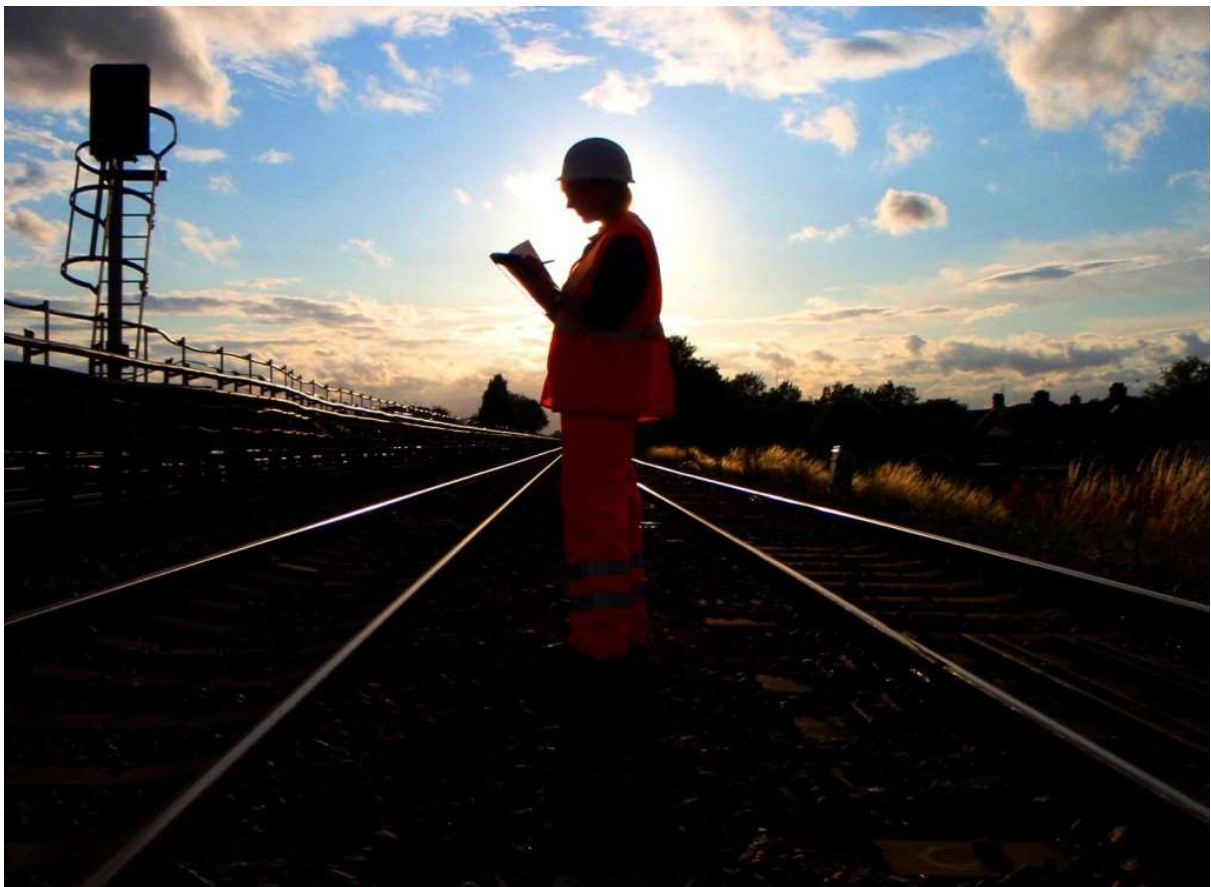


FEL- OCH FÖRSENINGSMODELLEN+

FORTSATT UTVECKLING MED LUPP DATA 2017 OCH RAILSYS

2020-05-26



FEL- OCH FÖRSENINGSMODELLEN+

fortsatt utveckling med LUPP data 2017 och RailSys

KUND

Trafikverket

KONSULT

WSP Advisory

WSP Sverige AB
121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7
Tel: +46 10 7225000

wsp.com

KONTAKTPERSONER

CHRISTER PERSSON (KTH)
HANS SIPILÄ (SWECO)
ANDERS LINDFELDT (SWECO)
SIDA JIANG (WSP, 070-231 68 77)

UPPDRAGSNAMN

Fel- och förseningsmodellen +

UPPDRAGSNUMMER

10278498

FÖRFATTARE

Sida Jiang

DATUM

2019-12-15

ÄNDRINGSDATUM

2020-03-16

Granskad av
Trafikverket

Godkänd av

INNEHÅLL

1	SAMMANFATTNING	4
2	INLEDNING	4
3	NYA DATA OCH BEHANDLING	5
3.1	LUPP 2017	5
3.2	OFELIA	6
3.3	RAILSYS-MODELLEN OCH FÖRBEREDELSE	6
3.4	DATAVÄXLING MELLAN FF OCH RAILS	8
4	FF-MODELLEN	9
4.1	WIENER PROCESS	9
4.2	ANLÄGGNINGSTYP (BVS 811 GRUPPERING KONTRA VERKLIGT FEL)	10
4.3	WEIBULLFÖRDELNING	11
5	RESULTAT (FF-MODELLEN, KALIBRERING OCH ELASTICITET)	11
5.1	RESULTAT AV FF-MODELLEN	12
5.1.1	Gångtidsmodellen – Resandetåg (RST)	12
5.1.2	Gångtidsmodellen för icke-persontåg	14
5.1.3	Weibullmodell för persontåg	16
5.1.4	Weibull modell för icke-persontåg	17
5.2	MODELLIMPLEMENTERING	18
5.3	KALIBRERING	18
5.4	MODELLKÖRNINGAR: FÖRSENINGSELASTICITETER, FÖRSENINGAR (OCH STM5)	24
6	RESULTAT AV INTEGERING RAILS OCH FF+	30
6.1	MODELLOMRÅDE	30
6.2	NORMALT FÖREKOMMANDE STÖRNINGSFÖRDELNINGAR	30
6.3	ANTAGNA FÖRUTSÄTTNINGAR I SIMULERINGAR	31
6.4	INLÄSNING OCH HANTERING AV INDATA FRÅN FF-MODELLEN	32
6.5	JÄMFÖRELSE MELLAN RAILS OCH LUPP	33
7	BEGRÄNSNING OCH POTENTIAL FÖR TILLÄMPNING	34

1 SAMMANFATTNING

Fel- och förseningsmodellen (FF) är en statistisk modell som underlättar samhällsekonomisk analys av förseningar och restidsvariation för järnväg. Modellen ger effektsamband för infrastrukturfelens effekt på förseningar. Modellen tillämpas mest för övergripande förseningsanalys vid investering-, reinvestering-, drift- och underhållsåtgärder. Modellen ger sannolikhetsfördelningar för restid på länkar (Wiener process med drift) och uppehållstider vid noder/stationer (Weibull-fördelning) för person- och godståg i järnvägsnätet (eller delar av det) i Sverige.

Projektet har fortsatt utveckla FF modellen med nyare tågförflyttningsstatistik från Trafikverkets offentliga databas LUPP för år 2017 för hela Sverige. Den uppdaterade FF modellen har tillämpats för beräkningen av förseningselasticiteter i förhållande till anläggningsspecifika fel, t.ex. spårfel, signalfel och så vidare. Förseningselasticiteten beskriver hur en procentuell förändring av anläggningsspecifika fel kan påverka den procentuella genomsnittliga förändringen av totala förseningar i järnvägsnätet. Totalelasticiteter för fel är något större i den nya versionen av FF, 1,19 jämfört med 0,9 för den tidigare versionen. Därmed är modellen nu generellt något känsligare för förändring i förekomst av fel. När det gäller elasticiteter för ändring av förekomst av specifika feltyper går det att säga att förseningselasticiteten, 0,59, för spårfel ligger tämligen säkert under värdet för totalelasticiteten. Denna elasticitet som innebär att spårfel har en betydande påverkan på förseningarna.

Projektet har även påbörjat testa enkel dataväxling mellan FF modellen och tidtabellssimuleringsverktyg RailSys. Kortsagt visar resultaten att primärförseningar från FF modellen kan användas som kalibreringsmått för RailSys för att förebygga försening vid design av tidtabell. För persontåg räcker det med enkel schablonfördelning t.ex. exponentiell med genomsnittlig primär försening från FF modellen. Men för godståg krävs empirisk fördelning av primärförseningar från FF-modellen. Resultatet har visat konsistens på två separata simuleringar på Ostkustbanan (OKB) och Västkustbanan (VKB).

Inom projektet har en tämligen omfattande omstrukturering av programkoden för FF utförts. Modellen sett som ett program är nu betydligt mer numeriskt robust i beräkningarna och mer anpassad för att kunna presentera och visualisera resultat.

2 INLEDNING

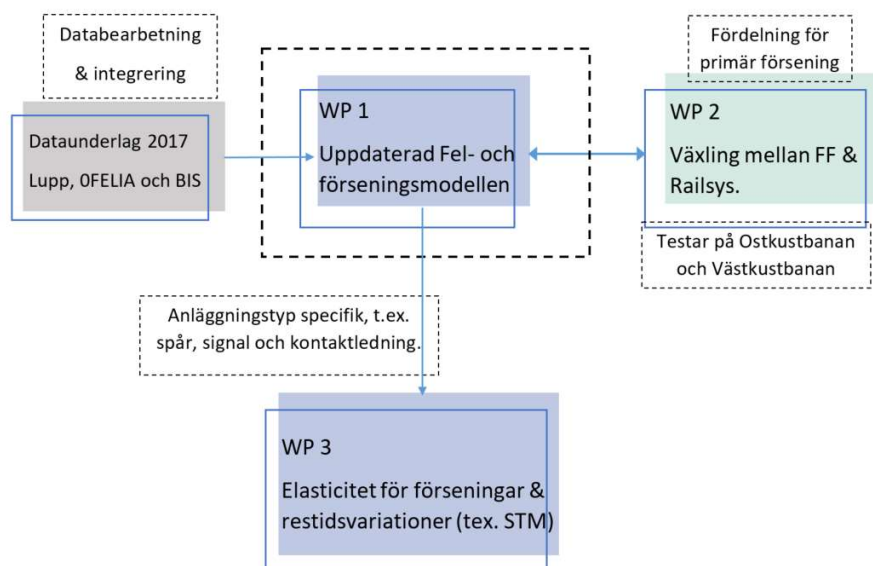
I arbetet med att utveckla Trafikverkets Fel- och förseningsmodell (FF modellen) behöver vi öka kunskapen om sambanden mellan olika typer av fel och trafikala effekter, och hur FF modellen kan hjälpa till kalibreringen av tidtabellssimulering under varierande trafikscenarier.

I den nuvarande versionen av FF ingår ingen uppdelning efter olika typer av fel. Däremot har tidigare estimeringar gjorts av FF med feltypsindelningar som innehåller de typer av fel som efterfrågas i Trafikverkets **utvecklingsplan** avsnitt 3.1.6 (spår, spårväxel, kontaktledning, signalställverk m.m.). Därför är vår utgångspunkt att:

- Införliva feltyp, anläggningstyp av verklig fel enligt databas Ofelia, i fel- och förseningsmodellen.
- Ta fram modellberäknade elasticiteter med hjälp av den uppdaterade FF, för t.ex. spårfel, växelfel och kontaktledningsfel.
- Översätt elasticiteterna till genomsnittliga förseningsminuter per feltyp.

De tidigare estimeringarna med feltyp indikerar att det finns relativt goda möjligheter att få rimliga skattningar av de sökta feltypernas påverkan på tågföringen. Nuvarande FF är estimerad på data från 2009. En viktig, och stor, del av projektet blir att estimerar modellen på nyare data från Lupp 2017. Effektsamband erhållna på ovan angivna sätt har nackdelen att vi endast vet att de är giltiga för trafikering och tågplan så som de ser ut för 2017. För att få en uppfattning om robustheten i resultatet används tidtabeller från RailSys, för några alternativa trafikeringar. Vi utreder även tidtabellssimulering på RailSys med primärförsening som härledas från FF, för robustare design av tidtabell.

Skissen av projektet illustreras nedanför.



Figur 1 Ramverket av projektet

Rapport slutar med elasticitetsberäkningen, för att beskriva och eventuell förutspår restidsvariation- och förseningsmått av tillstånd på järnväg infrastruktur.

