

# Styrning av laborationsprocess för flexibel tillverkning

Examensarbete



---

**Dan Andersson**  
**Pontos Philipp**

Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation, IEA  
Lunds Tekniska Högskola, LTH

Styrning av laborationsprocess  
för flexibel tillverkning

Examensarbete, civilingenjör

*Arbetet utfört av:*

Dan Andersson

Pontos Philipp

Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation, IEA  
Lunds Tekniska Högskola, LTH

Mars 2005

# Tack

Vi skulle vilja tacka följande personer för deras hjälp med vårt examensarbete:

- Gustaf Olsson, handledare  
Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation, IEA  
Lunds Tekniska Högskola, LTH
- Gunnar Lindstedt, hjälp med PLC-moduler och kommunikationen däremellan  
Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation, IEA  
Lunds Tekniska Högskola, LTH
- Getachew Darge, allmän teknisk hjälp  
Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation, IEA  
Lunds Tekniska Högskola, LTH
- Deltagarna i projektet ”Legofabriken, Projektkurs i Industriell Automation” [1], hjälp med ombyggnad av LEGO-fabriken  
Institutionen för Industriell Elektroteknik och Automation, IEA  
Lunds Tekniska Högskola, LTH

# Förkortningar

Under examensarbetets gång har ett flertal förkortningar dykt upp. Både facktermer och egna förkortningar förekommer. Dessa förkortningar listas nedan och används i rapporten.

|     |                               |
|-----|-------------------------------|
| PLC | Programmable Logic Controller |
| SFC | Sequential Function Chart     |
| ST  | Structured Text               |

|     |                 |
|-----|-----------------|
| Sch | Schemaläggare   |
| Trp | Transportsystem |

|     |                        |
|-----|------------------------|
| In  | Inbuffert              |
| Drl | Borr                   |
| Wel | Svets                  |
| Grd | Slip                   |
| Out | Utbuffert              |
| B1  | Vagnens buffertplats 1 |
| B2  | Vagnens buffertplats 2 |

|      |                 |
|------|-----------------|
| cc   | centrum-centrum |
| t.e. | tidsenheter     |
| l.e. | längdenheter    |

# Innehållsförteckning

|     |   |    |
|-----|---|----|
| 1   | Introduktion  | 6  |
| 1.1 | Bakgrund  | 6  |
| 1.2 | Målsättning   | 7  |
| 1.3 | Begränsningar                                       | 7  |
| 1.4 | Översikt över examensarbetet                        | 8  |
| 2   | Vagnanvändning – teoretisk modell                   | 9  |
| 2.1 | Tillvägagångssätt för analysen                      | 9  |
| 2.2 | En typ av jobb                                      | 10 |
| 2.3 | Två typer av jobb                                   | 11 |
| 2.4 | Rekommendationer                                    | 13 |
| 3   | Analys av vagnens stopposition                      | 13 |
| 3.1 | Bakgrund  | 13 |
| 3.2 | Utförande   | 13 |
| 3.3 | Mätvärden och beräkningar                           | 14 |
| 3.4 | Definitioner  | 14 |
| 3.5 | Förklaring till felaktig stopposition               | 25 |
| 3.6 | Sammanfattning av vagnens egenskaper                | 26 |
| 4   | Schemaläggning                                      | 27 |
| 4.1 | Bakgrund  | 27 |
| 4.2 | Vektor  | 27 |
| 4.3 | Jobbkontroll  | 28 |
| 4.4 | Implementering                                      | 29 |
| 5   | Slutsats  | 31 |
| 6   | Utvecklingspotential                                | 33 |
| 7   | Referenser  | 34 |
|     | Appendix A  | 35 |
|     | A.1 Förklaring                                      | 35 |
|     | A.2 Ett jobb, en buffertplats                       | 37 |
|     | Appendix B  | 38 |
|     | B.1 Förklaring                                      | 38 |
|     | B.2 Ett jobb, två buffertplatser                    | 40 |
|     | Appendix C  | 42 |
|     | C.1 Förklaring                                      | 42 |
|     | C.2 Två jobb, en buffertplats                       | 44 |
|     | Appendix D  | 45 |
|     | D.1 Förklaring                                      | 45 |
|     | D.2 Två jobb, två buffertplatser, ej specifik plats | 47 |
|     | Appendix E  | 49 |
|     | E.1 Förklaring                                      | 49 |
|     | E.2 Två jobb, två buffertplatser, specifik plats    | 51 |
|     | Appendix F  | 53 |
|     | analys.m  | 53 |
|     | Appendix G  | 55 |
|     | Beskrivning av villkor för val av sekvens           | 55 |

# 1 Introduktion

I följande kapitel kommer det att redogöras för bakgrunden och målsättningen med examensarbetet ”Styrning av laborationsprocess för flexibel tillverkning”. Även begränsningar och en översikt av arbetet kommer att presenteras.

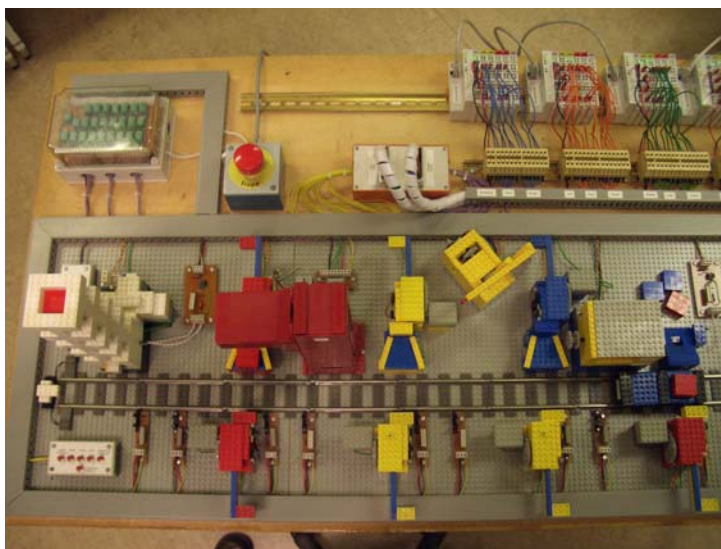
## 1.1 Bakgrund

Syftet med detta examensarbete har varit att vidareutveckla laborationsprocessen LEGO-fabriken ett steg längre än vad som gjordes i projektkursen ”Projekt i Industriell Elektroteknik och Automation 2004”. För att bättre förstå laborationsprocessen rekommenderas följande rapport ”Legofabriken, Projektkurs i Industriell Automation” [1].

För att få en djupare insikt i laborationsprocessen och inte vara helt nollställda inför examensarbetet, deltog vi i ovanstående projektkurs. Vi fick därmed en varmstart i vårt examensarbete. I projektkursen byttes styrsystemet ut till ett modernt ”Programmable Logic Controller”-system, PLC-system, bestående av fem PLC-moduler. De fem PLC-modulerna styr följande:

1. Schemaläggaren (*Sch*) samt knappsats och lysdioder därtill
2. Borr (*Drl*)
3. Svets (*Wel*)
4. Slip (*Grd*)
5. Transportsystemet (*Trp*) samt inbuffert (*In*) och utbuffert (*Out*)

PLC-modulerna programmerades i 4CONTROL [2] till att styra LEGO-fabriken. LEGO-fabriken kunde vid examensarbetets start hantera en typ av jobb där maskinordningen bestämdes via knappsatsen.



Figur 1.1: Översikt av LEGO-fabriken.

## **1.2 Målsättning**

Målet är att vidareutveckla LEGO-fabriken, så att processen klarar av två olika typer av jobb. För att detta ska vara möjligt måste en detektor byggas för att kunna detektera vilken typ av jobb som ligger i inbufferten. Jobbet måste vara identifierat innan lastning.

Jobb av typ 1 ska alltid lastas på vagnens buffertplats 1 och jobb av typ 2 ska alltid lastas på vagnens buffertplats 2. För att kunna använda vagnens bägge buffertplatser måste transportsystemet modifieras, alternativt bytas ut.

Programmet måste vidareutvecklas, så att man kan hålla reda på, om det är ett jobb av typ 1 eller 2 som ligger i respektive maskin. Varje jobb ska gå igenom alla maskiner en gång. Ordningen bestäms av operatören via knappsatsen på LEGO-fabriken. Ett exempel på en maskinordning för de två typerna av jobb är enligt nedan.

Jobb av typ 1:

1. Borr
2. Svets
3. Slip

Jobb av typ 2:

1. Svets
2. Slip
3. Borr

## **1.3 Begränsningar**

Då ingen detektor har konstruerats för att kunna detektera vilken typ av jobb som ligger i inbufferten var det nödvändigt att komma fram till en annan lösning.

Då orsaken till att vagnen missar sin stopposition var okänd, kläcktes idén att transportsystemet skulle byggas om, alternativt bytas ut.

Är det möjligt att köra hela LEGO-fabriken på endast en PLC-modul eller krävs det flera?

## **1.4 Översikt över examensarbetet**

Under examensarbetets gång har vagnanvändandet analyserats för att komma fram till hur man på bästa sätt utnyttjar vagnens buffertplatser. Det har gjorts beräkning då både en och två buffertplatser används, likaså har antalet olika typer av jobb varierats mellan ett och två.

Det har gjorts mätningar på hur kommunikation mellan PLC-moduler påverkar vagnens stopposition i förhållande till då endast en PLC-modul används. Det hade varit möjligt att styra hela LEGO-fabriken med endast en PLC-modul, men då man vill efterlikna den verkliga industrin har det använts en PLC-modul per maskin.

4CONTROL [2] har använts för att implementera en schemaläggare som hanterar två typer av jobb och utnyttjar bägge buffertplatserna. Vilken strategi som ska användas vid lastning och lossning av vagnen kommer att framgå längre fram i rapporten.



## 2 Vagnanvändning – teoretisk modell

Den teoretiska modellen innebär att vagnanvändningen analyseras, dvs. att man undersöker hur man bäst utnyttjar vagnens båda buffertplatser. Ska man ha bestämda buffertplatser då man har mer än en typ av jobb eller inte? För att ha något att jämföra med utgår man från endast en typ av jobb på vagnen.

### 2.1 Tillvägagångssätt för analysen

Här undersöks hur olika schemaläggningar påverkar hur många tids- samt längdenheter systemet kräver vid ett visst antal jobb. Det har utretts hur stor besparing som görs om man använder två buffertplatser istället för en vid en typ av jobb. Därefter utreds olika varianter, då två typer av jobb används. Samma tankesätt för vagnanvändandet har använts vid de olika kombinationerna av antalet jobb och buffertplatser.

Då schemaläggningen sköttes manuellt sattes vissa kriterier upp för att få veta vad som skulle utföras. Detta innebär att vissa operationer ska utföras före andra. Man försöker efterlikna hur SFC-kod exekveras i 4CONTROL [2], dvs. operationerna utförs från vänster till höger samt uppifrån och ner.

Som en konsekvens av detta har lastning av vagn högre prioritet än lossning. Den maskin som kommer först i arbetsordningen för de två typerna av jobb har högre prioritet än den som kommer sist. Jobb av typ 1 har högre prioritet än jobb av typ 2. Lossning i utbufferten har lägst prioritet. Allt detta är en konsekvens av hur 4CONTROL [2] fungerar.

För att ta reda på antalet längdenheter mellan maskinerna samt mellan vagnens buffertplatser räknades antalet LEGO-ploppar mellan dessa. En LEGO-plopp motsvarar en längdenhet.

| Från ↔ Till | Antal l.e. |
|-------------|------------|
| In ↔ Drl    | 24         |
| Drl ↔ Wel   | 27         |
| Wel ↔ Grd   | 26         |
| Grd ↔ Out   | 26         |
| B1 ↔ B2     | 7          |

Tabell 2.1: Antalet längdenheter mellan de olika stopplatserna i fabriken.

För att kunna sätta ett mått på hur lång tid det tar att köra igenom en sekvens av jobb bestämdes att det tar 15 tidsenheter att köra en maskin och tre tidsenheter att köra mellan två intilliggande stationer. Lastning respektive lossning tar två tidsenheter och slutligen att körning mellan vagnens buffertplatser tar en tidsenhet.

## 2.2 En typ av jobb

Här gjordes två teoretiska beräkningar av vagnanvändandet. Man hade endast en typ av jobb och fyra jobb som skulle igenom processen. Skillnaderna mellan de två beräkningarna var antalet buffertplatser på vagnen som man fick utnyttja.

Första beräkningen<sup>1</sup> innebär att man har en typ av jobb och en buffertplats till sitt förfogande. Detta medför att man maximalt kan ha tre jobb samtidigt i processen och man måste ta hand om det jobb som kommit längst i arbetsordningen först. Därefter tar man hand om det jobb som kommit näst längst osv. Arbetsordningen som använts vid en typ av jobb är borrh, svets samt slip.

Andra beräkningen<sup>2</sup> innebär att man använder båda buffertplatserna. Nu kan man ha fyra jobb samtidigt i processen och man behöver inte ta hand om det jobb som kommit längst i processen först. Detta är en följd av att man använder båda buffertplatserna. Man kan med andra ord köra till en maskin och skifta två jobb. Då båda buffertplatserna används, tas det även hänsyn till tiden det tar att flytta vagnen från buffertplats 1 till buffertplats 2 och längden däremellan.

| <b>Ett jobb, en buffertplats</b> |             |
|----------------------------------|-------------|
| Totalt t.e.                      | Totalt l.e. |
| 214                              | 1039        |

| <b>Ett jobb, två buffertplatser</b> |             |
|-------------------------------------|-------------|
| Totalt t.e.                         | Totalt l.e. |
| 176                                 | 771         |

|  |
|--|
| Två buffertplatser ger en tidsbesparing på:<br>17,8%       |
| Två buffertplatser ger en körsträcksbesparing på:<br>25,8% |

*Resultat 2.1: En typ av jobb.*

Som man kan se i resultat 2.1 leder en mer effektiv användning av vagnen till knappt 20 % tidsbesparing och drygt 25 % körsträcksbesparing. Här användes endast fyra jobb. Hade fler jobb använts, hade de procentuella besparingarna blivit ungefär desamma. Det är som synes bättre att använda båda buffertplatserna i detta fall, då man sparar tid och körsträcka, vilket i industrin innebär en kostnadsbesparing.

<sup>1</sup> Ett jobb, en buffertplats finns i appendix A.

<sup>2</sup> Ett jobb, två buffertplatser finns i appendix B.

## 2.3 Två typer av jobb

Här gjordes tre teoretiska beräkningar av vagnanvändandet. Man hade nu två typer av jobb som skulle igenom processen. Av varje typ fanns det tre stycken jobb, dvs. sex jobb totalt som skulle tas om hand.

Första beräkningen<sup>1</sup> innebär att man har två typer av jobb, men endast en buffertplats till sitt förfogande. Arbetsordningen som använts för jobb av typ 1 är borr, svets samt slip. För jobb av typ 2 är arbetsordningen istället svets, slip samt borr. Detta medför att man endast kan ha två jobb i processen samtidigt, en av var typ. Annars låser processen sig, man hamnar i ett dödläge där inget kan göras. Processen måste startas om med korrekta villkor för att inte låsa sig.

Vid den andra och tredje beräkningen fanns det två typer av jobb och båda buffertplatserna fanns till förfogande. Det som skiljde de båda beräkningarna åt var om man hade specifika buffertplatser eller ej. Specifika buffertplatser innebär att jobb av typ 1 alltid ligger på buffertplats 1 och jobb av typ 2 på buffertplats 2.

Den andra beräkningen<sup>2</sup> innebär att de olika typerna av jobb ej har specifika buffertplatser. Man lastar helt enkelt jobbet, oavsett typ på första bästa lediga buffertplats. Man kan ha fyra jobb som mest i processen samtidigt. Då man inte har specifika buffertplatser, måste man på något sätt hålla reda på vilken typ av jobb som ligger på vilken buffertplats.

Den tredje beräkningen<sup>3</sup> innebär att de olika typerna av jobb har specifika platser. Jobb av typ 1 lastas alltid på buffertplats 1 och jobb av typ 2 lastas på motsvarande sätt på buffertplats 2. Det är inte längre nödvändigt att hålla reda på vilken typ av jobb som ligger var. Det enda man behöver kontrollera är om vagnens buffertplatser är tomma eller ej.

<sup>1</sup> Två jobb, en buffertplats finns i appendix C.

<sup>2</sup> Två jobb, två buffertplatser, ej specifik plats finns i appendix D.

