

ISSN 0280-5316  
ISRN LUTFD2/TFRT--5895--SE

# Reglering av transportband

Carl Raskowski

Lund University  
Department of Automatic Control  
May 2012



<b>Lund University</b> <b>Department of Automatic Control</b> <b>Box 118</b> <b>SE-221 00 Lund Sweden</b>		<i>Document name</i> <b>MASTER THESIS</b>	
		<i>Date of issue</i> <b>May 2012</b>	
		<i>Document Number</i> <b>ISRN LUTFD2/TFRT--5895--SE</b>	
<i>Author(s)</i> <b>Carl Raskowski</b>		<i>Supervisor</i> <b>Stefan Snygg, StoraEnso Hylte</b> <b>Choy-Hsien Lin, StoraEnso Hylte</b> <b>Tore Hägglund, Dept. of Automatic Control,</b> <b>LTH, Lund University (examiner)</b>	
		<i>Sponsoring organization</i>	
<i>Title and subtitle</i> <b>Reglering av transportband</b>			
<i>Abstract</i> <p>This thesis investigates the possibility of improving level control in a buer silo fed by a long conveyor belt at Stora Enso's industrial paper mill in Hyltebruk. The controller controlling the process has diculties when the input to the conveyor belt stops since it takes at least 2.5 minutes for the empty belt segment to reach the buer. Given relatively low quality level measurements a solution specically aimed at detecting and compensating for these holes, by selectively circumventing the ordinarycontroller, is described.</p>			
<i>Keywords</i>			
<i>Classification system and/or index terms (if any)</i>			
<i>Supplementary bibliographical information</i>			
<i>ISSN and key title</i> <b>0280-5316</b>			<i>ISBN</i>
<i>Language</i> <b>Swedish</b>	<i>Number of pages</i> <b>1-41</b>	<i>Recipient's notes</i>	
<i>Security classification</i>			



## **Abstract**

This thesis investigates the possibility of improving level control in a buffer silo fed by a long conveyor belt at Stora Enso's industrial paper mill in Hyltebruk. The controller controlling the process has difficulties when the input to the conveyor belt stops since it takes at least 2.5 minutes for the empty belt segment to reach the buffer. Given relatively low quality level measurements a solution specifically aimed at detecting and compensating for these holes, by selectively circumventing the ordinary controller, is described.

# Innehåll

<b>1</b>	<b>Bakgrund</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>Problemformulering</b>	<b>6</b>
<b>3</b>	<b>Processbeskrivning</b>	<b>6</b>
3.1	Processens komponenter . . . . .	6
3.1.1	Buffertsilo . . . . .	7
3.1.2	Transportband . . . . .	7
3.1.3	Våg . . . . .	7
3.1.4	Transportskruvar . . . . .	9
3.1.5	Mätsignaler . . . . .	9
<b>4</b>	<b>Nivåreglering med inflöde via transportband</b>	<b>10</b>
4.1	Transportbandets egenskaper . . . . .	10
4.1.1	Transportband med konstant inflöde . . . . .	10
4.1.2	Transportband med konstant bandhastighet . . . . .	11
4.2	Nuvarande nivåreglering . . . . .	12
4.2.1	Processmanipulering för enklare reglering . . . . .	12
4.2.2	Process- och mätstörningar . . . . .	15
<b>5</b>	<b>Hålkompensering</b>	<b>17</b>
5.0.3	Bränslevågen . . . . .	17
5.0.4	Strategi för hålkompensering . . . . .	18
5.1	Håldetektorn . . . . .	18
5.2	Hålkompensatorn . . . . .	19
5.3	Sammanfattning . . . . .	23
5.3.1	Normal drift (inga hål i slutet av bandet) . . . . .	24
5.3.2	Hål närvarande i slutet av bandet . . . . .	24
5.4	Implementering . . . . .	26

5.5	Tester . . . . .	27
<b>6</b>	<b>Diskussion och slutsats</b>	<b>33</b>
<b>A</b>	<b>Simuleringsmodell</b>	<b>34</b>
A.1	Källkod . . . . .	35

# 1 Bakgrund

Pappersbruket i Hylte grundades 1907 och efter sammanslagningen av Stora och Enso 1998 ägs nu Hylte Bruk av Stora Enso. Grunden till dagens bruk är konstruktionen av det nya bruket, se figur 1, med moderna pappersmaskiner som påbörjades 1970. Den första pappersmaskinen togs i drift 1972 och sedan 1989 produceras 8,4 meter brett tidningspapper från fyra pappersmaskiner med en sammanlagd maximal kapacitet på 730 m<sup>2</sup>/s. Hylte Bruk är idag ett av de största tidningspappersproducerande bruken i världen.<sup>1</sup>



Figur 1: Flygbild över Hylte Bruk

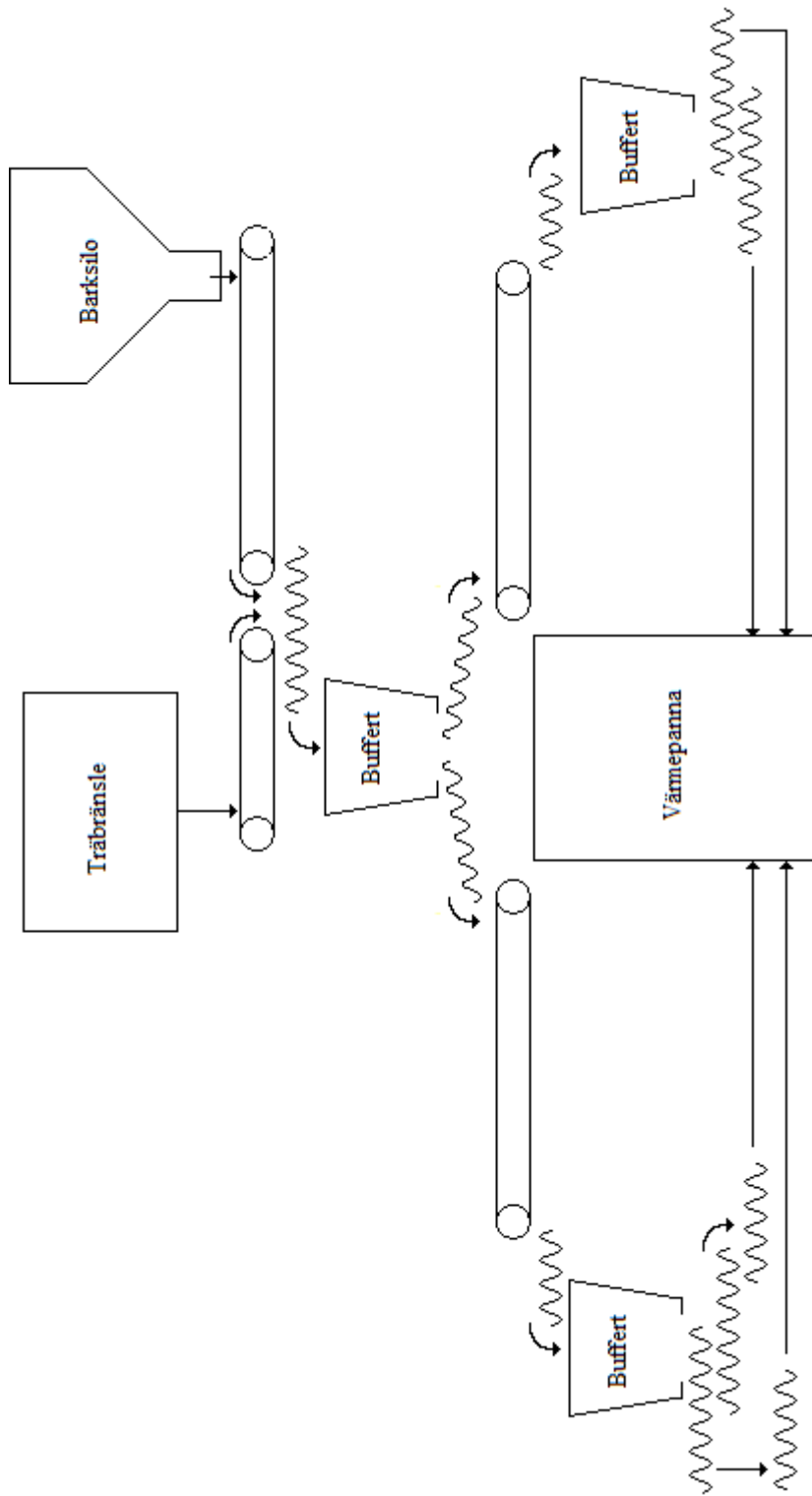
Vid tillverkning av tidningspapper i pappersmaskinerna används het vattenånga för att värma upp cylindrar som i slutet av tillverkningsprocessen torkar pappret. Det krävs stora mängder het vattenånga och detta förses av värme pannor som måste ha jämn och framför allt kontinuerlig bränsletillförsel för att hålla rätt ångtemperatur.

Vid Stora Ensos pappersbruk i Hylte skickas bränslet, bestående av bland annat flis eller bark, till värme pannorna med hjälp av en serie av transportband och buffertsilor (se figur 2) med stora transportskruvar emellan vilka sköter på- och avlastning av bränsle till respektive från banden. Det är av högsta vikt att värme pannorna har tillgång till bränsle för att kunna tillgodose pappersmaskinerna med het vattenånga, vid avbrott eller nedsatt bränsletillförsel till de ordinarie värme pannorna används en naturgasdriven reservpanna.

Bränsletillförseln styrs genom att transportbandens hastighet och inflöde, i form av varvtalshastighet på framför liggande skruv, regleras mot bränslenivån i efter liggande buffertsilor. För kontinuerlig bränsletillförsel till pannorna bör buffertsilorna aldrig bli tomma eller fyllas helt. Detta gäller framför allt silorna närmast

<sup>1</sup>Key facts of Hylte Mill, <http://www.storaenso.com/about-us/mills/sweden/hylte-mill/facts/Pages/key-facts-of-hylte-mill.aspx>, Nerladdad 2012-03-20



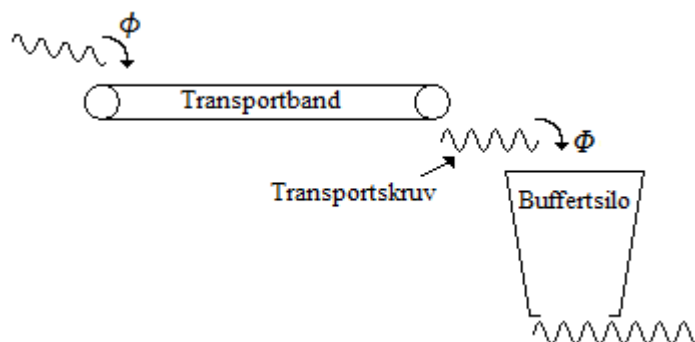


Figur 2: Schematisk skiss över bränsletillförseln till Panna 4.

pannorna då det här direkt ger upphov till avbrott i pannornas bränsletillförsel, utan möjlighet att åtgärda med reglering.

## 2 Problemformulering

Målet med detta arbete är att kontrollera möjligheterna att förbättra nivåregleringen i ett delsystem bestående av transportband och buffertsilo, se figur 3, samt implementera en generell lösning för liknande processer.



Figur 3: Skiss över transportbandet, buffertsilon och mellanliggande transportskruvar

## 3 Processbeskrivning

### 3.1 Processens komponenter

Värmepannans bränsletillförsel består av ett system av transportband, buffertsilor samt transportskruvar och till varje transportband hör även en väg som mäter mängden bränsle på bandet. Den konfiguration av komponenter som är av intresse för detta arbete samt bygger upp systemet för bränsletillförsel från lagersilo till panna, med variationer av transportbandslängder, vägplacering och silostorlek (mindre volym närmare pannan) återfinns i figur 3. Det transportband och den buffertsilo (med tillhörande transportskruvar) vilket undersökts och använts för tester under detta arbete är utformat på samma sätt och nedan följer en generell presentation av dess komponenter. Bränslet till bandet består av blandat träbränsle, som bark och flisat trämaterial, sammansättningen bestäms vid början av transportsystemet till pannan och kan inte ändras vid det aktuella bandet.

### 3.1.1 Buffertsilo

Silon, i storleksordningen  $1 \text{ m}^3$ , som sitter efter transportbandet agerar buffert mellan transportbandet och värmepannan. Bandet är kopplat till buffertsilon via en transportskruv och utförelse från silon sker via två transportskruvar i botten av silon. När silon inte är tom, eller helt fylld, påverkas inte processen nedströms, men vid helt fylld buffertsilo blir bränslet packat för hårt, vilket stoppar utflödet och manuellt ingrepp, i form av utskyffning av bränsle från silon, krävs. Det finns två säkerhetsfunktioner som stoppar alla processer uppströms om buffertnivån blir för hög; den första är mjukvarubaserad (den förlitar sig på nivåmätningen) och kan återställas automatiskt, medan den andra är en fysisk spärr som slår ifrån när bränslet når den, denna måste dock återställas manuellt vid silon.