3 NYA DATA OCH BEHANDLING

3.1 LUPP 2017

Lupp är ett system för uppföljning av tågförflyttningar (innan 2011 hette det TFÖR), som för varje tåg anger avgångs- och ankomsttider för varje station enligt tidtabell respektive i verkligheten, samt egenskaper för tåg och driftsplats, t.ex. tågnummer och specifik avgång. Från och med 2017 används samma tågnummer även om tåg blir inställda under resan, detta underlättar förseningsuppföljning av alla tåg med unik kombination av tågnummer och datum, s.k.

"tåglänk". Inställda tåg¹ är med i Lupp-datan och har använts vidare med tidtabellssimuleringsverktyget RailSys för en prognostidtabell.

Projektet har inventerat en lista för saknad information om tågflyttningar från Lupp. Data som innefattar 33 million rader tågflyttningar totalt har kategoriserats i upp till 41 grupper och behandlats på olika sätt. Av Lupp-datan från år 2017 kunde ca 99,997% användas för FF implementation². 79% av datan bedömdes uppfylla estimeringskraven och 20% av datan användes för implementation men inte i estimeringen på grund av att viktiga tidpunktsuppgifter saknades.

3.2 OFELIA

Rådata från OFELIA följer en sträckbaserad struktur på samma sätt som LUPP. Från tidigare forskningsprojekt har vi utvecklat ett programmeringsskript som med hjälp av en "shortest path"-algoritm kan matcha felhändelser med berört tåg. Dataintegrering har gjorts mellan tåguppföljningsdatabasen Lupp och felrapporteringssystemet Ofelia för år 2017. Felhändelser har kategoriserats på anläggningstyp (spår, spårväxel, kontaktledning och signal) och matchats med tågflyttningsobservationer på driftplats- och sträckningsnivå. Noterbart är att "teknikgren" av fel är en kandidat till anläggningstyp men stor del av värdena saknades från början av registreringen. Vi har även testat att gruppera fel enligt dokument BVS 811 – Anläggningsstruktur järnväg inom Trafikverket, vilket innebär fel grupperat på mer aggregerad nivå än anläggningstyp, t.ex. fel på banöverbyggnad/elanläggning. Estimering av en mer aggregerad feltyp börjar bli mer korrelerad med bantyp vilket motiverar att vi delar upp felhändelser på anläggningstyp för estimering av slutmodellen.

3.3 RAILSYS-MODELLEN OCH FÖRBEREDELSE

Den RailSys-modell som ligger till grund för arbetet heter *T17 Infrastruktur och Tidtabell* från Trafikverket. Modellen består av infrastrukturen i det så kallade Sverigenätet samt en tågplan för T17 (exporterad från TrainPlan) som lästs in vid en viss tidpunkt till RailSys. Vid inläsning till RailSys mappas även de fordonstyper som angivits i TrainPlan till motsvarande fordonstyper i RailSys. Enligt överenskommelse används torsdagen den 21 september 2017 som en representativ tidtabell och tidtabellen i RailSys filtreras enligt detta.

Eftersom alla tåg i hela Sverige som planerats gå denna dag vid tidpunkten då exporten från TrainPlan gjordes finns med krävs ytterligare hantering innan tidtabellen anpassats till respektive område. I detta fall används ett script som läser in exporterad tidtabell från RailSys och tar bort hela eller delar av tåg som ligger utanför områdena för att därefter skriva en fil som kan importeras tillbaka till RailSys. Genom detta fås slutligen en tidtabell med tåg endast i det område som är aktuellt.

Det finns normalt inte någon fullständig spårplanering gjord i TrainPlan vid den tidpunkt som årsplanen brukar importeras till RailSys. Det förekommer även skillnader mellan spårangivelser gjorda i TrainPlan och namngivningen i RailSys. Detta innebär att

¹ Inställdtåg räknas in även i sammanvägt tillförlitlighetsmått (STM).

² Implementation är ett steg för modelltillämpning, t.ex. elasticitetberäkning för olika ålder (investeringsscenario) och sin påverkan på förseningar.

tidtabellen i RailSys behöver gås igenom avseende vilka spår tågen normalt trafikerar. Det rör sig både om användning av stationsspår och ibland även linjespår på flerspåriga sträckor (dubbelspår, fyrspar).

I samband med detta arbete görs även justeringar med tågens olika tidtabellstillägg. I många fall innebär det sätt som tillägg hanteras på i TrainPlan att tågen efter inläsning till RailSys kan få ett onaturligt beteende. Relativt de tidtabellstider som finns i TrainPlan kan det exempelvis finnas mycket tillägg från station A till B, för lite tid för att köra från B till C (negativt tillägg), därefter tillägg igen mellan C och D. På grund av detta görs justeringar i RailSys som innebär att summan av tillägg på en viss sträcka över flera platser (driftplatser, hållplatser, linjeplatser) fördelas ut över hela sträckan. Hur detta görs beror på vilket tåg det rör sig om, var någonstans i nätet samt andra omständigheter.

Huvudregeln är att platser med uppehåll, oavsett anledning till uppehållet, får de tider som ges av planerad tidtabell. Detta gäller även vid vissa andra platser, exempelvis passage av större driftplatser eller platser där banor ansluter. Den här hanteringen gör dock att tiderna vid alla enskilda platser inte längre exakt överensstämmer mellan TrainPlan och RailSys. Normalt är dock skillnaderna relativt små. Nackdelen om detta inte görs är att det i simuleringsresultaten systematiskt finns vissa platser där tågen alltid uppvisar förseningar eftersom tågen hela tiden försöker följa sina planerade tider vid varje tidtabellsplats. Om det då finns relativt sett mycket tillägg på vissa sträckor mellan två efterföljande platser och negativt tillägg på andra (det vill säga att körtiden är längre än skillnaden mellan planerade tider), får vissa platser i princip alltid förseningar även om tågens verkliga beteende inte är sådan.

När tidtabellerna hanterats färdigt återstår att definiera alternativa spårval som tågen kan använda i simuleringar. I princip betyder detta att när det i simuleringar i förväg identifieras konflikter mellan tåg ska det finnas möjligheter att hantera detta genom att ett eller fler tåg styrs över till andra spår, antingen med uppehåll eller för genomfart. Denna möjlighet ges i form av spårlistor för varje station och riktning samt vid behov uppdelat på olika tåggrupper. Målsättningen är att detta görs så realistiskt som möjligt med tanke på verkligheten. Exempelvis måste hänsyn tas till att resandetåg som har uppehåll för på- och avstigning behöver stanna vid plattformsspår och inte i verkligheten kan göra det på ett spår utan plattform.

Förutom de inställningar och parametrar som finns inlagda i Trafikverkets nationella modell avseende infrastruktur och fordonstyper³ har vissa anpassningar skett vid specifika platser för att framförallt undvika deadlocks. I vissa fall har det även funnits felaktigheter i den ursprungliga infrastrukturmodellen som inte påverkar tidtabellshanteringen men däremot simuleringar, dessa har i förekommande fall åtgärdats.

Simuleringsutfallet är till stor del beroende av tidtabellen, störningsfördelningarnas karakteristik, tågens trafikledningsprioritet relativt sin egen och andra tågs rättidighet samt hur stor andel av ursprungliga körtidstillägg som får användas för att reducera förseningar. Tågens prioritetstal definieras i fordonsmodellerna och

³ Med fordonstyper menas exempelvis att PX550220 är två X55-enheter i multipel, PX610016 är en X61-enhet etc.

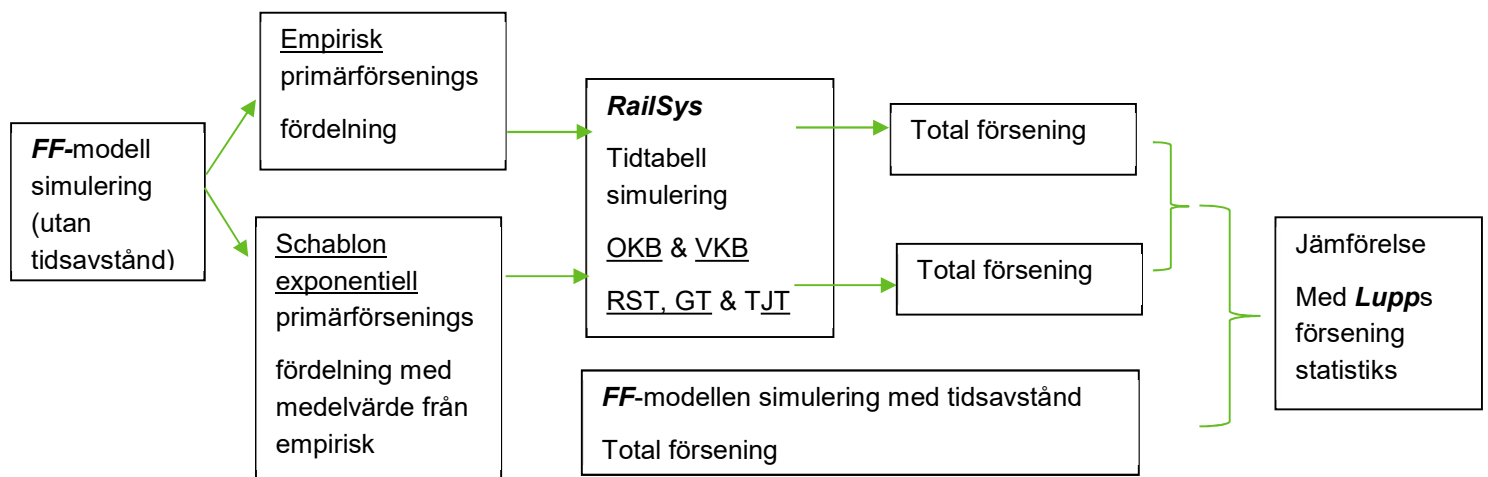
dessa har inte ändrats utifrån de inställningar som lagts in av Trafikverket.

3.4 DATAVÄXLING MELLAN FF OCH RAILSYS

Primärförseingsfördelning härleds från FF-modellen som bygger på Trafikverkets offentliga förseingsstatistik och felregistrering. Detta underlättar tidtabellsoptimering med hänsyn till verklig förseingsstatistik och ger därmed en robustare tidtabellsdesign.

I detta projekt har vi valt Ostkustbanan (OKB) och Västskustbanan (VKB) för att utreda hur primärförseing påverkar den totala ankomstförseingen vid resandeutbyte för stationen med varierande trafikblandning. Dessa stråk har valts för att OKB generellt har homogen trafik och därmed dominant primärförseing, medan VKB har en känd flaskhals – enkelspår med mycket persontrafik mellan Helsingborg och Ängelholm – och därmed relativt många avvikande sekundärförseingar.

Dataväxlingen mellan FF-modellen och RailSys kan ses i figur 2 nedan.



Figur 2 Illustration av dataväxling mellan RailSys och FF, och utvärdering av resultat mot förseingsstatistik från Lupp

Inför simuleringen av primär förseing har FF-modellen (generellt för hela landet) validerats mot Lupps statistik med första halvan av september 2017 för motsvarande stråk. Sedan har en typisk höstdag valts, torsdag den 14e september, för att simulera en dag med validerad FF-modell utan tidsavståndsvariabel. Detta har gjorts för att nollställa "knock-on"-effekten mellan tåget (s.k. sekundär förseing). Efter detta simuleringsssteg med FF-modellen kvarstår bara primär förseing. 40 till 50 stycken simuleringsscirklar har körts med FF-modellen för att förbereda primär förseing.

Förseing har definierats som skillnaden mellan den simulerade linjesträckans avgångstid och motsvarande tidtabells avgångstid, se illustration av linjefördelning för OKB nedan.



Figur 3 Illustration av simuleringssnivå på linjesträckan, tar delen av OKB som exempel

Primär försening fungerar alltså som ett kalibreringsmått av linjestörning ("run-time extension") på varje sträcka X_i till X_j (uppehållstid på ankomststation X_j inklusiv) i RailSys.

Därefter jämförs två primära förseningar på sträckningsnivå på OKB och VKB som härleds från FF-modellen, som kalibreringsmått till följande RailSys-simuleringar:

- 1) Empirisk primär försenings-fördelning från FF modellen
- 2) Schablonmässig exponentiell primär försenings-fördelning med medelvärde från motsvarande empiriska fördelning. Enligt KTH-studier (Lindfelt A. och H. Sipilä, 2016) väljer vi en schablonmässig exponentiell fördelning med medelvärde som motsvarar medelvärdet av motsvarande empiriska fördelning.

Med primär försening från FF-modellen simulerar RailSys antal cirklar enligt motsvarande tidtabell så att man får ut de totala förseningarna inkl. sekundär försening. Till sist jämförs de totala förseningarna med de totala förseningarna från Lupps försenings statistik.

