

Förord

Detta examensarbete har genomförts vid avdelningen för produktionsekonomi vid Lunds Tekniska Högskola, för det av danska staten ägda DSB. Uppsatsen är om 30 poäng och är skriven mellan februari och december 2008.

Vår målsättning med examensarbetet var att få tillämpa de kunskaper som vi tillgodogjort oss under vår utbildning. Vår önskan är att DSB kommer att kunna använda det arbete vi har gjort under detta examensarbete.

Vi vill tacka våra handledare Stefan Vidgren på DSB och Patrik Tydesjö vid produktionsekonomi som har gjort det möjligt att göra denna uppsats.

Sammanfattning

- Titel:** En simuleringsstudie av tågtrafiknätet på DSB S-tåg AS i Köpenhamn
- Författare:** Björn Johnson, Patrik Bjärkeson
- Handledare:** Patrik Tydesjö, Stefan Vidgren
- Syfte:** Syftet med detta examensarbete är att ta fram en väl fungerande simuleringsmodell för S-tågnätet. Modellen kommer sedan att analyseras med avseende på att höja regulariteten. Därefter presenteras ett förslag på en lokaloptimalplacering av bufferttid för respektive linje.
- Avgränsning:** Detta arbete avser endast att analysera en "normal dag" under rusningstid. Vi bortser därför från oförväntade fel som t.ex. lok som går sönder, olyckor, elfel, signalfel osv.
- Metod:** Detta projektarbete kan definieras som en fallstudie. Vår fallstudie på DSB kan betecknas som en förklarande undersökning. Vi har valt att följa Banks (1998) tolvstegsguide för att genomföra vårt simuleringsprojekt.

Slutsatser:

Alla resultat tyder på att simuleringsmodellen och verkligheten stämmer väl överens. Vi anser därmed att vi har tagit fram en väl fungerande simuleringsmodell för S-tågnätet. Från våra simuleringar har vi dragit slutsatsen att det är mycket viktigt att tågen verkligen anländer till det centrala avsnittet planenligt för att förhindra att tågen blockerar varandra, eftersom blockeringarna ger upphov till de största förseningarna i S-tågnätet. Det är även viktigt att undvika tidiga regularitetsbrott då de oftast är svåra att bli av med och därmed oftast ger regularitetsbrott ända fram till ändhållplatsen.

Nyckelord:

Simulering, lokaloptimering, statistik

Abstract

- Title:** A simulation study of the train network at DSB S-train AS in Copenhagen
- Authors:** Björn Johnson, Patrik Bjärkeson
- Supervisors:** Patrik Tydesjö, Stefan Vidgren
- Purpose:** The purpose of this thesis is to develop a simulation model that represents the S-train network. The model will then be analysed in order to improve the regularity. We will then present a locally optimized proposal on the placement of the buffer time for every train line.
- Delimitation:** This report intends only to analyse a "normal day" during rush hour. We will ignore unexpected course of events, e.g. train breakdowns, accidents, electricity errors and signal errors.
- Method:** This thesis can be defined as a case study with an explanatory examination. We have chosen to follow Banks' (1998) twelve step guide to conduct a simulation project.
- Conclusions:** All results indicate that our model is a good representation of the real situation. We therefore consider our model to be validated. From the

simulation results we have come to the conclusion, that it is very important for the trains to arrive to the central part as planned, in order to prevent the trains from blocking each other. This is because the blockings cause the largest delays in the S-train network. It is also important to avoid regularity violations because they are often hard to get rid off and create regularity violations all the way to the end station.

Key words: Simulation, local optimization, statistics

Innehållsförteckning

1 INTRODUKTION.....	1
1.1 Bakgrund	1
1.2 Problembeskrivning	2
1.3 Syfte	6
1.4 Avgränsning	6
1.5 Användningsområde	7
2 METOD.....	9
2.1 Metodval.....	9
2.2 Utförande av fallstudien.....	10
2.3 Simulering	12
2.4 Förberedande arbete.....	17
2.5 Konceptuell modell	17
2.6 Data insamling	18
2.6.1 Vem skall undersökas	21

2.6.2	Vad skall undersökas.....	22
2.6.3	Ska en total- eller en urvalsundersökning göras.....	22
2.6.4	Insamlingsmetod för data.....	23
2.6.5	Analys av indata.....	24
2.7	Använd mjukvara	27
2.7.1	Extend	27
2.7.2	Matlab.....	28
2.7.3	Microsoft Excel	29
2.8	Verifiering och validering av simuleringsmodellen	29
2.8.1	Verifiering	29
2.8.2	Validering	31
2.9	Simulering och analys.....	32
2.10	Källkritik	33
2.11	Replikation	34
3	TEORI	35
3.1	Inledning	35
3.2	Lognormalfördelning.....	35
3.3	Test av sannolikhetsfördelning.....	38
3.3.1	Chi-två test.....	38
3.4	Skattning av parametrar.....	40
3.4.1	ML – Skattning	40
3.4.2	Stickprovskattning	41

3.5 Statistiska metoder	43
3.5.1 Centrala gränsvärdessatsen	43
3.5.2 Konfidensintervall	45
4 MODELLBESKRIVNING	49
4.1 Beskrivning av S – tågnätet	49
4.2 Skapandet av simuleringsmodellen	50
4.2.1 Konceptuell modell	51
4.2.2 Modellöversättning.....	54
4.2.3 In- och utdata.....	55
4.2.4 Modelförklaring	56
4.2.5 Antaganden i simuleringsmodellen	61
4.3 Uppdelning i delsimuleringar och lokaloptimering	63
4.3.1 Delsimuleringar	63
4.3.2 Lokaloptimering	65
4.3.3 Optimeringsmakron i Excel	67
5 RESULTAT.....	69
5.1 Resultat av verifikation av simuleringsmodellen	69
5.2 Resultat av valideringen på simuleringsmodellen	71
5.3 Validering av indata	72
5.4 Resultat av lokaloptimeringen.....	76
5.4.1 Linje E:s lokaloptimering	76
5.4.2 Resultat regularitet	82

6 SLUTSATS OCH DISKUSSION	85
6.1 Slutsats.....	85
6.2 Diskussion	87
REFERENSER	89
Litteratur	89
Internetkällor	90
Muntliga Källor.....	90
Artiklar	90
APPENDIX A.....	A

1 Introduktion

Det här kapitlet beskriver syftet med problemformuleringen samt användningsområdet för examensarbetet.

1.1 Bakgrund

Danske Statsbaner, förkortat DSB, är Danmarks och Nordens största tågoperatör. Företaget ägs av danska staten genom det danska energi- och transportdepartementet sedan 1999. Trots att DSB är statligt och har ett antal samhällsåtaganden, drivs det som ett vinstdrivande företag. Medan DSB sköter mestadels persontrafik på danska järnvägen, är godstrafik och järnvägsunderhåll aktiviteter DSB inte sysslar med. DSB har ca 9000 anställda och omsätter ca 10.5 miljarder danska kronor per år.

Runt omkring Köpenhamnsområdet driver DSB ett regionalt tågsystem kallat S-tåg . Detta system startades 1934 och består av 7 linjer och 85 stationer utspridda över Köpenhamnsområdet. Varje dag använder sig ungefär 240 000 människor av S-tågssystemet. (<http://www.DSB.dk>)

1.2 Problembeskrivning

Alla har vi någon gång stått och väntat på ett tåg som är försenat. Det finns många faktorer som kan orsaka en försening, t.ex. många passagerare som skall stiga av och på, lokförare som är försenade och följdförseningar som uppkommer för att tidigare tåg har varit försenade osv.

Den danska staten kräver en viss kvalitet på DSB:s arbete med S-tågen. Idag har S-tågen en regularitet under rusningstiden på morgonen på ca. 87%, dvs. 87 % av avgångarna skall vara mindre än 2,5 min försenade. DSB har för avsikt att höja regulariteten, eftersom den danska staten ställer allt högre krav.

DSB arbetar idag efter 4 fokusområden:

1. Fler kunder
2. Tåg i tid
3. Bättre image
4. Effektivare verksamhet

Vårt examensarbete bidrar till att förbättra punkt nummer 2, genom att höja regulariteten genom att förbättra utplaceringen av bufferttiden inom S-tågnätet. Men indirekt påverkar examensarbetet även de andra punkterna, om tågen kommer i tid bidrar det till fler kunder, bättre image och effektivare verksamhet.

DSB S-tåg använder sig av en modell för att planera tidtabellen. Modellen är uppbyggd så att varje linje har 2 st. ändhållplatser med mellanliggande stationer. Mellan varje station finns det en minsta körtid och en

bufferttid. Med minsta körtid menas den minsta tid det tar för tåget att köra mellan två stationer utan störningar. Bufferttid är en extra tid som läggs till på varje hållplats för att eliminera eventuella förseningar som uppkommit. Tidtabellerna är så pass snäva att man lägger stor vikt i att fördela den bufferttid som tilldelas varje linje på ett bra sätt. Det gäller att hitta en bra balans mellan bufferttid och total körtid. En stor bufferttid ger bra punktlighet men också en lång körtid och tvärt om.

För att lösa problemet med hur man skall fördela bufferttiden, så att man minimerar förseningarna, har Kroon, Dekker och Vromans tagit fram en analytisk lösning. Problemet med den är att den endast fungerar för en linje med separat spår. I S-tågnätet finns det 7 olika linjer varav 6 st. har korsande spår, se figur 1.1. Det här gör problemet mycket komplext och därför lämpligt att lösa med hjälp av simulering.

Det här problemet, med utplaceringen av bufferttid, delas upp på två st. examensarbeten pga. sin stora omfattning.

Den första delen, som det här examensarbetet kommer behandla, är mer av ett praktiskt slag. Här skall en simuleringsmodell som beskriver S-tågnätet tas fram, verifieras och därefter valideras. För att göra det möjligt att optimera placeringen av bufferttid kommer S-tågnätet att delas upp i olika delavsnitt. Ett program som optimerar varje delavsnitt av modellen skall skapas. Modellen skall sedan testköras för att man skall hitta den lokaloptimala inställningen av bufferttid. Med lokaloptimal inställning av bufferttid menas att man optimerar varje delavsnitt var för sig med avseende på så hög regularitet som möjligt. Därefter sätts alla optimerade delavsnitt samman och på så sätt fås en

lokaloptimalplacering av bufferttid. Detta görs för varje linje och jämförs sedan med dagens inställning av bufferttid. En mer omfattande förklaring av hur lokaloptimeringen går till tas upp i kapitel 4.3 .

Huvuduppgifterna med det här examensarbetet är att

- Skapa en simuleringsmodell av S-tågnätet
- Verifiera och validera simuleringsmodellen
- Analysera simuleringsresultat och ge förslag på lokaloptimal placering av bufferttid.

Det andra examensarbetet kommer att fokusera på framtagningen av mängden bufferttid som varje delavsnitt tilldelas, till skillnad från detta arbete, som använder sig av redan förutbestämda bufferttider för varje delavsnitt, som fås enligt dagens tidtabell. Det andra examensarbetet kommer sedan att ta fram ett förslag på en mer globaloptimal placering av bufferttid med hjälp av vår simuleringsmodell.



Figur 1.1 Översiktsgörning över S-tågnätet.

1.3 Syfte

Syftet med detta examensarbete är att ta fram en väl fungerande simuleringsmodell för S-tågnätet. Modellen kommer sedan att analyseras med avseende på att höja regulariteten. Därefter presenteras ett förslag på en lokaloptimalplacering av bufferttid för respektive linje.

1.4 Avgränsning

Examensarbetet kommer endast att ta hänsyn till störningar som sker vid hållplatser. Störningar som sker vid andra tillfällen kommer inte att beaktas i arbetet. Detta beror på att DSB anser att sådana sker för sällan och därmed inte skall påverka valet av bufferttider. Vi kommer att använda oss av ett tidigare simuleringsprojekts standardfördelningar för förseningarna vid varje hållplats. Vi kommer dock att göra några stickprov på utvalda hållplatser för att kontrollera rimligheten med fördelningarna. Den här avgränsningen görs eftersom arbetet att ta fram standardfördelning för varje linje vid varje hållplats skulle bli för omfattande för detta examensarbete. Vi kommer att använda samma standardfördelning i både nordgående och sydgående riktning.

1.5 Användningsområde

Simuleringsmodellen gör det möjligt för DSB att testa olika kombinationer av bufferttider, och se vad de får för följder för t.ex. regularitetsbrott eller medelförsening. Detta kan användas för framtida planering av tidtabeller eller då linjerna måste omdirigeras pga. ombyggnad. Modellen kan helt enkelt användas som ett hjälpmedel för DSB när beslut om förändringar i S-tågnätet skall göras. Simuleringsmodellen kommer också att vara grunden för nästa examensarbete som har fokus på att hitta en globaloptimal inställning av bufferttiden.

2 Metod

Detta kapitel behandlar tillvägagångssättet vid litteratursökningen, vilka metoder som använts för att bygga simuleringsmodellen, och hur insamlingen och analysen av data gått till.

2.1 Metodval

Metoden är ett hjälpmedel för att kunna ge en beskrivning av verkligheten eller empirin. Metoden anger vilka tillvägagångssätt som ska användas för att ge en bild av verkligheten. Det finns 2 sätt att arbeta med metodologin. Man kan gå från "teori till empiri", kallat ett deduktivt angreppssätt. Denna strategi går ut på att först ha förväntningar om hur omvärlden ser ut och sedan samla in fakta för att se om dessa förväntningar stämmer överens med verkligheten. Om man tvärtom går "från empiri till teori" kallas det ett induktivt angreppssätt. Här gäller det idealet, att man inte har några förväntningar för hur omvärlden ser ut och samlar in relevant fakta och data för att sedan skapa teorier utifrån det insamlade materialet. I detta arbete används ett induktivt angreppssätt just därför att vi inte har några förväntningar på hur resultatet av projektarbetet kommer att bli. (Jacobsen, 2002)

Detta projektarbete kan betraktas som en fallstudie. En fallstudie definieras som ” en undersökningsdesign som går ut på en detaljerad och ingående analys av ett enda fall (t.ex. en individ, organisation eller situation). (Bryman & Bell, 2005) Detta projektarbete försöker, genom insamling av data och skapandet av en simuleringsmodell för ett specifikt tågssystem på DSB, komma fram till en väl fungerande simuleringsmodell, kan det sägas vara en fallstudie.

Man kan dela in en fallstudie efter avsikten med den, där det finns 2 huvudtyper. I den första är avsikten att beskriva dagens situation mest för att förstå dagens problem. Den andra huvudtypen av fallstudie har avsikten att mäta vilka verkningar eller effekter en åtgärd har, t.ex. vad som händer med produktiviteten i ett företag efter det att ett utbildningsprogram för de anställda har genomförts. Denna typ av problemställningar brukar kallas förklarande eller kausala, detta för att man är intresserad av sambandet mellan vad vi tror är en orsak (utbildningsprogrammet) och en verkan (högre produktivitet). Vår fallstudie på DSB kan betecknas som en förklarande undersökning eftersom vi undersöker vad verkan blir på DSB:s S-tågnät då vi ändrar tågens bufferttider på tågnätets olika stationer. (Jacobsen, 2002)

2.2 Utförande av fallstudien

Ett av momenten i detta projektarbete är att först konstruera en simuleringsmodell som fungerar precis som DSB:s S-tågnät gör idag. Ett annat är att leta upp sannolikhetsfördelningar för hur länge tågen stannar på de olika hållplatserna. För momentet att konstruera

simuleringsmodellen skapas först en konceptuell modell av tågnätet. Denna modell görs sedan mer detaljerad i simuleringsprogrammet "Extend". Därefter samlar vi in kvalitativa data som behövs för att konstruera dessa två modeller. Kvalitativa data är information som fås genom observationer och intervjuer (Jacobsen 2002). Vi har tänkt samla in data genom möten med vår kontaktperson på DSB, men även med annan personal på företaget .

Det andra momentet i projektarbetet är, som nämnts ovan, att leta upp sannolikhetsfördelningar för hur länge tågen stannar på de olika hållplatserna i tågnätet. För att kunna genomföra detta moment behöver vi samla in kvantitativa data från DSB:s databas. Kvantitativa data kan sägas vara data som kan mätas på en numerisk skala. (Jacobsen, 2002) De data vi hämtar in från DSB kommer vi att utföra indataanalys på. Vi kommer också att göra utdataanalys på resultaten från den i arbetet konstruerade simuleringsmodellen. Under alla delmomenten i fallstudien kommer nödvändig litteratur från relevanta källor att anskaffas och läsas in så att varje delmoment kan genomföras korrekt. Följande rubriker i detta metodkapitel kommer mer ingående beskriva delmomenten.

2.3 Simulering

Man kan i stort sett dela in simuleringsmodeller i tre olika kategorier beroende på deras egenskaper.

Statisk eller dynamisk. I en statisk modell spelar inte tiden någon roll. I en dynamisk modell spelar tiden en avgörande roll.

Deterministisk eller stokastisk. I en deterministisk modell kan utdata beräknas så fort indata är känd. I en stokastisk modell beror utdata på slumpmässiga händelser.

Diskret eller kontinuerlig. Den diskreta modellen hoppar från händelse till händelse. Under hoppen är modellen oförändrad. I den kontinuerliga förändras modellen kontinuerligt.

Vår simuleringsmodell är således dynamisk, stokastisk och diskret.

Det finns många olika simuleringsmetoder. För modeller som är dynamiska, stokastiska och diskreta är den vanligaste metoden "Discrete-event"-simulering. Metoden bygger på att man uppdaterar alla systemvariabler när en händelse sker, därefter räknas tiden fram till nästa händelse. På så sätt läggs fokus endast på de tidpunkter då det verkligen sker förändringar i systemet och all "dötid" hoppas över. Vi kommer att använda oss av "Discrete-event"-simulering i det här examensarbetet (Banks, 1998).

Det finns många sätt att genomföra ett simuleringsprojekt. Vi har valt att följa Banks' tolvstegsguide i det här examensarbetet. (Banks, 1998) Dock har en punkt tagits bort för att anpassa guiden till vårt arbete. Figur 2.1

kan man se ett flödesschema som beskriver tillvägagångssättet i Banks' tolvstegsguide.

De 11 steg som valts att användas i det här arbetet beskrivs mer ingående nedan.

1. Problemformulering

Det första steget går helt enkelt ut på att definiera problemet som skall lösas i examensarbetet. Det här steget är extremt viktigt, eftersom allt som görs i simuleringsprojektet görs just för att lösa det definierade problemet. Problemet kan antingen definieras av de som har problemet (kunden), eller av de som utför simuleringsprojektet. Vår problemformulering är beskriven i kapitel 1.

2. Målsättning

Ett annat passande namn på det här steget skulle vara "förberedande av ett förslag". I målsättningen skall de huvudfrågor, som simuleringsprojektet avser att svara på för att lösa det definierade problemet i föregående steg, beskrivas.

3. Konceptuell modell

I det här steget skapas en grundläggande modell som skall ligga till grund för senare implementering i simuleringsprogrammet. Den konceptuella modellen fokuserar på de viktiga delarna av det verkliga problemet, dvs. det gäller att skapa en modell som är så enkel som möjligt men ändå tillräckligt detaljerad för att

kunna lösa huvudfrågorna i målsättningen. Det ingår även att ta reda på vilka indata, som behövs till modellen, i det här steget.

4. Datainsamling

Det här steget är precis vad det heter, här skall alla indata som behövs för att genomföra simuleringsprojektet samlas in. Detta steg är mycket viktigt och tar oftast lång tid. En modell med dåliga indata ger även dåliga resultat.

5. Modellöversättning

I det här steget översätts den konceptuella modellen till en fullt körbar datormodell.

6. Verifiering

Här kontrolleras datormodellen så att den fungerar rent praktiskt, t.ex. att det inte finns några implementeringsfel. Man kontrollerar helt enkelt att datormodellen är körbar. Detta steg skall man göra kontinuerligt under modellöversättningen, då det är mycket lättare att upptäcka fel.