Nivåmätning är grunden till nivåregleringen och sker genom att aktiviteten av radioaktivt material, placerat på sidan av silon, mäts på motsatta sidan och nivån ges av hur mycket som absorberas. Figur 4 är en enkel schematisk skiss över buffertsilon med transportskruvar som för bränslet från silon, kopplingen mellan buffertsilon och införelse- respektive bortförelseskruvar illustreras i figur 5.

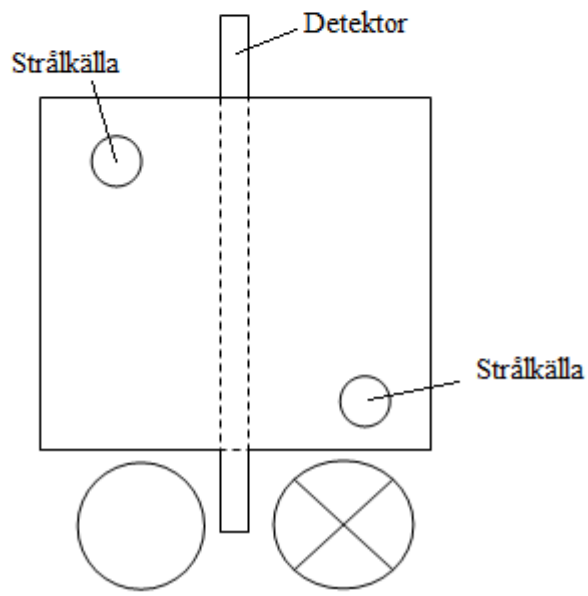
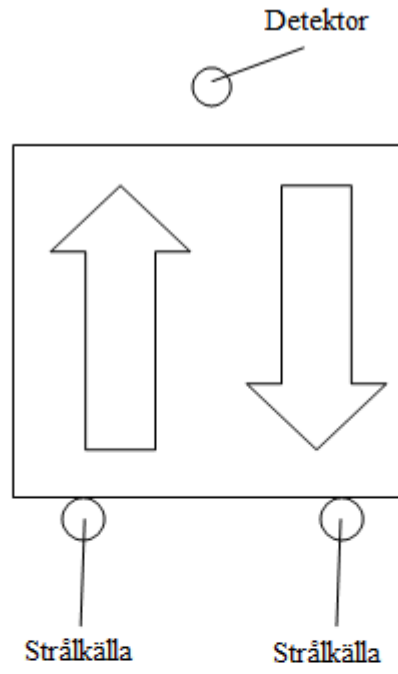
Det finns även en större buffertsilo före bandet där den ena skruven för utförelse, motsvarande den undre skruven i figur 5, för ner bränsle på transportbandet (den andra skruven för ut bränsle till ett annat band).

### 3.1.2 Transportband

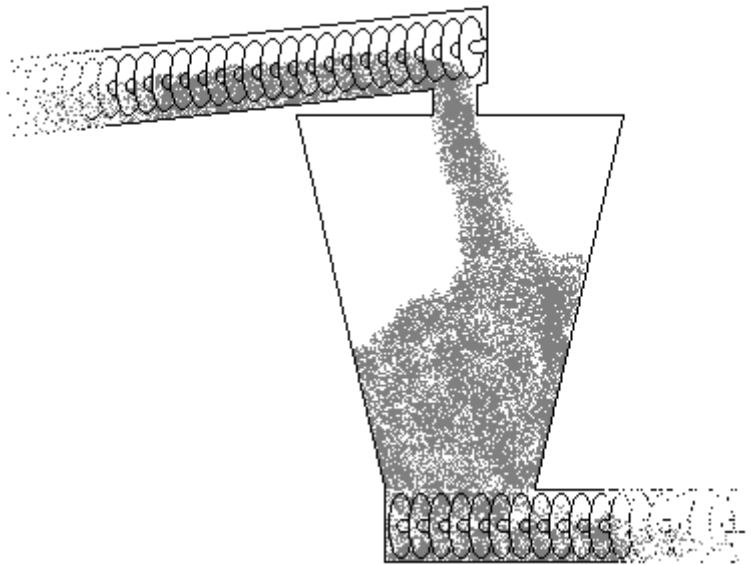
Transportbandet är ca 1 meter brett, 100 meter långt och bandens maximala hastighet är ca  $40 \text{ m/min}$  (ca  $0,67 \text{ m/s}$ ). Den lägsta hastigheten vid drift är ca  $10 \text{ m/min}$  (ca  $0,17 \text{ m/s}$ ). Bandet drivs av en kombination av elektriska motorer samt hydraulik och hastigheten regleras av en regulator vars referenssignal kommer ifrån huvudregulatorn, vilken styr nivåregleringen i buffertsilon. Bandet bör inte startas och stoppas i onödan eftersom detta leder till utslitning av framdrivningsmekanismen, därav är det viktigt att hålla nivåmätningen i buffertsilon under ca 80% (detta värde ändras manuellt till och från, beroende på hur processen beter sig), vilket är det värde då den mjukvarubaserade säkerhetsfunktionen stoppar bandet.

### 3.1.3 Våg

Vågen, placerad strax efter början av bandet, mäter mängden bränsle på en kort bit av transportbandet och ger mätvärden i  $\text{kg/m}$ . Vågen bygger på samma princip som nivåmätningen i buffertsilonerna och beräknar massan av lasten genom att mäta aktiviteten från ett radioaktivt material igenom bandet och dess last. Data från vågen (och motsvarande vågar på andra band) används primärt för bokföring av bränslemängder.



Figur 4: Schematisk skiss över buffertsilon, sett uppifrån respektive från sidan



Figur 5: Buffertsilo med transportskruvar

#### 3.1.4 Transportskruvar

Transportskruvarna står för uttransport av bränsle från den framförvarande buffertsilon till transportbandet samt transporten från bandet till buffertsilon efter bandet och utförsel från buffertsilon efter bandet. Längder och radier på skruvarna varierar, men här är de kring 5 m långa, med radier runt 30 cm. Förutom vid höga varvtal, nära det maximala, svarar varvtalet på skruvarna någorlunda linjärt mot flödet av bränsle genom skruven. Regulatorer styr skruvarnas varvtal mot referensvärdena från huvudregulatorerna.

#### 3.1.5 Mät signaler

Signaler från processen består således av nivåmätningen från buffertsilon (andel av full silo i procent), transportskruvarnas varvtal (andel av maximalt varvtal i procent), mätsignalen från vågen (kg bränsle per meter) samt transportbandets hastighet (meter per minut). Ur nivåregulatorns perspektiv är det, av dessa signaler, endast nivåmätningen som agerar insignal, bandhastighet samt skruvarnas varvtal sätts av nivåregulatorns styrsignal och vågen används inte för närvarande vid reglering.

## 4 Nivåreglering med inflöde via transportband

### 4.1 Transportbandets egenskaper

Modellbeskrivningen för systemet bestående av en buffertsilo med inflöde via ett transportband består i grunden av två komponenter; buffertsilon, vilken är en integrerande process, och transportbandet. Transportbandets egenskaper vad gäller reglerbarhet beror dels på att inflödet till bandet,  $\phi$ , samt bandhastigheten,  $v$ , har styrbara områden enligt (1) och dels på att kvoten mellan inflöde och bandhastighet,  $\frac{\phi}{v}$ , inte får överskrida bandets maximala lastkapacitet,  $k_{last}$ , d.v.s. hur mycket det går att lasta utan att lasten flödar över eller blir för tung för att transportera.

$$\left\{ \begin{array}{l} 0 \leq \phi_{min} \leq \phi \leq \phi_{max} \\ 0 \leq v_{min} \leq v \leq v_{max} \\ \frac{\phi}{v} \leq k_{last} \\ k_{last} > 0, \text{ konstant} \end{array} \right. \quad (1)$$

Det, vid drift, minimala flödet  $\phi_{min}$  och den minimala bandhastigheten  $v_{min}$  bestäms i första hand av fysiska begränsningar, men designval (beroende på bl.a. reglerstrategi eller minimering av slitage) kan dock höja dessa värden över deras rent fysiska minimumgränser. Det bör observeras att dessa gränser för bandhastighet och inflöde endast gäller reglering vid normal drift och att säkerhetsfunktioner i ett verkligt system kan stoppa ett band även om regulatorn i sig inte har denna möjlighet.

För att närmare visa på egenskaperna för transportband undersöks extremlägena, vilka beskrivs av "konstant inflöde" och "ren tidsfördröjning" med begränsningar, motsvarande (1), på inflöde och bandhastighet enligt (2) respektive (5).

#### 4.1.1 Transportband med konstant inflöde

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi > 0, \text{ konstant} \\ 0 < \frac{\phi}{k_{last}} = v_{min} \leq v \leq v_{max} \\ k_{last} > 0, \text{ konstant} \end{array} \right. \quad (2)$$

Vid konstant inflöde är det uppenbart att flödet från bandet, utflödet  $\Phi$ , i genomsnitt är exakt lika med inflödet  $\phi$  och att reglering av nivån i en buffertsilo efter bandet inte är möjlig. Genom att öka bandhastigheten går det visserligen att tillfälligt öka utflödet, men eftersom ett konstant inflöde och en ökad bandhastighet ger lägre bandlast kommer utflödet att åter motsvara inflödet när flanken för den lägre bandlasten når slutet av transportbandet. Detta går endast att göra tills bandhastigheten når sitt maximum, därefter är den enda

möjligheten till styrning att på omvänt sätt minska utflödet genom att minska bandhastigheten och därigenom få en högre bandlast. Denna tillfälliga utflödesminskning begränsas sedan av den minimala bandhastigheten, vilken i sin tur begränsas och i detta fall helt bestäms av förhållandet mellan bandets inflöde och dess lastkapacitet enligt (2).

Det intressanta är inte att det i längden inte går att nivåreglera en efterliggande buffertsilo med denna typ av transportband, utan att bandhastigheten i två led bestämmer ett olinjärt samband för proportionerna mellan utflödet och inflödet. Detta eftersom bandhastigheten vid varje enskild tidpunkt både är proportionell mot nuvarande utflöde men samtidigt är omvänt proportionell mot ett framtida utflöde vilket, när bandet rört sig en bandlängd,  $l$ , i sin tur kommer vara proportionell mot ytterligare ett framtida inflöde o.s.v. Således bestäms utflödet från transportbandet,  $\Phi$ , vid en tidpunkt  $t_2$  av det olinjära sambandet i (3), där tiden  $t_2$  är lösningen på (4), givet  $t_1$ , bandhastigheten  $v(t)$  för alla tidpunkter  $t = \{t_1 \dots t_2\}$  och transportbandets längd  $l$ . Enkelt uttryckt är  $t_1$  den tidpunkt då bandets nuvarande slutpunkt, vid tiden  $t_2$ , senast befann sig vid transportbandets början.

$$\Phi(t_2) = \frac{\phi}{v(t_1)}v(t_2), \quad \phi > 0, \text{ konstant} \quad (3)$$

$$\begin{cases} \int_{t_1}^{t_2} v(t)dt = l \\ l > 0, \text{ konstant} \end{cases} \quad (4)$$

#### 4.1.2 Transportband med konstant bandhastighet

$$\begin{cases} 0 \leq \phi_{min} \leq \phi \leq \phi_{max} = v \cdot k_{last} \\ v > 0, \text{ konstant} \\ k_{last} > 0, \text{ konstant} \end{cases} \quad (5)$$

Studeras det andra extremläget beskriver dess begränsningar för bandhastighet och inflöde enligt (5) en process där inflödet endast påverkas av en dödtid och beskrivs enkelt av överföringsfunktionen från inflöde  $\phi$  till utflöde  $\Phi$  i (6).

$$G_P(s) = \frac{\Phi(s)}{\phi(s)} = e^{-sL} \quad (6)$$

Nivåreglering av en buffertsilo efter bandet blir till skillnad från det förra exemplet möjligt, men beroende på bandlängden och bandhastigheten kan dödtiden,  $L$ , bli mycket svårt att övervinna. Med långa transportband och maximala transportbandshastigheter på ca 1 m/s hamnar tidsfördröjningen i storleksordningen 100 sekunder för ett transportband med längden 100 meter. Generellt ger tum-

regeln<sup>2</sup> att dödtiden,  $L$ , multiplicerat med skärfrekvensen  $\omega_c$  ej bör överskrida 0,2, vilket med en dödtid på 100 sekunder ger en maximal skärfrekvens på 0,002. Även vid ideala förhållanden skulle reglering utan någon form av prediktor, t.ex. en Otto-Smith-regulator<sup>3</sup> vara för långsam för att hålla buffertnivån över respektive under min- och maxgränserna i en buffertsilo av allt utom extremt stora mått (i förhållande till bandets inflöde och buffertsilons uttagsflöde).

