



UPPSALA
UNIVERSITET

UPTEC STS 21032

Examensarbete 30 hp

Juni 2021

Kan SUMO användas för simulering av 2+1-vägar?

Ella Calais & Filip Kristofersson



UPPSALA
UNIVERSITET

Can SUMO be used for simulation of 2+1 roads?

Ella Calais & Filip Kristofersson

Abstract

Traffic simulation is a growing research field which enables study and evaluation of the dynamics of a traffic system with the help of today's various traffic simulation models. Rural roads with separated oncoming lanes and alternating lanes for overtaking, so-called 2+1 roads, are becoming increasingly common in Sweden due to its positive safety effects. In Sweden, there is today only one traffic simulation model developed for simulation of these road types, RuTSim (Rural Traffic Simulator). RuTSim is a research tool which makes it difficult to apply for others than the developers. This study therefore investigated whether the more accessible open-source code traffic simulation model SUMO (Simulation of Urban MObility) developed for urban and motorway traffic can be modified for modeling of traffic operations on 2+1 roads. Simulations of a virtual 2+1 road section were examined qualitatively and quantitatively using various comparison metrics aimed at capturing the characteristic traffic operations and human driver behavior on 2+1 roads. The results were further compared with an identical road section simulated in RuTSim. By adjusting parameters in the SUMO model and using its source code in its original form, the results show that it is to some extent possible to reflect the traffic operations and human driver behavior on 2+1 road, while some important mechanisms cannot be fully captured. By further modifying the source code in such a way that the speed of overtaking vehicles is temporarily increased, some of these missing mechanisms are successfully captured. The conclusion is that SUMO to some extent can model 2+1 roads, but the simulation model still lacks some basic mechanisms for capturing some of the traffic operations. For future studies, it is recommended to focus on further developing the sub-models for the merging behavior at the end of the two-lane sections, which differs compared to merging at on-ramps or lane closures since merging on 2+1 roads are part of an overtaking process.

Teknisk-naturvetenskapliga fakulteten

Uppsala universitet, Uppsala

Handledare: Johan Olstam & Viktor Bernhardsson Ämnesgranskare: Hans Rosth

Examinator: Elísabet Andrésdóttir

Populärvetenskaplig sammanfattning

Det finns ett behov att kunna beskriva och analysera hur fordons rörelser och interaktion påverkar trafiksystemet. Hur ett fordon rör sig och interagerar med andra fordon och vägens utformning kan beskrivas med hjälp av matematiska modeller. Detta är något som utnyttjas inom trafiksimulering.

Trafiksimulering kan beskrivas som en analysmetod där ett virtuellt trafiksystem först etableras och därefter simuleras i en programvara. Själva simuleringen kan gå till på så sätt att trafiken uppdateras varje sekund och att de matematiska modellerna tar in tillståndet i det föregående tidssteget och beräknar fordonens rörelse och beteende i det kommande tidssteget. På så sätt kan fordonens rörelse analyseras under en given tidsperiod. Trafiksimulering kan exempelvis användas för att jämföra alternativa förändringar i ett trafikinät och hur dessa skulle påverka köbildningen eller andra effektmått. Då fordons beteende skiljer sig åt mellan olika vägtyper behöver även modellerna som representerar beteendet anpassas därefter. En matematisk modell som fungerar bra för att beskriva fordons interaktion med andra fordon i stadsmiljö behöver nödvändigtvis inte fungera bra för att beskriva interaktionen på en landsväg.

I detta examensarbete undersöks det hur väl en trafiksimuleringsprogramvara utvecklad för simulering av stads- och motorvägstrafik kan simulera trafik på 2+1-vägar – en landsvägstyp där antalet körfält växlar mellan ett och två, så att fordon kan köra om på de återkommande omkörningssträckorna. Arbetet syftar till att studera olikheterna mellan denna programvara och en programvara framtagen för 2+1-vägar. Förutom att endast ta reda på skillnaderna och vad de kan bero på görs även ett försök att justera programvaran anpassad för stads- och motorvägstrafik för att den bättre ska kunna simulera 2+1-vägar.

Programvarorna som jämförs i studien är SUMO och RuTSim. RuTSim är en forskningsprogramvara utvecklad av Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) avsedd för simulering av landsvägar däribland 2+1-vägar. Till skillnad från RuTSim är SUMO anpassad för simulering av stads- och motorvägstrafik. SUMO består av en öppen källkod vilket gör det möjligt att fritt ändra programvarans funktionalitet.

Jämförelsen går till på så sätt att två identiska vägnät med likadana fordonssammansättning simuleras under en lika lång tid i vardera programvara. Simuleringarna ställs därefter mot varandra och jämförs utifrån olika mått. Dessa mått är till exempel hastighet vid olika platser i vägnätet och antalet omkörningar under en viss period. Resultatet från jämförelsen har även varit vägledande för vad som kan förändras i källkoden för SUMO för att potentiellt förbättra möjligheten att simulera 2+1-vägar.

Studiens slutsats är att det främst är två egenskaper som saknas för att SUMO ska kunna simulera 2+1-vägar på ett sätt som överensstämmer med RuTSim. Den första är att fordon inte ökar sin hastighet för att ”jaga ifatt” och köra om långsammare framförvarande fordon. Den andra delen där programvarorna avviker från varandra är vävningen, det vill säga hur och när fordon väljer att byta tillbaka till det högra körfältet efter en omkörning och vilka förutsättningar som krävs för att det ska ske. Genom att ändra i källkoden för SUMO går det

att återskapa liknande medelhastigheter som i RuTSim. För att SUMO ska kunna simulera 2+1-vägar fullt ut skulle även de underliggande modellerna för vävningen behöva ses över och anpassas efter förarbeteendet på 2+1-vägar.

Förord

Detta examensarbete har varit det sista delmomentet i vår civilingenjörsutbildning i system i teknik och samhälle på Uppsala universitet, och har skapats i nära samarbete med Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI). Vi vill rikta ett otroligt stort tack till våra handledare där, Johan Olstam och Viktor Bernhardsson, för otaliga timmar i Teams varje vecka under våren, för ert otroliga engagemang och framförallt all er kunskap vi har fått ta del av. Så mycket vi kan om trafiksimulering nu, som vi inte visste innan. Utan er hade det inte varit möjligt att få till detta examensarbete.

Vi vill även tacka vår ämnesgranskare Hans Rosth för veckovis kontinuerlig feedback, samt goda råd och vetenskaplig vägledning igenom hela projektets gång.

Ella Calais & Filip Kristofersson

Uppsala, juni 2021

Innehållsförteckning

Lista över förkortningar och begrepp.....	1
1. Introduktion	2
1.1 Problemformulering.....	2
1.2 Syfte & frågeställningar.....	3
1.3 Tillvägagångsätt.....	4
1.4 Avgränsning	5
1.5 VTI	5
1.6 Rapportstruktur	6
2. Trafiksimulering	7
2.1 Användning	7
2.2 Kategorisering av trafiksimuleringsmodeller	8
2.3 Riktlinjer för tillämpning av trafiksimulering.....	8
3. Mötesfria 2+1-vägar	11
3.1 Förarbeteende	12
3.2 Nyckelkomponenter för 2+1-vägar.....	12
4. Trafiksimuleringsupplägg	14
4.1 Basmodellen: uppbyggnad och verifiering.....	14
4.2 Parameterjustering av basmodellen	15
4.3 Källkodsmodifiering.....	15
5. Programvaror för trafiksimulering: RuTSim & SUMO	16
5.1 RuTSim	16
5.2 SUMO	16
5.3 Indata	17
5.3.1 Förarbeteendemodeller för 2+1-vägar	18
5.4 Accelerationsmodell	19
5.4.1 Accelerationsmodell i RuTSim	19
5.4.2 Accelerationsmodell i SUMO	20
5.5 Körfältsbytesmodell.....	21
5.5.1 Körfältsbyten	21
5.5.2 Omkörning	22
5.5.3 Körfältsbytesmodell i RuTSim.....	23
5.5.4 Omkörningsmodell i RuTSim	24
5.5.5 Körfältsbytesmodell i SUMO	26
6. Basmodellen.....	29
6.1 Dataunderlag	29

6.1.1 TMS-data	29
6.2 Implementering i SUMO.....	30
6.2.1 Detaljer för simuleringsupplägg	31
6.3 Verifiering av basmodell.....	32
6.3.1 Mjukvarukontroll.....	32
6.3.2 Granskning av indata och kodning.....	32
6.4 Jämförelsemått och dataanalys	33
6.5 Antaganden om troliga orsaker till skillnader	35
6.6 Jämförelse av basmodell mot RuTSim	35
6.6.1 Medelhastighet för punktmätningar.....	35
6.6.2 Konfidensintervall för medelhastighet.....	37
6.6.3 Omkörningsstatistik.....	39
6.6.4 Omkörningar start- & slutposition.....	39
6.6.5 Viktiga parametrar för parameterjustering	40
7. Parameterjustering basmodell	42
7.1 Urval av relevanta SUMO-parametrar	42
7.2 Jämförelse av parameterjusterad modell mot RuTSim.....	43
7.2.1 Slutgiltiga parametervärden	43
7.2.2 Resultat jämförelsemått	45
7.2.3 Sammanfattning.....	50
8. Källkodsmodifiering	52
8.1 Genomförd förändring.....	52
8.1.1 Logiken bakom förändringen	52
8.2 Effekt av källkodsmodifiering	53
8.2.1 Jämförelse modifierad modell och omodifierad modell.....	53
8.2.2 Jämförelse av olika parameterjusteringar för modifierad modell	58
8.2.3 Sammanfattning.....	63
9. Sammanfattande slutsats	64
9.1 Fortsatta studier	65
Referenser	66
Författarbidrag	69
Appendix A – Exkluderade jämförelsemått.....	70
Appendix B – Parameterjustering	78
Appendix C – Källkodsmodifiering	79
Appendix D – Utdata.....	80

Lista över förkortningar och begrepp

- VTI – Statens väg- och transportforskningsinstitut
- SUMO – *Simulation of Urban MObility*
- RuTSim – *Rural Traffic Simulator*
- PB – fordonstypen *personbil*
- LBU – fordonstypen *lastbil utan släp*
- LBS – fordonstypen *lastbil med släp*
- CF – *car-following*
- LC – *lane-changing*
- TMS – Trafikverkets trafikmätningssystem
- IDM – *Intelligent Driver Model*
- 2+1-väg – mötesfri landsväg med växelvisa enfälts- och omkörningssträckor
- Enfältssträcka – en vägsträcka med endast ett körfält där omkörning inte är möjlig
- Tvåfältssträcka – en vägsträcka med två körfält i samma bredd och riktning
- Omkörningssträcka – den del av vägsträckan där fordon kan köra om, inkluderar tvåfältssträckan
- Omkörningsfält – det vänstra körfältet på tvåfältssträckan där omkörning genomförs

1. Introduktion

Trafiksimulering är ett effektivt sätt att analysera ett trafiksystems dynamik, egenskaper och potential. Genom att modellera och simulera ett vägnät kan effekten av olika utformnings- eller trafikstyrningsalternativ analyseras. Simulering kan även användas för att undersöka hur en planerad om- eller nybyggnation inom nätet kan komma att fungera.

Simulering av trafik är ett relativt ungt forskningsfält (Tapani, 2005, s. 5). I och med de senaste decenniernas explosionsartade utveckling av datorers beräkningskraft har även möjligheterna inom trafiksimuleringen utvidgats väsentligt. Allt mer detaljerade modeller kan idag tas fram där trafikens karaktär kan finjusteras utifrån en mängd parametrar, allt ifrån reaktionsförmåga till villighet att samarbeta med andra fordon vid omkörning.

Då olika delar av vägnätet ger upphov till olika typer av förarbeteenden kan en trafiksimuleringsmodell utformad för en viss del av trafiksystemet inte nödvändigtvis användas för att simulera en annan. En fundamental del av trafiksimulering är möjligheten att kunna utvärdera hur väl modellen kan representera verkligheten. Då trafiksystemet i sig ständigt är under förändring, både till följd av nya väg- och korsningsutformningar och tekniska framsteg – som en allt mer automatiserad fordonsflotta – måste även trafiksimuleringsmodellerna ständigt omprövas, revideras och utvecklas (Tapani, 2005).

En 2+1-väg är en vägtyp där trafiken är mötteseparerad och där omkörningar möjliggörs genom växelvisa omkörningsfält. Vanligen är de båda körriktningarna separerade med ett mitträcke och vägtypen benämns då som mötesfri landsväg/motortrafikled (beroende på om korsningar är planskilda eller inte). Mötesfria vägar har under den senaste årtiondena blivit allt vanligare i Sverige. Då trafiken på den mötande vägbanan skiljs åt med ett mitträcke ökar säkerheten jämfört med vanliga landsvägar som inte är mötteseparerade. De växelvisa omkörningsfälten gör dessutom att framkomligheten inte minskar lika drastiskt som för en mötesfri landsväg utan omkörningsfält. Jämfört med motorvägar som även är mötesfria men med fler än ett körfält i båda riktningar, är även 2+1-vägar ett mer ekonomiskt alternativ (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 13).

Förarbeteendet på 2+1-vägar är speciellt eftersom sammanvävningen skapar ett karaktäristiskt beteende hos många förare att ”jaga ifatt” andra fordon för att hinna genomföra en omkörning innan nästa sammanvävning. Liknande beteende uppstår inte på vanliga landsvägar eller motorvägar eftersom det inte förekommer förutbestämda kapacitetsreduktioner på samma sätt (Tapani, 2005, s. 1).

1.1 Problemformulering

Då förarbeteendet varierar mellan olika vägtyper kan det finnas svårigheter för trafiksimuleringsmodeller utformade för andra typer av vägar att på ett rättvist sätt beskriva trafikföringen på 2+1-vägar. I allmänhet har dessutom utvecklingen av trafiksimuleringsmodeller för landsvägar historiskt sett varit relativt nedprioriterat. Fokus har främst legat på stadstrafik och motorvägar på grund av en större trängselproblematiken, vilket gjort att behovet av modeller har varit mer påtagligt för dessa vägtyper. I och med ett ökat klimathänseende samt fokus på säkerheten på vägarna har dock intresset för simulering av

landsvägar vuxit (Tapani, 2005, s. 1). I Sverige har en trafiksimuleringsprogramvara tagits fram av VTI för att studera 2+1-vägar – RuTSim.

Som namnet av förkortningen avslöjar är RuTSim utvecklat för studier av landsvägar, både för tvåfältsvägar och mötesfria vägar med växelvisa omkörningsfält, alltså 2+1-vägar. Det finns ett behov av en mer tillgänglig och aktuell trafiksimuleringsprogramvara då RuTSim är en forskningsprogramvara som i huvudsak används och utvecklas på VTI, och därmed finns det ett intresse av att inkorporera RuTSim:s egenskaper i en mer mångsidig och tillgänglig programvara.

SUMO är en programvara för trafiksimulering som finns tillgängligt gratis för nedladdning på nätet. Programmet används över hela världen och testas och utvecklas ständigt av dess användare. SUMO består av öppen källkod vilket gör det möjligt för användare att fritt förändra den kod och delmodeller som programvaran bygger på. Programvaran har däremot ingen modell anpassad för modellering av 2+1-vägar, utan är ämnad för simulering av stads- och motorvägstrafik (Alvarez Lopez m.fl., 2018). SUMO:s användaromfattning tillsammans med det faktum att användaren själv kan påverka källkoden som verktyget bygger på gör att det lämpar sig väl som undersökningsobjekt.

Genom att tillämpa SUMO för en 2+1-väg som tidigare har simulerats med RuTSim kan förståelsen för vilka skillnader som finns mellan traditionella trafiksimuleringsmodeller och modeller som är utvecklade för just 2+1-vägar öka. Genom att undersöka detta kan även egenskaper specifika för 2+1-vägar ytterligare fastställas. Detta kan i sin tur ge en indikation om vilka förändringar som krävs för att utveckla andra trafiksimuleringsmodeller för att även de ska kunna simulera 2+1-vägar.

1.2 Syfte & frågeställningar

Syftet med examensarbetet är att undersöka vilka mekanismer det är som saknas för att en trafiksimuleringsmodell anpassad för stads- och motorvägstrafik ska kunna simulera 2+1-vägar, samt vilka modifieringar som behövs för att kunna inkludera förarbeteendet på dessa vägar. För att konkretisera arbetets olika delar och besvara syftet kommer följande frågeställningar att undersökas:

- Hur väl kan öppen-källkods-programvaran SUMO simulera trafik på 2+1-vägar endast genom parameterjustering?
- Vilka mekanismer i SUMO är det som saknas för att programvaran ska kunna simulera 2+1-vägar?
- Hur kan SUMO modifieras för att inkludera en eller flera mekanismer som tidigare saknats och därmed uppvisa ett förarbeteende som i högre grad överensstämmer med tidigare forskning och uppmätt data på 2+1-vägar?

1.3 Tillvägagångsätt

Rapportens övergripande tillvägagångsätt kan sammanfattas med följande delar:

- Litteraturstudie
- Jämförelse av simuleringar med SUMO och RuTSim för en representativ 2+1-väg
- Justera parametrar som påverkar trafikföringen i SUMO
- Identifiera potentiella mekanismer som påverkar skillnaderna
- Modifiera källkoden i SUMO för att inkludera en eller flera av mekanismerna som påverkar skillnaden

Den första delen av projektet har bestått av en litteraturstudie där relevant information om trafikteori i allmänhet och trafiksimulering i synnerhet samlats in för att skapa en teoretisk grund för studien. Litteraturen har varit centrerad kring forskning av 2+1-vägar. Det centrala med denna del av litteraturstudien har varit att identifiera och förstå vilka aspekter som kan anses vara signifikanta för just den här vägtypen. Detta har gett en föräning om vilka delar under jämförelsen av de två programvarorna som kan vara av extra vikt. Litteraturstudien har bland annat varit vägledande för studiens avgränsningar genom att utifrån tidigare forskning ringa in studieobjektet och dess omfattning på ett sätt som uppfyller projektets syfte.

Litteraturstudien har även bidragit till det specifikt valet att använda en modellering av en 2+1-väg i RuTSim som har tagits fram och beskrivs i rapporten *Effektiva omkörningsfält på 2+1-vägar* (Bernhardsson & Olstam, 2017a).

För att kunna ta reda på hur väl en trafiksimuleringsmodell anpassad för stads- och motorvägstrafik kan simulera trafik på 2+1-vägar hade det varit önskvärt att ha tillgång till mer detaljerade mätdata över körförloppet på dessa vägar. På grund av den bristande tillgången på mätdata har de två programvarorna jämförts baserat på en simulerad genomsnittlig fiktiv vägsträcka i RuTSim som i sin tur är anpassad efter punktmätningar från flera olika platser i Sverige från Trafikverkets trafikmätningssystem (TMS). Den genomsnittliga fiktiva vägsträckan är framtagen i Bernhardsson och Olstam (2017a). Modellen i Bernhardsson och Olstam (2017a) är skapad i RuTSim och kalibrerad för att representera en genomsnittlig 2+1-väg, vilket är anledningen till att modellen antas kunna utgöra en referens för trafikföringen på en 2+1-väg.

Studiens andra steg, efter litteraturstudien, har således varit att konstruera en trafiksimuleringsmodell i SUMO med målet att modellen i så hög utsträckning som möjligt resulterar i en trafikföring som överensstämmer med resultaten från trafiksimuleringen med RuTSim i Bernhardsson och Olstam (2017a). Då modeller är förenklingar av verkligheten, kan RuTSim inte med säkerhet modellera trafikföringen på 2+1-vägar perfekt. Att anpassa SUMO helt efter RuTSim har därmed inneburit att förenklingar och potentiella felkällor som finns inkluderade i den modellen efterliknats.

Den tidigare forskningen om 2+1-vägar tillsammans med informationen om de två programvarorna har även varit vägledande vid valet av de jämförelsemått som utgör grunden för att kunna undersöka studiens frågeställningar. Genom att sätta SUMO:s funktionalitet i relation till förarbeteendet på 2+1-vägar har antaganden kring potentiella skillnader kunnat

fastställas redan innan jämförelsen. Dessa antaganden har i sin tur använts för att bestämma de jämförelsemått som används vid jämförelsen av SUMO och RuTSim. Antagandena har även varit vägledande i arbetet att justera parametrarna kopplade till de underliggande förarmodellerna i SUMO, i ett försök att få bättre överensstämmelse mellan de två programvarornas prestation. Syftet med jämförelsen är bland annat att besvara den andra frågeställningen, nämligen vilka mekanismer det är som saknas för att SUMO ska kunna användas för simulering av 2+1-vägar.

Det sista steget i projektet är att utifrån de identifierade mekanismerna på ett eller flera sätt modifiera SUMO:s källkod för att på så sätt möjliggöra eller förbättra simuleringarna av 2+1-vägar. Det här betyder att det även i det här steget sker en jämförelse mot RuTSim för att påvisa den förbättring som gjorts.

1.4 Avgränsning

Studien avgränsas till att endast beröra svenska trafikförhållanden, vilket bidrar till att vedertagna begrepp och situationer kopplade till trafiken som diskuteras, ska ses vara gällande i en svensk kontext. Studien undersöker modellering av 2+1-vägar, och har då avgränsats till att omfatta endast ett specifikt trafikscenario. Detta betyder att det trafikscenario som modelleras och simuleras, i detta fall en specifik virtuell sträcka av en 2+1-väg, har en viss längd på de olika körfälten, andel omkörbar längd och trafikflöde. Längden på enfältssträckan är 2000 meter och omkörningssträckan är 1500 meter. Vidare är det 40 % andel omkörbar längd, vilket betyder att fordon har möjlighet att köra om på 40 % av den totala vägsträckan. Trafikflödet är 400 fordon/timme.

Ett antagande som gjorts i studien och som även kan ses som en avgränsning är att en trafiksimuleringsmodell antas kunna representera trafikföringen på 2+1-vägar. Därmed jämförs två programvaror istället för att en programvara jämförs mot mätdata. Några ytterligare avgränsningar blir naturliga i och med jämförelsen sker mellan två programvaror och att den ena modellen är uppbyggd efter den andra modellen. Modellen i Bernhardsson & Olstam (2017a) används som referens vilket innebär att modellen i SUMO är utformad därefter. De antaganden och förenklingar som görs i den rapporten, gäller därmed även i denna studie. Detta presenteras mer ingående i kapitel 6.

1.5 VTI

Det här examensarbetet har utförts på Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) som är en statlig myndighet vars huvuduppgift är att bedriva forskning och utveckling inom infrastruktur, trafik och transporter. Verksamheten omfattar en mängd olika områden med koppling till transportsektorn varav ett är trafikanalys, vilket är det område som detta examensarbete kan placeras under (VTI, 2021).

Då det främst är VTI som är verksamma inom trafikanalysområdet i Sverige är även en betydande del av referenserna som använts i det här arbetet utgivna av VTI. Det kan finnas en svaghet i detta som är viktig att belysa – en snävare bredd på källorna kan leda till att teoretiska utgångspunkter hos artikelförfattarna påverkar innehållet i den här studien. Med

detta sagt ska det dock poängteras att VTI är ett forskningsinstitut som aktivt arbetar med att upprätthålla en högkvalitativ objektiv forskning.

1.6 Rapportstruktur

I kapitel 2 beskrivs trafiksimulering generellt, både vad metoden har för användningsområden och hur olika trafiksimuleringsmodeller som ryms under paraplybegreppet trafiksimulering kan kategoriseras.

Kapitel 3 innehåller en redogörelse för 2+1-vägar och sättet som vägtypen särskiljer sig vad gäller förarbeteendet.

Det följande kapitlet, kapitel 4, sammanfattar arbetsprocessen i den här studien, med andra ord hur trafiksimuleringsupplägget ser ut.

Under kapitel 5 beskrivs de två programvarorna som utgör grunden för jämförelsen i studien. Fokus ligger här på hur förarbeteendet kopplat till 2+1-vägar modelleras i de båda programvarorna.

Kapitel 6, 7 och 8 utgör det huvudsakliga resultatet i studien. Delarna är i hög grad kopplade till varandra i den mening att resultaten från föregående delar påverkar innehållet i efterliggande delar. Löpande diskussion av resultaten sker även under dessa avsnitt.

I kapitel 9 sammanfattas och diskuteras rapportens slutsatser.

2. Trafiksimulering

Det finns en mängd olika analysmetoder för att studera ett dynamiskt system. Ett sätt är att simulera systemet och därigenom bilda sig en uppfattning om systemets dynamiska karaktär, hur systemets olika komponenter interagerar och vilka egenskaper som detta ger upphov till hos systemet. För att studera ett trafiksystems dynamik och förändring över tid är simulering det främsta verktyget (Olstam, 2009, s. 5).

För att kunna simulera trafik krävs det att en simuleringsmodell etableras, där modellen består av en matematisk representation av det dynamiska systemet där tid är den oberoende variabeln. Simuleringsmodellen kan i sin tur antingen uppdateras utifrån bestämda tidsintervall eller utifrån specificerade händelser. Uppdatering via förbestämda tidsintervall lämpar sig bättre då trafiksystemet ständigt ändrar sitt tillstånd och där de ingående komponenterna är stora till antalet. Då de flesta trafiksystem har dessa egenskaper är simuleringsmodeller vars uppdatering baseras på tid överlägset vanligast idag. För att fånga trafikens slumpmässighet och osäkerhet kan stokastiska simuleringsmodeller användas (Tapani, 2005, s. 5).

2.1 Användning

Trafiksimulering möjliggör undersökning av trafikeffekter där de analytiska metoderna visar upp svagheter. Å ena sidan ger det mer analytiska tillvägagångssättet snabba och aggregerade resultat, framförallt när det kommer till kapacitet och framkomlighet såsom restidseffekter. Å andra sidan klarar de inte av att fånga in systemeffekter för ett mer komplext trafiksystem såsom den stokastiska trafiksimuleringen gör. Modeller över olika trafiksituationer kan byggas upp med hjälp av verkliga trafikdata. Därmed kan verkliga trafiksituationer simuleras och testas genom att den stokastiska modellen körs tillräckligt många gånger med olika slumpfrön. På så vis säkerställs det att observerade skillnader är faktiska skillnader och inte orsakade av slumpen. Trafiksimuleringen har sin styrka i att på ett bättre sätt analysera och utvärdera dynamiken i olika trafiksituationer, såsom hur köer och trafikstockning utvecklas, men har till skillnad från analytiska metoder svårare att utvärdera kapacitetseffekter. Kapacitetseffekter kan visserligen studeras, men får då snarare uppskattas genom mätning. En trafiksimuleringsmodell ger även bättre möjlighet att modellera speciella utformningar av vägar och korsningar (Bång m.fl., 2014, s. 6).

Några fördelar och nackdelar med att använda trafiksimulering för studie av trafik i jämförelse med en analytisk metod är följande:

Fördelar

- Trafiksystemets stokastiska natur fångas in på ett bättre sätt
- Bättre på att modellera olika utformningar av vägar och korsningar
- Trafikstyrda signaler beskrivs på ett bättre sätt
- Resultaten kan enklare visualiseras

Nackdelar

- Tidskrävande att bygga modellen samt kalibrera och validera den
- Tidskrävande att köra simuleringar och analysera utdata
- Kräver mer data – både för modellbyggandet och för kalibrering och validering
- Kan vara mer tidskrävande att jämföra olika utformningar av vägar med trafiksimulering

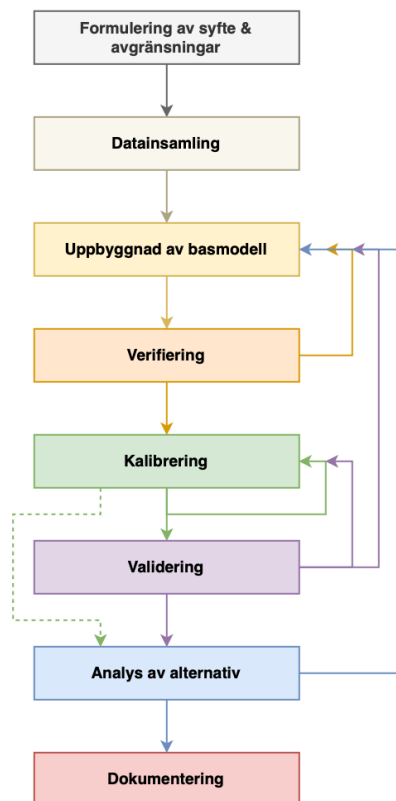
2.2 Kategorisering av trafiksimuleringsmodeller

Ett konventionellt sätt att beskriva trafiksimuleringsmodeller är utifrån vilken detaljnivå de representerar trafikflödet. Makroskopiska trafiksimuleringsmodeller beskriver trafikflödet utifrån medelhastighet, flöde och densitet. Dessa modeller förhåller sig därmed med ett helikopterperspektiv till trafikflödet och lämpar sig därför främst till studier av stora nätverk där fokus inte ligger på individuella fordon påverkan. Mikroskopiska trafiksimuleringsmodeller bygger på en mer detaljrik beskrivning av individuella fordon och deras interaktion med varandra (Tapani, 2005, s. 6). Dessa simuleringsmodeller är nästan alltid stokastiska (Bång m.fl., 2014, s. 13). Mikroskopiska modeller är mer indatakrävande på grund av den mer detaljrika beskrivningen av trafikinätet, detta gör att mikroskopiska modeller är mer lämpade för simuleringar av storleksmässigt mindre nätverk. Mikroskopisk simulering är ofta även en mer lämplig metod för att i detalj studera hur vävningssträckor fungerar, det vill säga sträckorna där fordon ofta byter körfält (Bång m.fl., s. 64).