4 FF-MODELLEN

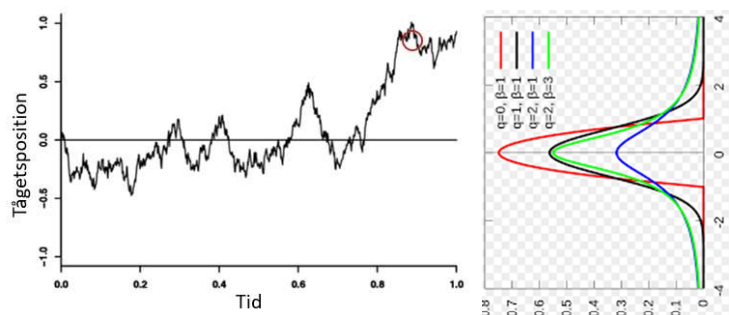
Fel- och förseningsmodellen (FF-modellen) utgörs av Wiener processmodell för tågets genomsnittshastighet, standardavvikelsen av tågets position på sträckan och Weibullfördelnings-modell för väntetid (dwell time på engelska) vid resandeutbyte för stationer. FF-modellen har estimerats för resenärtåg (RST) respektive icke persontåg (GT och TJT).

4.1 WIENER PROCESS

Wieners process $W(t)$ är en kontinuerlig stokastisk process för tågförflyttningar mellan stationer. Wiener-process kallas ofta Brownian motion, en kontinuerlig "random walk". Vi tänker oss grafiska tidtabeller för tåglägen där den horisontella X-axeln utgör tidpunkten t och den vertikala Y-axel visar järnvägsstationerna. Varje kurva i grafen visar ett tågläge. Anta att ett tåg börjar avresa från station A och ankommer till station B med avståndet d med genomsnittshastighet v men påverkas av en motverkande process (t.ex. infrastrukturs fel eller sekundär försening m.m.) med diffusion koefficient σ . Då ges tågets position Y i förhållande mot tid $Y(t)$ av Wieners process nedanför:

$$E[Y(t)] = d - vt \text{ och } Var[Y(t)] = \sigma^2 t \quad (1)$$

När den motverkande processen är relativt liten jämför med genomsnittshastigheten är verkligt tågläge nästan en rak linje som i en grafisk tidtabell, och $Y(t) \approx d - vt$. Gångtid T mellan stationerna A och B är nästan en deterministisk funktion $T \approx \frac{d}{v}$ och följer en invers normalfördelning.



Figur 4 Illustration av Wiener process $Y(t)=d-vt$ på vänster panel, och Normal fördelning för tågets hastighet på höger panel

När infrastrukturs tillståndet är oförutsägbart dåligt och/eller kapacitetsutnyttjandet nästan är fullt, kan motståndet för tågets ankomst blir mer dominant än genomsnittshastigheten. Konsekvensen blir då att tågets läge kan tecknas som en sicksacklinje med stor varians och risken för försening är således stor.

Wiener process är ett naturligt val för att modellera tågförflyttning om man beaktar tidtabellen grafiskt. Dessutom kan man enkelt estimerar genomsnittshastigheten och diffusionskoefficienten som en generell linjär funktion av infrastruktur, tåg, tidtabell och andra intressanta egenskaper i järnvägssammanhang.

4.2 ANLÄGGNINGSTYP (BVS 811 GRUPPERING KONTRA VERKLIGT FEL)

För att beräkna hur olika typ av fel påverkar förseningar utreder projektet vilka variabler som bäst kan beskriva feltyp i FF-modellen. Två indelningar har testats på Trafikverkets befintliga FF-modell (med 2010 års data): 1) BVS 811, gruppering av infrastruktur fel från Ofelia enligt första rubriknivå i BVS 811, t.ex. banöverbyggnad och banunderbyggnad; 2) anläggningstyp av verkligt fel från Ofelia. Vi testar felgruppering på befintlig FF-modell så att anläggningsfeleffekten på hastighetsnedsättning (i Wiener process) kan beräknas direkt, sedan ska resultatet vägleda modellutveckling med bättre indelning av feltyp.

För 1) BVS 811 indelning får vi oväntade positiva effekter av övriga anläggningar på hastigheten vilket kan ses i tabellen nedan:

Tabell 1 Hastighetsförändringar av befintlig FF modellen med BVS 811 feltyp indelning (2010s data)

Feltyp (BVS)	Bantyp 1	Bantyp 2
6 Banöverbyggnad	-16,6	-14,5
7 Banunderbyggnad	-11,5	
8 Bangårdsanläggningar	-1,1	
9 Elanläggningar	-3,1	
10 Signalanläggningar	-13,8	
11 Teleanläggningar	-6,1	
12 Övriga anläggningar	4,1	3,6

Positiv koefficient av övriga anläggningar påstår att fler övriga fel leder till högre hastighet, vilket är felaktigt och kan bero delvis på högre icke-linjäritet inom övriga fel.

Parallellt har 2) anläggningstyp (AT) testats och åtminstone är tecknen av alla hastighetsförändringar negativa som förväntat, se tabell nedan:

Tabell 2 Hastighetsförändringar av befintlig FF modellen med AT indelning (2010s data)

Feltyp (vissa AT)	Bantyp 1	Bantyp 2
kontaktledning	-5,8	-15
signal	-5,8	-7,9
spår	-23,1	-1,6
spårväxel	-18,1	-21,4
övrigt	-5,8	-15

För både bantyp 1 och 2 enligt befintlig FF-modell har AT-indelning stämt överens med vår förväntning, därför ska anläggningsspecifik feleffekt indelas enligt anläggningstyp från Ofelia och fortsatt modelleras i nya FF-modellen med 2017s data (se detaljer i avsnitt 5).

4.3 WEIBULLFÖRDELNING

Weibull modell är en flexibel modellkandidat som väljs för dess matematiska egenskap - ett presumtivt proportionellt förhållande mellan medelvärde på responsvariabeln (väntetid vid station) och förklarandevariabeln (ingångsförsening) i skalparametern. För ett visst värde på shape-parametern så är scale-parametrarna direkt proportionella mot medeldurationen, alltså den genomsnittliga väntetiden vid en station.

Weibullmodellen har också infört anläggningsspecifik effekt som ses i Wiener process gångtidsmodellen ovanför. En annan stor förändring är att Weibullmodellen har blivit uppdaterad med nya data från år 2017. För specifikation av Weibullmodellen hänvisas till avsnitt 5.

5 RESULTAT (FF-MODELLEN, KALIBRERING OCH ELASTICITET)

Estimering av den nya FF-modellen bygger på data från den första halvan av september 2017 för järnvägsnät från hela Sverige. Fyra separata modeller estimeras beroende på typ av tillstånd och typ av tåg. Modelltyperna som valts är:

Gångtid mellan stationer, persontåg:	invers normalfördelad
Gångtid mellan stationer, icke-persontåg:	invers normalfördelad
Väntetid på station, persontåg:	Weibull
Väntetid på station, icke-persontåg:	Weibull

FF-modellen kalibreras fortsatt med dygnsdata från en torsdag under september för elasticitetberäkning över hela landet, och över OKB/VKB för beräkningen av primära förseningar som ska vidare till RailSys simulering.

5.1 RESULTAT AV FF-MODELLEN

Effektsambanden mellan fel i systemet och förseningar ska redovisas uppdelat på fem bantyper som används av Trafikverket för att beskriva järnvägssystemet. De fem bantyperna är:

1. Storstadsområden
2. Banor som bildar större sammanhängande stråk
3. Banor för övrig viktig gods- och resandetrafik
4. Banor med mindre trafik
5. Banor med ringa eller ingen trafik

Typ av fel ska kategoriserats enligt anläggningstyp av verkligt fel från Ofelia databas. Anläggningstyp som har valts är:

- A. Spår
- B. Växel
- C. Signal
- D. Kontaktledning (enbart signifikant för vissa modeller)
- E. Övriga

För modellering av samverkansseffekt mellan trafik och fel har vi interaktion term av bantyp multiplicerat med anläggningsfel.

5.1.1 Gångtidsmodellen – Resandetåg (RST)

Gångtidsmodellen har två estimeringsblock, den första är för genomsnittshastighet mellan stationer (km/min), medan den andra är för standardavvikelse av tågets position.

Resultat av Wiener process gångtidsmodell för resenärtåg kan ses i tabell 3 nedan. I tabellerna anges standardavvikelsen för parameterskattningarna (ofta kallad standardfelet), i kolumnerna betecknade med "Std". Kolumnerna betecknade med "Z" ger statistiken för att testa om parametrarna är signifikant skilda från noll (i ett normalfördelningstest). Slutligen markerar kolumnerna betecknade med "Sign" med vilken signifikansnivå från noll som parametrarna klarar sådana test, "****" innebär att signifikansnivån åtminstone är 0,1%, "***" att den ligger mellan 0,1% och 1%, "**" att den ligger mellan 1% och 5% och "." att den ligger mellan 5% och 10%. En tom cell i en Sign-kolumn innebär att signifikansnivån ligger mellan 10% och 100%.

Tabell 3 Estimering av gångtidsmodellen för RST med data september 1 till september 15, 2017 hela landet.

Parameter	Koeff.	Std.	Z	Pvärde	Sign.
Genomsnitt hastighet					
konstant	1,75	0,00	775,25	0	***
bantyp2	0,33	0,00	144,91	0	***
bantyp3	-0,04	0,00	-16,35	0	***
bantyp4	-0,21	0,00	-56,21	0	***
bantyp5	-0,33	0,02	-18,50	0	***
bantypNA	0,26	0,00	64,03	0	***
X2000	0,42	0,00	145,94	0	***
pendel	-0,04	0,00	-15,81	0	***
1/(tg + 1)	0,004	0,01	0,54	0,5923	
X2000*1/(tg + 1)	-0,72	0,02	-45,80	0	***
pendel*1/(tg + 1)	-0,59	0,01	-66,97	0	***
KTLfel	-0,35	0,01	-32,76	0	***
signalställverksfel	-0,04	0,00	-14,24	0	***
spårfel	0,01	0,00	3,55	0,0004	***
övriga fel	-0,06	0,00	-61,02	0	***
KTLfel*bantyp2	0,36	0,01	27,06	0	***
ställverksfel*bantyp2	-0,18	0,01	-36,52	0	***
spårfel*bantyp2	-0,19	0,01	-37,83	0	***
övriga fel*bantyp2	0,01	0,00	5,47	0	***
KTLfel*bantyp3	0,30	0,02	17,32	0	***
ställverksfel*bantyp3	-0,06	0,01	-7,60	0	***
spårfel*bantyp3	-0,10	0,01	-14,16	0	***
övriga fel*bantyp3	0,05	0,00	19,39	0	***
KTLfel*bantyp4 5	0,43	0,03	14,49	0	***
ställverksfel*bantyp4 5	0,42	0,03	15,02	0	***
spårfel*bantyp4 5	0,04	0,01	4,68	3E-06	***
övriga fel*bantyp4 5	-0,04	0,00	-13,28	0	***
Sigma (standardavvikelse av tågets position)					
konstant	0,15	0,00	142,43	0	***
tot.fel	-0,003	0,00	-4,90	1E-06	***
1/(tg + 1)	-0,22	0,00	-57,16	0	***

Gångtidsmodellen för RST resultat överensstämmer med förväntningar:

1. Bantyp 1 och övriga resenärtåg bortsett från pendeltåg och snabbtåg X2000 ligger på konstant av hastighetsdel som referenskategori. Generellt har bantyp 2 högsta genomsnittshastighet följt av bantyp 1, sedan bantyp 3 till bantyp 5. En liten del av datan har bantyp NA som har högre hastighet än bantyp 1 men det är förmodligen inte Trafikverkets banor (t.ex. Arlandabanan) eftersom bantypsinformation saknas.

2. X2000 är snabbare än övriga RST, och pendeltåg ligger i sist. För X2000 som har kört på bantyp 2 utan fel är genomsnittshastigheten:

$$(1,75 + 0,42 + 0,33) = 2,5 \text{ km/min} = 150 \text{ km/h}$$

3. Timegap (tg) har positiva effekter för hastighet av både X2000 och pendeltåg, ju större timegap desto högre hastighet, fast marginell hastighetsökning vid timegap-ökning blir mindre och slutar med nästan noll marginaleffekt. Samma ökning av timegap har större hastighetsökningseffekt på X2000 än pendeltåg påstår modellen.