Det som är av intresse här är att, vid konstant bandhastighet, ger långa transportband långa dödtider, och långa dödtider gör att effekterna av en inflödesändring tar lång tid att fortplanta sig till slutet av bandet och efterföljande buffertsilo. Detta gäller även för ett transportband utan konstant inflöde, men för dessa är tidsfördröjningen varierbar och inte konstant.

Sammanfattningsvis har alla transportband i någon mening, beroende av gränserna för inflöde och bandhastighet, en "varierande tidsfördröjning" av inflöde till utflöde och bandets hastighet ger, förutom möjlighet att variera tidsfördröjningen, även utrymme för tillfälliga justeringar av utflödet (oberoende av inflöde) så länge det finns last på bandet.

## 4.2 Nuvarande nivåreglering

Den nuvarande nivåregleringen, se figur 6, består av en PI-regulator med framkoppling från värmepannans bränsleintag. Regulatorns styrsignal styr bandhastigheten  $v$  och inflödet  $\phi$  (den främre transportskruvens varvtal), kvoten mellan dessa hålls konstant för att hålla jämn lastnivå över hela transportbandet och, vid någorlunda ostörd drift, minimera effekterna av tidsfördröjning mellan bandets början och slut. Denna processmanipulering ger för en helt ostörd process en överföringsfunktion vilken, i teorin, är enkel att reglera. Transportskraven mellan bandet och buffertsilon förutsätts ingå i transportbandet eftersom den fungerar som en förlängning av bandet då dess varvtalshastighet är skalad för att transportera samma flöde som bandet (även om den laterala hastigheten är lägre än för bandet). Det vill säga, transportband med längd  $a$  och tillhörande utförselskruv med längd  $b$  är, teoretiskt, ekvivalent med ett transportband med längd  $c$ ,  $c > a$ .

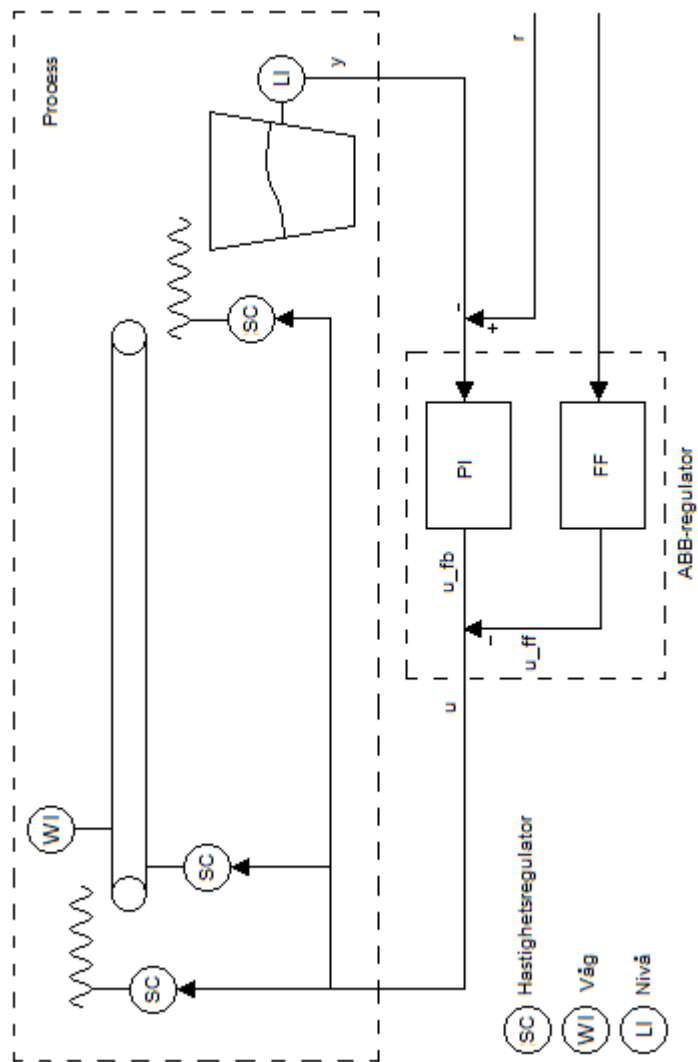
### 4.2.1 Processmanipulering för enklare reglering

Med förutsättningen att transportbandet har begränsningar enligt (1) gör kombinationen av att transportbandets hastighet är proportionell mot utflödet samt att inflödet går att styra, att det för idealfallet går att designa en kontinuerlig processmodell i vilken det, från regulatorns synvinkel, går att styra utflödet  $\Phi$  utan tidsfördröjning och utan att påverka bandlasten vid inflödet till bandet.

<sup>2</sup>se sida 56, Häggglund, T. (2006) Reglerteknik AK Föreläsningar. Institutionen för reglerteknik, Lunds tekniska högskola.

<sup>3</sup>se sid 112ff, Häggglund, T. (2006) Reglerteknik AK Föreläsningar. Institutionen för reglerteknik, Lunds tekniska högskola.





Figur 6: Blockschema över regulatorn.

Med tillägget att inflödet är styrbart kan ekvationen i (3) skrivas om enligt (7), där skillnaden ligger i att inflödet  $\phi$  nu inte längre är konstant.

$$\Phi(t_2) = \frac{\phi(t_1)}{v(t_1)} v(t_2) \quad (7)$$

Utfödet  $\Phi$  är fortfarande beroende av bandets hastighet vid två tidpunkter,  $t_1$  samt  $t_2$ , där tidsskillnaden är den tid det tagit för bandet att röra sig en bandlängd, enligt ekvation (4). Tillägget att även inflödet  $\Phi$  är tidsberoende öppnar dock upp för möjligheten att göra utfödet beroende av endast en tidpunkt.

Principen går ut på att styra inflödet  $\phi$  mot bandhastigheten  $v$  och på detta vis hålla mängden bränsle på bandet konstant vilket gör att alla ändringar i bandhastigheten ger en motsvarande ändring i utfödet från bandet till buffertsilon, utan att påverka bandlasten vid inflödet.

Ekvationen i (7) tappas nu sitt dubbla tidsberoende och det resulterande envariabla uttrycket för utfödet  $\Phi$  återfinns i (8).

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi(t_2) = \frac{\phi(t_1)}{v(t_1)} v(t_2) \\ \frac{\phi(t)}{v(t)} = C, \quad C > 0, \text{ konstant} \end{array} \right. \implies \left\{ \begin{array}{l} \Phi(t) = Cv(t) \\ C > 0, \text{ konstant} \end{array} \right. \quad (8)$$

Möjligheterna att styra på detta sätt förbättras desto större styrbart område bandhastigheten och inflödet har. Det viktiga är att förhållandet mellan inflödet och bandhastigheten hålls konstant och med förutsättningen att inflödet och bandhastigheten är större än eller lika med noll beräknas det styrbara området, mellan 0 och 1, för regulatorns utsignal,  $u$ , enligt (10) nedan. Om förhållandet  $\frac{\phi_{max}}{v_{max}}$  är större än lastkapaciteten väljs ett nytt  $\phi_{max}$  enligt (9) för att bandet inte ska bli överbelastat.

$$\phi_{max} = k_{last} \cdot v_{max} \quad (9)$$

$$u_{min} = \max\left(\frac{\phi_{min}}{\phi_{max}}, \frac{v_{min}}{v_{max}}\right), \quad u_{max} = 1 \quad (10)$$

Förhållandet  $C = \frac{\phi(t)}{v(t)}$  i (8) beräknas enligt (11) givet styrsignalen  $u$  med gränser enligt (10).

$$\left\{ \begin{array}{l} C = \frac{\phi(t)}{v(t)} = \frac{u(t) \cdot \phi_{max}}{u(t) \cdot v_{max}} = \frac{\phi_{max}}{v_{max}} \text{ kg/m} \\ [\phi] = \text{kg/s}, \quad [v] = \text{m/s} \end{array} \right. \quad (11)$$

I idealfallet, det vill säga utan någon form av störningar, blir bränslemängden på bandet konstant  $C$  enligt (11) och flödet  $\Phi$ , från transportbandet till buffertsilon, bestäms endast av bandhastigheten  $v$  och i förlängningen av regulatorns styrsignal  $u$  enligt (12).

$$\begin{cases} \Phi(t) = C \cdot v(t) = \frac{\phi(t)}{v(t)}v(t) = \phi(t) = u(t) \cdot \phi_{max} \text{ kg/s} \\ u_{min} \leq u \leq u_{max} = 1 \end{cases} \quad (12)$$

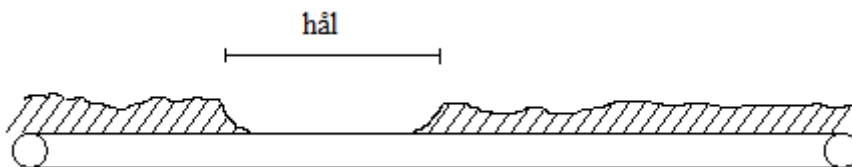
Väljs mängden bränsle på transportbandet konstant enligt ovan blir transportbandets överföringsfunktion således mycket enkel och hela processen (inklusive buffertsilo med skalningsfaktor  $K$ ) från styrsignal  $u$  till buffertnivå  $y$  återfinns i (13).

$$G_P(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{\phi_{max}}{K \cdot s} \quad (13)$$

Överföringsfunktionen i (13) är helt oberoende av transportbandslängden och genom att manipulera maximum- och minimumgränserna för bandhastigheten och inflödet, samt styra dem med samma styrsignal  $u$ , med gränser enligt (10), fungerar detta som utgångspunkt vid reglering. Principen, att hålla bandets last konstant över hela bandet och styra utflödet med bandhastigheten, fungerar utmärkt när mätsignaler för bandhastighet, inflöde till bandet och buffertnivå är tillförlitliga och utan större störningar, men i realiteten är så inte fallet.

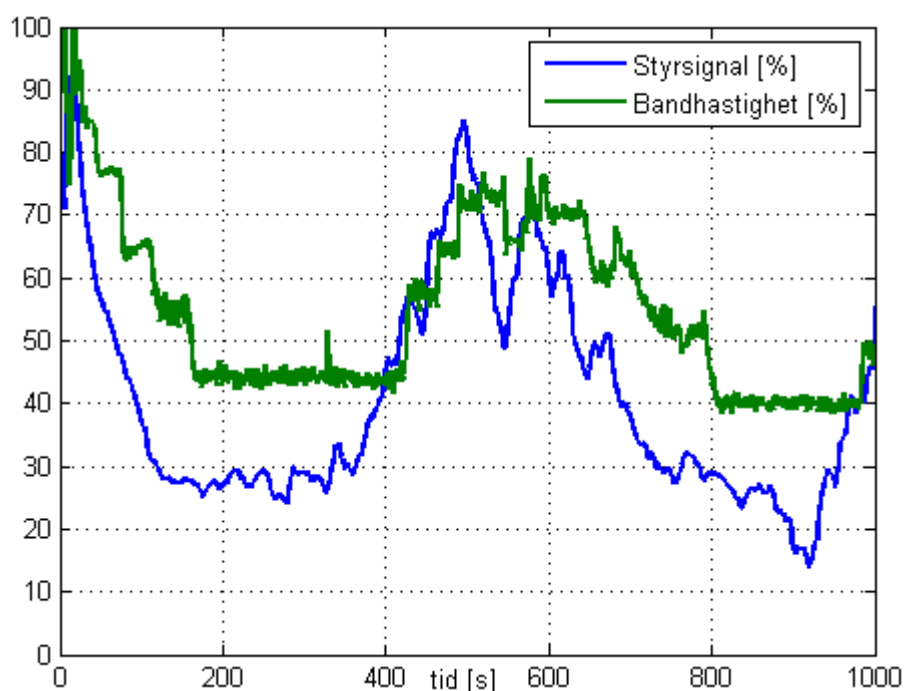
#### 4.2.2 Process- och mätstörningar

De viktigaste och mest påtagliga störningarna består först och främst av att införselskruvens varvtal inte ger någon bekräftelse av hur mycket bränsle det verkligen kommer till bandet och ett avbrott i bränsletillförseln kan ske utan att skruven upphör att rotera. Det kan t.ex. finnas större träbitar, eller ihopfrusna bitar vilka fastnar i skruven och hindrar utflödet. Ett avbrott ger upphov till ett "bränslehål" på bandet, se figur 7, vilket regulatorn inte blir medveten om förrän nivån i buffertsilon sjunker, långa hål (större än 30m) ger nästan garanterat att buffertsilon hinner tömmas.