Då mikroskopiska modeller baseras på en hög detaljrikedom kommer olika vägtyper att ställa varierande krav på modellen i fråga. En landsväg kommer exempelvis att ställa helt andra krav på modellen än vad en motorväg kommer göra. Det som ger upphov till den här variationen är det faktum att fordon både interagerar med varandra och med infrastrukturen på vitt skilda sätt beroende på vägtypen. Exempelvis behöver inte ett fordon som vill köra om på en motorväg förhålla sig till den mötande trafiken, något som ett fordon på en landsväg behöver göra. Modeller som beskriver trafik på landsvägar behöver i större utsträckning ta hänsyn till interaktionen mellan fordon och infrastruktur då kurvatur, lutning och vägbredd i större utsträckning än på andra vägtyper påverkar vilken hastighet förare vill köra i. Fordonsinteraktionen är dock fortfarande en fundamental del för trafiksimulering av landsvägar, speciellt vid omkörningar (Tapani, 2005, s. 6).

2.3 Riktlinjer för tillämpning av trafiksimulering

Detta avsnitt redogör för hur trafiksimulering bör tillämpas, och är till största del baserat på *Handbok för kapacitetsanalys med hjälp av simulering* (Bång m.fl., 2014) som är en handbok sammanställd av flera författare verksamma inom området, på uppdrag av Trafikverket. Denna handbok redogör bland annat för en generell metodbeskrivning och rekommenderad arbetsprocess för en studie med mikroskopisk trafiksimulering. I det fall då en trafiksimuleringsstudie avviker från denna rekommenderade arbetsprocess, är det viktigt att detta dokumenteras – både själva avvikelserna och hur resultatet påverkas av det. Vidare är handboken inte anknuten till någon specifik programvara för trafiksimulering. (Bång m.fl., 2014 s. 11)



Figur 1. Rekommenderad arbetsprocess för en trafiksimuleringsstudie

De olika stegen för den rekommenderade arbetsprocessen synliggörs i flödesschemat i figur 1. Nedan redogörs det kort för vad samtliga steg handlar om, vilket syftar till att ge förståelse för hur simuleringsstudien som presenteras i denna rapport genomförts och vilka steg som varit avvikande.

- **Formulering av syfte & avgränsningar** – Syftar till att definiera vilket typ av trafiksystem som är fokus för studien, samt vilka utformningar och trafikefterfrågan systemet har. Vidare bestäms vilken typ av trafiksimuleringsmodell som ska användas – mikroskopisk, makroskopisk eller mesoskopisk (kombination av de första två)
- **Datainsamling** – Insamling av detaljerad information om det valda trafiksystemet och dess karakteristika. Det finns även ett behov av verkliga mätdata för att kunna genomföra stegen *Kalibrering* och *Validering*.
- **Uppbyggnad av basmodell** – Den första representationen av modellen i vald programvara vilket inkluderar inkodning av trafiknätet (vägar, korsningar, o.s.v.), trafikstyrning och hur trafikefterfrågan ser ut.
- **Verifiering** – En kontroll av den skapade basmodellen så att den är korrekt konstruerad och fungerar som det är avsett.
- **Kalibrering** – Justering av basmodellens parametrar för att få så god överensstämmelse med det verkliga trafiksystemet som möjligt. Detta är en iterativ process där simuleringsresultat av olika justerade parametrar jämförs mot mätdata från trafiksystemet som studeras.
- **Validering** – För att säkerställa att den kalibrerade modellen är representativ används valideringsdata för att kontrollera att modellen presterar liknande som för

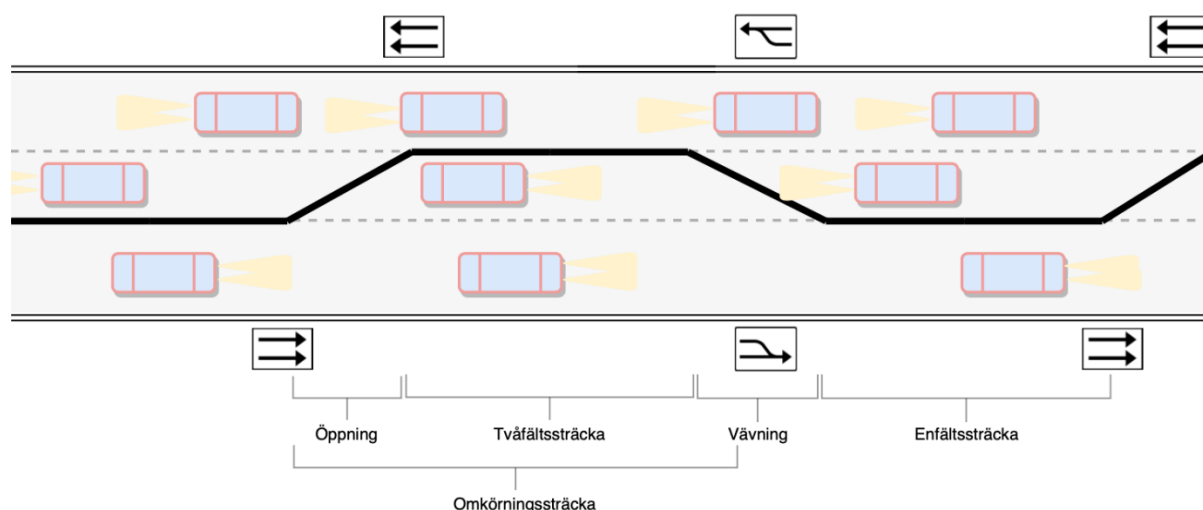
kalibreringsdata. Om detta ger upphov till alltför stora skillnader kan ett eller flera tidigare steg i arbetsprocessen behöva upprepas.

- **Analys av alternativ** – I detta steg är trafiksimuleringsmodellen redo att användas för analys av det som trafiksimuleringsstudiens syftar till att studera, exempelvis olika utformningar av trafiksystemet och dess trafikefterfrågan.
- **Dokumentering** – Handlar kortfattat om att sammanställa studiens resultat och dokumentera allt i en slutgiltig rapport.

3. Mötesfria 2+1-vägar

En 2+1-väg är en vägtyp där trafiken är mötteseparerad, vilket innebär att riktningarna är separerade med omkörningsförbud genom antingen heldragen linje eller mitträcke. 2+1-vägar är istället utrustade med omkörningsfält som växelvis skiftar mellan färdriktningarna. När det finns en fysisk barriär mellan riktningarna så som ett mitträcke betecknas vägtypen även mötesfri landsväg eller mötesfri motortrafikled. Denna vägtyp kan ses som ett alternativ mellan en landsväg med ett körfält i vardera riktningen och en ”vanlig” motorväg med två körfält i vardera riktningen. Detta är både ett mer ekonomiskt alternativ till en vanlig motorväg, samt ett alternativ som är mer säkert och med bättre framkomlighet än en vanlig ej mötteseparerad landsväg med endast ett körfält i vardera riktningen (Romana m.fl., 2018, s. 1).

Vanligtvis är andelen omkörbar längd på en 2+1-väg mellan 15–40 % av den totala vägsträckan. Längden på själva omkörningsfälten bör enligt Trafikverket (2021, s. 43–45) konstrueras med en längd mellan 1000–2500 meter. Andelen omkörbar längd och framkomligheten på en 2+1-väg står i korrelation till varandra. En högre andel omkörbar längd ger större utrymme för omkörningar, vilket i sin tur leder till mindre köbildning. Det är däremot inte bara den omkörningsbara längden som har en inverkan på köbildningen, utan utformningen och lokaliseringen av själva omkörningsfälten påverkar även detta. Det finns för- och nackdelar med både långa och korta omkörningsfält, då fältens längd blir en avvägning mellan antalet tillfällen en omkörning kan göras och storleken på det tidsfönster som omkörningen kan göras på. Den vanligast förekommande längden på omkörningsfälten är enligt Bernhardsson och Olstam (2017a, s. 23) 1400 meter och att de utgör 40 % av den totala vägsträckan. I omkörningssträckan ingår hela sträckan för öppningen (där ett körfält övergår till två stycken körfält) samt 50 meter av de sista 150 metrarna som utgör vävningssträckan (där antalet körfält övergår från två till ett). Detta illustreras i figur 2.



Figur 2. Exemplifiering av en 2+1-väg

3.1 Förarbeteende

Den karaktäristiska utformningen av 2+1-vägar, där möjligheten till omkörning uppkommer periodiskt, ger även upphov till ett speciellt förarbeteende. Förare på en 2+1-väg är i större mån benägna att jaga ifatt framförvarande fordon för att hinna genomföra en omkörning under den kommande omkörningssträckan. Ett sådant beteende har inte observerats för andra vägtyper där omkörningstillfället inte förekommer periodiskt (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 13).

Att omkörningar endast är möjliga under begränsade områden leder även till en varierad medelhastighet över vägsträckan. Under enfältssträckan kommer medelhastigheten att vara lägre än på omkörningssträckorna då snabbare fordon kommer ikapp och begränsas av långsammare fordon. Fordon med ett lägre hastighetsanspråk, exempelvis bussar och lastbilar, påverkas inte i samma utsträckning eftersom deras önskade hastighet i högre grad kan hållas. På omkörningssträckan är medelhastigheten högre eftersom fordon återigen kan köra om. Därefter minskar medelhastigheten igen i slutet av omkörningssträckan då fordon från omkörningsfältet behöver väva tillbaka in i det högra körfältet. Medelhastigheten i körfältet för omkörning har dessutom observerats vara högre än hastighetsbegränsningen på vägen (Bergh m.fl., 2016, s. 336–338).

En annan del av förarbeteendet där 2+1-vägar särskiljer sig från andra vägtyper är beteendet under vävningen. Till skillnad från motorvägar där vävning sker vid påfartsramper eller då antalet körfält minskar är vävningen på en 2+1-väg förknippad med en genomförd omkörning. Det här innebär att förare i omkörningsfältet inte är intresserade av att väva in bakom varken det omkörda fordonet eller fordonet som de ligger jämsides med. Åtminstone om fordonet inte behöver avbryta sin omkörning för att undvika en olycka eller att säkerhetsmarginalerna upplevs som för små (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 22). Det här innebär att fordon är mer benägna att hålla sig kvar i det upphörande körfältet på en 2+1-väg jämfört med en påfartsramp på en motorväg eller en avsmalning från två till ett körfält i stadstrafik.

Jämfört med vägtyper där omkörningar sker i det mötande körfältet tar en omkörning längre tid på en 2+1-väg. Omkörningen sker därmed inte under lika skyndsamma förhållanden, som på mer traditionella landsvägar där trafiken inte är mötteseparerad. En annan tydlig skillnad jämfört med andra vägtyper är att valen som en förare behöver ta till viss del minskar, eller åtminstone koncentreras till tillfällen som återkommer med jämna intervall (Kaistinen m.fl., 2004, s. 77). En förare behöver därav inte ställa sig frågan – ”Ska jag köra om eller inte?” – under hela vägsträckan, utan endast inför och under tvåfälssträckan av 2+1-vägen.

3.2 Nyckelkomponenter för 2+1-vägar

Det speciella förarbeteendet på 2+1-vägar kan sammanfattas med följande två punkter:

- En större benägenhet att jaga ifatt långsammare framförvarande fordon för att senare kunna köra om under omkörningssträckan. Detta innebär att fordon har en högre önskad hastighet innan och under omkörningar jämfört med körning på andra flerfältiga vägtyper.

- Ett vävningsbeteende där fordon har en större benägenhet att väva in framför än bakom parallella fordon. Detta innebär även att fordon i högre utsträckning ligger kvar i omkörningsfältet om möjligheten att köra om fler fordon finns.

För att kunna studera hur väl SUMO kan simulera 2+1-vägar behöver ett antal jämförelsemått, som nämnt i avsnitt 1.3, konstrueras så att det speciella förarbeteendet kan analyseras. Jämförelsemåtten behöver därmed beakta både fordonens hastighet på olika delar av vägsträckan och även positionerna där fordonen byter körfält. Om SUMO inte kan beskriva det ovan beskrivna förarbeteendet på 2+1-vägar bör det kunna observeras i jämförelsemåtten.

4. Trafiksimuleringsupplägg

Trafiksimuleringsstudien i detta arbete skiljer sig till viss del från den rekommenderade tillämpningsprocessen för trafiksimulering beskriven i avsnitt 2.3. Utgångspunkten har dock varit detta ramverk, men vissa anpassningar har gjorts eftersom studien inte avser simulering av en specifik verklig vägsträcka.

Syftet med simuleringen är att studera hur väl programvaran SUMO kan modellera trafikföringen på 2+1-vägar, och för att ta reda på detta jämförs trafiksimuleringsmodellerna i SUMO och RuTSim. Alla data som tas i beaktning är i den här studien hämtad från simuleringar av Bernhardsson och Olstams (2017a) modell, vilken därmed kan ses som virtuell data från en annan simuleringsmodell. I och med studiens syfte, samt den data som finns att tillgå är stegen *Uppbyggnad av basmodell*, *Verifiering* och *Kalibrering* möjliga att genomföra helt likt den rekommenderade arbetsprocessen i figur 1. Med utgångspunkt i denna rekommenderade arbetsprocess, de beskrivna stegen ovan och rapportens problemformulering, har författarna valt att definiera en egen arbetsprocess som blir det ramverk som simuleringsstudien baseras på. Dessa olika steg presenteras i avsnitten 4.1–4.3.

4.1 Basmodellen: uppbyggnad och verifiering

Detta steg bygger i stora drag på beskrivningen från *Handbok för kapacitetsanalys med hjälp av simulering* (Bång m.fl., 2014). En basmodell byggs första upp i SUMO utifrån trafiksystemet i RuTSim och dess karakteristika. Basmodellen är en första representation av trafiknätet och den indata som beskriver trafikefterfrågan, trafikföringen och förarbeteendet (Bång m.fl., 2014). Basmodellen kan ses som det första försöket att beskriva verklig trafik i form av en simuleringsmodell. Bång m.fl. (2014, s. 26) liknar det hela med uppbyggnaden av ett hus, där man startar med grunden och jobbar sig uppåt. På ett liknande sätt kan uppbyggnaden av en simuleringsmodell ses – först fastställs nätet i form av vägar, korsningar och dess geometri och därefter adderas trafikstyrning, trafikefterfrågan och förarbeteende.

Det första steget i arbetet med basmodellen kan beskrivas som ett första försök till att efterlikna trafiksimuleringsmodellen i RuTSim och dess prestation.

Trafiksimuleringsmodellen i SUMO modelleras därmed med det vägnät som beskriver den virtuella 2+1-sträckan simulerad i RuTSim, samt initiala indata som beskriver trafikefterfrågan, trafikföringen och förarbeteendet.

Nästa steg är att verifiera den uppbyggda basmodellen för att säkerställa att den är korrekt konstruerad och inte innehåller logiska fel. Även detta steg följer Bång m.fl. (2014) till största del, men det finns vissa avvikelser som är värda att notera. Verifieringen har enligt ramverket till syfte att kontrollera huruvida den valda programvaran är lämplig. I detta fall är SUMO det valda simuleringsverktyget, vilken basmodellen är uppbyggd i. Detta simuleringsverktyg valdes som studieobjekt till denna studie just för att det inte finns dokumenterat att den kan modellera 2+1-vägar, vilket medföljer att denna del av verifieringen inte kan säkerställa huruvida simuleringsverktyget är lämpligt eller ej. Utöver denna avvikelse följer verifieringen av simuleringen samma steg som för den rekommenderade arbetsprocessen.

4.2 Parameterjustering av basmodellen

Det här är ett av de två steg som kan liknas vid en slags kalibrering, utifrån hur Bång m.fl. (2014) definierar det steget. Ett första försök för att få basmodellen att modellera och avbilda den virtuella 2+1-vägen på ett representativt sätt är via parameterjustering. Detta innebär att parametrarna till den uppbyggda basmodellen i SUMO justeras så att överensstämmelsen mot modellen i RuTSim blir så stor som möjligt. Eftersom SUMO inte tidigare dokumenterats ha använts för att simulera 2+1-vägar, undersöks alla relevanta parametrar och justeras vid behov. Arbetet är iterativt där de olika delarna utgörs av justeringar av parametrar, simulering av modellen och analys av jämförelsemått.

4.3 Källkodsmodifiering

I detta steg undersöks det hur den öppna källkoden för programvaran SUMO kan modifieras för att med bättre överensstämmelse kunna avbilda den virtuella 2+1-sträckan i RuTSim. Det betyder att en mindre modifiering av förarbeteendet i SUMO i justeras. Vidare sker löpande jämförelse mot relevanta jämförelsemått allteftersom modifieringar görs. Parameterjustering för den modifierade modellen genomförs även i detta skede, i likhet med det tidigare avsnittet (4.2).

5. Programvaror för trafiksimulering: RuTSim & SUMO

I detta avsnitt presenteras programvarorna RuTSim och SUMO mer djupgående. Detta avsnitt ska vidare belysa hur uppbyggnaden av de två programvarorna ser ut och skiljer sig åt för att på så vis kunna identifiera de potentiella möjligheterna och svårigheterna som finns för SUMO att kunna återspegla trafiken på 2+1-vägar. Syftet är även att öka läsarens förståelse för hur de olika trafiksimuleringsmodellerna fungerar i praktiken.

Utgångspunkten för jämförelsen av de två trafiksimuleringsmodellerna skapade i RuTSim och SUMO är hur deras olika delmodeller är uppbyggda, vilket sätter grunden för hur trafikföringen karaktäriseras och hur fordonen interagerar med varandra. Delmodellerna styr hur fordonen följer varandra och därmed anpassar sin hastighet (accelerationsmodell), samt körfältsbyten och omkörning (körfältsbytesmodell).

5.1 RuTSim

RuTSim är en programvara framtagen av Statens väg- och transportforskningsinstitut (VTI) för simulering av landsvägstrafik, bland annat för traditionella landsvägar med två körfält men även för mötesfria landsvägar med växelvisa omkörningsfält, så kallade 2+1-vägar (Olstam, 2020). Programvaran kallades ursprungligen VTISim och togs fram av Brodin och Carlsson (1986) och har sedan dess vidareutvecklats till sin nuvarande form som kan hantera fler trafikscenarier (Tapani, 2005).

Modellen i RuTSim är en så kallad mikroskopisk trafiksimuleringsmodell vilket tillåter en hög detaljrikedom då individuella fordon och deras interaktioner tas i beaktning vid simulering (Olstam, 2009, s. 5). RuTSim simulerar endast en vägsträcka i taget, vilket bidrar till att större nätverk av landsvägar inte kan studeras. Den enskilda vägsträckan kan dock påverkas av yttre faktorer såsom påfarter, avfarter och korsningar där fordon kan tillkomma eller lämna simuleringen.

Trafiksimuleringsmodellen i RuTSim är den enda i sitt slag som är justerad efter mätdata i en svensk kontext, vilket gör den unik och samtidigt specifik i hur den är uppbyggd. Exempelvis är de parametrar som styr modellens mekanismer för omkörning grundade på omfattande data och bör inte justeras (Bång m.fl., 2014, s. 77). RuTSim har använts inom olika projekt inom forskning men också för studie av landsvägsutformningar. En landsvägsutformning kan exempelvis vara då en traditionell tvåfältsvägs landsväg byggs om till att bli en 2+1-väg (Olstam, 2020).

5.2 SUMO

SUMO är en öppen-källkodsmodell för trafiksimulering, framtagen och utvecklad av Institute of Transportation Research vid tyska Aerospace Center (DLR) sedan år 2000 (Krajzewicz m.fl., 2006, s. 1). Att SUMO är en öppen-källkodsmodell betyder att programvaran är gratis och tillgänglig för vem som helst att inspektera och modifiera (Cambridge Dictionary, uå). Detta bidrar till ökat samarbete och stöttning inom trafikforskarssamhället genom att det möjliggör transparens och gemensam delning av olika projekt inom trafiksimulering (Krajzewicz m.fl., 2006, s. 1).

Liksom RuTSim är SUMO en så kallad mikroskopisk trafiksimuleringsmodell, som dock kan hantera stora trafiknätverk, vilket möjliggör en bred användning och modellering av en rad olika trafikscenarier som kan uppstå främst för stads- och motorvägstrafik (Alvarez m.fl., 2018). SUMO har främst använts inom större simuleringsprojekt av större stadsområden för att undersöka trafikledning samt trafikprognoser. Modellen är kapabel till att simulera ungefär upp till 200 000 stycken fordon samtidigt, tillsammans med trafiknätets tillhörande trafiksignaler, hinder och riktlinjer för exempelvis körfältsbyten och trafikregler (Krajewicz m.fl., 2006, s. 2). Programvaran har även använts inom andra applikationer, då den har visat sig vara rätt enkel att modifiera och utöka (Krajewicz m.fl., 2006, s. 5).

5.3 Indata

Det krävs olika typer av trafiksimuleringsprogramvaror för att kunna återspegla alla de möjliga kombinationer av vägar och trafiksituationer som finns. Trafiken som i fråga ska simuleras karaktäriseras bland annat av hur vägnätet är utformat i form utav antal körfält, trafiksignaler, på- och avfarter, men även av andra faktorer såsom trafikdensitet, hastighetsanspråk och trafikflöde. Se tabell 1 för generella indata som krävs vid trafiksimuleringsstudier (Bergqvist & Runn, 2014, s. 37).

Ur ett mikroskopiskt perspektiv finns det ytterligare faktorer kopplade till dels fordonets egenskaper men även till hur föraren påverkar trafikföringen. Förarens olika typer av beteenden i trafiken modelleras med hjälp av matematiska modeller och kan ses som underliggande delmodeller till den övergripande trafiksimuleringsmodellen. Modellering av det mänskliga beteendet är en viktig del för att skapa realistiska och användbara modeller för trafiksimulering. (Olstam, 2009, s. 8)

Tabell 1. Generella indata för trafiksimuleringsstudier (Bergqvist & Runn, 2014, s. 37)

Datatyp	Databehov	Dataexempel
Vägnät	Länklängder	-
	Antal körfält	-
	Hastighetsgränser	-
	Vävningssträckor	-
Trafikdata	Trafikvolym	Trafikflöden
	Fordonssammansättning	Andel av olika fordonstyper
Förar- och fordonsegenskaper	Förarbeteende	Accepterade tidsluckor, önskad hastighet
	Fordonsegenskaper	Längd, bredd, maximal acceleration/retardation
Data för kalibrering och validering	Hastighet	Punkt- och sträckhastigheter
	Fördröjning	Fördröjningar per länk, fordon, körfält
	Körfältsfördelning	Andel fordon per fordonstyp och körfält

5.3.1 Förarbeteendemodeller för 2+1-vägar

Eftersom både SUMO och RuTSim är mikroskopiska trafiksimuleringsverktyg betyder det att fordonsinteraktionen styrs av olika delmodeller, så kallade förarbeteendemodeller. Det finns olika typer av förarbeteenden som anses relevanta att använda vid modellering av olika trafiksituationer; en trafiksimuleringsmodell för landsvägar kräver exempelvis inte samma typer av förarbeteendemodeller som en simuleringsmodell för motorvägar. Vidare finns det även olika typer av modeller för ett givet förarbeteende, som har utvecklats med tiden och är anpassade efter olika trafiksituationer.

En typ av förarbeteendemodell som dock behöver inkluderas i alla typer av trafiksimuleringar är en modell som styr fordonens följarbeteende och hastighetsanpassning, vilket kallas för accelerationsmodell. Det engelska namnet på denna modell är *car-following*-modell (CF). En annan typ av förarbeteendemodell är körfältsbytesmodellen, som hanterar körfältsbyten och är viktiga för både stads- och motorvägstrafik men även för trafik på landsväg. Även de har en engelsk översättning; *lane-changing*-modell (LC).

Modellerna för de olika förarbeteendena beskrivs i avsnitt 5.4.1, 5.5.3 och 5.5.4 för RuTSim respektive avsnitt 5.4.2 och 5.5.5 för SUMO. För protokollet, finns det även ytterligare delmodeller som hanterar andra förarbeteenden som avståndacceptans, vävning av påfarter och hastighetsanpassning, men de täcks inte i denna rapport (Olstam, 2009, s. 6).

Förarbeteendemodellerna liknar en funktion som använder nuvarande trafiksituation som input och beroende på vad den hanterar ger den output på hur individuella fordon ska agera i

nästa simuleringssteg, exempelvis vilken acceleration fordonet ska tillämpa (Olstam, 2009, s. 1). De olika trafiksimuleringsmodellerna har vardera en uppsättning parametrar kopplade till modellerna som styr CF- och LC-beteendet. Olika värden på parametrarna ger olika typ av indata till modellerna, se tabell 1 för exempel på data som kan varieras.

5.4 Accelerationsmodell

Förarbeteendet som berör hur fordonen anpassar sin hastighet, som kommer kallas CF från och med nu, beskriver hur fordon på samma väg tenderar att följa efter varandra på olika sätt beroende på situation och vägnät. Ett fordon definieras följa det framförvarande fordonet om det blir begränsat på så vis att en kollision skulle uppstå om fordonet skulle köra i sin önskade hastighet. Ett fordon som inte är begränsat kallas för ett fritt fordon som kan köra i sin önskade hastighet. En CF-modell beskriver följarfordonets beteende som funktionen av hur ledarfordonets rörelse ter sig, alltså hur fordonen interagerar med varandra. CF-modellen kommer i sin tur påverka hur enskilda fordons acceleration och retardation varierar under simuleringens gång. (Olstam, 2009)

En CF-modell tar avstamp i antagandet att en hastighetsförändring endast genomförs om fordonet i fråga inte kör i sin önskade hastighet, givet att fordonet inte är hindrat. Sedan 1950-talet har flertalet olika typer av CF-modeller utvecklats och därav finns det flera tänkbara modeller för att kunna beskriva CF-beteendet. Tapani (2005) menar att CF-modellen bör väljas utifrån den tilltänkta applikationen eftersom varje modell har sina respektive för- och nackdelar. Vidare ställs det högre krav på CF-modeller som ska användas för mikroskopisk trafiksimulering än vid makroskopisk dito, då enskilda värden för fordonen studeras (Tapani, 2005 s. 11).

Det finns CF-modeller som endast beskriver förarbeteendet i situationer då fordonet följer ett annat fordon, och det finns även mer kompletta CF-modeller som även modellerar alla möjliga situationer ett fordon kan befinna sig i. De flesta CF-modellerna beskriver CF-beteendet på tre olika sätt:

- För fordon som kör i sin önskade hastighet (fria fordon)
- För fordon som följer ett annat fordon på ett normalt sätt
- För fordon som måste nödbromsa bakom framförvarande fordon (Olstam, 2009, s. 9)

De flesta CF-modellerna tar endast hänsyn till det närmaste framförvarande fordonet, dock har det visats att CF-modeller som tar hänsyn till fler än ett framförvarande fordon på ett bättre sätt speglar verkliga data (Olstam, 2009, s. 9).

5.4.1 Accelerationsmodell i RuTSim

RuTSim modellerar CF-beteendet med hjälp av den så kallade *Intelligent Driver Model* (IDM), vilket är en modell som baseras på att ett säkerhetsavstånd till framförvarande fordon upprätthålls. Om CF-modellen är korrekt kalibrerad kommer följarfordonets hastighet att anpassas med hjälp av tillräckligt stark acceleration eller retardation, så att säkerhetsavståndet bibehålls. (Olstam & Tapani, 2010)

IDM-modellen beskriver ett fordons acceleration a beskrivs som,

$$a = a^{free}(v) + a^{int}(s, v, \Delta v) \quad (1)$$

där a^{free} är fordonets fria acceleration som bestäms dels av fordonets önskade hastighet, men också av dess accelerationsförmåga, och a^{int} är fordonets acceleration vid interaktion med framförvarande fordon, som ska se till att ett säkerhetsavstånd upprätthålls. För följarfordonet är $s, v, \Delta v$ avstånd till framförvarande fordon, fordonets hastighet samt med vilken hastighet den närmar sig framförvarande fordon (Olstam & Tapani, 2010, s. 3). Dessa termer, a^{free} och a^{int} , finns mer detaljerat beskrivna som polynomfunktioner i Olstam och Tapani (2010).

I trafiksimuleringsmodellen i Bernhardsson och Olstam (2017a) används en modifierad variant av IDM-modellen, vilken kallas *Enhanced IDM*. Relationen för hur fordonets acceleration a modelleras är samma som i (1). Den modifierade IDM-modellen ger bland annat bättre resultat i jämförelsen av hastighetsflödessambanden mellan simuleringarna och studerade trafikdata för svenska förhållanden (Olstam & Tapani, 2010, s. 1).

5.4.2 Accelerationsmodell i SUMO

Den CF-modell som används som standard för trafiksimuleringsmodellen i SUMO kallas för *Krauss* och är utvecklad av Stefan Krauss. Det finns olika versioner av *Krauss*-modellen att tillämpa i SUMO, då modellerna med tiden har uppdaterats med förbättringar och för olika trafiksituationer. Den som används som standard är en något modifierad modell av den CF-modell som presenteras i Krauss (1998), och baseras på idén att fordon ska kunna färdas i sin önskade hastighet så länge som säkerheten på vägen upprätthålls, alltså att fordonen ska ha möjlighet att undvika kollision vid hastighetsretardation av ledarfordonet (SUMO, 2021).

CF-modellen i Krauss (1998) modellerar fordonens säkra hastighet v_{safe} enligt,

$$v_{safe} = v_l(t) + \frac{g(t) - v_l(t)t_r}{\frac{v_l(t) + v_f(t)}{2b} + t_r} \quad (2)$$

där $v_l(t)$ är det framförvarande ("leading") fordonets hastighet, $g(t)$ är avståndet till det framförvarande fordonet, t_r är den följande förarens reaktionstid, $v_f(t)$ är det följande fordonets hastighet, och b är det följande fordonets maximala retardation (i m/s^2) (Song m.fl., 2015, s. 4). Fordonets önskade hastighet v_{des} beräknas sedan utifrån,

$$v_{des} = \min [v_{max}, v + at, v_{safe}] \quad (3)$$

där v_{max} är vägens maximala hastighet och $v + at$ beskriver det följande fordonets hastighet utifrån dess maximala acceleration a (Song m.fl., 2015, s. 4).

De förändringar till den ursprungliga Krauss-modellen, som finns implementerade i den nuvarande standardmodellen i SUMO är följande:

- Modellen kan hantera olika funktioner för hastighetssänkning bland fordonen på ett säkrare sätt än vad modellen i Krauss (1998) kunde.

