:
Godkänt på alla utom med $T_a = 5\ s$, då styrsignalen regelbundet bottnar/går i taket vilket visas i figur 5.22. Det hände även då $T_a = 10\ s$, men bara några enstaka gånger på tjugo minuter. Reglering då $T_a > 10\ s$ har inte detta problem, där fås en styrsignal som aldrig når övre/undre gräns. Alltså, bättre stabilitet desto högre arresttid.

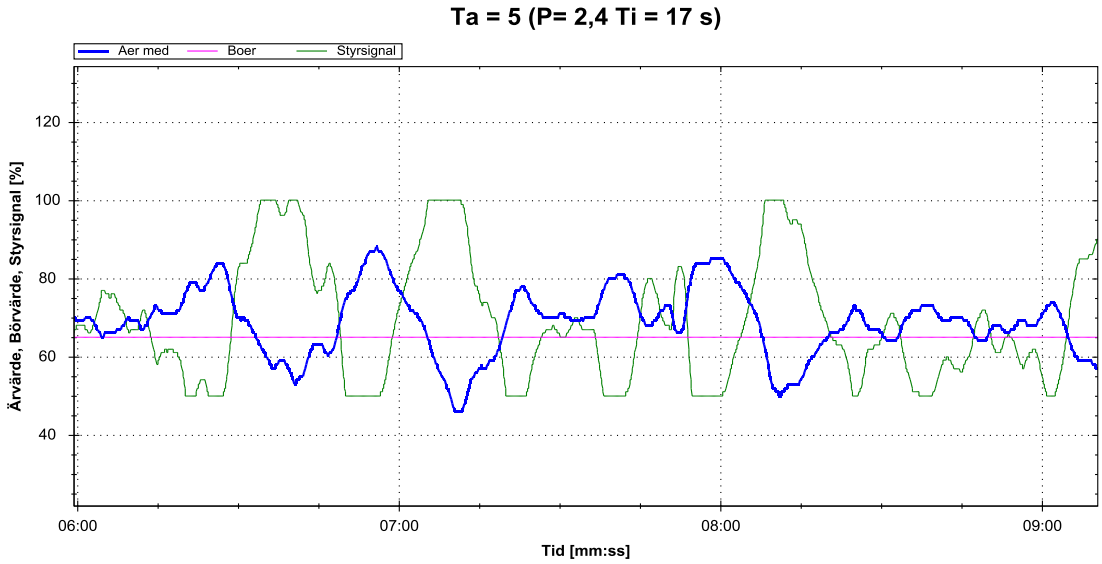


Fig. 5.22, Instabil reglering på grund av för låg arresttid.

Störningsundertryckning:
För att jämföra hur jämn nivån hölls med de olika arresttiderna räknades nivåns standardavvikelse ut vilket visas i tabell 5.5.

T_a	*Standardavvikelse*
5 s	7,6
10 s	8,5
15 s	6,9
20 s	7,4

Tabell 5.5, Standardavvikelse på nivån för olika T_a.

Det ska inte läggas allt för mycket vikt på den uträknade standardavvikelsen eftersom bara 20 minuters drift av varje arresttid har loggats. Vad som kan sägas om saken är att en för snabb reglering överkompenserar för störningar, medan en för långsam reglering inte reagerar nog snabbt för att hinna eliminera störningar.

Snabbhet:
Stigtid från tre minuter för $T_a = 20\ s$ till en minut för $T_a = 5\ s$.

$T_a = 15\ s$ anses som det bästa valet i och med att den höll nivån mest jämn, samt att den är en bra kompromiss mellan för stora styringrepp och för långsam reglering, och blir det som ska jämföras med den ursprungliga regleringen. Att stigtiden inte är den bästa kan alltid förbättras genom att ett bättre sätt att hantera uppstarter tas fram.

5.3 Vidareutveckling av reglerprototyp

Vidareutvecklingen syftar till skapa en mer finslipad produkt med hjälp av de lärdomar som fåtts under testkörningarna. Sättet att förkorta stigtiden bör förbättras, att behöva välja ett så pass högt minvärde på styrsignalen på 50 % är inte önskvärt. Lösningen blev en uppstartssekvens där 75 % styrsignal ges tills nivån kommit över börvärdet, varefter regleringen tar över. Detta förkortade stigtiden till cirka 30 s.

Automatinställningsblocket bör också ses över. Att ställa in regulatorn med data från endast ett stegsvar medför att regleringen löper stor risk att bli feldimensionerad. Funktionsblocket byggdes om med möjligheten att dimensionera efter medelvärdet av ett visst antal steg.

5.4 Jämförelse med ursprunglig reglering

För att rättvist kunna jämföra den framtagna regleringen trimmades den ursprungliga regleringen in lite bättre, så att nivåerna åtminstone hålls i samma spann. Annars hade den framtagna regleringen varit bättre oavsett, eftersom krossen inte gick ”choke-fed” innan intrimning. Det är mer intressant att jämföra den framtagna regleringen med en vältrimmad reglering, än med något som fungerar riktigt dåligt.

I figur 5.23 och 5.24 jämförs strömsampel tagna från drift med den intrimmade ursprungliga- respektive den framtagna regleringen. Krossens strömförburkning, vilken är proportionell mot effekten, är som sagt ett mått på hur hårt krossen arbetar. För att se till att krossen utnyttjas maximalt ska strömmen vara så hög som möjligt, och för att minska slitaget på krossen bör också strömmen vara så jämn som möjligt. Samplena storlekssorteras och sampel från tomgång tas bort eftersom tiden spenderat i pausläge oftast inte beror på regleringen i sig. Datan kommer från en hel dags körning av krossen där regleringen växlades mellan den ursprungliga och den framtagna regleringen en gång i timmen.

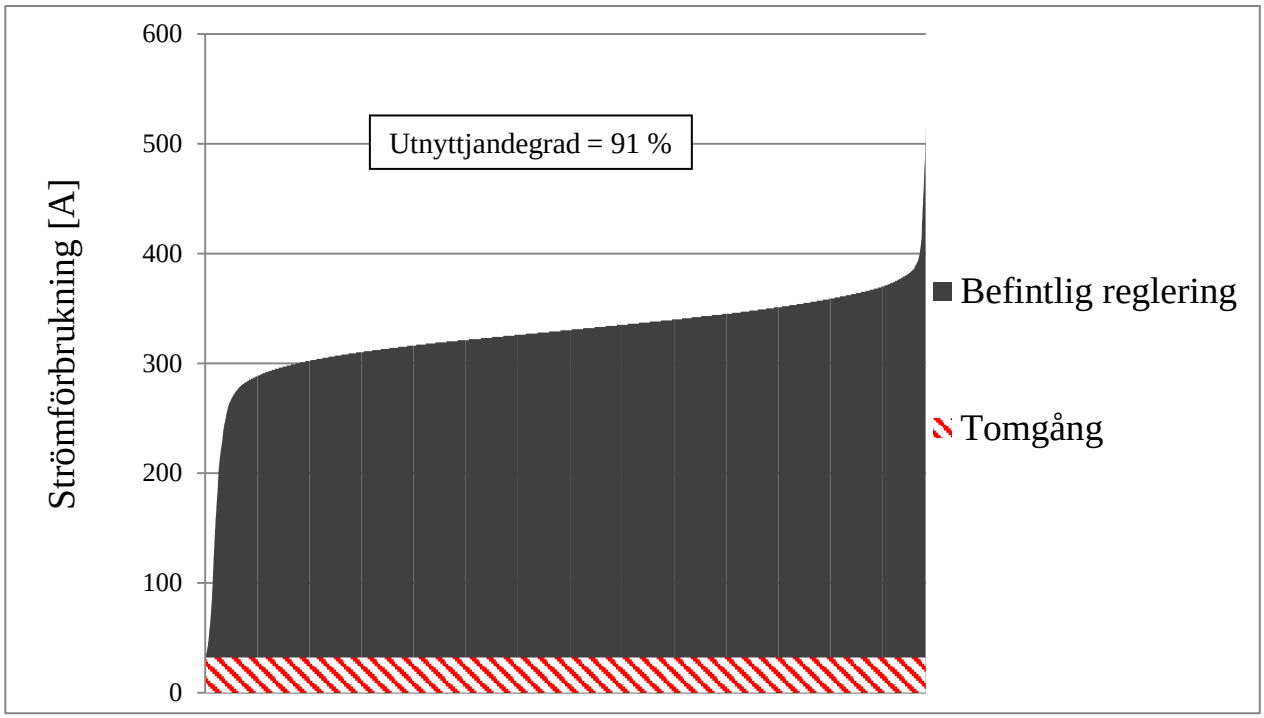


Fig. 5.23, Storlekssorterade strömsampel från den intrimmade befintliga regleringen.