4. För bantyp 1 till 3 och anläggningsfelsinteraktion har flest negativa påverkningar på tågförflyttningar.

Tabell 4 Koefficienter av bantyp och anläggningsfel interaktion i gångtidsmodellen RST

<i>Koeff.</i>	bantyp 1	bantyp 2	bantyp 3	bantyp 4 5
kontaktledningsfel	-0,35	0,01	-0,06	0,08
signalställverksfel	-0,04	-0,23	-0,11	0,37
spårfel	0,01	-0,18	-0,09	0,06
övriga fel	-0,06	-0,06	-0,02	-0,10

På mindre trafikerade banor (bantyp 4 eller 5) förekommer oväntade positiva effekter, vilket även noterats förut på befintlig FF-modell med 2010 års data, och därför rekommenderar vi att begränsa tillämpningen av gångtidsmodellen till enbart bantyp 1 till 3. Modellen är helt enkelt anpassad för dominant bantyp (bantyp 1 till 3) och inte för lågt trafikerade banor.

För spårfel på bantyp 1 och kontaktledningsfel på bantyp 2 är koefficienten på 0,01 och bedöms försumbart i vidare tillämpningssammanhang. Hastighetsnedsättningseffekt vid olika fel och bantyp för resenärtåg är sammanställda nedan:

Tabell 5 Hastighetsnedsättning vid olika fel och bantyp för resenärtåg

Hastighet(km/h)	bantyp 1	bantyp 2	bantyp 3
kontaktledningsfel	-21,17	0	-3,34
signalställverksfel	-2,66	-13,67	-6,32
spårsfel	0	-10,96	-5,29
övriga fel	-3,81	-3,34	-1,10

5. För sigma block påstår modellen att liten minskning av standardavvikelsen för tågets position vid fel oavsett anläggningstyp, och variansökning vid timegaps-ökning. Standardavvikelse antar symmetrisk fördelning, och kan innebära lika hög sannolikhet för tidig ankomst och försenad ankomst vid samma avvikelse från tidtabellen.

5.1.2 Gångtidsmodellen för icke-persontåg

Resultat av gångtidsmodellen för icke-persontåg (godståg och tjänståg) kan ses i tabell 6 nedan.

Tabell 6 Estimering av gångtidsmodellen för icke-persontåg med data på första halv månad i september, 2017 hela landet.

Parameter	Koeff.	Std.	Z	Pvärde	Sign.
Genomsnitt hastighet					
konstant	1,12	0,00	526,29	0	***
bantyp2	0,19	0,00	109,05	0	***
bantyp3	0,12	0,00	64,46	0	***
bantyp4 5	-0,09	0,00	-25,70	0	***
bantypNA	0,27	0,01	41,94	0	***
godståg	-0,03	0,00	-14,88	0	***
1/(tg + 1)	-0,16	0,00	-40,28	0	***
KTLfel	-0,03	0,00	-8,39	0	***
signalfel	-0,04	0,00	-16,05	0	***
signalställverksfel	-0,14	0,00	-71,17	0	***
spårfel	-0,07	0,00	-40,36	0	***
övriga fel	-0,04	0,00	-81,27	0	***
Sigma (standardavvikelse av tågets position)					
konstant_sigma	0,16	0,00	83,33	0	***
bantyp2	0,19	0,00	96,82	0	***
bantyp3	0,10	0,00	47,98	0	***
bantyp4 5	0,21	0,01	39,86	0	***
bantypNA	0,19	0,01	29,28	0	***
tjänsttåg	0,10	0,00	53,10	0	***
1/(tg + 1)	-0,24	0,00	-50,56	0	***
övr.fel	-0,01	0,00	-8,80	0	***

1. Bantyp 1 och tjänsttåg ligger på konstant av hastighetsdel som referenskategori. Generellt har bantyp 2 högsta genomsnittshastighet följt av bantyp 1, därefter bantyp 3 till bantyp 5. Hastigheten är generellt lägre än hos persontåg som förväntat.

2. Godståg (GT) åkte långsammare än tjänsttåg. För GT som har kört på bantyp 2 utan fel och med tillräckligt timegap framför sig är genomsnittshastigheten nästan hälften av motsvarande hastighet hos X2000:

$$(1,12 + 0,19 - 0,03) = 1,28 \text{ km/min} = 77 \text{ km/h}$$

3. Timegap (tg) har positiva effekter för hastigheten hos icke-persontåg. Med andra ord, större timegap ger mindre hastighetsnedsättningar.

4. Grovt sagt har alla anläggningsfel negativa påverkningar på tågförflyttningar oavsett bantyp, men nedsättningseffekterna blir lägre jämfört med persontåg.

Tabell 7 Hastighetsnedsättning vid olika fel och samtliga bantyper för icke-persontåg

km/h	KTLfel	signalfel	ställverksfel	spårfel	övriga fel
Δ Hastighet	-2,07	-2,28	-8,10	-4,04	-2,70

5. För sigma block påstår modellen att andra bantyper än bantyp 1 har större standardavvikelse avseende tågets position eventuellt restidosäkerhet. Tjänsttåg har större standardavvikelse än GT. Ökning av timegap och minskning av övriga fel kan leda till ökningen av motsvarande varians.

5.1.3 Weibullmodell för persontåg

Väntetidsmodellen har två estimeringsblock, det första är för scale-parameterna och är direkt proportionellt mot medeldurationen, alltså den genomsnittliga väntetiden på en station. Den andra är för shapeparametern vilken approximativt tämligen korrekt kan tolka procentuella förändringar i shape-parametern som procentuella förändringar i den genomsnittliga väntetiden på en station. För Weibullmodeller estimeras scale- och shape-parametrarna som funktioner av de förklarande variablerna, som i sin tur resulterar i att ett antal koefficienter estimeras.

Tabell 8 Estimering av väntetidsmodellen för RST med data september 1 till september 15, 2017 hela landet.

Parameter	Koeff.	Std.	Z	Pvärde	Sign.
Scale					
konstant_scale	0,60	0,005	124,85	0,00	***
bantyp2	0,13	0,005	27,54	0,00	***
bantyp3	0,23	0,01	45,08	0,00	***
bantyp4 5	-0,06	0,01	-7,51	0,00	***
bantypNA	0,01	0,01	2,26	0,02	*
x2000	0,26	0,01	24,51	0,00	***
pendel	-0,34	0,004	-80,93	0,00	***
(ptg+1)/(tg + 1)	0,03	0,002	21,53	0,00	***
KTLfel.från	0,25	0,01	19,38	0	***
signalfel.från	0,17	0,01	24,38	0	***
ställverksfel.från	0,07	0,01	13,39	0	***
spårfel.från	-0,19	0,01	-26,41	0	***
övrigafel.från	0,004	0,001	2,89	0,0039	**
Additiv term i scale					
1(from0.delay<0)* from0.delay	-0,47	0,003	-151,81	0	***
1(from0.delay>0)* from0.delay	0,02	0,001	24,26	0	***
Shape					
konstant_shape	0,19	0,003	70,85	0,00	***
bantyp2	-0,13	0,003	-48,79	0,00	***
bantyp3	-0,02	0,004	-4,29	0,00	***
bantypNA	0,03	0,005	6,78	0,00	***
x2000	0,17	0,01	25,89	0,00	***
pendel	0,28	0,003	109,99	0,00	***
ph	-0,04	0,002	-21,57	0,00	***
1(from0.delay<0)* from0.delay	-0,03	0,0003	-80,04	0,00	***
1(from0.delay>0)* from0.delay	-0,003	0,0002	-15,90	0,00	***
tot.fel.från	-0,06	0,00	-99,80	0,00	***

Generellt har bantyp 1, 4 och 5 mindre väntetid än andra bantyper, och pendeltåg har mindre väntetid än andra persontåg. Om verklig timegap ökar ska väntetiden minska, alltså ska sannolikheten öka för att tåget ska avresa från stationen istället för att vänta på stationen. De flesta fel på stationen ska leda till längre väntetid, med undantag för signalfel. Spårfel (på från station) har moderat men konstant

positiv korrelation (mellan 0,1 till 0,2) med alla andra anläggningsspecifik fel, därför kan visas signifikant negativ tecken för att balansera positiv korrelation med andra typer av fel, så vi bedömer att nollställa effekter av spårfel på väntetidsmodell för att undvika ytterligare multi-kollinjäritet problem.

Om persontåg ankommer till stationen tidigare än tidtabellen, får tåget negativ försening som noteras av $\text{from0.delay} < 0$ i tabellen ovanför. Detta persontåg kommer vänta längre för tåget kan inte släppas från stationen innan planerad avgångstid, vilket leder till längre väntetid. Tåget med positiv ingångsförsening kommer vänta längre vilket orsakas av nedprioritering i trafikledningen.

5.1.4 Weibull modell för icke-persontåg

Resultat av väntetidsmodell för icke-persontåg kan ses i tabellen nedan. Generellt har icke-persontåg längre väntetid än persontåg på samma bantyp/station. Ökning av verklig timegap kan hjälpa med att minska onödig väntetid på stationen. Men även fel (oavsett fel-typ) inom stationsområden minskar väntetiden, vilket är oväntat men koefficienten är endast -0,02 så det kan tolkas som noll effekt för icke-persontåg. Dessutom behöver inte icke-persontåg följa med tidtabellen i praktiken, så om tåget ankommer till stationen tidigt kan det också avresa ifrån stationen tidigt. Detta enligt koefficient för multiplikation av tidig ankomst dummy och negativ försening ser ” $1(\text{from0.delay} < 0) * \text{from0.delay}$ ” på tabell 9. Å andra sidan underlättar dagens trafikledning chansen för försenade icke-persontåg att minska väntetiden genom att lämna stationen i tid eller tidigt. Resultat i överensstämmer i stort med befintlig FF-modell med 2010 års data.

Tabell 9 Estimering av väntetidsmodellen för icke-persontåg med data september 1 till september 15, 2017 hela landet.

Parameter	Koeff.	Std.	Z	Pvärde	Sign.
Scale					
konstant_scale	2,29	0,03	67,62	0,00	***
bantyp2	-0,65	0,04	-18,06	0,00	***
bantyp3	-0,88	0,04	-23,52	0,00	***
bantyp4	-0,51	0,07	-7,38	0,00	***
bantyp5	0,17	0,20	0,86	0,39	
bantypNA	0,61	0,11	5,56	0,00	***
$(\text{ptg}+1)/(\text{tg} + 1)$	0,14	0,01	16,89	0,00	***
tot.fel.från	-0,02	0,01	-3,29	0,00	***
Additiv term i scale					
$1(\text{from0.delay} < 0)^*$ from0.delay	0,01	0,00	11,58	0,00	***
$1(\text{from0.delay} > 0)^*$ from0.delay	-0,003	0,00	-9,68	0,00	***
Shape					
konstant_shape	-0,56	0,01	-52,65	0,00	***
bantyp2	-0,05	0,01	-3,47	0,00	***
bantyp3	-0,04	0,01	-3,47	0,00	***
Ph	0,04	0,01	3,99	0,00	***
$1(\text{from0.delay} < 0)^*$ from0.delay	0,002	0,00	13,75	0,00	***
$1(\text{from0.delay} > 0)^*$ from0.delay	-0,0002	0,00	-2,94	0,00	**

5.2 MODELLIMPLEMENTERING

De nya estimeringarna av tågförflyttningar, beskrivna i föregående avsnitt, har implementerats genom en uppdatering av de tidigare programfilerna för FF-modellen. Dessutom har indata till modellen uppdaterats där utgångspunkten är Lupp och Ofelia för år 2017. Föregående version av FF var baserad på Banstat (tidigare system jämförbart med Lupp) och Ofelia för år 2009.