<sup>3</sup> Två jobb, två buffertplatser, specifik plats finns i appendix E.

|                                  |             |
|----------------------------------|-------------|
| <b>Två jobb, en buffertplats</b> |             |
| Totalt t.e.                      | Totalt l.e. |
| 462                              | 1607        |

|  |             |
|--|-------------|
| <b>Två jobb, två buffertplatser, ej specifik plats</b> |             |
| Totalt t.e.  | Totalt l.e. |
| 298  | 1707        |

|   |             |
|---|-------------|
| <b>Två jobb, två buffertplatser, specifik plats</b> |             |
| Totalt t.e.   | Totalt l.e. |
| 294   | 1460        |

|  |
|--|
| Två buffertplatser, ej specifik plats, ger en tidsbesparing på:<br>35,5%       |
| Två buffertplatser, ej specifik plats, ger en körsträcksbesparing på:<br>-6,2% |

|  |
|--|
| Två buffertplatser, specifik plats, ger en tidsbesparing på:<br>36,4%      |
| Två buffertplatser, specifik plats, ger en körsträcksbesparing på:<br>9,1% |

|   |
|---|
| Specifik plats i förhållande till ej specifik plats ger en tidsbesparing på:<br>1,3%        |
| Specifik plats i förhållande till ej specifik plats ger en körsträckebesparing på:<br>14,5% |

*Resultat 2.2: Två typer av jobb.*

I resultat 2.2 presenteras tider och längder för de tre teoretiska beräkningarna. Jämförelserna är relaterade till två jobb, en buffertplats, om inget annat anges. Att resultaten är relaterade till denna beräkning beror på att den intressanta aspekten är att jämföra en buffertplats med två buffertplatser. Då man använder två buffertplatser, kan man välja om man ska kunna placera ett jobb av en specifik typ på första lediga buffertplats, eller på en specifik buffertplats.

Som man kan se minskar tiden med drygt 35 %, då man använder båda buffertplatserna istället för att endast använda en buffertplats. Körsträckan blir längre då man inte har en specifik plats, medan den blir kortare om man har en specifik plats. Att man inte erhåller någon körsträcksbesparing vid ej specifik plats beror på att vagnen får köra extra mycket när endast ett fåtal jobb återstår. Detta är en följd av hur 4CONTROL [2] exekverar SFC-kod, då de teoretiska beräkningarna ska efterlikna detta. Vid ett ökat antal jobb så erhålls förmodligen även här en körsträcksbesparing.

Då man endast har sex stycken jobb, tre av varje sort, tjänar man på att tilldela jobben en specifik buffertplats istället för att använda första lediga buffertplats. Tidsbesparingen är knapp, men finns dock där. Körsträcksbesparingen är knappt 15 % vilket är tillräckligt för att motivera en implementering av denna typ av schemaläggning i 4CONTROL [2]. Detta överensstämmer med vår ursprungliga målsättning.

## **2.4 Rekommendationer**

De teoretiska beräkningarna har visat att det alltid är mest effektivt att använda båda buffertplatserna. Man gör alltid en tidsbesparing då man utnyttjar vagnens buffertplatser maximalt. Man gör inte lika stora besparingar då det gäller körsträckan, men små besparingar är bättre än inga alls.

Slutsatsen är att vill man utnyttja processen maximalt, ska man använda båda buffertplatserna på vagnen, oavsett om man har en eller två typer av jobb. Det är fullt möjligt att endast använda en buffertplats men det tar avsevärt längre tid.

## **3 Analys av vagnens stopposition**

Vagnen har problem som medför att den inte stannar på samma ställe varje gång. Detta gäller vid alla maskiner samt in- och utbufferten. Det krävdes en analys av vagnens stopposition för att kunna reda ut vad detta problem beror på och eventuella åtgärder.

### **3.1 Bakgrund**

Anledningen till varför en analys av vagnens beteende gjordes var flera. LEGO-fabriken har nyligen byggts om till ett modernt PLC-system i projektkursen "Legofabriken, Projektkurs i Industriell Automation" [1]. Det nya PLC-systemet har programmeras i 4CONTROL [2]. Både det ursprungliga och det nya systemet har visat en tendens till att vagnen missar sin stopposition. Det nya systemet består av, som tidigare nämnts, ett antal PLC-moduler som kommunicerar via Ethernet. Detta medför att felet ökar ytterligare.

### **3.2 Utförande**

För att kunna analysera vagnens beteende gjordes mätningar av felet vid vagnens stopposition. Det gjordes två typer av mätningar för att se skillnaden på att använda en eller flera PLC-moduler. Det skrevs två separata program i 4CONTROL [2], ett program där alla kommandon hanterades internt i PLC-modulen för *Trp* och ett program där PLC-modulen för *Sch* skötte all schemaläggning och skickade instruktioner till PLC-modulen för *Trp*. Båda programmen var programmerade att skicka vagnen från in- till utbuffert med stopp vid varje maskin. Vagnen gick sedan tillbaka i omvänd ordning. Det gjordes ett stopp vid varje maskin i fem sekunder för avläsning av stoppositionen.

### 3.3 Mätvärden och beräkningar

Det gjordes 26 mätningar utan kommunikation och lika många mätningar med kommunikation. En mätning består av sex resultat, en stopposition från höger och en från vänster på alla tre maskinerna, borr, svets samt slip. Mätningarna gjordes i LEGO-skala och räknades om till mm-skala med hjälp av faktorn åtta mm per LEGO-plopp.

Det skrevs en MATLAB-funktion<sup>1</sup> för beräkning av medelvärde, median, varians, standardavvikelse samt variationskoefficient. Mätvärdena och beräkningarna presenteras i tabellerna 3.1 – 3.6.

### 3.4 Definitioner

Följande ekvationer användes för att beräkna resultaten som presenteras i tabellerna 3.1 – 3.6.

$$E(X) = \bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (3.1)$$
$$n = 1, 2, \dots, 26$$

$$\frac{n+1}{2} \in \mathbf{Z} \rightarrow \text{Sortera } x \text{-vektorn} \rightarrow \tilde{x} = x_{n/2}$$
$$\frac{n}{2} \in \mathbf{Z} \rightarrow \text{Sortera } x \text{-vektorn} \rightarrow \tilde{x} = \frac{x_{n/2} + x_{n/2+1}}{2} \quad (3.2)$$
$$n = 1, 2, \dots, 26$$

$$V(X) = \sigma^2 = \frac{n \sum_{i=1}^n x^2 - \left( \sum_{i=1}^n x \right)^2}{n(n-1)} \quad (3.3)$$
$$n = 1, 2, \dots, 26$$

$$D(X) = \sigma = \sqrt{V(X)} \quad (3.4)$$

$$R(X) = \frac{D(X)}{E(X)} \quad (3.5)$$

$$f(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}} \quad (3.6)$$

<sup>1</sup>analys.m finns i appendix F.

| Maskin/håll |         | Maskin/håll |         | Maskin/håll |         |
|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| Borr        |         | Svets       |         | Slip        |         |
| Höger       | Vänster | Höger       | Vänster | Höger       | Vänster |
| 2,5         | 3,0     | 2,0         | 3,5     | 2,5         | 3,0     |
| 2,3         | 2,8     | 2,1         | 3,3     | 2,1         | 2,9     |
| 2,3         | 3,0     | 2,0         | 3,0     | 2,6         | 3,0     |
| 2,7         | 2,9     | 1,9         | 3,2     | 2,2         | 2,9     |
| 2,6         | 3,1     | 1,9         | 3,5     | 2,3         | 2,7     |
| 2,9         | 3,1     | 2,0         | 3,1     | 2,8         | 2,5     |
| 2,7         | 3,0     | 2,0         | 3,2     | 2,6         | 2,8     |
| 2,2         | 3,0     | 2,0         | 3,1     | 2,3         | 2,7     |
| 2,6         | 3,0     | 2,0         | 3,2     | 2,7         | 2,7     |
| 2,6         | 3,0     | 2,1         | 3,1     | 2,5         | 2,9     |
| 2,5         | 2,9     | 2,1         | 3,2     | 2,3         | 3,0     |
| 2,1         | 3,0     | 1,8         | 3,2     | 2,3         | 2,9     |
| 2,1         | 3,0     | 2,0         | 3,1     | 2,5         | 2,8     |
| 2,3         | 2,9     | 2,0         | 3,1     | 2,2         | 2,7     |
| 2,7         | 2,5     | 2,0         | 3,2     | 2,3         | 2,5     |
| 2,7         | 3,0     | 2,0         | 3,1     | 2,7         | 3,0     |
| 2,8         | 2,8     | 2,0         | 3,2     | 2,7         | 2,9     |
| 2,2         | 3,1     | 2,0         | 3,1     | 2,6         | 2,7     |
| 2,7         | 2,9     | 1,8         | 3,0     | 2,3         | 3,0     |
| 2,5         | 2,9     | 2,0         | 3,3     | 2,3         | 2,7     |
| 2,7         | 3,1     | 1,8         | 3,1     | 2,2         | 2,6     |
| 2,6         | 2,9     | 2,1         | 3,1     | 2,3         | 2,8     |
| 2,8         | 2,9     | 2,0         | 3,2     | 2,3         | 2,9     |
| 2,3         | 3,0     | 1,8         | 3,1     | 2,6         | 2,8     |
| 2,7         | 3,0     | 2,1         | 2,8     | 2,7         | 2,7     |
| 2,3         | 2,7     | 2,1         | 3,3     | 2,5         | 2,5     |

Tabell 3.1: Stopposition då all kommunikation sköts i Trp-PLC-modulen, LEGO-skala.

I tabell 3.1 finns stoppositionerna som ligger till grund för mm-värdena i tabell 3.2.

| Maskin/håll |         | Maskin/håll |         | Maskin/håll |         |
|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| Borr        |         | Svets       |         | Slip        |         |
| Höger       | Vänster | Höger       | Vänster | Höger       | Vänster |
| 20,0        | 24,0    | 16,0        | 28,0    | 20,0        | 24,0    |
| 18,4        | 22,4    | 16,8        | 26,4    | 16,8        | 23,2    |
| 18,4        | 24,0    | 16,0        | 24,0    | 20,8        | 24,0    |
| 21,6        | 23,2    | 15,2        | 25,6    | 17,6        | 23,2    |
| 20,8        | 24,8    | 15,2        | 28,0    | 18,4        | 21,6    |
| 23,2        | 24,8    | 16,0        | 24,8    | 22,4        | 20,0    |
| 21,6        | 24,0    | 16,0        | 25,6    | 20,8        | 22,4    |
| 17,6        | 24,0    | 16,0        | 24,8    | 18,4        | 21,6    |
| 20,8        | 24,0    | 16,0        | 25,6    | 21,6        | 21,6    |
| 20,8        | 24,0    | 16,8        | 24,8    | 20,0        | 23,2    |
| 20,0        | 23,2    | 16,8        | 25,6    | 18,4        | 24,0    |
| 16,8        | 24,0    | 14,4        | 25,6    | 18,4        | 23,2    |
| 16,8        | 24,0    | 16,0        | 24,8    | 20,0        | 22,4    |
| 18,4        | 23,2    | 16,0        | 24,8    | 17,6        | 21,6    |
| 21,6        | 20,0    | 16,0        | 25,6    | 18,4        | 20,0    |
| 21,6        | 24,0    | 16,0        | 24,8    | 21,6        | 24,0    |
| 22,4        | 22,4    | 16,0        | 25,6    | 21,6        | 23,2    |
| 17,6        | 24,8    | 16,0        | 24,8    | 20,8        | 21,6    |
| 21,6        | 23,2    | 14,4        | 24,0    | 18,4        | 24,0    |
| 20,0        | 23,2    | 16,0        | 26,4    | 18,4        | 21,6    |
| 21,6        | 24,8    | 14,4        | 24,8    | 17,6        | 20,8    |
| 20,8        | 23,2    | 16,8        | 24,8    | 18,4        | 22,4    |
| 22,4        | 23,2    | 16,0        | 25,6    | 18,4        | 23,2    |
| 18,4        | 24,0    | 14,4        | 24,8    | 20,8        | 22,4    |
| 21,6        | 24,0    | 16,8        | 22,4    | 21,6        | 21,6    |
| 18,4        | 21,6    | 16,8        | 26,4    | 20,0        | 20,0    |

Tabell 3.2: Stoppostion då all kommunikation sköts i Trp-PLC-modulen, mm-skala.

|                                      |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Medelvärde / Väntevärde, $E(X)$ , mm |       |       |       |       |       |
| 20,13                                | 23,54 | 15,88 | 25,32 | 19,51 | 22,34 |
| Median, mm                           |       |       |       |       |       |
| 20,80                                | 24,00 | 16,00 | 25,20 | 19,20 | 22,40 |
| Varians, $V(X)$ , mm <sup>2</sup>    |       |       |       |       |       |
| 3,452                                | 1,135 | 0,599 | 1,328 | 2,513 | 1,635 |
| Standardavvikelse, $D(X)$ , mm       |       |       |       |       |       |
| 1,858                                | 1,066 | 0,774 | 1,153 | 1,585 | 1,279 |
| Variationskoefficient, $R(X)$        |       |       |       |       |       |
| 0,092                                | 0,045 | 0,049 | 0,046 | 0,081 | 0,057 |

Tabell 3.3: Statistiska mått beräknade av värdena från tabell 3.2.

I tabell 3.3 har diverse olika storheter beräknats med utgångspunkt från värdena i tabell 3.2. Dessa storheter jämförs och förklaras under respektive figur, se figur 3.1 – 3.5. De statistiska mått som använts är beräknade enligt ekvationerna (3.1) – (3.5).



| Maskin/håll |         | Maskin/håll |         | Maskin/håll |         |
|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| Borr        |         | Svets       |         | Slip        |         |
| Höger       | Vänster | Höger       | Vänster | Höger       | Vänster |
| 3,8         | 4,0     | 3,2         | 4,1     | 3,6         | 3,7     |
| 3,9         | 3,9     | 3,2         | 4,2     | 3,5         | 3,8     |
| 3,6         | 3,9     | 3,1         | 4,1     | 3,5         | 4,1     |
| 4,1         | 4,4     | 3,2         | 4,2     | 3,5         | 4,1     |
| 4,0         | 3,8     | 3,1         | 4,5     | 3,5         | 4,1     |
| 3,6         | 4,3     | 3,2         | 4,2     | 3,5         | 3,9     |
| 4,1         | 4,0     | 2,9         | 3,9     | 3,3         | 3,4     |
| 3,7         | 4,4     | 3,2         | 4,6     | 3,2         | 3,4     |
| 3,7         | 3,9     | 2,5         | 4,2     | 3,4         | 4,0     |
| 4,2         | 3,8     | 3,3         | 4,2     | 3,4         | 3,5     |
| 3,7         | 4,0     | 2,7         | 4,1     | 3,6         | 3,9     |
| 4,1         | 4,1     | 3,1         | 3,9     | 3,5         | 3,7     |
| 3,8         | 4,0     | 2,7         | 3,5     | 3,6         | 3,8     |
| 3,6         | 3,9     | 2,7         | 4,3     | 3,6         | 4,0     |
| 3,7         | 4,2     | 2,9         | 4,5     | 4,1         | 3,8     |
| 3,5         | 3,8     | 2,7         | 4,1     | 3,2         | 3,6     |
| 3,8         | 4,2     | 3,4         | 4,0     | 3,2         | 3,3     |
| 3,8         | 4,1     | 2,9         | 4,2     | 3,3         | 3,2     |
| 3,8         | 3,8     | 2,7         | 4,0     | 3,3         | 4,0     |
| 3,7         | 4,1     | 2,8         | 4,0     | 3,4         | 4,1     |
| 3,9         | 4,0     | 3,0         | 4,1     | 4,0         | 4,1     |
| 3,8         | 4,0     | 2,6         | 4,1     | 3,0         | 3,8     |
| 3,4         | 3,9     | 2,6         | 4,2     | 3,7         | 3,7     |
| 3,6         | 3,9     | 3,3         | 3,8     | 3,7         | 3,5     |
| 3,7         | 3,8     | 3,2         | 4,5     | 3,7         | 3,6     |
| 4,2         | 3,7     | 3,0         | 4,0     | 3,7         | 3,7     |

Tabell 3.4: Stopposition då Trp-PLC-modulen kommunicerar med Sch-PLC-modulen, LEGO-skala.

I tabell 3.4 finns stoppositionerna som ligger till grund för mm-värdena i tabell 3.5.