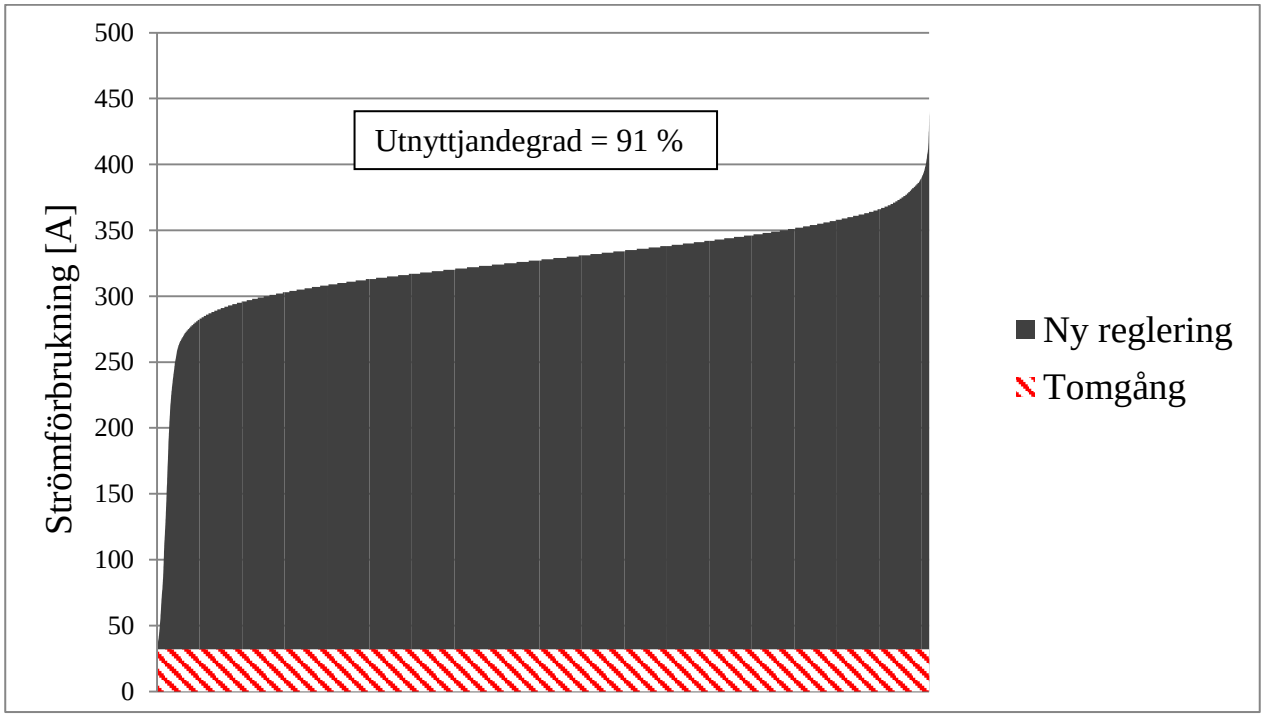


Fig. 5.24, Storlekssorterade strömsampel från den framtagna regleringen.

I utnyttjandegradssynpunkt är alltså den framtagna regleringen likvärdig med den i efterhand intrimmade regleringen.

I tabell 5.6 presenteras nivåns standardavvikelse. Den räknas ut för att se hur jämn nivån hålls.

Reglering	Standardavvikelse [procentenheter]
Ursprunglig, intrimmad	5,6
Framtagen reglering, T_a = 15 s	6,1

Tabell 5.6, Jämförelse av standardavvikelse på nivån i krossen.

Nivån hålls alltså marginellt jämnare med den intrimmade regleringen än med den framtagna.

Stigtid för de båda regleringarna är jämförbara, på runt 30 s. Uppstartsförloppet för den framtagna regleringen presenteras i figur 5.25.

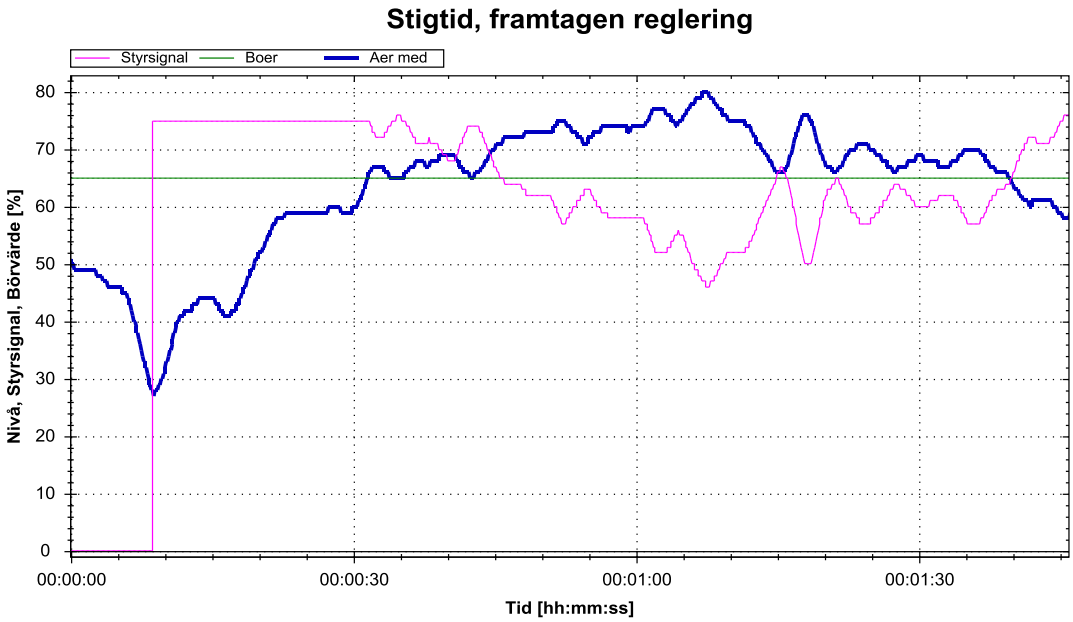


Fig. 5.25, Uppstartsförlopp, framtagen reglering.

För att ge en fingervisning om hur dålig den ointrimmade regleringen faktiskt var kan data från en av de tidigaste testkörningarna användas. I figur 5.26 kan det avläsas hur låg nivån hölls, en nivå på runt 40 %. Detta är inte nog högt för att krossen ska gå ”choke-fed”. Notera att effekten ligger under 100 kW.