5.3 KALIBRERING

FF-modellens huvuduppgift är att prognostisera ankomst- och avgångstider till stationer. För närvarande ligger fokus på ankomsttider för resandetåg till stationer med resandeutbyte. De ovan estimerade modeller är avsedda att prognostisera enskilda gångtider mellan driftsplatser och uppehållstider på stationer. Ankomst- och avgångstider till stationer består av en summering av flera gång- och uppehållstider. Det innebär att även om modellerna för enskilda gång- och uppehållstider är väntevärdesriktiga så behöver inte ankomst- och avgångstider från stationer vara väntevärdesriktiga. Av denna anledning behöver modellen ytterligare kalibreras efter det att modellerna för gång- och uppehållstid är estimerade. Det finns ytterligare skäl till varför en kalibrering av FF-modellen är nödvändig, bland annat:

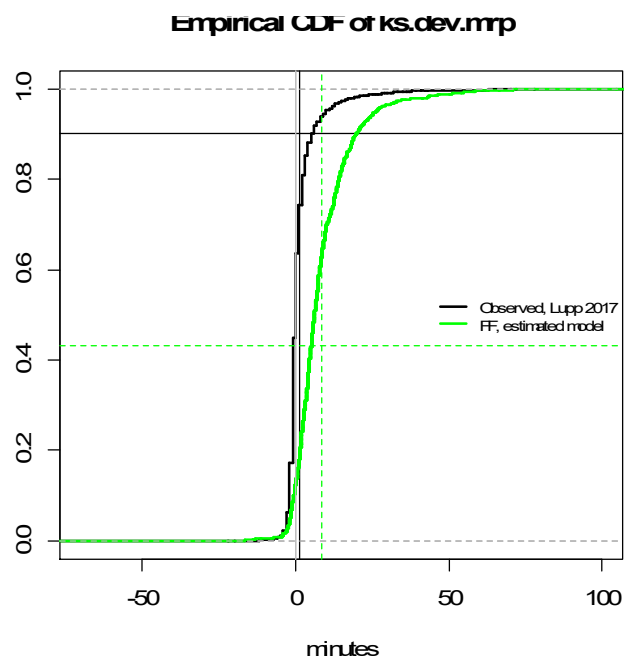
- Större delen av trafikledningens agerande hamnar i modellens slumpstermer
- Godstågen hanteras bristfälligt i modellen, bland annat får de inte i modellen avgå före utsatt tid i tidtabellen från utgångsstationen trots att en betydande andel av godstågen i Lupp avgår före utsatt tid.
- Tidstillägg i tidtabellen hamnar i gångtidsmodellens slumpstermer. Det innebär att om det finns ett stort tidstillägg på sista delsträckan för ett tåg men inga tidstillägg på tågets övriga delsträckor, så kommer gångtidsmodellen att slumpmässigt sprida ut tidstillägget över alla delsträckorna. Utspridningen görs så att i genomsnitt kommer summan av de utspridda tidstilläggen vara lika med det stora reella tidstillägget på den sista delsträckan.

Ingen kalibrering har skett av modellerna för godståg då de har bedömts vara alltför bristfälliga för att kunna bedöma rimligheten i en kalibrering, vilket innebär att FF-modellen fortsatt är en modell främst avsedd för persontågstrafik.

Figur 5 - Figur 7 nedan visar diagram över den okalibrerade modellens avvikelse vid ankomst och avgång från driftsplatser. Diagrammen visar så kallade empiriska fördelningsfunktioner vilket är en skattning, direkt från data, med hjälp av stegfunktioner av punktlighetens sannolikhetsfördelning. Empiriska fördelningsfunktioner är ett lämpligt sätt att utvärdera FF på eftersom förseningar och andra relevanta mått som STM5 fås direkt ur sannolikhetsfördelningen för tågens punktlighet. I alla diagram visar den heldragna tjocka svarta linjen den empiriska fördelningsfunktionen för observerade Lupp-data från 2017-09-14, den heldragna tjocka gröna linjen är den empiriska fördelningsfunktionen baserad på utdata från nulägeskörningar av FF

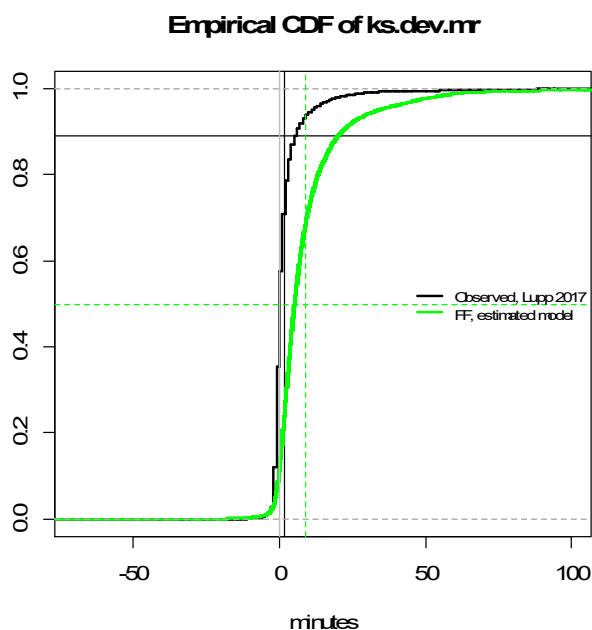
modellen vars syfte är att replikera förhållandena för typdagen 2017-09-14. I det ideala fallet skall FF replikera den empiriska fördelningsfunktionen för Lupp-data, det vill säga, den gröna kurvan ska ligga exakt på den svarta. De lodräta linjerna (parallella linjer till y-axeln) visar medelavvikelsen från tidtabellen: svart heldragen linje anger medelavvikelsen för Lupp-data och grön streckad linje visar medelavvikelsen för FF-modellen. De horisontella linjerna (parallella linjer till x-axeln) anger STM5-värden för de presenterade fördelningsfunktionerna: svart heldragen horisontell linje anger STM5 för Lupp-data och grön horisontell streckad linje anger STM5 enligt FF-modellen.

Figur 5 visar punktligheten för persontågens ankomst till stationer för resandeutbyte. Detta mått är det viktigaste måttet för att mäta förseningar som är relevanta för resenärer. Det är uppenbart från Figur 5 att FF-modellen inte har tillfredställande anpassning till observerade Lupp-data. Eftersom FF-modellens fördelningsfunktion ligger konsekvent under fördelningsfunktionen för Lupp-data så är förseningar betydligt vanligare (och större) i den okalibrerade FF-modellen än för observerade data. Det visar sig både i en märkbart högre medelavvikelse och ett STM5-värde som är helt fel.



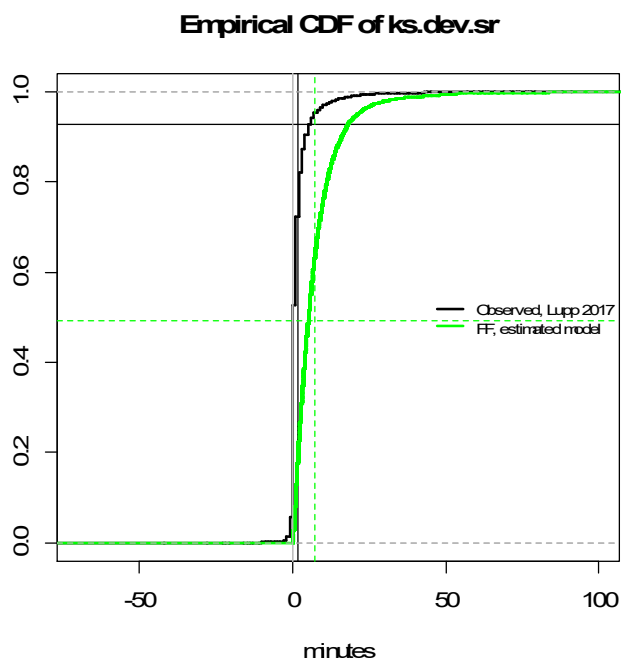
Figur 5 Diagram över empiriska fördelningsfunktioner avvikelse från tidtabell vid ankomst till station för passagerarutbyte för resandetåg. Okalibrerad FF-modell.

Figur 6 visar de empiriska fördelningsfunktionerna för avvikelsen från tidtabell för persontågs ankomst till driftsplatser (Figur 5 är baserad på en delmängd bestående av stationer med resandeutbyte av datapunkterna för Figur 6) och Figur 7 visar motsvarande fördelningsfunktioner för avvikelsen från tidtabell för persontågs avgång från stationer med resandeutbyte. De båda figurerna uppvisar samma mönster som Figur 5, samtliga figurer visar på behovet av att kalibrera FF-modellen.



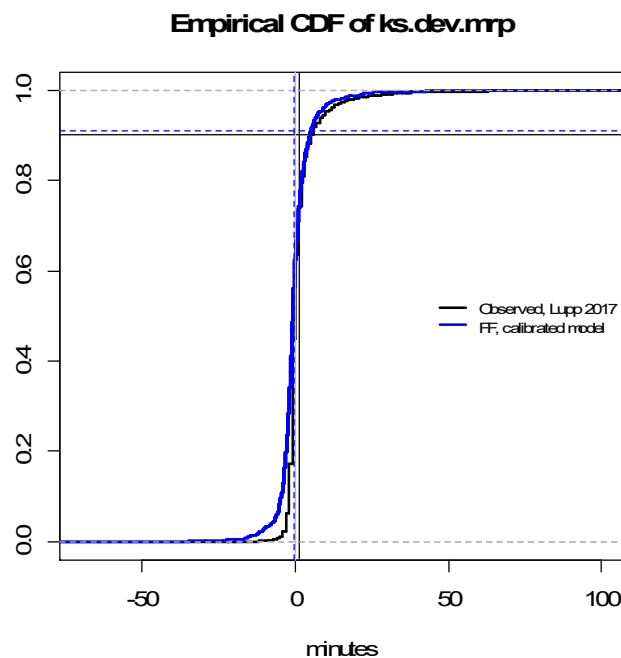
Figur 6 Diagram över empiriska fördelningsfunktioner för avvikelse från tidtabell vid ankomst till driftplats för resandetåg. Okalibrerad FF-modell.

Svarta linjer avser observerade data från Lupp 2017, gröna linjer okalibrerad FF-modell. Heldragna tjocka linjer ger kurvorna för de empiriska fördelningsfunktionerna. Horisontella heldragen svart linje anger STM5 för observerade Lupp-data, horisontell streckad grön linje anger STM5 för okalibrerad FF-modell. Vertikal heldragen svart linje anger medelavvikelse för punktligheten för observerade Lupp-data, vertikal streckad grön linje anger motsvarande medelavvikelse för den okalibrerade FF-modellen.

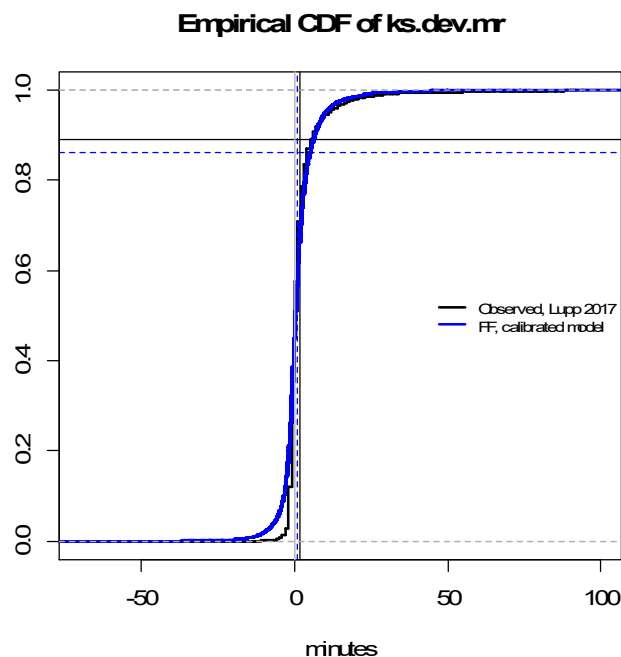


Figur 7 Diagram över empiriska fördelningsfunktioner för avvikelse från tidtabell vid avgång från station för passagerarutbyte för resandetåg. Okalibrerad FF-modell.

Kalibreringen av FF-modellen har utförts genom att addera en konstant till hastighetskomponenten i gångtidsmodellen för persontåg (se avsnitt 5.1.1). Utvärderingen av kalibreringen har avgränsats till persontågs ankomsttider till stationer för resandeutbyte, och måtten för STM5 och medelavvikelse. Kalibreringen har skett genom att successivt köra FF-modellen med skilda värden för kalibreringskonstant till dess att FF-modellens anpassning till observerad STM5 och medelavvikelse enligt Lupp 2017, har bedömts som tillräckligt god. I bedömning har hänsyn också tagits till de empiriska fördelningsfunktionernas grafiska anpassning till varandra för avvikelser som innebär förseningar. Däremot har i princip ingen egentlig anpassning gjorts för att få fördelningsfunktionerna för tidig ankomst att överensstämja med varandra. Det innebär att FF-modellen i nuvarande version i högre grad är en modell för att utvärdera förseningar och punktlighet mer än avvikelse från tidtabell. Figur 8 - Figur 10, nedan visar resultatet av kalibreringen där en hastighetskonstant på 0,72 har adderats till gångtidsmodellen för persontåg.