- Dynamiken för den säkra hastigheten i (2) beskrivs annorlunda då den är anpassad till att beskriva mekaniken bakom fordonens position på ett annat sätt. *Ballistik*-position används istället för *Euler*-position. För en mer detaljerad beskrivning kring detta, se SUMO (2021).

5.5 Körfältsbytesmodell

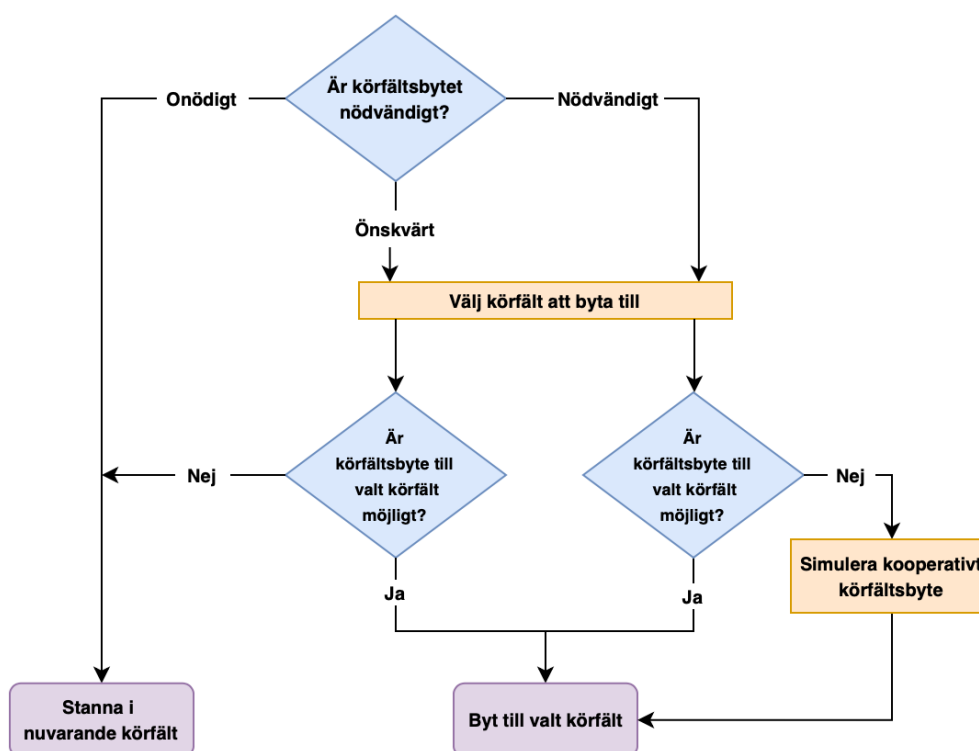
I detta avsnitt ska det beskrivas hur en körfältsbytesmodell generellt fungerar. Både för att modellera körfältsbyten, men även omkörningar. Det kan emellertid vara svårt att dra en tydlig gräns för vad ett körfältsbyte är, samt vad en omkörning är, och för vissa trafiksimuleringsmodeller delas dessa upp i två separata förarbeteendemodeller. Detta är fallet för RuTSim vid modellering av 2+1-vägar, då det är viktigt att modellera omkörningsbeteendet för sig, vilket inte bara hanterar körfältsbytet utan även hela omkörningen (Olstam, 2009, s. 8–9).

5.5.1 Körfältsbyten

Förarbeteendet som hanterar körfältsbyten (LC) beskriver scenarier kopplade till att genomföra körfältsbyten eller ej på flerfältiga vägar. Dessa typer av modeller är som tidigare nämnt avgörande för att modellera trafikföringen på stads- och motorvägar. År 1986 presenterade Gipps tre frågor föraren bör ställa sig inför ett eventuellt körfältsbyte (Olstam, 2009, s. 17):

1. Är körfältsbytet nödvändigt?
2. Är körfältsbytet önskvärt?
3. Är körfältsbytet möjligt ur ett säkerhetsperspektiv?

Gipps (1986) byggde vidare upp ett ramverk som konkretiserar dessa frågor i form av ett beslutsträd, vilket har kommit att utgöra grunden för andra framtida LC-modeller. I Gipps modell från 1986 är ett körfältsbyte endast möjligt om det finns tillräckligt med utrymme i det körfält som bytet avses göras till, givet att körfältsbytet är önskvärt. Senare modeller har utökat detta för att även kunna hantera nödvändiga körfältsbyten, alltså när fordon i det andra körfältet samarbetar för att skapa utrymme för det fordon som då i detta fall, måste byta körfält. En sådan modell kan ses i figur 4 och är en modell av Hidas (2002), vilken i grund och botten bygger på Gipps (1986), vilken beskriver hur de olika beslutsstegen för ett körfältsbyte går till i simuleringen. (Olstam, 2009, s. 18)



Figur 3. Beslutsträd över olika LC-beslut av Hidas (2002)

Nödvändiga körfältsbyten innefattar bland annat att undvika körfältsblockeringar och begränsade körbanor, medan önskvärda körfältsbyten genomförs bland annat för att kunna köra i sitt hastighetsanspråk eller för att undvika körfält vid påfarter. Det som skiljer dessa två typer av körfältsbyten åt rent modelleringsmässigt är hur stor avståndssacceptansen är mellan fordon, samt hur kooperativt fordonen i motsatt körfält agerar. Bedömningen av ett nödvändigt körfältsbyte baseras således på hur fordonen interagerar, men beror även på hur den kommande rutten ser ut; förarens beslut kring körfältsbyte baseras på kommande hinder såsom korsningar, avfarter, påfarter och när körfält vävs samman (Olstam, 2009, s. 20).

Ett körfältsbyte anses säkert om utrymmet i det närliggande körfältet inte är mindre än ett kritiskt avstånd. För det fordon som ska byta körfält tas både avståndet framför och bakom i beaktning för att inte underskrida det kritiska värdet. Detta kritiska avstånd är svårt att mäta då det dels varierar mellan förare, och dels skiljer det sig mellan olika typer av körfältsbyten. Avståndet går inte heller att observera då det bara går att observera accepterade och förkastade tidsluckor. Ett tillvägagångssätt är att använda samma kritiska avstånd för alla förare, men olika kritiska avstånd för avstånden framåt och bakåt, samt för olika typer av körfältsbyten (Olstam, 2009, s. 24).

5.5.2 Omkörning

För ett fordon som kör på en tvåfältig väg separerad från mötande trafik kan omkörningar modelleras med hjälp av LC-modeller, men det är inte en tillräcklig modellering för alla vägtyper. För att kunna modellera omkörningar på exempelvis landsvägar med mötande trafik eller mötesfria 2+1-vägar, krävs en modell som tar hänsyn till hela omkörningsprocessen (Olstam, 2009, s. 25).

Möjligheten för omkörning är en viktig faktor för framkomligheten på alla typer av vägar och därför är modeller som styr detta förarbete viktiga vid mikroskopisk trafiksimulering (Tapani, 2005). På 2+1-vägar har omkörningsbeteendet stor påverkan för framkomligheten då växelvisa omkörningsfält ger fordonen olika stora tidsfönster för omkörning. Modeller för omkörningsbeteendet beskriver två saker:

- En övergripande beslutsprocess för genomförande av omkörning som kan hantera frågor såsom:
 - Är det lediga utrymmet i det andra körfältet tillräckligt stort?
 - Är föraren och dess fordon kapabel till att köra om?
 - Är föraren villig att påbörja en omkörning med utrymmet som finns i det andra körfältet? (Olstam, 2009, s. 25–26)
- Hur fordonet i fråga sedan beter sig vid själva omkörningen (Tapani, 2005)

Liksom för LC-beteendet modelleras förarens villighet till att påbörja en omkörning på någon typ av avståndsacceptansmodell, där det oftast bestäms ett kritiskt avstånd för alla förare (Olstam, 2009, s. 26). Avståndsacceptansen är svårmodellerad i och med att den är beroende av förare samt över tid och trafiksituation. Den påverkas även av vilken typ av omkörning som görs samt vilket fordon det är som körs om. Nedan följer fem stycken beskrivningar för att kunna klassificera beslutet för att köra om:

- Fordonstyp på fordonet som blir omkört – det finns en större villighet till att köra om lastbilar
- Hastighet på fordonet som körs om – detta påverkar omkörningssträckan och avståndsacceptansen
- Fordonstyp på fordonet som kör om – prestandan på omkörningsfordon påverkar
- Typ av omkörning – flygande omkörning (behöver ej accelerera upp till en högre hastighet) eller accelerera innan omkörning
- Typ av begränsning framåt på vägen – mötande fordon eller siktbegränsning

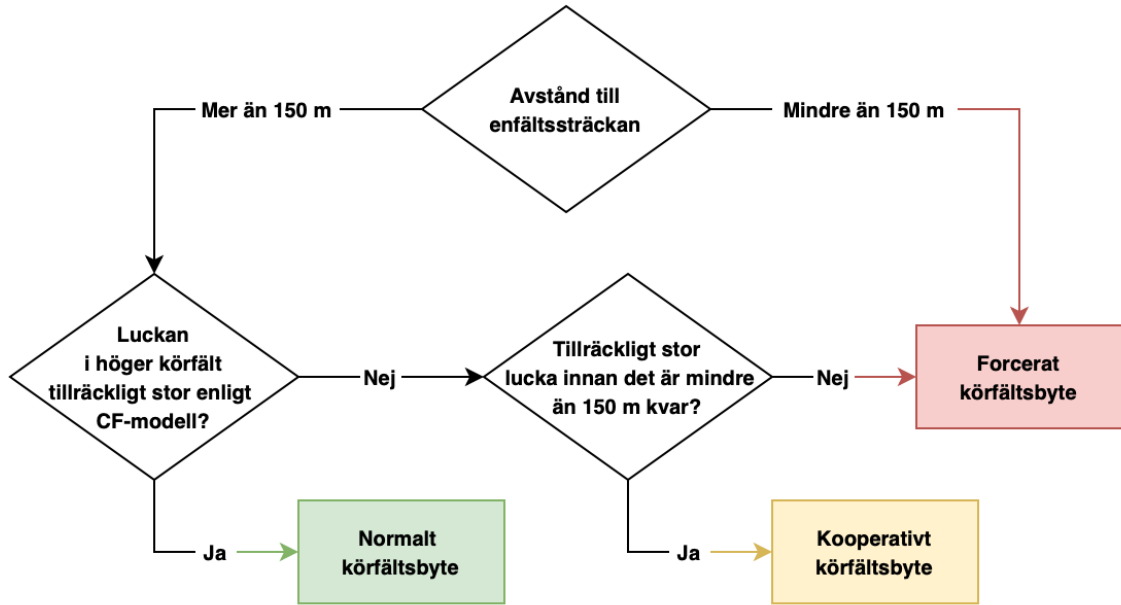
5.5.3 Körfältsbytesmodell i RuTSim

Den modell för LC-beteendet, som alltså modellerar körfältsbyten, kan i RuTSim även kallas för vävningsmodell. Körfältsbyten i RuTSim för 2+1-vägar handlar om körfältsbyten till vänster körfält för start av omkörning samt tillbakagång till höger körfält (vävning). Denna modell beskriver körfältsbyten vilket på 2+1-vägar handlar om att fånga in hur vävningen på olika sätt går till, och presenterades tidigare av Olstam och Tapani (2013) och är ursprungligen en modell av Hidas (2005).

För det specifika fallet 2+1-vägar ses alla fordon som tar sig ut i det vänstra omkörningsfältet behöva väva tillbaka till det högra körfältet någon gång, givet att det finns i alla fall en enfältssträcka kvar på den givna rutten. Det finns därmed ett behov av att definiera vilka olika situationer för sammanvävning som kan uppstå på en sträcka med omkörningsfält, vilket beskrivs som olika zoner på omkörningsfältet (Bergqvist & Runn, 2014, s. 46).

- **Zon 1:** Definierar ett avstånd som är så pass långt att sammanvävningen inte påverkas. Denna situation kan liknas vid en ”normal” omkörning, där fordonet i fråga antingen kan fortsätta köra i omkörningsfältet eller byta tillbaka till det högra körfältet.
- **Zon 2:** Definierar ett avstånd då det är 350 meter kvar till sammanvävningen.
- **Zon 3:** Definierar ett avstånd då det är 150 meter kvar till sammanvävningen.

De olika zonerna för sammanvävningarna förknippas med en viss typ av körfältsbyte; *normalt* (zon 1), *kooperativt* (zon 2) och *forcerat* (zon 3). Beroende på vilken zon som fordonet i omkörningsfältet befinner sig i, finns olika beslutssteg för vilken typ av körfältsbyte (sammanvävning) som bör göras, se figur 6 för beslutsträd.



Figur 4. LC-modell i RuTSim – beslutsträd

5.5.4 Omkörningsmodell i RuTSim

I RuTSim påverkas omkörningsbeteendet främst av hur fordonets önskade hastighet påverkas av framförvarande fordon. Skillnaden mellan följarfordonets och ledarfordonets önskade hastighet ($v_{des}^{(n+1)}$ och $v_{des}^{(n)}$) måste överstiga gränsvärdet Δv_{ovtk}^{min} för att föraren ska överväga omkörning (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 21). Detta beskrivs som,

$$v_{des}^{(n+1)} > v_{des}^{(n)} + \Delta v_{ovtk}^{min} \quad (4)$$

där förarens benägenhet att genomföra en omkörning baseras på gränsvärdet Δv_{ovtk}^{min} . Detta gränsvärde baseras på antal framförvarande personbilar, N_{pb} , inom ett siktavstånd på 500 meter, och beskrivs av,

$$\Delta v_{ovtk}^{min} = c_1^i + c_2^i \cdot N_{pb} \quad (5)$$

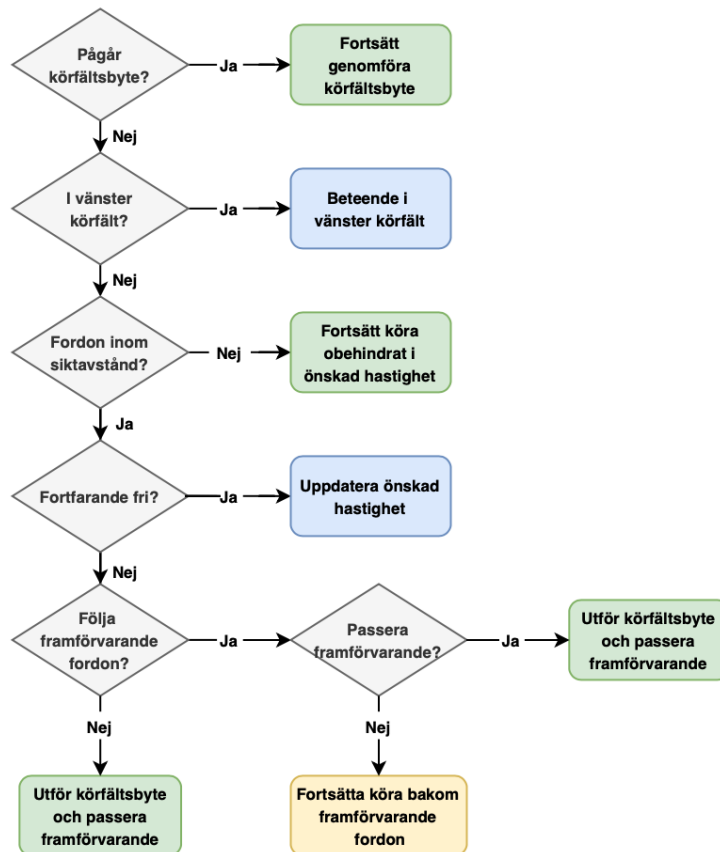
där c_1 och c_2 är två så kallade fordonstypsberoende kalibreringskonstanter. Den första konstanten står för minsta skillnad i önskad hastighet om det endast är ett framförvarande

fordon samt den andra är en addering till gränsvärdet för det antal fordon som är inom siktavståndet.

I modelleringen för omkörningsbeteendet på 2+1-vägar tas antal framförvarande fordon i beaktning på grund av att omkörningsfältet inom en översiktlig framtid kommer att vävas ihop till ett körfält. Omkörningsbenägenheten för fordon $n + 1$ minskar alltså med ett ökande antal framförvarande fordon inom siktavståndet, men är samtidigt en avvägning mot den hastighet fordon $n + 1$ önskar hålla (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 21).

Enligt Bernhardsson och Olstam (2017a) är denna omkörningsmodell en generaliserad version av den omkörningsmodell som presenteras i Tapani (2005, s. 49) där beslutet för omkörning endast baseras på att gränsvärdet Δv_{ovtk}^{min} beror av en framförvarande bil, alltså att $c_2^i = 0$. Vidare menar de att denna tidigare modell eventuellt är korrekt för omkörningsbeteende på exempelvis motorvägar, men för 2+1-vägar måste situationen på resterande omkörningssträcka också tas i beaktning (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 21).

Efter att omkörningsbeslutet är taget kommer fordonets beteende förändras då omkörningen väl ska genomföras. Detta på grund av att det karaktäristiska beteendet på 2+1-vägar är att vilja köra om innan två körfält vävs ihop till ett körfält, vilket har påvisats i studier från Sverige genom att det omkörande fordonet ökar sin hastighet (Tapani, 2005, s. 49; Carlsson & Bröde, 2003). Omkörningsmodeller i RuTSim tar detta i beaktning genom att öka den önskade hastigheten för fordon som kommer ikapp långsammare fordon. Ökningen av den önskade hastigheten är den hastighet som krävs för att omkörningsfordon ska kunna köra om, och varierar mellan intervallet 10–20 km/h (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 22). I figur 5 ses ett flödesschema för omkörningsbeteendet i RuTSim, där logiken tydliggörs.



Figur 5. Flödesschema över olika typer av beslut som görs i en omkörning

5.5.5 Körfältsbytesmodell i SUMO

I tidigare avsnittet för RuTSim:s LC-modell presenterades dels ett avsnitt för körfältsbyten och dels ett för omkörningar. För SUMO kommer endast en del att presenteras, i och med att LC-modellen modellerar både körfältsbyten och omkörningar. För att det ska bli tydligt för läsaren; ponera att ett fordon som kör i höger körfält på en vägsträcka med två körfält utan mötande trafik (exempelvis en motorväg) ska köra om framförvarande fordon – en omkörning blir i detta fall ett körfältsbyte till vänster och sedan ett körfältsbyte till höger.

SUMO:s LC-modeller är under ständig utveckling och har varit sedan programvarans start i början av 2000-talet. SUMO:s första LC-modell *DK2008* utvecklades av Daniel Krajzewicz och vidareutvecklades år 2013 till *LC2013* av Jakob Erdmann som idag används som standardmodell för att modellera LC-beteendet (SUMO, 2021).

LC-modellen styr i huvudsak två saker; beslutssteget för körfältsbyte baserat på väg- och trafikförhållanden, samt justerar hastighetsförändringar hos både det körfältsbytandet fordonet och fordon runt omkring som påverkas (Erdmann, 2015, s. 2). Modellen urskiljer fyra stycken olika anledningar till körfältsbyte:

- Strategiskt körfältsbyte
- Kooperativt körfältsbyte
- Taktiskt körfältsbyte
- Reglerat körfältsbyte

Strategiskt körfältsbyte

Ett körfältsbyte anses vara *strategiskt* då fordonet kör i ett så kallat dött körfält, som fordonet alltså inte kommer kunna fortsätta sin rutt på inom den närmaste framtiden. Ett körfält anses dött exempelvis om ett fordon ska köra rakt men körfältet övergår till en vänstersväng. Besluten kring om ett körfältsbyte är strategiskt eller ej baseras på data från de nuvarande parallella körfälten som leder fram till rutförändring, exempelvis en korsning eller sammanvävning. Denna data uppdateras först då fordonet bytt körfält. Dessa beslut tar fordonen i god tid innan hindret uppstår, och i beslutet räknas följande faktorer in (Erdmann, 2015, s. 3–4):

- Återstående distans att köra på dött körfält, d
- Antagen hastighet vid slutet av dött körfält, $lookAheadSpeed$
- Vilket körfält fordonet befinner sig i, $bestLaneOffset$, där höger körfält alltid betecknas 0 och ytterligare körfält till vänster betecknas $-1, -2, -3$ o.s.v. beroende på hur många körfält som existerar. Detta betecknar alltså antal körfältsbyten som behöver göras till det körfält bäst lämpat för körfältsbyte.
- Variabel som betecknar antal fordon i närliggande körfält, o

Ett strategiskt körfältsbyte anses brådskande om relationen i pseudokoden som följer gäller,

$$d - o < lookAheadSpeed * abs(bestLaneOffset) * f \quad (6)$$

där f är en faktor som står för tiden det tar att genomföra ett körfältsbyte, satt till 10 sekunder för att byta till vänster och 20 sekunder för att byta till höger. (Erdmann, 2015, s. 3–4)

Kooperativt körfältsbyte

För det *kooperativa* körfältsbytet finns det olika mekanismer som påverkar fordon att genomföra körfältsbyten för att undvika att blockera bakomliggande fordon. Modellen styr även att fordon justerar sin hastighet om de själva är blockerade men inte har möjlighet till att byta körfält (Erdmann, 2015, s. 7).

Taktiskt körfältsbyte

Det *taktiska* körfältsbytet genomför fordon när de vill undvika att följa ett långsammare framförvarande fordon. Fordonet som ska ta beslut kring att genomföra körfältsbytet måste ställa värdet av den potentiella hastighetsökningen som körfältsbytet kan ge, mot ansträngningen som körfältsbytet kräver. Beslutet kring att genomföra ett taktiskt körfältsbyte baseras på att ett kritiskt tröskelvärde måste överstigas, som baseras på fordonets nuvarande körfältsposition och den förväntade nyttan av att byta körfält (Erdmann, 2015, s. 8)

Reglerat körfältsbyte

Ett *reglerat* körfältsbyte handlar om att föraren måste byta körfält i vissa scenarier om det finns trafikregler som reglerar fordons närvaro i olika körfält. Ett exempel på ett sådant körfältsbyte kan vara på grund av att det nuvarande körfältet övergår till ett busskörfält. För en väg med två körfält och högertrafik ses det vänstra körfältet som omkörningsfält, vilket fordonen ska lämna så fort de har passerat långsammare fordon som kör i höger körfält. Detta

körfältsbyte liknar det kooperativa körfältsbyte vilket underlättar för framkomligheten på vägen, men är till skillnad från det inte valfritt (Erdmann, 2015, s. 9). Fordonen i modellen beter sig på följande sätt:

- Fordon som förväntas kunna fortsätta i en för dem, hög hastighet, i höger körfält kommer mer troligt att byta till höger körfält.
- Fordon som kör långsammare än hastighetsbegränsningen kommer mer troligt att byta till höger körfält.
- Fordon som vill köra i en hög önskad hastighet relativt de andra fordonen kommer troligt att stanna i omkörningsfältet (Erdmann, 2015, s. 9).

6. Basmodellen

I detta avsnitt beskrivs det hur basmodellen byggs upp och implementeras i SUMO, för att sedan verifieras och därmed kunna användas till en initial jämförelse mellan RuTSim och SUMO. Jämförelsemåtten som är grunden för denna jämförelse presenteras, samt vilka de troliga skillnaderna mellan programvarorna kommer att vara. Slutligen identifieras viktiga parametrar som vidare undersöks i avsnitt 7.

6.1 Dataunderlag

Trafiksimuleringsmodellen i Bernhardsson & Olstam (2017a) är uppbyggd i RuTSim och kalibrerad samt validerad mot TMS-data. Utdata från simuleringar av denna modell finns tillgängliga vilket innebär att en jämförelse mellan RuTSim och SUMO är genomförbar utan att nya simuleringar behöver göras i RuTSim.

Modellen bygger på den utformning av 2+1-vägar som antas vara den vanligast förekommande i det svenska vägnätet. Som tidigare nämnt, är vägnätet utformat med omkörningsfält på 1400 meter samt att längden på tvåfälten utgör 40 % av den totala vägsträckan (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 23). Enfältssträckan är totalt 2000 meter, och omkörningssträckan är 1500 meter, där de sista 100 metrarna, under övergången från två till ett körfält, inte ingår i den omkörbara längden. Den faktiska sträckan som ett fordon har möjlighet att köra om är därmed 1400 meter. Hela nätet består av fyra enfältssträckor och tre omkörningssträckor vilket innebär att nätets totala längd är 12 500 meter.

Förutom vägnätets utformning har även basmodellens parameteruppsättning antagits efter parametervärdena för modellen i Bernhardsson och Olstam (2017a). Själva förarbeteendemodellerna har däremot inte ändrats utan basmodellen bygger på de förarbeteendemodeller som är standard i SUMO. I övrigt har basmodellens indata – i form av trafikflöde, fordonssammansättning, förarbeteende, fordonsegenskaper och trafikgenerering – baserats helt på de tidigare nämnda parametrarna. Det här innebär dock inte att alla parametrar är identiska för de två modellerna, utan endast att de parametrar som har en tydlig motsvarighet i RuTSim-modellen har justerats därefter, se tabell 2. De parametrar som inte har en tydlig motsvarighet har lämnats orörda.

6.1.1 TMS-data

Bernhardsson och Olstams (2017a) trafiksimuleringsmodell är som tidigare nämnt kalibrerad och validerad mot TMS-data, vilken består av slangmätningar från mötesfria landsvägar och mötesfria motortrafikleder mellan år 2012–2015. Dataunderlaget består av mätningar från 385 stycken olika platser i Sverige och samtliga vägsträckor där mätningarna utförts har en hastighetsbegränsning på 100 km/h. Då TMS-datan ligger till grund för modellen i Bernhardsson och Olstams (2017a) rapport, som i sin tur används i den här studien som en representation av trafikföringen på 2+1-vägar, är det av vikt att belysa svagheter i TMS-underlaget.

Till att börja med är hastighetsspridningen för TMS-mätningarna väldigt stor. Det här är ett resultat av att det finns en inhomogenitet i det att mätningarna inte är gjorda under samma tid

på året och på vägar med varierande standard. Mätningarna är även gjorda på olika delar av vägsträckan, det vill säga vissa mätningar är gjorda i början av en omkörningssträcka medan andra är gjorda i slutet. Det datamaterial som används är dock likartad i den mening att samtliga mätningar är gjorda på 2+1-vägar med en hastighetsbegränsning på 100 km/h, samt för samma flödesnivåer. (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 25).

Det faktum att hastighetsspridningen är stor innebär att möjligheten till en detaljerad kalibreringen och valideringen är begränsad. En stor hastighetsspridning i datamaterialet minskar skillnaden mellan den kalibrerade och den validerade modellen vilket i sin tur minimerar vinsten med valideringen. TMS-datamaterialet saknar dessutom information om andelen omkörbar längd och omkörningssträckornas längd för mätpunkterna. För Bernhardsson och Olstams (2017a) modell har därför samtliga mätningar antagits vara utförda på den vanligast förekommande utformningen av 2+1-vägar på det svenska vägnätet (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 23).

Det finns även en osäkerhet i klassificeringen av de olika fordonstyperna i TMS-datan, vilka är personbil (PB), lastbil utan släp (LBU) och lastbil med släp (LBS). Klassningen i TMS-underlaget baseras inte på fordonslängd och fordonsvikt utan på axelavstånd och axelantal för fordonen. Det finns därmed en risk att vissa fordon kan ha en felaktig klassning. Exempelvis kan fordon som hastighetsmässigt tillhör kategorin PB men som längdmässigt uppfattas som LBU klassificeras fel (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 25). En mer detaljerad beskrivning av TMS-datan tillsammans med diskussioner om dess problem finns att läsa i Bernhardsson och Olstam (2017b).

På grund av svagheter i TMS-underlaget bör tolkningar av RuTSim-modellen som en exakt representation av verkligheten göras med försiktighet. Modellen antas dock vara tillräckligt tillförlitlig för att kunna beskriva trafikföringen och förarbeteendet på 2+1-vägar på ett övergripande plan.

6.2 Implementering i SUMO

För Bernhardsson och Olstams (2017a) trafiksimuleringsmodell är vägens bredd avgörande för när omkörningssträckan börjar och slutar. En skillnad mellan programvarorna är att nätverksbeskrivningen i RuTSim möjliggör att representera vägen på ett mer detaljerat sätt (varierande körfältsbredd) medan SUMO har ett mer binärt sätt att beskriva/visualisera antalet körfält. I praktiken innebär det här dock fortfarande att fordonen kommer se det som att omkörningssträckan slutar och börjar vid en exakt punkt – då vägen är smalare eller bredare än bredden på två fordon.

Den framtagna basmodellen bygger på de förarbeteendemodeller som är standard i SUMO. Den CF- och LC-modell som använts är därmed *Krauss* respektive *LC2013* (SUMO, 2021). I tabell 2 presenteras samtliga parametrar som ändrats och ingår i basmodellen. Samtliga andra parametrar i SUMO har lämnats orörda och antar därmed sitt defaultvärde. Tabell 2 visar även fordonssammansättningen för basmodellen. Trafikflödet för basmodellen är 400 fordon per timme, samma värde som använts under verifieringen av den jämförda modellen i RuTSim (Bernhardsson & Olstam, 2017a, s. 30).

Tabell 2. SUMO-parametrar basmodell

	PB	LBU	LBS
Fordonssammansättning	88.6 %	5.7 %	5.7 %
Önskad hastighet (<i>speedFactor</i>)	$\mathcal{N}(0.995; 0.08)$	$\mathcal{N}(0.845; 0.05)$	$\mathcal{N}(0.811; 0.032)$
Min & max önskad hastighet (<i>speedFactor</i>)	0.796 & 1.195	0.73 & 0.972	0.73 & 0.892
Fordonslängd [m]	4.6	12	22
<i>minGap</i> [m]	2	2	2
<i>accel</i> [m/s ²]	1.4	1.4	1.4
<i>decel</i> [m/s ²]	1.4	1.4	1.4
<i>tau</i>	1.5	2	2
<i>departSpeed</i>	”desired”	”desired”	”desired”

Parametern *speedFactor* påverkar fördelningen av den önskade hastigheten inom fordonsuppsättningen, genom att multiplicera dess värde med hastighetsbegränsningen, vilket gör att fördelningen baseras på hastighetsbegränsningen på vägen. Hastighetsbegränsningen är satt till 100 km/h för samtliga vägsträckor, vilket innebär att medelvärdet för PB:s önskade hastighet är 99.5 km/h med en standardavvikelse på 8 km/h. Den önskade hastigheten baseras på en normalfördelning. *speedFactor* gör det även möjligt att fastställa en övre och nedre gräns på fördelningen för hastighetsanspråket, normalfördelningen trunkeras med andra ord vid två definierade värden (SUMO, 2021). Till exempel sker trunkeringen för PB vid 79.6 och 119.5 km/h.