7. Validering

I detta viktiga steg kontrolleras om datormodellen kan representera det verkliga systemet. Man tar helt enkelt reda på om datormodellen fungerar som det är tänkt i den konceptuella modellen. Oftast sker valideringen genom att man kontrollerar utdata från modellen och jämför dem med verkliga värden.

8. Experimentell design

Här planeras hur de olika testscenarierna skall se ut. Vilka parametrar skall ändras? Hur lång tid skall simuleras? Hur många körningar skall göras?

9. Simulering och analys

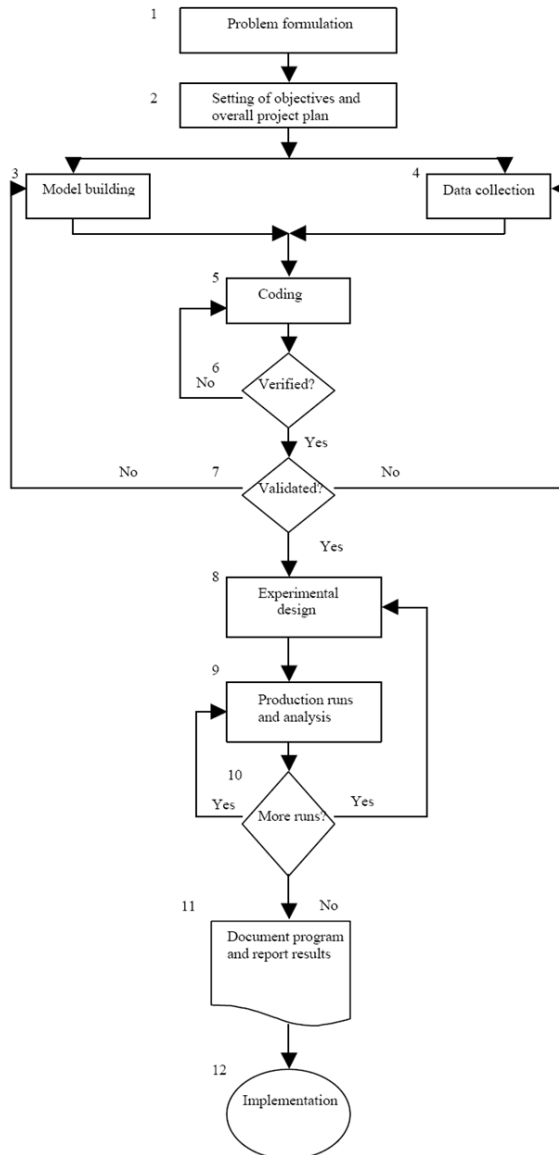
Under denna fas simuleras de olika testscenarierna och resultaten analyseras.

10. Fler körningar

I det här steget kontrollerar man utdata. Har simuleringarna gett ett önskvärt resultat? Behövs det fler körningar för att kunna dra slutsatser, eller rent av fler testscenarios?

11. Dokumentering och rapportering

I det är steget sker en dokumentering av alla körningarna och hur modellen fungerar. Det är viktigt att vara noggrann och tydlig med dokumenteringen. Simuleringsmodellen skall kanske användas eller modifieras av någon annan person i framtiden. En god dokumentering underlättar när resultatet från de olika körningarna skall jämföras. I det här steget sker även rapportering av analysresultatet. Det är även här viktigt att vara tydlig och svara på de frågor som skulle besvaras i målsättningen.



Figur 2.1 Visar ett flödesschema som beskriver tillvägagångssättet i Banks (1998) tolv stegsguide.

2.4 Föreberedande arbete

Som förberedande arbete inför detta examensarbete studerades först problembeskrivningen. I problembeskrivningen finns bl.a. en beskrivning av hur S-tågnätet är uppbyggt och en förklaring av den terminologi som är viktig för att utföra examensarbetet. Dessutom studerades artikeln *Cyclic Railway Timetabling: a Stochastic Optimization Approach* av Leo G. Kroon, Rommert Dekker och Michiel J.C.M. Vromans som handlar om hur man analytiskt kan beräkna optimala bufferttider för en tåglinje som inte korsas av någon annan tåglinje. Denna artikel är tänkt att användas för att verifiera att vi tänker rätt i simuleringsmodellen. Banks (1998) "Handbook of simulation" studerades också för att ge tips om hur ett simuleringsprojekt skall genomföras. Därefter besökte vi DSB:s kontor i Köpenhamn där vi fick en mer utförlig genomgång av hur DSB:s S-tågnät fungerar av vår kontaktperson på DSB, Stefan Vidgren, och en kollega till honom. De huvudsakliga frågorna vi ville ha svar på inför detta möte var hur man definierar bufferttider och hur de beräknas idag. Ett annat syfte med mötet var att vi skulle samla på oss tillräckligt med information för att kunna göra en konceptuell modell av DSB:s S-tågnät. Vid detta möte diskuterades även hur vi skulle lägga upp vårt arbete och vad som skulle vara nästa steg för oss.

2.5 Konceptuell modell

När problemformuleringen, målsättningen och projektplanen är klara är nästa steg att tillverka en konceptuell modell. Den konceptuella

modellen ligger till grund för den simuleringsmodell som kommer att programmeras i simuleringsprogrammet "Extend". Det finns inga direkta regler då den konceptuella modellen tillverkas. Första steget kommer att vara att vi bygger denna modell genom att först genomföra möten med relevanta personer, besöka relevanta platser och läsa på om det riktiga undersökta systemet. Under hela processen av byggandet av den konceptuella modellen kommer vår kontaktperson på DSB att kontaktas om det uppstår oklarheter under uppbyggnaden av denna modell.

2.6 Data insamling

För att kunna hitta en sannolikhetsfördelning med skattade parametrar till uppehållstiden vid varje "station" i simuleringsmodellen, behövs insamlade värden på hur lång tid tågen verkligen blivit stående på stationen. I denna del av arbetet beskrivs hur vi gick till väga för att införskaffa våra datavärden och hur vi med statistiska metoder analyserade våra data innan vi använde simuleringsmodellen. Statistiska undersökningar kan indelas i olika kategorier beroende på dess syfte.

Syftet med en statistisk undersökning kan vara:

- Beskrivande/deskriptivt
- Förklarande/utredande
- Framåtblickande

Syftet med undersökningen bestämmer i princip vilken metod som bör användas. (Dahmström, 2005) Man kan också klassificera en undersökning efter de metoder man använder vid datainsamlingen. Det går en viktig skiljelinje mellan experimentella undersökningar och icke-experimentella undersökningar. En experimentell undersökning kännetecknas av att försöket kan upprepas önskat antal gånger medan man vid en icke-experimentell undersökning måste nöja sig med att konstatera vad som har hänt och i efterhand kartlägga orsakerna. (Körner & Wahlgren, 2005) Dessutom måste alltid de statistiska metoderna som används vara sådana att en oberoende person kan göra om undersökningen. Därför måste man beskriva exakt hur undersökningen gått till. Det behövs också för att man ska kunna bedöma kvaliteten på undersökningen.

Den beskrivande/deskriptiva undersökningen försöker svara på frågor av typen:

- Hur många?
- Hur stor andel?
- Hur mycket?
- Hur länge?
- Hur stor förändring?

Sådana här undersökningar brukar genomföras som en postenkät eller intervjuundersökning.

En förklarande undersökning innehåller ofta någon form av hypotesprövning. Syftet med undersökningen kan vara att få svar på frågor av följande form:

- Är andelen defekta enheter i en viss tillverkningsprocess signifikant eller statistiskt påvisbart lägre än 2 procent?
- Har andelen moderater i väljarkåren ökat under den senaste månaden?

Att kartlägga och förklara samband är ett vanligt syfte med en förklarande undersökning. Orsak och verkan är ofta begrepp som används vid sådana undersökningar. Till exempel kan en fråga som "hur påverkades försäljningen av den genomförda annonskampanjen?" ställas i denna typ av undersökningar. (Körner & Wahlgren, 2005)

I framåtblickande undersökningar är syftet att beskriva eller förklara något förhållande. Man kan t.ex. vilja veta hur Sveriges befolkning eller ekonomi kommer att utvecklas en tid framåt. Man vill alltså göra en prognos eller, med ett annat ord, en prediktion. Vid sådana prognoser är man dock utlämnad åt omvärlden och alla oförutsedda händelser.

Den statistiska undersökningen som görs i denna fallstudie kan definieras som en förklarande undersökning. Detta beror på att våra data kommer att utsättas för någon form av hypotesprövning. Undersökningen är också icke-experimentell därför att vi inte själva kommer att utföra några experiment. Alla data kommer att hämtas ifrån DSB:s egna databaser.

När man gör en statistisk undersökning måste några övergripande frågor besvaras:

- Vem skall undersökas?
- Vad skall undersökas?
- Hur skall undersökningen göras?
- Ska en total undersökning eller en urvalsundersökning göras?

(Dahmström, 2005)

2.6.1 Vem skall undersökas

När man specificerar målsättningen med sin undersökning är det nödvändigt att man definierar och avgränsar en population. Med population menas en mängd av element som man vill studera egenskaper och attityder för. Elementen kan vara människor, företag, bilar etc. Dessutom måste elementen relateras till en viss bestämd tidpunkt eller tidsperiod samt ett geografiskt område eller liknande. Den population man helt idealt vill studera brukar kallas målpopulation. (Dahmström, 2005)

I vår undersökning kommer elementen att vara tider som olika tåg från olika linjer på DSB:s S-tågnät uppehållit sig på nätets olika stationer. Tidsperioden som data är hämtade ifrån sträcker sig från 1 november 2007 till sista december 2007. Alla data är hämtade från DSB i Köpenhamn.

2.6.2 Vad skall undersökas

När man planerar vad som ska undersökas ska man alltid utgå från målsättningen och frågeställningen. I en statistisk undersökning används begreppet parameter. Med detta avses en konstant storhet som karakteriserar en variabel i populationen. (Dahmström, 2005)

I denna undersökning kommer parametrar, som sannolikhetsfördelningar och deras inparametrar, vanligtvis medelvärde och standardavvikelse, att undersökas.

2.6.3 Ska en total- eller en urvalsundersökning göras

Det går att få tag på i princip oändligt med data till vår undersökning, men med hänsyn till att vi har begränsat med tid att genomföra detta examensarbete på, kommer vi bara att kunna göra en urvalsundersökning.

2.6.4 Insamlingsmetod för data

Vid insamling av data brukar man skilja på primära data och sekundära data. Primära data innebär att det efterfrågade datamaterialet samlas in för första gången. Med sekundär data menas att man använder redan insamlade data. (Dahmström, 2005) I denna undersökning av uppehållstiderna för tågen vid stationerna kommer vi enbart att använda oss av sekundär data från DSB:s databas.

Insamling av våra sekundära data har skett via DSB:s databas . Vår undersökning går ut på att samla in uppehållstider för de olika tåglinjerna på S-tågnätets stationer. I DSB:s databas finns inte denna tid lagrad, men de tar tiden då tågen bromsar in till 2 km/h vid varje station och lagrar denna tidpunkt i en databas. Den sensor som registrerar tidpunkten för tågens anländande till en station är lokaliserad på stationen. För att kunna säga något om tågens uppehållstid på en station måste också tågens avgångstid från en station registreras och detta görs med en sensor som finns på varje tåg. Denna sensor antecknar tidpunkten då tåget accelereras upp till en hastighet på 2 km/h. Vi har valt att anse att den tiden det tar från tåget att bromsa in från 2 km/h till ett fullständigt stopp, och den tid det tar innan tåget kommer upp till en hastighet av 2km/h, är försumbar. Dessa två data, för ankomsten av ett tåg till station och avgången av ett tåg från en station, måste jämföras manuellt. Detta kan medföra att "slarvfel" görs och felaktiga uppehållstider registreras. Hanterandet av detta problem tas upp i nästa rubrik, analys av indata.

2.6.5 Analys av indata

Syftet med denna analys är att hitta standardsannolikhetsfördelningar som ska representera uppehållstiderna vid S-tågnätets olika stationer för tåglinjerna inom tågnätet. I simuleringsmodellen, som är skapad i simuleringsprogrammet Extend, ska de skattade standardfördelningarna motsvara tiden då tågen står stilla på station.

Analysen av våra indata görs i flera steg:

Första steget är att ta bort inkorrekta värden. Sensorn på stationen, som registrerar tidpunkten när tåget bromsar in till hastigheten till 2 km/h, och sensorn på tåget, som registrerar tidpunkten då tåget kommer upp till hastigheten 2 km/h, är inte alltid pålitliga. Därför kommer vi att direkt ta bort tåg som enligt våra indata uppehållit sig på en station mindre än den minimala tiden som är möjlig. Den minimala tiden är minsta tiden för att bromsa in från 2 km/h, öppna och stänga dörrarna och accelerera upp till 2 km/h igen. Denna tid är idag 16 sekunder. Dessutom kom vi fram till genom diskussion med vår handledare, Stefan Vidgren på DSB, att värden på uppehållstider som avviker mer än 3 standardavvikelse från medelvärdet ska tas bort. Syftet med detta är främst att få bort de längre tiderna som inte är relevanta för utplaceringen av bufferttid. Genom att anta att centrala gränsvärdessatsen gäller, kan uppehållstiderna ses som normalfördelade stokastiska variabler. Sannolikheten att en uppehållstid hamnar utanför intervallet på 3 standardavvikelse åt vardera hållet är 0,3%. Teorin för detta går igenom mer ingående i kapitel 3. Medelvärdet och standardavvikelsen har skattats med punktskattning i Excel. Medelvärdet är beräknat som det aritmetiska medelvärdet, och beräknas genom att en grupp tal summeras för att sedan divideras med antalet tal

i gruppen. Medelvärdet av 2, 3, 3, 5, 7 och 10 är exempelvis 30 dividerat med 6, d.v.s. 5. Standardavvikelsen beräknas enligt formeln:

$$s = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(n-1)}}$$

där n är sampelstorleken, x en observation och \bar{x} är sampelmedelvärdet (Excel).

Nästa steg i indataanalysen är att skatta en standardsannolikhetsfördelning för uppehållstiderna för varje tåglinje för varje station i S-tågnätet. Att ta reda på uppehållstiderna vid stationerna är ett mycket tidskrävande manuellt arbete. Vi har därför i samråd med vår kontaktperson på DSB kommit fram till att använda oss av indata från en tidigare simuleringsmodell som finns på DSB. För att kontrollera de tidigare indata gör vi stickprov på några stationer i de olika zonerna (se figur 2.3) och sedan jämför vi sannolikhetsfördelning och dess inparametrar. Linje F går på ett helt eget spår och påverkar inte det övriga S – tågnätet. För stickproven kommer ett chi-två test samt en grafisk jämförelse att göras mot de tidigare fördelningarna med hjälp av Matlab. En ML- skattning och en punktskattning (se kapitel 3 för mer info) i Matlab kommer att göras för att ta fram inparametrarna till stickprovets fördelningar. Därefter kommer stickprovets inparametrar att jämföras mot de fördelningar som DSB tillhandahöll oss.



Figur 2.2 viser vilka olika zoner vi har gjort stickprov i.

2.7 Använd mjukvara

Under denna rubrik beskrivs mjukvaran vi skall använda oss av för att kunna skapa vår simuleringsmodell.

2.7.1 Extend

Extend är ett simuleringsprogram som kan användas för att skapa dynamiska modeller för diskreta händelser i system genom grafisk programmering. Det går till så att "block" med förprogrammerade egenskaper används för att skapa den grafiska modellen i programmet. Blocken utgör grunden för byggandet av modeller i programmet. Varje block representerar någon del av processen i modellen, t.ex. en kemisk reaktion eller en maskins aktivitet. Det finns också block som kan representera köer av olika slag. Dessa kan i verkligheten tolkas som bl.a. buffrar och lager. Blocken binds samman i modellen genom "kontaktlinjer". De olika blocken i programmet finns indelade i olika "bibliotek" i mjukvaran, beroende på deras egenskaper. Genom att klicka på ett blocks "ikon" med muspekaren, kan man i detalj få reda på dess egenskaper och tilldela den data. När man tycker att Extendmodellen är byggd så att den på bästa sätt efterliknar det tänkta systemet, kan modellen simuleras för en bestämd tid som man själv kan välja. När modellen simuleras vill man gärna att objekt, som t.ex. kan representera kunder eller tåg, färdas genom modellen. Dessa objekt skapas av generatorblock och det är dessa som orsakar händelser i modellen då den simuleras (http://www.extendsim.com/prods_overview.html).

2.7.2 Matlab

Matlab är ett numeriskt, matematiskt beräkningsprogram som kan användas vid matrisoperationer, plottning av funktioner och data, och implementering av algoritmer. För att kunna göra operationer i Matlab måste man använda sig av programmeringsspråket M-kod. Matlab har många förprogrammerade funktioner som är användbara inom områden som statistik, numerisk analys, linjär analys m.m. I programmet kan även egna funktioner skrivas med hjälp av programmeringsspråket M kod (<http://www.eetimes.com/news/design/showArticle.jhtml?articleID=49400392>). Vi kommer att använda Matlab till att bl.a. skatta fram standardsannolikhetsfördelningar och dess parametrar.

2.7.3 Microsoft Excel

Microsoft Excel är ett program som kan användas till kalkylering, pivottabeller, grafiska verktyg och för att programmera makron i programmeringsspråket Visual Basic. I detta examensarbete kommer programmet att användas till kalkyleringar på indata och utdata till simuleringsmodellen gjord i Extend. Dessutom kommer makrofunktionen i Excel att hjälpa oss välja ut körbara utplaceringar av buffertiden på de olika stationerna.

2.8 Verifiering och validering av simuleringsmodellen

Det är viktigt att kontrollera, att simuleringsmodellen är byggd som det är tänkt, för att bekräfta att simuleringsmodellen beskriver det verkliga systemet den är tänkt att representera. Man bör göra detta medan man bygger upp sin konceptuella modell och sin simuleringsmodell. I detta examensarbete har verifierings- och valideringstekniker hämtats från Banks (1998).

2.8.1 Verifiering

De verifieringstekniker vi kommer att använda oss av när vi bygger vår konceptuella modell och simuleringsmodell är:

Modularity building

Vår modell kommer att byggas i moduler. Varje del av huvudmodellen som kan delas in i en mindre modul, kommer att byggas för sig, för att det ska bli lättare att lokalisera var felen i modellen uppstår.

Test of sub - models

Här testas olika delar av modellen och ser till att de olika delarna av modellen fungerar som de ska. Detta gör det mycket lättare att lokalisera var felen uppstår.

Check by third party

Man låter någon som inte gjort simuleringsmodellen kontrollera den.

Check that input values are correctly used

Man kontrollerar att indata anges i rätt enheter. Man kollar upp att ekvationer i modellen är skrivna korrekt. Detta testas genom att man kontrollerar blocken i modellen manuellt och genom att man testkör modellen.

Animation

Genom att man animerar objekten, som färdas i den simuleringsmodell, kan man verifiera att de färdas, som man tänkt sig, genom simuleringsmodellen.

2.8.2 Validering

De valideringstekniker vi kommer att använda oss av när vi bygger vår konceptuella och simuleringsmodell är:

Face Validation

De som känner till hur systemet validerar om modellen överensstämmer med verkligheten. De som känner till det verkliga systemet vet på ett ungefär vilka värden som är rimliga.

Special input Testing

Man testar om speciella värden ger de tänkta resultaten i modellen. Det kan röra sig om att ge extrema värden på indata till simuleringsmodellen och sedan testa hur simuleringen uppför sig.

Sensitive analys

Denna analys görs för att se om förändringar av indata till modellen ger väntat uppförande i simuleringsmodellen. Oväntat uppförande i modellen kan visa på att modellen inte fungerar som det är tänkt.

Input and output validation

Denna validering går ut på att se om simuleringsmodellen ger liknande resultat som gamla data från det verkliga simulerade systemet. Det är möjligt i detta arbete just pga. att systemet som ska simuleras redan existerar.

Data analys

Här gäller det att genom olika tekniker validera att man använder sig av korrekt indata till sin simuleringsmodell. Detta ska göras genom olika statistiska test. Vi kommer att använda oss av chi två-test, jämförelse av skattade parametrar, samt en grafisk analys, för att ta fram passande standardfördelningar.