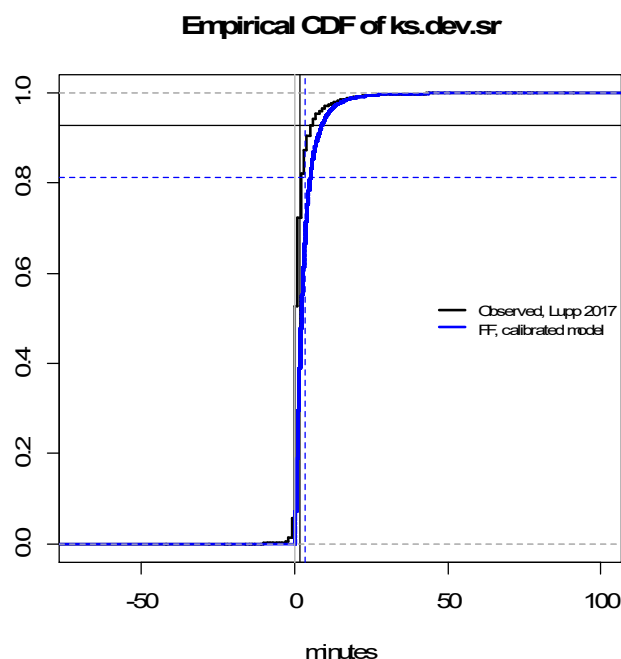


Figur 8 Diagram över empiriska fördelningsfunktioner för avvikelser från tidtabell vid ankomst till station för passagerarutbyte för resandetåg. Kalibrerad FF-modell.



Figur 9 Diagram över empiriska fördelningsfunktioner för avvikelser från tidtabell vid ankomst till station för resandetåg. Kalibrerad FF-modell.

Svarta linjer avser observerade data från Lupp 2017, blå linjer kalibrerad FF-modell. Heldragna tjocka linjer ger kurvorna för de empiriska fördelningsfunktionerna. Horisontella heldragen svart linje anger STM5 för observerade Lupp-data, horisontell streckad blå linje anger STM5 för kalibrerad FF-modell. Vertikal heldragen svart linje anger medelavvikelse för observerade Lupp-data, vertikal streckad blå linje anger motsvarande medelavvikelse för den kalibrerade FF-modellen.



Figur 10 Diagram över empiriska fördelningsfunktioner för avvikelse från tidtabell vid avgång från station för passagerarutbyte för resandetåg. Kalibrerad FF-modell.

Svarta linjer avser observerade data från Lupp 2017, blå linjer kalibrerad FF-modell. Heldragna tjocka linjer ger kurvorna för de empiriska fördelningsfunktionerna. Horisontella heldragen svart linje anger STM5 för observerade Lupp-data, horisontell streckad blå linje anger STM5 för kalibrerad FF-modell. Vertikal heldragen svart linje anger medelavvikelse för observerade Lupp-data, vertikal streckad blå linje anger motsvarande medelavvikelse för den kalibrerade FF-modellen.

Figur 8 ovan, för persontågs avvikelse från tidtabell vid ankomst till station för resandeutbyte, visar de utvärderingskriterier som användes vid kalibreringen. STM5 för den kalibrerade FF-modellen är 0,91 att jämföra med 0,9 enligt Lupp-data. Medelavvikelsen för FF är -0,41 minuter att jämföra med 1,27 minuter för Lupp-data, en skillnad på 1,68 minuter det vill säga 100 sekunder. Anpassningen för fördelningsfunktionernas kurvor vid förseningar har bedömts som god. Det är möjligt att ytterligare förbättra anpassningen för STM5 och medelavvikelsen, genom att ytterligare förfinas valet av kalibreringskonstant (här = 0,72). Dock innebär ett sådant val av kalibreringskonstant att anpassningen för fördelningskurvorna försämrats märkbart. Därför har kalibreringen med hastighetskonstant 0,72 sammantaget bedömts som den bästa av de testade varianterna.

Kalibreringen av FF har skett genom att variera kalibreringskonstanten för en viss specifik körning av FF där samma slumpföljder alltid har använts. För att få ett säkert resultat för FF behövs normalt flera upprepade körningar göras med olika slumpföljder. Nulägeskörningar med FF med 12 upprepade körningar (av samma slag som körningarna som gjordes för nästa avsnitt) Detta gav STM5 på 0,908 och en medelavvikelse på -0,32 minuter för persontåg, alltså nära de resultat som uppnåddes för båda måtten vid kalibreringen och samtidigt något närmare samma värden för observerad Lupp-data. Därför bedömdes kalibrering som här redovisas som tillräcklig för de resultatkörningarna som har gjorts för denna redovisning (se nästa avsnitt).

Figur 9 - Figur 10 visar anpassningen för den kalibrerade FF-modellen för mått som inte har ingått i utvärderingen av kalibreringen. Det är värt att notera att även om kalibreringen enbart innebar en justering av gångtidsmodellen så lyckas den ändå märkbart förbättra anpassningen för avvikelsen vid avgång från stationer (Figur 10). I övrigt så är det givet att anpassningen av fördelningskurvor, STM5 och medelavvikelser är sämre i dessa figurer. Detta på grund av att de kalibreringen inte har utvärderats mot måtten i Figur 9 och Figur 10. Dessa figurer har tagits med för att fördjupa redovisningen av kalibreringsresultaten.

5.4 MODELLKÖRNINGAR: FÖRSENINGSELASTICITETER, FÖRSENINGAR (OCH STM5)

Den kalibrerade FF-modellen, beskriven i föregående, avsnitt har använts för att utvärdera den nyutvecklade modellen. Detta avseende hur resultat för den nya versionen skiljer sig från den tidigare versionen, men också hur modellen bör köras i olika typer av scenarier.

Ett av huvudsyftena med utvecklingen av FF-modellen i detta projekt har varit att estimeras och implementera effekter för olika typer av fel. Vid estimeringen användes följande indelning i 5 typer av fel:

Kontaktledning

Signal

Spår

Växel

Övriga

baserat på anläggningstyp för verkligt fel i Ofelia. Syftet i detta avsnitt är att presentera modellberäknade elasticiteter för förseningstiden för persontåg vid ankomst till stationer för passagarutbyte när felen minskar avseende de fem feltyperna ovan, samt total elasticitet när alla fel minskar. Elasticitet är ett tal som anger den relativa procentuella förändringen av förseningar för en viss procentuell förändring av felen. Uttryckt som en formel innebär det att om den procentuella förändringen av felen är $X\%$ och förändring av förseningarna är $Y\%$ så är elasticiteten ett tal E sådant att

$$Y\% = E \cdot X\%.$$

Till exempel, en elasticitet på 0.5 innebär att förseningen minskar med 5% om felen minskar med 10%.

För beräkning av elasticiteter så har felen minskats med 10% för respektive feltyp, vid beräkning av totalelasticitet så har felen minskats med 10% oavsett feltyp.

För tolkningen av elasticiteter så gäller att både hur stor förekomsten av en viss feltyp är och hur stor den estimerade förseningseffekten är vid passage över ett fel påverkar elasticitetens storlek för en given feltyp.

Tabell 10 nedan visar andel fel över feltyperna. Det är tydligt att Övriga fel är dominerande när det gäller förekomst av fel. Orsaken till den använda indelningen i feltyper är att de fyra specifika feltyperna står för en stor andel av felorsakerna enligt merförseningsstatistiken. Det är också viktigt att ha i åtanke att felen som ingår i FF modellen är samtliga infrastrukturrelaterade fel registrerade i Ofelia, inte enbart fel som har bedömts som tågstörande som är ett vanligt förekommande kriterie vid presentation av statistik.

Tabell 10: Andel av feltyp över samtliga passager eller väntetider för tåg vid stationer där fel förekommer, utifrån Lupps data på den 14e september, 2017.

Feltyp	Andel
Kontaktledning	2,1%
Signal	3,7%
Spår	11,3%
Växel	6,0%
Övriga	77,0%
	100,0%

Utöver förekomsten av fel och estimerad effekt per tåg så påverkar tågen också varandra i form av följdförseningar, vilket är en viktig del av elasticiteternas storlek.

FF-modellen är en Monte Carlo-simulering av den gemensamma sannolikhetsfördelningen av samtliga ankomst- och avgångstider (totalt 114 507 st.) vid alla stationer i hela järnvägssystemet under en dag (14:e sep. 2017). Att det är en Monte Carlo-simulering innebär att en modellkörning utgör en slumpmässig dragning från den sannolikhetsfördelningen. För att få precision i resultaten från modellen behövs ett antal körningar typisk genomföras. Varje resultat har ett visst slumpmässigt simuleringsfel som kan beräknas, till exempel i form av konfidensintervall.

En skillnad för denna version av FF-modellen jämfört med den tidigare versionen av FF som endast innehöll estimerade genomsnittliga fel, är att det krävs fler körningar av modellen för att uppnå en given storlek på simuleringsfelet. Orsaken till detta är att tidigare versionen var mer av en genomsnittsmode. I den nu framtagna versionen påverkas varje körning mer specifikt av var olika individuella fel förekommer, och dess typ, jämfört med den slumpmässiga komponenten i modellen.

En annan skillnad gentemot tidigare elasticitetskörningar är att simuleringsfelet nu skattas mer realistiskt än tidigare genom att konfidensintervall beräknas med hjälp av den så kallade bootstrap-metoden. Tidigare har konfidensintervall beräknats genom att anta att de medelvärdena för modellberäknade värden över upprepade körningar är normalfördelade. Bootstrap-metoden gör inte något sådant skarpt antagande om sannolikhetsfördelning, utan utnyttjar direkt den empiriska fördelning som data uppvisar (i detta fall fördelningen över de simulerade modellberäknade värdena). Konfidensintervall enligt bootstrap-metoden har gett betydligt bredare konfidensintervall, 3-4 ggr bredare när metoderna har jämförts, men troligen ger de en betydligt mer realistisk skattning av simuleringsfelet.

Elasticiteter i en Monte Carlo-simulerad modell kan beräknas på två sätt, (1) som ett genomsnitt av elasticiteter över körningarna, eller (2) som en elasticitet för genomsnittliga förseningarna över körningarna⁴.

De två sätten att beräkna elasticiteter på ger olika resultat eftersom elasticitet inte är en linjär storhet. Den första metoden är teoretiskt attraktiv eftersom elasticitet definieras som den relativa procentuella förändringen när en viss variabel förändras *och alla andra påverkande faktorer hålls konstanta*. Den andra metoden är i mindre grad teoretiskt väl definierad på detta sätt⁵. Däremot har den fördelen att den bättre motsvarar observerbara förändringar i järnvägssystemet. I en reell mätsituation kan vi aldrig uppskatta effekten av en minskning av en viss feltyp med 10% genom att hitta exakt likadana mättdagar före och efter minskningen och sedan para dessa dagar med varandra i beräkningen av observerade elasticiteter. Däremot skulle det vara möjligt att före förändringen identifiera ett antal mättdagar som liknar den 14:e september (som är dagen som FF-modellen körs för) och beräkna de genomsnittliga förseningarna för dessa mättdagar. Därefter kan vi beräkna de genomsnittliga förseningarna för motsvarande lämpliga mättdagar efter förändringen i felförekomst. Den så erhållna observerade elasticiteterna skulle skattas konsistent av våra modellberäknade elasticiteter enligt metod (2) ovan, men ej av elasticiteterna beräknade enligt metod (1). Så även om metod (1) ovan är att föredra, ur vissa aspekter, ur teoretisk synvinkel så är metod (2) den metod som troligen är mest lämpad i ett policysammanhang. Metod (2) motsvarar vilken mätbar effekt vi kan förvänta oss av en given förändring i förekomst av fel.

Metod (2) har också fördelen att den kräver betydligt färre upprepade körningar av FF-modellen för att uppnå en given nivå på simuleringsfelet, metod (1) kräver cirka fyra gånger så många modellkörningar som metod (2). Av ovanstående skäl så har metod (2) valts för att beräkna elasticiteter för den nya versionen av FF. Endast elasticiteter enligt metod (2) redovisas nedan. I fortsättning refereras därför inte till metod (1).

Tabell 11 nedan ger elasticiteter för respektive feltyp samt total elasticitet när alla fel, oavsett feltyp, minskas med samma faktor. I samtliga körningar har felen minskats med 10%. Totalt gjordes 644 körningar för att producera tabellen, fördelade på 92 upprepade körningar per feltypsscenario och scenariot för totalelasticiteten samt ett baslinjesenario (nuläge enligt Lupp 2017-09-14).