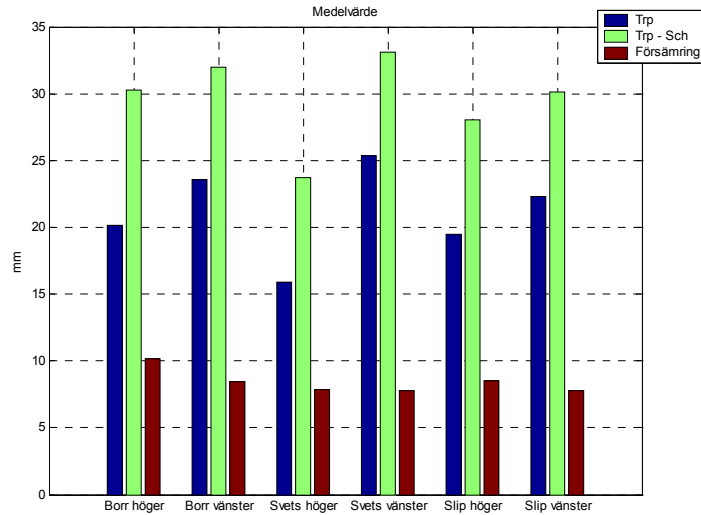
| Maskin/håll |         | Maskin/håll |         | Maskin/håll |         |
|-------------|---------|-------------|---------|-------------|---------|
| Borr        |         | Svets       |         | Slip        |         |
| Höger       | Vänster | Höger       | Vänster | Höger       | Vänster |
| 30,4        | 32,0    | 25,6        | 32,8    | 28,8        | 29,6    |
| 31,2        | 31,2    | 25,6        | 33,6    | 28,0        | 30,4    |
| 28,8        | 31,2    | 24,8        | 32,8    | 28,0        | 32,8    |
| 32,8        | 35,2    | 25,6        | 33,6    | 28,0        | 32,8    |
| 32,0        | 30,4    | 24,8        | 36,0    | 28,0        | 32,8    |
| 28,8        | 34,4    | 25,6        | 33,6    | 28,0        | 31,2    |
| 32,8        | 32,0    | 23,2        | 31,2    | 26,4        | 27,2    |
| 29,6        | 35,2    | 25,6        | 36,8    | 25,6        | 27,2    |
| 29,6        | 31,2    | 20,0        | 33,6    | 27,2        | 32,0    |
| 33,6        | 30,4    | 26,4        | 33,6    | 27,2        | 28,0    |
| 29,6        | 32,0    | 21,6        | 32,8    | 28,8        | 31,2    |
| 32,8        | 32,8    | 24,8        | 31,2    | 28,0        | 29,6    |
| 30,4        | 32,0    | 21,6        | 28,0    | 28,8        | 30,4    |
| 28,8        | 31,2    | 21,6        | 34,4    | 28,8        | 32,0    |
| 29,6        | 33,6    | 23,2        | 36,0    | 32,8        | 30,4    |
| 28,0        | 30,4    | 21,6        | 32,8    | 25,6        | 28,8    |
| 30,4        | 33,6    | 27,2        | 32,0    | 25,6        | 26,4    |
| 30,4        | 32,8    | 23,2        | 33,6    | 26,4        | 25,6    |
| 30,4        | 30,4    | 21,6        | 32,0    | 26,4        | 32,0    |
| 29,6        | 32,8    | 22,4        | 32,0    | 27,2        | 32,8    |
| 31,2        | 32,0    | 24,0        | 32,8    | 32,0        | 32,8    |
| 30,4        | 32,0    | 20,8        | 32,8    | 24,0        | 30,4    |
| 27,2        | 31,2    | 20,8        | 33,6    | 29,6        | 29,6    |
| 28,8        | 31,2    | 26,4        | 30,4    | 29,6        | 28,0    |
| 29,6        | 30,4    | 25,6        | 36,0    | 29,6        | 28,8    |
| 33,6        | 29,6    | 24,0        | 32,0    | 29,6        | 29,6    |

Tabell 3.5: Stoppostion då Trp-PLC-modulen kommunicerar med Sch-PLC-modulen, mm-skala.

|                                      |       |       |       |       |       |
|--------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Medelvärde / Väntevärde, $E(X)$ , mm |       |       |       |       |       |
| 30,28                                | 31,97 | 23,75 | 33,08 | 28,00 | 30,09 |
| Median, mm                           |       |       |       |       |       |
| 30,40                                | 32,00 | 24,00 | 32,80 | 28,00 | 30,40 |
| Varians, $V(X)$ , mm <sup>2</sup>    |       |       |       |       |       |
| 3,405                                | 2,226 | 4,289 | 3,530 | 3,789 | 4,561 |
| Standardavvikelse, $D(X)$ , mm       |       |       |       |       |       |
| 1,845                                | 1,492 | 2,071 | 1,879 | 1,947 | 2,136 |
| Variationskoefficient, $R(X)$        |       |       |       |       |       |
| 0,061                                | 0,047 | 0,087 | 0,057 | 0,070 | 0,071 |

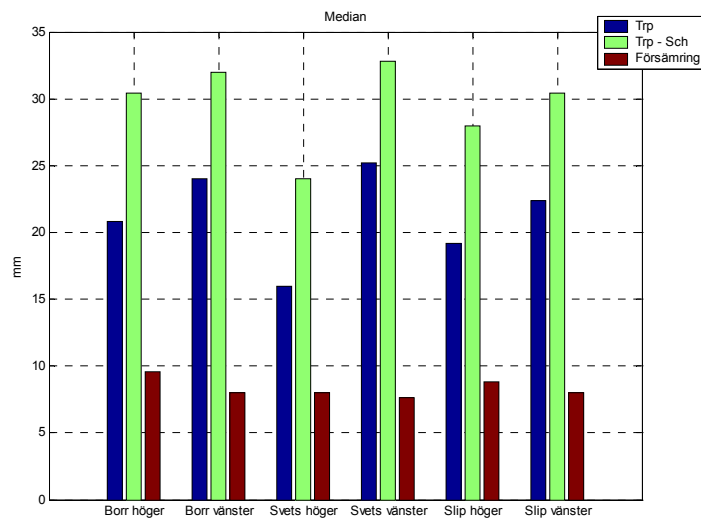
Tabell 3.6: Statistiska mått beräknade av värdena från tabell 3.5.

I tabell 3.6 har diverse olika storheter beräknats med utgångspunkt från värdena i tabell 3.5. Dessa storheter jämförs och förklaras under respektive figur, se figur 3.1 – 3.5. De statistiska mått som använts är beräknade enligt ekvationerna (3.1) – (3.5).



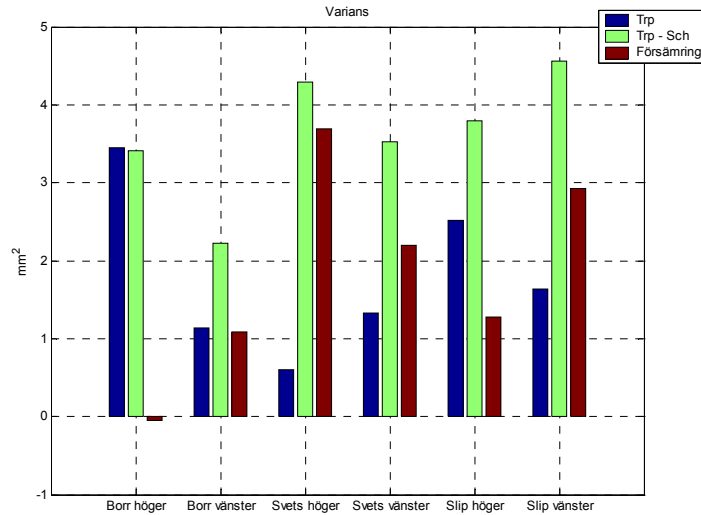
Figur 3.1: Medelvärde beräknat enligt formel (3.1). Det sker en medelvärdesökning då kommunikation mellan PLC-modulerna används, gröna staplar i förhållande till blå.

I figur 3.1 kan man se att medelvärdet skiljer sig mellan de olika maskinerna, men samtidigt skiljer det sig också om man närmar sig maskinen från höger resp. vänster. Detta förklaras med att vagnen går något fortare åt vänster än åt höger. Man ser även att då kommunikation mellan PLC-modulerna används ökar medelvärdet med i genomsnitt 40 %.



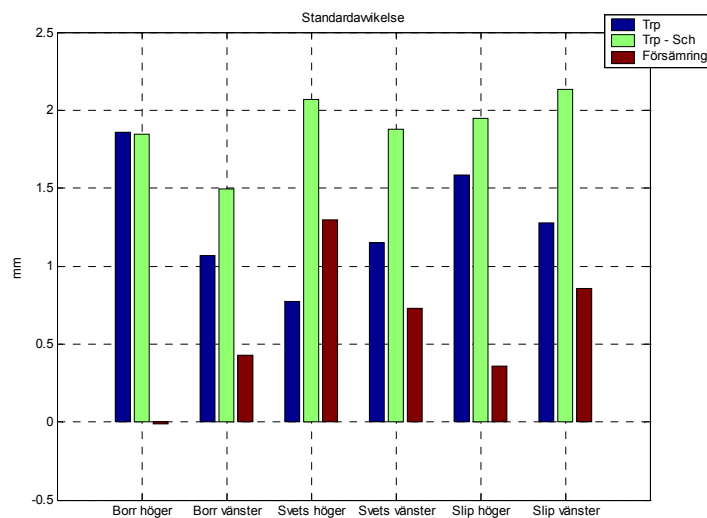
Figur 3.2: Median beräknat enligt formel (3.2). Det sker en ökning av medianen då kommunikation mellan PLC-modulerna används, gröna staplar i förhållande till blå.

I figur 3.2 ser man precis som för medelvärdet en skillnad mellan maskinerna. Då PLC-modulerna börjar kommunicera ökar medianen med i genomsnitt 39 %.



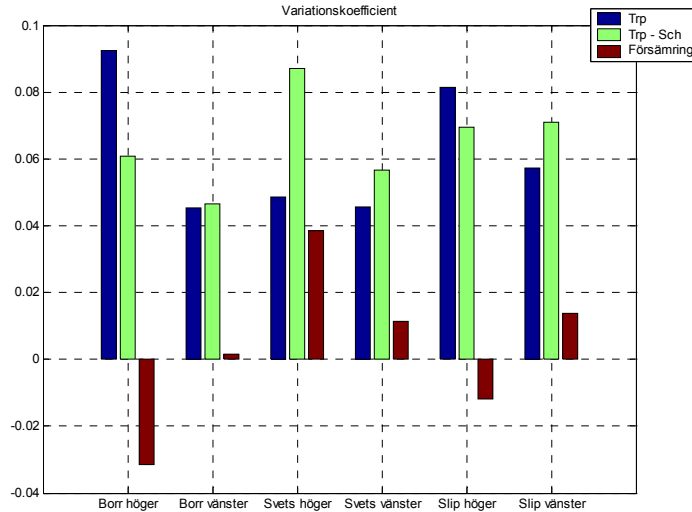
Figur 3.3: Varians beräknat enligt formel (3.3). Variansen ökar då kommunikation mellan PLC-modulerna används, gröna staplar i förhållande till blå. Det finns dock ett undantag.

Som ses i figur 3.3 ökar variansen, då PLC-modulerna kommunicerar utom i ett fall, då vagnen åker åt höger till borren. Att det inte sker en försämring i detta fall saknar förklaring och beror snarast på slumpen. Klart sämst är det när vagnen åker åt vänster till slipen.



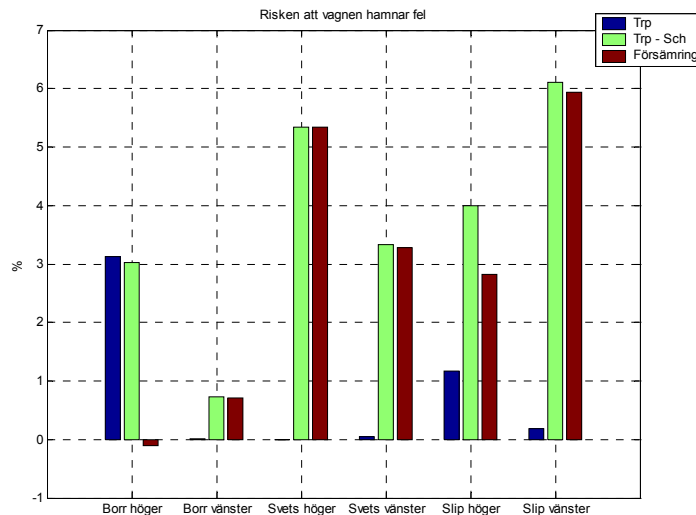
Figur 3.4: Standardavvikelse beräknat enligt formel (3.4). Standardavvikelsen påverkas på samma sätt som variansen då kommunikation mellan PLC-modulerna används. Detta då dessa storheter är kopplade till varandra.

Figur 3.4 liknar figur 3.3 och förklaringen till detta är att standardavvikelsen beräknas som roten ur variansen.



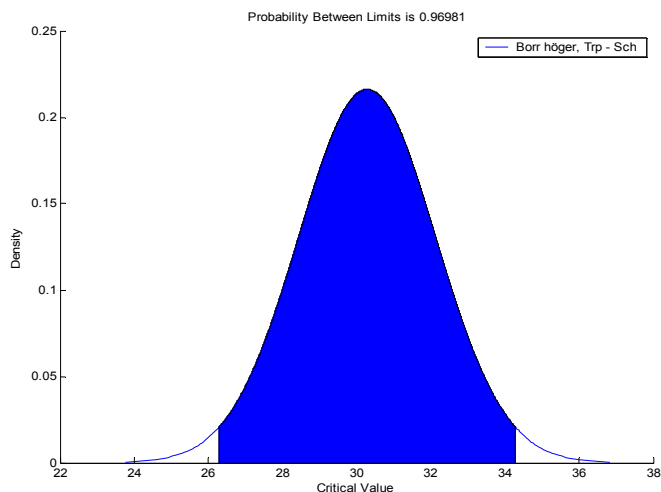
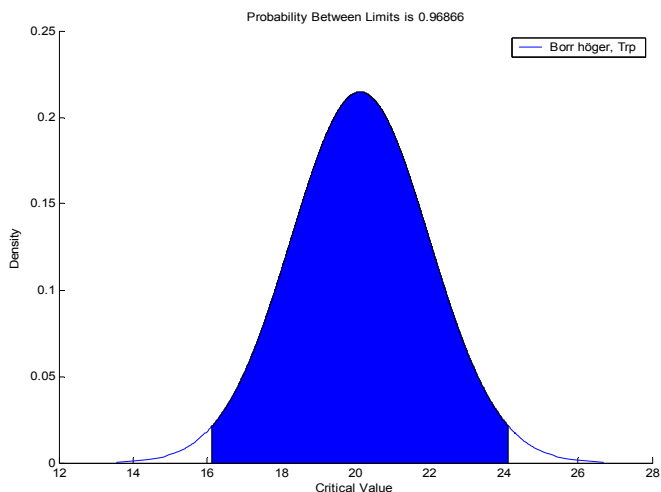
Figur 3.5: Variationskoefficienten är beräknad enligt formel (3.5). Variationskoefficienten beror på förhållandet mellan standardavvikelsen och medelvärdet.

Anledningen till att visa variationskoefficienten i figur 3.5 är att den är dimensionslös och på så sätt lätt att använda för att göra jämförelser. Variationskoefficienten är definierad som kvoten mellan standardavvikelsen och medelvärdet.



Figur 3.6: Risken att vagnen hamnar fel, dvs. det uppstår ett oönskat stopp hos processen.

I figur 3.6 visas risken att vagnen hamnar mer än  $\pm 4$  mm från cc vagn-maskin vilket medför att processen stannar upp, då en kloss fastnar eller att vagnen spårar ur.



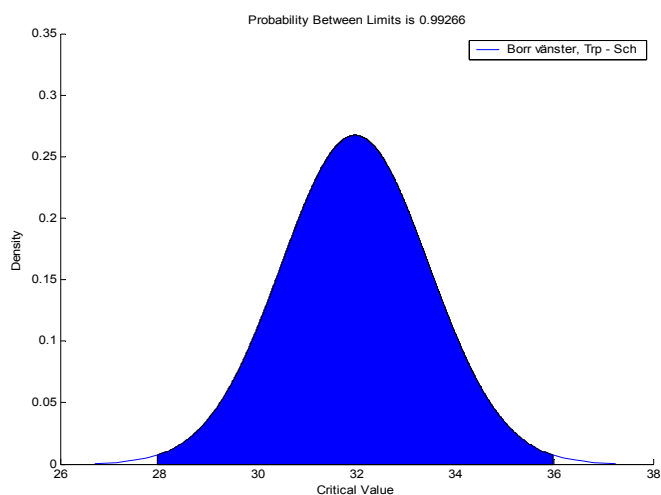
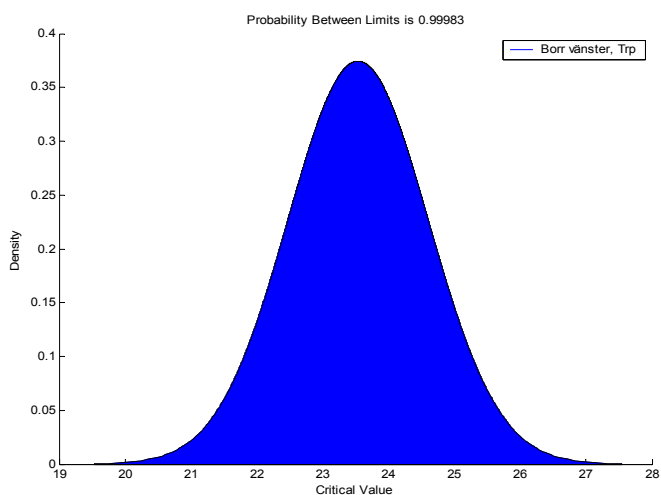
Figur 3.7: Sannolikheten, antag normalfördelning, att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm, borr höger.