Failure insertion testing

Man testar om ens simuleringsmodell reagerar på om man stoppar in fel i simuleringsmodellen.

2.9 Simulering och analys

Eftersom simuleringsmodellen kommer att vara stokastisk, d.v.s. utdata som skickas från modellen ser annorlunda ut efter varje simulering, behöver man analysera resultatet från simuleringsmodellen med statistiska metoder. I detta fall beräknas konfidensintervall på de olika tåglinjernas regularitet (regularitet förklaras mer ingående i avsnitt 4).

För att beräkna konfidensintervall för regulariteten kommer simuleringsmodellen att simuleras flera gånger med exakt samma inställningar. Vid konfidensintervallsberäkning antas centrala gränsvärdessatsen gälla. Den säger kort att sannolikhetsfördelningen för en summa av N stycken oberoende och likafördelade stokastiska variabler är ungefär normalfördelad om bara antalet komponenter i summan är tillräckligt stort. (Blom & Holmqvist, 1998) Vad som anses

som tillräckligt stort varierar från situation till situation, men som en tumregel brukar man säga att $N > 30$. (Laguna & Marklund, 2004) Denna approximation till normalfördelning gör konfidensintervallberäkningen enklare.

I detta examensarbete kommer vi att simulera mer än 50 gånger då tåglinjernas regularitet beräknas. Vid beräkning av konfidensintervall för de olika tåglinjernas regularitet kommer Excel att användas.

2.10 Källkritik

Litteraturen som vi utgår ifrån när vi skrivit detta arbete, kommer mestadels från Lunds universitetsbibliotek och från olika Lundbaserade fakulteters bibliotek. Information kommer också ifrån kursboken i simulering av produktionssystem och från kursboken i matematisk statistisk grundkurs vid Lunds tekniska högskola. Även internetkällor har använts i enstaka fall i arbetet. Dessutom har även muntlig information, speciellt om hur DSB:s tågsystem fungerar, erhållits via vår kontaktperson, Stefan Vidgren, på företaget. Vi anser att de källor vi använt oss av har varit tillförlitliga och att det varit möjligt att få tag på tillräckligt med information för att kunna genomföra projektarbetet på den nivå som förväntats.

2. 11 Replikation

Denna punkt behandlar frågor om ett experiment kan reproduceras av någon annan vid ett senare tillfälle och om denne kommer fram till samma resultat. Om en sådan replikation är omöjlig kan man ifrågasätta resultatens validitet. Det som menas med validitet är frågan huruvida en eller flera indikatorer, som utformats i syfte att mäta ett begrepp, verkligen mäter detta begrepp. (Bryman & Bell, 2005) I vårt fall på DSB tror vi att det är fullt möjligt för någon annan att komma fram till samma resultat som oss. Dock kan skapandet av simuleringsmodellen vara ett hinder för att reproducera våra resultat, pga. att den kan skapas på många olika sätt. Detta kan i sin tur innebära att slutresultatet kan bli ett annat än det vi kommit fram till.

3 Teori

I teorikapitlet tas grundläggande teorier upp som används senare i arbetet.

3.1 Inledning

Först beskrivs sannolikhetsfördelningen som har använts i examensarbetet. Sedan beskrivs teori för chi-två testet, vilket används för att testa vilken standardsannolikhetsfördelning en datamängd bäst kan beskrivas med. I teorikapitlet beskrivs dock också metoderna för hur vi skattat inparametrarna till standardfördelningarna. Som avslutning på teorikapitlet tas teori upp angående de statistiska metoder vi använt för att analysera indata och utdata till simuleringsmodellen.

3.2 Lognormalfördelning

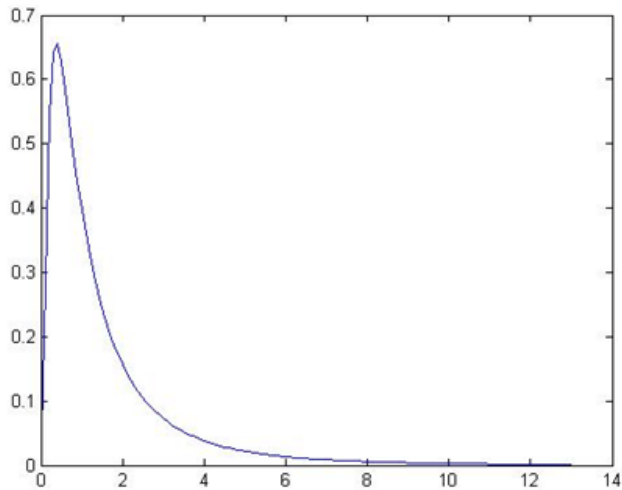
Om den stokastiska variabeln x har täthetsfunktionen nedan så har x en lognormalfördelning.

$$f(x) = \begin{cases} \frac{1}{x\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-(\ln x - m)^2 / 2\sigma^2} & \text{om } x \geq 0 \\ 0 & \text{om } x < 0 \end{cases}$$

Där $-\infty < m < \infty$ och $\sigma > 0$ är medel och standardavvikelse för variabelns logaritm.(Blom, 1984)

Om Y är normalfördelad med $N(m, \sigma^2)$ så är $X = e^Y$ lognormalfördelad med $LN(m, \sigma^2)$.

(Banks, 1998)



Figur 3.1 som är gjord i matlab visar en Lognormalfördelnings täthetsfunktion med $m = 0$ och $\sigma = 1$

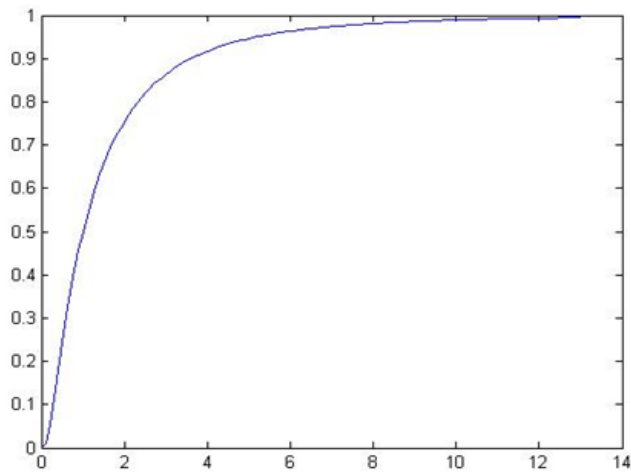
Lognormalfördelningens fördelningsfunktion är:

$$F(x) = 1 + \operatorname{erf}\left(\ln x - \frac{m}{\sigma\sqrt{2}}\right),$$

där

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt.$$

Och m och σ är medelvärde och standardavvikelse för variabelns logaritm. (Blom, 1984)



*Figur 3.2 som är gjord i matlab visar en Lognormalfördelnings
fördelningsfunktion med $m = 0$ och $\sigma = 1$*

Om θ och τ^2 är medelvärdet och varians för lognormal fördelningen är de relaterade till m och σ^2 genom formlerna:

$$m = \ln \frac{\theta^2}{\sqrt{\theta^2 + \tau^2}} \text{ och } \sigma^2 = \ln \frac{\theta^2 + \tau^2}{\theta^2}.$$

(Blom, 1984)

3.3 Test av sannolikhetsfördelning

Nedan beskrivs hur vi skattat fram standardfördelningarna som används i arbetet.

3.3.1 Chi-två test

Detta test kan användas för att undersöka om en dataserie kan approximeras med en statistisk standardfördelning på en viss signifikansnivå. Testet går till så, att man delar in datamaterialet i olika stapelintervall. Sedan jämförs frekvensen av värden i varje stapel mot en statistisk standardfördelnings förväntade antal värden i intervallet. Det förväntade värdet i intervallet kan beräknas $F(u_i) - F(l_i)$ där $F(x)$ är fördelningsfunktionen för en statistisk standardfördelning. Vidare är l_i och u_i övre resp. undre intervallgränsen för en stapel. Antalet värden som behövs i varje intervall är minst 5 för att testet ska fungera. (Laguna & Marklund, 2004) Antalet intervall som behövs räknas ofta enligt $\sqrt{n} + 1$ (<http://maps.unomaha.edu/maher/GEOL2300/week2/week2.html>).

Beroende på hur intervallindelningen och antalet intervall görs fås olika resultat på chi-två testet. Intervallindelningen kan göras på olika sätt, men vanligt är att man låter intervallen ha lika längd eller väljer dem så, att intervallen har samma sannolikhet. (Banks, 1998)

Sedan beräknas

$$Q = \sum_{i=1}^N \frac{(x_i - n \times p_i)^2}{n \times p_i}.$$

Här är n antalet observationer, N är antalet intervall och p_i är sannolikheten att en observation hamnar i intervallet i och x_i är det observerade antalet i intervallet. (Laguna & Marklund, 2004)

Q - värdet jämförs därefter med chi-två fördelningen och man kan förkasta hypotesen att datamaterialet kommer från den testade statistiska standardfördelningen om

$$Q > \chi_a^2(f).$$

Här är f antalet frihetsgrader och beräknas som antalet intervall, minskat med 1, minus antalet parametrar i den testade statistiska standardfördelningen. a är den valda signifikansnivån. (Banks, 1998)

3.4 Skattning av parametrar

Nedan beskrivs metoderna för hur vi skattat inparametrarna till standardfördelningarna.

3.4.1 ML – Skattning

Den som först systematiskt undersökte ML-skattningsmetoden (Maximum likelihood metoden) var R A Fisher. Denna metod går ut på att skatta okända parametrar då man känner till täthetsfunktionen i det kontinuerliga fallet resp. sannolikhetsfunktionen i det diskreta fallet. Dessutom krävs ett slumpmässigt stickprov från den kända fördelningen. Funktionen nedan kallas likelihood-funktionen

$$L(\theta) = \begin{cases} f(x_1; \theta) f(x_2; \theta) f(x_3; \theta) \dots f(x_n; \theta) & (\text{Kontinuerliga fallet}) \\ p(x_1; \theta) p(x_2; \theta) p(x_3; \theta) \dots p(x_n; \theta) & (\text{diskreta fallet}) \end{cases}$$

Här är θ den okända parametern.

I det diskreta fallet anger $L(\theta)$ sannolikheten att just värdena $x_1 \dots x_n$ i stickprovet skall fås. För det kontinuerliga fallet innebär $L(\theta)$ att det värde som den n-dimensionella täthetsfunktionen för den stokastiska variabeln $\mathbf{X} = (x_1 \dots x_n)$ antar för $x_1 \dots x_n$.

Vi antar att elementen i stickprovet dras oberoende av varandra.

ML-skattningen går sedan ut på att man i L-funktionen låter argumenten θ anta alla värden inom ett parameterområde A, och ser efter för vilket värde på argumentet som funktionen blir så stor som möjligt. Detta värde kallas $\tilde{\theta}$ och tas som skattning på parametern. Metoden kan användas även i fall där fler parametrar behöver skattas. L-funktionen blir då en funktion av alla dem. Ett annat fall då metoden kan användas är när värdena $x_1 \dots x_n$ är observationer av stokastiska variabler $X_1 \dots X_n$ med olika fördelningar som beror på en och samma parameter. (Blom & Holmqvist, 1998)

3.4.2 Stickprovskattning

Man kan välja att punktskatta medelvärdet \tilde{m} med hjälp av stickprovsmedelvärdet enligt:

$$\tilde{m} = \bar{x}$$

För att bestämma väntevärde och varians för denna skattning, betraktas $\bar{x} = \sum_1^n \frac{x_i}{n}$ som observationer av en stokastisk variabel.

$$\tilde{m}(\mathbf{X}) = \sum_1^n \frac{X_i}{n}$$

där n är antalet observationer i stickprovet och de stokastiska variablerna X_i är oberoende och har samma fördelning, samtliga med väntevärde m och standardavvikelse σ . Detta ger att

$$E[\tilde{m}(\mathbf{X})] = m, V[\tilde{m}(\mathbf{X})] = \sigma^2/n.$$

Det första sambandet anger att skattningen är väntevärdesriktig och det andra anger att variansen är liten, om n är tillräckligt stort.

Om man i stället vill punktskatta variansen, σ^2 med hjälp av stickprovsvariansen så får man

$$s^2 = \frac{1}{n-1} (x_i - \bar{x})^2.$$

Anledningen till att man dividerar med $n - 1$ vid beräkningen av s^2 är att man vill åstadkomma en väntevärdesriktig skattning av σ^2 . Skattningen av standardavvikelsen, σ , om man väljer att skatta med hjälp av stickprovets standardavvikelse, fås enligt

$$s = \sqrt{\frac{1 \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}.$$

Denna skattning är dock inte väntevärdesriktig. (Blom & Holmqvist, 1998)

3.5 Statistiska metoder

Här beskrivs centrala gränsvärdessatsen som används vid indataanalysen och som även är ett viktigt antagande vid beräkning av konfidensintervall. Denna del innehåller även teori om konfidensintervall.

3.5.1 Centrala gränsvärdessatsen

Centrala gränsvärdessatsen säger att om X_1, X_2, \dots är en oändlig följd av oberoende likafördelade stokastiska variabler med väntevärdet m och standardavvikelsen $\sigma > 0$ och om $Y_n = X_1 + \dots + X_n$

så gäller att:

$$P\left(a < \frac{Y_n - nm}{\sigma\sqrt{n}} < b\right) \rightarrow \Phi(b) - \Phi(a) \text{ då } n \rightarrow \infty.$$

Här är Φ fördelningsfunktionen för den standardiserade normalfördelade stokastiska variabeln. Den har väntevärde lika med 0 och standardavvikelse lika med 1. När n växer mot oändligheten kommer hela fördelningen för den angivna variabeln att gå mot en standardiserad normalfördelning.

Dessutom gäller om $Z_n, n = 1, 2, \dots$, är en oändlig följd av stokastiska variabler och man kan finna tal A_n och $B_n, n = 1, 2, \dots$, så att

$$P\left(a < \frac{Z_n - A_n}{B_n} < b\right) \rightarrow \Phi(b) - \Phi(a) \text{ då } n \rightarrow \infty,$$

så sägs Z_n vara asymptotiskt normalfördelad med parametrarna A_n och B_n .

En konsekvens av centrala gränsvärdessatsen är att man för stora n kan behandla den stokastiska variabeln som om den vore approximativt normalfördelad med de angivna parametrarna.

En följsats till den centrala gränsvärdessatsen säger att om X_1, X_2, \dots , är en följd oberoende likafördelade stokastiska variabler med väntevärdet m och standardavvikelsen σ så gäller det att $\bar{X} \in AsN(nm, \sigma\sqrt{n})$, där \bar{X} är det aritmetiska medelvärdet av likafördelade stokastiska variabler. Denna följsats visar att nämnda medelvärde är ungefär normalfördelat, oavsett formen på den angivna fördelningen, bara antalet komponenter är tillräckligt stort. Ett problem här är att veta vad som kan anses som tillräckligt stort. Man måste beakta att formen på fördelningen för variablerna X_i är avgörande för att man vid ett visst antal n skall få en hygglig anpassning. Det kan sägas att snedheten hos denna fördelning spelar en betydande roll. Ju snedare den är, desto fler komponenter behövs för att approximationen skall bli god.

Den centrala gränsvärdessatsen gäller även under vissa allmänna villkor för summor av oberoende icke likafördelade stokastiska variabler X_1, X_2, \dots , med $m_n = E(Y_n)$ och $\sigma_n = D(Y_n)$, där

$$m_n = E(Y_1) + \dots + E(Y_n)$$

$$\sigma_n = V(Y_1) + \dots + V(Y_n)$$

Här säger centrala gränsvärdessatsen att $Y_n \in AsN(m_n, \sigma_n)$. (Blom & Holmqvist, 1998)

3.5.2 Konfidensintervall

Man använder sig av konfidensintervall för att ta fram ett intervall som troligen innehåller det sanna värdet på den skattade parametern. Antag att det föreligger ett slumpmässigt stickprov

$$\mathbf{x} = (x_1, \dots, x_n)$$

från en fördelning som beror av den okända parametern θ . Ett intervall I_θ som med sannolikheten $1 - \alpha$ täcker över θ kallas konfidensintervall för θ med konfidensgrad $1 - \alpha$. Konfidensintervallets högra och vänstra ändpunkter också kallade konfidensgränserna, brukar normalt betecknas a_1 och a_2 . Ett konfidensintervall kan skrivas som

$$P[a_1 < \theta < a_2] = 1 - \alpha$$

Sannolikheten $1 - \alpha$ kan i princip väljas fritt. Vanligen väljer man den lika med 0.95, 0.99 eller 0.999 beroende på vilken säkerhetsnivå man vill åstadkomma. Om man gör ett konfidensintervall som täcker över θ då man sätter $1 - \alpha = 0.95$ finns det en risk på 0.05 att konfidensintervallet inte täcker över θ . Det kan också påpekas att ju större sannolikhet det är att konfidensintervallet täcker över θ desto bredare blir intervallet.

I detta examensarbete kommer konfidensintervall att användas då väntevärdet på de olika tåglinjernas regularitet skall beräknas. Vi har skattat standardavvikelsen för regulariteten. Därför beskrivs här nedan hur konfidensintervall för denna situation beräknas.

Antag att de stokastiska variablerna kan betraktas som normalfördelade, så att x_1, \dots, x_n är ett slumpmässigt stickprov från $N(m, \sigma)$. Vi räknar ut det aritmetiska medelvärdet. Detta görs enligt formeln:

$$\bar{x} = \sum_1^n \frac{x_i}{n},$$

där n är antalet observationer i stickprovet.

Efter det skattas standardavvikelsen enligt:

$$s = \sqrt{\frac{1 \sum_1^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}}.$$

Eftersom den stokastiska variabeln för stickprovet kan anses vara normalfördelad kan den bli normaliserad genom:

$$Z = (\bar{x} - m)/d$$

$$\text{där } d = s/\sqrt{n}$$

Z är här t-fördelad med $n - 1$ frihetsgrader. Om c betecknas som kvartilen för normalfördelningen, t.ex. om den sätts till 5 %, kan ett konfidensintervall som med 90 % sannolikhet innehåller Z tas fram så här:

$$P(-c < Z < c) = 0.9$$

Här fås 0.9 genom att $(1 - \alpha) = 0.9$ då α är satt till 0.1. Det betyder i detta fall att det finns en sannolikhet på 5 % att Z kommer vara mindre än $-c$ och en chans på 5 % att Z är större än c . Konfidensintervallet kan också skrivas som:

$$P\left(\bar{x} - \frac{cs}{\sqrt{n}} < Z < \bar{x} + \frac{cs}{\sqrt{n}}\right) = 0.9$$

(Blom & Holmqvist, 1998)

4 Modellbeskrivning

Det här kapitlet beskriver det verkliga systemet, den konceptuella modellen och redovisar hur simuleringsmodellen skapades i Extend. Beskriva de olika antagandena i simuleringsmodellen. Till sist kommer en beskrivning av hur simuleringsmodellen används för att besvara problemformuleringen i kapitel 1.

4.1 Beskrivning av S – tågnätet

S-tågnätet består av 85 stationer fördelade på 7 linjer och täcker stora delar av Köpenhamnsområdet. Tågen inom näten drivs med hjälp av elenergi. I Köpenhamn centrum befinner sig tågen under marken och utanför Köpenhamns centrum åker tågen ovanför. S-tågnätet går på ett eget spår som inte använts av andra tågnät. Dock går linje F på ett helt eget spår och påverkar därför inte de andra linjerna i S-tågnätet. S-tågnätets spår skiljer sig från de andra spåren i området genom att de har ett annorlunda signalsystem och drivs med annan elstandard. Tågnätet är i drift från ca kl 05.00 till ca kl 01.00 varje dag med avgångar var tionde minut vid tider då det är hård belastning och avgång var tjugonde minut övrig tid. De linjer som inte följer denna regel är linje F som går var femte minut och linje H och Bx som går var tjugonde minut hela dagen. Linje Bx körs endast vid de tider då nätet är utsatt för hård belastning. Vissa linjer är snabblinjer som inte stannar på alla stationer de passerar.