⁴ I det första fallet genomförs körningarna så att en körning med en viss feltyp minskad 10% utförs och en baslinjekörning utan någon felminskning genomförs på exakt samma utgångsföljd av slumpstal, sedan beräknas en elasticitet för denna ihop-parade körning. De upprepade körningarna utförs på samma sätt, men med andra slumpstalsföljder, vilket ger upphov till en följd av elasticiteter som är lika många som de olika slumpstalsföljderna. Enligt den andra metoden så genomförs lika många körningar men *endast en* elasticitet beräknas per feltyp genom att beräkna den genomsnittliga förseningen över de olika slumpstalsföljderna för feltyps- och baslinjekörningarna sedan beräknas elasticiteterna utifrån den procentuella förändringa av de genomsnittliga förseningarna

⁵ Det bör också sägas att det teoretiska begreppet "elasticitet" definierades innan Mont Carlo-simulerade modeller började användas. Den första metoden kan också beskrivas som en övertolkning av den teoretiska definitionen av elasticitet.

Tabell 11: Förseningselasticiteter vid 10% minskning av fel per feltyp eller totala fel, 92 modellkörningar per feltyp, baslinjekörning och scenario för total elasticitet, totalt 644 körningar.

Feltyp	Elasticitet	95% bootstrap konf.intervall	
		Undre gräns	Övre gräns
Kontaktledning	0,10	0,01	0,19
Signal	0,09	0,00	0,18
Spår	-0,04	-0,13	0,05
Växel	0,12	0,04	0,20
Övriga	0,58	0,50	0,66
Total	0,81	0,73	0,89

Den totala elasticiteten var 0,81, alltså minskar medelförseningen med 8,1% när samtliga typer av fel minskas med 10%. Konfidensintervallet för den totala elasticiteten ligger mellan 0,73 och 0,89, vilket kan betecknas som en måttlig precision i skattningen av elasticiteten. Konfidensintervallet för den totala elasticiteten ligger dock klart över konfidensintervallen för de feltypsspecifika elasticiteterna. De modellberäknade elasticiteterna för feltyperna Spår, Kontaktledning, Växel och Signal går inte att skilja från varandra då deras konfidensintervall överlappar varandra. För att skilja de elasticiteterna åt behövs fler modellkörningar genomföras. Konfidensintervallet för Övriga fel är dock klart skilt från konfidensintervallen för de specifika feltyperna, så elasticiteten för Övriga fel är klart högre än elasticiteten för de specifika feltyperna. Totalelasticiteten för den föregående versionen av FF var 0,9, vilket är samma storleksordning som den nu uppmätta totalelasticiteten på 0,8.

Elasticiteter är på grund av att de är icke-linjära transformationer av utdata från modellen, tämligen beräkningskrävande storheter. Som en illustration över hur beräkningsintensiteten skiljer sig åt beroende på vilka mått som studeras visas nedan de modellberäknade medelförseningarna för respektive scenario i Tabell 11. Medel- eller summerade förseningar är den typiska utdata som FF har konstruerats för att ge prognoser om. Vi ser från Tabell 12 nedan att bredden på konfidensintervallen är betydligt mindre än för elasticiteterna. För många tillämpningar är denna noggrannhet i resultaten troligen tillräcklig i sig, och att även en lägre precision från färre antal körningar kan vara acceptabelt. De beräkningarna som redovisas längre fram i texten om antal nödvändiga körningar som behövs för att uppnå en given noggrannhet i resultaten, visar att antalet nödvändiga upprepade modellkörningar som behövs för att skatta noggranna medelförseningar är endast cirka en tiondel av det antal modellkörningar som behövs för att noggrant skatta elasticiteter.

Tabell 12 Medelförseningar per feltypsscenario, totalscenario och baslinjescenario från körningarna som Tabell 11 baseras på.

Feltyp	Medelförsening	95% bootstrap konf.intervall	
		Undre gräns	Övre gräns
(baslinje)	4,16	4,14	4,19
Kontaktledning	4,12	4,10	4,14
Signal	4,12	4,10	4,15
Spår	4,18	4,15	4,21
Växel	4,11	4,09	4,14
Övriga	3,92	3,90	3,94
Total	3,83	3,81	3,85

För att kunna dra mer slutsatser om behovet av antal upprepade modellkörningar och förväntad körtid för dessa körningar behöver vi göra antaganden om vilken noggrannhet i resultaten som är nödvändig eller lämplig. För att dra tillfredställande slutsatser om elasticiteternas storlek och deras inbördes skillnader är konfidensintervall med noggrannheten

Elasticitet $\pm 0,05$

troligen erforderliga. Vi har också använt noggrannheten $\pm 0,05$ för medelförseningar.

Med hjälp av antagandena att konfidensintervallens längd är proportionella mot standardavvikelsen för elasticiteten och att standardavvikelsen avtar som ett genom kvadratroten ur antalet körningar så går det att beräkna hur många körningar som behöver göras för att nå denna noggrannhet. Tabell 13 nedan visar resultatet av sådana beräkningar, för elasticiteter och medelförseningar, med utgångspunkt i modellkörningarna gjorda för Tabell 11 och Tabell 12 ovan. Som ytterligare referens redovisas antalet körningar och beräknad körtid för att bestämma STM5 till noggrannheten $\pm 0,005$. Utgångspunkten är en server som kan utföra 12 parallella körningar samtidigt där varje körning tar 4,25 timmar.

Tabell 13: Antal körningar och beräknad körtid för att nå noggrannheten $\pm 0,05$ (STM5: $\pm 0,005$) för modellberäknade elasticiteter, medelförseningar och STM5. Beräknat för en server som medger 12 parallella modellkörningar samtidigt och en körtid på 4,25 timmar per körning.

Feltyp	Elasticitet		Medelförsening		STM5	
	Antal körningar	Total körtid (dygn)	Antal körningar	Total körtid (dygn)	Antal körningar	Total körtid (dygn)
(baslinje)	222	3,3	31	0,5	12	0,2
Kontaktledning	250	3,7	16	0,2	12	0,2
Signal	282	4,2	23	0,3	11	0,2
Spår	280	4,1	25	0,4	11	0,2
Växel	237	3,5	19	0,3	12	0,2
Övriga	240	3,5	22	0,3	11	0,2
Total	222	3,3	14	0,2	12	0,2
Summa	1732	25,6	150	2,2	81	1,2

För elasticitetsberäkningar ligger antalet körningar på 222 till 282 körningar per feltyp, och det totala antalet körningar för att producera

Tabell 11 med en noggrannhet på $\pm 0,05$ uppskattas till knappt 26 dygn. Körtiden för enskilda elasticitetsscenarioer ligger mellan 3,3 och 4,2 dygn per scenario. För beräkning av medelförseningar till samma noggrannhet krävs 14 till 31 körningar per scenario och 150 körningar totalt för alla scenarier. Detta tar 0,2 till 0,5 dygn per scenario och 2,2 dygn totalt för körning av alla scenarier. För att beräkna STM5 till noggrannheten $\pm 0,005$ krävs 11 till 12 körningar per scenario och 81 körningar totalt, vilket är den minst krävande uppgiften för modellen.

Behovet av upprepade körningar och krav på körtid beror alltså tämligen starkt vilka resultatmått som ska beräknas. Som nämnts ovan är behovet av upprepade körningar större i den nya versionen av FF än för den tidigare version. Det är värt att upprepa att FF, om den totala körtiden är kritisk, framför allt är en modell som lämpar sig för att köra enskilda stråk i järnvägssystemet. Körtiden för FF-modellen avtar i princip proportionellt med en minskning i det totala antalet ankomster och avgångar till och från stationer (eg. driftsplatser).

6 RESULTAT AV INTEGERING RAILSYS OCH FF+

6.1 MODELLOMRÅDE

Två olika delar i järnvägsnätet simuleras med störningsfördelningar från FF. Det är dels en del av Ostkustbanan och hela Västkustbanan. Förutsättningar för områdena som tagits med i RailSys-modellen listas nedan med huvud- och sidodelar:

- Ostkustbanan delen Ulriksdal–Gävle inklusive Arlandabanan
 - Uppsala C–Uppsala N på Dalabanan ingår för att få med rörelser inom Uppsala C fullständigt.
- Västkustbanan, Göteborg C–Lund, inklusive delarna nedan:
 - Almedal–Mölndals övre
 - Varberg–Tofta
 - Torebo–Falkenbergs godsstation
 - Halmstads central–Oskarström
 - Eldsberga–Genevad (inga tåg har lästs in)
 - Ängelholm–Åstorp
 - Kattarp–Hasslarp (inga tåg har lästs in)
 - Helsingborg godsbangård–Ättekulla
 - Helsingborg godsbangård–Gantofta
 - Landskrona Östra–Landskrona godsbangård
 - Kävlinge–Teckomatorp
 - Kävlinge–Flädie

Anledningen till att innefatta, i många fall, korta delar av anslutande banor är att tågrörelserna in till och ut från den bana som huvudsakligen modelleras ska bli fullständiga i en simulering. På Ostkustbanan ingår i Gävle endast tåg som trafikerar Ostkustbanan söder om Gävle. På Göteborg C finns endast tåg till och från Västkustbanan med. Samma förhållanden gäller i Lund.

6.2 NORMALT FÖREKOMMANDE STÖRNINGSFÖRDELNINGAR

Det finns flera typer av störningar som kan definieras i RailSys. Dessa ges i form av fördelningar vilka kan allokeras till platser och riktningar samt till berörda tåg på lite olika sätt. De störningstyper som normalt används är:

- *Initial* – Störningar som kan ges till tåg på startplatser i modellen. Platserna kan vara verkliga startplatser för tågen eller platser där tågen ”kör in” i modellområdet.
- *Dwell* – Störningar vid planerade uppehåll. Det typiska exemplet här är för modellering av variationer i resandetågens uppehållstider men den kan även användas för andra typer av uppehåll, exempelvis växling av vagnar och personalbyte. Ett värde som dragits ur en uppehållsfördelning behöver inte

nödvändigtvis innebära en sen avgång (eller en merförsening) eftersom tiden kan ligga inom den planerade uppehållstiden.

- *Run time* – Störningar som inträffar när tåget körs mellan två platser i form av förlängd körtid, benämns ofta för linjestörningar.

Tanken med störningsfördelningarna är att de normalt ska representera den mängden störningar som har en primär orsak. Simuleringens syfte är sedan att modellera de sekundära störningarna som inträffar på grund av konflikter mellan tåg och ge ett resultatutfall, exempelvis i form av punktlighet eller medelförsening. I fallet med initialstörningar för tåg som "kör in" i modellen representerar fördelningen mängden primär- och sekundärstörningar som inträffat utanför simuleringsområdet.

6.3 ANTAGNA FÖRUTSÄTTNINGAR I SIMULERINGAR

I dessa simuleringar används endast de primärfördelningar för linjesträckor som erhålls från körningar i FF-modellen. Med linjesträckor menas här normalt sträckan mellan två på varandra följande platser i LUPP. Fördelningarna speglar vad som sett ur primärförseningsperspektiv kan hända tågen mellan avgång från föregående plats fram till avgång från aktuell plats. Denna typ av fördelningar kallas här för *linjefördelningar*. De innehåller i denna tillämpning även sånt som kan ske på aktuell plats under ett uppehåll. Eftersom inga initialstörningar (initialfördelningar) används har alla tåg har bra förutsättningar att starta i tid, om inte andra tåg som redan finns i modellen inverkar hindrande.

Det används inga specifika uppehållsfördelningar. Motivet till detta är att inverkan från uppehållstidernas variationer kommer indirekt med via de primära linjestörningsfördelningarna från FF-modellen eftersom dessa bygger på avgångsregistreringar mellan två på varandra följande trafikplatser. Om slutplatsen för länken har planerade uppehåll kommer de verkliga uppehållstiderna att påverka linjefördelningarna. På grund av detta hanteras resandetågens uppehållstider normalt så att de alltid använder hela den planerade tiden oavsett om tågen är försenade eller inte. Undantag görs i de fall där uppehållstiden tydligt är längre än normalt på grund av anpassningar till övrig trafik, det vill säga där den totala uppehållstiden innehåller en viss andel tidtabellsteknisk tid. I dessa fall sätts en minsta uppehållstid som reflekterar den normala uppehållstiden för liknande tåg.