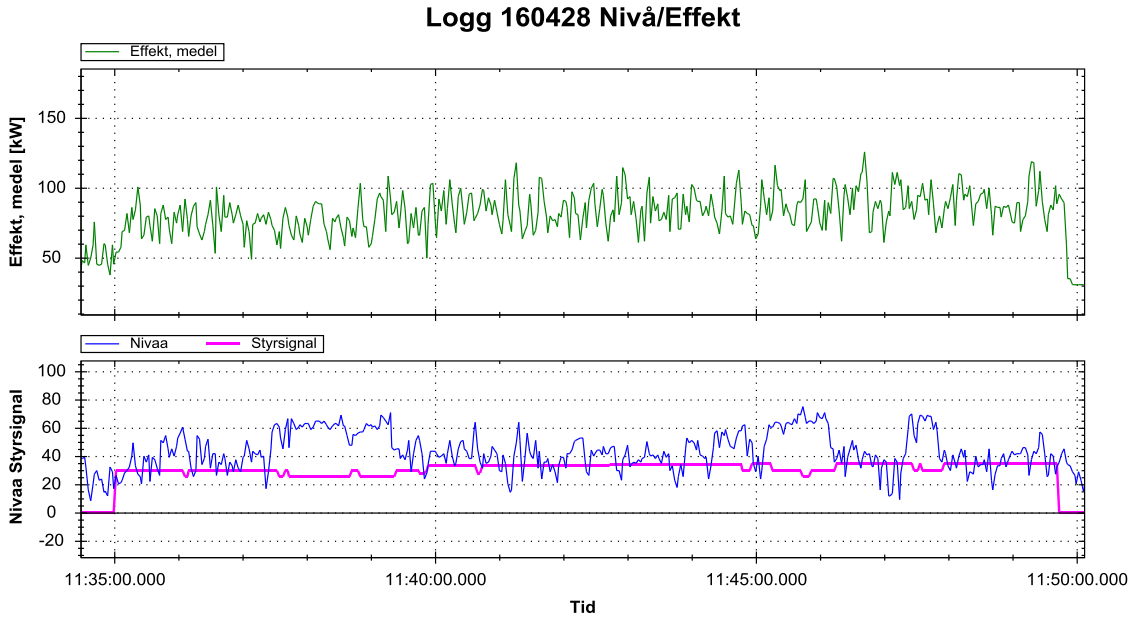


Fig. 5.26, Nivå/effekt för den ursprungliga regleringen (ointrimmad).

Fig. 5.27 visar ett förlopp från samma dag som förloppet i fig. 5.37, men nu i drift med en prototyp av den framtagna regleringen under utveckling. Effektförbrukningen ökar kraftigt då nivån passerar 50 %. Krossen börjar då gå ”choke fed”. Jämfört med då krossen gick med låg nivå är effektförbrukningen nästan dubbelt så hög. Den framtagna regleringen reglerar nivån på så sätt att krossen alltid går med en ordentlig vilket garanterat medför högre utnyttjandegrad jämfört med den ointrimmade ursprungliga regleringen.

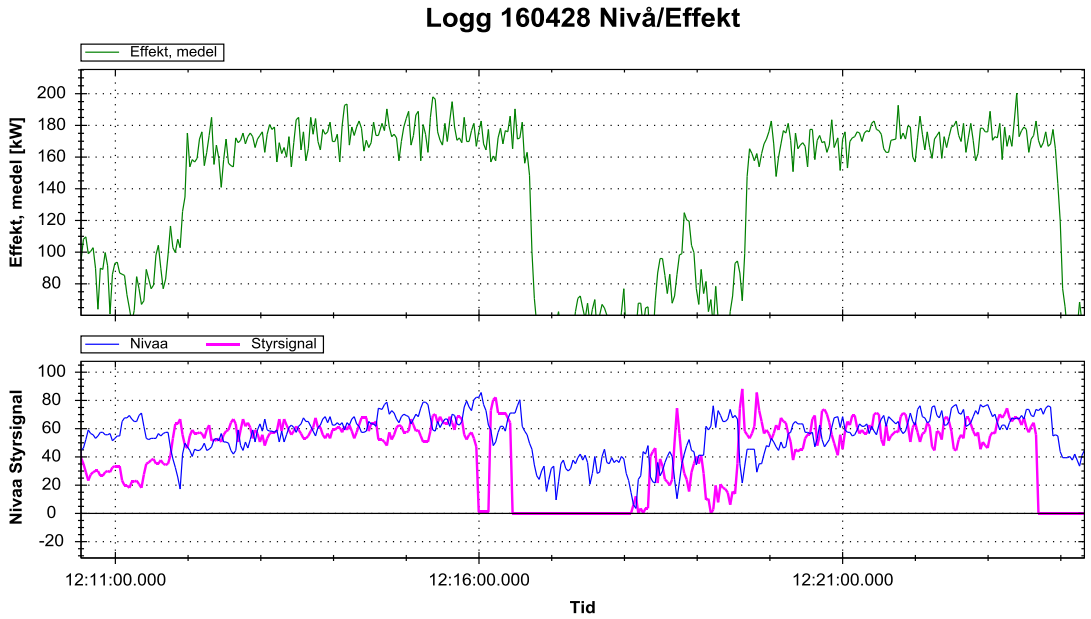


Fig. 5.27, Nivå/effekt under test av en reglerprototyp.

6 Resultat

– *Här presenteras de resultat som arbetet gett upphov till.*

Arbetet har undersökt metodik för att ta fram processens egenskaper och för att dimensionera reglering av materialnivå en kross genom att styra dess matare. Det har visat sig vara lämpligt att behandla processen som rent integrerande, och att stegsvarsanalys är praktiskt lämpligt för dimensionering.

Det har tagits fram ett PLC-program som integrerats med den ursprungliga styrningen av anläggningen.

Som illustreras i figur 6.1 regleras nivån så att krossen alltid går med en ordentlig materialnivå utan att någonsin överfylla krossen.

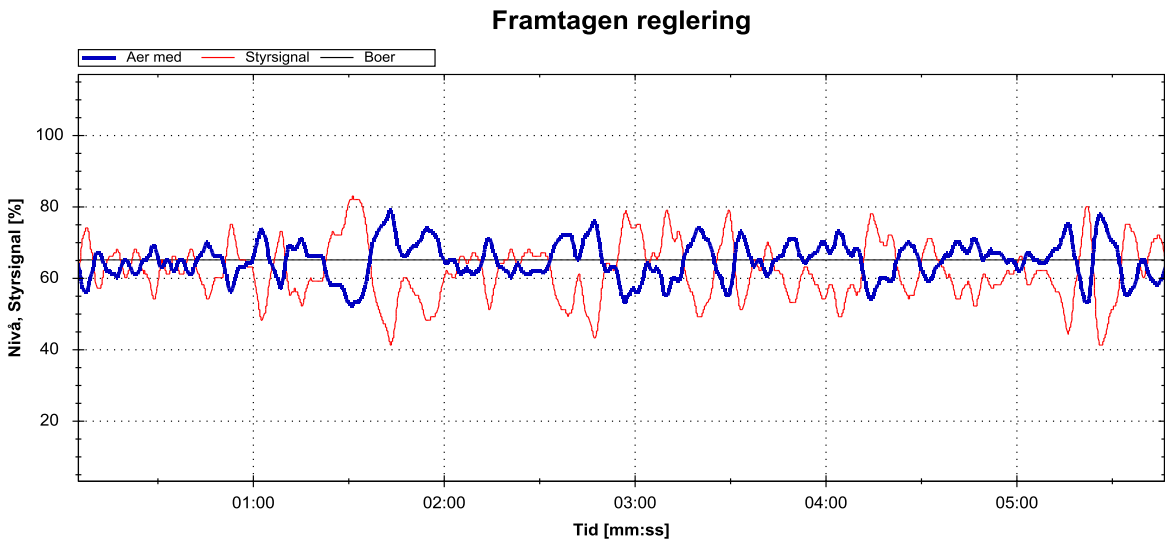


Fig. 6.1, Nivå (tjock linje), styrsignal (tunn linje), framtagen reglering

Självinställning med hjälp av ett framtaget funktionsblock, som gör automatiska stegsvar, har också utvärderats med goda resultat.

6.1 Svar på frågeställningar

Här görs ett försök att ge svar på de tidigare ställda frågorna som arbetet syftar till att besvara.

- Kan materialnivån regleras med godtagbar noggrannhet?