Parametern *minGap* definierar det minimala avstånden till det framförvarande fordonet vid stillastående. Parametrarna *accel* och *decel* beskriver fordonens acceleration- och retardationsförmåga. Parametern *tau* bestämmer fordonens önskade minimala tidlucka, det vill säga det önskade tidsavståndet mellan två fordon. För CF-modellen Krauss baseras avståndet på den tid det tar för nosen på det bakomvarande fordonet att nå det framförvarande fordonets bakdel. Att parametern *departSpeed* sätts till ”desired” innebär att fordonens hastighet vid insättning på nätet ges utifrån fordonets önskade hastighet. Om fordonet inte kan anta sin önskade hastighet på grund av utrymmesbrist kommer insättningen att fördröjas tills den önskade hastigheten kan ges (SUMO, 2021).

6.2.1 Detaljer för simuleringsupplägg

Bernhardsson och Olstam (2017, s. 19) använder sig av 20 upprepningar per simuleringsscenario för att kunna säkerställa att skillnaderna mellan olika utformningar inte varit ett resultat av den naturliga variationen. En sådan variation uppstår till följd av spridningen mellan olika förare och fordonstyper. För att minimera den naturliga variationens

påverkan på resultatet från simuleringarna i SUMO utförs även simuleringarna i den här studien med 20 upprepningar per scenario. Vid simuleringarna användes även samma slumpfrön som styr när de olika fordonen sätts in i simuleringen. Detta för att kunna uppnå variation mellan de 20 olika simuleringarna, samtidigt som det skulle vara möjligt att upptäcka skillnader mellan simuleringsuppsättningarna då trafiksimuleringsmodellen justerades eller modifierades. För att på ett smidigt sätt kunna köra upprepade simuleringar i SUMO har TraCI (Traffic Control Interface) använts.

För att göra den undersökta delen av vägnätet så homogen som möjligt utgör den första enfälssträckan tillsammans med den första omkörningssträckan en så kallad uppvärmningssträcka. Det här innebär att dessa två delsträckor inte tas med i resultaträkningen. På så sätt minimeras risken för avvikelser i utdata till följd av situationer som är en effekt av att fordonen nyligen sattes in i nätet. Analysen av utdatan baseras således på totalt tre stycken enfälssträckor samt två stycken omkörningssträckor.

Av liknande anledningar utgörs även den första halvtimmen av simuleringarna av uppvärmningstid. På så sätt hinner trafiknätet fyllas upp och få en representativ trafikförläggning. Bernhardsson och Olstams trafiksimuleringsmodell (2017, s. 32) tillämpar en motsvarande uppvärmning vilket ytterligare stärker poängen med uppvärmningstiden samt uppvärmningssträckan. För att kunna ta fram timmedelvärden har simuleringstiden satts till 1.5 timme där den sista timmen utgör den faktiska mättiden, och första halvtimmen ignoreras och använts som uppvärmningstid.

6.3 Verifiering av basmodell

När basmodellen anses färdig bör den genomgå en så kallad verifieringsprocess för att säkerställa att den är korrekt konstruerad och inte innehåller logiska fel. Att modellen är korrekt konstruerad betyder i detta fall att den beter sig på det vis som är förväntat. Genomförandet av verifieringen följer beskrivningen av *Verifiering* i en generell trafiksimuleringsstudie (Bång m.fl., 2014, s. 33). Vid avvikelser från ett förväntat modellbeteende har modellen korrigerats och verifieringsprocessen upprepats.

6.3.1 Mjukvarukontroll

Mjukvarukontrollen innefattar att använda den senaste uppdaterade versionen av programvaran samt att ha insikt i kända fel och problem som programvaran kan tänkas ha. Programvaran som har använts för denna simulering är den senaste versionen av öppen-källkods-programvaran SUMO. Den öppna källkoden gör att det finns en stor mängd dokumentation och användarforum att tillgå, samt att programvaran uppdateras löpande av dess utvecklare. Detta projekt grundar sig på att använda just denna programvara, oavsett hur väl utformad den visar sig vara, därför har det enbart säkerställts att den senaste uppdaterade versionen har använts. I skrivande stund för denna studie var den senaste versionen 1.9.0.

6.3.2 Granskning av indata och kodning

För verifieringen av indata och kodning har olika Python-skript konstruerats för analys av utdata samt SUMO:s grafiska gränssnitt har studerats, för att säkerställa korrekt inmatning till modellen. Följande punkter har kontrollerats:

Indata:

- Trafikflöde – utifrån tvärsnittsmätningar upprätthålls flödet (fordon/h) kring ett medelvärde över hela trafiknätet
- Ankomsttid – fordon genereras och sätts in i trafiknätet enligt en exponentialfördelning
- Önskad hastighet – fordonens önskade hastighet följer fordonsspecifika normalfördelningar
- Trafiknätet – trafiknätets struktur (noder och körfält) och väggeometrin (längd och bredd på körfält)
- Hastighetsbeteende – fordonen kör igenom trafiknätet utan att den maximala hastigheten för varje fordonstyp överskrids
- Fordonstyper – fördelningen av fordonstyper är korrekt
- Utdata – filerna med utdata som genereras ser ut som förväntat (längd på simulering, olika fordonstyper och antal fordon)

Kodning:

- Koden är rätt och inga buggar påträffas
- De egenskrivna kodfilerna som senare kommer att användas för jämförelse och parameterjustering är korrekt utformade. Denna kontroll består i att använda genererade utdata från RuTSim-simuleringarna från Bernhardsson och Olstams (2017a) trafiksimuleringsmodell och jämföra resultaten med de som återfås i samma rapport.
- De egenskrivna kodfilerna för jämförelsemått verifieras även genom visuell granskning av simuleringen

6.4 Jämförelsemått och dataanalys

För jämförelsen av simuleringarna i SUMO med simuleringarna i RuTSim har ett antal jämförelsemått valts ut samt Python-skripten skapats för att extrahera och bearbeta utdata i form av CSV-filer (textilsformat för tabelldata). Se Appendix D för exempel på hur utdatan från RuTSim samt SUMO såg ut. Dessa mått beskriver den simulerade trafikföringen på en aggregerad nivå. Ett jämförelsemått kan till exempel vara fordonens medelhastighet över en viss sträcka.

Då det finns ett nästan oändligt antal sätt som trafikföringen kan mätas och klassificeras på, är även utbudet av möjliga jämförelsemått så gott som obegränsat. Trafikföringen i de båda programvarorna kan därmed inte jämföras på alla tänkbara sätt utan jämförelsen behöver avgränsas till de mest avgörande punkterna som är i linje med projektets syfte.

Jämförelsemåtten som används här bygger därmed på den tidigare forskningen kring trafikföring på 2+1-vägar som beskrivs under avsnitt 3. Tillsammans med informationen om SUMO:s förarbeteendemodeller har även två antaganden kunnat fastställas gällande de förarbeteendemonster på 2+1-vägar som troligen inte kan fångas genom att enbart justera parametrar i SUMO, se avsnitt 6.5.

Trafikföringen på 2+1-vägar kännetecknas av att fordon "jagar ifatt" framförvarande fordon för att senare kunna köra om fordonet under omkörningssträckan. Hastigheten har dessutom observerats vara högre i omkörningsfältet. En annan tydlig skillnad mellan 2+1-vägar och andra vägtyper är beteendet under vävningen. Den beskrivna trafikföringen kan ge en indikation om vilka effekter som potentiellt följer ett förarbeteende signifikant för 2+1-vägar. Till att börja med antyder det beskrivna beteendet en specifik spridning av fordonens hastighet över nätet. Fordonens medelhastighet bör till exempel vara betydligt högre i omkörningsfältet. Det är även rimligt att anta att antalet omkörningar påverkas av det specifika förarbeteendet eftersom fordon ökar sin önskade hastighet under omkörningen. Fordonens agerande under vävningen bör även ge uttryck åt ett speciellt mönster, där fordon i vissa fall tvingas bromsa in för att kunna väva tillbaka till det högra körfältet.

De jämförelsemått som använts under studiens gång är därmed följande:

- Medelhastighet för punktmätningar
- Konfidsensintervall över medelhastigheten
- Omkörningar
 - Antal omkörningar
 - Antal misslyckade omkörningar
 - Antal omkörda fordon
- Position för körfältsbyte/omkörning på omkörningssträcka

Det generella förarbeteendet kan studeras genom att beräkna medelhastigheten med jämna mellanrum över hela nätverket. Detta typ av jämförelsemått illustrerar den genomsnittliga hastighetens förändring över sträckan. På så sätt kan beteendet, eller avsaknaden av beteendet – att öka sin hastighet under omkörningssträckan för att därefter tvingas bromsa in under vävningen – uppmärksammas. Det här jämförelsemåttet går under namnet *medelhastighet för punktmätningar*. Alla hastigheter (punktmätningar) inom varje 100-metersintervall aggregeras till en medelhastighet. För detta jämförelsemått visas samtliga enfälts- och omkörningssträckor.

För att kvantitativt kunna jämföra medelhastigheterna är det inte tillräckligt att studera medelhastigheten för punktmätningar. För att kunna uppskatta hastighetsskillnaderna mellan simuleringarna i de olika programvarorna mer precist har därför även konfidsensintervall över medelhastigheten tagits fram. Konfidsensintervallet ger en indikation på hur skattningen av osäkerheten ser ut för medelhastigheten av all observerade och simulerade data. Konfidsensintervallet beräknas som följer:

$$\bar{x}_n \pm t_a * s_n \sqrt{1/n} \quad (7)$$

Där $\bar{x}_n$ motsvarar hastighetens medelvärde uppdelat efter fordonstyp med $n - 1$ frihetsgrader. t_a är students t-fördelning och s_n standardavvikelsen för x . Den tvåsidiga fördelningen med en 95-procentig konfidsensnivå antogs i det här fallet. Konfidsensintervallen beskriver medelhastigheten uppdelad efter körfält (enfältssträcka, vänster och höger körfält på omkörningssträckan) vilket betyder att hastigheterna i omkörningsfälten kan jämföras

mellan programvarorna. Mätningarna som konfidensintervallet baseras på är medelvärdena för alla mätningar 50 meter runt mitten på de olika körfälten.

Eftersom en grundläggande del av 2+1-vägar är möjligheten för fordon att köra om på växelvisa omkörningsfält, har även jämförelsemått som beskriver omkörningar använts. Både mått som beskriver frekvensen av lyckade och misslyckade omkörningar har använts under jämförelsen. Även antal omkörda fordon har tagits fram, vilket beskriver det totala antalet omkörda fordon under en timme. Om ett fordon kör om flera fordon under en och samma omkörning räknas det i det här fallet som flera omkörningar. Antal omkörningar beskriver däremot en omkörning utifrån förarens perspektiv, det vill säga en omkörning är oberoende av antalet fordon som körs om så länge antalet är större än noll. Antal misslyckade omkörningar definieras utifrån att ett fordon byter till omkörningsfältet och därefter byter tillbaka till det högra körfältet utan att ha passerat ett framförvarande fordon. För att undvika potentiella buggar eller artefakter där fordon gör orealistiskt korta körfältsbyten räknas ett omkörningsförsök endast om fordonet har befunnit sig i omkörningsfältet längre än fyra sekunder.

Det sista jämförelsemåttet är ett histogram som beskriver var fordon, och hur stor andel av dem som, genomför omkörningar. Detta ses dels som ett komplement till föregående jämförelsemått över omkörningsstatistiken då det bidrar med djupare förståelse för hur omkörningsbenägenheten ser ut, men också hur vävningsbeteendet hos fordonen ser ut. Det är totalt fyra stycken olika histogram som beskriver olika typer av omkörningar; startposition för lyckad omkörning, slutposition för lyckad omkörning, startposition för misslyckad omkörning samt slutposition för misslyckad omkörning.

6.5 Antaganden om troliga orsaker till skillnader

Genom att sätta SUMO:s förarbeteendemodeller i relation till trafikföringen på 2+1-vägar har antaganden kunnat göras angående de förarbeteenden som skulle kunna saknas i SUMO för att kunna simulera 2+1-vägar på ett sätt som överensstämmer med modelleringen i RuTSim. Detta är beteenden som sannolikt inte kan korrigeras genom att endast justera parametrarna i SUMO. Antagandena beskrivs nedan:

- Fordonen i SUMO kommer inte att öka sin önskade hastighet under omkörningen
- Fordonen i SUMO kommer inte kunna uppvisa ett vävningsbeteende som överensstämmer med beteendet i RuTSim

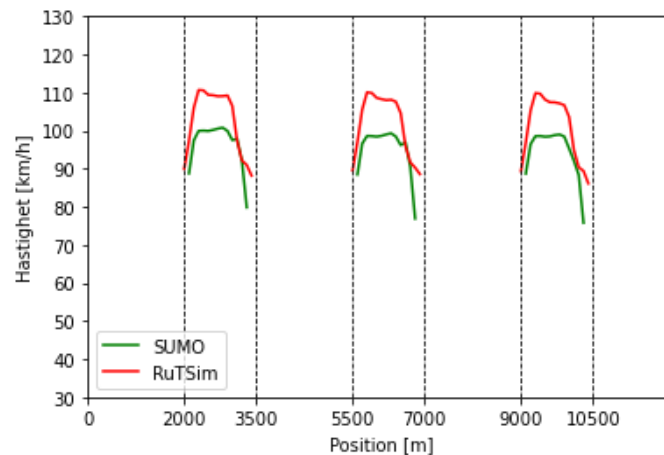
6.6 Jämförelse av basmodell mot RuTSim

Den initiala jämförelsen av modellerna i SUMO och RuTSim görs för att identifiera de mest markanta skillnaderna modellerna emellan. Dessa skillnader kan i sin tur ge en fingervisning om vilka parametrar som främst är relevanta för parameterjustering i SUMO.

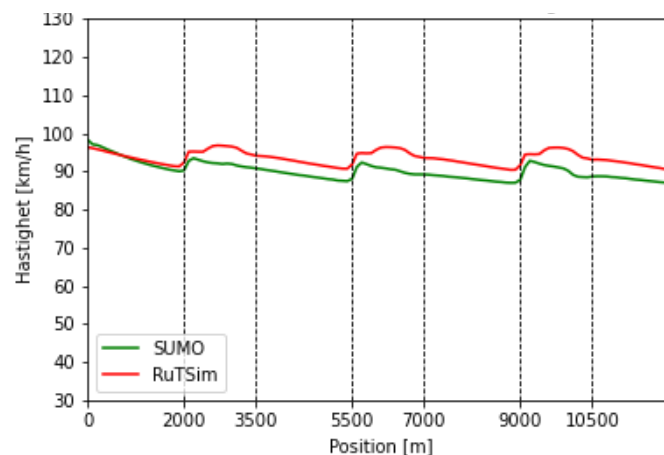
6.6.1 Medelhastighet för punktmätningar

Grafen i figur 6 visar mätningar från omkörningssträckans vänstra körfält, alltså det som även kallas omkörningsfältet. Omkörningsfältet existerar bara under sträckorna 2000–3500 meter, 5500–7000 meter samt 9000–10500 meter, vilket är anledningen till att det är endast under

dess perioder grafen syns. Om grafen för omkörningsfältet upphör även under de nämnda sträckorna, beror det på att det saknas mätningar där, alltså att ett medelvärde för fordonstypen i fråga inte har kunnat beräknas för de 20 simuleringarna. Figur 7 har en kontinuerlig graf eftersom den visar den sammanhängande vägsträckan av enfältssträckan och omkörningssträckans högra körfält. På detta vis ska denna typ av jämförelsemått tolkas igenom hela rapporten.



Figur 6. Medelhastighet för punktmätningar (var 100:e meter) för SUMO samt RuTSim för personbilar i det vänstra körfältet (omkörningsfältet) på omkörningssträckan



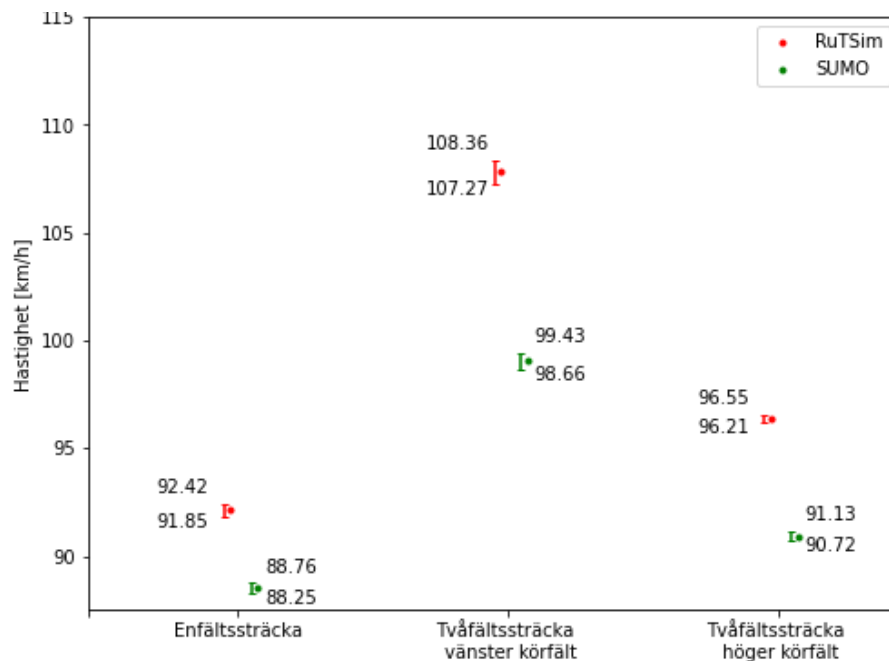
Figur 7. Medelhastighet för punktmätningar (var 100:e meter) för SUMO samt RuTSim för personbilar på enfältssträckan och i det högra körfältet på omkörningssträckan

Figur 6 och 7 gör det tydligt att fordon inte lyckas upprätthålla en lika hög hastighet i SUMO som i RuTSim varken under omkörningen eller i det högra körfältet. Däremot är hastighetsbeteendet relativt likt. Fordonen ökar sin hastighet i början av omkörningssträckan både i det vänstra (omkörningsfältet) och i det högra körfältet. Att fordonen även kan öka sin hastighet i det högra körfältet är troligen en effekt av att fordon som tidigare blockerat nu byter till det vänstra körfältet. Den kraftiga hastighetsminskningen i slutet av det vänstra körfältet (figur 6) kan förklaras av att fordon har slutfört sin omkörning och nu letar efter en lucka för att kunna väva tillbaka till det högra körfältet och därför minskar sin hastighet.

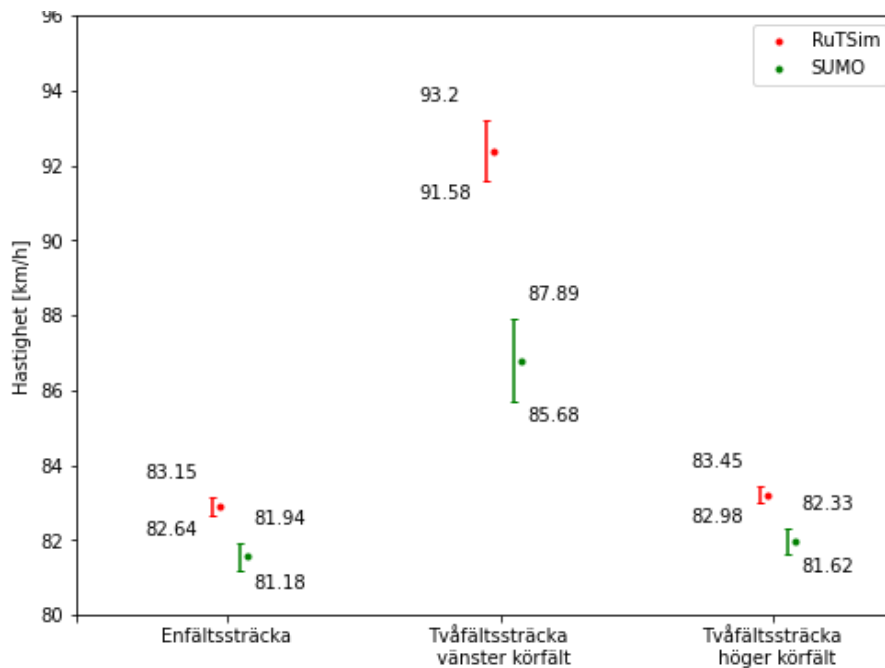
För den tunga trafiken (LBU och LBS) finns det för få mätvärden i det vänstra körfältet (omkörningsfältet) för att graferna ska vara representativa. I det högra körfältet finns det däremot tillräckligt med mätningar. Medelhastigheten i det högra körfältet är något lägre i SUMO för fordonstyperna LBU och LBS. Förutom detta är beteendet i det högra körfältet nästintill identiskt mellan modellerna. Detta är anledningen till att dessa grafer inte har inkluderats i avsnittet. Graferna finns istället att se i *Appendix A*.

6.6.2 Konfidensintervall för medelhastighet

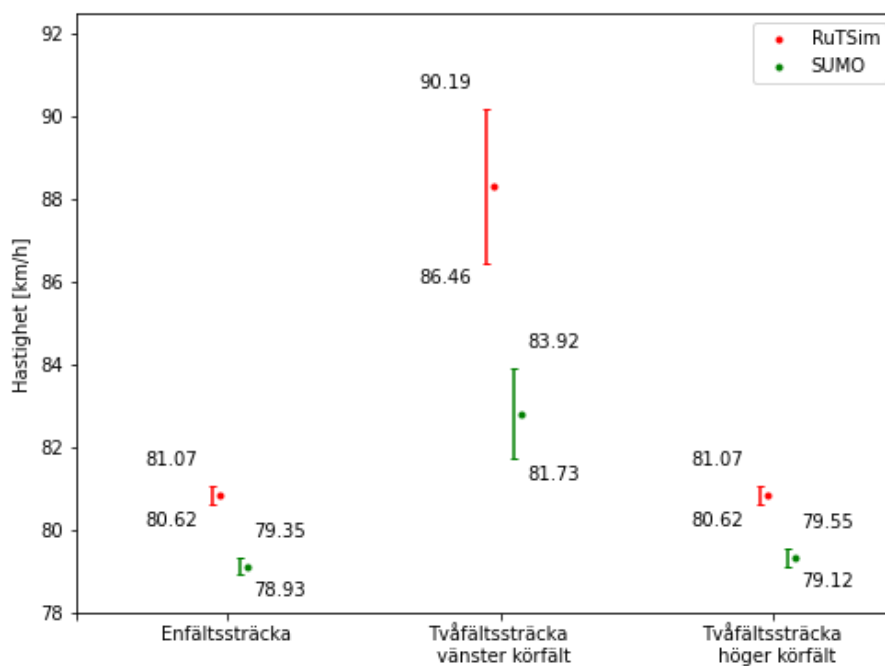
Figur 8, 9 och 10 representerar konfidensintervallen över medelhastigheten på de olika typerna av vägsträckor och för olika fordonstyper. Detta jämförelsemått ska tolkas på samma vis för alla fordonstyper igenom hela rapporten. De två olika trafiksimuleringsmodellerna har sina vardera konfidensintervall (RuTSim – röd, SUMO – grön) för de tre olika delarna – enfältssträcka, tvåfältssträcka vänster körfält (omkörningsfältet) och tvåfältssträcka höger körfält (se x-axel). Detta ger totalt sex stycken konfidensintervall per figur och fordonstyp. Överlappande konfidensintervall representerar en relativt god överensstämmelse medan icke överlappande konfidensintervall innebär en dålig överensstämmelse.



Figur 8. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO samt RuTSim för personbilar



Figur 9. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO samt RuTSim för lastbilar utan släp



Figur 10. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO samt RuTSim för lastbilar med släp

Resultatet som visas i figur 8, 9 och 10 styrker beskrivningen under avsnitt 6.6.1 – medelhastigheten är på samtliga undersökta delar av vägnätet lägre i SUMO än i RuTSim. Det blir även tydligt att det finns färre mätvärden i det vänstra körfältet för LBU och LBS eftersom intervallen för dessa blir betydligt bredare.

6.6.3 Omkörningsstatistik

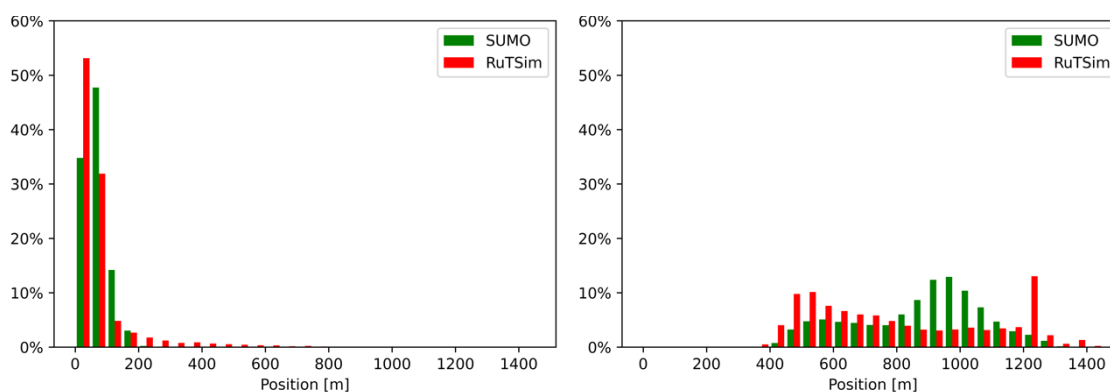
Tabell 3. Omkörningsstatistik för SUMO samt RuTSim

	SUMO	RuTSim
Antal omkörda fordon	280	349
Antal fordon som genomför och lyckas med en omkörning	202	292
Misslyckade omkörningar	19	63

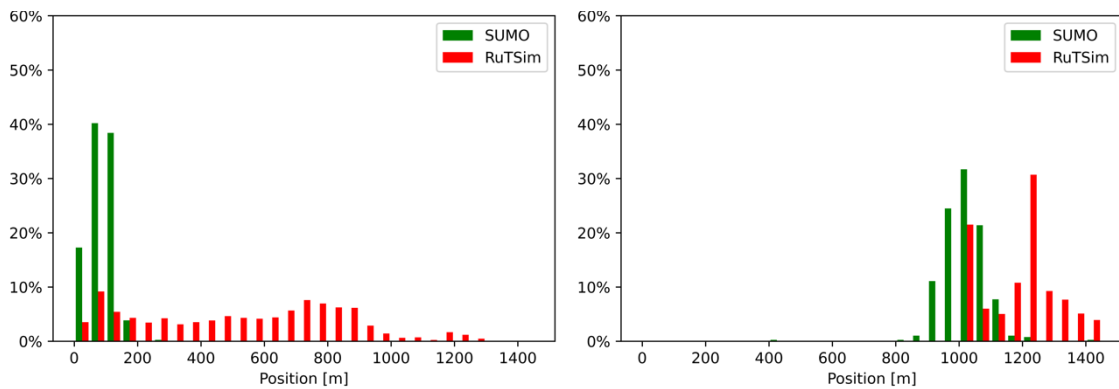
Basmodellen i SUMO ger inte upphov till ett lika stort antal omkörningar, för alla undersökta attribut, som simuleringarna i RuTSim gör. Detta skulle kunna vara en förklaring till varför hastigheten i SUMO-modellen även är lägre på enfälssträckan och i det högra körfältet på omkörningssträckan. Detta då ett lägre antal omkörningar kan leda till att fler fordon följer ett annat fordon med lägre önskad hastighet, vilket i sin tur kan sänka medelhastigheten på dessa sträckor. Resultatet tyder på att fordonen är mindre benägna att testa att köra om i SUMO än vad fordonen är i RuTSim.

6.6.4 Omkörningar start- & slutposition

Figurerna 11 och 12 representerar hur stor fordonsandel som byter körfält vid en viss position, för lyckade samt misslyckade omkörningar. I figur 11a ses att drygt 50 % av fordonen i RuTSim som genomför lyckade omkörningar, byter till vänster körfält efter ungefär 50 meter från omkörningssträckans början. För tillbakavävningen till höger körfält vid en lyckad omkörning, ses den största andelen vara ca 10 % runt 1250 meter, som ses i figur 11b. Figur 12a och 12b ska tolkas på liknande sätt, men för då omkörningar misslyckas.



Figur 11a & 11b. Startposition & slutposition körfältsbyte – lyckade omkörningar för SUMO samt RuTSim



Figur 12a & 12b. Startposition & slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO samt RuTSim

Figurerna 11 och 12 visar hur valet att byta körfält och köra om skiljer sig åt mellan programvarorna. Den sista positionen som fordon verkar vara benägna att starta en omkörning kommer betydligt tidigare i SUMO. Nästintill inget fordon påbörjar en omkörning senare än 200 meter in i tvåfältet i SUMO, se figur 11a och 12a. Detta kan jämföras med RuTSim där fordon påbörjar omkörningar under nästan hela omkörningssträckan. Även positionen där fordonen väver tillbaka till det högra körfältet efter en lyckad omkörning skiljer sig åt mellan programvarorna, se figur 11b. RuTSim ger upphov till två toppar där den ena kommer efter ungefär 500 meter och den andra strax efter 1200 meter. I SUMO finns det bara en topp, ungefär 1000 meter in på körfältet. Även detta skulle kunna vara en effekt av att fordonen inte upprätthåller en lika hög hastighet under omkörning i SUMO och spenderar därmed längre tid för att köra om.