Enligt figur 3.7 är sannolikheten att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm enligt nedan.

| Förklaring       | Sannolikhet |
|------------------|-------------|
| Ej kommunikation | 0,9687      |
| Kommunikation    | 0,9698      |
| Försämring       | -0,0011     |

Tabell 3.7: Jämförelse av sannolikheter att vagnen hamnar inom felmarginalen.

Som tidigare nämnts handlar det om en minimal förbättring i detta fall.

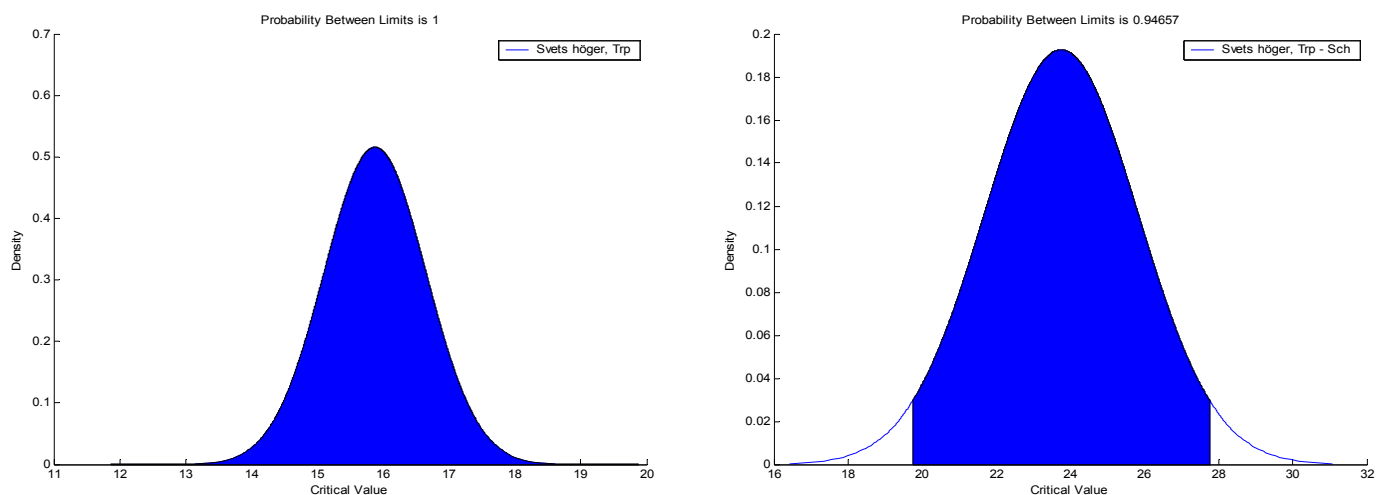


Figur 3.8: Sannolikheten, antag normalfördelning, att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm, borr vänster.

Enligt figur 3.8 är sannolikheten att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm enligt nedan.

| Förklaring       | Sannolikhet |
|------------------|-------------|
| Ej kommunikation | 0,9998      |
| Kommunikation    | 0,9927      |
| Försämring       | 0,0072      |

Tabell 3.8: Jämförelse av sannolikheter att vagnen hamnar inom felmarginalen.

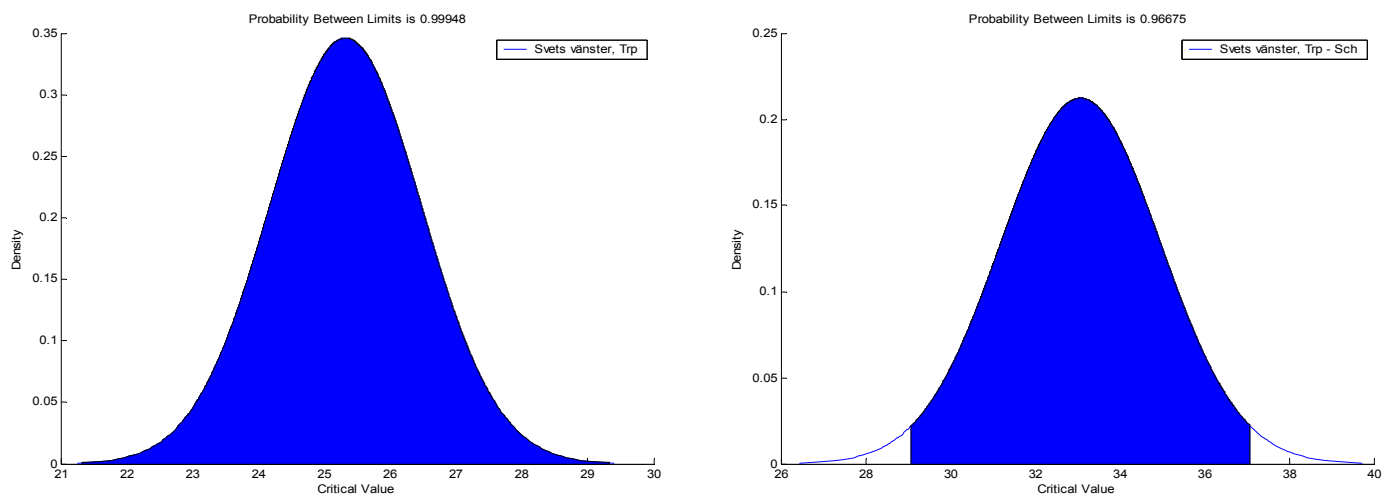


Figur 3.9: Sannolikheten, antag normalfördelning, att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm, svets höger.

Enligt figur 3.9 är sannolikheten att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm enligt nedan.

| Förklaring       | Sannolikhet |
|------------------|-------------|
| Ej kommunikation | 1,0000      |
| Kommunikation    | 0,9466      |
| Försämring       | 0,0534      |

Tabell 3.9: Jämförelse av sannolikheter att vagnen hamnar inom felmarginalen.

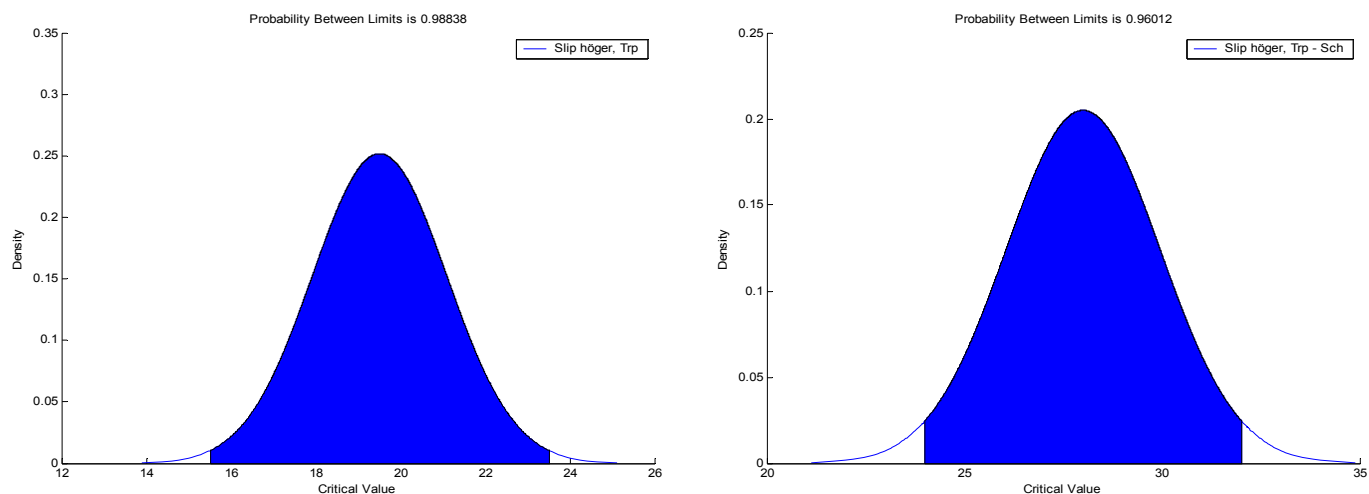


Figur 3.10: Sannolikheten, antag normalfördelning, att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm, svets vänster.

Enligt figur 3.10 är sannolikheten att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm enligt nedan.

| Förklaring       | Sannolikhet |
|------------------|-------------|
| Ej kommunikation | 0,9995      |
| Kommunikation    | 0,9667      |
| Försämring       | 0,0327      |

Tabell 3.10: Jämförelse av sannolikheter att vagnen hamnar inom felmarginalen.

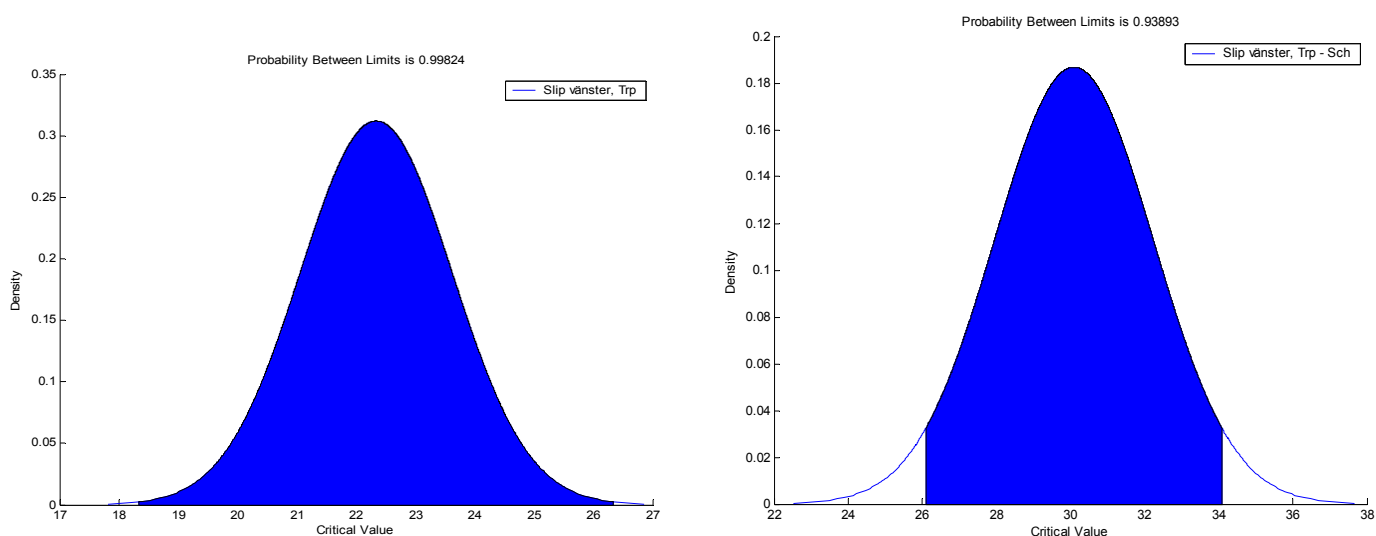


Figur 3.11: Sannolikheten, antag normalfördelning, att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm, slip höger.

Enligt figur 3.11 är sannolikheten att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm enligt nedan.

| Förklaring       | Sannolikhet |
|------------------|-------------|
| Ej kommunikation | 0,9884      |
| Kommunikation    | 0,9601      |
| Försämring       | 0,0283      |

Tabell 3.11: Jämförelse av sannolikheter att vagnen hamnar inom felmarginalen.



Figur 3.12: Sannolikheten, antag normalfördelning, att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm, slip vänster.

Enligt figur 3.12 är sannolikheten att vagnen kommer inom  $\pm 4$  mm enligt nedan.

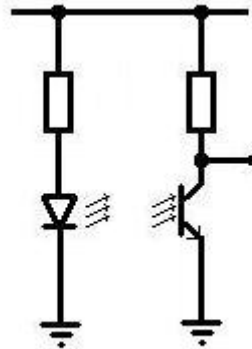
| Förklaring       | Sannolikhet |
|------------------|-------------|
| Ej kommunikation | 0,9982      |
| Kommunikation    | 0,9389      |
| Försämring       | 0,0593      |

Tabell 3.12: Jämförelse av sannolikheter att vagnen hamnar inom felmarginalen.



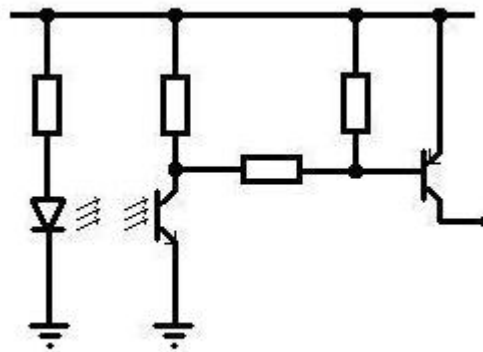
### 3.5 Förklaring till felaktig stopposition

Att stoppositionen hamnar cirka 20 mm från centrum på fotogivarna, då endast en PLC-modul används, beror på konstruktionen av transportsystemet. En avgörande faktor till detta fel är de elektriska reläer, som används för styrning av vagnens motor. Eventuellt hamnar transistorerna i fotogivarna i det linjära området och fränslag dröjer då en extra tid. Att fotogivarna eventuellt hamnar i det linjära området beror på konstruktionen av dessa, se figur 3.13.



Figur 3.13: Kretsschema på nuvarande lösning, fotogivare.

En hög ström går igenom transistorn, när fotogivaren inte är blockerad, dvs. mesta delen av tiden. Transistorn blir således varm och fungerar inte längre på önskvärt sätt. En bättre lösning hade varit att bygga om fotogivarna enligt figur 3.14. Man kan då ställa in omslagsnivån för den tillkomna transistorn, så att omslag sker direkt då fotogivaren blir blockerad. Att fotogivarna inte har konstruerats om enligt figur 3.14 beror på den marginella förbättringen av stoppositionen som detta förmodligen hade lett till.



Figur 3.14: Kretsschema på önskvärd lösning, fotogivare.

Det största problemet är att stoppositionen förflyttas då flera PLC-moduler används. Anledningen till detta problem har inte lösts, då inga programmeringsfel har upptäckts. Det har konstaterats att det inte sker någon tidskritisk kommunikation mellan PLC-modulerna. Lösningen blev istället rent mekanisk, vagnens feltolerans har ökat från  $\pm 4$  mm till  $\pm 8$  mm. En justering av fotogivarna har gjorts med hjälp av beräkningarna i kapitel 3.3, tabell 3.6. Även LEGO-biten som bryter strålen i fotogivarna har längdanpassats för att erhålla bästa möjliga stopposition.

### 3.6 Sammanfattning av vagnens egenskaper

Vagnen färdas med olika hastigheter åt höger respektive vänster. Då kommunikation mellan PLC-moduler används blir stoppositionen förflyttad vilket är negativt. Vagnen har även olika egenskaper beroende på hur länge processen har varit igång, stoppositionen förflyttas när processen blivit varm, även detta är negativt.

Att LEGO-biten fastnar vid lastning eller lossning beror på att felmarginalen överskrids med cirka två mm. Två mm för vagnen handlar tidsmässigt om en fördröjning på mindre än sju millisekunder. Se följande beräkningar.

Vagnens maximala körsträcka är 0,88 m och det tar 2,9 s att köra denna sträcka. Vagnen når sin topphastighet nästan omedelbart.

$$s = v \cdot t \quad \Leftrightarrow \quad v = \frac{s}{t} = \frac{0,88}{2,9} \approx 0,303 \text{ m/s}$$

*Beräkning 3.1: Vagnens hastighet.*

Vagnen rör sig med en hastighet av 0,303 m/s och risken att LEGO-biten fastnar handlar om två mm.

$$s = v \cdot t \quad \Leftrightarrow \quad t = \frac{s}{v} = \frac{0,002}{0,303} \approx 6,6 \text{ ms}$$

*Beräkning 3.2: Kritisk tid, tidsfördröjning som leder till att LEGO-biten fastnar.*

## 4 Schemaläggning

### 4.1 Bakgrund

I enlighet med resultaten som presenterades i kapitel 2.3 kommer en schemaläggare att implementeras<sup>1</sup> i 4CONTROL [2] som klarar av att hantera två typer av jobb. Båda buffertplatserna på vagnen kommer att användas. Jobb av typ 1 lastas alltid på buffertplats 1, *B1*, och jobb av typ 2 lastas på motsvarande sätt på buffertplats 2, *B2*. Anledningen till denna implementering av schemaläggaren är att bättre kunna utnyttja LEGO-fabriken. LEGO-fabriken blir effektivare och maskinbeläggningen kommer att bli högre. Detta är önskvärt då man vill producera så mycket som möjligt, på så kort tid som möjligt. Tid är som bekant lika med pengar. Även användandet av vagnen ökar, allt i enlighet med hur en verklig fabrik hade implementerats.