Figur 4.1 Ett S-tåg som står på Valby station

4.2 Skapandet av simuleringsmodellen

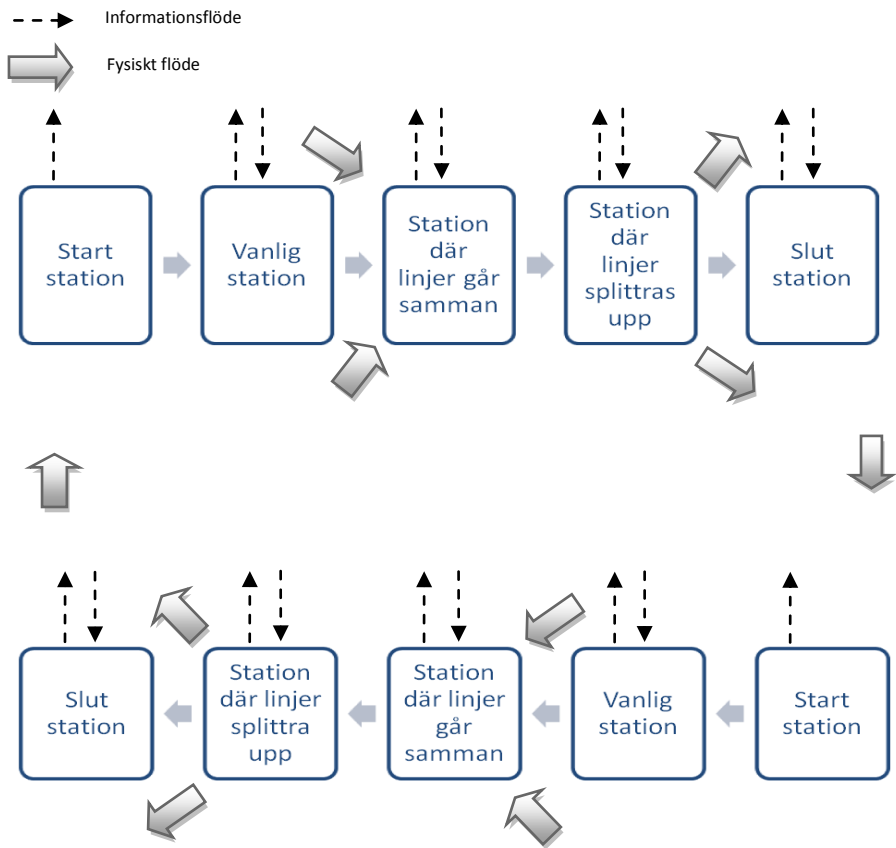
I detta avsnitt beskrivs hur framtagningen av simuleringsmodellen gjordes. Denna process inleddes med att skapa en översiktlig modell av S-tågnätet, som i detta examensarbete kommer att kallas konceptuell modell. Med utgångspunkt från denna konceptuella modell gjordes en

simuleringsmodell i Extend som resten av avsnittet kommer att handla om.

4.2.1 Konceptuell modell

Den konceptuella modellen var tänkt att återspegla S-tågnätet översiktligt. Den gjordes för att underlätta skapandet av en simuleringsmodell i Extend. Det var främst för att se hur de olika tåglinjerna inom tågnätet var sammanlänkade och hur de påverkar varandra, men också för att se vilka indata som behövdes, för att få önskade utdata nödvändiga för att kunna lösa examensarbetets huvudproblem. Modellen visar alltså översiktligt det fysiska flödet och informationsflödet. För att kunna skapa den konceptuella modellen samlade vi in fakta främst genom kontakt med vår handledare på DSB, Stefan Vidgren, men även från andra källor så som från projektbeskrivningen och från DSB:s hemsida. Den konceptuella modellen skissades på papper men till rapporten gjordes en version med hjälp av MS Word för att den skulle bli tydligare. Den konceptuella modellen visas i figur 4.1 och informationsflödet i tabell 4.1. Den konceptuella modellen består av 5 olika typer av stationer. Startstation är den station där tågen startas, linjetillhörighet och starttid tilldelas. Det finns inga indata till startstation pga. att tågen inte kör fram till den och tågen får ingen stokastisk uppehållstid då de alltid antas lämna startstationen i tid. Den vanliga stationen är den typ av station som kommer att förekomma mest i simuleringsmodellen. Fram till den här typen av station antas tågen köra med en körtid och på stationen tilldelas tågen en stokastisk uppehållstid som skall symbolisera på- och

avstigningstiden. Stationen där linjer går samman har samma uppbyggnad som den vanliga stationen. Här kommer dock även att finnas en prioritering som anger i vilken ordning tågen skall komma in på hållplatsen. Stationen där tågen splittras upp är av samma typ som den vanliga stationen med skillnaden att tåg från olika linjer kör till olika hållplatser. Slutstationen skiljer sig från den vanliga stationen genom att den skall kunna vända tågen och göra dem körklara för att köras i motsatt riktning.



Figur 4.2 Visar den konceptuella modellen med de olika typerna av stationer

Typ av station	Indata	Utdata
Startstation	Ingen	Antal tåg, ackumulerad försening, regularitetsbrott
Vanlig station	körtid, stokastisk uppehållstid, bufferttid	Antal tåg, ackumulerad försening, regularitetsbrott
Station där linjer går samman	körtid, stokastisk uppehållstid, bufferttid	Antal tåg, ackumulerad försening, regularitetsbrott
Station där linjer splittras upp	körtid, stokastisk uppehållstid, bufferttid	Antal tåg, ackumulerad försening, regularitetsbrott
Slutstation	körtid, stokastisk uppehållstid, bufferttid	Antal tåg, ackumulerad försening, regularitetsbrott

Tabell 4.1 Indata och utdata till den konceptuella modellen

4.2.2 Modellöversättning

S-tågnätet består av 7 st. linjer varav 6 av dem har korsande spår. Den linje som är fristående (Linje F) påverkar inte det övriga S-tågnätet och kommer således inte att behandlas i det här examensarbetet. Varje linje körs samtidigt i två riktningar, nordgående respektive sydgående. Det finns alltså ett spår för varje linje i varje riktning. Dock kan många linjer dela på det här spåret, t.ex. i de centrala delarna av Köpenhamn delar

alla 6 linjerna på ett enda spår. När man gör en modellöversättning är det viktigt göra avvägningar för vilka faktorer som kommer att påverka resultatet. Man vill skapa en simuleringsmodell som är så enkel som möjligt utan att förändra resultatet. När buffertiden skall placeras ut vill man göra det för en så "normal" dag som möjligt. Vi och vår kontaktperson på DSB har därför valt att bortse från händelser som är sällsynta t.ex. lok som går sönder, olyckor, elfel, signalfel osv. För att symbolisera hur lång tid det tar att stiga av och på ett tåg har en lognormalfördelning med tillhörande inparametrar använts. Varje hållplats har en unik lognormalfördelning, dock används samma fördelning i både nordgående och sydgående riktning. Fördelningarna med tillhörande inparametrar kommer från ett tidigare simuleringsprojekt på DSB. Inparametrarna är skattade för en vardag mellan kl 06-10 på morgonen, vilket representerar rusningstiden, då de flesta linjer startar med 10 minuters mellanrum. Det är under denna tid som DSB har mest problem med regulariteten och därför vill analysera djupare. Vi kommer därför att simulera just fyra timmar med anpassade inparametrar för rusningstiden.

4.2.3 In- och utdata

För att hantera in- och utdata har vi valt att använda oss av kalkylprogrammet Excel. I Excel har ett gränssnitt skapats för att det skall bli lätt att göra förändringar i simuleringsmodellen. Varje hållplats har 5 st. datainput-block och 3 st. dataoutput-block som kommunicerar med Excel genom att blocken är länkade till specifika celler i Excel. Tabell 4.2 visar vilka indata, med tillhörande förklaring, som simuleringsmodellen

använder sig av. Simuleringsmodellens utdata och anledning till valet av utdata kan ses i tabell 4.3.

Indata	Förklaring
Minsta körtid	Den tid det tar att köra mellan två stationer under normal omständigheter
Bufferttid	Den tid som varje hållplats har för att eliminera förseningar
Minsta stopptid	Den tid det tar att bromsa tåget samt öppna och stänga dörrarna
Medelvärde för uppehållstid	Inparamater till lognormalfördelningen
Standardavvikelse för uppehållstid	Inparamater till lognormalfördelningen

Tabell 4.2 indata med tillhörande förklaring

Utdata	Syfte
Antal tåg	För att kunna beräkna medelvärde av förseningarna och regulariteten
Antal Regularitetsbrott	För att kunna beräkna regulariteten
Ackumulerad försening	För att kunna beräkna medelförseningen

Tabell 4.3 utdata och dess syfte

4.2.4 Modellförklaring

Vid skapandet av hållplatserna i simuleringsmodellen användes de fem olika typerna av stationer med den konceptuella modellen som bas, dock

med några få anpassningar, för att kunna hantera hållplatser där fler linjer passerar.

För att på ett enkelt sätt förklara hur simuleringsmodellen fungerar, beskrivs nedan hur ett tåg transporteras och vilka beräkningar som görs på en vanlig station. Då ett tåg startas upp i simuleringsmodellen tilldelas det ett attribut, en variabel som är unik för varje enskilt tåg. Varje tåg ges 3 attribut: vilken linje de tillhör, avgångstid och aktuell försening. Då tågen lämnar en station startas ett "tidtagarur" och en ny avgångstid beräknas, alltså när tåget förväntas lämna kommande station. Tåg kan endast lämna en station på jämna hel eller halv minuter. Därför beräknas den nya avgångstiden med formeln:

$$\text{Ny avgångstid} = (\text{avrundat ner till närmsta heltal}(2 \cdot (\text{Minsta körtid} + \text{Bufferttid} + \text{Minsta stopptid}))/2) + (\text{ny avgångstid från föregående station})$$

Värdena minsta körtid, bufferttid och minsta stopptid hämtas från Excel. Minsta körtiden används även för att ställa in ett activitydelay-block som uppehåller tåget just denna tid för att representera tiden det tar att färdas mellan 2 stationer. Tåget är nu redo att komma in på stationen. Om där inte finns ett tåg inne på stationen kommer tåget att tillåtas att köra in. Om så inte är fallet kommer tåget att ställa sig i en kö för att stationen skall bli ledig. Väl inne på stationen tilldelas tåget en uppehållstid som representeras i modellen av ett activitydelay-block. Tåget uppehålls en stokastisk tid enligt en lognormalfördelning med inparametrarna medelvärde och standardavvikelse. Inparametrarna hämtas från Excel och är unika för varje station. Tåget är nu redo att lämna stationen, men förseningen för tåget måste beräknas. Vilket görs genom att "tidtagaruret" avläses, och tiden som det tagit för tåget att köra fram till stationen plus hur lång tid som tåget uppehållits pga. på-

och avstigningar, erhålls. Denna tid kallas T. I vår simuleringsmodell företräds en försening av ett negativt tal. Aktuell försening beräknas sedan enligt formeln:

Aktuell försening = (Ny avgångstid) - T + (tidigare försening).

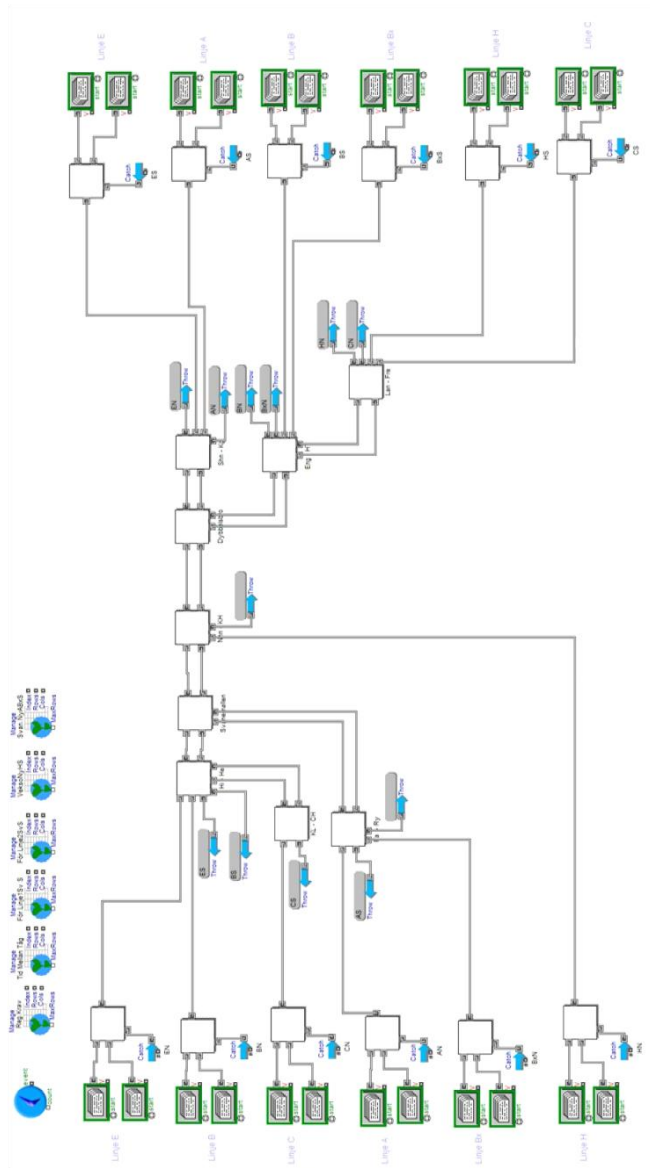
Innan tåget lämnar stationen räknas ett par variabler upp. Om ett regularitetsbrott har skett, dvs. om tåget är mer än 2,5 min försenat noteras det. Dessutom räknas antal tåg som har passerat hållplatsen och eventuell försening som nuvarande tåg dragit på sig, ackumuleras med de tidigare tågens förseningar på den här stationen. När hela simuleringen är klar skickas utdata, antal regularitetsbrott, antal tåg och ackumulerad försening till Excel.

Om tåget är före sin planerade avgångstid inväntar tåget den planerade avgångstiden och lämnar sedan stationen (annars lämnar tåget stationen direkt).

Alla de olika typerna av stationer har samma händelseförlopp som den vanliga stationen med några få skillnader. På den typ av stationer där en linje går samman med en eller flera andra linjer sker en prioritering, alltså i vilken ordning tågen ska släppas in på hållplatsen. Denna prioritering är bara aktuell om skillnaden mellan de inkommande tågens planerade avgång är mindre än 1 minut. Vi valde att sätta gränsen vid 1 minut pga. att ett tåg då normalt hinner avgå från stationen innan ett annat tåg hinner fram till stationen.

Prioriteringen delas upp i 3 olika fall enligt punkterna nedan:

1. Om båda tågen är försenade sker ingen prioritering.
2. Om inget tåg är försenat sker ingen prioritering.
3. Om ett tåg är försenat och ett annat inte är det, prioriteras det försenade tåget. På de stationer som trafikeras av flera olika linjer används ett attribut som anger tågets linjetillhörighet för att dirigera tågen, för att möjliggöra att korrekt utdata och indata hämtas och skickas till rätt tåg.



Figur 4.3 Översikt bild av simulering modellen

4.2.5 Antaganden i simuleringsmodellen

När en simuleringsmodell skapas måste man göra antaganden eftersom verkligheten är mycket komplex och oförutsägbar. Nedan beskrivs de antaganden med tillhörande motivering som gjorts i vår simuleringsmodell.

- I simuleringsmodellen antas att uppehållstiden vid varje station beskrivs av den lognormalfördelning som DSB gett oss. Antagandet har gjorts eftersom DSB har brister i sin dokumentation och det blir därmed för tidskrävande att själv göra skattningar för varje station. Dock har stickprov gjorts på några stationer för att validera DSB fördelningar.
- Upphållstiden antas ha samma inparametrar till fördelningen i både nord- och sydgående riktning. Det här antagandet gjordes eftersom DSB har samma inparametrar i båda riktningarna. Förmodligen kommer det här antagandet att påverka resultatet något, eftersom fördelningarna skiljer sig något i de olika riktningarna.
- Vi antar i simuleringsmodellen att tågen skall ha en minuts mellanrum då de kör. Det här har gjorts eftersom det finns ett säkerhetskrav för att undvika kollisioner. Kravet i verkligheten varierar något beroende på vilken hastighet tåget kör med på sträckan. Vi tror att det här antagandet inte kommer att påverka resultatet nämnvärt.

- Minsta stopptiden, den tid det tar att bromsa in tåget samt öppna och stänga dörrarna, antas vara 16 s. Tiden har valts i samråd med vår kontaktperson på DSB.
- Minsta körtiden, den tid det tar att köra mellan två stationer, antas vara en konstant tid. I verkligheten varierar den här tiden något. Variationen är så pass liten, att antagandet om konstant tid inte kommer att påverka resultatet märkbart.
- Vår simuleringsmodell är en beskrivning av en "normal dag". Vi bortser från oförväntade fel som t.ex. lok som går sönder, olyckor, elfel, signalfel osv. De här händelserna är mycket ovanliga och skall inte påverka placeringen av bufferttid.
- Simlueringsmodellen antar att det endast finns ett spår i varje riktning. I verkligheten finns det två spår på ett ställe i S-tågnätet.
- I verkligheten kan man avlysa tåg som är mycket försenade. Den möjligheten finns inte i vår simuleringsmodell. Detta kan sänka regularitetsresultaten för våra simuleringar jämfört med verkligheten.

- Tågen antas aldrig vara försenade från en startstation när de startas upp. De kan dock bli försenade om tåget har samlat på sig en stor försening innan tåget vänder vid slutstationen. I verkligheten står tåget på startstationen en stund innan avgång. Passagerare kan gå på tåget under denna tid och vid avgångstiden stängs dörrarna och tåget lämnar stationen.

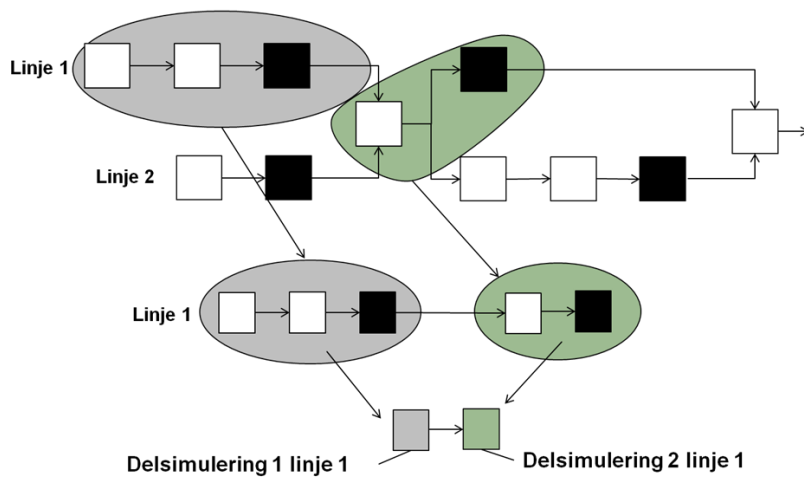
4.3 Uppdelning i delsimuleringar och lokaloptimering

Det här avsnittet kommer att ge en förklaring till hur vi valt att dela upp problemet och varför vi valt att använda oss av delsimuleringar. Avsnittet behandlar även hur lokaloptimeringen fungerar för modellen. Dessutom beskrivs vilka konsekvenser delsimuleringarna och lokaloptimeringen får för resultatet.

4.3.1 Delsimuleringar

Om en enda simulering gjorts skulle en optimering innefatta ca: $1,52 \cdot 10^{142}$ olika kombinationer att placera ut bufferttid på. Antalet kombinationer är beräknat på att vi varierar bufferttiden på 3 olika vis på varje hållplats för varje linje i varje riktning. Det skulle ta en ofantligt lång tid att köra en sådan simulering. För att göra det möjligt att optimera utplaceringen av bufferttid blev vi tvungna att dela upp simuleringen i många delsimuleringar.