I de fall godstågen har uppehåll sker bedömningar från fall till fall. Normalt här är att om uppehållet endast består av tidtabellsteknisk tid, det vill säga operatören har inte efterfrågat någon uppehållstid utan denna har enbart tillkommit som anpassning till övrig trafik, sätts minsta uppehållstiden till en sekund. Det finns möjligheter att i RailSys definiera dessa uppehåll så att tågen i en simulering kan köra förbi utan att genomföra uppehållet. Även om denna funktion framstår som verklighetstrogen tillkommer ofta andra modelltekniska problem i RailSys, vilket innebär att om funktionen används ska den användas med varsamhet.

Tågens trafikledningsprioriteter, vilka är relativa tal som används av trafikledningsfunktionen vid konfliktlösning, ingår i fordonstyperna. Dessa är i de flesta fall gruppade efter huvudsaklig användning,

exempelvis snabbtåg, regionaltåg, godståg etc. Samma värden och tidsgränser används som redan är inlagda av Trafikverket.

6.4 INLÄSNING OCH HANTERING AV INDATA FRÅN FF-MODELLEN

Indata från FF-modellen ges i form av fördelningar för respektive platslänk och tåggrupp. Riktningen ges av ordningen på platserna i varje platslänk. Platserna som förekommer motsvarar dem som det finns registreringar för i den LUPP-data som använts i FF-modellen.

Exempel på en fördelning visas i Tabell 14. *Värde* anger primär linjestörning i minuter och *Antal* ger andelarna eller sannolikheterna för att ligga i ett visst intervall. Dragning av värden från fördelningarna görs genom att likformigt dra ett värde mellan 0 och summan av kolumnen *Antal*. Värdet som dras pekar i princip på en rad i fördelningen. För att slumpvist dra ett tidsvärde sker en likformig dragning i intervallet som ges av värdet på aktuell rad och föregående rad. Slutvärdet ges i sekunder. Upplösningen i fördelningarna kan styras med tidsvärdena vilket gör det möjligt ge teoretiska fördelningar på empirisk form. Det spelar ingen roll om den ursprungliga fördelningen definieras med sekunder eller minuter, de värden som dras ur fördelningen kommer till slut att omvandlas till sekunder i den fil som genereras inför en simulering.

Tabell 14: Exempel på fördelning från FF-modellen.

Tåggrupp	Platslänk	Värde(min)	Antal
Other	SÄY U	0	301
Other	SÄY U	1	43
Other	SÄY U	3	43
Other	SÄY U	4	43

Inläsning och allokering av fördelningar samt dragning av värden görs genom att köra olika Matlab-script vilket slutligen skriver en XML-fil som RailSys behöver inför en simulering. Det är möjligt att göra all hantering direkt i RailSys men eftersom mängden fördelningar är stor skulle detta vara väldigt tidskrävande och framförallt opraktiskt eftersom det krävs manuell inmatning av alla fördelningar och allokeringar till platslänkar och tåggrupper. Med scripthantering finns dessutom möjlighet att skapa andra villkor och modellera olika beroenden som inte kan göras direkt i programmets interface.

Det förekommer fyra tåggrupper i de filer som använts i simuleringarna. Dessa allokeras enligt:

- *X2000* – Snabbtåg
- *Pendel* – Pendeltåg
- *Other* – Resandetåg som inte är snabbtåg eller pendeltåg
- *Non-RST* – Godståg och tjänstetåg

I de flesta fall är platssignaturerna i RailSys samma som de som förekommer i LUPP-data, men ibland finns skillnader och därför används en mappningslista för att undvika felaktiga allokeringar. Även

om detta hanteras är det inte säkert att platslänknings från FF-modellen överensstämmer eller fungerar med RailSys-modellen. Detta beror antingen på att platslänknings inte är lika eller på specifika egenskaper i RailSys infrastrukturmodell. I vissa fall kan problemet åtgärdas genom ändringar i infrastrukturmodellen men detta är inte alltid möjligt eller lämpligt av andra skäl.

Det finns därför möjlighet att mappa även platslänkar via en lista genom att i förekommande fall specifikt för vissa länkar i FF-data ange vilken RailSys-länk dessa ska peka på. Vilka länkar som kräver åtgärd framgår i fellistor med fördelningar som inte kan allokeras när scripten körs innan länkmappning är gjord. Mappningen av platslänkar är implementerad så att två eller fler platslänkar från FF-modellens utdata kan peka mot en och samma platslänk i RailSys-modell. Alla värden som dras ur de aktuella fördelningarna för ett visst tåg summeras då ihop till ett gemensamt värde för aktuell platslänk i RailSys. Denna princip används exempelvis för att mappa FF-länkarna Uppsala–Löten och Löten–Samnan till RailSys-länk Uppsala–Samnan i båda riktningar. När det första spåret på det nya dubbelspåret mellan Löten och Samnan kopplades in i maj 2017 slopades driftplatsen Löten helt och finns därför inte med i RailSys infrastrukturmodell T17.

Styrning av vilket största möjliga värde som kan förekomma som pålagd störning i simuleringar kan antingen ske direkt genom att anpassa fördelningarna eller genom att ange maxvärde för olika störningstyper i scripten. I det senare fallet trunkeras eventuella högre värden som dragits ur fördelningar till respektive maxvärde. Det finns möjlighet att dels ha generella maxvärden och avvikande maxvärden som gäller för vissa platser eller platslänkar enligt separat lista. Detta används i simuleringarna på Väst kustbanan för att begränsa mängden *deadlocks* som i simuleringarna lätt uppstår på enkelspåriga sträckor med relativt sett mycket trafik som redan innan de kommer till det området ofta är försenade. I detta sammanhang beskrivs en *deadlock* av situationen då ett eller flera tåg inte kan fortsätta vidare eftersom andra tåg blockerar på ett sådant sätt att dessa låser varandra. Det är relativt vanligt att dessa inträffar i synkrona simuleringar på enkelspåriga banor och komplexa stationsområden med mycket trafik och stora förseningar. Sannolikheten för att dessa inträffar kan sänkas med olika åtgärder och begränsningar i simuleringssmodellen men det går inte att förhindra de helt och hållet. Den generella trunkeringen som används är 30 minuter men på sträckan Ängelholm–Helsingborg C används fem minuter och anledningen är för att minska förekomsten av *deadlocks*.

Enligt överenskommelse har målsättningen varit att simulera 100 cykler både på Ost kustbanan och Väst kustbanan. Eftersom andelen *deadlocks* på Väst kustbanan varit cirka 50 % har simuleringarna där körts med drygt 200 cykler för att kunna få minst 100 genomförda cykler.

6.5 JÄMFÖRELSE MELLAN RAILSYS OCH LUPP

Primär förseningsfördelning kan INTE beräknas utifrån statistik från Lupp då denna blandar både primära och sekundära förseningar vid ankomststationer. Därför har den primära förseningsfördelningen härletts från den kalibrerade FF-modellen (utan effekt av timegap) på Ost kustbanan OKB och väst kustbanan VKB, för både person- och

icke-persontåg. Ett jämförelsealternativ för empirisk fördelning är schablonmässig exponentiell fördelning. Totala förseningar inkl. primär- och sekundärförsening har sammanfattats från RailSys simuleringar baserad på empirisk och schablonfördelning av primär försening, se tabell nedan:

Tabell 15 Beskrivande statistik av totala förseningar från RailSys och Lupp

Totala förseningar (sek)	OKB			VKB		
	1st kvartil	median	3:e kvartil	1st kvartil	median	3:e kvartil
RailSys Empirisk						
persontåg	0	39	192	0	39	218
icke-persontåg	0	21	254	0	0	522
RailSys Schablon						
persontåg	0	29	133	0	36	166
icke-persontåg	0	43	252	0	62	722
Lupp statistik						
persontåg	0	0	0	0	0	120
icke-persontåg	0	0	0	0	0	180

För både OKB och VKB noteras att empirisk fördelning ger en statistisk profil som bättre överensstämmer med Lupps statistik avseende icke-persontåg; medan schablonmässig exponentiell fördelning fungerar bättre för persontåg i förhållande till statistik. Både empirisk- och schablonmässig fördelning har större varians än statistik från Lupp. Detta beror på att de flesta fallen har räknats in via simuleringar med RailSys och FF-modellen, t.ex. har simulering gjorts 40 till 50 gånger med FF-modellen och 100+ gånger med RailSys för en torsdag. Lupps statistik å andra sidan består av data från en verklig torsdag.

Noterbart är att RailSys endast har använt en historisk tidtabell för vardagar i september 2017 under projektet, men i framtiden bör RailSys användas för simulering av prognostidtabell med empirisk primär försening som kalibreringsmått för icke-persontåg, och motsvarande schablon fördelning som kalibreringsmått för persontrafik.

7 BEGRÄNSNING OCH POTENTIAL FÖR TILLÄMPNING

Kalibreringen av FF som utfördes i avsnitt 5.3 fokuserade på modellens anpassning till observerade Lupp-data, främst avseende avvikelser som innebär förseningar för resenärer. Vid arbetet med kalibrering framkom främst två punkter där modellen har svårigheter, och därmed också förbättringspotential. Den första punkten är att modellen har svårt att återskapa observerade data när tågen har för tidiga ankomster till stationer. Den andra punkten är att modellen har

svårigheter att återskapa observerade data när tågen har större förseningar, mer än 30 min. Den första punkten skulle kunna förbättras genom att explicit inför tidtabellstillägg i gångtidsmodellerna och kanske även i modellerna för uppehållstid. Den andra punkten kan vara en indikation på en begränsning i estimeringsmodellerna. Den kan till exempel förbättras genom att införa slumpmässiga effekter i estimeringsmodellerna.

Ytterligare en sak som berör kalibreringen är att den fokuserar på persontåg, detta på grund av att bristerna i modelleringen av godståg är för stora. Detta kan dock innebära att risk för så kallad överkalibrering av persontågstrafik. Det vill säga att avvikelser från observerade data som beror på brister i modelleringen av godståg, avhjälps genom att justera i persontågsmodellerna. Vilket i sin tur riskerar att snedvrider effekterna av förklarande variabler i persontågsmodellerna, till exempel felvariablerna. Den största bristen i nuvarande modellering av godståg är att de inte kan avgå från första station före utsatt tid i tidtabellen. I observerade data så avgår en betydande andel av godstågen före utsatt tid, ofta flera timmar före. Troligen skulle även en tämligen enkel modell för godstågens avgång från utgångsstationen, som medger för tidig avgång, innebära att det går att ta med godstågen i kalibreringen.

Dataväxling mellan FF modellen och RailSys bör kunna testas på både djupare och bredare plan, detta projekt har enbart fokuserat på linjestörningar och kan utökas med störningar vid station och ingångsförseningar, samt testa i komplicerad trafikmiljö t.ex. västra stambanan. Kommande projekt ska kunna underlätta automatisering av prognostidtabell på kort sikt, med löpande generering av primärförseningar från FF-modellen baserad på uppdaterad tågförflytningsstatistik ifrån Lupp.

Kapacitetscenter på Trafikverket använder ett egenutvecklat Excel-makro för hantering och allokering av störningsfördelningar i samband med simuleringar i RailSys. Det finns i nuläget en viss automatik för att få in initialfördelningar från LUPP-data. Däremot finns ingen automatik för att automatiskt modellera eller generera linje- eller uppehållsfördelningar och även få in dessa. Dessa fördelningar behöver skapas på annat sätt eller tas från tidigare simuleringar, föras in i Excel-bladet där allokering kan göras även för dessa.

Det finns en potential i att använda fördelningar framtagna via FF-modellen i samma Excel-makro. Om hanteringen delvis ska kunna automatiseras behöver en importrutin göras (exempelvis VBA-skript alternativt R-skript) som kan läsa in fördelningar från FF-modellen till arbetsbladet och allokera mot platser och tåggrupper.

VI ÄR WSP

WSP är ett av världens ledande analys- och teknikkonsultföretag. Vi verkar på våra lokala marknader med stöd av global expertis. Som tekniska experter och strategiska rådgivare har vi tillgång till ingenjörer, tekniker, naturvetare, planerare, utredare och miljöspecialister liksom professionella projektörer, konstruktörer och projektledare. Vi erbjuder hållbara lösningar inom Hus & Industri, Transport & Infrastruktur och Miljö & Energi. Med drygt 39 000 medarbetare på 500 kontor i 40 länder medverkar vi till en hållbar samhällsutveckling. I Sverige har vi omkring 4 000 medarbetare. wsp.com

WSP Sverige AB

121 88 Stockholm-Globen
Besök: Arenavägen 7

T: +46 10 7225000
Org nr: 556057-4880
Styrelsens säte: Stockholm
wsp.com

wsp