### 4.2 Vektor

Då ingen detektor för igenkänning av olika typer av jobb finns, har lösningen istället blivit att använda sig av en boolesk vektor, *jobQueue*. Då det endast ska finnas två typer av jobb markeras jobb av typ 1 med *false* och jobb av typ 2 med *true* i vektorn *jobQueue*. I enlighet med de teoretiska beräkningarna, kapitel 2.3, innehåller vektorn endast sex platser. Ordning på jobben framgår av förklaring 2.2, dvs. jobben ligger växelvis med början av jobb av typ 1. Vektorn *jobQueue* kan lätt bytas mot en vektor med fler platser, men återigen vill man ha en återkoppling till de teoretiska beräkningarna. Man använder sig av en pekare, *jobNbr*, som pekar på vilken typ av jobb som ska lastas. Då lastning skett i inbufferten flyttar man fram pekaren ett steg.

Då sex lastningar har utförts finns inte fler jobb i inbufferten och schemaläggaren kör färdigt de jobb som finns i processen. Om inbufferten skulle bli tom innan sex jobb har lastats på vagnen, fortsätter schemaläggaren att bearbeta de redan påbörjade jobben. Då fler jobb fylls på, hämtar vagnen dessa tills totalt sex lastningar har gjorts. Det får finnas maximalt fyra jobb i processen samtidigt varav maximalt tre jobb av samma typ. Detta kontrolleras innan ett nytt jobb lastas. Det används två variabler, *N1* och *N2*, för att hålla reda på antalet jobb av typ 1 och 2 i processen.

Skulle utbufferten bli blockerad innan sex lossningar har gjorts, bearbetas de påbörjade jobben så långt det är möjligt innan alla maskiner är belagda. Det uppstår ett önskat stopp om lossning i utbufferten krävs för att kunna bearbeta resten av jobben. Vagnen och maskinerna kommer stå still tills dess att utbufferten blir tömd. Programmet fortsätter sedan som vanligt då vagnen lossats. Då sex lossningar har gjorts i utbufferten, är programmet färdigexekvererat och man kan välja att starta om eller att stänga av processen. För att hålla reda på hur många lossningar som skett används variabeln *N3*.

Så länge processen kör blinkar en orange varningslampa, signalerna *mainLight* och *mainLightFixed* sätts till *true*. Denna lampa övergår till att lysa med ett fast sken då sex bitar har lossats och processen är klar, *mainLightFixed* sätts till *false*. Detta eftersom ingången hos varningslampan är inverterad.

<sup>1</sup> Två jobb, två buffertplatser, specifik plats finns i appendix E.

### 4.3 Jobbkontroll

Då det finns två typer av jobb är det nödvändigt att hålla reda på vilken typ av jobb som ligger i vilken maskin, eftersom maskinordningen är annorlunda för de två olika typerna av jobb. Maskinordningen som används vid körning av processen styrs av knappsetsen, som är kopplad till initieringen av schemaläggaren. Maskinordningen lagras i vektorn *order* som innehåller sex platser.

Då en maskin lastas får den en signal av schemaläggaren, som berättar vilken typ av jobb, som har lastats. Jobb av typ 1 är kopplade till alla variabler som inleds med *m1*, *m2* samt *m3*. På motsvarande sätt är jobb av typ 2 kopplade till inledningen *m4*, *m5* samt *m6*. *m1* – *m6* är dynamiska namn som kopplas till respektive maskin vid programmering av maskinordningen, dvs. första maskinen som väljs blir knuten till *m1*, nästa blir knuten till *m2* osv. För att vagnen ska veta var den får åka, så finns det ett antal variabler som håller reda på detta. Dessa variabler listas nedan.

| Variabelnamn      | Typ av variabel | Förklaring   |
|-------------------|-----------------|--|
| <i>mXEmpty</i>    | <i>BOOL</i>     | Indikerar om maskinen är tom på jobb av samma typ      |
| <i>mXCorr</i>     | <i>BOOL</i>     | Indikerar om maskinen är tom på jobb av annan typ      |
| <i>mXWorking</i>  | <i>BOOL</i>     | Indikerar om maskinen arbetar eller ej                 |
| <i>mXFinished</i> | <i>BOOL</i>     | Indikerar om maskinen är färdig                        |
| <i>mYPos1</i>     | <i>BOOL</i>     | Indikerar vart vagnen ska åka, buffertplats 1          |
| <i>mZPos2</i>     | <i>BOOL</i>     | Indikerar vart vagnen ska åka, buffertplats 2          |
| <i>B1</i>         | <i>BOOL</i>     | Indikerar om buffertplats 1 är upptagen eller ej       |
| <i>B2</i>         | <i>BOOL</i>     | Indikerar om buffertplats 2 är upptagen eller ej       |
| <i>In1</i>        | <i>BOOL</i>     | Indikerar att vagnen kommer från inbufferten med typ 1 |
| <i>In2</i>        | <i>BOOL</i>     | Indikerar att vagnen kommer från inbufferten med typ 2 |
| <i>MX</i>         | <i>BOOL</i>     | Indikerar att vagnen kommer från maskin nummer X       |

Tabell 4.1: Variabellista,  $X = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ ;  $Y = 1, 2, 3$ ;  $Z = 1, 2, 3$ .

Det är variablerna i tabell 4.1 som i rätt kombination avgör vilken alternativ parallell sekvens som ska exekveras i schemaläggaren. Dessa variabler nollställs vid initieringen som sker vid program- och omstart. Villkoren som avgör vilken alternativ parallell sekvens som ska exekveras finns beskrivna i ett appendix<sup>1</sup>. Här förklaras i klartext vad variabelnamnen gör.

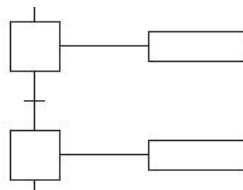
<sup>1</sup> Beskrivning av villkor för val av sekvens finns i appendix G.

## 4.4 Implementering

Implementeringen av schemaläggaren har gjorts i 4CONTROL [2]. Det huvudsakliga programmeringsspråket som använts är SFC, då detta ger en god överblick och programkoden blir lätt att följa. Då programkommandon ska utföras skrivs dessa i ST. En del av schemaläggaren är helt skriven i ST, då mer avancerad programmering är lättare att uttrycka på detta sätt och komplexiteten inte blir så hög som då man skriver motsvarande kod i SFC.

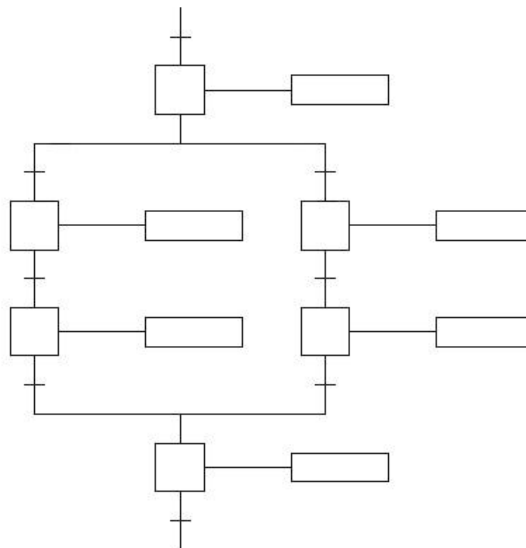
Då man programmerar i SFC kan man använda sig av tre typer av kombinationer för hur programmet ska exekveras [5]:

1. Enkel sekvens – Det finns endast en möjlig väg att gå igenom programmet.



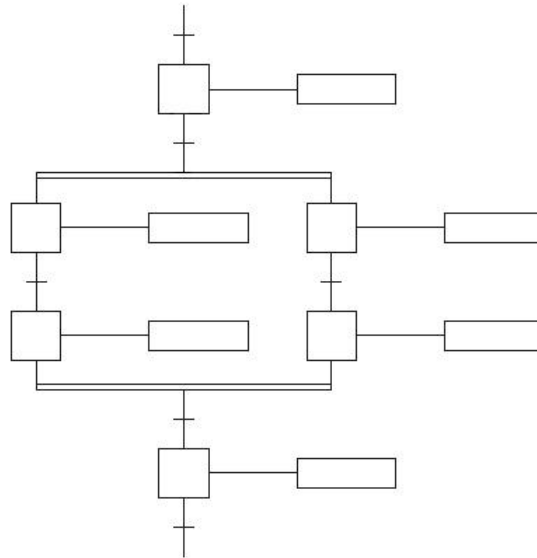
Figur 4.1: Enkel sekvens [5].

2. Alternativ parallell sekvens – Det finns två eller flera möjliga vägar att välja mellan. Vilken väg som väljs beror på vilket villkor som uppfylls.



Figur 4.2: Alternativ parallell sekvens [5].

3. Simultan parallell sekvens – Det finns två eller flera vägar som exekveras samtidigt.



Figur 4.3: Simultan parallell sekvens [5].

Huvudprogrammet för schemaläggaren är skrivet enligt principen alternativ parallell sekvens, se figur 4.4. Vilken väg som ska väljas beror på om det är ett jobb av typ 1 eller 2, om maskinerna arbetar eller inte, om det finns fler obehandlade jobb i inbufferten och slutligen om utbufferten är blockerad eller inte.

Det finns 16 alternativt parallella sekvenser att välja mellan, åtta för jobb av typ 1 samt åtta för jobb av typ 2. Dessa åtta delas upp i fyra sekvenser som hämtar jobb av typ 1 i inbufferten, maskin ett, maskin två alternativt maskin tre och lastar jobbet på vagnen. De andra fyra kör jobb av typ 1 till maskin ett, maskin två, maskin tre alternativt utbufferten och lossar jobbet från vagnen. Det fungerar på motsvarande sätt för jobb av typ 2, men då heter maskinerna fyra, fem och sex.

Efter dessa 16 alternativt parallella sekvenser finns ytterligare två alternativt parallella sekvenser, som kontrollerar om sex jobb har gått igenom processen eller inte. Om sex jobb har gått igenom väntar programmet, med varningslampan tänd, på att man ska trycka återställ och programmera in en ny arbetsordning samt fylla på inbufferten med obehandlade jobb.

4CONTROL [2] exekverar den alternativt parallella sekvensen från vänster till höger, dvs. programmet väljer den första sekvensen som har ett sant villkor<sup>1</sup>, oavsett hur många och hur länge sekvenserna till höger om denna har varit sanna.



Figur 4.4: Programstruktur för schemaläggare.

<sup>1</sup> Beskrivning av villkor för val av sekvens finns i appendix G.

## 5 Slutsats

Under examensarbetets gång har en del problem uppstått, vilket gör att vi inte har uppfyllt vår målsättning på alla punkter. Detta beror främst på vagnens problem med stoppositionen.

Analysen av vagnens stopposition var inte tänkt att ingå in i examensarbetet, men då kommunikation mellan PLC-moduler innebär en försämring av vagnens stopposition blev det nödvändigt att utreda detta. Denna analys har blivit en stor del av arbetet pga. att den var tidsödande och väsentlig för att kunna gå vidare. Någon egentlig lösning på problemet har ej uppdagats, då orsaken till fördröjningen inte har kunnat identifieras. Vi har istället kompen-serat för en del av problemet genom att öka vagnens marginaler för lastning dvs. öppningarna till vagnens buffertplatser har ökat i bredd. Även fotogivarna som registrerar när vagnen passerar har justerats med hjälp av resultaten från analysen. Med detta i bakhuvudet finns det ingen anledning att byta ut, alternativt modifiera, LEGO-fabrikens transportsystem, vilket tidigare var en av målsättningarna med examensarbetet.

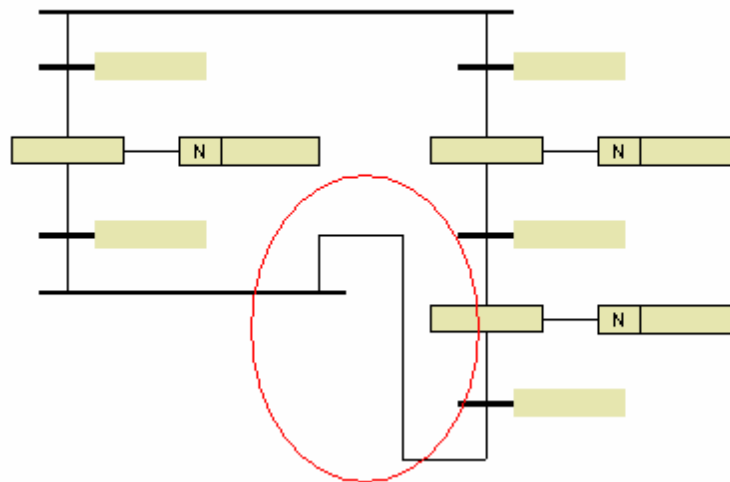
En utredning av vilken vagnanvändningsmodell, som skulle användas, har också tillkommit. Detta för att veta hur man utnyttjar LEGO-fabriken på ett optimalt sätt. Att resultatet av denna utredning överensstämmer med vår ursprungliga målsättning visar att vårt antagande om vilken modell som skulle vara bäst stämmer.

Detektorn för att kunna känna igen vilken typ av jobb som lastas på vagnen har ersatts med vektorn *jobQueue*. Denna vektor återfinns i ett underprogram för schemaläggaren och hanterar sex jobb dvs. tre jobb av typ 1 och tre av typ 2. Vektorn kan lätt bytas ut mot en vektor med fler platser. Att detektorn ersattes med en programmeringsteknisk lösning beror på tidsbristen som uppstod då vagnens beteende analyserades.

Maskinordning styrs som planerat via knappatsen, först gör man en återställning av processen genom att trycka på knappen "Återställ/Timeout", lysdioden för "Timeout" tänds. När alla maskiner samt transportsystemet har återställts, trycker man på knappen "Ändra körplan" och lysdioden för "Ändra" tänds. Samtidigt släcks lysdioden för "Timeout". Därefter ställer man maskinordningen för jobb av typ 1. En maskin i taget och totalt tre maskiner väljs. När en maskin har valts tänds lysdioden för respektive maskin. När tre maskiner valts släcks lysdioderna för dessa efter en sekunds väntetid. Man kan nu ställa maskinordning för jobb av typ 2 på motsvarande sätt. Efter att de tre maskinerna för jobb av typ 2 har valts släcks lysdioderna för dessa och för "Ändra" samtidigt som "Verkställ" tänds. Allt detta sker efter ytterligare en sekunds väntetid. Därefter kan man trycka på knappen "Verkställ" för att starta processen. Vid knapptryckningen släcks lysdioden för "Verkställ" och processen startar.

Under programmeringsarbetets gång har två väsentliga problem med 4CONTROL [2] upptäckts. Den första är en begränsning hos PLC-modulerna vilket innebär att man endast kan ladda ner åtta programinstanser per PLC-modul.

Det andra problemet uppkom, då vi fick platsbrist. När vi gjorde enligt figur 5.1 erhöles felet "FATAL ERROR" vid exekvering, dock inte vid kompilering. Någon hänvisning till var felet fanns i koden, fanns inte att få. Genom att jobba baklänges och ta bort tillagd kod kom vi fram till orsaken till vårt problem. Då 4CONTROL [2] utför operationerna från vänster till höger samt uppifrån och ner kan man inte ansluta en sekvens genom att dra den baklänges och uppåt för anslutning till den uppsamlande linjen för alternativ parallell sekvens.



Figur 5.1: Felaktig SFC i högra sekvensen, röd ring.



## 6 Utvecklingspotential

Det finns egentligen en obegränsad utvecklingspotential hos LEGO-fabriken. Det handlar helt enkelt om hur mycket tid och pengar man är beredd att lägga ner på LEGO-fabriken. Nedan beskrivs ett antal utvecklingsmöjligheter:

1. Under examensarbetets gång har det visat sig att vagnen färdas med olika hastigheter beroende på färdriktningen. Vagnen färdas fortare åt vänster än åt höger. En analys av detta och eventuella åtgärder skulle vara önskvärt. Man skulle kunna byta vagn och räls mot ett annat transportsystem med större precision.
2. Fotogivarna skulle även de kunna byggas om enligt principen som förklarades i kapitel 3.5. Om man byter ut transportsystemet är det även möjligt att byta ut hela givarsystemet. På så sätt erhåller man ett transportsystem med ännu större precision än om man bara byter ett av systemen.
3. Man kan bygga en detektor som känner igen olika typer av jobb, dvs. läser av LEGO-bitarna. Om man endast har två typer av jobb räcker det med en enkel detektor som läser av om LEGO-biten är svart eller vit. Vid fler än två typer av jobb krävs en mera avancerad detektor. Då en detektor används behöver inte jobben vara sorterade enligt en viss fördefinierad ordning. Dagens system kräver att jobbordningen är fördefinierad i programmet. Detta gäller även antalet jobb.
4. Man kan göra LEGO-fabriken fjärrstyrd och övervaka hela processen via en webbkamera eller något liknade. Fjärrstyrning och programmering av processen hade kunnat skötas från en extern terminal om man designar ett användargränssnitt för Ethernet.