6.6.5 Viktiga parametrar för parameterjustering

Utifrån de resultat som presenterats ovan fastställs det att förarbeteendet i SUMO inte överensstämmer fullt ut med det simulerade förarbeteendet i RuTSim. Det finns en skillnad i hur hastighetsbeteendet simuleras, medelhastigheten är bland annat lägre i SUMO. Antalet omkörningar är även färre och vävningsbeteendet skiljer sig åt mellan programvarorna. Dessa identifierade skillnader ger upphov till att det finns flertalet parametrar som är intressanta att justera, med mål att kunna öka överensstämmelsen mot hur modellen i RuTSim presterar. Notera att de parametrar som är angivna i tabell 2 ses som vedertagna i denna studie och är konstanta parametrar som inte kommer att justeras.

Det finns runt ett 40-tal parametrar i trafiksimuleringsmodellen SUMO som skulle kunna undersökas och justeras i denna studie, alla med sina specifika beskrivningar och syften att kunna anpassas för att modellera olika trafiksituationer. De parametrar som anses relevanta att avgränsa denna studie till är de som är kopplade till de olika förarbeteendemodellerna – LC- och CF-modeller. Detta motiveras med att trafikföringen och förarbeteendet på 2+1-vägar till stor del är en följd av hur fordon interagerar vid omkörning, vilket styrs av dessa modeller.

Dokumentation för respektive förarbeteendemodell ger förståelse för vilka parametrar som kan ge efterfrågad förändring i jämförelsemått. För LC-beteendet kommer en modell och dess parametrar att undersökas, vilken är *LC2013*, och detta eftersom det är standardmodellen

för modellering av LC-beteendet i SUMO. Det finns två till LC-modeller i SUMO men dessa kommer inte att undersökas på grund av studiens omfattning. För CF-beteendet kommer dels standardmodellen undersökas, *Krauss*, och dels den CF-modell som används i RuTSim, *IDM*. Alla dessa modellers parametrar finns dokumenterade på SUMO:s hemsida och de parametrar som anses relevanta att studera för sin respektive förarbeteendemodell återges i tabell 4.

Tabell 4. SUMO-parametrar för justering av basmodell

Förarbeteendemodell	Typ	Kommentar	Parametrar
Körfältsbytesmodell (LC-modell)	<i>LC2013</i>	Standardmodell för SUMO	<i>lcStrategic</i> <i>lcCooperative</i> <i>lcSpeedGain</i> <i>lcKeepRight</i> <i>lcLookaheadLeft</i> <i>lcSpeedGainRight</i> <i>lcSpeedGainLookahead</i> <i>lcCooperativeSpeed</i> <i>lcAssertive</i>
Accelerationsmodell (CF-modell)	<i>Krauss</i>	Standardmodell för SUMO	<i>sigma</i> <i>emergencyDecel</i>
	<i>IDM</i>	Standardmodell för RuTSim	<i>delta</i> <i>emergencyDecel</i>

7. Parameterjustering basmodell

I detta avsnitt justeras basmodellens parametervärden så att SUMO-modellen i största möjliga mån kan simulera förarbeteendet på den virtuella 2+1-sträckan som är simulerad i RuTSim. Parameterjusteringen anses färdig då SUMO-modellen i så hög grad som möjligt överensstämmer med RuTSim-modellen utifrån de olika jämförelsemått som studeras.

7.1 Urval av relevanta SUMO-parametrar

Ett första urval av alla de parametrar som existerar för SUMO-modellen redogjordes för under avsnitt 6.6.5. Där valdes de parametrar ut som anses relevanta, vilka är kopplade till en LC-modell, samt två CF-modeller. Vid parameterjusteringen körs 20 simuleringar för den parameteruppsättning som ska testas. Justeringarna görs manuellt och simuleringarna genererar utdata som i sin tur utvärderas för respektive jämförelsemått, som beskrivs under avsnitt 6.4. Varje ny parameteruppsättning som testas jämförs mot föregående resultat för att se om och hur jämförelsemåtten påverkas. Alla dessa iterationer av parametrar dokumenteras och struktureras noggrant i en parameterloggbok igenom hela processen, och specifika data från den finns i *Appendix B*.

Var och en av parametrarna i tabell 4 studerades till en början enskilt för olika extremvärden i dess respektive intervall, och simuleringarnas resultat jämfördes allteftersom mot simuleringarna från RuTSim. Utifrån detta sammanställdes de mest relevanta parametrarna att justera, vilka ses i tabell 5. Där återges även parametrarnas defaultvärde, intervall, beskrivning samt dess påverkan på SUMO-modellen. Dessa parametrar testades i olika kombinationer om två respektive tre parametrar, där de kombinerades utifrån dess effekt. Även dessa resultat finns dokumenterade i loggboken i *Appendix B*.

Initialt under parameterjusteringen har fokus legat på att undersöka huruvida antagandena under avsnitt 6.5 stämmer eller inte. Därefter har de modeller som ger störst överensstämmelse mot RuTSim tagits fram. Alla jämförelsemått har under det här skeendet bedömts lika viktiga.

Tabell 5. Relevanta SUMO-parametrar för justering av basmodell

Parameter	Default	Intervall	Beskrivning	Effekt
<i>sigma</i>	0.5	[0, 1]	Förarens oförmåga att köra perfekt	Fordonen kör perfekt vid värde 0 – hastigheten varierar inte lika mycket för ett fordon
<i>lcStrategic</i>	1.0	$[0 - \infty[$	Benägenhet till att lämna körfältet som fortsätter in på enfältssträckan, alltså höger körfält	Lägre värde ger fler omkörningar
<i>lcSpeedGain</i>	1.0	$[0 - \infty[$	Benägenhet till att byta körfält för hastighetsvinst	Högre värde ger fler omkörningar
<i>lcLookaheadLeft</i>	2.0	$]0 - \infty[$	Faktor som påverkar avståndet för strategiskt körfältsbyte	Lägre värde ger fler omkörningar
<i>lcKeepRight</i>	1.0	$[0 - \infty[$	Benägenhet till att köra i höger körfält	Högre värde ger tidigare tillbakavävning till höger körfält
<i>lcSpeedGainLookahead</i>	0	$[0 - \infty[$	Tid att förutspå hastighetsminskning orsakat av framförvarande fordon	Högre värde ger tidigare körfältsbyte vid omkörning
<i>lcCooperativeSpeed</i>	1.0	$[0 - 1]$	Hur hjälpsamma fordon är att släppa in andra fordon i sitt körfält genom att anpassa hastigheten	Ökat samarbete vid körfältsbyten
<i>lcAssertive</i>	1	$\mathbb{R}^+$	Villighet att acceptera mindre avstånd till andra fordon vid körfältsbyten	Högre värde ger fler omkörningar

Notera att den enda parametern som hör till CF-modellen som påverkade resultaten nämnvärt var *sigma*, övriga parametrar fick behålla sina defaultvärden. I övrigt var det enbart justering av parametrar kopplade till LC-modellen, alltså modellen för körfältsbyte, som gav resultat som var intressanta att arbeta vidare med i olika kombinationer och för olika värden.

7.2 Jämförelse av parameterjusterad modell mot RuTSim

I det här avsnittet presenteras effekten till följd av parameterjusteringarna. Den parameterjusterade modellen ställs i relation till basmodellen för att tydliggöra förändringen. Först kommer en beskrivning av de parametrar som justerats och därefter följer den faktiska jämförelsen.

7.2.1 Slutgiltiga parametervärden

Efter att ha justerat och kombinerat de olika parametrarna i tabell 5 ges resultatet att det finns flertalet parameterkombinationer som förbättrar basmodellens överensstämmelse mot

modellen i RuTSim. Olika typer av parametervärden i olika kombinationer visade sig ge liknande effekter för trafikföringen i slutändan, vilket bidrar till att endast en slutgiltig parameteruppsättning presenteras i tabell 6. Tabellen visar en kombination av parametrar som var en av dem som gav största möjliga överensstämmelse med jämförelsemått för simuleringarna från RuTSim. Tabellen visar även vilka effekter som parameterjusteringen gav upphov till. Se *Appendix A* för ytterligare en parameteruppsättning som gav likvärdiga effekter.

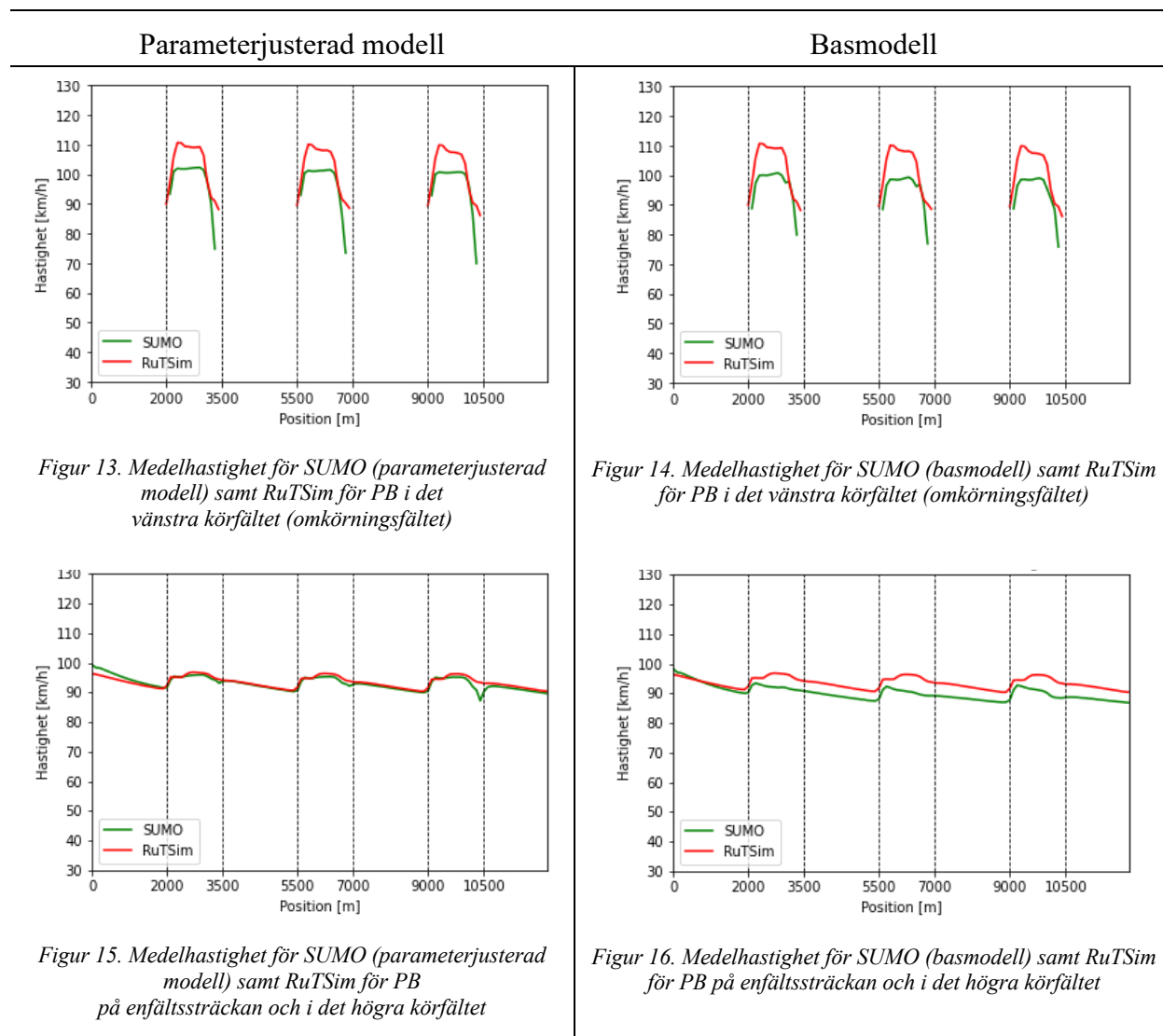
Tabell 6. Slutgiltiga parametervärden och dess effekter på basmodellen

Parameter	Problem att lösa	Justering	Effekt
<i>lcStrategic</i>	Köbildning och minskad framkomlighet, framförallt i slutet av sista omkörningsfältet	Minskar värdet från 1.0 till 0.6	Fler omkörningar, fler misslyckade omkörningar och högre hastighet för personbilar
<i>lcKeepRight</i>	Köbildning och minskad framkomlighet, framförallt i slutet av sista omkörningsfältet	Ökar värdet från 1.0 till 2.0	Tidigare körfältsbyten tillbaka till höger körfält efter genomförd omkörning
<i>sigma</i>	Fordonen kör i genomsnitt lägre än sin önskade hastighet	Minskar värdet från 0.5 till 0	Medelhastigheten för alla fordonstyper ökar

Att minska värdet på parametern *lcStrategic* var initialt fokus, då målet var att öka antalet omkörningar. Det minskade värdet leder till att fordonen inte kommer vara lika strategiska, vilket i detta sammanhang betyder att de med större sannolikhet inte kommer ligga kvar i sitt strategiska körfält, vilket är höger körfält på omkörningssträckan. Som ses i tabell 6 blev även detta effekten. För att öka fordonens benägenhet att återvända till det högra körfältet för att undvika att allt för många fordon begränsas i slutet av omkörningsfältet ökades även värdet på parametern *lcKeepRight*. Till sist sattes *sigma* till 0 vilket gör att hastigheten inte oscillerar för fordon när de inte önskar accelerera eller retardera, vilket kan liknas med att förarens fot är helt still på gaspedalen. Detta för att få mindre variation i hastigheten.

I nästa avsnitt följer de jämförelsemått som är resultat för den studerade kombinationen av parametrarna, mot basmodellens jämförelsemått från avsnitt 6.6. Detta medför att figurerna i den högra kolumnen kallad "Basmodell" i avsnitt 7.2.2 är identiska med figurerna i avsnitt 6.6.

7.2.2 Resultat jämförelsemått



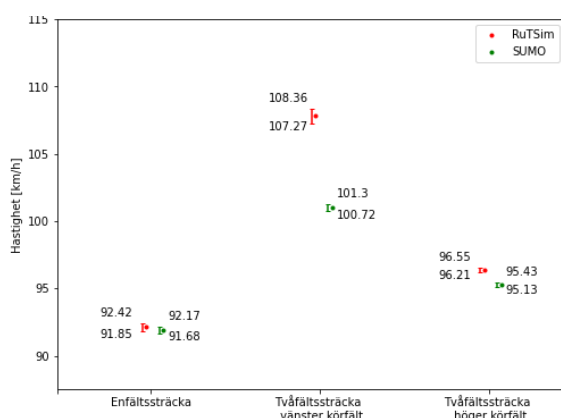
Resultatet ovan visar att det är möjligt att påverka hastigheten en aning genom att justera parametrarna i SUMO. Att parametern σ för den justerade modellen är satt till 0 är rimligtvis en bidragande faktor till att hastigheten mellan SUMO och RuTSim mer går i linje med varandra. Detta då ett högre värde på σ än 0 påverkar fordonens rörelse att de begår misstag bland annat när det kommer till acceleration och retardation, se tabell 5. Fordonens medelhastighet kan därmed i praktiken bli lägre än den önskade hastigheten. Utöver detta så finns det däremot inget som tyder på att förändringarna av parametrarna skulle påverka fordonens önskade hastighet. Däremot kan skillnaden i medelhastighet mellan den parameterjusterade modellen och basmodellen även vara en effekt av ett mer effektivt flöde, där fordon som är blockerade i högre utsträckning kör om.

Den ökade omkörningsbenägenheten kan även förklara det faktum att hastighetsminskningen i slutet av omkörningsfälten är större för den parameterjusterade modellen, vilket ses på de gröna kurvorna i figur 13 och 14. I och med att fler fordon kör om bidrar till att det därmed

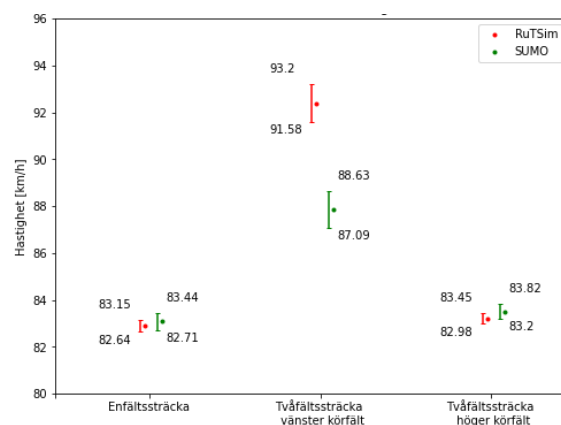
även kan förekomma fler misslyckade omkörningar, vilket är omkörningar som i sin tur troligen leder till en hastighetsminskning då fordonen letar efter en lucka att väva tillbaka till.

Det blir tydligt att det genom parameterjustering går att få till ett hastighetsbeteende som överensstämmer mellan RuTSim och SUMO under enfältssträckorna och i det högra körfältet på omkörningssträckan. I det vänstra körfältet på omkörningssträckan finns det fortfarande en tydlig differens mellan modellerna i de olika programvarorna. Skillnaden går i linje med antagandet under avsnitt 6.5, det vill säga att fordonen i SUMO inte ökar sin önskade hastighet för att jaga ifatt och köra om framförvarande fordon. Samma resonemang gäller för lastbilarna, både LBU och LBS, se *Appendix A* för medelhastighet för dessa fordonstyper.

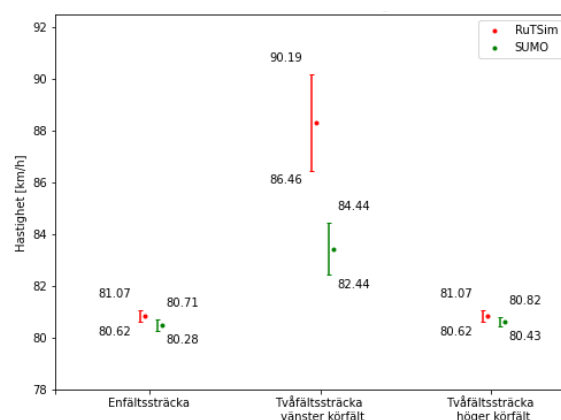
Parameterjusterad modell



Figur 17. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för personbilar

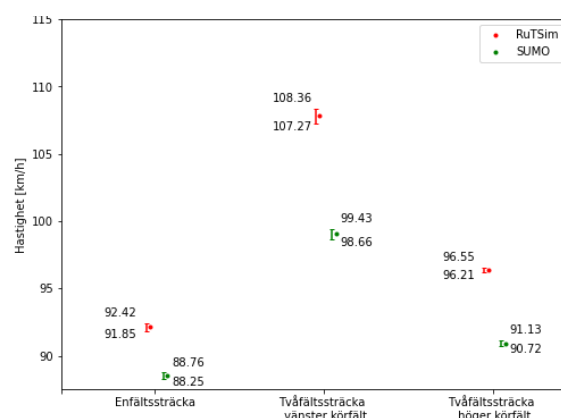


Figur 19. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för lastbilar utan släp

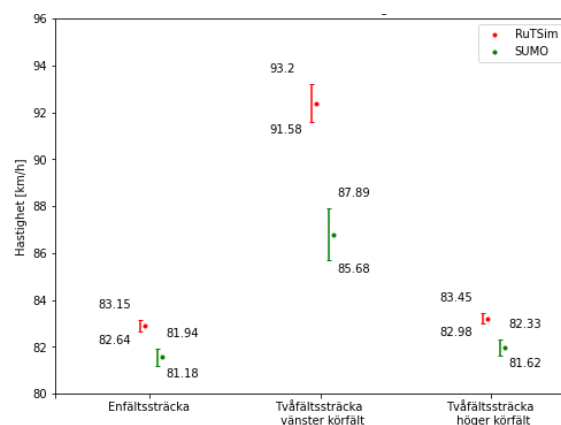


Figur 21. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för lastbilar med släp

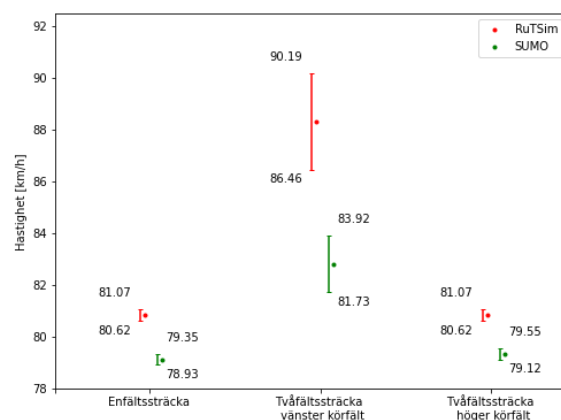
Basmodell



Figur 18. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (basmodell) samt RuTSim för personbilar



Figur 20. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (basmodell) samt RuTSim för lastbilar utan släp



Figur 22. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (basmodell) samt RuTSim för lastbilar med släp

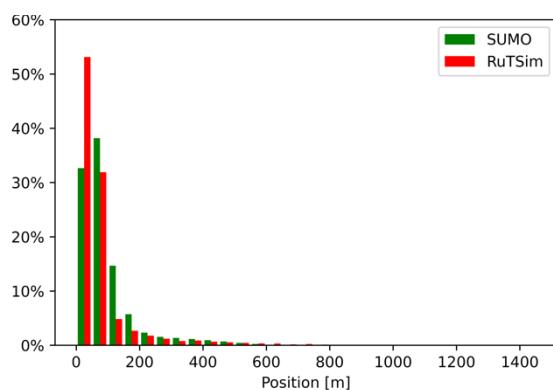
Konfidensintervallen tydliggör ytterligare hur det är möjligt att med hjälp av parameterjusteringar uppnå en högre medelhastighet, och då främst på enfältssträckan och det högra körfältet på tvåfältssträckan, för alla fordonstyper. Det finns dock fortfarande en markant avvikelse när det kommer till hastigheten i det vänstra körfältet vilket styrker det tidigare påståendet; att fordonen i SUMO inte ökar sin önskade hastighet under omkörning. Det tåls även att upprepas att konfidensintervallen endast visar hastighetsspridningen för en sträcka på 50 meter på mitten av körfälten. För att kunna dra slutsatser om hastighetsbeteendet på resterande delsträckor används jämförelsemåttet medelhastighet var 100:e meter, se figur 13–16.

Tabell 7. Omkörningsstatistik för den parameterjusterade modellen i SUMO, basmodellen i SUMO samt modellen i RuTSim

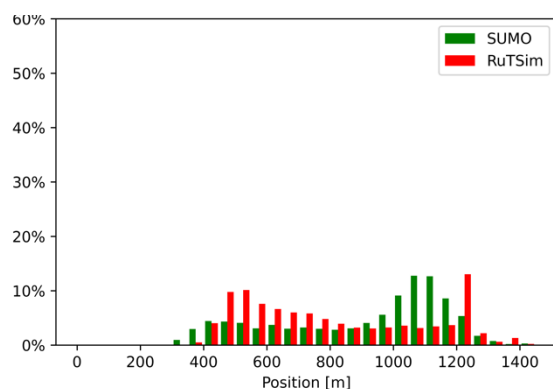
	SUMO parameterjusterad modell	SUMO basmodell	RuTSim
Antal omkörda fordon	375	280	349
Antal fordon som genomför och lyckas med en omkörning	296	202	292
Misslyckade omkörningar	51	19	63

Tabell 7 ger en uppfattning om effekten som parameterjusteringarna har på fordonens benägenhet att köra om. Genom att sänka värdet på parametern *lcStrategic* lägger fordonen inte lika stor vikt vid att ligga kvar i körfältet som fortsätter in på enfältssträckan, vilket indirekt leder till en större benägenhet att köra om. Att antalet fordon som försöker köra om nu är betydligt högre och även mer i linje med antalet i RuTSim kan till viss del förklara den ökade hastigheten som observerats i graferna för medelhastighet var 100:e meter och konfidensintervallen över medelhastigheterna vilket även nämnts i styckena ovan.

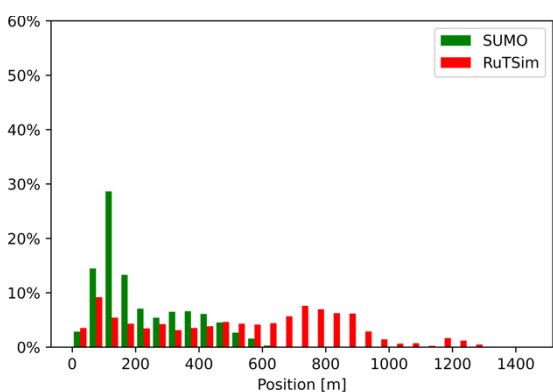
Parameterjusterad modell



Figur 23. Startposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim

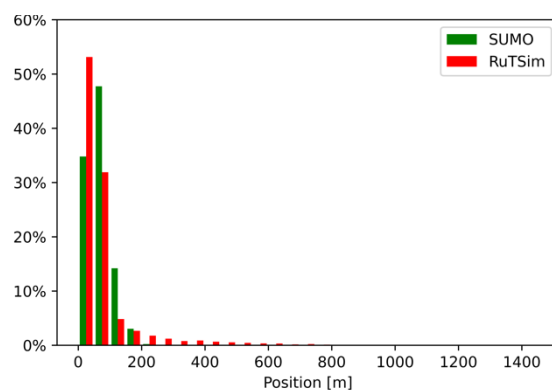


Figur 25. Slutposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim

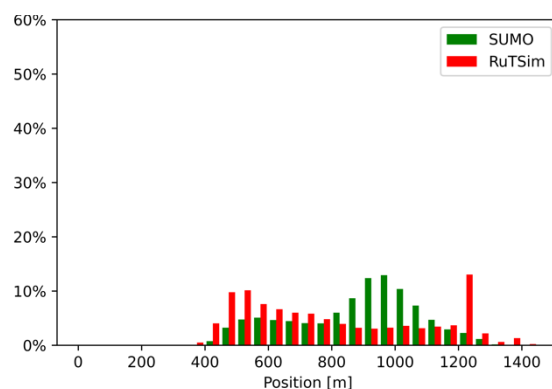


Figur 27. Startposition körfälsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim

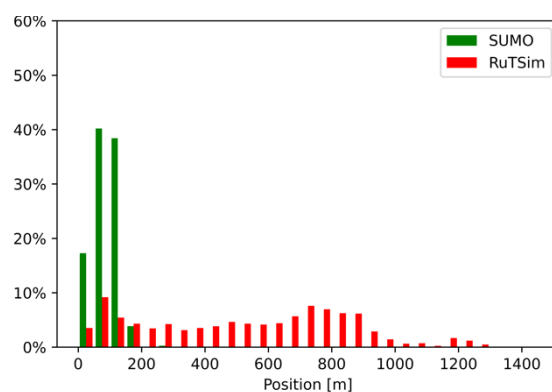
Basmodell



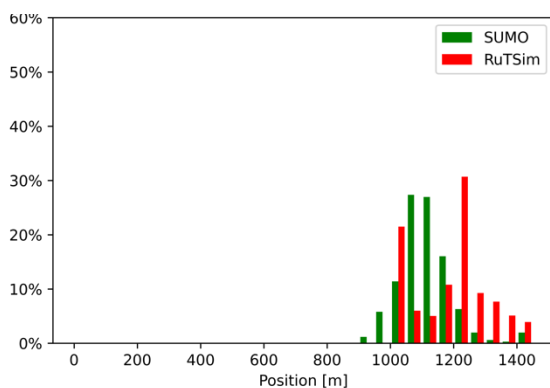
Figur 24. Startposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (basmodell) samt RuTSim



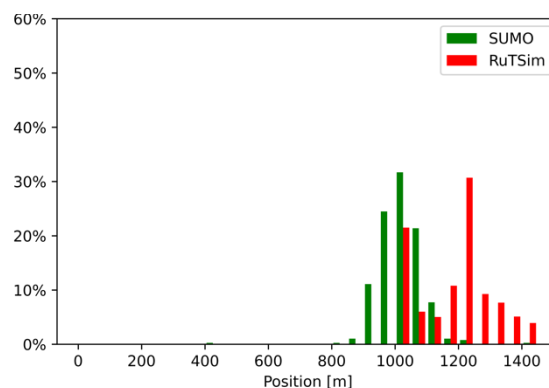
Figur 26. Slutposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (basmodell) samt RuTSim



Figur 28. Startposition körfälsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (basmodell) samt RuTSim



Figur 29. Slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim



Figur 30. Slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (basmodell) samt RuTSim

Jämförelsen av omkörningarnas start- och slutposition framhäver otillräckligheten i att endast justera befintliga parametrar i SUMO för att kunna modellera 2+1-vägar. Jämfört med basmodellen är den justerade modellen aningen bättre på att spegla vävningsbeteendet i RuTSim. Fordonen är i den justerade modellen mer benägna att påbörja en omkörning senare in i nätet än vad fordon i basmodellen är. Det finns fortfarande en stor avvikelse när det kommer till slutpositionen för omkörningar – både lyckade (figur 25 & 26) och misslyckade (figur 29 & 30), även om det går att hävda att den parameterjusterade modellen uppvisar ett beteende som är aningen mer likt beteendet i RuTSim. Även detta bekräftar antagandet kring vävningen i avsnitt 6.5, i och med att fordonen i SUMO inte kan uppvisa ett vävningsbeteende som överensstämmer med det i RuTSim.

En potentiell förklaring till att vävningen skiljer sig åt mellan programvarorna är sättet som avståndet till körfältets slut tas i beaktning av fordonen som kör om. I RuTSim till skillnad från SUMO beror fordonens vävningsbeteende på vilken zon fordonet befinner sig i där vävningen sker på ett mer forcerat sätt desto längre in på omkörningssträckan som zonen förekommer, se avsnitt 5.5.3 för en mer utförlig beskrivning. Detta kan förklara den höga andelen körfältsbyten 1250 meter in på omkörningssträckan i RuTSim, som kan ses i figur 25, 26, 29 och 30. I SUMO verkar behovet av ett körfältsbyte mer följa en linjär ökning desto närmare slutet på körfältet som fordonen kommer.