Ja. Ingen direkt definition av den krävda noggrannheten har gjorts, men nivån hålls i alla fall nog hög för att krossen alltid går ”choke-fed” utan att någonsin gå så pass högt att högnivålarmet går till. Normalt sett ligger nivån inom ± 10 % av börvärdet.

- Bidrar nivåregleringen till ökad utnyttjandegrad?

Intrimning gjorde att denna punkt egentligen inte kunde testas ordentligt. Den framtagna regleringen har likvärdig prestanda som den intrimmade. Jämfört med den ointrimmade torde den framtagna regleringen garanterat ha avsevärt bättre utnyttjandegrad i och med att krossen ursprungligen gick med väldigt låg nivå och inte speciellt hög effekt.

6.2 Kravspecifikationen

Här säkerställs att kravspecifikationen uppfyllts.

1. <u>Hålla önskad materialnivå i krosskammare</u>

Godkänd. Nivån hålls inom ett spann runt det önskade börvärdet.

2. <u>Aldrig överfylla krosskammare</u>

Godkänd. Regleringen kunde köras en hel dag utan några högnivålarm.

3. <u>Hantera start/stopp av kross</u>

Godkänd. Regleringen tittar på matarens statusflagga för att se vilket läge krossen körs i. En uppstartsekvens som medför en snabb återgång till drift utförs vid omstart.

4. <u>God störningsundertryckning</u>

Godkänd. Normalt sett ligger nivån inom ±10 % från börvärdet med en standardavvikelse på 6,1 procentenheter.

5. <u>Allmän implementeringsmetod</u>

Godkänd. Regleringen dimensioneras med stegsvar och kräver inte någon tidigare kunskap om processen. Reglersystemet har även möjlighet till självinställning.

Det framtagna reglersystemet uppfyller alltså de krav och önskemål som sattes vid arbetets start.

7 Diskussion och slutsatser

– *Här diskuteras arbetets metodik samt de resultat som arbetet gett upphov till.*

7.1 Metod/Genomförande

En del kritik kan riktas mot den initiala planeringen. Även efter kravspecifikationen tagits fram var det inte helt klart vilka krav som ställdes på hastighet eller hur exakt nivån behöver hållas. Hastighetskravet fick omvärderas halvvägs in i projektet.

Även styrsignalaktivitet borde tagits upp i detta arbete. Alltså om det är fördelaktigt med en mindre aktiv styrsignal sett till styrdonet. Till exempel då om en mer aktiv styrsignal sliter på mataren. Regleringen som tagits fram tar ingen hänsyn till det, utan har som enda krav att reglera nivån så exakt som möjligt.

Genomförandet i allmänhet har inte varit så strukturerat som det kanske borde ha varit. Testkörningar var tidvis ganska ostrukturerade på grund av bristande planering och/eller oerfarenhet. Även om en till synes vattentät plan för testerna tagits fram visade det sig ofta att det var tvunget att avvika från testprotokollet. Orsaker kunde vara sådana saker som att produktionen inte var aktiv under hela dagen så att krossen tidvis inte gick att köra eller att slutsatser som dragits om systemet inte visade sig stämma i praktiken.

Att få fram processens egenskaper med stegsvar har visat goda resultat, men det har inte tagits fram någon lösning på problemet med varierande hastighetsförstärkning. I alla testerna som gjorts har regulatorn dimensionerats efter de förhållanden som rådde just då. För att kunna lita på att regleringen alltid presterar måste det undersökas hur stor påverkan den varierande hastighetsförstärkningen kan ha på regleringen. Alltså inom vilket spann hastighetsförstärkningen kan variera.

7.2 Resultat

Att regleringen ”bara” är lika bra som den intrimmade reglering kan ändå ses som ett positivt resultat. Den intrimmade regleringen är ju specifik för just den här krossen medan den framtagna regleringen har en allmän implementeringsmetod som inkluderar möjlighet till självinställning. Utan vidare jämförelse kan ändå slutsatsen dras att den framtagna regleringen fungerar avsevärt mycket bättre än den reglering som var i drift vid arbetets start.

7.3 Framtida arbeten

Det viktigaste för att gå vidare är att mer exakt definiera vad som är önskvärt från regleringen, alltså då hur jämnt nivån bör hållas och vilken styrsignalaktivitet som är att föredra.

Dessutom bör det undersökas vilka faktorer som spelar in vad gäller matningshastighet från matare. Detta för att kunna förbättra möjligheten till självinställning.

Referenser

1. **European Aggregates Association.** *Annual Review 2014-2015.* Bryssel : UEPG, 2015.

2. **Sveriges geologiska undersökning.** *Grus, sand och krossberg 2014.* Uppsala : SGU, 2015. ISSN 0283-2038.

3. **Evertsson, Magnus.** *Cone Crusher Performance.* Göteborg : Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Inst. för maskin- och fordonskonstruktion, 2000.

4. **Hulthén, Eric.** *Real Time Optimization of Rock Crushers.* Göteborg : Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Inst. för tillämpad mekanik, 2008.

5. **Bengtsson, Magnus.** *Quality-Driven Production of Aggregates in Crushing Plants.* Göteborg : Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Inst. för produk och produktionsutveckling, 2009.

6. **Thomas, Bertil.** *Modern Reglerteknik, 4:e uppl.* Göteborg : Liber, 2008. ISBN 978-91-47-09323-6.

7. **Åström, Karl och Hägglund, Tore.** *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning, 2:a uppl.* Lund : ISA, 1995. ISBN 978-15-56-17516-9.

8. **Hägglund, Tore.** *Praktisk processreglering.* Lund : Studentlitteratur, 2008. ISBN 978-91-44-05164-2.

9. **Hugh, Jack.** *Automatic Manufacturing Systems - with PLCs, Version 5.1.* Boston : Free Software Foundation, 2008.

10. **Lindstedt, Stefan och Bolander, Anton.** *Automation and Optimization of Primary Gyratory Crusher Performance for Increased Productivity.* Göteborg : Examensarbete M.Sc, Chalmers tekniska högskola, Inst. för produkt- och produktionsteknik, 2015.

11. *Tight feed-hopper level control in cone crushers.* **Itävuo, Pekka, Väyrynen, Teemu och Vilkko, Matti.** Santiago : u.n., 2014. XXVII International Mineral Processing Congress.

12. **Asbjörnsson, Gauti.** *Utveckling av simuleringsförmåga och avancerade processmodeller för bergmaterial-, malm- och mineralproduktion.* Göteborg : Doktorandprojekt, opublicerad, uå.

13. —. *Crushing Plant Dynamics.* Göteborg : Doktorsavhandling, Chalmers tekniska högskola, Inst. för tillämpad mekanik, 2015. ISBN 978-91-7597-278-7.

14. *Output Prediction of Cone Crushers.* **Evertsson, Magnus.** 1998, Minerals Engineering, Vol. 11, ss. 215-231.

15. *Pilot Study on the Influence of Eccentric Speed on Cone Crusher Production and Operation.* **Jacobson, D och Lamminmäki, N.** Denver : u.n., 2013. SME Annual Meeting.

16. **Jutterström, Karl-Erik.** *Utvärdering av olika regleralgoritmer för mikrodatorstyrning av en stenkross.* Göteborg : Examensarbete Civ. Ing., Chalmers tekniska högskola, Inst. för reglerteknik, 1982.