## 7 Referenser

1. Andersson, Dan; Davidsson, Joakim; Nyman, Martin; Larsson, Martin; Philipp, Pontos (2004)  
*Legofabriken, Projektkurs i Industriell Automation*  
IEA, LTH, Lund
2. Softing 4CONTROL Engineering V2.1 (2004)  
Softing AG, <http://www.softing.com>
3. Microsoft Excel XP  
Hjälpfunktion (2004)
4. Blom, Gunnar  
*Sannolikhetsteori med tillämpningar*, andra upplagan 2001  
ISBN 91-44-04372-4, Studentlitteratur
5. Olsson, Gustaf, Rosen, Christian  
*Industrial automation, applications, structures and systems*, Revised edition 2004  
IEA, LTH, Lund

## Appendix A

Den teoretiska modellen innebär att vagnanvändningen analyseras, dvs. man undersöker hur man bäst utnyttjar vagnens båda buffertplatser. Ska man ha bestämda buffertplatser då man har mer än en typ av jobb eller inte?

### A.1 Förklaring

För att ta reda på antalet längdenheter mellan maskinerna samt mellan vagnens buffertplatser räknades antalet LEGO-ploppar mellan dessa. En LEGO-plopp motsvarar en längdenhet.

| Från ↔ Till | Antal l.e. |
|-------------|------------|
| In ↔ Drl    | 24         |
| Drl ↔ Wel   | 27         |
| Wel ↔ Grd   | 26         |
| Grd ↔ Out   | 26         |
| B1 ↔ B2     | 7          |

Tabell A.1: Antalet längdenheter mellan de olika stopplatserna i fabriken.

För att kunna sätta ett mått på hur lång tid det tar att köra igenom en sekvens av jobb bestämdes att det tar 15 tidsenheter att köra en maskin och tre tidsenheter att köra mellan två intilliggande stationer. Lastning respektive lossning tar två tidsenheter och slutligen att körning mellan vagnens buffertplatser tar en tidsenhet.

För att kunna hålla reda på vilken typ av jobb som ligger på en viss buffertplats används följande variabler; en 0:a motsvarar inget jobb, en 1:a motsvarar jobb av typ 1 samt en 2:a motsvarar jobb av typ 2. Nedanstående tabell visar hur buffertplatserna B1 och B2 kan vara belagda.

| B1 | B2 |
|----|----|
| 0  | 0  |
| 0  | 1  |
| 0  | 2  |
| 1  | 0  |
| 2  | 0  |
| 1  | 1  |
| 1  | 2  |
| 2  | 1  |
| 2  | 2  |

Tabell A.2: Beläggning av buffertplatserna B1 och B2.

|         |    |   |      |    |            |    |            |            |
|---------|----|---|------|----|------------|----|------------|------------|
| Buffert | 10 |   | 12   |    | 02         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2  |   | 3    |    | 4          |    | 9          |            |
| l.e.    |    | 7 |      | 17 |            | 34 |            | 58         |
| Ordning | In | → | Vagn | →  | Drl - Vagn | →  |            |            |
|         | A  | B | C    | D  | E          | F  | G          | H          |

*Exempel A.1: Utdrag ur en av de teoretiska beräkningarna, för att närmre kunna förklara kolumnerna.*

För att kunna förstå den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet förklaras ovanstående exempel kolumnvis.

- A. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 1 på buffertplats 1. Detta tar två tidsenheter att utföra.
- B. Vagnen förflyttar sig sju längdenheter, dvs. en vagnslängd.
- C. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 2 på buffertplats 2. Lastningen tar två tidsenheter och vagnkörningen tar en tidsenhet att utföra, totalt tre tidsenheter.
- D. Vagnen förflyttar sig 17 längdenheter, dvs. avståndet mellan inbufferten och borren minus vagnens längd.
- E. Vagnen är vid borren och lossar ett jobb av typ 1. Körning mellan inbufferten och borren tar tre tidsenheter, men då man inte kör vagnens längd räknas en tidsenhet bort. Lossning tar två tidsenheter, dvs. detta tar fyra tidsenheter att utföra.
- F. Vagnen förflyttar sig 34 längdenheter, dvs. avståndet mellan borren och svetsen plus vagnens längd.
- G. Summering av antalet tidsenheter på denna rad av utförda händelser, totalt nio tidsenheter.
- H. Summering av antalet längdenheter på denna rad av utförda händelser, totalt 54 längdenheter.

## A.2 Ett jobb, en buffertplats

Den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet då endast en typ av jobb och en buffertplats används finns nedan.

|         |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |             |             |
|---------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-------------|-------------|
| Buffert | 10  |    | 10  |    | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 2   |    | 22  |    | 5   |    | 8   |    | 5   |    | 5   | 47          |             |
| l.e.    |     | 24 |     | 27 |     | 51 |     | 24 |     | 27 |     |             | 179         |
| Ordning | In  | →  | Drl | →  | Wel | →  | In  | →  | Drl | →  | Wel | →           |             |
| Buffert | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5   |    | 8   |    | 5   |    | 8   |    | 5   |    | 8   | 39          |             |
| l.e.    |     | 53 |     | 27 |     | 51 |     | 24 |     | 53 |     |             | 234         |
| Ordning | Grd | →  | Drl | →  | Wel | →  | In  | →  | Drl | →  | Grd | →           |             |
| Buffert | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5   |    | 8   |    | 5   |    | 8   |    | 5   |    | 8   | 39          |             |
| l.e.    |     | 52 |     | 26 |     | 53 |     | 27 |     | 51 |     |             | 233         |
| Ordning | Out | →  | Wel | →  | Grd | →  | Drl | →  | Wel | →  | In  | →           |             |
| Buffert | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5   |    | 8   |    | 5   |    | 8   |    | 5   |    | 8   | 39          |             |
| l.e.    |     | 53 |     | 26 |     | 52 |     | 26 |     | 53 |     |             | 237         |
| Ordning | Drl | →  | Grd | →  | Out | →  | Wel | →  | Grd | →  | Drl | →           |             |
| Buffert | 00  |    | 10  |    | 00  |    | 10  |    | 10  |    | 00  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5   |    | 5   |    | 5   |    | 8   |    | 22  |    | 5   | 50          |             |
| l.e.    |     | 26 |     | 26 |     | 52 |     | 26 |     | 26 |     |             | 156         |
| Ordning | Wel | →  | Grd | →  | Out | →  | Wel | →  | Grd | →  | Out |             |             |
|         |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     | Totalt t.e. | Totalt l.e. |
|         |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     | 214         | 1039        |

## Appendix B

Den teoretiska modellen innebär att vagnanvändningen analyseras, dvs. man undersöker hur man bäst utnyttjar vagnens båda buffertplatser. Ska man ha bestämda buffertplatser då man har mer än en typ av jobb eller inte?

### B.1 Förklaring

För att ta reda på antalet längdenheter mellan maskinerna samt mellan vagnens buffertplatser räknades antalet LEGO-ploppar mellan dessa. En LEGO-plopp motsvarar en längdenhet.

| Från ↔ Till | Antal l.e. |
|-------------|------------|
| In ↔ Drl    | 24         |
| Drl ↔ Wel   | 27         |
| Wel ↔ Grd   | 26         |
| Grd ↔ Out   | 26         |
| B1 ↔ B2     | 7          |

Tabell B.1: Antalet längdenheter mellan de olika stopplatserna i fabriken.

För att kunna sätta ett mått på hur lång tid det tar att köra igenom en sekvens av jobb bestämdes att det tar 15 tidsenheter att köra en maskin och tre tidsenheter att köra mellan två intilliggande stationer. Lastning respektive lossning tar två tidsenheter och slutligen att körning mellan vagnens buffertplatser tar en tidsenhet.

För att kunna hålla reda på vilken typ av jobb som ligger på en viss buffertplats används följande variabler; en 0:a motsvarar inget jobb, en 1:a motsvarar jobb av typ 1 samt en 2:a motsvarar jobb av typ 2. Nedanstående tabell visar hur buffertplatserna B1 och B2 kan vara belagda.

| B1 | B2 |
|----|----|
| 0  | 0  |
| 0  | 1  |
| 0  | 2  |
| 1  | 0  |
| 2  | 0  |
| 1  | 1  |
| 1  | 2  |
| 2  | 1  |
| 2  | 2  |

Tabell B.2: Beläggning av buffertplatserna B1 och B2.

|         |    |   |      |    |            |    |            |            |
|---------|----|---|------|----|------------|----|------------|------------|
| Buffert | 10 |   | 12   |    | 02         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2  |   | 3    |    | 4          |    | 9          |            |
| l.e.    |    | 7 |      | 17 |            | 34 |            | 58         |
| Ordning | In | → | Vagn | →  | Drl - Vagn | →  |            |            |
|         | A  | B | C    | D  | E          | F  | G          | H          |

*Exempel B.1: Utdrag ur en av de teoretiska beräkningarna, för att närmre kunna förklara kolumnerna.*

För att kunna förstå den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet förklaras ovanstående exempel kolumnvis.

- A. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 1 på buffertplats 1. Detta tar två tidsenheter att utföra.
- B. Vagnen förflyttar sig sju längdenheter, dvs. en vagnslängd.
- C. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 2 på buffertplats 2. Lastningen tar två tidsenheter och vagnkörningen tar en tidsenhet att utföra, totalt tre tidsenheter.
- D. Vagnen förflyttar sig 17 längdenheter, dvs. avståndet mellan inbufferten och borren minus vagnens längd.
- E. Vagnen är vid borren och lossar ett jobb av typ 1. Körning mellan inbufferten och borren tar tre tidsenheter, men då man inte kör vagnens längd räknas en tidsenhet bort. Lossning tar två tidsenheter, dvs. detta tar fyra tidsenheter att utföra.
- F. Vagnen förflyttar sig 34 längdenheter, dvs. avståndet mellan borren och svetsen plus vagnens längd.
- G. Summering av antalet tidsenheter på denna rad av utförda händelser, totalt nio tidsenheter.
- H. Summering av antalet längdenheter på denna rad av utförda händelser, totalt 54 längdenheter.

## B.2 Ett jobb, två buffertplatser

Den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet då endast en typ av jobb, men två buffertplatser används finns nedan.

|         |            |    |            |    |            |            |            |
|---------|------------|----|------------|----|------------|------------|------------|
| Buffert | 10         |    | 11         |    | 11         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2          |    | 3          |    | 21         | 26         |            |
| l.e.    |            | 7  |            | 17 |            |            | 31         |
| Ordning | In         | →  | Vagn       | →  | Drl - Vagn | →          |            |
| Buffert | 10         |    | 00         |    | 10         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 4          |    | 8          | 15         |            |
| l.e.    |            | 20 |            | 51 |            |            | 102        |
| Ordning | Vagn       | →  | Wel - Vagn | →  | In         | →          |            |
| Buffert | 11         |    | 01         |    | 11         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 6          |    | 3          |    | 5          | 14         |            |
| l.e.    |            | 7  |            | 27 |            |            | 41         |
| Ordning | Drl + Vagn | →  | Vagn       | →  | Wel        | →          |            |
| Buffert | 10         |    | 00         |    | 10         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 4          |    | 11         | 18         |            |
| l.e.    |            | 19 |            | 77 |            |            | 127        |
| Ordning | Vagn       | →  | Grd - Vagn | →  | In         | →          |            |
| Buffert | 11         |    | 01         |    | 11         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 6          |    | 3          |    | 5          | 14         |            |
| l.e.    |            | 7  |            | 27 |            |            | 41         |
| Ordning | Drl + Vagn | →  | Vagn       | →  | Wel        | →          |            |
| Buffert | 10         |    | 11         |    | 01         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 5          |    | 3          | 11         |            |
| l.e.    |            | 26 |            | 7  |            |            | 66         |
| Ordning | Vagn       | →  | Grd        | →  | Vagn       | →          |            |
| Buffert | 00         |    | 10         |    | 11         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 6          |    | 12         |    | 6          | 24         |            |
| l.e.    |            | 86 |            | 34 |            |            | 127        |
| Ordning | Out + Vagn | →  | Drl        | →  | Wel + Vagn | →          |            |
| Buffert | 01         |    | 11         |    | 10         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 5          |    | 3          | 11         |            |
| l.e.    |            | 26 |            | 7  |            |            | 52         |
| Ordning | Vagn       | →  | Grd        | →  | Vagn       | →          |            |
| Buffert | 00         |    | 10         |    | 11         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 4          |    | 8          |    | 6          | 18         |            |
| l.e.    |            | 52 |            | 33 |            |            | 92         |
| Ordning | Out - Vagn | →  | Wel        | →  | Grd + Vagn | →          |            |

Fortsättning på nästa sida.



|         |      |    |            |    |            |             |             |
|---------|------|----|------------|----|------------|-------------|-------------|
| Buffert | 01   |    | 00         |    | 10         | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 3    |    | 6          |    | 11         | 20          |             |
| l.e.    |      | 33 |            | 33 |            |             | 92          |
| Ordning | Vagn | →  | Out + Vagn | →  | Grd + Vagn | →           |             |
| Buffert | 00   |    |            |    |            | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5    |    |            |    |            | 5           |             |
| l.e.    |      |    |            |    |            |             | 0           |
| Ordning | Out  |    |            |    |            |             |             |
|         |      |    |            |    |            | Totalt t.e. | Totalt l.e. |
|         |      |    |            |    |            | 176         | 771         |

## Appendix C

Den teoretiska modellen innebär att vagnanvändningen analyseras, dvs. man undersöker hur man bäst utnyttjar vagnens båda buffertplatser. Ska man ha bestämda buffertplatser då man har mer än en typ av jobb eller inte?

### C.1 Förklaring

För att ta reda på antalet längdenheter mellan maskinerna samt mellan vagnens buffertplatser räknades antalet LEGO-ploppar mellan dessa. En LEGO-plopp motsvarar en längdenhet.

| Från ↔ Till | Antal l.e. |
|-------------|------------|
| In ↔ Drl    | 24         |
| Drl ↔ Wel   | 27         |
| Wel ↔ Grd   | 26         |
| Grd ↔ Out   | 26         |
| B1 ↔ B2     | 7          |

Tabell C.1: Antalet längdenheter mellan de olika stopplatserna i fabriken.

För att kunna sätta ett mått på hur lång tid det tar att köra igenom en sekvens av jobb bestämdes att det tar 15 tidsenheter att köra en maskin och tre tidsenheter att köra mellan två intilliggande stationer. Lastning respektive lossning tar två tidsenheter och slutligen att körning mellan vagnens buffertplatser tar en tidsenhet.

För att kunna hålla reda på vilken typ av jobb som ligger på en viss buffertplats används följande variabler; en 0:a motsvarar inget jobb, en 1:a motsvarar jobb av typ 1 samt en 2:a motsvarar jobb av typ 2. Nedanstående tabell visar hur buffertplatserna B1 och B2 kan vara belagda.

| B1 | B2 |
|----|----|
| 0  | 0  |
| 0  | 1  |
| 0  | 2  |
| 1  | 0  |
| 2  | 0  |
| 1  | 1  |
| 1  | 2  |
| 2  | 1  |
| 2  | 2  |

Tabell C.2: Beläggning av buffertplatserna B1 och B2.

|         |    |   |      |    |            |    |            |            |
|---------|----|---|------|----|------------|----|------------|------------|
| Buffert | 10 |   | 12   |    | 02         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2  |   | 3    |    | 4          |    | 9          |            |
| l.e.    |    | 7 |      | 17 |            | 34 |            | 58         |
| Ordning | In | → | Vagn | →  | Drl - Vagn | →  |            |            |
|         | A  | B | C    | D  | E          | F  | G          | H          |

*Exempel C.1: Utdrag ur en av de teoretiska beräkningarna, för att närmre kunna förklara kolumnerna.*

För att kunna förstå den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet förklaras ovanstående exempel kolumnvis.

- A. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 1 på buffertplats 1. Detta tar två tidsenheter att utföra.
- B. Vagnen förflyttar sig sju längdenheter, dvs. en vagnslängd.
- C. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 2 på buffertplats 2. Lastningen tar två tidsenheter och vagnkörningen tar en tidsenhet att utföra, totalt tre tidsenheter.
- D. Vagnen förflyttar sig 17 längdenheter, dvs. avståndet mellan inbufferten och borren minus vagnens längd.
- E. Vagnen är vid borren och lossar ett jobb av typ 1. Körning mellan inbufferten och borren tar tre tidsenheter, men då man inte kör vagnens längd räknas en tidsenhet bort. Lossning tar två tidsenheter, dvs. detta tar fyra tidsenheter att utföra.
- F. Vagnen förflyttar sig 34 längdenheter, dvs. avståndet mellan borren och svetsen plus vagnens längd.
- G. Summering av antalet tidsenheter på denna rad av utförda händelser, totalt nio tidsenheter.
- H. Summering av antalet längdenheter på denna rad av utförda händelser, totalt 54 längdenheter.