Figur 7: Avbrott i inflöde till transportbandet ger upphov till hål, d.v.s. avsaknad av bränsle på bandet

Vidare är förhållandet mellan bandhastighet och skruvvarvtal inte verkligen konstant då hastighetsregulatorn för bandet, p.g.a. slitagerisk, givits förhållandevis långsamma parametrar (d.v.s. låg förstärkning och integralverkan). Detta har till följd att ändringar i huvudregulatorns styrsignal ger förändringar i mängden bränsle på bandet (vilket i idealfallet hålls konstant) och detta i sin tur ger olika inflöde till bufferten vid samma bandhastighet. För närvarande uppvisar även hastighetssignalen dödzoner, enligt figur 8, där styrsignalen inte ger någon förändrad hastighet. Förutom att bidra till förändringar i bandlasten, bidrar detta även till oföljsam styrning av inflödet till bufferten då regulatorns styrsignaländringar inte nödvändigtvis ger någon inverkan på bandhastigheten, vilket i sin tur styr inflödet till bufferten.



Figur 8: Bandhastighetens svar på styrsignalen uppvisar dödzoner

Den viktigaste mätsignalen är nivåmätningen i buffertsilon då det är denna signal som helt styr regleringen. Den är dels osäker eftersom bränslet inte är flytande och inte nödvändigtvis sprider sig jämt i silon, vilket förstärks av att silon är förhållandevis liten (i en större silo sprids bränslet bättre). Detta kan leda till att bränslet lägger sig högt mot ena siloväggen vilket ger en nivåmätning vilken inte motsvarar den verkliga mängden bränsle. I ogynnsamma lägen kan den uppmätta nivån vara mycket högre än den verkliga och när bränslet vilket bidrar till felmätningen rasar ner sjunker nivån mycket snabbt, något som regulatorn inte kan börja motverka förrän det sker. Då buffertsilon har två utförselskruvar gör silons geometri att inflödet hamnar direkt över den ena skruven vilket i sig ger en skev fördelning av bränslet i silon. Vidare finns det ingen praktiskt möjlighet att mäta nivån på något annat sätt, delvis eftersom processen är i drift dygnet runt, vilket gör att det inte med säkerhet går att verifiera nivåmätning-

ens felmarginaler. Detta leder i sin tur till att nivåmätningen ger ett osäkert intryck och ej lämpar sig för reglerstrategier vilka kräver noggranna mätvärden. Erfarenhet av personalen på plats har gett upphov till säkerhetsinställningarna för låg-nivåvarning när nivåmätning är under 20%, här antas buffertnivån vara nära nog tom.

## 5 Hålkompensering

Den nuvarande regleringen har en viss tendens att ge oscillationer i buffertnivån, men vid normal drift är den dock tillfredsställande, de verkliga störningarna sker när det uppstår bränslehål på bandet. Som nämnts ovan är den viktiga nivåmätningen till viss del osäker och även om den varit exakt hade detta inte hindrat att bränslehål ger avbrott i inflödet till buffertsilon, svaret från regulatören hade förvisso varit snabbare, men tack vare bränslevågen finns det möjlighet att förbättra den befintliga regleringen genom att detektera och i förtid kompensera för dessa.

### 5.0.3 Bränslevågen

Vågen kan ge en uppfattning om när det inte kommer något bränsle på bandet och eftersom det minst tar 2,5 minuter för bandet att röra sig från vågen till buffertsilon är det möjligt att förutbestämma när det inte finns något bränsle i slutet av bandet och därigenom kompensera genom att i förtid maximera regulatorns utsignal för att minimera tiden hålet avbryter tillförsel till buffertsilon.

Precis som för buffertnivåmätningen ger vågens signal intryck av att ge en delvis felaktig bild av bränslenivån, skillnaden är här att det går att okulärt undersöka bandets bränslemängd direkt efter vågen. Genom att filma bränslemängden efter vågen och synkronisera filminspelningens tid med processens datauppsamlingsstider går det att under kortare tider (för att inte införa onödiga störningar på processen) manuellt stoppa tillförseln till bandet och undersöka vågens signal i förhållande till vad det visuellt går att säga om nivån på bandet. Det visar sig att signalen är hårt filtrerad med ett mycket långsamt filter, ca 20 sekunders filtreringstid (Det visar sig dock att ett filter utanför vågens stängda system går att plocka bort och få brusigare, men snabbare signal med en filtreringstid på ca 6 sekunder), mätningen är dock konsekvent och visar samma nivå när bandet är tomt vid olika testtillfällen. Filtret innanför det stängda systemet ser ut att vara ett enkelt lågpasfilter, eller möjligen ett rullande medelvärdesfilter, men mer detaljerad information är inte nödvändig för att kunna beräkna när ett hål börjar och slutar.

Huruvida den uppmätta bränslemängden i övrigt är korrekt är svårt att säga något om, att bandet är tomt på bränsle är enkelt att se med blåtta ögat, men om det verkligen är 5 eller 7 kg/m kräver försök vilka är opraktiska för ett system i drift. En kvalificerad gissning är dock att mätmetoden i sig ger upphov

till osäkerheter beroende på hur bränslet ligger på bandet samt ger en ganska brusig signal vilket givit upphov till filtreringen.

#### 5.0.4 Strategi för hålkompensering

Genom att detektera början och slut av bränslehål med hjälp av vågen kan hålets position beräknas och när det når slutet av bandet kopplas nivåregulatorn i följningsläge och styrsignalen maximeras för att minimera tiden hålet befinner sig i slutet av bandet. Beroende på hållängden och nivåmätningen i buffertsilon kan kompensering börja tidigare än hålet för att bygga upp en buffert och på så vis återfå en buffertnivå nära den före hålet när kontrollen återlämnas till huvudregulatorn. För att underlätta för korrigeringar för andra band, delas hålkompenseringen upp i två komponenter; detektorn, vilken skickar vidare positioner för början och slut på hål till kompensatorn som med hänsyn till processparametrar beräknar när hålet når slutet av bandet och väljer tidpunkt då huvudregulatorn sätts i följningsläge. Simulering och tester av kompensatorn görs med hjälp av Matlab/Simulink och en simuleringsmodell för detta ändamål, se appendix A.

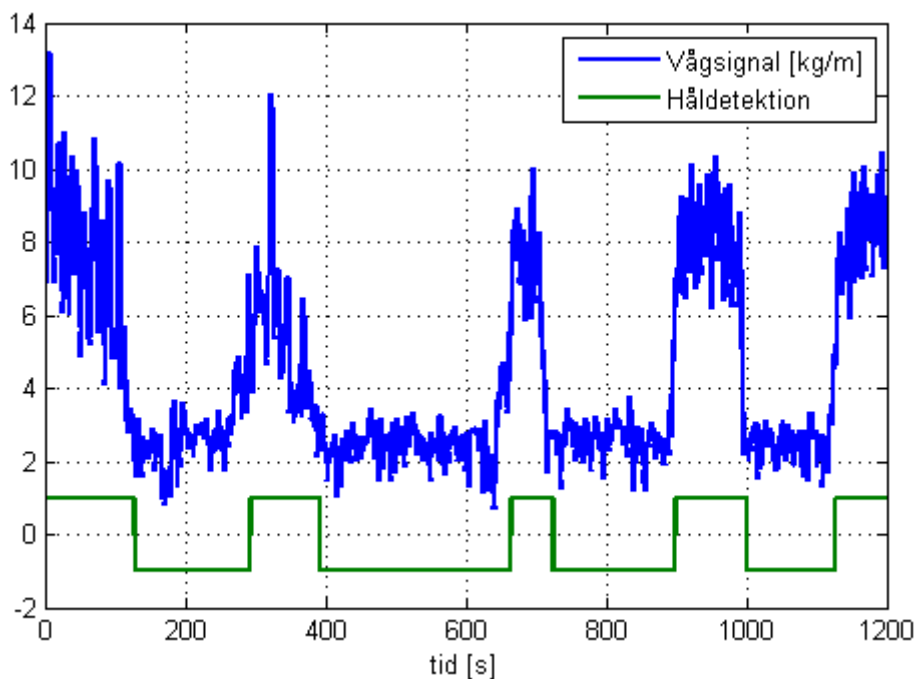
### 5.1 Håldetektorn

Detektorn kräver att vågen konsekvent visar samma nivå när bandet är tomt, flertalet tester vid olika skilda tidpunkter bekräftar att så är fallet och analys av testdata ger att 5 på varandra efterföljande mätvärden under 2 med hög säkerhet indikerar att bandet är tomt. På samma sätt ger 5 på varandra efterföljande mätvärden över 4 att bandet inte är tomt. Kravet att 5 på varandra följande mätvärden måste vara under eller över ett värde syftar till att säkerställa att detektorn inte indikerar hål, eller slut av hål i för tid. Felmarginalerna för håldetektorn är beroende av signalbrus och hur abrupt bränsleinförseln avtar och under testerna har felmarginalen varit under  $\pm 5$  sekunder vilket i värsta fall (vid maximal bandhastighet på 40 m/min) ger längdfel på  $\pm 3,3$  meter.

En vektor med data från vågen och nuvarande position på bandet håller de senaste samplingarna i minne för att kunna skicka den position hålfanken har till kompensatorn när denna detekterats, vågens filtretid på ca 6 sekunder kompenseras genom att skicka data från minnesvektorn.

Detektorn växlar mellan att känna av början av hål samt slut av hål och bandhastigheten ger det avstånd början, eller slutet av ett hål har rört sig från den första till den sista kontrollsamplen tillsammans med information om det är just början eller slutet av ett hål som detekterats. I figur 9 visas hur håldetektorn detekterar hål på data från testkörningar av vågen, den gröna linjen visar på detekterade hål när linjen är under 0. I figuren varar det längsta hålet ca 220 sekunder i vågen, vilket motsvarar en hållängd på 73 meter (bandhastigheten är här kring 20 m/min under detektoren). Detektorns konfiguration ger att de längsta hål vilka inte detekteras är ca 3,3 meter (vid maximal bandhastighet)

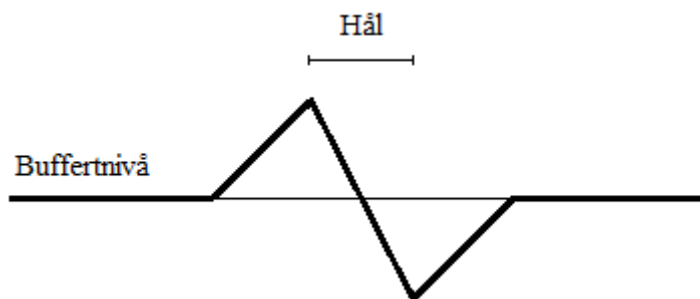
vilket är fullt godtagbart då de hål som verkligen stör processen är väsentligt längre, 10 meter och över (beroende av bandhastigheten innan hålet).



Figur 9: Detektion av hål

## 5.2 Hålkompensatorn

Grundidén är att minimera tiden hålet befinner sig i slutet av bandet och försöka återfå en nivå i bufferten vilken är nära buffertnivån innan hålet. För detta krävs att bandhastigheten maximeras innan hålet når slutet av bandet och fortsätter vara maximerad en stund efter hålet körts igenom. På så sätt kommer buffertnivån stiga före hålet, sjunka när hålet är i slutet av bandet och slutligen stiga innan regulatören återfår kontroll över styrningen, se figur 10.



Figur 10: Kompensatorns eftersökta beteende på buffertnivån

För att beräkna hur långt före ett hål kompensatorn ska maximera bandhastigheten görs två antaganden; bränslenivån på bandet är i genomsnitt konstant och om inte hålet skulle uppstått hade regulatorn bibehållit samma styrsignal under motsvarande tid hålet befinner sig i slutet av bandet. Det andra antagandet är uppenbarligen inte korrekt i många lägen, men här får säkerhetsfunktioner stoppa när kompensationen går över styr.

För att få det eftersökta buffertnivåbeteendet illustrerat i figur 10 beräknas kompensationen enligt förhållandet (14).

$$\frac{2x + a}{v_{max}} = \frac{x + a}{v} \quad (14)$$

Vänsterledet är tiden det tar bandet att röra sig den dubbla hållängden  $x$  plus ett godtyckligt avstånd  $a$  och högerledet är tiden det tar bandet att röra sig en hållängd plus  $a$  vid bandets nuvarande hastighet. Genom att lösa för  $a$  fås det avstånd,  $2x + a$ , bandet måste röra sig i maxhastighet för att röra sig lika långt som vid hastigheten  $v$  plus en hel hållängd.

$$\begin{aligned} v(2x + a) &= v_{max}(x + a) \\ &\Leftrightarrow \\ x(2v - v_{max}) &= a(v_{max} - v) \\ &\Leftrightarrow \\ a &= x \frac{2v - v_{max}}{v_{max} - v} \end{aligned}$$

Det resulterande avståndet bandet ska köras i maxhastighet utöver hålet beräknas slutligen enligt (15).