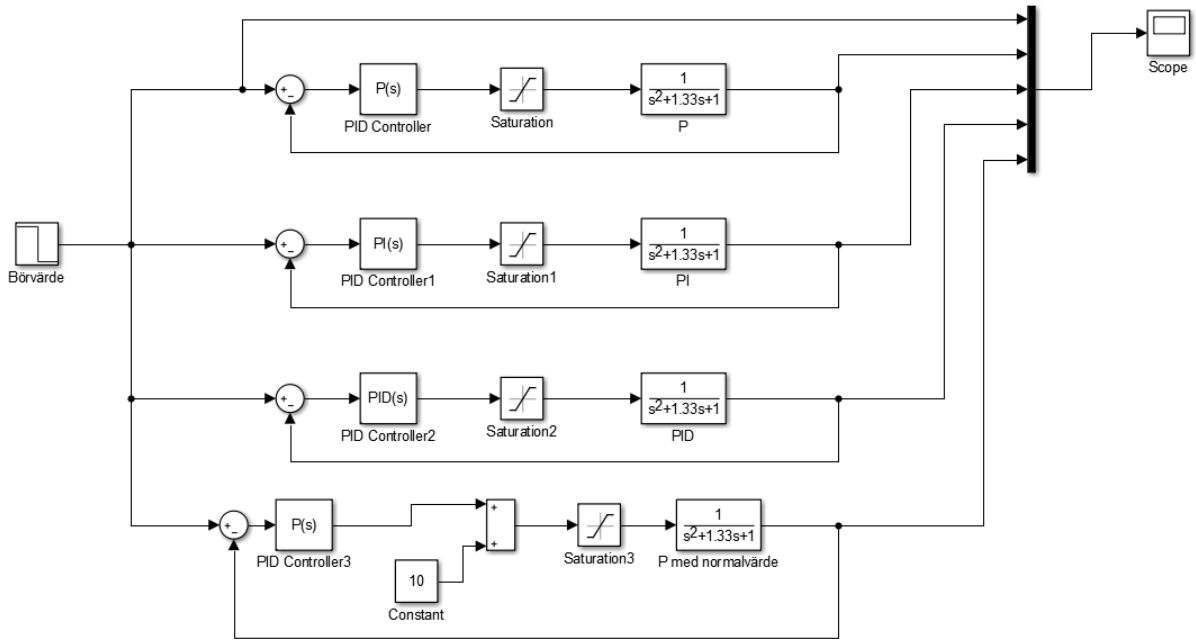
17. **Forsman, Krister.** *Reglerteknik för processindustrin.* Lund : Studentlitteratur, 2005. ISBN 91-44-03789-9.

Bilaga A: Simulink-modell för avsnitt 2.2.2

	K	u_0	Ti	Td
P (u0 = 0)	3	0	-	-
P (u0 > 0)	3	10	-	-
PI	3	-	3,33	-
PID	3	-	3,33	3,33

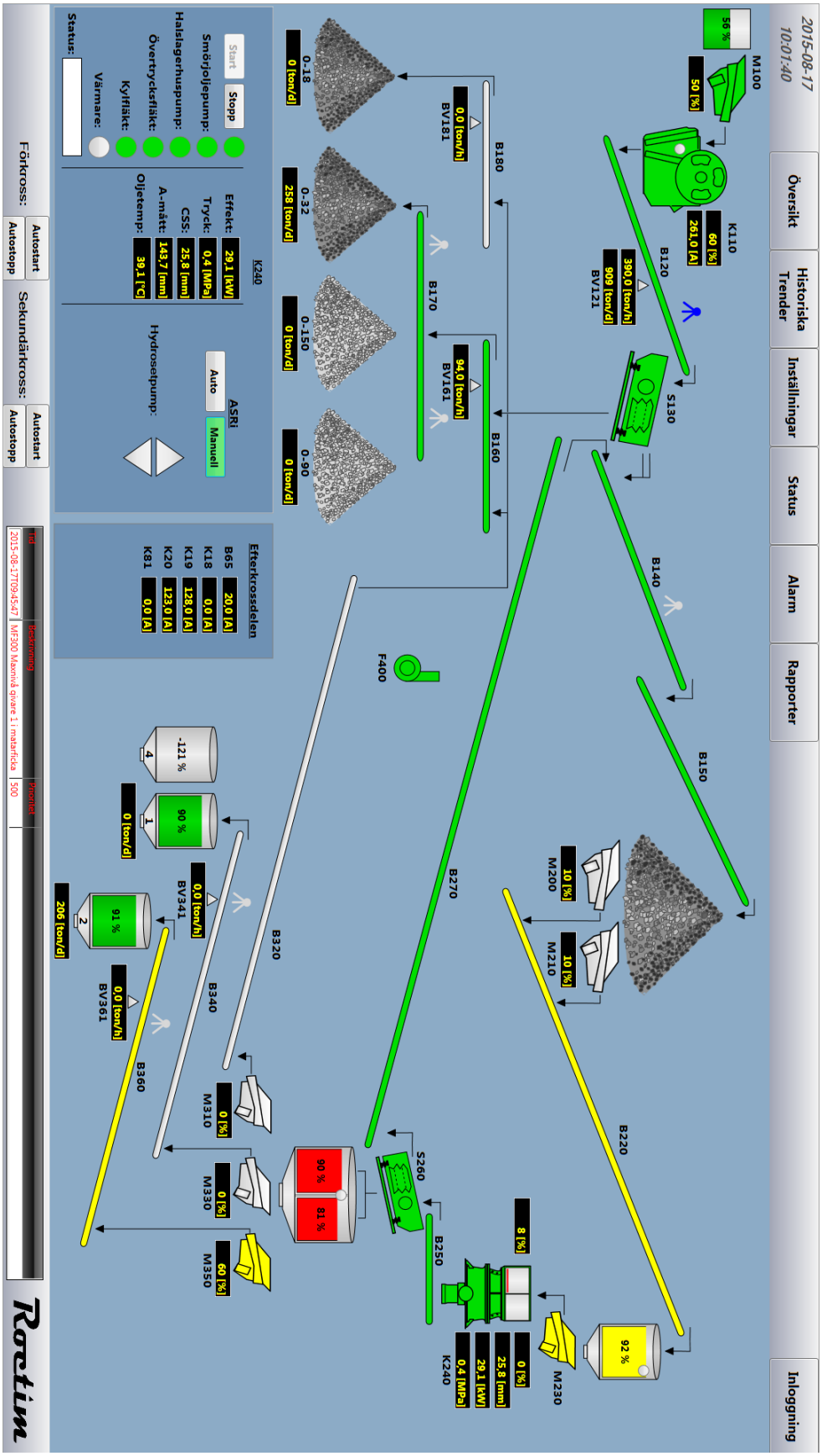
Reglerparametrar för de olika regulatorerna som jämförs i avsnitt 2.2.2.

Processens överföringsfunktion: $G(s) = \frac{1}{s^2+1{,}33s+1}$



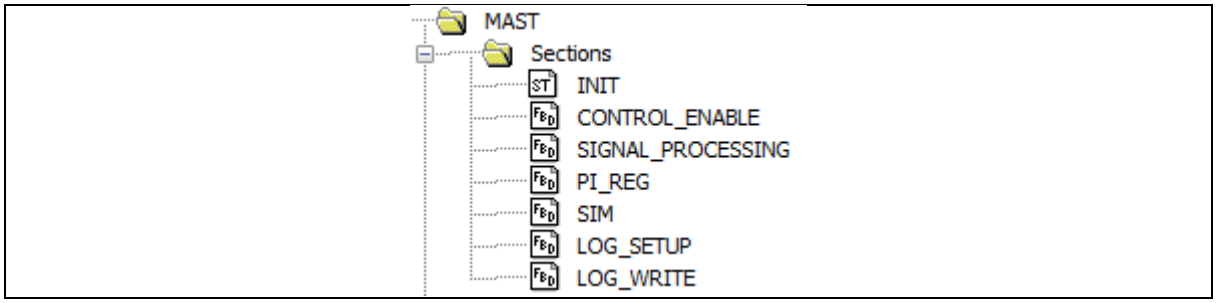
Försöksuppställning i MATLAB-Simulink.