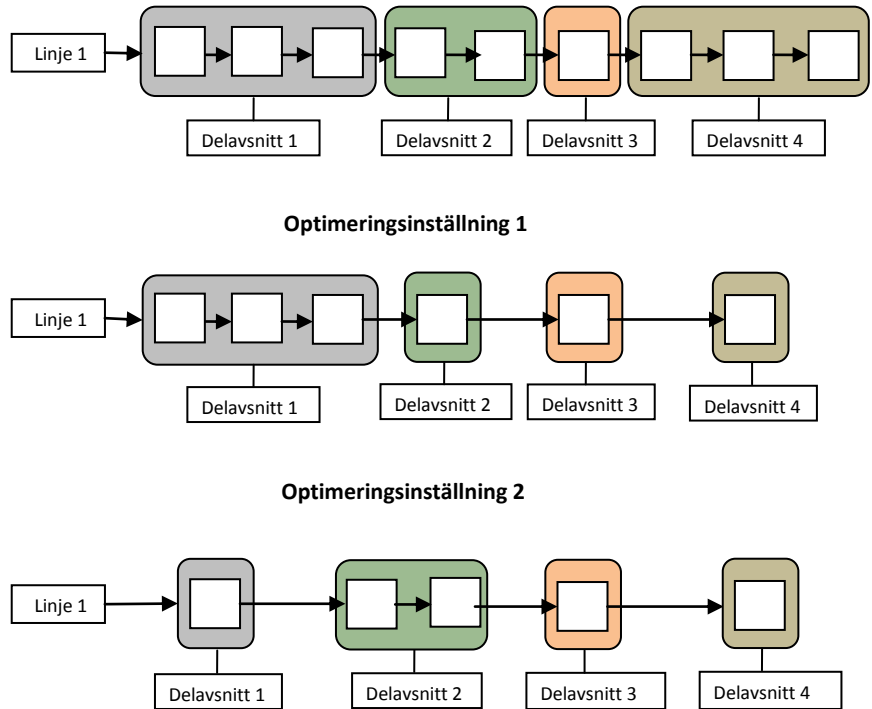
Vi valde att dela upp simuleringen i delsimuleringar med mål att få avsnitten så väl separerade från varandra som möjligt. Det gjordes genom att brytpunkten blev en station där en eller flera linjer går ihop. Stationerna fram till denna brytpunkt bildar en delsimulering och själva brytpunkten blir första station i nästa delsimulering, se figur 4.4.



Figur 4.4 Schematisk figur som visar ett exempel på hur delsimuleringar valdes ut, i detta fall för linje 1.

4.3.2 Lokaloptimering

När väl alla delsimuleringar har valts ut gäller det att optimera placeringen av bufferttid för varje delavsnitt så att en så hög regularitet som möjligt uppnås. Varje delavsnitt har en fast mängd bufferttid som är hämtad från den aktuella tidtabellen som S-tågen kör efter. Det går endast att optimera ett delavsnitt åt gången. Man optimerar till att börja med det första delavsnittet genom att variera bufferttiden på alla hållplatser i avsnittet. Figur 4.5 visar på ett schematiskt sätt hur de olika optimeringsinställningarna väljs för att optimera de olika delavsnitten. Tre olika kombinationer av bufferttid testas för varje hållplats. Dock startas bara simuleringsmodellen upp för giltiga kombinationer av bufferttider dvs. när summan av alla hållplatsers bufferttider i avsnittet är lika med den fasta mängd bufferttid som tidtabellen angett för delavsnittet. Vi har valt att skriva optimeringskoden som ett makro i Excel som styr vårt gränssnitt och startar Extend för giltiga kombinationer av bufferttid placering. En optimering som görs på detta sätt leder till en lokaloptimal placering av bufferttid. Med det menas att varje delavsnitt har en optimal inställning, men det behöver inte betyda att det är en globaloptimal lösning för hela S-tågnätet. Den fasta mängd bufferttid som varje delavsnitt har tilldelats av tidtabellen behöver inte vara optimal. Bufferttiden för varje delavsnitt kommer dock i nästa examensarbete att försöka optimeras fram.



Figur 4.5 En schematisk bild som visar optimeringsinställningarna. I detta fall de två första optimeringsinställningarna för linje 1.

4.3.3 Optimeringsmakron i Excel

I Tabell 4.4 listas de makron i Excel som används till simuleringsmodellen.

Makro	Syfte
Linje ES	Lokaloptimera delavsningen på linje ES
Linje EN	Lokaloptimera delavsningen på linje EN
Linje BS	Lokaloptimera delavsningen på linje BS
Linje BN	Lokaloptimera delavsningen på linje BN
Linje AS	Lokaloptimera delavsningen på linje AS
Linje AN	Lokaloptimera delavsningen på linje AN
Linje CS	Lokaloptimera delavsningen på linje CS
Linje CN	Lokaloptimera delavsningen på linje CN
Linje HS	Lokaloptimera delavsningen på linje HS
Linje HN	Lokaloptimera delavsningen på linje HN
Linje BxS	Lokaloptimera delavsningen på linje BxS
Linje BxN	Lokaloptimera delavsningen på linje BxN
Openmodell	Startar upp Extend, simuleringsmodellen samt startar simuleringen
Utskrift (alla linjer)	Kopierar resultatet från simuleringsmodellen till Excel samt beräknar medelförsening och standardavvikelse

Tabell 4.4 Excelmakron och dess syfte

5 Resultat

Detta avsnitt besvarar frågorna i problemformuleringen samt redovisar resultat för de olika scenarier som har simulerats.

5.1 Resultat av verifikation av simuleringsmodellen

Det är viktigt att kontrollera att simuleringsmodellen är byggd som det är tänkt. Verifikationen handlar om att se till att simuleringsmodellen fungerar som det är tänkt på en mycket detaljerad nivå. Det kan t.ex röra sig om att kontrollera den logiska strukturen, och att in- och utparametrar används som det är tänkt.

De verifikationstekniker vi har använt oss av i detta examens arbete är:

- **Modularity building**

Vid skapandet av simuleringsmodellen av S-tågnätet byggdes varje station som en enskild modul. I vår modell åstadkoms detta genom att vi skapade ett hierarkiskt block för varje hållplats. Anledningen till detta var att det skulle bli lättare att lokalisera var felen uppstår och att modellen skulle bli mera överskådlig.

- **Test of sub - models**

Denna verifikationsteknik användes till att börja med då de enskilda hållplatserna skapades för att se att de fungerade som de skulle. Sedan testades också varje enskild linje för sig.

- **Check by third party**

Då vi är 2 personer som har skapat denna simuleringsmodell har vi till att börja med kontinuerligt kontrollerat varandras arbete. Därutöver har vi vid utspridda tillfällen under arbetets gång fått simuleringsmodellen granskad dels av vår handledare på DSB och dels av vår handledare på LTH.

- **Check that input values are correctly used**

Detta gjordes genom att kontrollera att blocken som gör beräkningar i simuleringsmodellen gav det förväntade resultatet.

- **Animation**

Vi använde oss av animering för att se att objekten färdades som det var tänkt genom modellen. I denna simuleringsmodell utgjordes de animerade objekten i princip av tågen inom de olika linjerna i tågnätet.

5.2 Resultat av valideringen på simuleringsmodellen

Validering handlar om att kontrollera så att modellen fungerar som det verkliga systemet man försöker efterlikna.

De tekniker som använts för att validera simuleringsmodellen har varit:

- **Face Validation**

Denna teknik går ut på att någon som känner till det verkliga systemet kontrollerar att simuleringsmodellen beskriver verkligheten. Detta har gjorts genom att vår handledare på DSB har granskat modellen så att den överensstämmer med verkligheten.

- **Special input Testing**

Här testas om vissa speciella värden ger de tänkta resultaten i simuleringsmodellen. Vi använde oss av detta genom att vi, vid vissa tillfällen under arbetets gång, testade hur extrema indata påverkade modellen.

- **Sensitive analysis**

Denna analys gjordes genom att vi tog bort det stokastiska i modellen, detta för att se om simuleringsmodellen uppförde sig och gav de tänkta utdata, som vi hade beräknat på förhand.

- **Input and output validation**

Vi validerar här att modellens utdata ger liknande resultat som det verkliga systemet. Detta har gjorts genom att vår handledare på DSB har kontrollerat, att den regularitet som simuleringsmodellen har gett, verkar rimlig.

- **Failure insertion testing**

Den här valideringstekniken undersöker hur modellen reagerar om man medvetet stoppar in fel i modellen. Detta har använts vid enstaka tillfällen under skapandet av simuleringsmodellen.

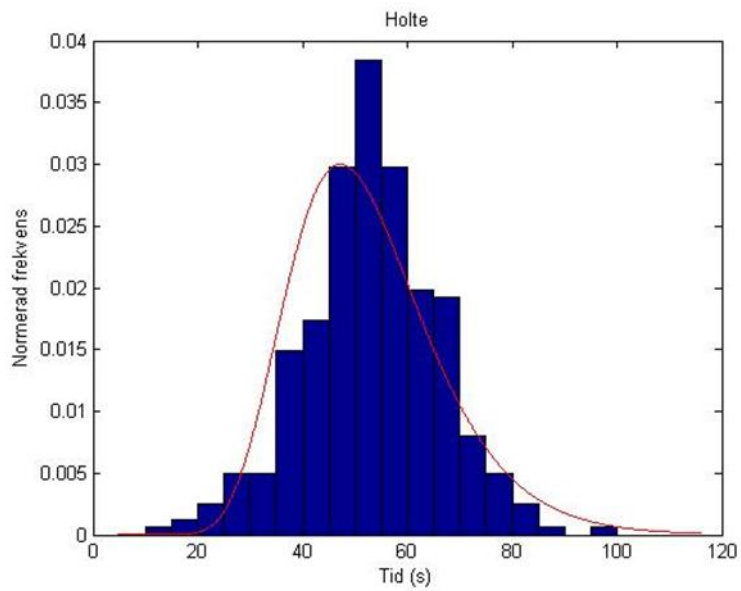
- **Data analysis**

För att validera att korrekt indata har använts i modellen, har några statistiska test genomförts. Detta tas upp mer under rubriken validering av indata.

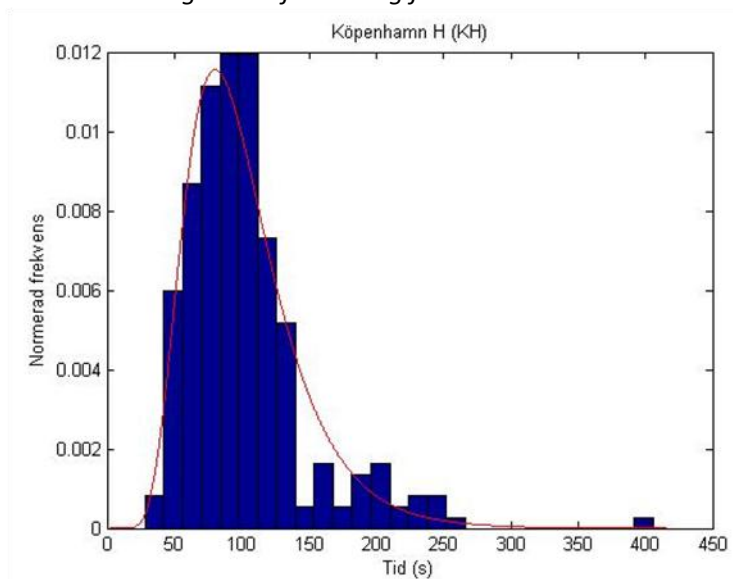
5.3 Validering av indata

För att validera indata som erhållits från DSB angående uppehållstiderna på stationerna, har stickprov gjorts i de olika zonerna enligt figur 2.2. För de stationer som valts ut har indata samlats in, chi-två test, ML-skattning och stickprovsskattning gjorts. Detta har gjorts för att jämföra våra insamlade data med de redan befintliga. I figur 5.1, 5.2 och 5.3 kan man se exempel på hur vi försökt anpassa en lognormalfördelning till våra insamlade data.

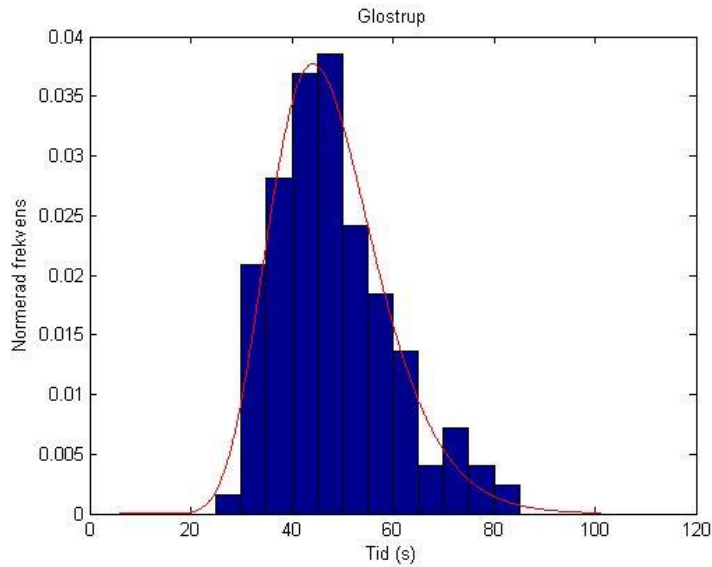
Ett chi-två test till varje stickprov har gjorts. Ett sådant test är mycket känsligt och all våra indata varierar kraftigt. Detta gör att man nästan på alla normala signifikansnivåer kan förkasta lognormalfördelningen. Vi tycker ändå att det går att representera våra indata med en lognormalfördelning, eftersom indata med så stora varianser i stort sett alltid blir förkastade av ett chi-två test. Det grafiska testet i figur 5.1, 5.2 och figur 5.3 styrker vårt antagande, att lognormalfördelningen kan användas för att representera den stokastiska uppehållstiden på en station. I tabell 5.1 görs en jämförelse mellan våra skattade inparametrar och DSB:s. De avviker något från varandra, men det finns även en stor osäkerhet i våra indata, eftersom uppehållstiderna var dåligt dokumenterade på DSB. Vi har därför valt att använda oss av DSB:S framtagna lognormalfördelningar med tillhörande inparametrar.



Figur 5.1 Grafisk anpassning av våra indata till en lognormalfördelning för stationen Holte



Figur 5.2 grafisk anpassning av våra indata till en lognormalfördelning för stationen KH



Figur 5.3 grafisk anpassning av våra indata till en lognormalfördelning för stationen Glostrup

Station	Stickprovsskattat μ & σ	ML - skattat μ & σ	DSB μ & σ
Holte	$\mu = 0,87$ $\sigma = 0,21$	$\mu = 0,87$ $\sigma = 0,21$	$\mu = 0,62$ $\sigma = 0,27$
KH	$\mu = 1,70$ $\sigma = 0,77$	$\mu = 1,70$ $\sigma = 0,77$	$\mu = 1,55$ $\sigma = 0,81$
Glostrup	$\mu = 0,80$ $\sigma = 0,19$	$\mu = 0,80$ $\sigma = 0,19$	$\mu = 0,91$ $\sigma = 0,41$

Tabell 5.1 Visar jämförelse av våra skattade parametrar och DSB:s

5.4 Resultat av lokaloptimeringen

I denna del presenterar vi våra resultat från lokaloptimeringen samt jämför dem med dagens inställning av bufferttid. Simuleringstiden är 4 timmar, med indata som skall motsvara den verkliga tiden 06.00-10.00 på morgonen. Simuleringsmodellen har sedan körts 50 ggr för att eliminera den stokastiska faktorn. Medelförsening, standardavvikelse (av förseningen) och medelregularitet har därefter beräknats. Vi har gjort samma resultatanalys för samtliga linjer och riktningar, men väljer endast att redovisa hur vi gått tillväga för Linje ES och EN. Övriga linjers resultat placeras i appendix A, dock visar tabell 5.5 beräknad regularitet för respektive linje och riktning.

5.4.1 Linje E:s lokaloptimering

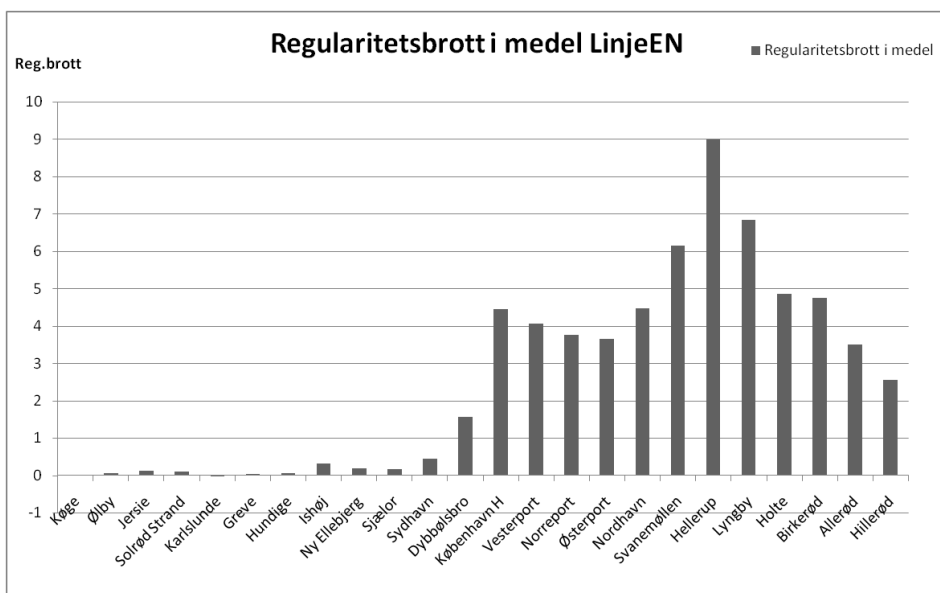
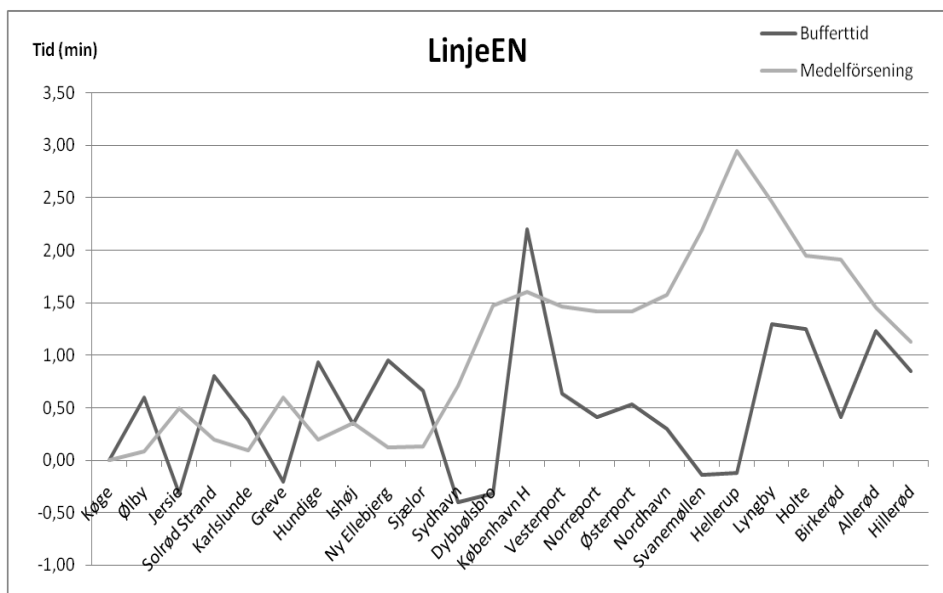
Det som visas i det övre diagrammet i figur 5.4 är en graf där den mörkgrå kurvan visar hur mycket bufferttid som placerats ut. Bufferttidsinställningen är den som lokaloptimerats fram för Linje ES. Den ljusgrå kurvan beskriver hur mycket ett tåg är försenat i medel vid varje hållplats. Samma sak har gjorts för linje EN. Här är givetvis bufferttidsinställningen den lokaloptimala för linje EN. Resultatet för linje EN kan ses i figur 5.5. Det övre diagrammet i figur 5.4 och figur 5.5 visar tydligt hur det uppstår problem i det centrala avsnittet (zon 2), där till och med kravgränsen på 2,5 min överstigs i medelvärde. Detta är ett genomgående scenario för alla linjer.