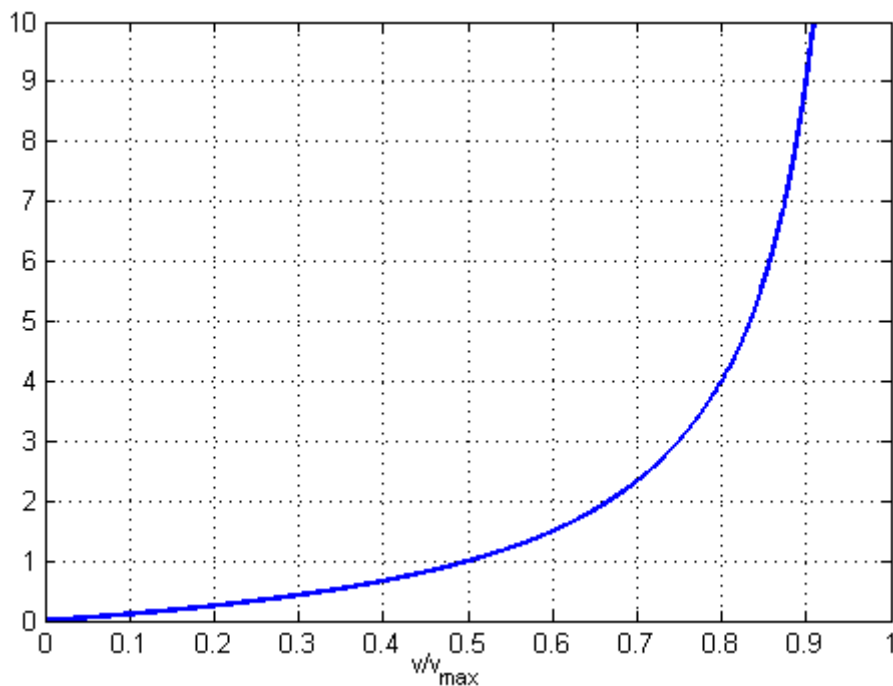
$$x + a = x + x \frac{2v - v_{max}}{v_{max} - v} = x \left( 1 + \frac{2v - v_{max}}{v_{max} - v} \right) = x \frac{v}{v_{max} - v}, \quad v < v_{max} \quad (15)$$

När bandhastigheten närmar sig den maximala går kompensationslängden mot oändligheten och bandhastigheter över halva maxhastigheten resulterar i kompensation på över en hel extra hållängd, se figur 11.

Eftersom förutsättningarna för korrekt beräkning av kompensationslängden bygger på bitvis konstant bandhastighet (d.v.s. att styrsignalen skulle varit konstant om inte hålet existerat) införs begränsning av kompenseringslängden för att begränsa kompensationen när den nuvarande bandhastigheten och hållängden överstiger förutbestämda värden. Hög bandhastighet, tillsammans med långa hål, ger högre sannolikhet att regulatorn inte alls skulle gett konstant styrsignal om hålet inte hade existerat.

Den resulterande kurvan för kompensationen har utseende enligt figur 12. Det första området är oförändrat och beräknas enligt,  $f(v) = \frac{v}{v_{max} - v}$ , punkten  $a$  er-





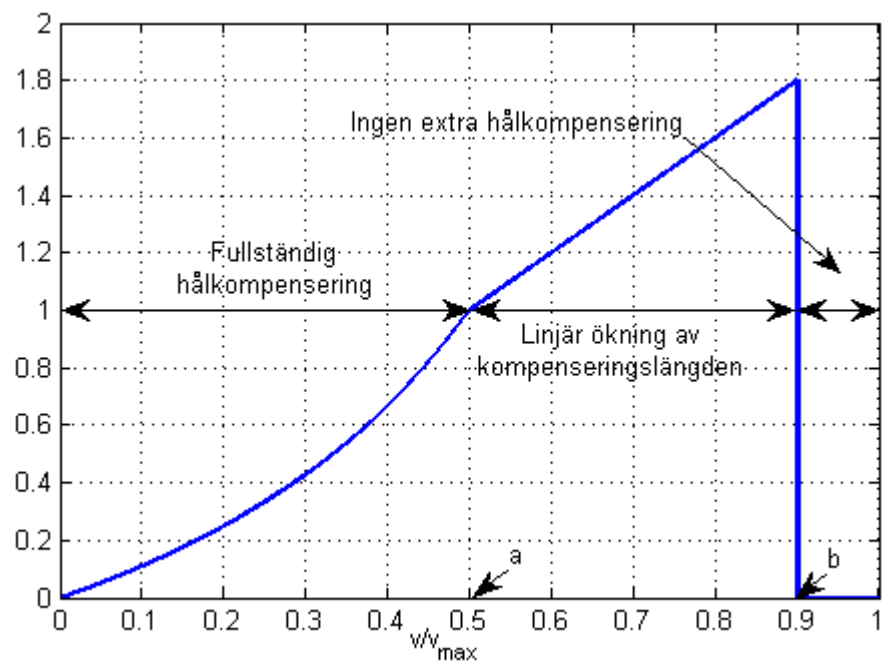
Figur 11: Extrakompensation utöver själva hålet i hållängder för olika hastigheter, t.ex. ger  $v = 0.5v_{max}$  att styrsignalen maximeras en hållängd utöver hålet

sätter den exponentiellt ökande kurvan med ett linjärt beroende,  $f(v) = \frac{v}{v_{max}-a}$ , och punkten  $b$  används för att sätta ett övre område där ingen extra kompensering används (d.v.s. endast hålet körs igenom i maxhastighet).

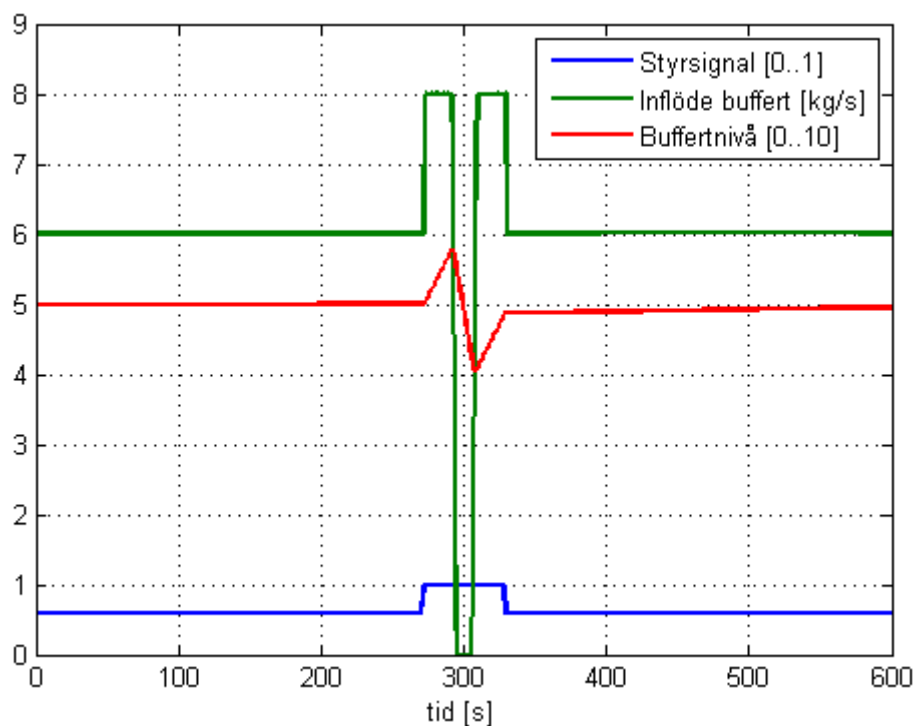
Simulering visar hur kompensatorn beräknar extrakompensation vilket gör att buffertnivån återgår mycket nära utgångsläget innan hålet, se figur 13.

I figuren går det att se utflödet från det simulerade transportbandet (en signal vilken inte finns i den verkliga processen) för att illustrera när hålet när bufferten, topparna i utflödet före och efter hålet är den extra kompensering kompensatorn ger upphov till vilket leder till att buffertnivån byggs upp extra före hålet och gör att den inte sjunker lika lågt som den skulle gjort utan kompenseringen. Kompensatorn ges också en skalningsfaktor för hur mycket extrakompenseringen ska ligga före respektive efter hålet, i ett läge då buffertnivån är mycket låg är det bättre att större delen av kompenseringen ligger före hålet och tvärt om när buffertnivån är hög, se figur 14 respektive figur 15. Hur extrakompenseringen skalas beror på buffertnivån och att bufferten inte ska fyllas när kompensering körs när buffertnivån är mycket hög, och på motsvarande sätt kan en tom buffert undvikas om extrakompenseringen helt sker före hålet vid låg buffertnivå.

Utöver begränsningarna i beräkningarna av den extra kompenseringen krävs det att kompensatorn har robusta säkerhetsfunktioner för att inte fylla buffert-



Figur 12: Kurva över hålkompenseringsberäkningen, d.v.s. kompensering utöver hålet, vid olika hastigheter. Punkterna  $a$  och  $b$ , bestämmer områdena för hur kompenseringen beräknas och väljs av användaren.

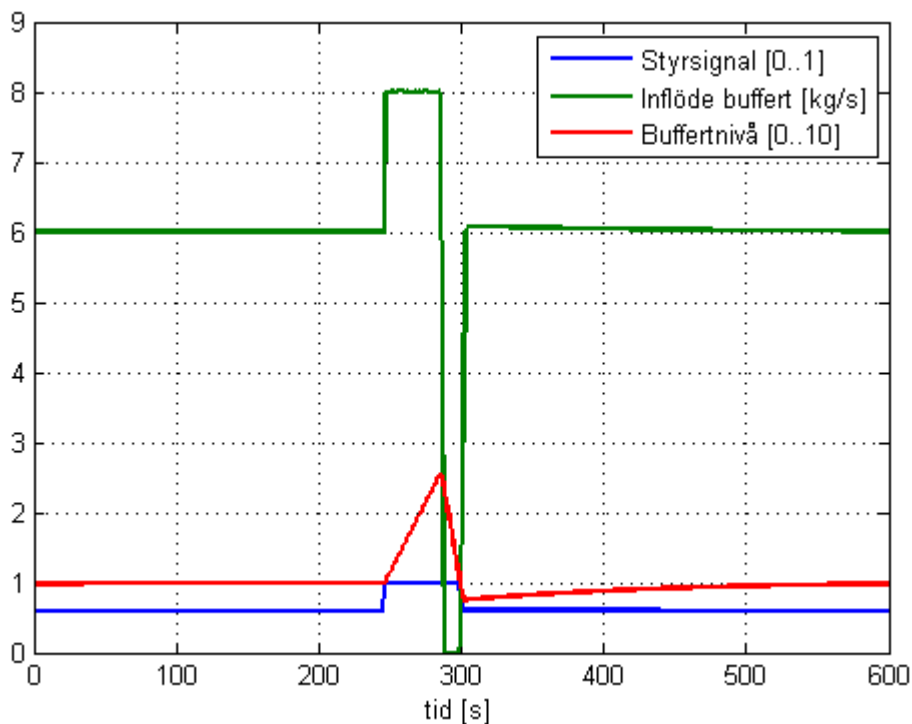


Figur 13: Simulering av hålkompensatorn

silon så att processen stoppas. En första gräns baseras på när buffertnivån är över regulatorns börvärde, detta ligger vanligtvis kring 50-60 procent av buffertnivån (ställs emellanåt om manuellt), all extra kompensation utöver själva hålet avbryts om nivån överstiger denna. En andra säkerhetsnivå för fullständig urkoppling av hålkompensationen sätts till 65% för att inte kompensationen i värsta fall ska tvinga upp buffertsilonnivån över reglersystemets mjukvaruspärrar (vilka stoppar processen och alla processer uppströms fram tills buffertnivån sjunkit tillräckligt).

### 5.3 Sammansatt funktion

För tester på processen har även en hastighetsbegränsning (rate limiter) av kompensatorns signal implementerats för att styrsignaländringarna inte ska bli för abrupta för processen. En schematisk skiss över de viktigaste signalerna vilka skickas mellan processen, regulatorn och hålkompenseringen återfinns i figur 16. Kompensatorn med tillhörande detektor arbetar med regulatorn enligt följande.