## C.2 Två jobb, en buffertplats

Den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet då två typer av jobb, men endast en buffertplats används finns nedan.

|         |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     |             |             |
|---------|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-------------|-------------|
| Buffert | 10  |    | 10  |    | 10  |    | 00  |    | 20  |    | 00  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 2   |    | 22  |    | 22  |    | 5   |    | 11  |    | 8   | 70          |             |
| l.e.    |     | 24 |     | 27 |     | 26 |     | 77 |     | 51 |     | 26          | 231         |
| Ordning | In  | →  | Drl | →  | Wel | →  | Grd | →  | In  | →  | Wel | →           |             |
| Buffert | 10  |    | 00  |    | 20  |    | 20  |    | 20  |    | 00  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5   |    | 5   |    | 8   |    | 22  |    | 25  |    | 11  | 76          |             |
| l.e.    |     | 26 |     | 52 |     | 26 |     | 53 |     | 79 |     | 103         | 339         |
| Ordning | Grd | →  | Out | →  | Wel | →  | Grd | →  | Drl | →  | Out | →           |             |
| Buffert | 10  |    | 10  |    | 10  |    | 00  |    | 20  |    | 00  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 14  |    | 22  |    | 22  |    | 5   |    | 11  |    | 8   | 82          |             |
| l.e.    |     | 24 |     | 27 |     | 26 |     | 77 |     | 51 |     | 26          | 231         |
| Ordning | In  | →  | Drl | →  | Wel | →  | Grd | →  | In  | →  | Wel | →           |             |
| Buffert | 10  |    | 00  |    | 20  |    | 20  |    | 20  |    | 00  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5   |    | 5   |    | 8   |    | 22  |    | 25  |    | 11  | 76          |             |
| l.e.    |     | 26 |     | 52 |     | 26 |     | 53 |     | 79 |     | 103         | 339         |
| Ordning | Grd | →  | Out | →  | Wel | →  | Grd | →  | Drl | →  | Out | →           |             |
| Buffert | 10  |    | 10  |    | 10  |    | 00  |    | 20  |    | 00  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 14  |    | 22  |    | 22  |    | 5   |    | 11  |    | 8   | 82          |             |
| l.e.    |     | 24 |     | 27 |     | 26 |     | 77 |     | 51 |     | 26          | 231         |
| Ordning | In  | →  | Drl | →  | Wel | →  | Grd | →  | In  | →  | Wel | →           |             |
| Buffert | 10  |    | 00  |    | 20  |    | 20  |    | 20  |    | 00  | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5   |    | 5   |    | 8   |    | 22  |    | 25  |    | 11  | 76          |             |
| l.e.    |     | 26 |     | 52 |     | 26 |     | 53 |     | 79 |     |             | 236         |
| Ordning | Grd | →  | Out | →  | Wel | →  | Grd | →  | Drl | →  | Out |             |             |
|         |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     | Totalt t.e. | Totalt l.e. |
|         |     |    |     |    |     |    |     |    |     |    |     | 462         | 1607        |

## Appendix D

Den teoretiska modellen innebär att vagnanvändningen analyseras, dvs. man undersöker hur man bäst utnyttjar vagnens båda buffertplatser. Ska man ha bestämda buffertplatser då man har mer än en typ av jobb eller inte?

### D.1 Förklaring

För att ta reda på antalet längdenheter mellan maskinerna samt mellan vagnens buffertplatser räknades antalet LEGO-ploppar mellan dessa. En LEGO-plopp motsvarar en längdenhet.

| Från ↔ Till | Antal l.e. |
|-------------|------------|
| In ↔ Drl    | 24         |
| Drl ↔ Wel   | 27         |
| Wel ↔ Grd   | 26         |
| Grd ↔ Out   | 26         |
| B1 ↔ B2     | 7          |

Tabell D.1: Antalet längdenheter mellan de olika stopplatserna i fabriken.

För att kunna sätta ett mått på hur lång tid det tar att köra igenom en sekvens av jobb bestämdes att det tar 15 tidsenheter att köra en maskin och tre tidsenheter att köra mellan två intilliggande stationer. Lastning respektive lossning tar två tidsenheter och slutligen att körning mellan vagnens buffertplatser tar en tidsenhet.

För att kunna hålla reda på vilken typ av jobb som ligger på en viss buffertplats används följande variabler; en 0:a motsvarar inget jobb, en 1:a motsvarar jobb av typ 1 samt en 2:a motsvarar jobb av typ 2. Nedanstående tabell visar hur buffertplatserna B1 och B2 kan vara belagda.

| B1 | B2 |
|----|----|
| 0  | 0  |
| 0  | 1  |
| 0  | 2  |
| 1  | 0  |
| 2  | 0  |
| 1  | 1  |
| 1  | 2  |
| 2  | 1  |
| 2  | 2  |

Tabell D.2: Beläggning av buffertplatserna B1 och B2.

|         |    |   |      |    |            |    |            |            |
|---------|----|---|------|----|------------|----|------------|------------|
| Buffert | 10 |   | 12   |    | 02         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2  |   | 3    |    | 4          |    | 9          |            |
| l.e.    |    | 7 |      | 17 |            | 34 |            | 58         |
| Ordning | In | → | Vagn | →  | Drl - Vagn | →  |            |            |
|         | A  | B | C    | D  | E          | F  | G          | H          |

*Exempel D.1: Utdrag ur en av de teoretiska beräkningarna, för att närmre kunna förklara kolumnerna.*

För att kunna förstå den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet förklaras ovanstående exempel kolumnvis.

- A. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 1 på buffertplats 1. Detta tar två tidsenheter att utföra.
- B. Vagnen förflyttar sig sju längdenheter, dvs. en vagnslängd.
- C. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 2 på buffertplats 2. Lastningen tar två tidsenheter och vagnkörningen tar en tidsenhet att utföra, totalt tre tidsenheter.
- D. Vagnen förflyttar sig 17 längdenheter, dvs. avståndet mellan inbufferten och borren minus vagnens längd.
- E. Vagnen är vid borren och lossar ett jobb av typ 1. Körning mellan inbufferten och borren tar tre tidsenheter, men då man inte kör vagnens längd räknas en tidsenhet bort. Lossning tar två tidsenheter, dvs. detta tar fyra tidsenheter att utföra.
- F. Vagnen förflyttar sig 34 längdenheter, dvs. avståndet mellan borren och svetsen plus vagnens längd.
- G. Summering av antalet tidsenheter på denna rad av utförda händelser, totalt nio tidsenheter.
- H. Summering av antalet längdenheter på denna rad av utförda händelser, totalt 54 längdenheter.

## D.2 Två jobb, två buffertplatser, ej specifik plats

Den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet då två typer av jobb och två buffertplatser används, dock ej specifika finns nedan.

|         |            |     |            |     |            |            |            |
|---------|------------|-----|------------|-----|------------|------------|------------|
| Buffert | 10         |     | 12         |     | 02         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2          |     | 3          |     | 4          | 9          |            |
| l.e.    |            | 7   |            | 17  |            | 34         | 58         |
| Ordning | In         | →   | Vagn       | →   | Drl - Vagn | →          |            |
| Buffert | 00         |     | 10         |     | 12         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 6          |     | 9          |     | 9          | 24         |            |
| l.e.    |            | 58  |            | 58  |            | 26         | 142        |
| Ordning | Wel + Vagn | →   | In + Vagn  | →   | Wel + Vagn | →          |            |
| Buffert | 10         |     | 11         |     | 01         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 5          |     | 8          |     | 3          | 16         |            |
| l.e.    |            | 53  |            | 7   |            | 34         | 94         |
| Ordning | Grd        | →   | Drl        | →   | Vagn       | →          |            |
| Buffert | 00         |     | 20         |     | 21         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 6          |     | 9          |     | 9          | 24         |            |
| l.e.    |            | 58  |            | 58  |            | 7          | 123        |
| Ordning | Wel + Vagn | →   | In + Vagn  | →   | Wel + Vagn | →          |            |
| Buffert | 01         |     | 21         |     | 20         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |     | 5          |     | 3          | 11         |            |
| l.e.    |            | 26  |            | 7   |            | 53         | 86         |
| Ordning | Vagn       | →   | Grd        | →   | Vagn       | →          |            |
| Buffert | 21         |     | 01         |     | 21         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 8          |     | 3          |     | 5          | 16         |            |
| l.e.    |            | 7   |            | 27  |            | 7          | 41         |
| Ordning | Drl        | →   | Vagn       | →   | Wel        | →          |            |
| Buffert | 20         |     | 21         |     | 01         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |     | 5          |     | 3          | 11         |            |
| l.e.    |            | 26  |            | 7   |            | 33         | 66         |
| Ordning | Vagn       | →   | Grd        | →   | Vagn       | →          |            |
| Buffert | 00         |     | 10         |     | 12         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 6          |     | 15         |     | 6          | 27         |            |
| l.e.    |            | 110 |            | 31  |            | 7          | 148        |
| Ordning | Out + Vagn | →   | In + Vagn  | →   | Drl + Vagn | →          |            |
| Buffert | 02         |     | 00         |     | 20         | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |     | 12         |     | 15         | 30         |            |
| l.e.    |            | 86  |            | 110 |            | 58         | 254        |
| Ordning | Vagn       | →   | Out + Vagn | →   | In + Vagn  | →          |            |

Fortsättning på nästa sida.

|         |            |    |            |    |            |    |             |             |
|---------|------------|----|------------|----|------------|----|-------------|-------------|
| Buffert | 21         |    | 01         |    | 21         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 9          |    | 3          |    | 5          |    | 17          |             |
| l.e.    |            | 7  |            | 26 |            | 7  |             | 40          |
| Ordning | Wel + Vagn | →  | Vagn       | →  | Grd        | →  |             |             |
| Buffert | 20         |    | 21         |    | 01         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 3          |    | 8          |    | 3          |    | 14          |             |
| l.e.    |            | 53 |            | 7  |            | 27 |             | 87          |
| Ordning | Vagn       | →  | Drl        | →  | Vagn       | →  |             |             |
| Buffert | 21         |    | 20         |    | 21         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5          |    | 3          |    | 5          |    | 13          |             |
| l.e.    |            | 7  |            | 26 |            | 7  |             | 40          |
| Ordning | Wel        | →  | Vagn       | →  | Grd        | →  |             |             |
| Buffert | 01         |    | 00         |    | 20         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 3          |    | 6          |    | 12         |    | 21          |             |
| l.e.    |            | 33 |            | 86 |            | 34 |             | 153         |
| Ordning | Vagn       | →  | Out + Vagn | →  | Drl + Vagn | →  |             |             |
| Buffert | 21         |    | 01         |    | 21         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 6          |    | 7          |    | 5          |    | 18          |             |
| l.e.    |            | 45 |            | 26 |            | 7  |             | 78          |
| Ordning | Wel + Vagn | →  | Out - Vagn | →  | Grd        | →  |             |             |
| Buffert | 20         |    | 00         |    | 10         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 3          |    | 9          |    | 8          |    | 20          |             |
| l.e.    |            | 60 |            | 53 |            | 26 |             | 139         |
| Ordning | Vagn       | →  | Drl + Vagn | →  | Grd        | →  |             |             |
| Buffert | 00         |    | 20         |    | 00         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 5          |    | 11         |    | 11         |    | 27          |             |
| l.e.    |            | 79 |            | 79 |            |    |             | 158         |
| Ordning | Out        | →  | Drl        | →  | Out        |    |             |             |
|         |            |    |            |    |            |    | Totalt t.e. | Totalt l.e. |
|         |            |    |            |    |            |    | 298         | 1707        |



## Appendix E

Den teoretiska modellen innebär att vagnanvändningen analyseras, dvs. man undersöker hur man bäst utnyttjar vagnens båda buffertplatser. Ska man ha bestämda buffertplatser då man har mer än en typ av jobb eller inte?

### E.1 Förklaring

För att ta reda på antalet längdenheter mellan maskinerna samt mellan vagnens buffertplatser räknades antalet LEGO-ploppar mellan dessa. En LEGO-plopp motsvarar en längdenhet.

| Från ↔ Till | Antal l.e. |
|-------------|------------|
| In ↔ Drl    | 24         |
| Drl ↔ Wel   | 27         |
| Wel ↔ Grd   | 26         |
| Grd ↔ Out   | 26         |
| B1 ↔ B2     | 7          |

Tabell E.1: Antalet längdenheter mellan de olika stopplatserna i fabriken.

För att kunna sätta ett mått på hur lång tid det tar att köra igenom en sekvens av jobb bestämdes att det tar 15 tidsenheter att köra en maskin och tre tidsenheter att köra mellan två intilliggande stationer. Lastning respektive lossning tar två tidsenheter och slutligen att körning mellan vagnens buffertplatser tar en tidsenhet.

För att kunna hålla reda på vilken typ av jobb som ligger på en viss buffertplats används följande variabler; en 0:a motsvarar inget jobb, en 1:a motsvarar jobb av typ 1 samt en 2:a motsvarar jobb av typ 2. Nedanstående tabell visar hur buffertplatserna B1 och B2 kan vara belagda.

| B1 | B2 |
|----|----|
| 0  | 0  |
| 0  | 1  |
| 0  | 2  |
| 1  | 0  |
| 2  | 0  |
| 1  | 1  |
| 1  | 2  |
| 2  | 1  |
| 2  | 2  |

Tabell E.2: Beläggning av buffertplatserna B1 och B2.

|         |    |   |      |    |            |    |            |            |
|---------|----|---|------|----|------------|----|------------|------------|
| Buffert | 10 |   | 12   |    | 02         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2  |   | 3    |    | 4          |    | 9          |            |
| l.e.    |    | 7 |      | 17 |            | 34 |            | 58         |
| Ordning | In | → | Vagn | →  | Drl - Vagn | →  |            |            |
|         | A  | B | C    | D  | E          | F  | G          | H          |

*Exempel E.1: Utdrag ur en av de teoretiska beräkningarna, för att närmre kunna förklara kolumnerna.*

För att kunna förstå den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet förklaras ovanstående exempel kolumnvis.

- A. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 1 på buffertplats 1. Detta tar två tidsenheter att utföra.
- B. Vagnen förflyttar sig sju längdenheter, dvs. en vagnslängd.
- C. Vagnen är i inbufferten och blir lastad med ett jobb av typ 2 på buffertplats 2. Lastningen tar två tidsenheter och vagnkörningen tar en tidsenhet att utföra, totalt tre tidsenheter.
- D. Vagnen förflyttar sig 17 längdenheter, dvs. avståndet mellan inbufferten och borren minus vagnens längd.
- E. Vagnen är vid borren och lossar ett jobb av typ 1. Körning mellan inbufferten och borren tar tre tidsenheter, men då man inte kör vagnens längd räknas en tidsenhet bort. Lossning tar två tidsenheter, dvs. detta tar fyra tidsenheter att utföra.
- F. Vagnen förflyttar sig 34 längdenheter, dvs. avståndet mellan borren och svetsen plus vagnens längd.
- G. Summering av antalet tidsenheter på denna rad av utförda händelser, totalt nio tidsenheter.
- H. Summering av antalet längdenheter på denna rad av utförda händelser, totalt 54 längdenheter.