Det undre diagrammet i figur 5.4 och figur 5.5 beskriver hur många regularitetsbrott i medel som uppkommit vid respektive station. Som väntat uppstår det mest regularitetsbrott i det centrala avsnittet (zon 2).

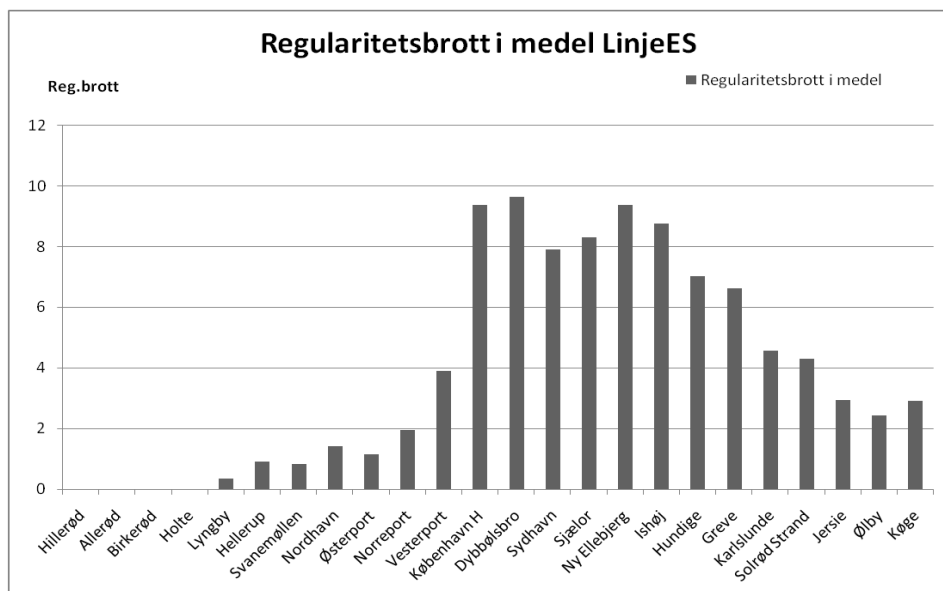
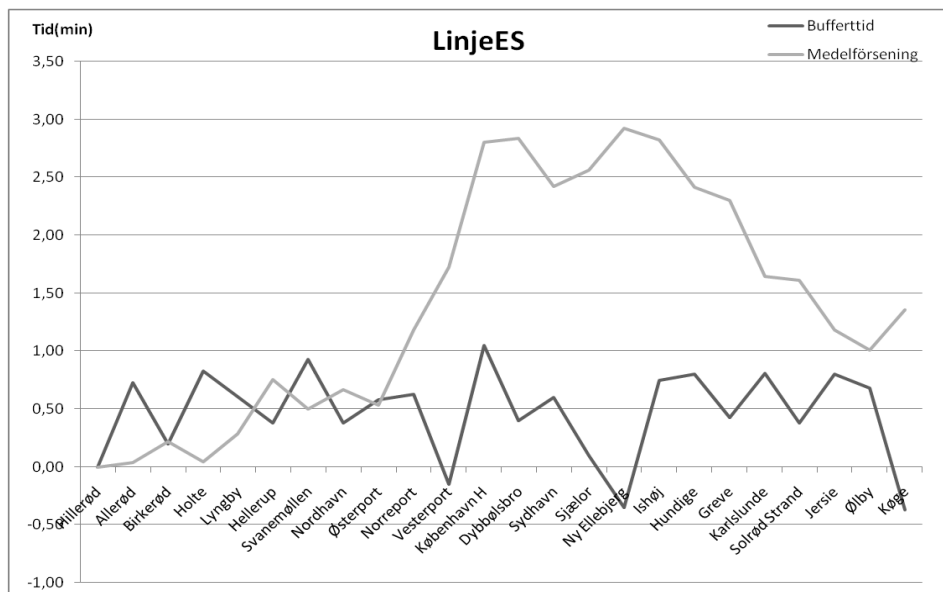
Ett konfidensintervall på signifikansnivån 5 % för regulariteten i de båda riktningarna på linje E har beräknats fram till (0,784:0,822). Det betyder att med 95% sannolikhet ligger vår simulerade regularitet i det nämnda intervallet.

Linje	Konfidensintervall för regulariteten ($\alpha=0,05$)
Linje ES	78,4%-82,2%
Linje EN	85,2%-87,8%

Tabell 5.2 Konfidensintervall för regularitet linjeE



Figur 5.5 visar resultaten från linjeEN



Figur 5.1 och 5.2 visar simuleringsresultat från linjeES

Linje E (S)	Hillerød	Allerød	Birkerød	Holte	Lyngby	Hellerup	Svanemøllen	Nordhavn
Verklig Bufferttid (min)	0,00	0,73	0,20	0,83	0,61	0,38	0,93	0,38
Regularitetsbrott i medel (st)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,34	0,90	0,84	1,42
Medelförsening (min)	0,00	0,04	0,22	0,05	0,29	0,76	0,50	0,67
Standardavvikelse (min)	0,00	0,02	0,05	0,03	0,14	0,17	0,16	0,23
Linje E (S)	Østerport	Norreport	Vesterport	København H	Dybbølsbro	Sydhavn	Sjælor	Ny Ellebjerg
Verklig Bufferttid (min)	0,58	0,63	-0,15	1,05	0,40	0,60	0,10	-0,35
Regularitetsbrott i medel (st)	1,14	1,94	3,90	9,36	9,64	7,88	8,30	9,36
Medelförsening (min)	0,53	1,18	1,73	2,81	2,84	2,42	2,57	2,93
Standardavvikelse (min)	0,24	0,29	0,31	0,75	0,78	0,76	0,76	0,76
Linje E (S)	Ishøj	Hundige	Greve	Karlslunde	Solrød Strand	Jersie	Ølby	Køge
Verklig Bufferttid (min)	0,75	0,80	0,43	0,81	0,38	0,80	0,68	-0,37
Regularitetsbrott i medel (st)	8,76	7,02	6,62	4,56	4,30	2,94	2,42	2,92
Medelförsening (min)	2,83	2,42	2,30	1,64	1,62	1,18	1,01	1,36
Standardavvikelse (min)	0,79	0,80	0,80	0,74	0,71	0,64	0,57	0,56

Tabell 5.3 visar vilka bufferttider som placerats ut för linjeES samt vilka resultat det gav

Linje E (N)	Køge	Ølby	Jersie	Solrød Strand	Karlsunde	Greve	Hundige	Ishøj
Verklig Bufferttid (min)	0,00	0,60	-0,32	0,80	0,38	-0,20	0,93	0,35
Regularitetsbrott i medel (st)	0,00	0,06	0,13	0,10	-0,03	0,03	0,06	0,31
Medelförsening (min)	0,00	0,08	0,49	0,19	0,09	0,60	0,19	0,35
Standardavvikelse (min)	0,00	0,03	0,49	0,25	0,13	0,65	0,24	0,43
Linje E (N)	Ny Ellebjerg	Sjælør	Sydhavn	Dybbølsbro	København H	Vesterport	Norreport	Østerport
Verklig Bufferttid (min)	0,95	0,66	-0,40	-0,32	2,20	0,63	0,41	0,53
Regularitetsbrott i medel (st)	0,18	0,16	0,45	1,57	4,44	4,07	3,76	3,65
Medelförsening (min)	0,12	0,13	0,71	1,47	1,60	1,46	1,41	1,42
Standardavvikelse (min)	0,11	0,17	0,79	1,43	1,50	1,28	1,19	1,23
Linje E (N)	Nordhavn	Svanemøllen	Hellerup	Lyngby	Holte	Birkerød	Allerød	Hillerød
Verklig Bufferttid (min)	0,30	-0,14	-0,12	1,30	1,25	0,41	1,23	0,85
Regularitetsbrott i medel (st)	4,47	6,15	8,99	6,83	4,86	4,75	3,49	2,56
Medelförsening (min)	1,57	2,19	2,94	2,46	1,94	1,91	1,45	1,13
Standardavvikelse (min)	1,33	1,93	2,62	2,35	1,91	1,91	1,57	1,23

Tabell 5.4 visar vilka bufferttider som placerats ut för linjeEN samt vilka resultat det gav

5.4.2 Resultat regularitet

För varje linje har regulariteten beräknats med ett konfidensintervall på signifikansnivån $\alpha=0,05$. I kolumnen "resultat vår optimering" visas regularitetsresultatet för vår lokaloptimerade bufferttidsinställning. I kolumnen "resultat DSB:s tidtabell" visas vår simuleringsmodellens regularitetsresultat med en bufferttidsinställning enligt den nuvarande tidtabellen på DSB.

Linje	Resultat (vår optimering)	Resultat (DSB:s tidtabell)
Linje ES	78,4%-82,2%	79,5%-83,6%
Linje EN	85,2%-87,8%	82,6%-85,2%
Linje BS	78,9%-82,4%	80,7%-83,8%
Linje BN	79,0%-82,0%	75,0%-78,6%
Linje AS	85,7%-88,3%	84,9%-88,1%
Linje AN	80,9%-84,2%	75,3%-78,9%
Linje CS	66,2%-70,0%	63,3%-66,1%
Linje CN	72,2%-75,0%	71,1%-74,3%
Linje HS	72,0%-77,7%	65,2%-70,6%
Linje HN	80,6%-84,0%	70,2%-73,2%
Linje BxS	85,2%-88,1%	83,6%-86,7%
Linje BxN	72,4%-77,7%	70,5%-76,1%

Tabell 5.5 visar en jämförelse av våra simuleringsresultat

DSB har endast dokumenterat ett regularitetsresultat för hela S-tågnätet dvs. ett medelvärde av alla linjer och riktningar. För att kunna jämföra våra regularitetsresultat för rusningstiden på morgonen var vi tvungna att lägga till den dokumenterade regulariteten på 97% för linje F. Medelregulariteten som simulerats fram med bufferttid enligt DSB:s tidtabell för hela S-tågnätet blev då 79,8%, vilket kan jämföras med 87 % som DSB dokumenterat. För vår lokaloptimerade placering av bufferttid har vi beräknat fram en regularitet för hela S-tågnätet till 81,2%.

6 Slutsats och diskussion

I denna del drar vi slutsatser och diskuterar resultaten från kapitel 5.

6.1 Slutsats

Syftet med detta examensarbete har varit att ta fram en väl fungerande simuleringsmodell för S-tågnätet, att analysera modellen med avseende på att höja regulariteten, samt att ge DSB ett förslag på en lokaloptimal placering av bufferttid för respektive linje.

Vi har genom olika valideringstekniker kontrollerat hur väl simuleringsmodellen beskriver verkligheten. Alla resultat tyder på att simuleringsmodellen och verkligheten stämmer väl överens. Regularitetsresultaten från tabell 5.5 visar att vår simulerade regularitet motsvarar den verkliga. Utseendet på graferna, som beskriver hur förseningar är fördelade över respektive linje, har diskuterats med insatt personal på DSB, som bekräftade att de kunde representera verkligheten. Vi anser därmed att vi har tagit fram en väl fungerande simuleringsmodell för S-tågnätet.

För att höja regulariteten har lokaloptimeringar gjorts på respektive linje i varje riktning. Vi har här varit ganska begränsade av tidtabellen, som angett mängden bufferttid som har tillåtits att placeras ut. Som tabell 5.5 visar har en liten förbättring i regularitet uppnåtts för de flesta linjer. Dock ger inte vår lokaloptimala bufferttidsinställning högst regularitet för

all linjer, det beror på att DSB har tillåtit variera bufferttiden utanför våra begränsningar. Den lokaloptimala utplaceringen av bufferttid, som har simulerats fram för respektive linje, kan ses i tabellerna i appendix A. Förseningarna uppkommer främst i det centrala avsnittet (zon 2) . Det beror på att linjerna planeras inkomma med 2 minuters mellanrum till det centrala avsnittet. Har tågen dragit på sig förseningar in till detta avsnitt leder det till att tågen kan blockera varandra och små köer uppkommer, vilket i sin tur leder till ytterligare förseningar. Slutsatsen man kan dra av det här är att det är mycket viktigt att tågen verkligen anländer till det centrala avsnittet planenligt. Detta kan åstadkommas genom att man placerar ut extra bufferttid i början av linjerna eller att planera in så att alla linjer har ungefär lika stor försening fram till det centrala avsnittet. En annan slutsats man kan dra är att man bör undvika tidiga regularitetsbrott, då de oftast är svåra att bli av med och oftast ger regularitetsbrott ända fram till sluthållplatsen. Detta leder i sin tur till att regulariteten sjunker.

Vårt förslag till DSB är, att de bör fokusera på placering av bufferttid fram till det centrala avsnittet och om möjligt prova att placera ut mer bufferttid i detta avsnitt, för att se hur det påverkar den totala regulariteten. Vi tror att detta kommer att leda till att tågen kan tajmas in bättre till det centrala avsnittet och därmed undviker att blockera varandra, vilket borde leda till en högre regularitet.

6.2 Diskussion

Vi anser att den största osäkerheten med simuleringsmodellen är indata till uppehållstiderna. Det finns inte någon databas med uppehållstider på DSB idag. För de hållplatser som vi gjort stickprov på, fick vi jämföra data från två olika databaser: en för ankomsttider och en för avgångstider. Vi upptäckte att databaserna innehöll givna fel, t.ex. att vissa uppehållstider blev negativa. Detta, och det tidskrävande manuella arbete som annars skulle ha krävts, var huvudanledning till att vi använde oss av DSB:s redan färdiga fördelningar för uppehållstiderna. En brist hos DSB:s uppehållstider är att man endast har skattat fördelningar till varje hållplats och att de sedan antas gälla för båda riktningarna. Vår validering av DSB:s fördelningar är inte tillräcklig. För att kunna lita på simuleringsresultaten fullt ut, måste nya uppehållstider tas fram eller en noggrannare analys av DSB:s fördelningar göras. DSB håller på att installera nya mätsystem som bl.a. skall mäta uppehållstiderna. Detta möjliggör att korrekta uppehållstider kan fås och nya fördelningar kan beräknas fram. Vårt interface i Excel är konstruerat på ett sätt, så att det är mycket lätt att ändra inparametrarna till fördelningarna för uppehållstider.

När vi optimerar vår utplacering av bufferttid för varje delavsnitt leder det till en lokaloptimal lösning. Det enda vi kan säga är att varje delavsitt är optimerat, men det behöver inte betyda att bufferttidsplaceringen är optimal för hela linjen. Vi får alltså inte en global lösning utan en lokaloptimerad. Detta är givetvis en brist men antalet stationer i S-tågnätet gör det omöjligt att ta fram en global lösning.

Vår simulerade medelregularitet över hela S-tågnätet visade sig vara något lägre än den dokumenterade hos DSB. Vi tror att skillnaden, förutom osäkerheten med indata, kan bero på de antaganden som gjorts i simuleringsmodellen.

Referenser

Litteratur

Banks, Jerry, (ed.) (1998). *Handbook of simulation: Principles, methodology, advances, applications and practice*. New York: Wiley.

Blom, Gunnar (1984). *Sannolikhets teori med tillämpningar*. 2. Upplagan. Lund: Studentlitteratur.

Blom, Gunnar & Holmqvist, Björn (1998). *Statistik teori med tillämpningar*. 3. upplagan. Lund: Studentlitteratur.

Bryman, Alan & Bell, Emma (2005). *Företagsekonomiska forskningsmetoder*. 1 uppl. Malmö: Liber ekonomi.

Dahmström, Karin (2005). *Från datainsamling till rapport: att göra en statistisk undersökning*. 4. uppl. Lund: Studentlitteratur.

Körner, Svante & Wahlgren, Lars (2005). *Statistiska metoder*. 2. uppl. Lund: Studentlitteratur.

Laguna, Manuel & Marklund, Johan (2005). *Business process modeling, simulation, and design*. Upper Saddle River, NJ: Pearson/Prentice Hall

Jacobsen, Dag Ingvar (2002). *Vad, hur och varför: Om metodval i företagsekonomi och andra samhällsvetenskapliga ämnen*. Lund: Studentlitteratur.

Internetkällor

<http://www.DSB.dk> (2008-04-10)

http://www.extendsim.com/prods_overview.html (2008-05-08)

<http://www.eetimes.com/news/design/showArticle.jhtml?articleID=49400392> (2008-05-08)

<http://maps.unomaha.edu/maher/GEOL2300/week2/week2.html> (2008-05-16)

Muntliga Källor

Stefan Vidgren, Operationsanalytiker på DSB.

Artiklar

Kroon, Leo & Dekker, Rommert & Vromans, Michiel J.C.M (2005). *Cyclic Railway Timetabling: a Stochastic Optimization Approach*

Appendix A

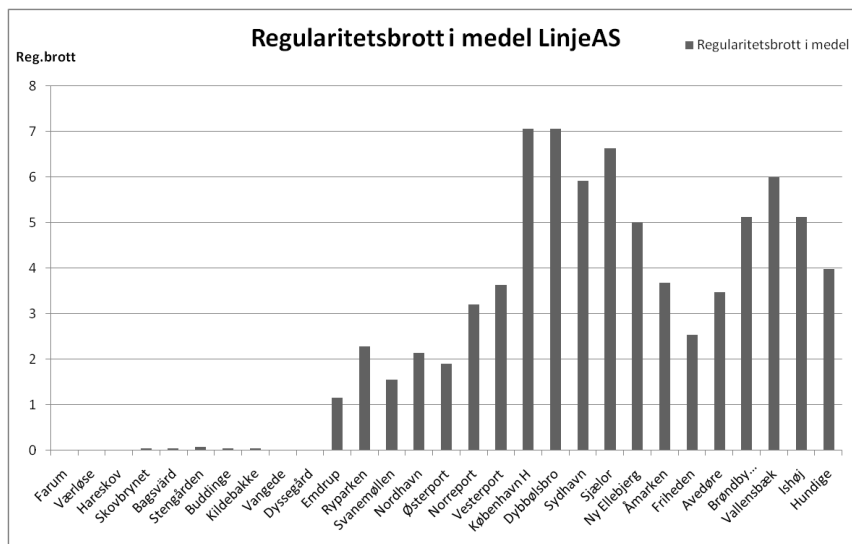
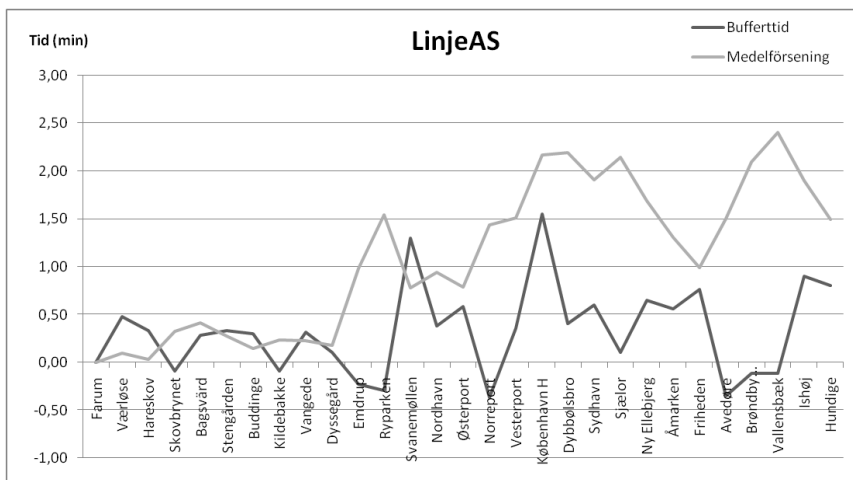
Resultat lokaloptimering

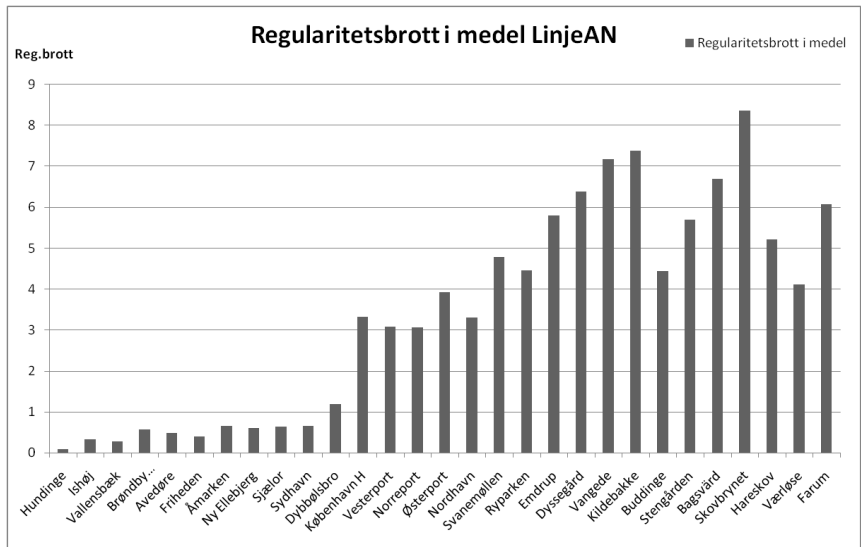
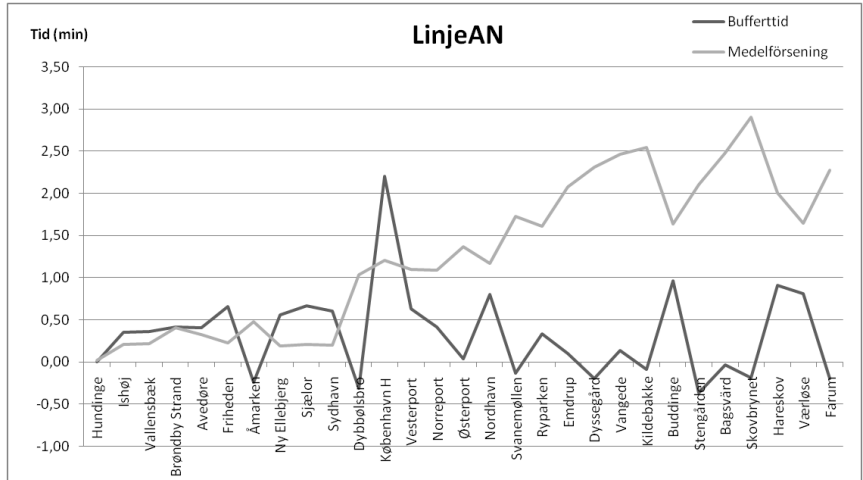
Appendix A visar lokaloptimeringsresultat för övriga linjer.