Figur 14: Simulering av hålkompensatorn (låg buffertnivå)

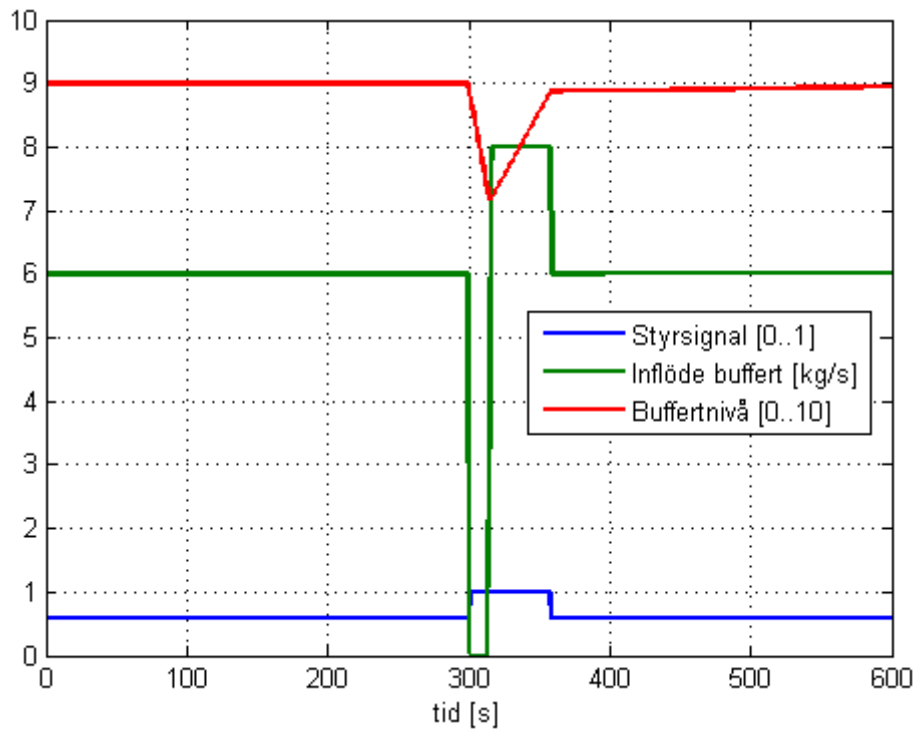
### 5.3.1 Normal drift (inga hål i slutet av bandet)

Regulatorn styr transportband och skruvar under normal drift, till skillnad från tidigare (reglering utan hålkompensator d.v.s.) skickas dock styrsignalen via hålkompensatorn vilken skickar vidare styrsignalen oförändrat i detta läge. Håldetektorn analyserar data från transportbandsvägen och söker efter början och slut på hål, detekteras något av detta skickas hålflekspositionen vidare till kompensatorn, vilken sparar positionen och håller den uppdaterad med hjälp av bandhastighetsdata. Vidare beräknas extrakompensation utöver hålet, både före och efter hålet, beroende på bandhastighet och buffertnivå.

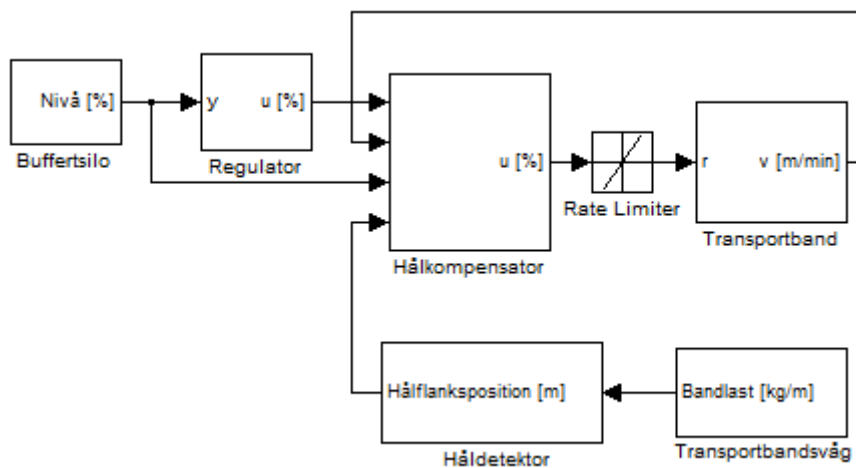
### 5.3.2 Hål närvarande i slutet av bandet

När positionen för kompenseringen före hålet når slutet av transportbandet kopplas regulatorn i följningsläge och hålkompensatorn maximerar styrsignalen. Beroende på buffertnivån finns tre möjliga händelseförlopp.

1. *Buffertnivån ligger under regulatorns börvärde (vilket ligger till grund för kompensatorns första säkerhetsnivå) under hela hålet samt för- och efterkompensering.* Kompensatorn kommer här att hålla styrsignalen maxime-



Figur 15: Simulering av hålkompensatorn (hög buffertnivå)



Figur 16: Skiss över kopplingarna mellan processdelarna, regulator och hålkompensator

rad tills positionen för slutet på kompenseringen efter hålet nått slutet av bandet, därefter sätts styrsignalen till regulatorns senaste värde (innan kompensatorn kopplades in) och regulatorn återfår kontrollen över regleringen.

2. *Buffertnivån överstiger första säkerhetsnivån under pågående kompensering.* I detta läge återställer kompensatorn styrsignalen till regulatorns senaste värde före urkoppling när det är för- eller efterkompensering vilket är i slutet av bandet. Sjunker buffertnivån under säkerhetsnivån kopplas regulatorn åter ur och styrsignalen maximeras. Skulle säkerhetsnivån överskridas när själva hålet befinner sig i slutet av bandet vidtas ingen åtgärd eftersom ett korrekt detekterat hål här, i alla fall i teorin, omöjligt kan bidra till en ökning av buffertnivån och således beror eventuella ändringarna på något annat, t.ex. hur bränslet ligger i buffertsilon.
3. *Buffertnivån överstiger den andra säkerhetsnivån under pågående kompensering.* Kompensatorn agerar som när buffertnivån överstiger den första säkerhetsnivån, med den skillnaden att kompenseringen stoppas även om själva hålet befinner sig i slutet av bandet. Denna säkerhetsnivå har till uppgift att se till att kompensatorn aldrig är direkt ansvarig för att styrsystemets säkerhetsfunktioner stoppar processen, detta kräver dock att säkerhetsnivån sätts med tillräcklig marginal.

Efter vart och ett av dessa scenarier återgår systemet till normal drift i väntan på att nästa hål och/eller positionen för dess förkompensering når slutet av bandet. Detta tillvägagångssätt är generellt oavsett om hålen är korta eller om detektorn ens har detekterat slutet av hålet när dess början nått slutet av bandet. Skillnaden är att ett jättehål (över 100 meter, d.v.s. om hela bandet är tomt) inte kommer resultera i någon beräkning av för- och efterkompensering eftersom det här garanterat kommer bli helt tomt i buffertsilon även om den skulle vara nära full när hålet når slutet av bandet (med undantag för om uttaget från buffertsilon av någon anledning skulle minska drastiskt).

## 5.4 Implementering

Tillsammans med transportbandsmodellen för simulering har detektorn och kompensatorn implementerats först i Matlab/Simulink för att ha möjlighet att testa och felsöka kod utan att behöva tillgång till styrsystemen på plats i bruket. Därefter har matlab-koden översatts till structured text enligt manualen för ABB:s 800xA-system. När ändringar sedan gjorts har översättning mellan antingen Matlab till structured text eller tvärt om gjorts beroende på var ändringarna gjorts, men med undantag för systemspecifika skillnader i hur programmen hanterar bl.a. beständiga variabler (persistent variables) är huvuddelen av koden, förutom notation och variabeldeklaration, densamma.

## 5.5 Tester

Figur 17 visar data för processens beteende med hålkompenseringen aktiverad för ett hål på 22 meter, kurvorna visar buffertnivå, transportbandets hastighet, styrsignalen till bandet respektive håлиндikatorsignalen. Alla signaler är skalade mellan 0 och 100%.

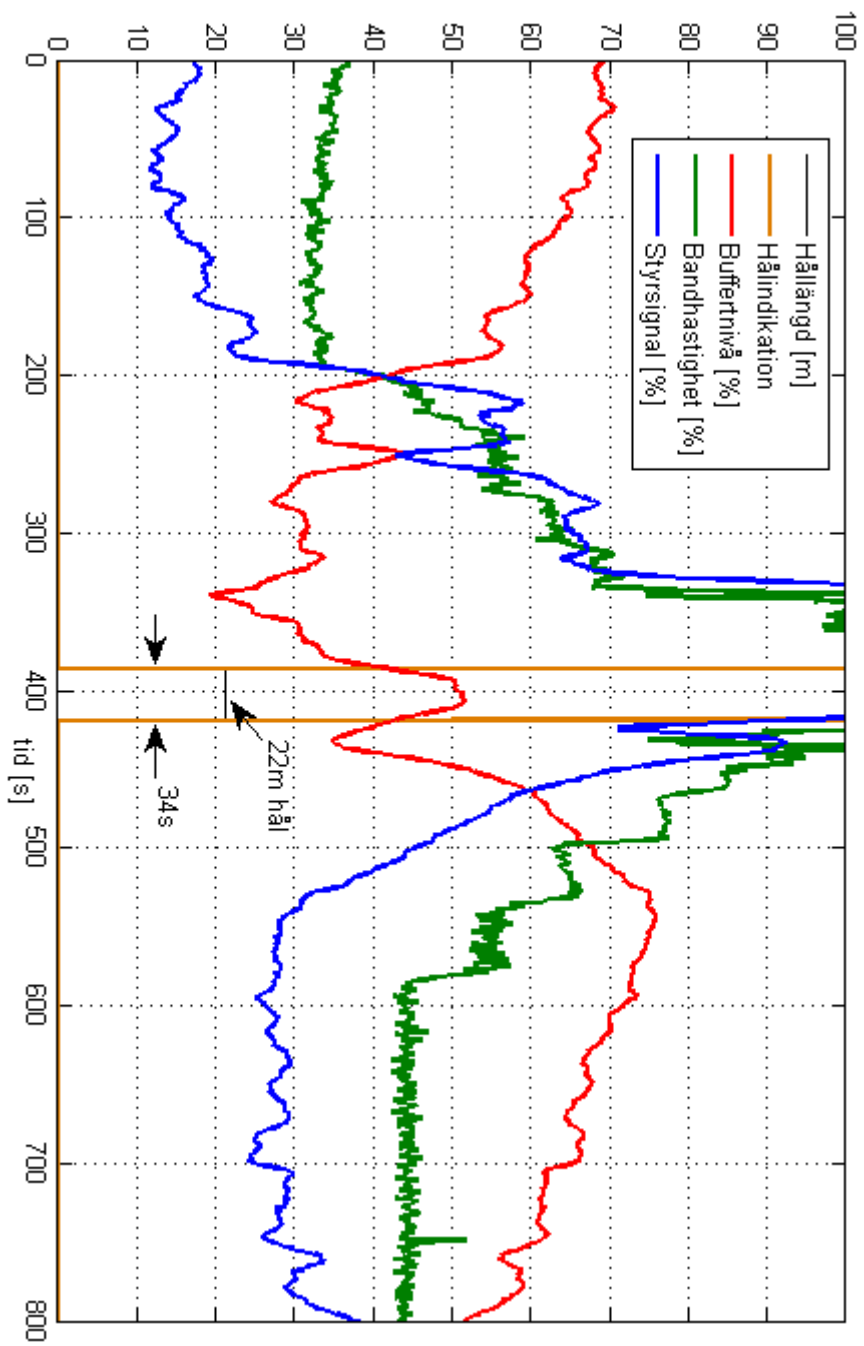
Det syns tydligt att kompensatorn maximerar styrsignalen för att ge förkompensering innan hålet når slutet av bandet samt låter huvudregulatorn återfå kontrollen precis efter hålet körts igenom. Vidare går det att observera hur transportbandets hastighet, när regulatorn har kontrollen, uppvisar dödzonsbeteende och följer styrsignalen dåligt. Den någorlunda snabba följningen när kompensatorn maximerar styrsignalen beror på att parametrarna för hastighetsregulatorn tillfälligt, under kompenseringen sätts mycket mer aggressiva, vilket tillåts eftersom kompenseringen inte kontinuerligt bidrar till förslitning av bandets framdrivningsmekanism. Buffertnivån ser ut att fyllas upp före hålet i samband med förkompenseringen och förutom buffertnivåns utseende i förhållande till håлиндikeringen påminner den om simuleringsresultaten i figur 11.

Svårigheter att repetera omständigheterna för ett försök gör att det är lättare att analysera hur kompensatorn förbättrar regleringen genom att undersöka hålens effekt på ett system med kompenseringen urkopplad och utifrån detta applicera kompensatorns determinanta beteende (givet korrekt detekterat hål).

I försöket i figur 18 är kompensatorn urkopplad och signalen vilken indikerar att hålet är i slutet av bandet ser ut att innesluta den fallande buffertnivån med god precision. Buffertnivån hinner falla under 20%-strecket vilket är nära gränsen för att i värsta fall strypa flödet till pannan. Vidare är det även tydligt att bandhastigheten inte med någon tillstymmelse till precision följer styrsignalen och den resulterande bandhastigheten under hela hålet är lägre än 20 m/min vilket resulterar i att hålet befinner sig över bufferten i 52 sekunder, med maximerad bandhastighet skulle motsvarande tid bli 27 sekunder.