7.2.3 Sammanfattning

Till att börja med kan det konstateras att det inte är tillräckligt att endast justera befintliga parametrar i SUMO för att programvaran ska kunna simulera 2+1-vägar på ett sätt som överensstämmer med hur det görs i RuTSim. Antagandena i avsnitt 6.5 kan bekräftas; fordonen i SUMO kan varken uppvisa ett vävningsbeteende eller ett hastighetsbeteende under omkörningar som överensstämmer med beteendena i RuTSim. Den uppenbart tydligaste skillnaden mellan simuleringarna är det faktum att fordon i RuTSim ökar sin önskade hastighet både för att jaga ifatt och för att köra om ett framförvarande fordon, vilket fordon i SUMO inte gör.

Parameterjusteringen visar dock att det är möjligt att få SUMO att bättre efterlikna RuTSim genom använda andra parametervärden än vad som annars är default. Det är främst fordonens benägenhet att köra om som går att påverka genom att justera parametrar. Justeringarna som har behövt göras för att omkörningsstatiken ska bättre överensstämja mellan programvarorna har dock inte haft med omkörningsbeteendet i sig att göra utan istället med benägenheten att ligga i ett specifikt körfält som senare tar slut (dött körfält). Det här innebär att justeringarna som gjorts kan vara svåra att överföra till andra vägsträckor. Ett problem är att tolkningen av parametern som ändras inte är direkt kopplad till anledningen bakom justeringen. Exempelvis så justeras *lcStrategic* för att öka benägenheten att köra om genom att minska benägenheten att ligga kvar i det strategiskt korrekta körfältet. Detta försvårar tillämpningen av SUMO på 2+1-vägar.

Det bör även upprepas att det finns fler än ett sätt att uppnå en omkörningsstatistik i SUMO som är likartad den i RuTSim. Gemensamt är dock behovet av att sänka vikten som fordonen lägger vid att befinna sig i det körfält som senare fortsätter, det vill säga höger körfält. Se *Appendix A* för ett annat exempel där alternativa parameterjusteringar fått SUMO att liknande sätt efterlikna RuTSim.

8. Källkodsmodifiering

Resultatet i det föregående kapitlet visar att förarbeteendet på en 2+1-väg i RuTSim inte kan efterliknas fullt ut i SUMO med endast parameterjustering. Resultatet tyder på att antagandena stämmer, det vill säga att fordonen inte uppvisar en tillräckligt hög önskad hastighet under omkörningen samt att vävningsbeteendet avviker från det som observerats i RuTSim. För att undersöka huruvida en modifierad källkod kan förbättra överensstämmelsen mellan RuTSim och SUMO kommer därmed ett av de avvikande förarbeteendena att justeras genom ändringar i SUMO:s källkod.

För att förstå om den modifierade modellen presterar bättre i avseendet att efterlikna RuTSim kommer även en parameterjustering att genomföras efter modifieringen. På så sätt kan den icke-modifierade SUMO-modellen jämföras mot den modifierade SUMO-modellen. Fokus ligger även här på att identifiera eventuella indirekta effekter som källkodsmodifieringen har på modellen.

Parameterjustering syftar även till att avgöra om förändringen i källkoden är tillräcklig för att SUMO ska kunna simulera 2+1-vägar på ett sätt som överensstämmer med modelleringen i RuTSim, eller om det fortfarande finns förarbeteenden som avviker mellan simuleringarna. Resultatet från dessa simuleringar kan även bidra med en indikation om vilka faktorer det är som potentiellt gör att förarbeteendet fortfarande skiljer sig åt.

8.1 Genomförd förändring

På grund av projektets omfattning kommer endast en del av förarbeteendet att modifieras i SUMO:s källkod. I och med detta kommer fokus att ligga på att förändra endast en av de två antagandena som definierats i avsnitt 6.5 och bekräftats i det tidigare kapitlet. Resultatet i avsnitt 7 gör det tydligt att modellen i SUMO inte innefattar en ökning av den önskade hastigheten under omkörningen. Resultatet tyder även på att vävningen i SUMO inte modelleras på ett sätt likt det i RuTSim. Jämförelsen av vävningen är mer av kvalitativ karaktär och det är därmed även svårare att på ett definitivt sätt fastställa hur det beteendet skiljer sig åt mellan modellerna. På grund av detta kommer källkodsmodifieringen att utgöras av en justering av fordons önskade hastighet under omkörning, och inte utav några förändringar som direkt påverkar vävningen.

8.1.1 Logiken bakom förändringen

Källkodsmodifieringen som gjorts består av en if-sats som ökar fordonens parameter *speedFactor* när de byter till omkörningsfältet, för att därefter justeras tillbaka när de byter tillbaka till det högra körfältet. Parametern *speedFactor* avgör ett fordons önskade hastighet utifrån vägens hastighetsgräns (*speedLimit*) och sätts initialt för varje fordon utifrån en trunkerad normalfördelning specifikt för fordonstypen, se tabell 2 och avsnitt 6.2 (SUMO, 2021). Sambandet för hur den nya önskade hastigheten sätts beskrivs som,

$$maxSpeed = MIN(speedFactor \cdot speedLimit, vTypeMaxSpeed) \quad (8)$$

då *maxSpeed* i det här fallet är synonymt med den önskade hastigheten. Då *vTypeMaxSpeed*, – fordonstypens specifika maximala hastighet – är odefinierad är det bara *speedFactor* och *speedLimit* som avgör fordonets önskade hastighet.

If-satsen som modifieringen bygger på ökar *speedFactor* för varje fordon som påbörjar en omkörning med en faktor som baseras på fordonstypen. Faktorn tas även fram så att ökningen av den önskade hastigheten är densamma inom fordonstypen. Det här betyder att varje fordon inom en fordonstyp ges en lika stor absolut ökning, oberoende av tidigare maxhastighet och *speedFactor*. Det exakta värdet på hastighetsökningen inom varje fordonstyp bestäms under parameterjusteringssteget, vilket blev 8 km/h för PB, 3 km/h för LBU och 3 km/h LBS. Se *Appendix C* för faktisk kod som källkodsmodifieringen består av.

8.2 Effekt av källkodsmodifiering

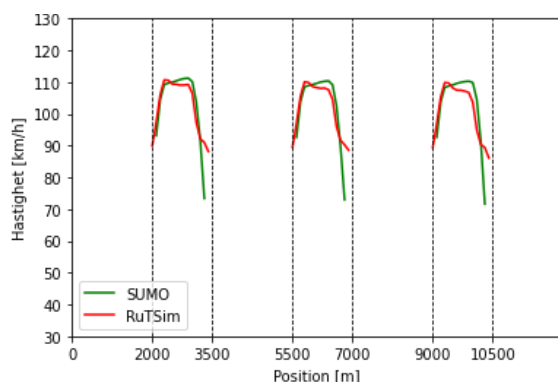
Avsnittet är uppdelat i två delar där den första delen består av jämförelser mellan simuleringar av den källkodsmodifierade modellen och simuleringar av den omodifierade modellen. Båda modellerna har under den första jämförelsen samma parametervärden. Parametervärdena som används är även samma som presenteras under avsnitt 7 och finns därmed att se i tabell 6. Den andra jämförelsen under det här avsnittet är mellan en modifierad modell med nya parameterjusteringar och en modifierad modell utan nya justeringar, det vill säga med samma parametervärden som används under den första jämförelsen.

8.2.1 Jämförelse modifierad modell och omodifierad modell

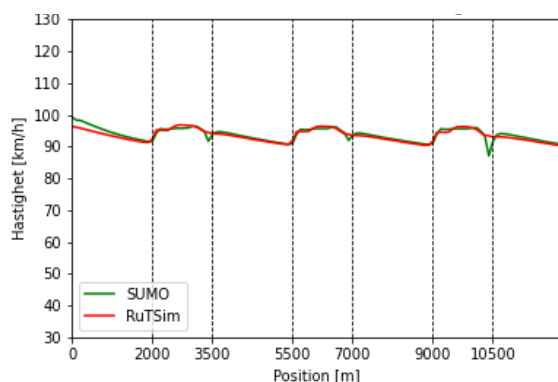
Nedan visas effekten av hastighetsökningen som källkodsmodifieringen ger upphov till, genom att jämföra den modifierade modellen mot den omodifierade modellen givet samma parametervärden. Detta medför att figurerna i den högra kolumnen kallad ”Omodifierad modell” är identiska med figurerna i den vänstra kolumnen i avsnitt 7.2.2.

Jämförelsemått

Modifierad modell

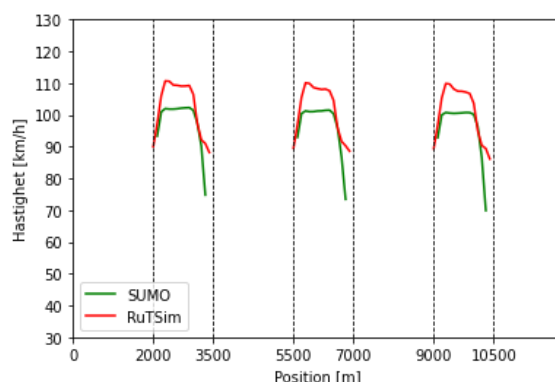


Figur 31. Medelhastighet för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim för PB i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)

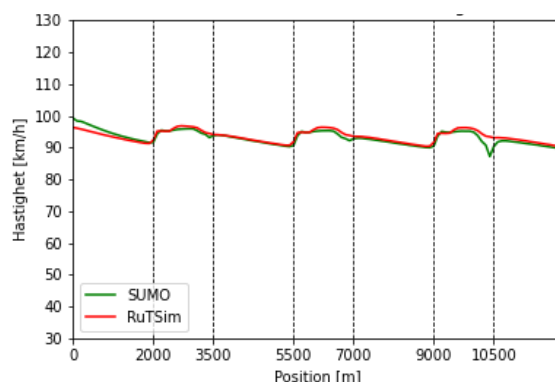


Figur 33. Medelhastighet SUMO (modifierad modell) samt RuTSim för PB på enfältssträckan och i det högra körfältet

Omodifierad modell



Figur 32. Medelhastighet för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim för PB i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



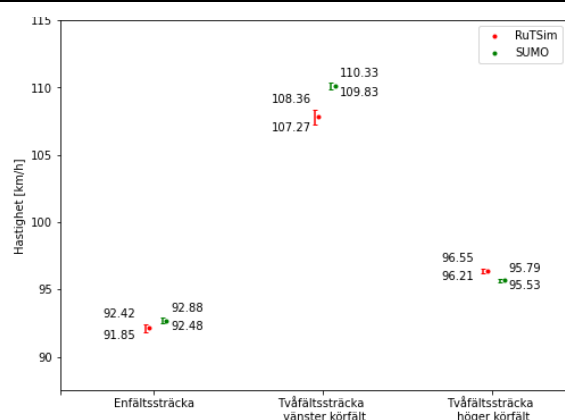
Figur 34. Medelhastighet för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim för PB på enfältssträckan och i det högra körfältet

Figur 31 gör det tydligt att källkodsmodificeringen ökar överensstämmelsen mellan SUMO och RuTSim vad gäller hastighetsbeteendet. Den ökade önskade hastigheten som fordon i SUMO får från det tillfälle då de påbörjar en omkörning överensstämmer väl med hur ökningen ser ut i RuTSim. Källkodsmodificeringen verkar dessutom påverka fordonens beteende i slutet av omkörningsfältet, där hastighetsminskningen i den modifierade modellen är kraftigare. Inbromsningen är dock inte till en hastighet som är lägre än vad fordon i den omodifierade modellen saktar in till (ca 75 km/h, se figur 31 och 32), utan det är främst skillnaden mellan högsta och lägsta hastigheten som gör att hastighetsminskningen nu är större. Att hastigheten i slutet av omkörningsfältet fortfarande går ner till en viss nivå som är lägre än i RuTSim tyder på att vävningsbeteendet är opåverkat av källkodsmodificeringen. Detta är väntat eftersom modifieringen endast påverkar fordons önskade hastighet.

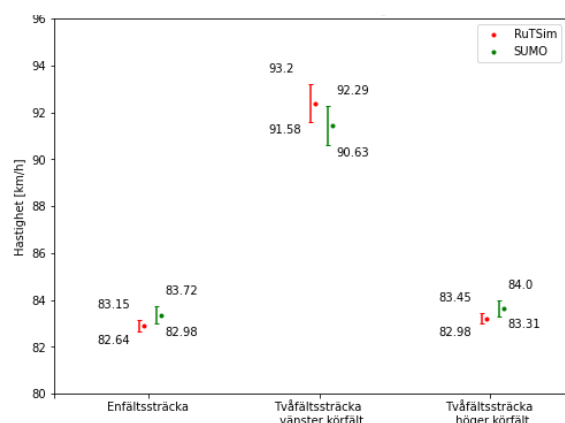
Även i detta fall är antalet lastbilar i det vänstra körfältet för lågt för att ge en representativ bild av hur medelhastigheten varierar över sträckan. På enfältssträckan och i det högra körfältet på omkörningssträckan är hastigheten för LBU och LBS nästintill oförändrad. Det

här är anledningarna till att dessa grafer även har uteslutits ur det här avsnittet. För att ta del av dessa, se *Appendix A*.

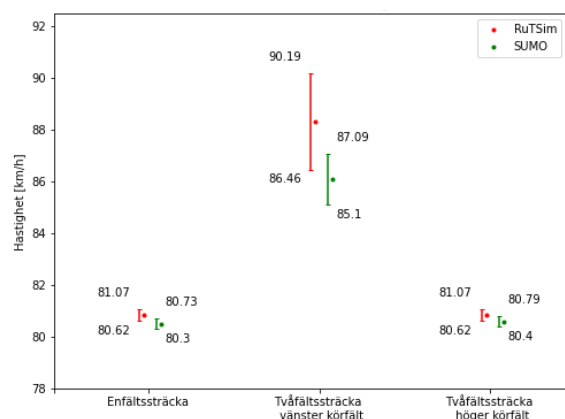
Modifierad modell



Figur 35. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim för PB

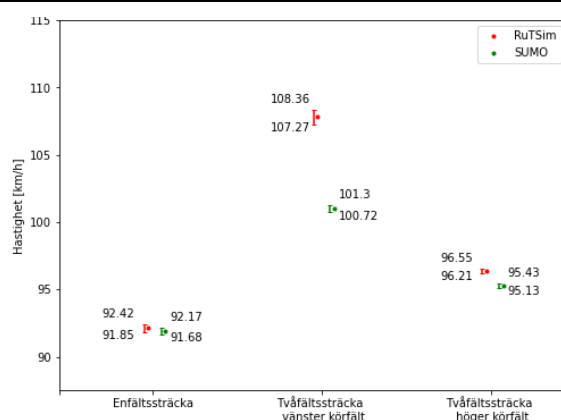


Figur 37. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim för LBU

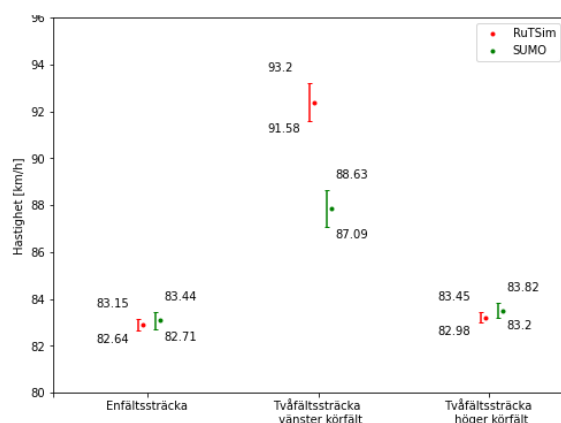


Figur 39. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim för LBS

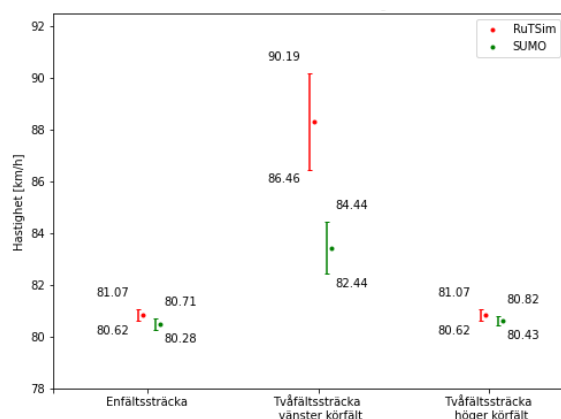
Omodifierad modell



Figur 36. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim för PB



Figur 38. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim för LBU



Figur 40. Konfidensintervall för medelhastigheten för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim för LBS

Konfidensintervallen i figur 35–40 styrker resonemanget angående den ökade medelhastighet, som presenterades under graferna för medelhastigheten var 100:e meter, figur 31–34. Hastigheten i det vänstra körfältet är efter modifieringen av källkoden i SUMO mer i linje med hastigheten i RuTSim. Att intervallet för PB från simuleringarna i SUMO till och med är högre än vad det är för simuleringarna i RuTSim betyder inte nödvändigtvis att hastighetsökningen är större i SUMO. Eftersom intervallen endast beror på hastigheten på mitten av tvåfälssträckan så säger det inget om hur hastigheten sett ut innan eller efter. Figur 31 visar att den faktiska skillnaden mellan hastighetsökningarna inte är lika stor som intervallet antyder.

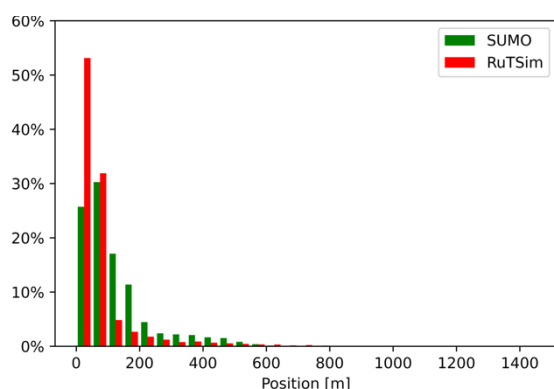
Tabell 8. Omkörningsstatistik för den modifierade och den omodifierade modellen i SUMO, samt modellen i RuTSim

	SUMO modifierad modell	SUMO omodifierad modell	RuTSim
Antal omkörda fordon	454	375	349
Antal fordon som genomför och lyckas med en omkörning	332	296	292
Misslyckade omkörningar	5	51	63

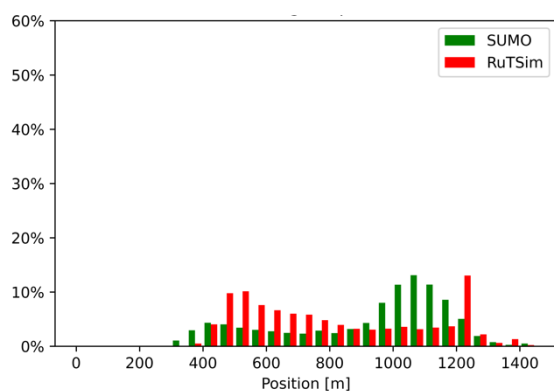
En tydlig effekt av den ökade önskade hastigheten under omkörning är förändringen av andelen lyckade och misslyckade omkörningar som ses i tabell 8. Fordon är i den modifierade modellen betydligt mycket mindre troliga att misslyckas med omkörningar. Detta kan förklaras med det faktum att fordon som ökar sin hastighet under omkörning även har en större chans att hinna köra om fordonet framför.

Fordonens benägenhet att faktiskt köra om verkar däremot inte påverkas av källkodsmodifieringen. Detta kan ses genom att jämföra antalet fordon som försöker köra om och antingen lyckas eller misslyckas, det vill säga *Antalet fordon som genomför och lyckas med en omkörning* tillsammans med *Misslyckade omkörningar*. Modellerna har här ett relativt likartat resultat; 337 jämfört med 347 fordon som påbörjar en omkörning.

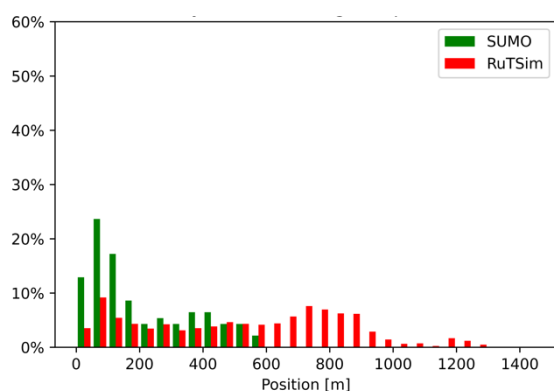
Modifierad modell



Figur 41. Startposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim

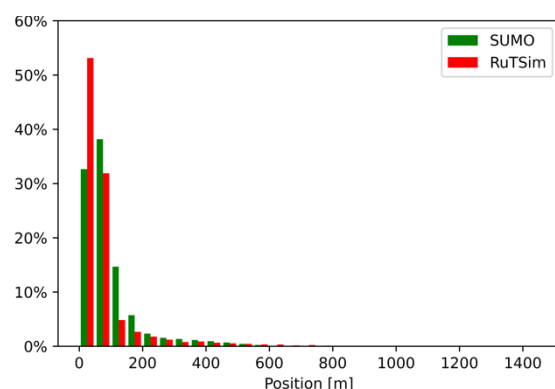


Figur 43. Slutposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim

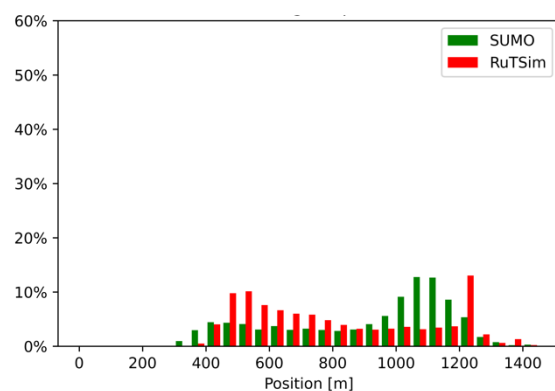


Figur 45. Startposition körfälsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim

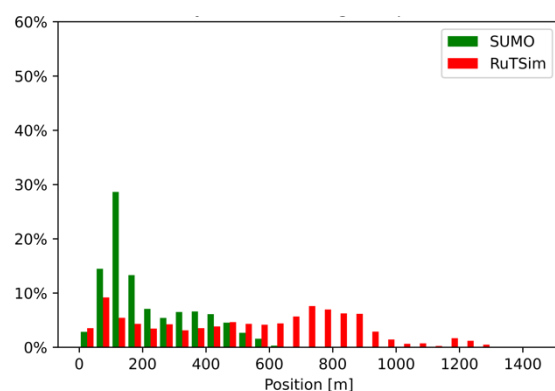
Omodifierad modell



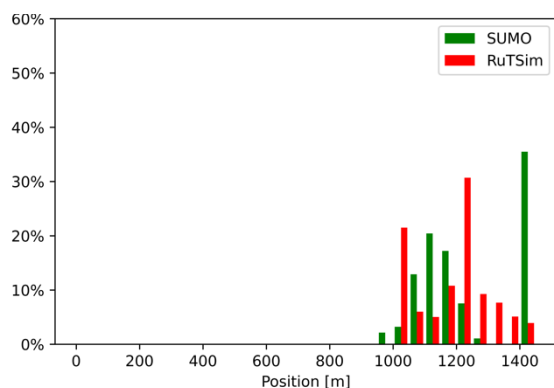
Figur 42. Slutposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim



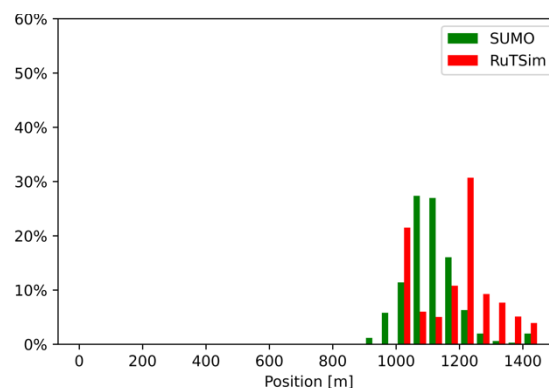
Figur 44. Slutposition körfälsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim



Figur 46. Startposition körfälsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim



Figur 47. Slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (modifierad modell) samt RuTSim



Figur 48. Slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (omodifierad modell) samt RuTSim

Figur 41–48 bekräftar ytterligare källkodsmodifieringens obefintliga påverkan på vävningsbeteendet. Det finns ingen uppenbar skillnad mellan den modifierade och den omodifierade modellen vad gäller start- och slutposition för körfältsbyten – förutom slutpositionen vid misslyckad omkörning. Då den modifierade modellen ger upphov till relativt få misslyckade omkörningar ska det här jämförelsemåttet tolkas med viss försiktighet. Att en större andel fordon väver tillbaka sent i den modifierade modell finns det dock relativt starka belägg för. Den större frekvensen av sena misslyckanden kan förklaras med den ökade hastigheten, då det är en större risk att fordon hinner komma en längre sträcka innan en lyckad vävning genomförs. Att det här problemet inte återfinns i simuleringarna i RuTSim i lika hög utsträckning, trots att hastighetsökningen även inkluderas, tyder på att fordonen bättre kan hantera sena vävningar. Detta tydliggör återigen en viktig skillnad mellan RuTSim och SUMO – vävningsbeteendet i RuTSim grundar sig på den zon som fordonet befinner sig i. Fordon kan väva tillbaka till det högra körfältet forcerat och därmed minska risken att komma till slutet av det vänstra körfältet innan en lyckad vävning är genomförd.

8.2.2 Jämförelse av olika parameterjusteringar för modifierad modell

Resultaten under avsnitt 8.2.1 visar hur modifieringen i SUMO:s källkod leder till en ökad hastighet för fordon som ligger i det vänstra körfältet för att köra om. Detta leder även till att fordonen är bättre på att köra om i den mån att misslyckade omkörningar inte är lika vanliga, vilket inte speglar beteendet för modellen i RuTSim. Parameterjusteringarna som etablerats under avsnitt 7 och som senare även använts för simuleringarna av den modifierade källkoden är därmed inte anpassade för den modifierade modellen. Det här medför att omkörningsstatistiken överensstämmer sämre mellan RuTSim och SUMO.

För att undersöka huruvida källkodsmodifieringen är tillräcklig för att SUMO ska kunna simulera 2+1-vägar på ett sätt som överensstämmer med RuTSim kommer därför även olika parameterjusteringar att testas för den modifierade modellen. Då det främst är omkörningsstatistiken som skiljer sig mellan den modifierade och den omodifierade modellen, som ses i tabell 8, ligger fokus på att justera parametrar på ett sätt som får statistiken att återigen relativt väl motsvara statistiken i RuTSim. Se tabell 9 för resulterande parameterjustering.

Resulterande parameterjusteringar

Tabell 9. Slutgiltiga parametervärden och dess effekter på den modifierade modellen

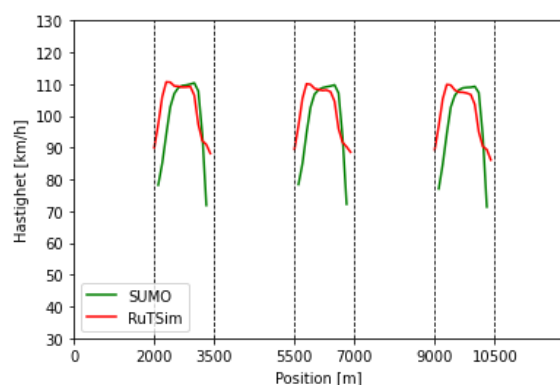
Parameter	Problem att lösa	Justering	Effekt
<i>lcStrategic</i>	Öka antalet misslyckade omkörningar	Minskar värdet från 1.0 till 0.2	Fordon blir mindre benägna att ligga kvar i höger körfält vilket ger fler omkörningar, både lyckade och misslyckade
<i>lcSpeedGain</i>	Minska antalet lyckade omkörningar	Minskar värdet från 1.0 till 0.1	Fordon blir mindre benägna att byta körfält för att kunna öka sin hastighet
<i>lcSpeedGainLookahead</i>	Öka antalet misslyckade omkörningar	Ökar värdet från 0 till 8.0	Fordon förutspår hastighetsminskningar tidigare vilket leder till tidigare beslut kring körfältsbyten
<i>sigma</i>	Fordonen kör i genomsnitt lägre än sin önskade hastighet	Minskar värdet från 0.5 till 0	Medelhastigheten för alla fordonstyper ökar

En tydlig skillnad mellan simuleringarna i SUMO och i RuTSim är att fordonen i RuTSim är mer benägna att köra om längre in på omkörningssträckan. För att öka benägenhet för detsamma i SUMO och därmed även öka risken för misslyckade omkörningar har därför *lcStrategic* justerats till ett lägre värde. För att ytterligare öka risken för misslyckade omkörningar i SUMO har även *lcSpeedGainLookahead* ökats. Detta leder till att fordon påbörjar sin omkörning tidigare, vilket i sin tur leder till att omkörningarna tar längre tid och därmed även i högre grad misslyckas. För att överlag minska antalet omkörningar har även *lcSpeedGain* minskats.

Jämförelsemått

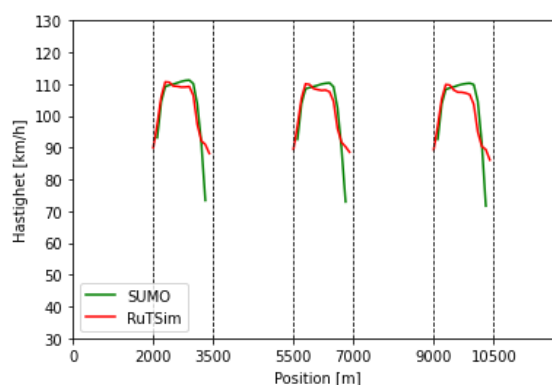
Den vänstra kolumnen står för den modifierade modellen med parametervärdena från tabell 9, medan den högra kolumnen står för den modifierade modellen från avsnitt 8.2.1. Detta medför att figurerna i den högra kolumnen nedan är identiska med figurerna i den vänstra kolumnen i avsnitt 8.2.1.