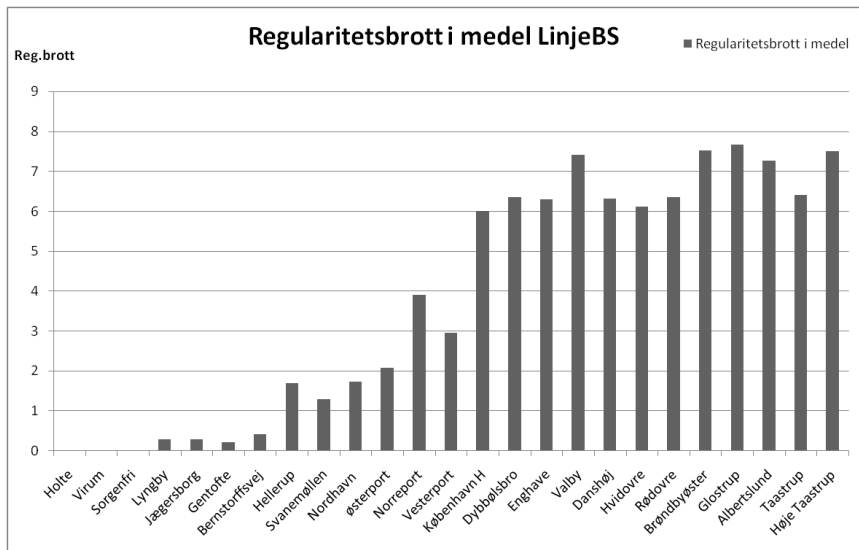
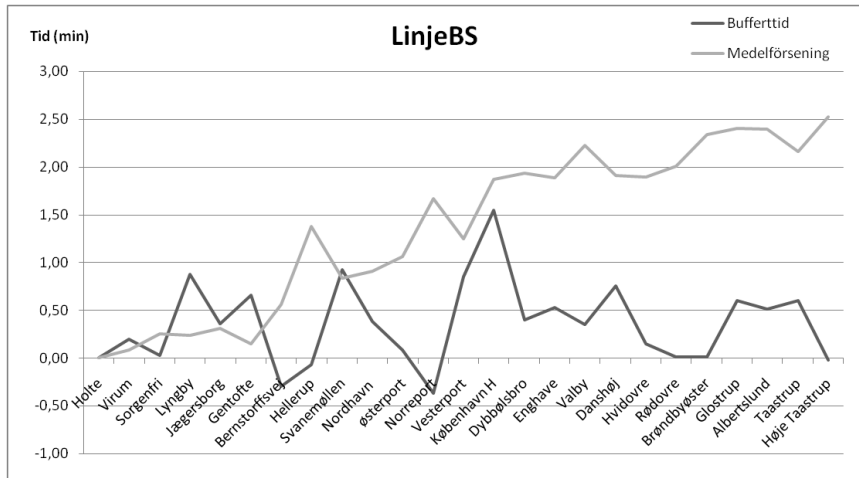
Varje linjes resultat består av 2 diagram och 1 tabell. Det som visas i det övre diagrammet för varje linje, är en graf där den mörkgråkurvan visar hur mycket bufferttid som placerats ut. Bufferttidsinställningen är den som lokaloptimerats fram för Linjen. Den ljusgråa kurvan beskriver hur mycket ett tåg är försenat i medel vid varje hållplats.

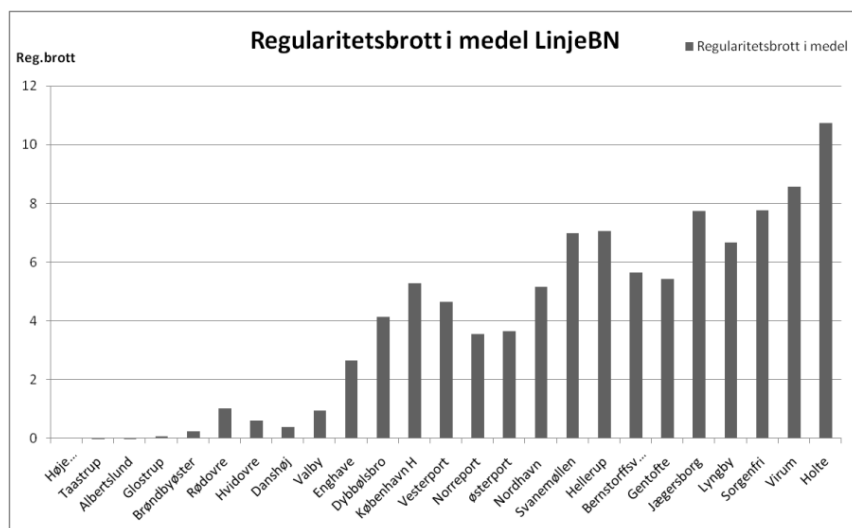
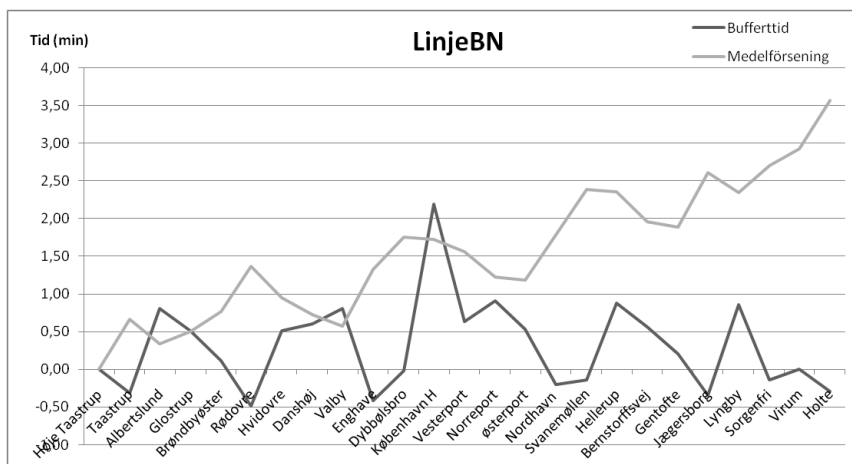
Det undre diagrammet för varje linje beskriver hur många regularitetsbrott i medel som uppkommit vid respektive station.

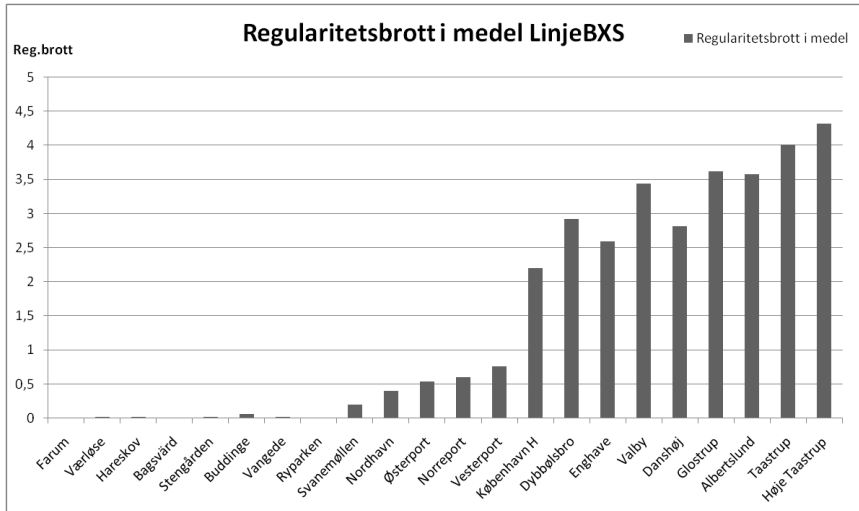
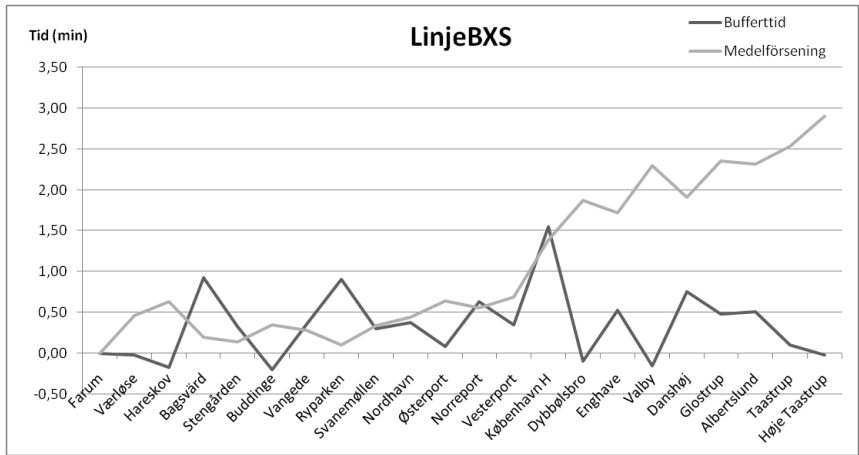
Tabellen som tillhör varje linjes resultat, visar vilka bufferttider som placerats ut för linjen, samt vilka resultat det gav.

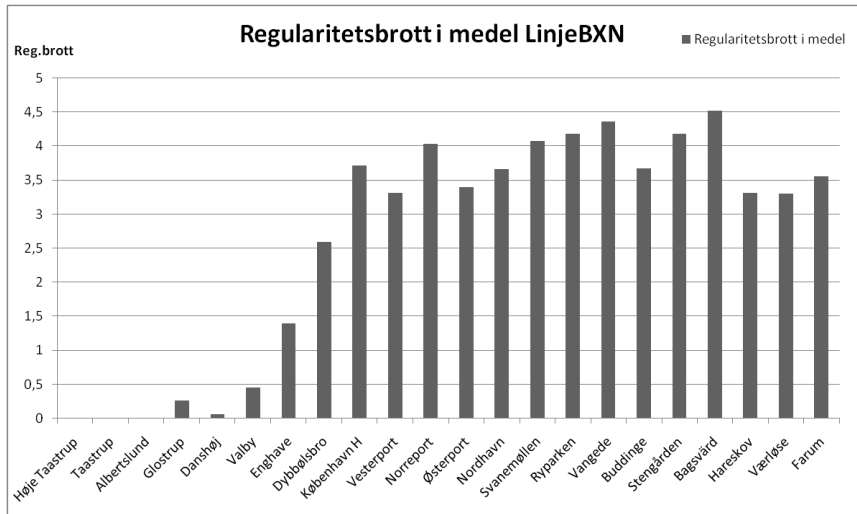
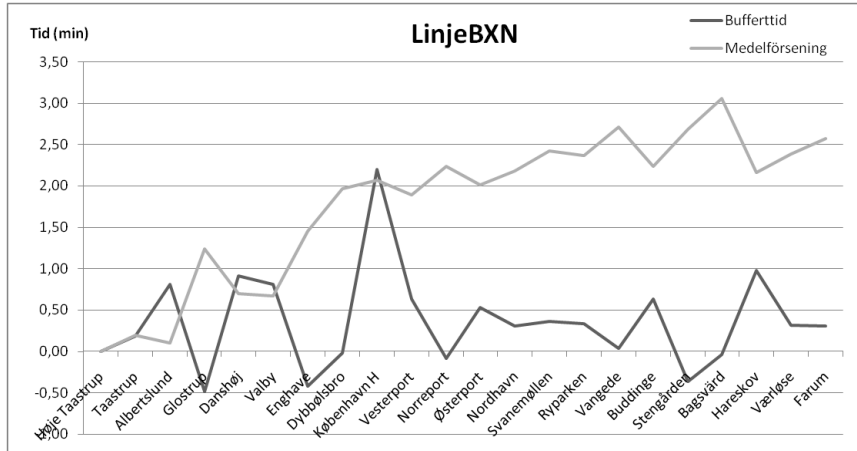


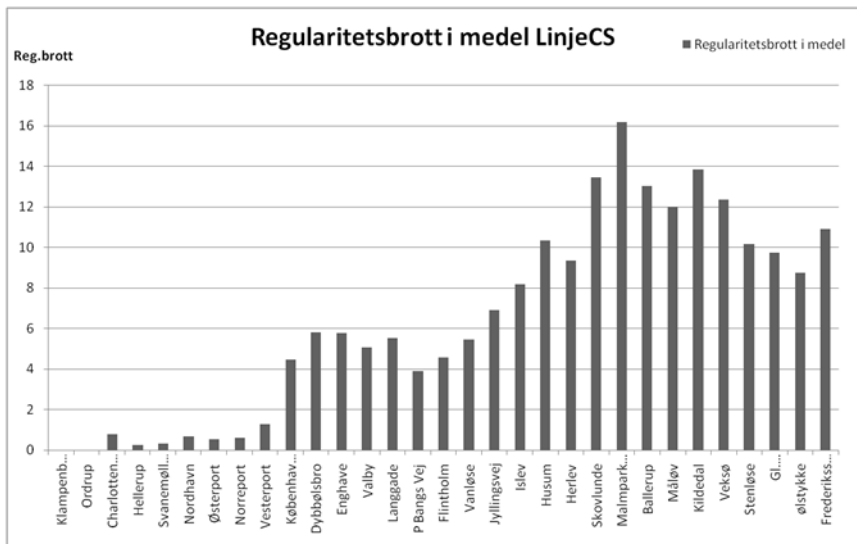
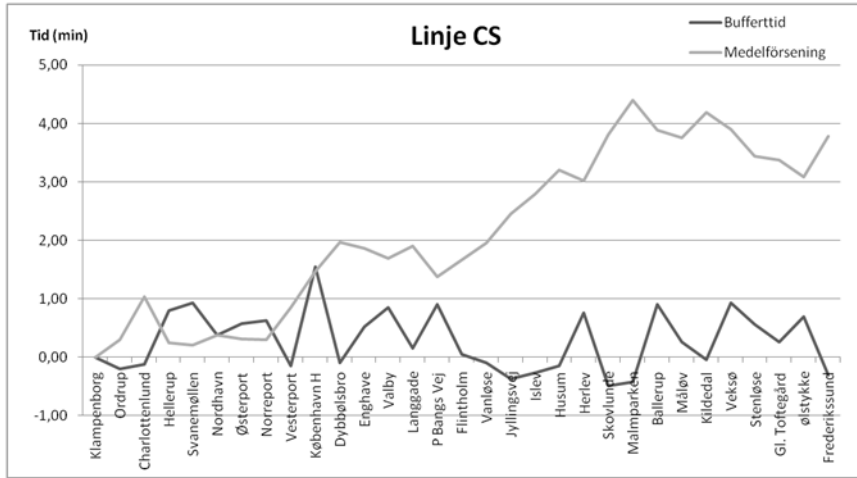


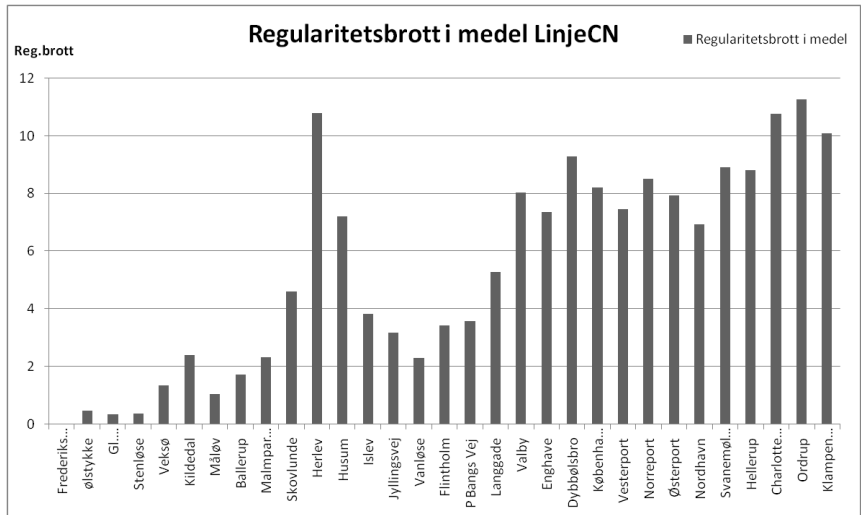
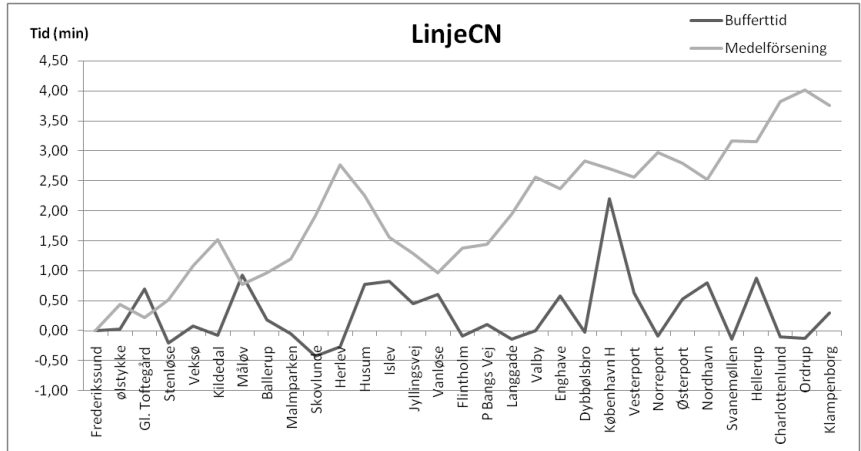