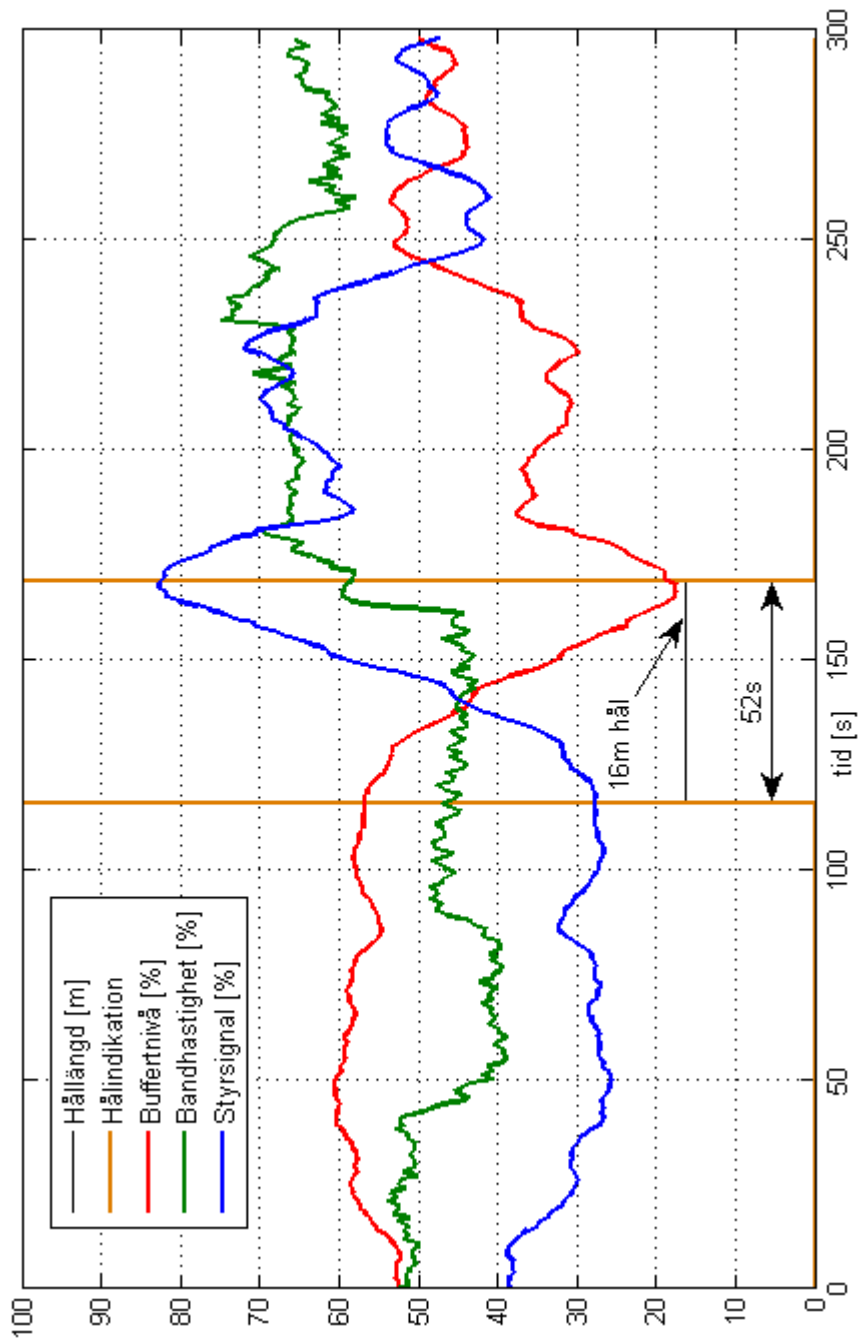
Utän kompenseringen inkopplad under försöket i figur 19 visar buffertnivåsignalen på ett märkligt beteende och ökar 10 procentenheter när detta inte borde vara möjligt. Det visar sig att transportskruven mellan transportbandet och buffertsilon fungerar som en liten extrabuffert och att det kommer lite bränsle även när flödet från bandet är noll, förmodligen har bränsle lagt sig mot sidan av buffertsilons vägg vilket lurar nivåmätningen. Vidare visar denna puckel på hur regulatorn kan göra fel när det är uppenbart att styrsignalen borde fortsätta sin ökning. Trots styrsignalen har bandhastigheten fortsatt öka i nästa samma takt och med kompensatorn inkopplad skulle hålet i sig inte körts igenom väsentligt mycket snabbare, däremot är det rimligt att anta att förkompenseringen skulle hjälpt buffertnivån att inte sjunka så lågt som 9% (vilket indikerar att utflödet från bufferten förmodligen påverkats, om inte helt avtagit).

Gemensamt för alla tester, samt vid normal drift, är att bandhastigheten inte följer styrsignalen med god precision. Grundprincipen för regulatorstrategin bygger på ett konstant förhållande mellan bandhastighet och inflöde (enligt av-

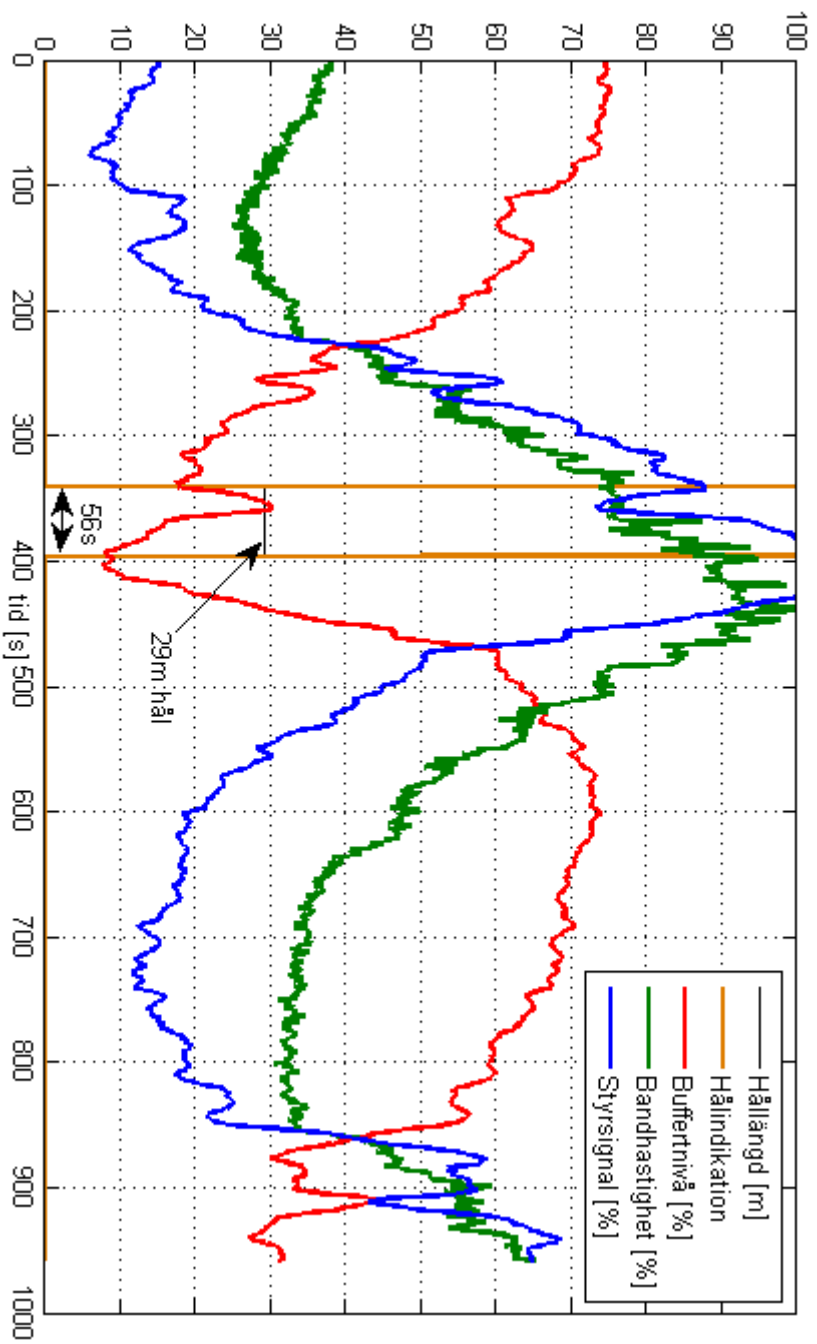


Figur 17: Processbeteende vid hål med hållkompensatorn inkopplad.



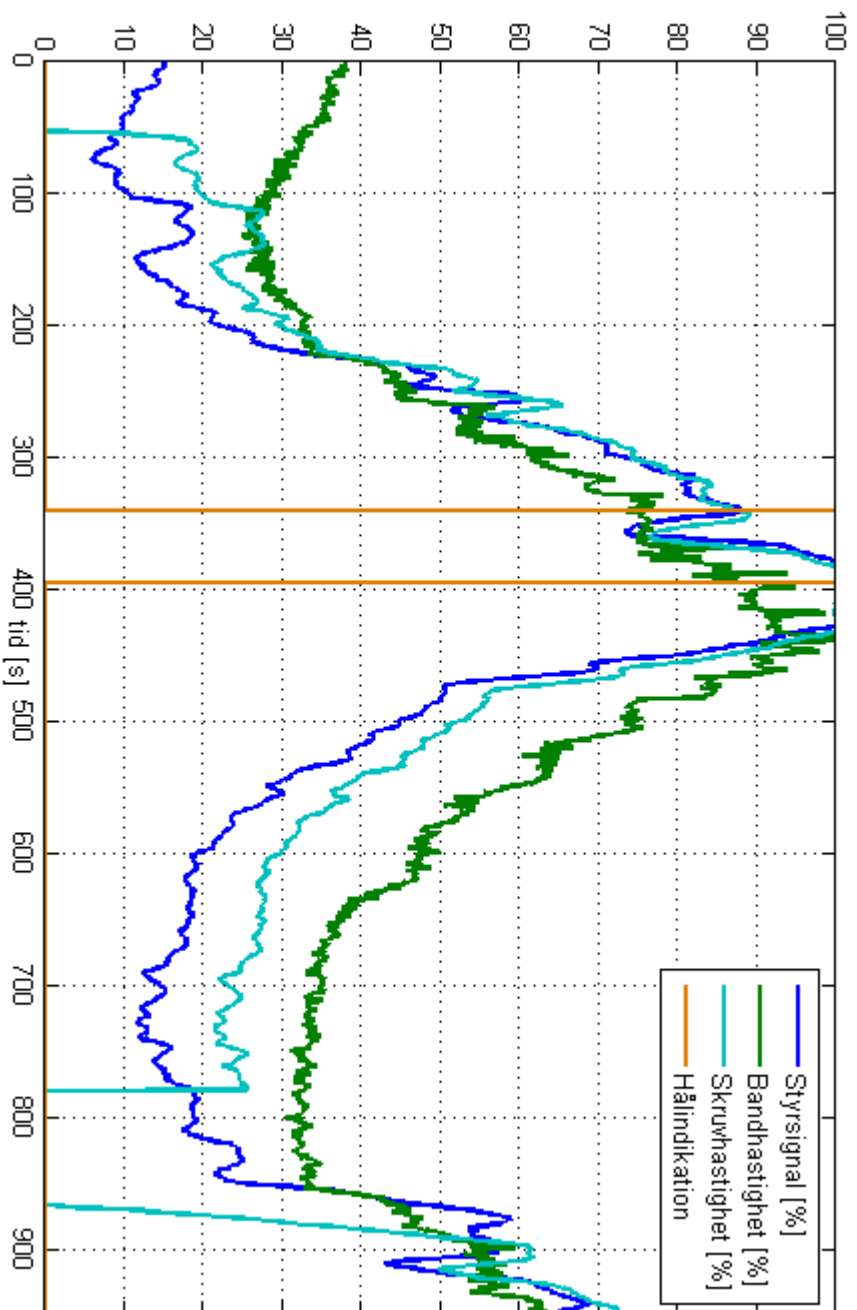


Figur 18: Processbeteende vid hål med hållkompensatorn urkopplad.



Figur 19: Processbeteende vid hål med hållkompensatorn urkopplad.

snitt 4.2 på sida 12) vilket delvis är omöjligt för processen eftersom inflödet inte är helt konstant för ett visst varvtal på inflödesskruven. Vidare görs en jämförelse mellan inflödesskruvens hastighet och bandhastigheten för tidsintervallet i figur 19, denna återfinns i figur 20. Inflödesskruvens hastighet (ljusblå) följer styrsignalen ganska väl, med bättre precision när bandhastigheten närmar sig den maximala (förmodligen p.g.a. lägre friktion mot bränslet den transporterar). Hur som helst följer skruvhastigheten styrsignalen mycket bättre än vad bandhastigheten gör och det resulterar i att kvoten dem emellan, vilken i idealfallet hålls konstant, varierar och kan i värsta fall göra att inflödet till buffertsilon varierar kraftigt och bidrar till oscillationer i buffernivån.