## E.2 Två jobb, två buffertplatser, specifik plats

Den teoretiska beräkningen av vagnanvändandet då två typer av jobb och två specifika buffertplatser används finns nedan.

|         |            |    |            |     |            |    |            |            |
|---------|------------|----|------------|-----|------------|----|------------|------------|
| Buffert | 10         |    | 12         |     | 02         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 2          |    | 3          |     | 4          |    | 9          |            |
| l.e.    |            | 7  |            | 17  |            | 34 |            | 58         |
| Ordning | In         | →  | Vagn       | →   | Drl - Vagn | →  |            |            |
| Buffert | 00         |    | 10         |     | 12         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 6          |    | 11         |     | 6          |    | 23         |            |
| l.e.    |            | 34 |            | 34  |            | 7  |            | 75         |
| Ordning | Wel + Vagn | →  | Drl + Vagn | →   | Wel + Vagn | →  |            |            |
| Buffert | 02         |    | 00         |     | 10         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 6          |     | 12         |    | 21         |            |
| l.e.    |            | 33 |            | 84  |            | 24 |            | 141        |
| Ordning | Vagn       | →  | Grd + Vagn | →   | In + Vagn  | →  |            |            |
| Buffert | 00         |    | 10         |     | 12         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 5          |    | 5          |     | 6          |    | 16         |            |
| l.e.    |            | 27 |            | 33  |            | 7  |            | 67         |
| Ordning | Drl        | →  | Wel        | →   | Grd + Vagn | →  |            |            |
| Buffert | 02         |    | 12         |     | 10         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 8          |     | 3          |    | 14         |            |
| l.e.    |            | 53 |            | 7   |            | 20 |            | 80         |
| Ordning | Vagn       | →  | Drl        | →   | Vagn       | →  |            |            |
| Buffert | 00         |    | 02         |     | 12         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 4          |    | 13         |     | 7          |    | 24         |            |
| l.e.    |            | 20 |            | 46  |            | 26 |            | 92         |
| Ordning | Wel - Vagn | →  | Drl - Vagn | →   | Grd - Vagn | →  |            |            |
| Buffert | 02         |    | 00         |     | 02         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 5          |    | 3          |     | 14         |    | 22         |            |
| l.e.    |            | 7  |            | 103 |            | 7  |            | 117        |
| Ordning | Out        | →  | Vagn       | →   | In         | →  |            |            |
| Buffert | 12         |    | 02         |     | 12         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 5          |     | 5          |    | 13         |            |
| l.e.    |            | 24 |            | 27  |            | 7  |            | 58         |
| Ordning | Vagn       | →  | Drl        | →   | Wel        | →  |            |            |
| Buffert | 10         |    | 00         |     | 10         |    | Summa t.e. | Summa l.e. |
| t.e.    | 3          |    | 4          |     | 8          |    | 15         |            |
| l.e.    |            | 19 |            | 53  |            | 34 |            | 106        |
| Ordning | Vagn       | →  | Grd - Vagn | →   | Drl        | →  |            |            |

Fortsättning på nästa sida.

|         |            |    |            |    |            |    |             |             |
|---------|------------|----|------------|----|------------|----|-------------|-------------|
| Buffert | 12         |    | 02         |    | 12         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 6          |    | 3          |    | 5          |    | 14          |             |
| l.e.    |            | 7  |            | 26 |            | 7  |             | 40          |
| Ordning | Wel + Vagn | →  | Vagn       | →  | Grd        | →  |             |             |
| Buffert | 10         |    | 00         |    | 02         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 3          |    | 4          |    | 13         |    | 20          |             |
| l.e.    |            | 19 |            | 96 |            | 44 |             | 159         |
| Ordning | Vagn       | →  | Out - Vagn | →  | In - Vagn  | →  |             |             |
| Buffert | 12         |    | 10         |    | 12         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 7          |    | 3          |    | 5          |    | 15          |             |
| l.e.    |            | 7  |            | 26 |            | 7  |             | 40          |
| Ordning | Wel - Vagn | →  | Vagn       | →  | Grd        | →  |             |             |
| Buffert | 02         |    | 00         |    | 02         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 3          |    | 7          |    | 5          |    | 15          |             |
| l.e.    |            | 46 |            | 27 |            | 19 |             | 92          |
| Ordning | Vagn       | →  | Drl - Vagn | →  | Wel        | →  |             |             |
| Buffert | 12         |    | 10         |    | 00         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 4          |    | 3          |    | 4          |    | 11          |             |
| l.e.    |            | 7  |            | 19 |            | 72 |             | 98          |
| Ordning | Grd - Vagn | →  | Vagn       | →  | Out - Vagn | →  |             |             |
| Buffert | 02         |    | 00         |    | 02         |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 10         |    | 11         |    | 5          |    | 26          |             |
| l.e.    |            | 79 |            | 26 |            | 53 |             | 158         |
| Ordning | Drl - Vagn | →  | Out        | →  | Grd        | →  |             |             |
| Buffert | 02         |    | 00         |    |            |    | Summa t.e.  | Summa l.e.  |
| t.e.    | 25         |    | 11         |    |            |    | 36          |             |
| l.e.    |            | 79 |            |    |            |    |             | 79          |
| Ordning | Drl        | →  | Out        |    |            |    |             |             |
|         |            |    |            |    |            |    | Totalt t.e. | Totalt l.e. |
|         |            |    |            |    |            |    | 294         | 1460        |

# Appendix F

## analys.m

```
format long

x = [20.0 18.4 18.4 21.6 20.8 23.2 21.6 17.6 20.8 20.8 20.0 16.8 16.8
     18.4 21.6 21.6 22.4 17.6 21.6 20.0 21.6 20.8 22.4 18.5 21.6 18.4
     % Borr höger, Trp
     24.0 22.4 24.0 23.2 24.8 24.8 24.0 24.0 24.0 24.0 23.2 24.0 24.0
     23.2 20.0 24.0 22.4 24.8 23.2 23.2 24.8 23.2 23.2 24.0 24.0 21.6
     % Borr vänster, Trp
     16.0 16.8 16.0 15.2 15.2 16.0 16.0 16.0 16.0 16.8 16.8 14.4 16.0
     16.0 16.0 16.0 16.0 16.0 14.4 16.0 14.4 16.8 16.0 14.4 16.8 16.8
     % Svets höger, Trp
     28.0 26.4 24.0 25.6 28.0 24.8 25.6 24.8 25.6 24.8 25.6 25.6 24.8
     24.8 25.6 24.8 25.6 24.8 24.0 26.4 24.8 24.8 25.6 24.8 22.4 26.4
     % Svets vänster, Trp
     20.0 16.8 20.8 17.6 18.4 22.4 20.8 18.4 21.6 20.0 18.4 18.4 20.0
     17.6 18.4 21.6 21.6 20.8 18.4 18.4 17.6 18.4 18.4 20.8 21.6 20.0
     % Slip höger, Trp
     24.0 23.2 24.0 23.2 21.6 20.0 22.4 21.6 21.6 23.2 24.0 23.2 22.4
     21.6 20.0 24.0 23.2 21.6 24.0 21.6 20.8 22.4 23.2 22.4 21.6 20.0]';
     % Slip vänster, Trp

y = [30.4 31.2 28.8 32.8 32.0 28.8 32.8 29.6 29.6 33.6 29.6 32.8 30.4
     28.8 29.6 28.0 30.4 30.4 30.4 26.6 31.2 30.4 27.2 28.8 29.6 33.6
     % Borr höger, Trp - Sch
     32.0 31.2 31.2 35.2 30.4 34.4 32.0 35.2 31.2 30.4 32.0 32.8 32.0
     31.2 33.6 30.4 33.6 32.8 30.4 32.8 32.0 32.0 31.2 31.2 30.4 29.6
     % Borr vänster, Trp - Sch
     25.6 25.6 24.8 25.6 24.8 25.6 23.2 25.6 20.0 26.4 21.6 24.8 21.6
     21.6 23.2 21.6 27.2 23.2 21.6 22.4 24.0 20.8 20.8 26.4 25.6 24.0
     % Svets höger, Trp - Sch
     32.8 33.6 32.8 33.6 36.0 33.6 31.2 36.8 33.6 33.6 32.8 31.2 28.0
     34.4 36.0 32.8 32.0 33.6 32.0 32.0 32.8 32.8 33.6 30.4 36.0 32.0
     % Svets vänster, Trp - Sch
     28.8 28.0 28.0 28.0 28.0 28.0 26.4 25.6 27.2 27.2 28.8 28.0 28.8
     28.8 32.8 25.6 25.6 26.4 26.4 27.2 32.0 24.0 29.6 29.6 29.6 29.6
     % Slip höger, Trp - Sch
     29.6 30.4 32.8 32.8 32.8 31.2 27.2 27.2 32.0 28.0 31.2 29.6 30.4
     32.0 30.4 28.8 26.4 25.6 32.0 32.8 32.8 30.4 29.6 28.0 28.8 29.6]';
     % Slip vänster, Trp - Sch

xMean = mean(x); % Medelvärde / Väntevärde, E(X) alt. mu, Trp
yMean = mean(y); % Medelvärde / Väntevärde, E(Y) alt. mu, Trp - Sch
totMean = [xMean' yMean' (yMean-xMean)'];
bar(totMean);
title('Medelvärde');
grid;
ylabel('mm');
set(gca,'XTickLabel',{'Borr höger','Borr vänster','Svets höger','Svets vänster',
'Slip höger','Slip vänster'});
legend('Trp','Trp - Sch','Försämring');

xMed = median(x); % Median, Trp
yMed = median(y); % Median, Trp - Sch
totMed = [xMed' yMed' (yMed-xMed)'];
figure
bar(totMed);
title('Median');
grid;
ylabel('mm');
set(gca,'XTickLabel',{'Borr höger','Borr vänster','Svets höger','Svets vänster',
'Slip höger','Slip vänster'});
legend('Trp','Trp - Sch','Försämring');
```

Fortsättning på nästa sida.

```

xVar = var(x);          % Varians, V(X) alt. sigma^2, Trp
yVar = var(y);          % Varians, V(Y) alt. sigma^2, Trp - Sch
totVar = [xVar' yVar' (yVar-xVar)'];
figure
bar(totVar);
title('Varians');
grid;
ylabel('mm^2');
set(gca,'XTickLabel',{'Borr höger','Borr vänster','Svets höger','Svets vänster',
'Slip höger','Slip vänster'});
legend('Trp','Trp - Sch','Försämring');

xStd = std(x);          % Standardavvikelse, D(X) alt sigma, Trp
yStd = std(y);          % Standardavvikelse, D(Y) alt sigma, Trp - Sch
totStd = [xStd' yStd' (yStd-xStd)'];
figure
bar(totStd);
title('Standardavvikelse');
grid;
ylabel('mm');
set(gca,'XTickLabel',{'Borr höger','Borr vänster','Svets höger','Svets vänster',
'Slip höger','Slip vänster'});
legend('Trp','Trp - Sch','Försämring');

xVarCoe = xStd./xMean;   % Variationskoefficient, Trp
yVarCoe = yStd./yMean;   % Variationskoefficient, Trp - Sch
totVarCoe = [xVarCoe' yVarCoe' (yVarCoe-xVarCoe)'];
figure
bar(totVarCoe);
title('Variationskoefficient');
grid;
set(gca,'XTickLabel',{'Borr höger','Borr vänster','Svets höger','Svets vänster',
'Slip höger','Slip vänster'});
legend('Trp','Trp - Sch','Försämring');

for i = 1:6

    xSlh(:,i) = normspec([xMean(:,i)-4 xMean(:,i)+4], xMean(:,i), xStd(:,i));
    % Sannolikheten att vagnen hamnar rätt, Trp

    ySlh(:,i) = normspec([yMean(:,i)-4 yMean(:,i)+4], yMean(:,i), yStd(:,i));
    % Sannolikheten att vagnen hamnar rätt, Trp - Sch

    xFail(:,i) = (1 - xSlh(:,i))*100;   % Risken i procent att vagnen hamnar fel, Trp
    yFail(:,i) = (1 - ySlh(:,i))*100;   % Risken i procent att vagnen hamnar fel, Trp - Sch

end

totFail = [xFail' yFail' (yFail-xFail)'];
figure
bar(totFail);
title('Risken att vagnen hamnar fel');
grid;
ylabel('%');
set(gca,'XTickLabel',{'Borr höger','Borr vänster','Svets höger','Svets vänster',
'Slip höger','Slip vänster'});
legend('Trp','Trp - Sch','Försämring');

```

## Appendix G

### Beskrivning av villkor för val av sekvens

Det finns 16 alternativt parallella sekvenser som avgör vad schemaläggaren ska utföra. Dessa 16 villkor beskrivs nedan, från vänster till höger enligt figur G.1. Den nedanstående listan består av 16 punkter där varje punkt innehåller tre delar enligt följande princip. X motsvarar aktuell sekvens.

X. Beskrivning av vad sekvensen utför.

*Villkor för att sekvensen ska exekveras.*

Villkor förklarad i klartext.



Figur G.1: Programstruktur för schemaläggare.

1. Kör vagnen till inbufferten och lastar ett jobb av typ 1 på buffertplats 1.

*LCData\_ECTransport\_trpSt.trpInEmpty=false AND m1Empty AND  
jobQueue[jobNbr]=false AND B1=false AND (N1+N2)<4 AND N1<3*

inbufferten innehåller jobb **OCH** maskin ett är tom på jobb av typ 1 **OCH** jobb av typ 1 ligger i inbufferten **OCH** buffertplats 1 är tom **OCH** antalet jobb i processen är mindre än fyra **OCH** antalet jobb av typ 1 i processen är mindre än tre

2. Kör vagnen till inbufferten och lastar ett jobb av typ 2 på buffertplats 2.

*LCData\_ECTransport\_trpSt.trpInEmpty=false AND m4Empty AND  
jobQueue[jobNbr]=true AND B2=false AND (N1+N2)<4 AND N2<3*

inbufferten innehåller jobb **OCH** maskin fyra är tom på jobb av typ 2 **OCH** jobb av typ 2 ligger i inbufferten **OCH** buffertplats 2 är tom **OCH** antalet jobb i processen är mindre än fyra **OCH** antalet jobb av typ 2 i processen är mindre än tre

3. Kör vagnen till maskin ett och lossar ett jobb av typ 1 samt ger maskinen klartecken att starta.

*m1Empty AND m1Corr AND B1=true AND In1=true*

maskin ett är tom på jobb av typ 1 **OCH** motsvarande maskin för jobb av typ 2 är tom **OCH** buffertplats 1 är belagd **OCH** vagnen har varit i inbufferten

4. Kör vagnen till maskin fyra och lossar ett jobb av typ 2 samt ger maskinen klartecken att starta.

*m4Empty AND m4Corr AND B2=true AND In2=true*

maskin fyra är tom på jobb av typ 2 **OCH** motsvarande maskin för jobb av typ 1 är tom **OCH** buffertplats 2 är belagd **OCH** vagnen har varit i inbufferten

5. Kör vagnen till maskin ett och lastar ett jobb av typ 1 på buffertplats 1.

*m1Finished AND m2Empty AND B1=false*

maskin ett är färdig **OCH** maskin två är tom på jobb av typ 1 **OCH** buffertplats 1 är tom

6. Kör vagnen till maskin två och lossar ett jobb av typ 1 samt ger maskinen klartecken att starta.

*m2Empty AND m2Corr AND B1=true AND M1=true*

maskin två är tom på jobb av typ 1 **OCH** motsvarande maskin för jobb av typ 2 är tom **OCH** buffertplats 1 är belagd **OCH** vagnen har varit i maskin ett

7. Kör vagnen till maskin fyra och lastar ett jobb av typ 2 på buffertplats 2.

*m4Finished AND m5Empty AND B2=false*

maskin fyra är färdig **OCH** maskin fem är tom på jobb av typ 2 **OCH** buffertplats 2 är tom

8. Kör vagnen till maskin fem och lossar ett jobb av typ 2 samt ger maskinen klartecken att starta.

*m5Empty AND m5Corr AND B2=true AND M4=true*

maskin fem är tom på jobb av typ 2 **OCH** motsvarande maskin för jobb av typ 1 är tom **OCH** buffertplats 2 är belagd **OCH** vagnen har varit i maskin fyra



9. Kör vagnen till maskin två och lastar ett jobb av typ 1 på buffertplats 1.

*m2Finished AND m3Empty AND B1=false*

maskin två är färdig **OCH** maskin tre är tom på jobb av typ 1 **OCH** buffertplats 1 är tom

10. Kör vagnen till maskin tre och lossar ett jobb av typ 1 samt ger maskinen klartecken att starta.

*m3Empty AND m3Corr AND B1=true AND M2=true*

maskin tre är tom på jobb av typ 1 **OCH** motsvarande maskin för jobb av typ 2 är tom **OCH** buffertplats 1 är belagd **OCH** vagnen har varit i maskin två

11. Kör vagnen till maskin fem och lastar ett jobb av typ 2 på buffertplats 2.

*m5Finished AND m6Empty AND B2=false*

maskin fem är färdig **OCH** maskin sex är tom på jobb av typ 2 **OCH** buffertplats 2 är tom

12. Kör vagnen till maskin fem och lossar ett jobb av typ 2 samt ger maskinen klartecken att starta.

*m6Empty AND m6Corr AND B2=true AND M5=true*

maskin sex är tom på jobb av typ 2 **OCH** motsvarande maskin för jobb av typ 1 är tom **OCH** buffertplats 2 är belagd **OCH** vagnen har varit i maskin fem

13. Kör vagnen till maskin tre och lastar ett jobb av typ 1 på buffertplats 1.

*m3Finished AND LCDData\_ECTransport\_trpSt.trpOutBlocked=false AND B1=false*

maskin tre är färdig **OCH** utbufferten är inte blockerad **OCH** buffertplats 1 är tom

14. Kör vagnen till utbufferten och lossar ett jobb av typ 1.

*LCDData\_ECTransport\_trpSt.trpOutBlocked=false AND B1=true AND M3=true*

utbufferten är inte blockerad **OCH** buffertplats 1 är belagd **OCH** vagnen har varit i maskin tre

15. Kör vagnen till maskin sex och lastar ett jobb av typ 2 på buffertplats 2.

*m6Finished AND LCData\_ECTransport\_trpSt.trpOutBlocked=false AND B2=false*

maskin sex är färdig **OCH** utbufferten är inte blockerad **OCH** buffertplats 2 är tom

16. Kör vagnen till utbufferten och lossar ett jobb av typ 2.

*LCData\_ECTransport\_trpSt.trpOutBlocked=false AND B2=true AND M6=true*

utbufferten är inte blockerad **OCH** buffertplats 2 är belagd **OCH** vagnen har varit i maskin sex