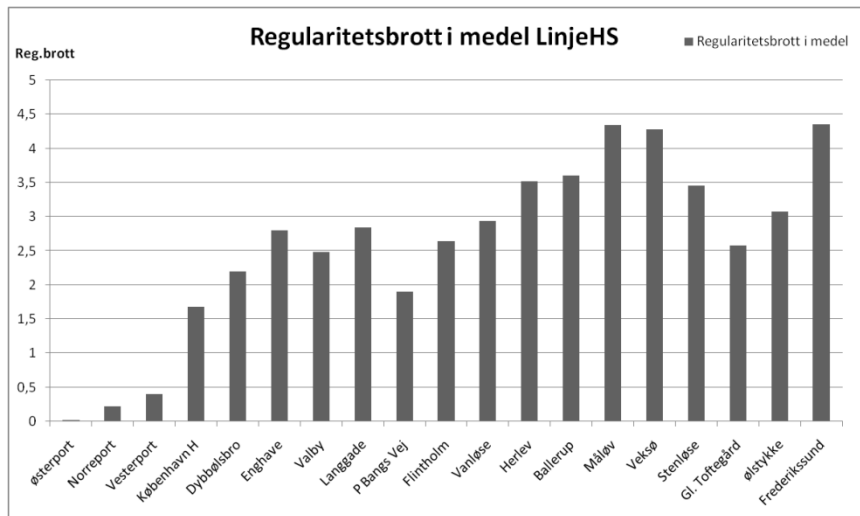
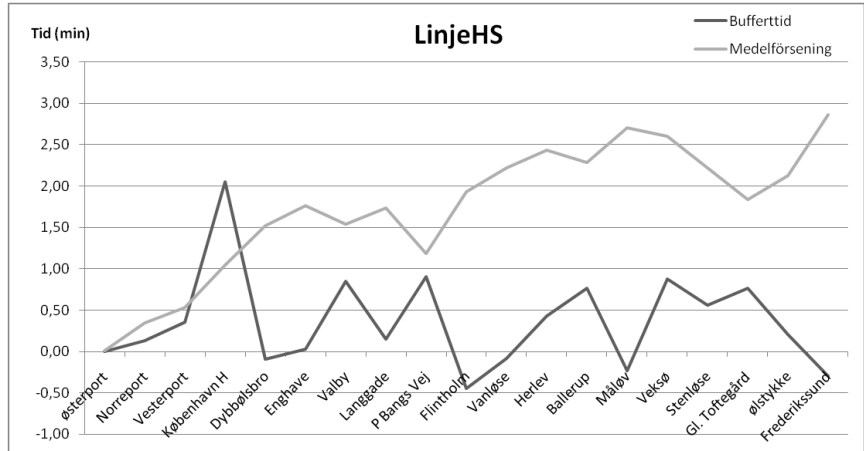


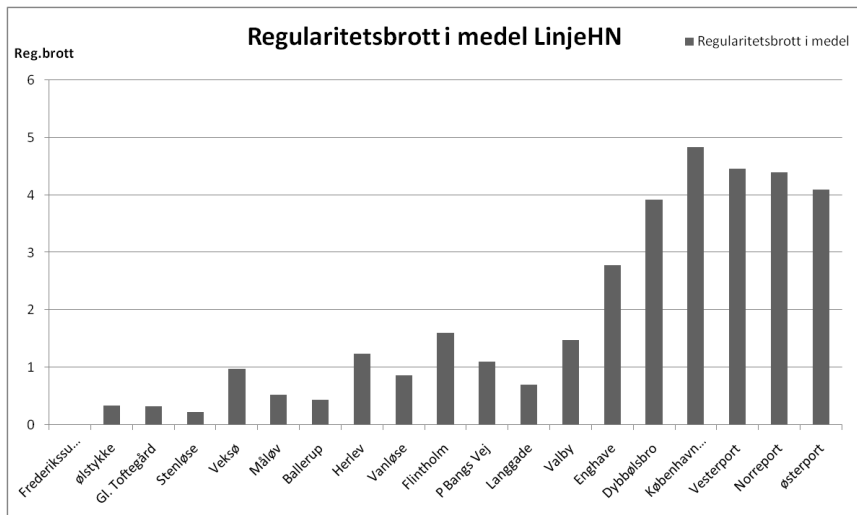
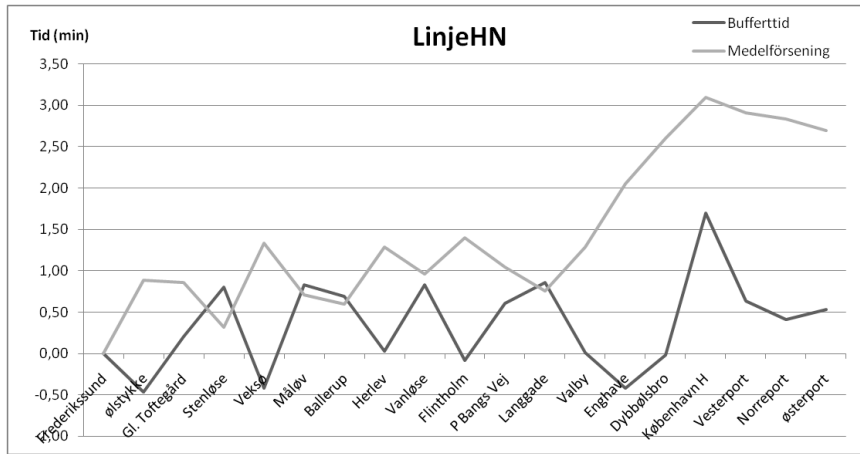












Linje AS

Linje A(S)	Farum	Værløse	Hareskov	Skovbrynet	Bagsvård	Stengården	Buddinge	Kildebakke	Vangede	Dyssegård
Verklig Bufferttid (min)	0,00	0,48	0,33	-0,09	0,28	0,33	0,30	-0,09	0,31	0,10
Regularitetsbrott i medel (st)	0,00	0,00	0,00	0,04	0,04	0,08	0,04	0,04	0,02	0,02
Medelförsening (min)	0,00	0,10	0,03	0,32	0,41	0,28	0,14	0,23	0,23	0,18
Standardavvikelse (min)	0,00	0,04	0,03	0,06	0,08	0,08	0,06	0,06	0,07	0,06
Linje A (S)	Emdrup	Ryparken	Svanemøllen	Nordhavn	Østerport	Norreport	Vesterport	København H	Dybbølsbro	Sydhavn
Verklig Bufferttid (min)	-0,23	-0,30	1,30	0,38	0,58	-0,37	0,35	1,55	0,40	0,60
Regularitetsbrott i medel (st)	1,16	2,28	1,56	2,14	1,90	3,20	3,64	7,06	7,06	5,92
Medelförsening (min)	0,98	1,54	0,78	0,94	0,79	1,43	1,51	2,17	2,19	1,91
Standardavvikelse (min)	0,16	0,19	0,23	0,25	0,26	0,33	0,38	0,57	0,57	0,57
Linje A (S)	Sjælor	Ny Ellebjerg	Åmarken	Friheden	Avedøre	Brøndby S.	Vallensbæk	Ishøj	Hundige	
Verklig Bufferttid (min)	0,10	0,65	0,56	0,76	-0,35	-0,12	-0,12	0,90	0,80	
Regularitetsbrott i medel (st)	6,64	5,00	3,68	2,54	3,48	5,12	6,00	5,12	0,00	
Medelförsening (min)	2,14	1,69	1,31	0,99	1,50	2,09	2,40	1,90	1,50	
Standardavvikelse (min)	0,57	0,55	0,51	0,46	0,48	0,52	0,56	0,64	0,66	

Linje AN

Linje A (N)	Hundinge	Ishøj	Vallensbæk	Brøndby S.	Avedøre	Friheden	Åmarken	Ny Ellebjerg	Sjælør	Sydhavn
Verklig Bufferttid (min)	0,00	0,35	0,36	0,41	0,40	0,65	-0,24	0,56	0,66	0,60
Regularitetsbrott i medel (st)	0,08	0,32	0,28	0,56	0,48	0,4	0,66	0,6	0,64	0,66
Medelförsening (min)	0,02	0,21	0,21	0,41	0,32	0,22	0,48	0,19	0,20	0,19
Standardavvikelse (min)	0,05	0,10	0,10	0,14	0,14	0,13	0,14	0,14	0,17	0,16
Linje A (N)	Dybbølsbro	København H	Vesterport	Norreport	Østerport	Nordhavn	Svanemøllen	Ryparken	Emdrup	Dyssegård
Verklig Bufferttid (min)	-0,32	2,20	0,63	0,41	0,03	0,80	-0,14	0,33	0,10	-0,20
Regularitetsbrott i medel (st)	1,18	3,32	3,08	3,06	3,92	3,3	4,78	4,46	5,8	6,38
Medelförsening (min)	1,03	1,20	1,10	1,09	1,37	1,17	1,72	1,61	2,08	2,31
Standardavvikelse (min)	0,23	0,42	0,41	0,43	0,50	0,48	0,48	0,47	0,48	0,49
Linje A (N)	Vangede	Kildebakke	Buddinge	Stengården	Bagsvård	Skovbrynet	Hareskov	Værløse	Farum	
Verklig Bufferttid (min)	0,13	-0,09	0,96	-0,37	-0,04	-0,19	0,91	0,81	-0,20	
Regularitetsbrott i medel (st)	7,18	7,38	4,44	5,7	6,7	8,36	5,22	4,12	6,08	
Medelförsening (min)	2,46	2,54	1,64	2,11	2,48	2,91	2,01	1,65	2,28	
Standardavvikelse (min)	0,50	0,48	0,47	0,48	0,50	0,52	0,51	0,49	0,52	

Linje BS

Linje B (S)	Holte	Virum	Sorgenfri	Lyngby	Jægersborg	Gentofte	Bernstorffsvej	Hellerup	Svanemøllen	Nordhavn
Verklig Bufferttid (min)	0,00	0,20	0,03	0,88	0,36	0,66	-0,30	-0,07	0,93	0,38
Regularitetsbrott i medel (st)	0	0	0	0,3	0,3	0,22	0,42	1,7	1,3	1,74
Medelförsening (min)	0,00	0,08	0,25	0,24	0,31	0,15	0,55	1,37	0,83	0,90
Standardavvikelse (min)	0,00	0,04	0,06	0,10	0,10	0,09	0,11	0,17	0,20	0,24
Linje B (S)	Østerport	Norreport	Vesterport	København H	Dybbølsbro	Enghave	Valby	Danshøj	Hvidovre	Rødovre
Verklig Bufferttid (min)	0,08	-0,37	0,85	1,55	0,40	0,53	0,35	0,76	0,15	0,01
Regularitetsbrott i medel (st)	2,08	3,9	2,96	6	6,36	6,3	7,42	6,32	6,12	6,36
Medelförsening (min)	1,06	1,66	1,25	1,87	1,93	1,88	2,23	1,91	1,89	2,00
Standardavvikelse (min)	0,24	0,27	0,29	0,74	0,77	0,75	0,73	0,72	0,71	0,71
Linje B(S)	Brøndbyøster	Glostrup	Albertslund	Taastrup	Høje Taastrup					
Verklig Bufferttid (min)	0,01	0,60	0,51	0,60	-0,02					
Regularitetsbrott i medel (st)	7,52	7,66	7,26	6,4	7,5					
Medelförsening (min)	2,33	2,40	2,39	2,16	2,52					
Standardavvikelse (min)	0,72	0,76	0,76	0,73	0,73					

Linje BN

Linje B (N)	Høje Taastrup	Taastrup	Albertslund	Glostrup	Brøndbyøster	Rødovre	Hvidovre	Danshøj	Valby	Enghave
Verklig Bufferttid (min)	0,00	-0,32	0,81	0,51	0,11	-0,49	0,51	0,60	0,81	-0,42
Regularitetsbrott i medel (st)	0,00	-0,02	-0,01	0,08	0,24	1,02	0,62	0,38	0,95	2,65
Medelförsening (min)	0,00	0,67	0,34	0,50	0,76	1,37	0,95	0,73	0,58	1,33
Standardavvikelse (min)	0,00	0,05	0,07	0,10	0,12	0,12	0,12	0,14	0,19	0,24
Linje B (N)	Dybbølsbro	København H	Vesterport	Norreport	Østerport	Nordhavn	Svanemøllen	Hellerup	Bernstorffsvej	Gentofte
Verklig Bufferttid (min)	-0,02	2,20	0,63	0,91	0,53	-0,20	-0,14	0,88	0,56	0,21
Regularitetsbrott i medel (st)	4,13	5,28	4,65	3,54	3,65	5,16	6,98	7,06	5,65	5,43
Medelförsening (min)	1,76	1,73	1,56	1,22	1,19	1,78	2,39	2,36	1,96	1,89
Standardavvikelse (min)	0,25	0,52	0,53	0,52	0,51	0,56	0,57	0,59	0,59	0,59
Linje B(N)	Jægersborg	Lyngby	Sorgenfri	Virum	Holte					
Verklig Bufferttid (min)	-0,35	0,86	-0,14	0,00	-0,30					
Regularitetsbrott i medel (st)	7,75	6,66	7,76	8,56	10,74					
Medelförsening (min)	2,61	2,34	2,71	2,93	3,57					
Standardavvikelse (min)	0,59	0,62	0,63	0,64	0,66					

Linje CS

Linje C (S)	Klampenborg	Ordrup	Charlottenlund	Hellerup	Svanemøllen	Nordhavn	Østerport	Norreport	Vesterport	København H
Verklig Bufferttid (min)	0,00	-0,20	-0,12	0,80	0,93	0,38	0,58	0,63	-0,15	1,55
Regularitetsbrott i medel (st)	0	0	0,78	0,24	0,32	0,68	0,52	0,62	1,26	4,46
Medelførsening (min)	0,00	0,30	1,04	0,25	0,22	0,38	0,31	0,30	0,86	1,47
Standardavvikelse (min)	0,00	0,04	0,13	0,12	0,11	0,14	0,13	0,20	0,27	0,70
Linje C (S)	Dybbølsbro	Enghave	Valby	Langgade	P Bangs Vej	Flintholm	Vanløse	Jyllingsvej	Islev	Husum
Verklig Bufferttid (min)	-0,10	0,53	0,85	0,15	0,90	0,05	-0,09	-0,37	-0,27	-0,15
Regularitetsbrott i medel (st)	5,8	5,78	5,08	5,54	3,88	4,58	5,44	6,9	8,2	10,36
Medelførsening (min)	1,97	1,86	1,69	1,90	1,37	1,67	1,96	2,45	2,80	3,20
Standardavvikelse (min)	0,74	0,76	0,78	0,79	0,74	0,75	0,76	0,76	0,77	0,77
Linje C (S)	Herlev	Skovlunde	Malmparken	Ballerup	Måløv	Kildedal	Veksø	Stenløse	Gl. Toftegård	Ølstykke
Verklig Bufferttid (min)	0,76	-0,49	-0,42	0,91	0,26	-0,04	0,93	0,56	0,26	0,70
Regularitetsbrott i medel (st)	9,34	13,46	16,18	13,04	12	13,86	12,36	10,16	9,74	8,76
Medelførsening (min)	3,02	3,80	4,39	3,88	3,75	4,18	3,90	3,43	3,37	3,09
Standardavvikelse (min)	0,77	0,74	0,77	0,80	0,82	0,82	0,79	0,78	0,79	0,76

Linje CS

Linje C (S)	Frederikssund
Verklig Bufferttid (min)	-0,30
Regularitetsbrott i medel (st)	10,92
Medelförsening (min)	3,78
Standardavvikelse (min)	0,77

Linje CN

Linje C (N)	Frederikssund	Ølstykke	Gl. Toftegård	Stenløse	Veksø	Kildedal	Måløv	Ballerup	Malmparken	Skovlunde
Verklig Bufferttid (min)	0,00	0,03	0,70	-0,20	0,08	-0,07	0,93	0,19	-0,05	-0,42
Regularitetsbrott i medel (st)	0	0,46	0,32	0,36	1,32	2,38	1,04	1,7	2,3	4,6
Medelførsening (min)	0,00	0,44	0,21	0,52	1,08	1,52	0,77	0,96	1,19	1,92
Standardavvikelse (min)	0,00	0,14	0,13	0,13	0,18	0,18	0,18	0,21	0,25	0,26
Linje C (N)	Herlev	Husum	Islev	Jyllingsvej	Vanløse	Flintholm	P Bangs Vej	Langgade	Valby	Enghave
Verklig Bufferttid (min)	-0,27	0,78	0,83	0,45	0,61	-0,09	0,11	-0,14	0,01	0,58
Regularitetsbrott i medel (st)	10,8	7,2	3,82	3,16	2,28	3,42	3,56	5,28	8,04	7,36
Medelførsening (min)	2,77	2,25	1,56	1,28	0,97	1,38	1,44	1,95	2,56	2,37
Standardavvikelse (min)	0,28	0,28	0,28	0,28	0,26	0,29	0,28	0,30	0,40	0,42
Linje C (N)	Dybbølsbro	København H	Vesterport	Norreport	Østerport	Nordhavn	Svanemøllen	Hellerup	Charlottenlund	Ordrup
Verklig Bufferttid (min)	-0,02	2,20	0,63	-0,09	0,53	0,80	-0,14	0,88	-0,10	-0,12
Regularitetsbrott i medel (st)	9,3	8,2	7,46	8,5	7,94	6,94	8,92	8,8	10,78	11,26
Medelførsening (min)	2,84	2,70	2,56	2,97	2,79	2,52	3,16	3,15	3,82	4,02
Standardavvikelse (min)	0,45	0,60	0,58	0,61	0,66	0,68	0,70	0,73	0,70	0,72

Linje CN

Linje C (N)	Klampenborg
Verklig Bufferttid (min)	0,30
Regularitetsbrott i medel (st)	10,08
Medelförsening (min)	3,76
Standardavvikelse (min)	0,74

Linje HS

Linje H (S)	østerport	Norreport	Vesterport	København H	Dybbølsbro	Enghave	Valby	Langgade	P Bangs Vej	Flintholm
Verklig Bufferttid (min)	0,00	0,13	0,35	2,05	-0,10	0,03	0,85	0,15	0,90	-0,45
Regularitetsbrott i medel (st)	0,02	0,22	0,4	1,68	2,2	2,8	2,48	2,84	1,9	2,64
Medelförsening (min)	0,01	0,35	0,54	1,04	1,51	1,76	1,53	1,73	1,18	1,93
Standardavvikelse (min)	0,03	0,19	0,25	0,55	0,58	0,56	0,58	0,59	0,57	0,61
Linje H (S)	Vanløse	Herlev	Ballerup	Måløv	Veksø	Stenløse	Gl. Toftegård	Ølstykke	Frederikssund	
Verklig Bufferttid (min)	-0,09	0,43	0,76	-0,24	0,87	0,56	0,76	0,20	-0,30	
Regularitetsbrott i medel (st)	2,94	3,52	3,6	4,34	4,28	3,46	2,58	3,08	4,36	
Medelförsening (min)	2,22	2,43	2,28	2,70	2,60	2,22	1,84	2,13	2,86	
Standardavvikelse (min)	0,64	0,68	0,70	0,72	0,75	0,78	0,77	0,73	0,73	

Linje HN

Linje H (N)	Frederikssund	Ølstykke	Gl. Toftegård	Stenløse	Veksø	Måløv	Ballerup	Herlev	Vanløse	Flintholm
Verklig Bufferttid (min)	0,00	-0,47	0,20	0,80	-0,42	0,83	0,69	0,03	0,83	-0,09
Regularitetsbrott i medel (st)	0	0,34	0,32	0,22	0,98	0,52	0,44	1,24	0,86	1,6
Medelförsening (min)	0,00	0,88	0,86	0,32	1,33	0,71	0,60	1,29	0,96	1,40
Standardavvikelse (min)	0,00	0,19	0,24	0,21	0,25	0,27	0,26	0,35	0,35	0,39
Linje H (N)	P Bangs Vej	Langgade	Valby	Enghave	Dybbølsbro	København H	Vesterport	Norreport	Østerport	
Verklig Bufferttid (min)	0,61	0,86	0,01	-0,42	-0,02	1,70	0,63	0,41	0,53	
Regularitetsbrott i medel (st)	1,1	0,7	1,48	2,78	3,92	4,84	4,46	4,4	4,1	
Medelförsening (min)	1,05	0,75	1,29	2,05	2,60	3,10	2,91	2,84	2,70	
Standardavvikelse (min)	0,37	0,36	0,39	0,46	0,54	0,86	0,88	0,92	0,92	