Figur 20: Jämförelse av styrsignalföljning för band- och skruvhastigheten. Där skruvhastigheten är noll har den stoppats manuellt för att inducera de håll vilka används under testerna

## 6 Diskussion och slutsats

Vad gäller den befintliga PI-regulatorn ger teroin för regulatornstrategin att det kan vara en god idé att byta inflödesskruvens referenssignal från huvudregulatorns styrsignal till bandhastighetsmätningen (med denna skalad i procent av den maximala hastigheten). Detta borde ge en mer jämn bränslenivå över hela bandet, men det är möjligt att variationerna i hur mycket som kommer från inflödesskruven är så stora att detta inte ger någon positiv effekt för nivåregleringen.

Övriga möjligheter att förbättra nivåregleringen för det aktuella transportbandet och dess buffertsilo är helt beroende av kvaliteten på silons nivåmätning samt vågens noggrannhet. Osäkerheten kring dessa signaler krymper mängden möjligheter att angripa problemet vilket har gett upphov till att alla planer på mer reglerteoretiskt "avancerade" lösningar varit tvungna att avfärdas. Detta har i sin tur resulterat i en förbättring som är okänslig för säkerheten kring buffertnivåmätningen och vågsignalen när bandet inte är tomt. Baksidan är att kompensatorn inte är en generell reglerlösning utan ett hjälpmedel vilket höjer prestandan hos den befintliga regulatorn i väldigt specifika fall. Enligt utsago från personalen vid bruket uppstår de hål kompensatorn är designad att kompensera framför allt under vintertid (vått bränsle fryser ihop och kan således fastna i transportskruvarna).

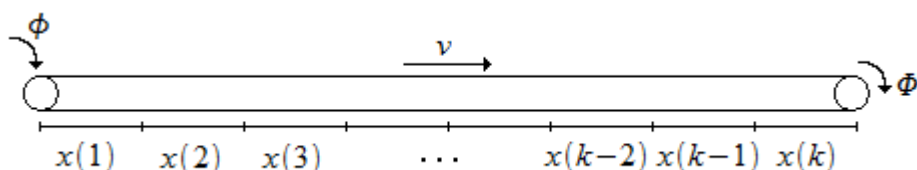
Förutsatt att värden för säkerhetsfunktionerna, i form av urkoppling av kompensatorn när buffertnivån är för hög, väljs med omsorg är kompensatorn robust och dess design gör det förhållandevis enkelt att överföra på andra liknande transportband, förutsatt möjlighet att detektera när bandet är tomt, som här i form av en våg, men ett alternativ kan vara en krets med datorseende.

Eventuell vidareutveckling av konceptet kan omfatta genomgående analys av transportvågens noggrannhet. Visar den sig, mot förmodan, överrenstämma väl med verkligheten kan den t.ex. användas för att mata simuleringsmodellen med inflödesdata och få ytterliggare insignal i form av det simulerade utflödet från bandet. Vidare har ett mycket långt band, över 300 meter, vilket för bränsle till värmepanna 2 i bruket en styrning som i dagsläget medvetet inför hål på bandet. Detta beror på att bandet absolut inte får stoppas, då det är för tungt för att enkelt startas igen, och för att buffertsilon med säkerhet inte ska fyllas trots att bandet körs i minimal hastighet. Genom att använda detektorn och ändra logiken för hur och när kompensatorn kompenserar för hål kan den här på ett mer kontrollerat sätt låta hålen minska nivån i bufferten.

Med bakgrund i praktiskt erfarenhet av processer där mätsignalerna i sig inte varit huvudproblemen blir kontentan att en robust och kanske till viss del simpel lösning ibland är den enda möjligheten.

## A Simuleringsmodell

Transportbandsmodellens insignaler är inflödet  $\phi$  samt bandhastigheten  $v$ , utsignalen är flödet  $\Phi$  och designkonstanter är bandets längd  $l$  och antalet element,  $k$ , bandet delas upp i, se figur 21. Elementlängden  $l_e$  beror på antalet element och bestämmer (tillsammans med samplingsfrekvensen  $h$ ) upplösningen för bandlasten, kortare elementlängd ger noggrannare fördelning av lasten. Givet att bandet har en lägsta drifhastighet större än noll ges det maximala antalet meningsfulla element enligt (16).



Figur 21: Schematisk modellbeskrivning

$$\max(k) = \text{ceil} \left( \frac{l}{\min(v) \cdot h} \right) \quad (16)$$

Varje element i vektorn  $x$  innehåller den last vilken för närvarande befinner sig på motsvarande del på bandet. Vektorns uppdateras varje gång (sedan modellen startats) bandet har rört sig en elementlängd och för varje iteration uppdateras mängden i  $x(1)$  samt  $x(k)$  och utflödet  $\Phi$  beräknas. Av hänsyn till att bandet inte rör sig en exakt elementlängd på ett heltal multiplar av samlingstiden måste även resthantering för bandets rörelse, mängden bränsle i första elementet samt bränsleutflödet användas. Hantering av bandhastigheter för vilka bandet rör sig mer än en elementlängd på en sampel hanteras genom att fördela inflödet jämt över det  $n$  element (avrundat nedåt till närmaste heltal) bandet rört sig under senaste sampeln och resten läggs i element  $x(1)$  nästa sampel.

Upplösningen på utflödet från bandet bestäms av samplingstiden och antalet element vilka delar upp bandet. För att möjliggöra att använda diskret embedded matlab-kod med bestämd sampeltid används insignalen  $t$ , vilken är simulerings-tiden från en digital klocka i Simulink. Detta säkerställer att programkoden som hanterar tillstånd och utflödesberäkningar endast körs en gång per sampel.

## A.1 Källkod

```
1 function [Output,belt,scale] = conveyorModel( Input, CvrBeltVel, ...
2     t,...
3     conveyorSettings)
4 %#eml
5 persistent StateArray last_t CvrBeltMov StateTotalCargo...
6     StateCargoOutput CurrentElementLength LastOutput ...
7     ElementLength...
8     CvrMaxVel initialConveyorState NOE Ts;
9
10 % Initiation of persisten variables
11 if isempty(last_t)
12     % conveyorSettings = ...
13     % [elementLength cMaxVelocity initialConveyorState];
14     % For easy configuration of the model
15     ElementLength = conveyorSettings(1);
16     CvrMaxVel = conveyorSettings(2);
17     initialConveyorState = conveyorSettings(3:end);
18     StateArray = initialConveyorState;
19     last_t = 0;
20     CvrBeltMov = 0;
21     NOE = length(StateArray); % Number of states/elements
22     StateTotalCargo = 0;
23     StateCargoOutput = 0;
24     CurrentElementLength = ElementLength;
25     LastOutput = 0;
26     Ts = 1; % Sample time
27 end
28
29 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% embedded matlab specific code
30 if(t-last_t>0) % True only if the digital clock, input t, ...
31     has changed
32     % since the last run (to make sure the code ...
33     % only runs
34     % once every sample).
35 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% end of embedded matlab specific code
36
37 StateCargoThisSample = Input*Ts;
38     % Input to state x(1) during this sample.
39     % [input flow*s] = [input unit/s*s] = [input unit]
40 StateTotalCargo = StateTotalCargo + StateCargoThisSample;
41     % Total input to state x(1) since last state update.
42     % [input unit]
43 CvrBeltMovThisSample = CvrBeltVel*Ts*CvrMaxVel;
44     % Movement of the conveyor belt during this sample.
45     % [unit of length]
46 CvrBeltMov = CvrBeltMov + CvrBeltMovThisSample;
47     % Total movement of the conveyor belt since last state
48     % update.
49     % [unit of length]
50
51 % State update
52 if (CvrBeltMov >= ElementLength);
53     % True only if the total conveyor belt movement since
54     % last state update is larger than the element length.
55
56     j = floor(CvrBeltMov/ElementLength);
57     % Integer larger or equal to 1, with the purpose of
58     % checking if the conveyor states should be updated
```

```

56         % more than once this sample.
57     CvrBeltMovRest = CvrBeltMov-j*ElementLength;
58         % How much more than j full element lengths the
59         % conveyor belt has moved.
60         % [unit of length]
61     OutputCargoRest = ...
        CvrBeltMovRest/ElementLength*StateArray(NOE-j);
62         % Fraction of cargo in element x(NOE-j) that also should
63         % be part of the output signal (as a result of
64         % "overshooting" the element length).
65     StateArray(NOE) = ...
        StateArray(NOE)+OutputCargoRest-StateCargoOutput;
66         % Update of how much cargo there is in the last element
67         % x(NOE), StateCargoOutput is the amount that has been
68         % leaving the conveyor belt since the last state update.
69     Output = sum(StateArray(NOE-j+1:NOE));
70         % Sum of the cargo in the last j elements that will
71         % be in the output this sample.
72         % [input unit]
73     StateArray(NOE-j) = StateArray(NOE-j) - OutputCargoRest;
74         % Removal of cargo in the last element that is not
75         % being part of the output this sample.
76
77     % Updating of all conveyor states/elements, i.e. moving the
78     % contents of the states/elements forward j steps.
79     StateArray(j+1:NOE) = StateArray(1:NOE-j);
80     %   for l=1:j      % Structured text equivalent of line above
81     %   for k=1:NOE-1
82     %       StateArray(NOE-(k-1))=StateArray(NOE-k);
83     %   end
84     % end
85     InputCargoRest = StateCargoThisSample*CvrBeltMovRest...
86         /CvrBeltMovThisSample;
87         % Fraction of cargo entering the conveyor belt this
88         % sample that should be added to state x(1) the next
89         % state update.
90
91     if(j>1) % Different rest management for j=1 and j>1, i.e. if
92         % CvrBeltMovThisSample>=ElementLength
93         StateX1Cargo = ...
            (ElementLength-CvrBeltMov+CvrBeltMovThisSample)...
94         /CvrBeltMovThisSample*StateCargoThisSample;
95         % Fraction of cargo entering the conveyor belt this
96         % sample that should be added to state x(j).
97         StateArray(j) = ...
            StateTotalCargo-StateCargoThisSample+StateX1Cargo;
98         % Cargo in element x(j).
99         StateArray(1:j-1) = (StateCargoThisSample-...
100             InputCargoRest-StateX1Cargo)/(j-1);
101         % Cargo in elements x(1) to x(j-1).
102     %   for l=1:j-1  % Structured text equivalent of line above
103     %   StateArray(l)=(StateCargoThisSample-InputCargoRest...
104     %   -StateX1Cargo)/(j-1);
105     %   % Cargo in elements x(1) to x(j-1).
106     % end
107     else
108         StateArray(j) = StateTotalCargo - InputCargoRest;
109         % Cargo in element x(j), i.e. x(1), if
110         % CvrBeltMovThisSample < ElementLength.
111     end
112
113     StateTotalCargo = InputCargoRest;

```



```

114         % Cargo rest that should be added to state x(1) the
115         % next state update.
116     CvrBeltMov = CvrBeltMovRest;
117         % Movement exceeding j full element lengths, i.e. how
118         % far the new state x(1) have already moved.
119     CurrentElementLength = ElementLength - CvrBeltMovRest;
120         % Length of element x(NOE) that still contains cargo.
121     StateCargoOutput = 0;
122         % Reset of the amount of cargo that has left the
123         % conveyor belt since the last state update.
124
125     else % Output when the conveyor states are not updating.
126         Output = ...
127             CvrBeltMovThisSample/CurrentElementLength*StateArray(NOE);
128             % Amount of cargo from the state x(NOE) leaving the
129             % conveyor belt this sample.
130         StateCargoOutput = StateCargoOutput + Output;
131         % Total amount of cargo that has been removed from the
132         % state x(NOE) since the last state update.
133     end
134
135     Output = Output/Ts; % (t-last_t);
136     % Making the output into a flow, i.e.
137     % [input unit per time unit] = [unit flow]
138
139     %%%%%%%%%%%%%%% embedded matlab specific code
140     LastOutput = Output;
141     % Saving last Output for the purpose of sending a ...
142     % "correct"
143     % output signal if the code is run in between samples.
144     else
145         Output = LastOutput;
146         % Output last Output if the code is run in between ...
147         % samples.
148     end
149
150     last_t = t;
151     % Time of the last time the code was run.
152     belt = StateArray; % Optional output
153     % Output of the state vector.
154     scale = StateArray(3)/ElementLength; % Optional output
155     % Output of simulated scale, [input unit per length unit]
156
157     %%%%%%%%%%%%%%% end of embedded matlab specific code
158 end

```