Bilaga B: Schema över krossanläggningen



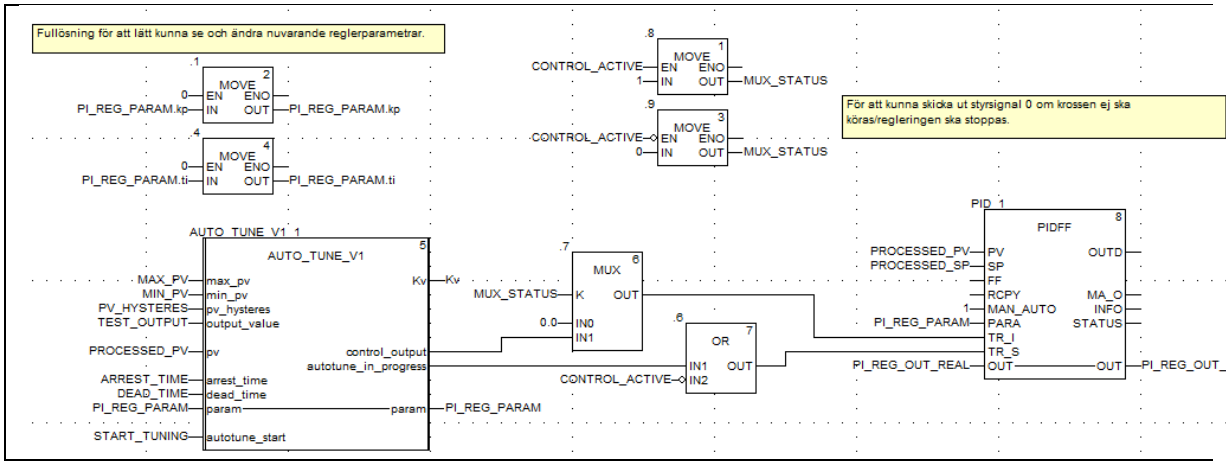
Schema över krossanläggningen.

Bilaga C: PLC-program för utvärdering av reglerprototyper

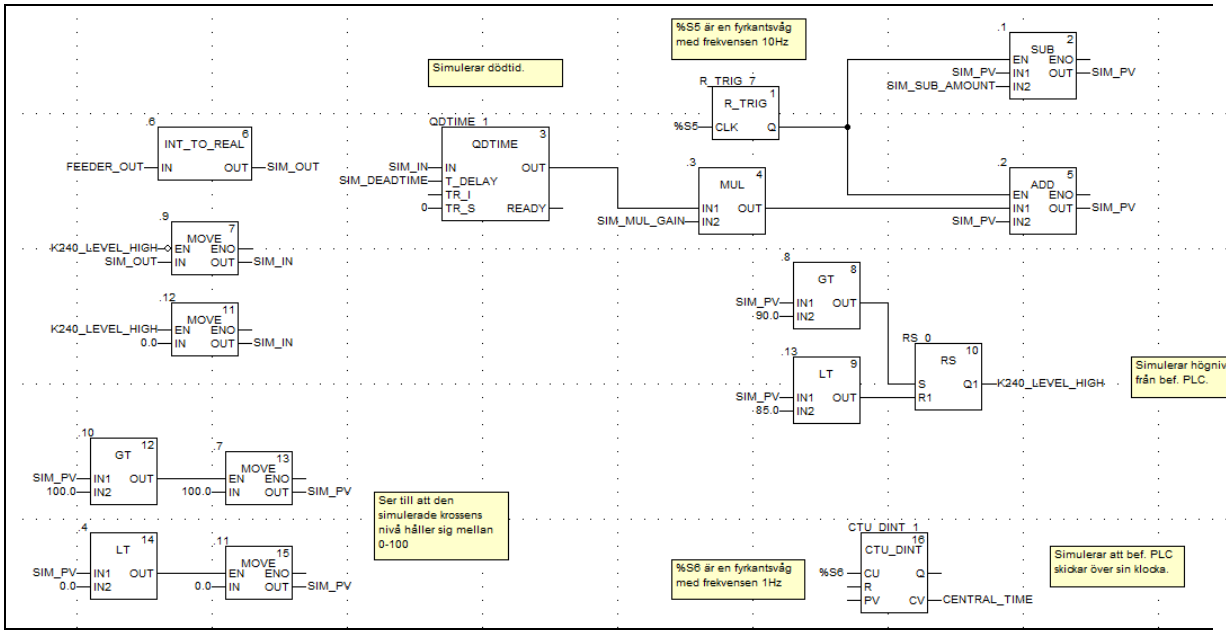


Programmets beståndsdelar

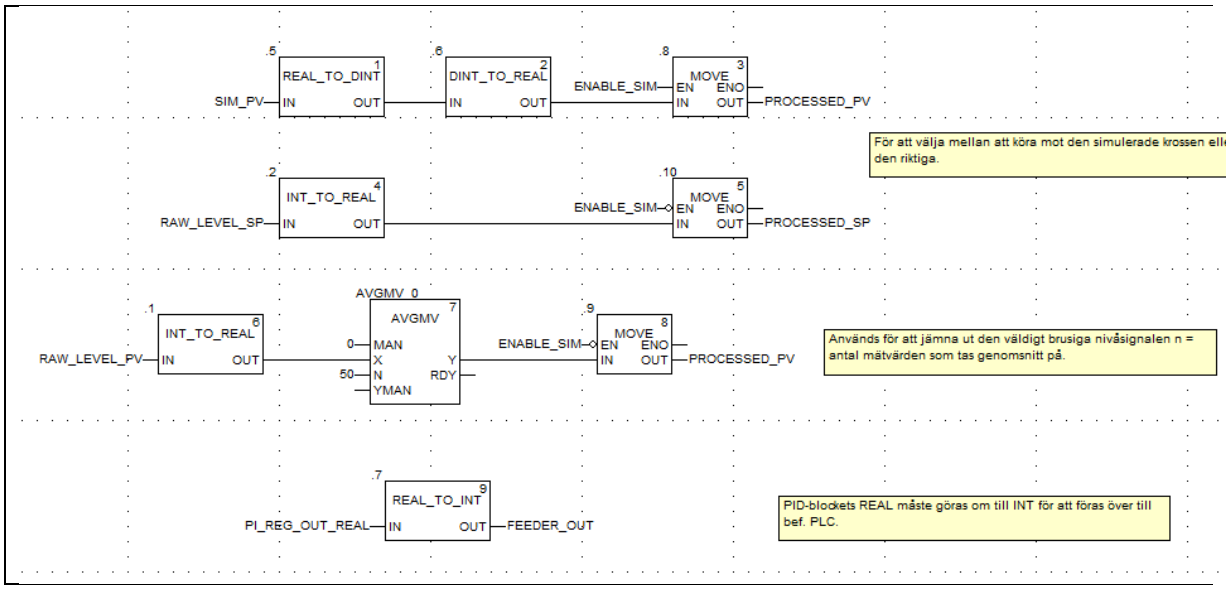
INIT är helt enkelt en lista med variabler som initialiseras. LOG_SETUP och LOG_WRITE loggar krossens driftdata till en fil för att kunna utvärdera regleringen.