Ny parameterjusterad
modifierad modell

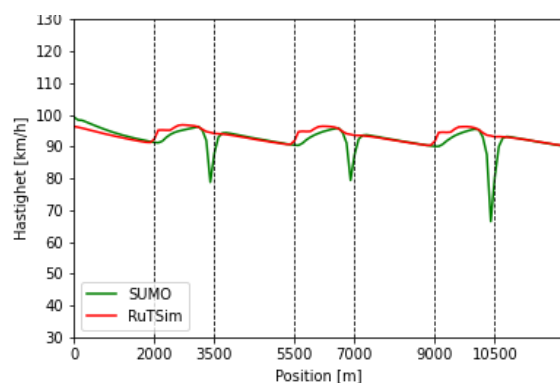


Figur 49. Medelhastighet för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim för PB i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)

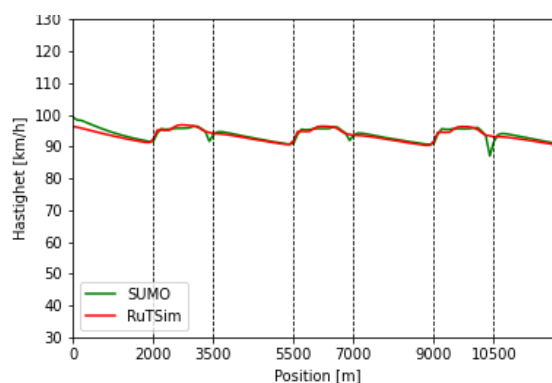
Föregående parameterjusterad
modifierad modell



Figur 50. Medelhastighet för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim för PB i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



Figur 51. Medelhastighet för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim för PB på enfältssträckan och i det högra körfältet



Figur 52. Medelhastighet för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim för PB på enfältssträckan och i det högra körfältet

Den nya parameteruppsättningen har ingen tydlig påverkan på fordonens maximala hastighet. Däremot har parametersättningen en effekt på fordonens hastighet i början och i slutet av omkörningssträckan, både i det högra och det vänstra körfältet. De uppdaterade parametervärdena är relativt extrema jämfört med tidigare justeringar. Detta leder till att det är betydligt mycket ovanligare att påbörja en omkörning tidigt på omkörningssträckan, se figur 53. Det här skulle kunna förklara den betydligt mycket långsammare hastigheten i början av det vänstra körfältet från simuleringarna med de uppdaterade parametrarna. Den minskade benägenheten att köra om tidigt leder troligen till att omkörningar endast görs av fordon som tvingas hålla en betydligt mycket lägre hastighet än deras önskade hastighet på grund av framförvarande fordon. Dessa fordon har därmed även en relativt låg hastighet när de väl byter körfält. Detta kan förklara den låga hastigheten i början av det vänstra körfältet i figur 49.

Den nya parameteruppsättningen ger även upphov till en betydande hastighetsminskning i slutet av det högra körfältet på omkörningssträckan, se figur 49. Att fordon i högre grad väver in sent, se figur 55 och 59, skulle kunna vara en bidragande faktor till minskningen. Ett större

antal fordon som behöver väva in från det vänstra körfältet påverkar även fordon i det högra körfältet i och med fordonens samarbetsförmåga. Fordon i det högra körfältet anpassar sin hastighet för att hjälpa fordon i det vänstra körfältet att väva in.

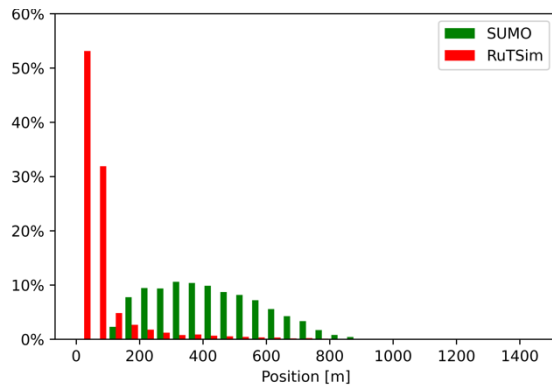
De uppdaterade parametrarna har inte haft någon större påverkan på konfidensintervallen. Dessa har därför uteslutits ur avsnittet och istället inkluderats i *Appendix A*.

Tabell 10. Omkörningsstatistik för modifierad SUMO-modell – med den nya samt föregående parameteruppsättningen, samt modellen i RuTSim

	SUMO nya parametrar	SUMO föregående parametrar	RuTSim
Antal omkörda fordon	339	454	349
Antal fordon som genomför och lyckas med en omkörning	261	332	292
Misslyckade omkörningar	70	5	63

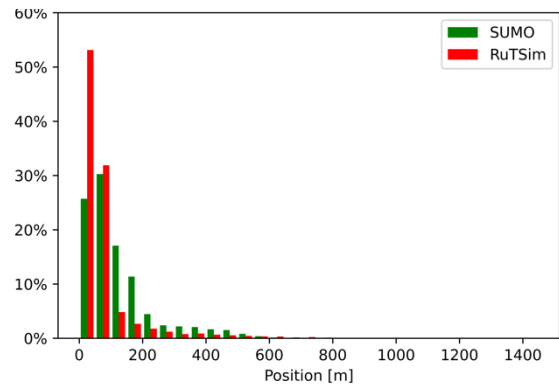
Den nya parameteruppsättningen har medfört en omkörningsstatistik som bättre överensstämmer med statistiken i RuTSim, se tabell 10. Att justera parametrar för att få till en bättre överensstämmelse har dock varit mer krävande för den modifierade modellen än för den omodifierade. Det har krävts mer extrema justeringar av parametervärdena för att få till en relativt god överensstämmelse. Justeringarna har dessutom haft en negativ inverkan på både vävningen och hastighetsbeteendet vilket vi kan se effekter av i graferna för medelhastigheten var 100:e meter (figur 49 & 51) och graferna för start- och slutposition för omkörning (figur 53 & 55).

Ny parameterjusterad
modifierad modell

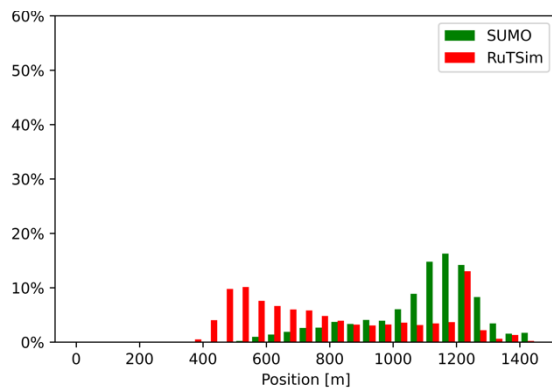


Figur 53. Startposition körfältsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim

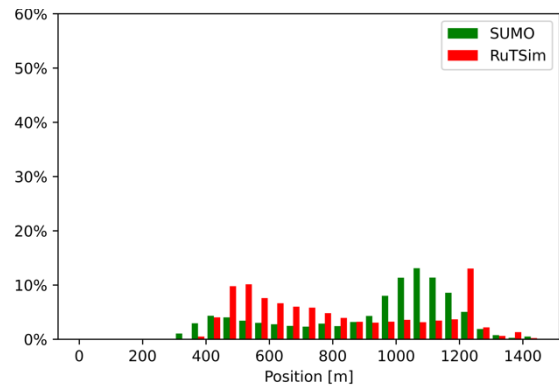
Föregående parameterjusterad
modifierad modell



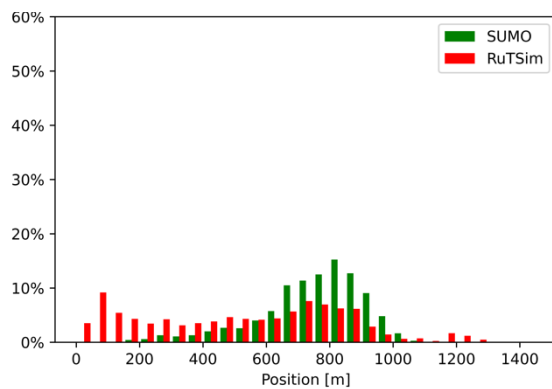
Figur 54. Startposition körfältsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim



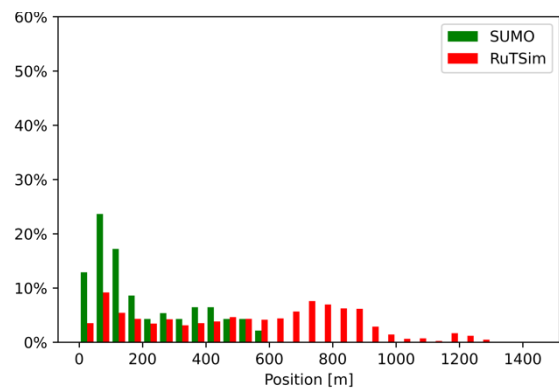
Figur 55. Slutposition körfältsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim



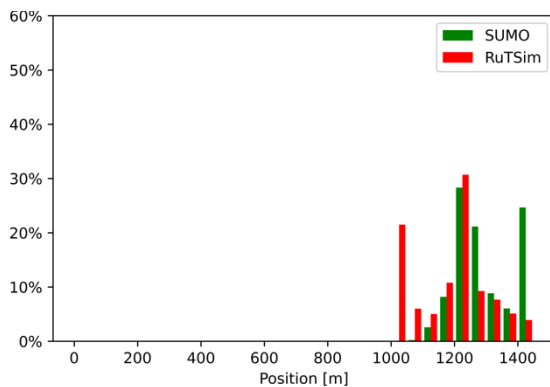
Figur 56. Slutposition körfältsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim



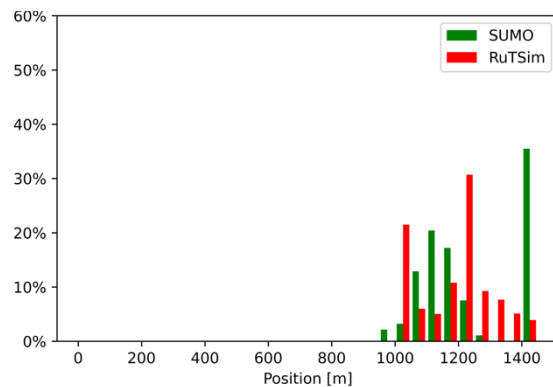
Figur 57. Startposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim



Figur 58. Startposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim



Figur 59. Slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim



Figur 60. Slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim

Parametrarna som ingår i den uppdaterade versionen har en stark inverkan på fordonens benägenhet att byta körfält. Detta blir som tydligast i figur 53 och 57 som skiljer sig väsentligt från figur 54 och 58. Detta belyser ytterligare svårigheten i att justera parametrarna i SUMO för att samtliga jämförelsemått ska ge resultat i likhet med resultaten från simuleringarna i RuTSim. För att få en omkörningsstatistik som motsvarar den i RuTSim kommer andra beteenden att göras avkall på.

8.2.3 Sammanfattning

Genom att lägga till en temporär hastighetsökning för fordon som genomför en omkörning har hastighetsbeteendet i SUMO bättre kunnat efterlikna hastighetsbeteendet i RuTSim. Fordon i den modifierade modellen håller en hastighet som överensstämmer med fordon i RuTSim över nästintill hela sträckan. Det avvikande vävningsbeteendet finns dock kvar vilket även kan förklara skillnaderna som finns kvar i de jämförelsemått som beskriver hastigheten.

Fordon i simuleringar av den modifierade källkoden är, på grund av förändringarna i källkoden, mindre troliga att misslyckas med sina omkörningar. Fordonen har dessutom större chans att köra om fler fordon än tidigare. I och med detta skiljer sig omkörningsstatistiken för den modifierade modellen mer från RuTSim än vad den omodifierade modellen gjort. Genom att justera parametrarna för den modifierade modellen har en högre grad av överensstämmelse av omkörningsstatistiken kunnat uppnås. De parameterjusteringar som krävts för detta har dock varit relativt extrema och därmed även påverkat andra delar av modellen så som vävningsbeteendet.

9. Sammanfattande slutsats

Resultaten i kapitel 6–8 visar att SUMO kan simulera trafik på 2+1-vägar till viss del men att det saknas viktiga mekanismer kopplade till förarbeteendet. Den första identifierade skillnaden mellan SUMO och RuTSim rör hastighetsbeteendet innan och under omkörning. Till skillnad från RuTSim ökar fordonen i SUMO inte sin önskade hastighet när de jagar ifatt och kör om långsammare fordon. Resultatet i studien visar också att vävningsbeteendet skiljer sig mellan programvarorna. Fordon i SUMO har inte samma möjlighet att tvinga igenom ett sent körfältsbyte. Benägenheten att byta tillbaka till det högra körfältet och hur detta förändras över sträckan skiljer sig också mellan RuTSim och SUMO. Resultatet tyder på att det i RuTSim sker en ökning av benägenheten att väva tillbaka vid diskreta punkter, medan ökningen modelleras på ett mer kontinuerligt sätt i SUMO.

Genom att lägga till en temporär ökad önskad hastighet för fordon som genomför en omkörning har hastighetsbeteendet i SUMO bättre kunnat efterlikna hastighetsbeteendet i RuTSim. Den genomförda källkodsmodificeringen är dock anpassad efter det specifika fallet som undersöks i studien. För att SUMO ska kunna simulera 2+1-vägar fullt ut skulle modifieringen av hastighetsbeteendet behöva göras på ett mer heltäckande sätt. Svaren på studiens frågeställningar lyder därmed:

- SUMO kan till viss del simulera 2+1-vägar genom endast parameterjustering. Det saknas dock viktiga mekanismer kopplade till hastighets- och vävningsbeteendet.
- Fordon i SUMO ökar inte sin önskade hastighet under omkörning på ett sätt som överensstämmer med beteendet på 2+1-vägar. Även benägenheten och möjligheten för fordon att byta körfält klarar SUMO inte av att modellera likt beteendet på 2+1-vägar.
- En temporär ökning av den önskade hastigheten kan läggas till i SUMO genom att modifiera källkoden för programvaran så att förarbeteendet i högre grad överensstämmer med tidigare forskning och uppmätt data på 2+1-vägar.

Svårigheten att fullständigt fånga förarbeteendet på 2+1-vägar i SUMO kan bland annat förklaras med det faktum att parameterjusteringarna i många fall är allt för binära. En justering som förbättrar modellens överensstämmelse med RuTSim i ett avseende påverkar ofta en annan del av modellen negativt. En justering görs helt enkelt ofta på bekostnad av en annan. Alla parametrar i SUMO är inte anpassade efter 2+1-vägar vilket inte är konstigt då programvaran är framtagen för andra vägtyper. För att uppnå en viss effekt kan därför justeringar behöva göras på parametrar som egentligen fyller ett annat syfte men som indirekt ger ett önskvärt resultat. Hade parametrarna varit bättre anpassade efter 2+1-vägar hade troligen även problemet med att justeringar görs på bekostnad av andra kunnat minimeras.

En avgörande skillnad mellan SUMO och RuTSim är även de underliggande beslutsstegen som leder fram till en omkörning. I SUMO är omkörningar en effekt av att fordon byter körfält för att sluta vara hindrade, och genom att byta körfält och därmed kunna köra snabbare än framförvarande fordon kommer framförvarande fordon att passeras om inte väg- eller trafikförhållanden ändras. Om vänster körfält däremot tar slut måste fordonen i vänster körfält väva tillbaka och kommer då att göra det på ett liknande sätt som vid en påfartsramp

där de vill hitta en lucka i höger körfält (oavsett om passeringen är färdig eller inte). En omkörning är således mer en konsekvens av en vilja att byta körfält för att köra närmare sin önskade hastighet än ett aktivt val att genomföra en omkörning.

9.1 Fortsatta studier

Som nämnt ovan har det identifierats en skillnad i hur SUMO och RuTSim modellerar omkörningar. För att SUMO bättre ska kunna simulera 2+1-vägar skulle vävningsbeteendet behöva förändras. Vidare studier behöver göras för att undersöka om det är möjligt att modellera vävningen på ett liknande sätt som i RuTSim. I RuTSim baseras fordonens vävningsbeteende på vilken zon i omkörningsfältet fordonen befinner sig i. Den sista av de tre zonerna i RuTSim, närmast slutet på omkörningsfältet, tillåter att fordon genomför ett så kallat forcerat körfältsbyte. Att fordon kan genomföra forcerade körfältsbyten leder troligen till att fordon inte behöver sakta in lika mycket för att kunna väva tillbaka till det högra körfältet. Skulle fordon i SUMO även kunna genomföra forcerade körfältsbyten skulle troligen överensstämmelsen mellan programvarorna bli ännu bättre.

Återigen bör det poängteras att det finns brister i hur implementeringen av den temporära hastighetsökningen är gjord i SUMO under källkodsmodifieringssteget. I RuTSim baseras exempelvis de beslut som ett fordon tar i omkörningsfältet på dess tidigare lägre önskade hastighet, medan besluten för fordon i SUMO till följd av källkodsmodifieringen baseras på den nya ökade önskade hastigheten. Det var inte möjligt med tanke på studiens begränsade omfång att göra en mer djupgående lösning än den som finns presenterad i rapporten. Med det sagt, rekommenderas det för fortsatta studier ytterligare undersökning och modifiering av de förarbeteendemodeller som SUMO består av. Dels att arbeta vidare med att implementera en mer heltäckande lösning för hastighetsökningen som nämnt ovan, men framförallt behöver LC-modellen undersökas för att få en bättre fungerande vävning.

Det ska även tilläggas att det hade varit önskvärt att öka generaliserbarheten av rapportens resultat genom att testa fler utformningar av 2+1-vägar samt för olika trafikflöden. Det viktigaste för att öka generaliserbarheten i både den här studien och andra simuleringsstudier på 2+1-vägar är dock mängden mätdata. Det finns främst ett behov av en mer detaljrik data där exempelvis individuella fordons hastighetsförändring över hela sträckan kan avgöras på ett mer exakt sätt.

Referenser

- Alvarez Lopez, P., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., Wiessner, E. 2018. Microscopic Traffic Simulation using SUMO. I: *2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC)*. Maui, Hawaii, USA 4–7 november, 2575–2582. doi: 10.1109/ITSC.2018.8569938.
- Bergh, T., Remgård, M., Carlsson, A., Olstam, J., Strömgren, P. 2016. 2+1-roads Recent Swedish Capacity and Level-of-Service Experience. *Transportation Research Procedia* 15: 331–345. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.06.028>
- Bergqvist, J. & Runn, J. 2014. *Hastighetsflödessamband för glesa 2+1-vägar*. Diss, Linköpings universitet: Institutionen för teknik och naturvetenskap. <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-110899>
- Bernhardsson, V. & Olstam, J. 2017a. Effektiva omkörningsfält på 2+1-vägar: trafiksimuleringar av olika utformningsalternativ ur ett framkomlighetsperspektiv (Nr 2013/0400-8.3). Hämtad från Statens väg- och transportforskningsinstitut webbsida: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-148194>
- Bernhardsson, V. & Olstam, J. 2017b. Hastighetsflödessamband för svenska typvägar: Förslag till reviderade samband baserat på trafikmätningar från 2012–2015 (Nr 2016/0249-7.1). Hämtad från Statens väg- och transportforskningsinstitut webbsida: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-148195>
- Bång, K.-L., Olstam, J., Köhler, J., Wahlstedt, J., Andersson, J. 2014. Handbok för kapacitetsanalys med hjälp av simulering. Hämtad från Trafikverket webbsida: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-121212>
- Cambridge Dictionary*. U.å. Open-source. <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/open-source> [Hämtad 2021-05-06]
- Carlsson, A. & Bröde, U. 2003. Utvärdering av mötesfri väg: halvårsrapport 2002:2. Hämtad från Statens väg- och transportforskningsinstitut., VTI notat 45–2003 webbsida: <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-1455>
- Erdmann, J. 2014. *Lane-Changing Model in SUMO*. I: *Proceedings of the SUMO2014 Modeling Mobility with Open Data, 14: Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V., SUMO2014*. Berlin, Tyskland 16 maj, 77-88. ISSN 1866-721X.
- Erdmann, J. 2015. *SUMO's Lane-changing model*. I: *Lecture notes in control and information sciences, 13: Springer Verlag. 2nd SUMO User Conference, 15*. Berlin, Tyskland 16 maj 2014, 105-123. doi: 10.1007/978-3-319-15024-6_7. ISBN 978-331915023-9.
- Gipps, P.G. 1986. A model for the structure of lane-changing decisions. *Transportation Research Part B: Methodological* 20(5): 403–414. [https://doi.org/10.1016/0191-2615\(86\)90012-3](https://doi.org/10.1016/0191-2615(86)90012-3)

- Hidas, P. 2002. Modeling lane Changing and merging in microscopic traffic simulation. *Transportation Research Part C: Emerging* 10(5–6): 351–371.
[https://doi.org/10.1016/S0968-090X\(02\)00026-8](https://doi.org/10.1016/S0968-090X(02)00026-8)
- Hidas, P. 2005. Modelling vehicle interactions in microscopic simulation of merging and weaving. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 13(1): 37–62.
<https://doi.org/10.1016/j.trc.2004.12.003>
- Kaistinen, J., Nieminen, T., Summala, H. 2004. Driving behavior on split 2+1 lane road. *Advances in Transportation Studies - an international Journal* 2: 69–81.
https://www.researchgate.net/publication/267449637_Driving_behavior_on_split_21_lane_road [Hämtad 2021-05-26]
- Krajzewicz, D., Bonert, M., Wagner, P. 2006. The Open Source Traffic Simulation Package SUMO. I: *RoboCup 2006*. German Aerospace Centre, Institute of Transportation Research.
https://www.researchgate.net/publication/224985263_The_open_source_traffic_simulation_package_SUMO [Hämtad 2021-05-26]
- Olstam, J. 2009. Simulation of Surrounding Vehicles in Driving Simulators. PhD Diss, Linköpings universitet: Institute of Technology. Hämtad från
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-17453>
- Olstam, J. 2020. *RuTSim – the Rural Traffic Simulator*.
<https://www.vti.se/forskning/trafikanalys-och-logistik/rutsim---rural-traffic-simulator> [Hämtad 2021-05-19]
- Olstam, J. & Tapani, A. 2010. Enhancements to the Intelligent Driver Model. TRB 89th Annual Meeting Compendium of Papers DVD. Presenterad vid Transportation Research Board 89th Annual Meeting. Hämtad från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:liu:diva-17452>
- Olstam, J. & Tapani, A. 2013. Microscopic traffic simulation modelling of 2+1-roads. Linköping: VTI.
- Romana, M., Martin-Gasulla, M., T. Marenó, A. 2018. 2+1 Highways: Overview and Future Directions. *Advances in Civil Engineering*, vol. 2018, Article ID 2705716, 13 sidor. <https://doi.org/10.1155/2018/2705716>
- Song, J., Wu, Y., Xu, Z., Lin, X. 2015 Research on car-following model based on SUMO. I: *The 7th IEEE/International Conference on Advanced Infocomm Technology*. Fuzhou, Kina 14–16 november 2014, 47–55, doi: 10.1109/ICAIT.2014.7019528.
- SUMO. 2021. *Definition of Vehicles, Vehicle Types, and Routes*.
https://sumo.dlr.de/docs/Definition_of_Vehicles%2C_Vehicle_Types%2C_and_Routes.html [Hämtad 2021-05-06]
- Tapani, A. 2005. A Traffic Simulation Modeling Framework for Rural Highways. Lic. Diss, Linköpings universitet: Institutionen för teknik och naturvetenskap. Hämtad från
<http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:vti:diva-6579>

Trafikverket. 2021. Råd – VGU: Vägars och gators utformning. 2021:003. Hämtad från <http://urn.kb.se/resolve?urn=urn:nbn:se:trafikverket:diva-4466>

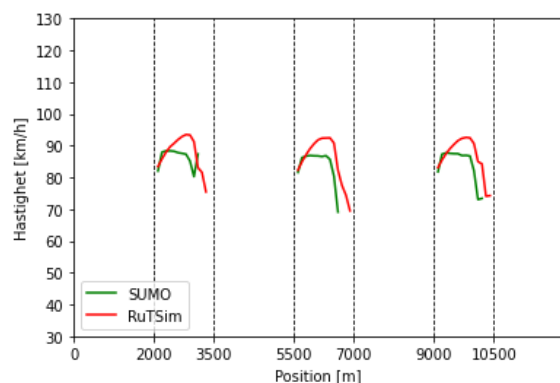
VTI. 2020. *Om VTI*. <https://www.vti.se/om-vti> [Hämtad 2021-05-26]

Författarbidrag

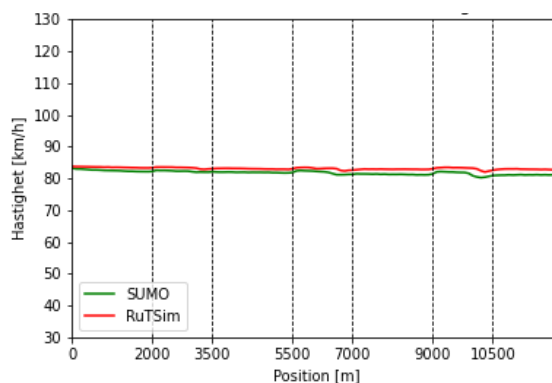
Detta examensarbete har utförts av Ella Calais och Filip Kristofersson. Författarna har delat lika på arbetet och har tillsammans varit delaktiga i alla moment av examensarbetet. Trots att enskilda uppgifter på ett naturligt sätt har fördelats ut under arbetets gång, har båda författarna alltid varit lika uppdaterade om vad den andre har arbetat med. Detta för att dels kunna stötta varandra i arbetet, men också för att båda författarna ska ha lika bra koll på alla delar av arbetet. Alla uppgifter och delar av arbetet har således genomförts i ett nära samarbete med löpande daglig kontakt.