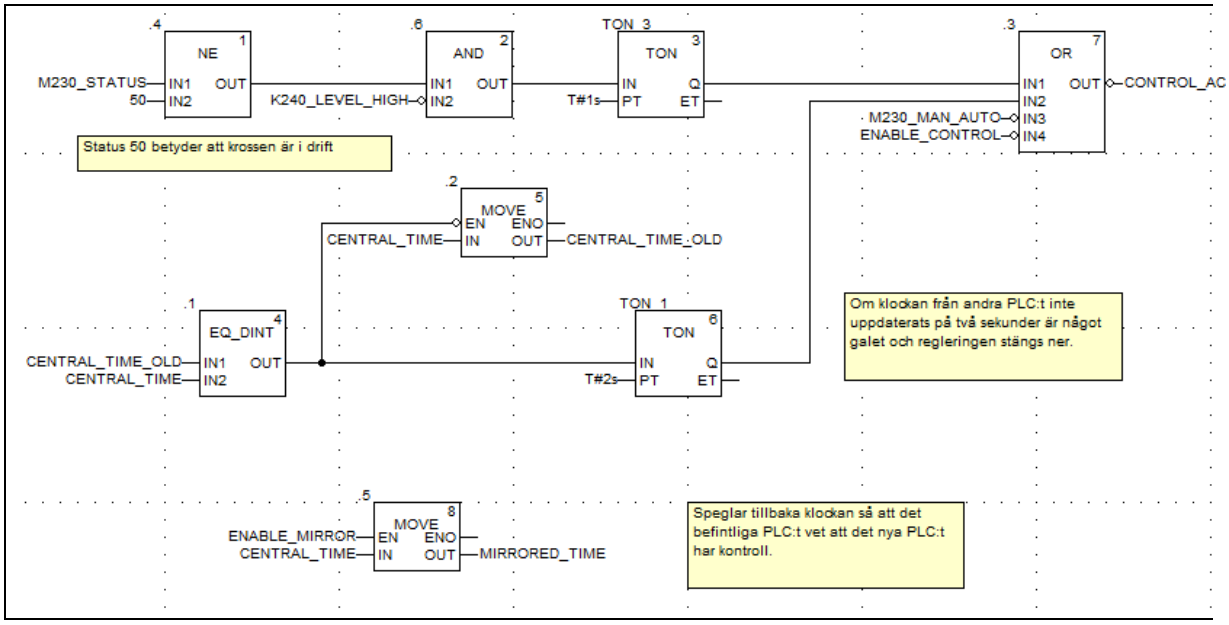
FBD: PI_REG



FBD: SIM

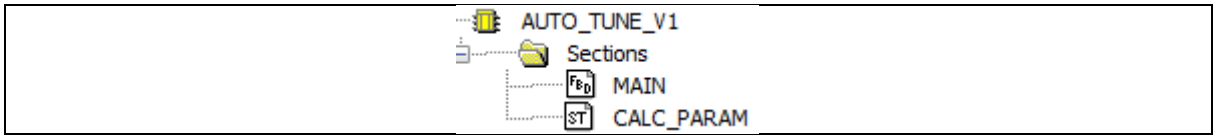


FBD: SIGNAL_PROCESSING

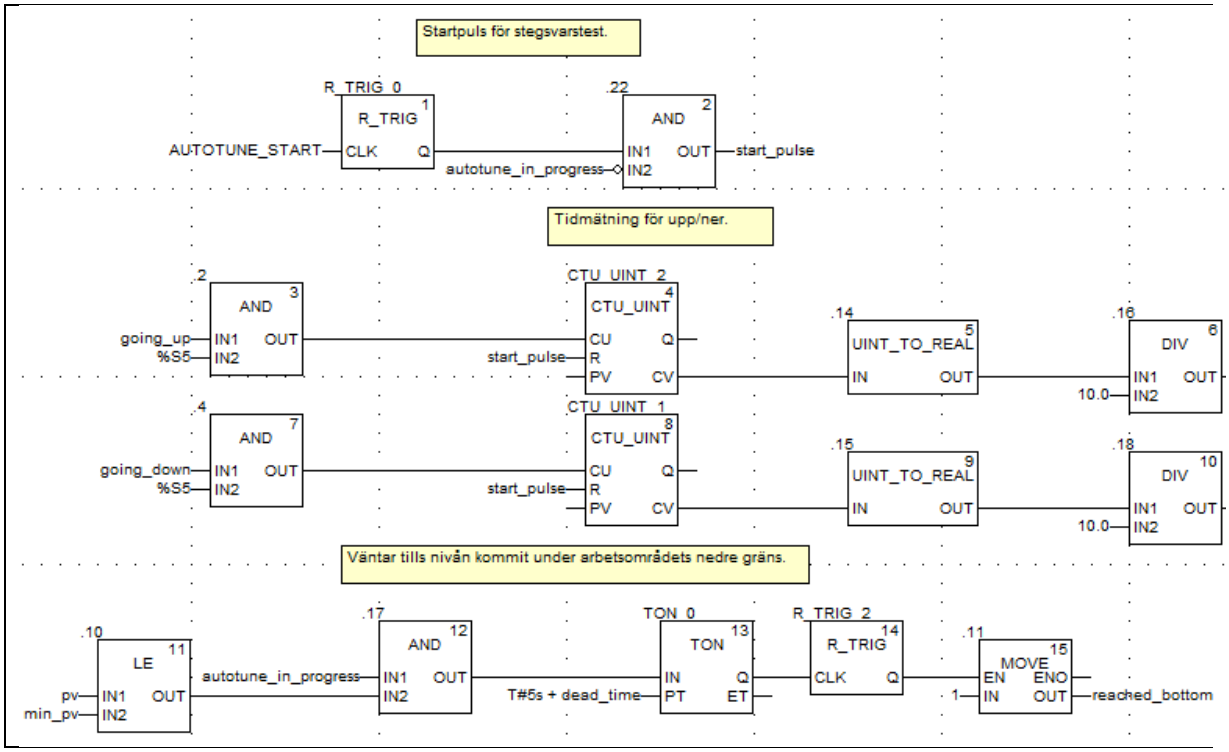


FBD: CONTROL_ENABLE

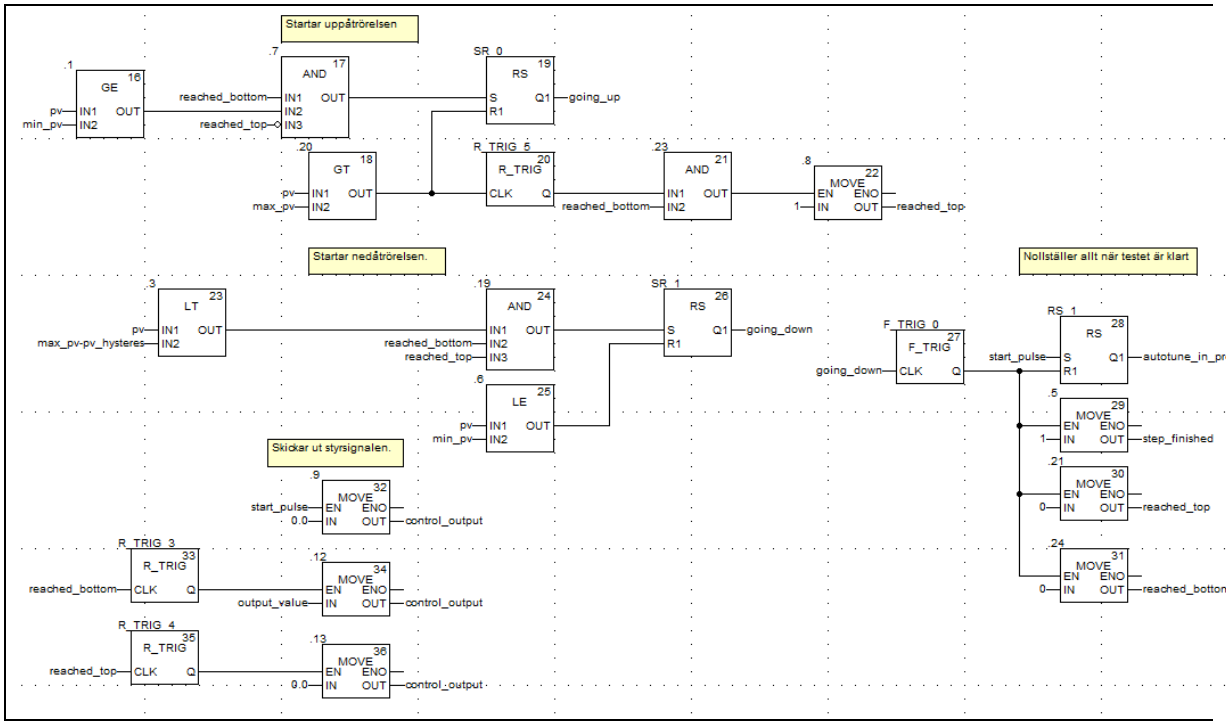
Utöver huvudprogrammet har även ett block för automatinställning med arresttidsmetoden tagits fram.



Funktionsblockets beståndsdelar



AUTO_TUNE_V1 → FBD: MAIN (1/2)



AUTO_TUNE_V1 → FBD: MAIN (2/2)

```
        (* uträkning av reglerparametrar enligt arresttidsmetoden *)
IF step_finished THEN
        t2 := t2;

        local_kv := ( (max_pv-min_pv)/t1 + (max_pv-min_pv-pv_hysteres)/t2 )/output_value;

        local_Ti := 2*arrest_time+dead_time;
        local_Kc := 1000.0*TIME_TO_REAL(local_Ti) / ( local_kv * ( TIME_TO_REAL(arrest_time) + TIME_TO_REAL(dead_time) )*

        param.kp := MOVE(local_Kc);
        param.ti := MOVE(local_Ti);
        param.td := MOVE(t#0s);
        Kv := MOVE(local_kv);
        step_finished := 0;
END_IF;
```

AUTO_TUNE_V1 → ST: CALC_PARAM

Bilaga D: Dimensionering av reglering

Bestämning av hastighetsförstärkning:

y_0: Nedre gräns av arbetsområde
y_1: Övre gräns av arbetsområde
u_0: Styrsignal vid stegsvar

Kör mataren manuellt så att nivån i krossen är låg. (En bit under arbetsområdet)
Öka styrsignal i ett steg till u_0 så att nivån stiger stadigt.
Notera när nivån passerar y_0.
När nivå > y_1, stäng av matare.
Vänta tills nivån kommit tillbaka ner till y_0.

$\Delta y = y_1 - y_0$

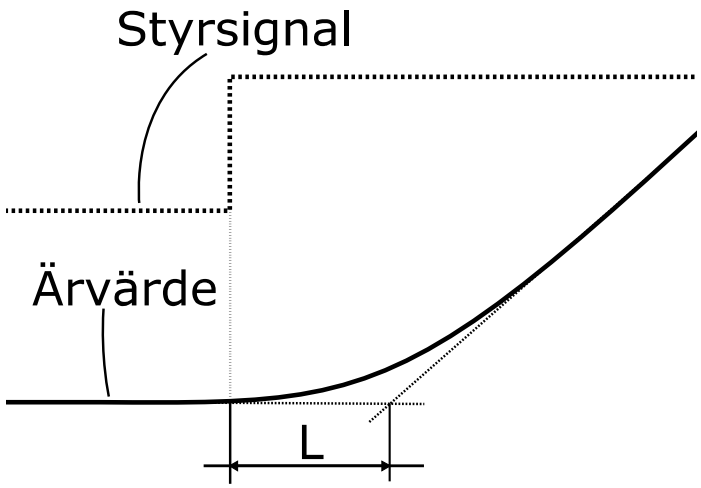
$v_1 = \frac{\Delta y}{T_1}$, där T_1 är tiden från y_0 till y_1.

$v_2 = -\frac{\Delta y}{T_2}$, där T_2 är tiden från y_1 till y_0.

Då blir hastighetsförstärkningen: $K_v = \frac{v_1 - v_2}{u_0} = \left(\frac{y_1 - y_0}{T_1} + \frac{y_1 - y_0}{T_2}\right)\frac{1}{u_0}$

Bestämning av dödtid:

Dödtid L är tiden från stegets början till den punkt där den stabila nivån och den ökande kurvans asymptoter korsar varandra.



Bestämning av dödtid för integrerande processer

1. Kör mataren manuellt så att en sånär som stabil nivå någonstans inom arbetsområdet uppnåtts.
2. Gör ett steg så att nivån stiger kraftigt.
3. Vänta tills dess att nivån i krossen har stigit *en bit*.
4. Stäng av matare.
5. Approximera dödtid med loggad data.

Arresttidsdimensionering:

Utan dödtid: $K = \frac{2}{K_v * T_a}, T_i = 2T_a$ (Egentligen ett specialfall av ekvationen med dödtid)

Med dödtid L: $K = \frac{T_i}{K_v(T_a+L)^2}, T_i = 2T_a + L$

Val av T_a:

$$T_a \geq 2.72 \frac{\Delta y_{max}}{k_v * C}$$

Δy_{max} = maxavvikelse från börvärdet
C = stegstörning i procentenheter

Alternativt, bestäm T_a så att $K_c = 1$ och sänk T_a i steg tills bra reglering uppnåtts.

Z-N, baserat på stegsvar för integrerande process:

	K	T_i	T_d
P	$\frac{1}{K_v}$	-	-
PI	$\frac{0,9}{K_v}$	$3L$	-
PID	$\frac{1,2}{K_v}$	$2L$	$\frac{L}{2}$

AMIGO, baserat på stegsvar för integrerande process:

	K	T_i	T_d
PI	$\frac{0,35}{K_v L}$	$13.4L$	-
PID	$\frac{0,45}{K_v L}$	$8L$	$0,5L$

Bilaga E: Resultat från stegsvarstest

Stegsvar #	Pausläge?	T1	T2	u	Kv	Hittas vid
1	Ja	18	6	75	0,059259	stegsvar.txt 00:38, HMI 05/04 kl. 07:45
2	Nej	11	9	75	0,053872	stegsvar2.txt 00:30, HMI 05/04 kl. 09:24
3	Ja	14	4	75	0,085714	stegsvar2.txt 02:30, HMI 05/04 kl. 09:26
4	Ja	17	5	75	0,06902	stegsvar2.txt 04:30, HMI 05/04 kl. 09:28
5	Nej	7	6	75	0,08254	stegsvar2.txt 07:30, HMI 05/04 kl. 09:32
6	Ja	9	4	75	0,096296	stegsvar2.txt 09:00, HMI 05/04 kl. 09:33
7	Nej	3	7	75	0,126984	automatinst.txt 01:10, HMI 05/04 kl. 11:02
8	Nej	16	14	75	0,035714	automatinst.txt 02:00, HMI 05/04 kl. 11:04
9	Ja	23	4	75	0,078261	automatinst.txt 04:00, HMI 05/04 kl. 11:06
10	Nej	23	5	75	0,064928	automatinst.txt 05:30, HMI 05/04 kl. 11:07
11	Nej	15	17	75	0,033464	automatinst.txt 06:30, HMI 05/04 kl. 11:08
13	Ja	14	9	75	0,048677	HMI 28/04 kl. 11:09
14	Ja	13	10	75	0,047179	HMI 28/04 kl. 11:11
15	Ja	13	8	75	0,053846	HMI 28/04 kl. 11:12
16	Nej	12	16	75	0,038889	HMI 28/04 kl. 11:28
17	Nej	11	12	75	0,046465	HMI 28/04 kl. 11:29
18	Nej	10	14	75	0,045714	auto_2.txt 00:30HMI 17/05 kl. 10:55
19	Nej	22	8	75	0,045455	auto_2.txt 02:00, HMI 17/05 kl. 10:56:30
20	Nej	22	8	75	0,045455	auto_2.txt 05:00, HMI 17/05 kl. 10:59:30
21	Nej	17	11	75	0,039929	auto_2.txt 06:00, HMI 17/05 kl. 11:00:30
22	Nej	20	10	75	0,04	auto_3.txt 01:30, HMI 17/05 kl. 12:27:30
23	Nej	9	5	75	0,082963	auto_3.txt 02:30, HMI 17/05 kl. 12:29:00
24	Nej	19	6	75	0,05848	auto_3.txt 02:30, HMI 17/05 kl. 12:29:30
25	Nej	26	9	75	0,039886	auto_3.txt 05:00, HMI 17/05 kl. 12:31:00
26	Nej	22	3	75	0,10101	auto_3.txt 09:00, HMI 17/05 kl. 12:35:00
28	Nej	19	11	75	0,038278	step2.txt 01:00 (24/05)
29	Nej	19	9	75	0,043665	step2.txt 02:30 (24/05)
30	Nej	29	4	75	0,075862	step2.txt 04:00 (24/05)
31	Nej	24	10	75	0,037778	step2.txt 05:30 (24/05)