Appendix A – Exkluderade jämförelsemått

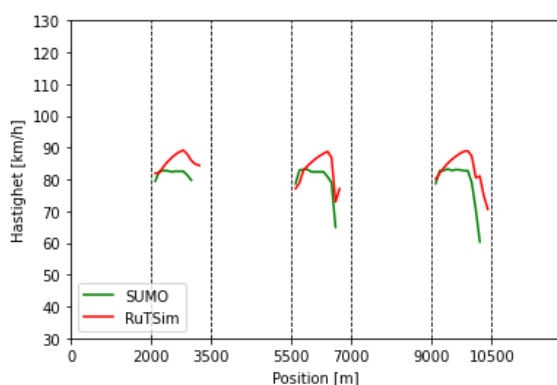
Medelhastigheten för punktmätningar: LBU och LBS basmodell



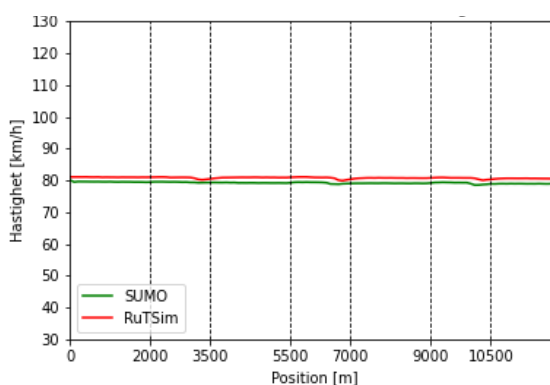
Figur A1. Medelhastighet för SUMO (basmodell) samt RuTSim för LBU i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



Figur A2. Medelhastighet för SUMO (basmodell) samt RuTSim för LBU på enfälssträckan och i det högra körfältet

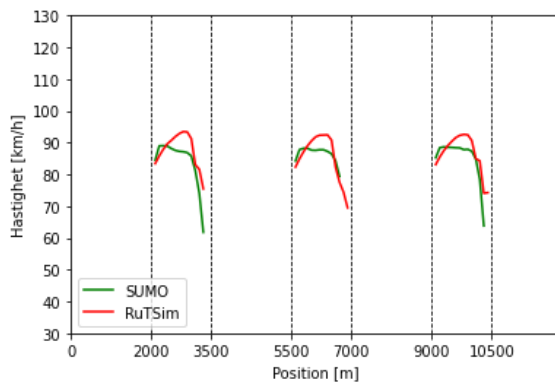


Figur A3. Medelhastighet för SUMO (basmodell) samt RuTSim för LBS i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)

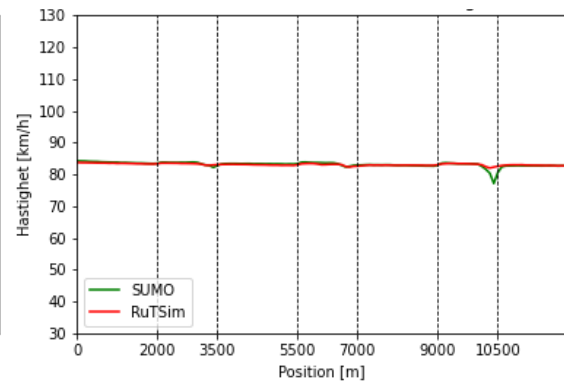


Figur A4. Medelhastighet för SUMO (basmodell) samt RuTSim för LBS på enfälssträckan och i det högra körfältet

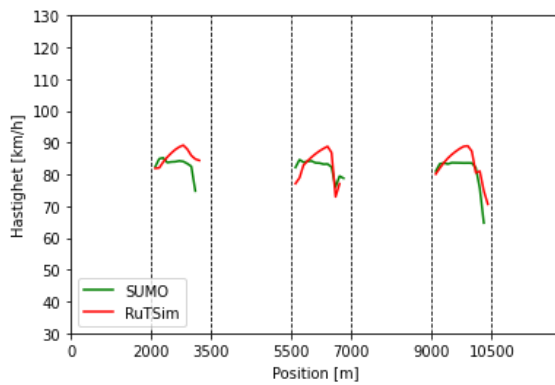
Medelhastigheten för punktmätningar: LBU och LBS parameterjusterad modell



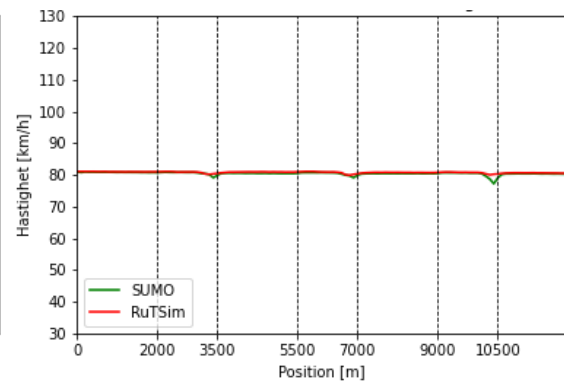
Figur A5. Medelhastighet för SUMO (parameterjustering) samt RuTSim för LBU i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



Figur A6. Medelhastighet för SUMO (parameterjustering) samt RuTSim för LBU på enfältssträckan och i det högra körfältet

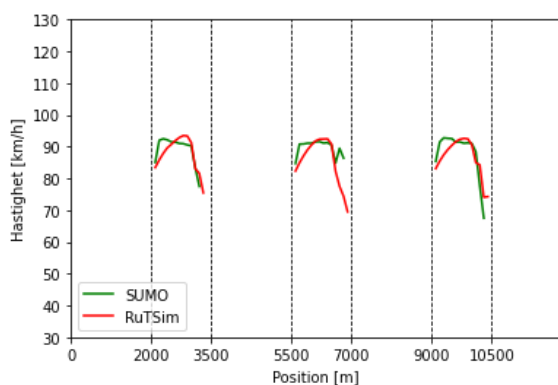


Figur A7. Medelhastighet för SUMO (parameterjustering) samt RuTSim för LBS i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)

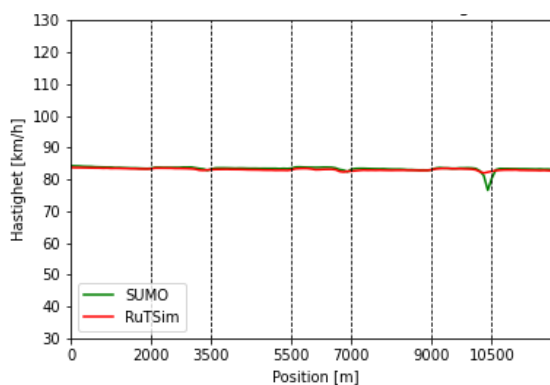


Figur A8. Medelhastighet för SUMO (parameterjustering) samt RuTSim för LBS på enfältssträckan och i det högra körfältet

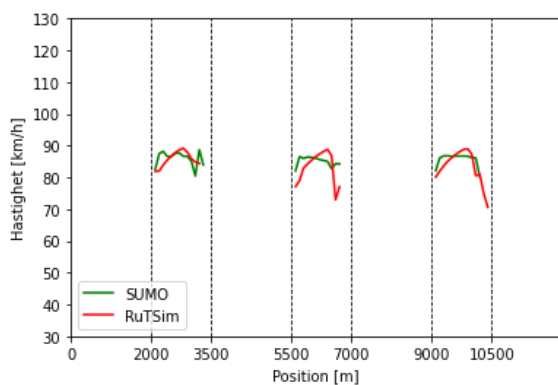
Medelhastigheten för punktmätningar: LBU och LBS modifierad modell



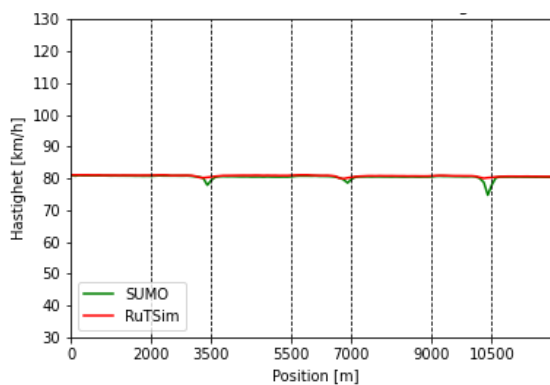
Figur A9. Medelhastighet för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim för LBU i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



Figur A10. Medelhastighet för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim för LBU på enfältssträckan och i det högra körfältet

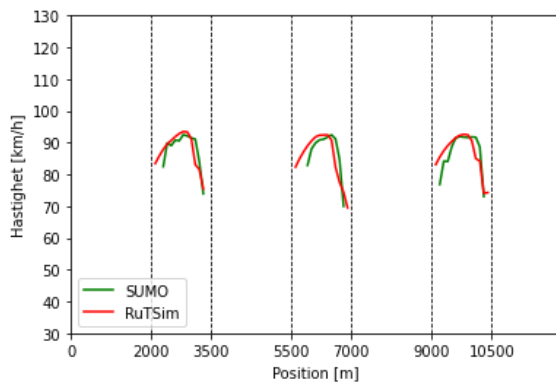


Figur A11. Medelhastighet för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim för LBS i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)

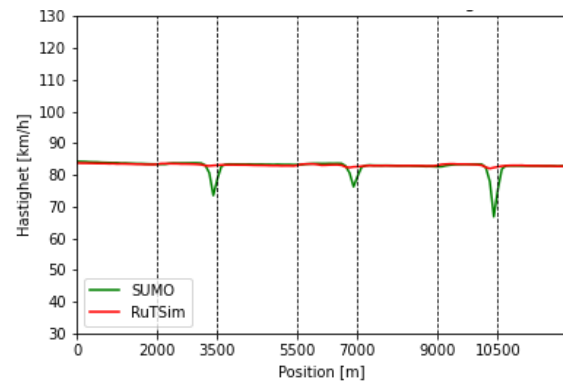


Figur A12. Medelhastighet för SUMO (föregående parametrar) samt RuTSim för LBS på enfältssträckan och i det högra körfältet

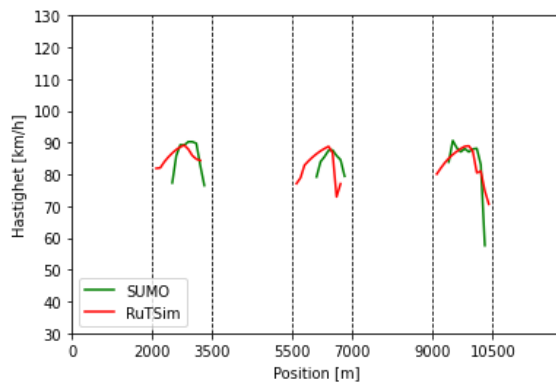
Medelhastigheten för punktmätningar: LBU och LBS nya parametrar modifierad modell



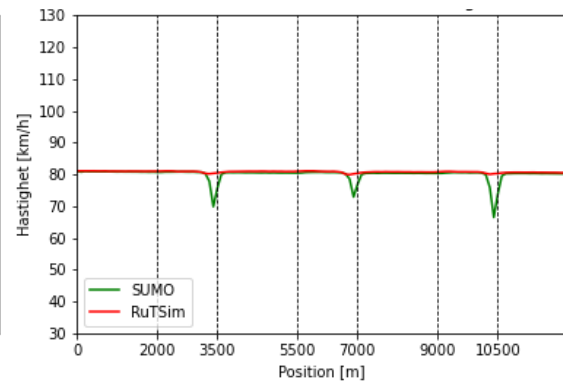
Figur A13. Medelhastighet för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim för LBU i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



Figur A14. Medelhastighet för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim för LBU på enfältssträckan och i det högra körfältet

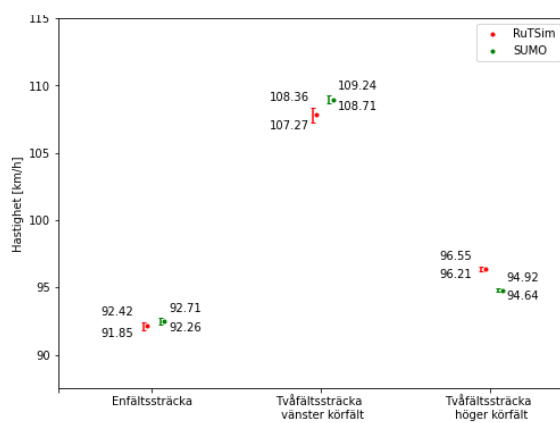


Figur A15. Medelhastighet för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim för LBS i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)

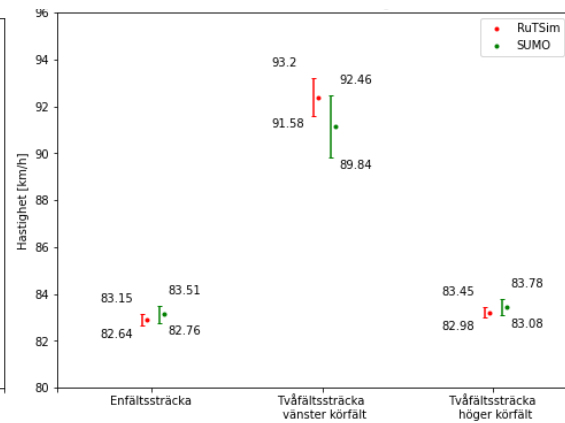


Figur A16. Medelhastighet för SUMO (nya parametrar) samt RuTSim för LBS på enfältssträckan och i det högra körfältet

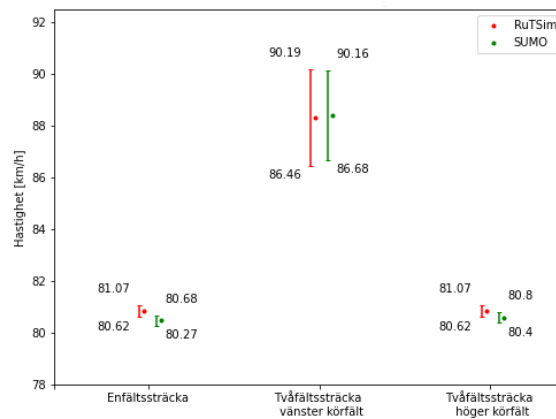
Konfidensintervall över medelhastigheten: nya parametrar modifierad modell



Figur A17. Konfidensintervall för medelhastigheten SUMO (nya parametrar modifierad modell) samt RuTSim för PB



Figur A18. Konfidensintervall för medelhastigheten SUMO (nya parametrar modifierad modell) samt RuTSim för LBU

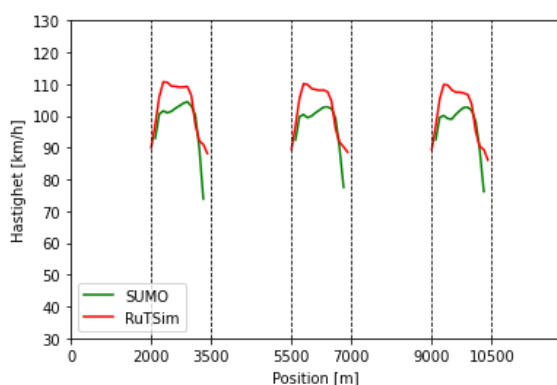


Figur A19. Konfidensintervall för medelhastigheten SUMO (nya parametrar modifierad modell) samt RuTSim för LBS

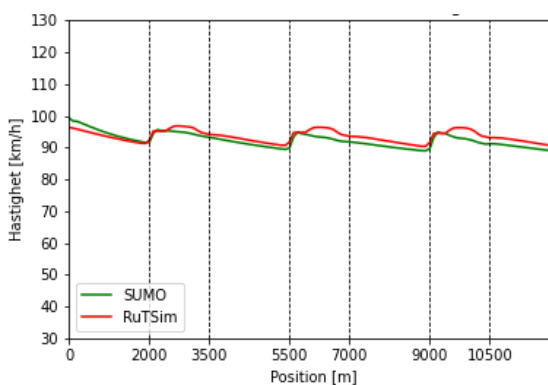
Slutgiltiga parametervärden som exkluderas från avsnitt 7.2.1

Tabell A1. Den exkluderade uppsättningen av en av de slutgiltiga parametervärden med bra överensstämmelse mot RuTSim från avsnitt 7.2.1

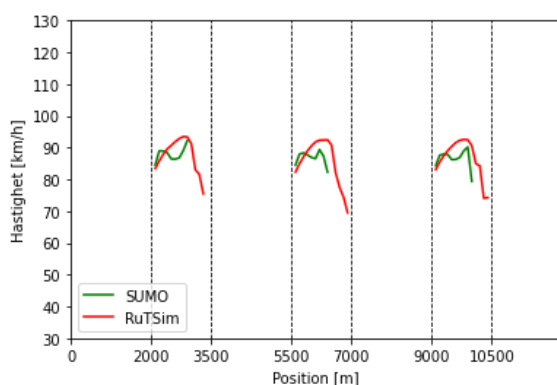
Parameter	Problem att lösa	Justering	Effekt
<i>lcStrategic</i>	Köbildning och minskad framkomlighet, framförallt i slutet av sista omkörningsfältet	Ökar värdet från 1.0 till 3.0	Färre omkörningar och färre misslyckade omkörningar
<i>lcLookaheadLeft</i>	Köbildning och minskad framkomlighet, framförallt i slutet av sista omkörningsfältet	Minskar värdet från 2.0 till 0.6	Fler omkörningar, speciellt tidigt på körfältet. Fordon är inte lika måna om att ligga i höger körfält
<i>sigma</i>	Fordonen kör i genomsnitt lägre än sin önskade hastighet	Minskar värdet från 0.5 till 0	Medelhastigheten för alla fordonstyper ökar



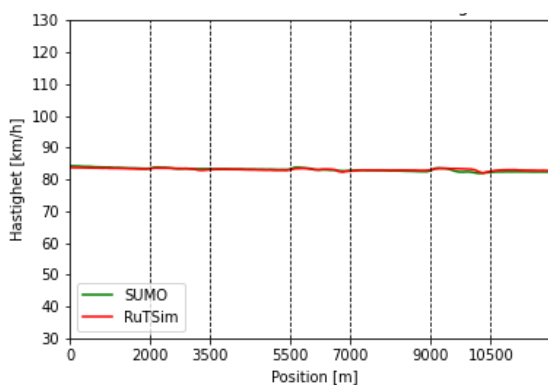
Figur A20. Medelhastighet för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för PB i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



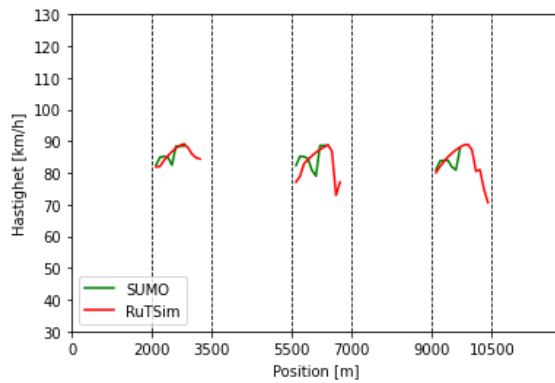
Figur A21. Medelhastighet för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för PB på enfältssträckan och i det högra körfältet



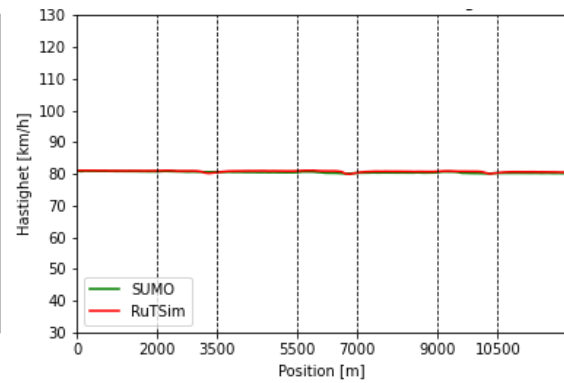
Figur A22. Medelhastighet för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för LBU i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



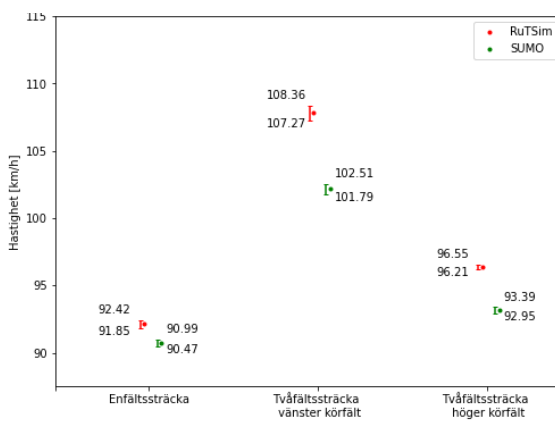
Figur A23. Medelhastighet för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för LBU på enfältssträckan och i det högra körfältet



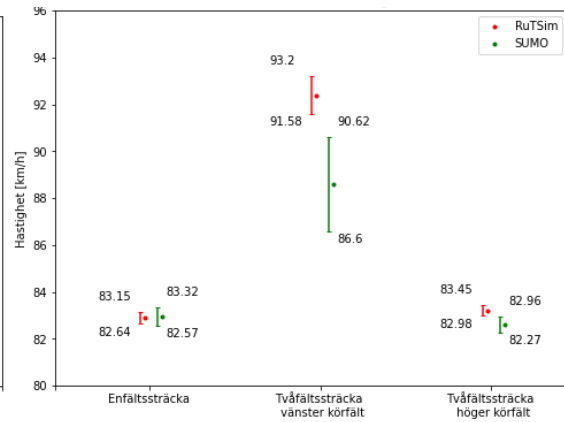
Figur A24. Medelhastighet för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för LBS i det vänstra körfältet (omkörningsfältet)



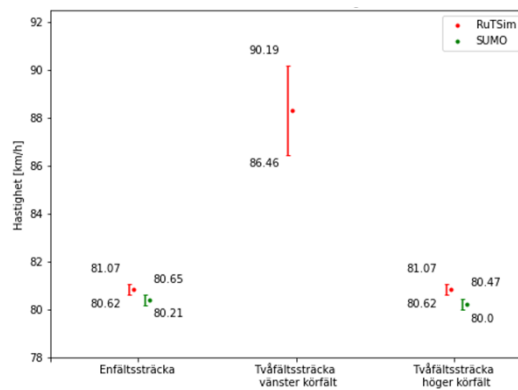
Figur A25. Medelhastighet för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för LBS på enfältssträckan och i det högra körfältet



Figur A26. Konfidensintervall för medelhastigheten SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för PB



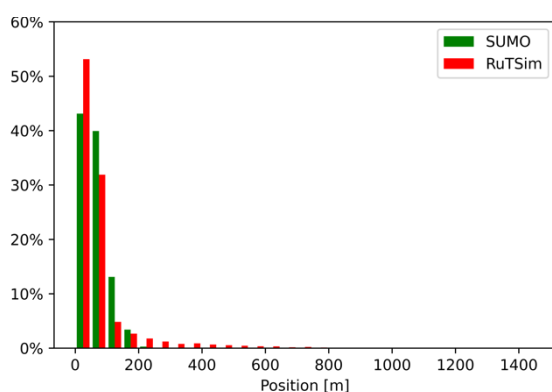
Figur A27. Konfidensintervall för medelhastigheten SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för LBU



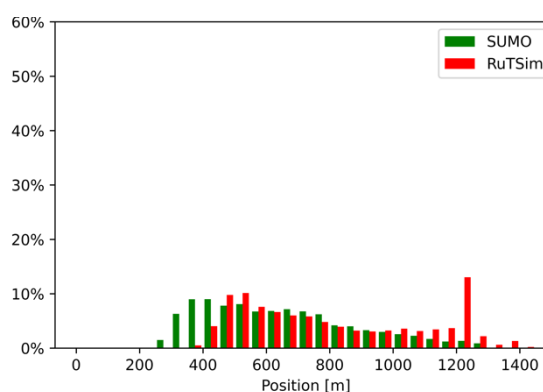
Figur A28. Konfidensintervall för medelhastigheten SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim för LBS

*Tabell A2. Omkörningsstatistik för den parameterjusterade modellen i SUMO
samt modellen i RuTSim*

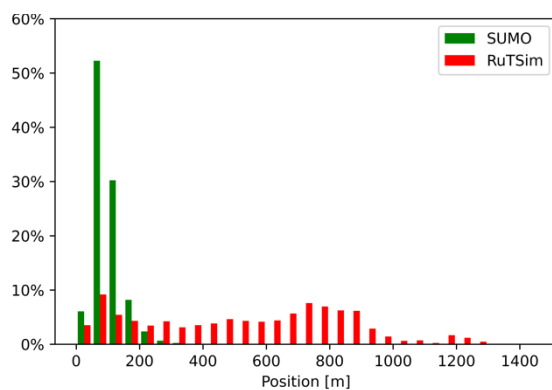
	SUMO parameterjusterad modell	RuTSim
Antal omkörda fordon	322	349
Antal fordon som genomför och lyckas med en omkörning	235	292
Misslyckade omkörningar	61	63



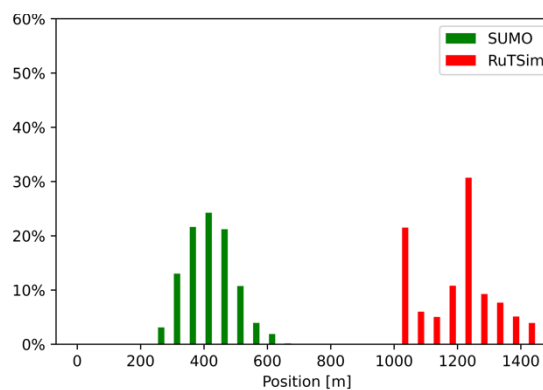
Figur A29. Startposition körfältsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim



Figur A30. Slutposition körfältsbyte – lyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim



Figur A31. Startposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim



Figur A32. Slutposition körfältsbyte – misslyckade omkörningar för SUMO (parameterjusterad modell) samt RuTSim

Appendix B – Parameterjustering

Loggbok över parameterjusteringen i avsnitt 7

Tabell B1. Loggbok parameterjustering över genomförd parametertestning

SUMOPARAMETRAR FÖR JUSTERING AV BASMODELL													
Intervall	LC-modell: LC2013									CF-modell: Krauss		CF-modell: IDM	
	lcAssertive	lcSpeedGain	lcCooperative	lcCooperativeSpeed	lcSpeedGainRight	lcStrategic	lcLookaheadLeft	lcKeepRight	lcSpeedGainLookahead	sigma	emergencyDecel	emergencyDecel	delta
	pos. reella tal	[0, ∞[	[0, 1]	[0, 1]	]0, ∞[	[0, ∞[	[0, ∞[	[0, ∞[	[0, ∞[	[0, 1]	>=0	>=0	-
Defaultvärde	1	1	1	1	0.1	1	2	1	0	0.5	>=decel>=1.4	>=decel>=1.4	4
Testade värden en parameter													
	0.2, 0.5, 0.7, 1.2, 1.4, 1.5	0.2, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 5, 10	0, 0.5, 0.8, 1	0, 0.5, 0.8, 1	0.5, 1, 5, 10	0.3, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 1.4, 3	0.5, 1, 1.5, 2.5, 3	0.1, 0.2, 0.5, 10, 50	0.5, 1, 5, 10	0, 1	2, 3, 5, 10	2, 3, 5, 10	4
Testade värden i kombination om två parametrar													
Simulering #1								5	10	0			
Simulering #2	0.5							10		0			
Simulering #3							1	10		0			
Simulering #4								10	5	0			
Simulering #5		0.5					0.2			0			
Simulering #6						2	0.5			0			
Simulering #7						3	0.6			0			
Simulering #8		2					1			0			
Simulering #9							1.5		5	0			
Simulering #10		0.5					1			0			
Simulering #11		0.5				0.5				0			
Simulering #12	1.5	5								0			
Simulering #13		5						0.5		0			
Simulering #14		5						5		0			
Simulering #15		5				0.5				0			
Simulering #16		15					3			0			
Simulering #17		20				2.5				0			
Simulering #18						0.2			10	0			
Simulering #19						0.5		0.5		0			
Simulering #20						0.5		5		0			
Simulering #21						0.5	1.5			0			
Simulering #22						0.5	2.5			0			
Simulering #23						0.6		2		0			
Simulering #24	1.5								10	0			
Testade värden i kombination om tre parametrar													
Simulering #1	1.5					0.5			10	0			
Simulering #2		2				0.8		50		0			
Simulering #3						0.8		50	10	0			
Simulering #4	0.5					3	0.5			0			
Simulering #5	1.5					3			10	0			
Simulering #6						3		50		0			
Simulering #7						0.5		10		0			
Simulering #8		0.5					1.5	2		0			
Simulering #9		2					1.5	2		0			
Simulering #10		0.5					1.5		5	0			
Simulering #11	1.5					0.2			10	0			

Appendix C – Källkodsmodifiering

På SUMO:s hemsida finns det instruktioner för hur den öppna källkoden på bästa sätt laddas ner och vilket program som den bäst modifieras i. Källkoden är skriven i programmeringsspråket C++ och modifierades i programmet *Visual Studio Code*. När kodförändringen är genomförd kompileras källkodsfilerna och programvaran kan användas på precis samma sätt som under avsnitt 6 och kapitel 7.

Nedan följer en kortfattad beskrivning av hur källkodsmodifieringen specifikt genomfördes:

- Ändrar fordonens önskade hastighet när de byter till vänster körfält. Denna förändring läggs till i `MSLaneChanger.cpp` under funktionen `startChange`, se kod i figur C1.
- Hastighetsökning: 8 km/h för PB, 3 km/h för LBU och 3 km/h LBS – detta ses i den första if-satsen
- Uppdaterade `speedFactor` utifrån hastighetsökning och hastighetsbegränsning – detta ses i den andra if-satsen
 - `speedFactor` ändras till x med hjälp av funktionen `setChosenSpeedFactor(x)`
 - Alla fordonen får en absolut ökning av dess önskade hastighet utifrån dess fordonstyp
 - `speedFactor` är fordonets önskade hastighet relativt hastighetsbegränsningen

```
if (vehicle->getVehicleType().getID() == "pb") {
    double speedChange = 8 / 3.6;
} else if ((vehicle->getVehicleType().getID() == "lbu") ||
           (vehicle->getVehicleType().getID() == "lbs")) {
    double speedChange = 3 / 3.6;
}

const char *lcBegin = "0";
const char *lcEnd = "1";

if (vehicle->getLane()->getID().back() == *lcBegin) {
    double laneSpeedLimit = vehicle->getLane()->getSpeedLimit();
    double oldMaxSpeed = laneSpeedLimit * vehicle->getChosenSpeedFactor();
    double newMaxSpeed = oldMaxSpeed + speedChange;
    vehicle->setChosenSpeedFactor(newMaxSpeed / laneSpeedLimit);
} else if (vehicle->getLane()->getID().back() == *lcEnd) {
    double laneSpeedLimit = vehicle->getLane()->getSpeedLimit();
    double oldMaxSpeed = laneSpeedLimit * vehicle->getChosenSpeedFactor();
    double newMaxSpeed = oldMaxSpeed - speedChange;
    vehicle->setChosenSpeedFactor(newMaxSpeed / laneSpeedLimit);
}
```

Figur C1. Implementerad kod för källkodsmodifieringen

Appendix D – Utdata

Utdata från simulering #1 av SUMO:s basmodell för PB

Den tabelldata som ses i figuren nedan är efter den har bearbetats en första gång efter rådatan genererats av simuleringen. Det är totalt sex stycken attribut som står för; tidssteg (*time*), fordons-ID (*vehID*), körfälts-ID (*vehLane*), hastighet (*speed*), fordonstyp (*vehType*) och distans från position 0 där vägnätet startar (*distance*). Tabellen har storlek 185347×6 och är endast för fordonstyp PB. Totalt 20 stycken tabeller av samma struktur med olika antal rader hanterades vid varje simuleringsomgång. För varje fordonstyp blir det totalt 60 stycken tabeller.

	time	vehID	vehLane	speed	vehType	distance
112728	1800.0	153.0	1kf4_0	24.17	pb	12571.23
112729	1800.0	154.0	1kf4_0	25.60	pb	12409.14
112730	1800.0	155.0	1kf4_0	27.85	pb	11934.86
112731	1800.0	156.0	1kf4_0	26.50	pb	11470.42
112732	1800.0	157.0	1kf4_0	27.53	pb	11878.54
...	...	...	...	...	...	...
387184	5400.0	618.0	1kf1_0	25.66	pb	867.91
387185	5400.0	619.0	1kf1_0	25.81	pb	734.21
387186	5400.0	620.0	1kf1_0	28.08	pb	634.27
387187	5400.0	621.0	1kf1_0	25.94	pb	529.50
387188	5400.0	622.0	1kf1_0	24.59	pb	4.70

Figur D1. Utdata från SUMO-simulering #1 för PB

Utdata från simulering #1 av RuTSim-modellen för PB

Den tabelldata som ses i figuren nedan är efter den har bearbetats en första gång efter rådatan genererats av simuleringen. Det är totalt 5 stycken attribut som står för; tidssteg (*time*), fordons-ID (*id*), distans från position 0 (*s*), körfältstyp där -2 är höger körfält och -1 är vänster körfält (*lid*) samt hastighet (*v*). Fordonets fordonstyp finns inte med som ett attribut, men just denna tabell är för PB. Liksom tabelldata för SUMO delas även RuTSim-data upp i fordonstyper. Tabellen har storlek 174974×5 . Totalt 20 stycken tabeller av samma struktur med olika antal rader hanterades vid varje simuleringsomgång, vilket även här ger totalt 60 stycken tabeller att analysera.

	time	id	s	lid	v
3	1800.0	144	11968.10	-2	26.529
4	1800.0	145	11909.71	-2	26.511
5	1800.0	146	12295.96	-2	29.649
6	1800.0	147	11851.69	-2	26.486
7	1800.0	148	11400.13	-2	25.623
...	...	...	...	...	...
205303	5400.0	654	3265.90	-2	28.489
205304	5400.0	655	3146.10	-2	25.343
205305	5400.0	656	3220.49	-1	28.918
205306	5400.0	657	3102.32	-1	25.709
205307	5400.0	658	3046.74	-1	25.935

Figur D2. Utdata från RuTSim-simulering #1 för PB